
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİNDE İLERİ ARAŞTIRMALAR

Editör: Doç.Dr. İlknur BEKEM KARA

İnşaat Mühendisliğinde İleri Araştırmalar

Editör

Doç. Dr. İlknur BEKEM KARA

yaz
yayınları

2024

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİNDE İLERİ ARAŞTIRMALAR

Editör: Doç. Dr. İlknur BEKEM KARA

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-6171-58-9

Aralık 2024 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

info@yazyayinlari.com

İÇİNDEKİLER

Reaktif Pudra Betonlarının Gelişimi ve Kullanım

Alanları Üzerine Bir Derleme 1

İbrahim PINARCI

Sürdürülebilir Yeni Nesil Betonlardan Kendiliğinden

Yerleşen Beton Üzerine Bir Değerlendirme..... 13

İbrahim PINARCI

Effect of Using Stone Dust Instead Of Sand On The

Properties Of Concrete 29

Ahmet GÖKDEMİR, Fatih KARAÇOR

Atıksu Sistemleri ve Hidrolik Hesaplamaları..... 57

Esin ACAR

Effects of Stiffener Length on Beam-To-Column

Connections In Steel Structures..... 73

*Diego Andree VEGA SAMUDIO, Mehmet Fethi ERTENLİ,
Mehmet Haşim KISA*

Efficient Energy Use In The Production Of Pozzolanic

Additive Cement..... 96

*Furkan TÜRK, Ahmet YİĞİT, Murat SAYDAN, Ülkü Sultan
KESKİN*

İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Betonda Kullanımı Üzerine Bir İnceleme: Türkiye Örneği.....	113
<i>Rukiye KOÇKAR TUĞLA</i>	
Türkiye Yapı Denetim Sistemini Geliştirme ve İyileştirme Çalışmaları: Yapı Denetim Programı Özelinde Bir İrdeleme	130
<i>Rukiye KOÇKAR TUĞLA</i>	
Beton Üretiminde Tarımsal Atık Küllerin Kullanımı	149
<i>İlknur BEKEM KARA</i>	
Yapı Yıkımı.....	177
<i>Sevil AY</i>	
Dönüşen Şehirler ile Yükselen Asbest Riskleri.....	197
<i>Yavuz Selim HATİPOĞLU</i>	
Geopolimerin İnşaat Sektöründeki Yeri ve Geleceği.....	227
<i>Serdar KORKMAZ, Gökhan EKİNCİOĞLU</i>	
Autodesk Vehicle Tracking ile Otopark Analizi: Kampüs Örneği	244
<i>Özlem BATTAL ŞAL, Alican ERGİN</i>	
Pasif Enerji Sönümleme Sistemleri	261
<i>Gülhan İNCE, Hüseyin Hakan İNCE</i>	
Gözenekli Malzemelerin Isıl İletkenlik Performansı Üzerine Bir İnceleme.....	286
<i>Elif Tuğçe KOCABEYOĞLU, Fuat KÖKSAL</i>	

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

REAKTİF PUDRA BETONLARININ GELİŞİMİ ve KULLANIM ALANLARI ÜZERİNE BİR DERLEME

İbrahim PINARCI¹

1. GİRİŞ

Günümüzde dünya çapında beton üretim prosesinde ciddi boyutta gelişmeler görülmektedir. Farklı malzemelerle kompozit yapıda üretim teknikleri sayesinde beton, üretimde ve kullanımda çok daha iyi noktalara gelen bir yapı malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Beton üretiminin ilk yıllarında başlayan yüksek dayanım algısı zaman içerisinde beklentilerinde etkisiyle değişime uğramış ve günümüzde 200 MPa' ında üzerinde sonuçlar elde edilebilir hale gelmiştir (Karabulut A. Ş., 2006).

Reaktif Pudra Betonları (RPB), zaman içinde 20 ila 60 MPa arasında dayanıma sahip olan konvansiyonel betonların basınç dayanım değerlerinin üzerine 60–115 MPa gibi önemli bir oranda ulaşmış, akabinde günümüzdeki hali ile 200 MPa değerinin de üzerine çıkarak önemini arttırmıştır (Taşdemir M. A. vd., 2002).

RPB 'ları yüksek dayanımlı betonlara kıyasen daha fazla basınç ve eğilme dayanımı değerleri göstermelerinin yanısıra boşluk oranı, porozite, geçirimsizlik gibi durabilite değerleri bakımından da üstün olduğu yapılan çalışmalardan bilinmektedir. Bu özellikleri ile daha küçük kesit alanında daha

¹ Öğr. Gör. Dr., Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Pazaryeri Meslek Yüksekokulu, Endüstri Ürünleri Tasarımı Programı, ibrahim.pinarci@bilecik.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9318-4325.

fazla dayanım gösterme potansiyeli sebebiyle deprem sonrası güçlendirme çalışmalarında kullanımı artmaktadır.

RPB üretiminde çelik lif, akışkanlaştırıcı, mineral katkıları gibi malzemeler kullanılmaktadır. Bu sebepten üretimin her aşamasında ciddi bir kalite kontrole ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısı ile üretimin verimli olması için yerinde üretimden ziyade özel olarak oluşturulmuş tesislerde kontrollü bir şekilde yapılması tercih edilmelidir (Karabulut A. Ş., 2006).

2. REAKTİF PUDRA BETONU

Günümüzde, betondan daha yüksek dayanım değerleri elde edebilmek için birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalar içinde dikkat çekenlerden biri reaktif pudra betonudur (RPB). RPB standart küp numune basınç dayanımı 200-800 MPa ve çekme dayanımı 25-150 MPa aralığında olan, kırılma enerjileri yaklaşık 30000 J/m^2 ve birim ağırlığı $2500\text{-}3000 \text{ kg/m}^3$ aralığında görülen ultra yüksek performanslı bir beton türüdür. Bu yeni nesil betondan darbelere, depremle oluşan gerilmelere karşı konvensiyonel beton türlerine kıyasla hatırı sayılır derecede iyi sonuçlar alınabilmektedir. İç yapısında kullanılan malzemelerin özelliğinden dolayı daha sıkı bir yapı elde edilmesinin yanında hidratasyonu daha üst düzeyde sağlayabilecek bir oluşum meydana gelmektedir (Topçu İ.B. vd., 2021).

Genel olarak değerlendirecek olursak RPB, liflerle güçlendirilen, su çimento oranının olabildiğince düşürüldüğü, bağlayıcı ve silis dumanı karışımının süper akışkanlaştırıcı ile birlikte güçlendirildiği ayrıca ince öğütülmüş kuvarz karışımı ile imal edilen ultra yüksek dayanımlı kompozit bir yapı malzemesidir, şeklinde tanımlanabilir. Bu karışımda kullanılan ince agregaların amacı boşluk oranını düşürerek betonun dayanım değerlerini yükseltmektir. Boşluk oranının düşürülmesine bağlı olarak dayanım değerlerinin yükseltilmesi

ve dayanıklılık değerlerinin daha iyi hale getirilmesi de sağlanmaktadır. Böylece betonun dış etkilere direnci artmaktadır. Bunun yanında betondan beklenen homojen dağılım da büyük oranda sağlanmaktadır (Dallaire, 1998)

Normal dayanımlı betona kıyasla reaktif pudra betonunda, S/Ç oranı düşük tutulmakta, iri agrega taneleri karışımdan çıkarılmakta, karbon silisyum oranı silis içeriği yüksek atık malzemelerle desteklenmesi ile düşürülmekte, çelik lifler dahil edilerek olabildiğince homojen bir dağılım sağlanmakta ve çok daha yüksek dayanımlı kompozit bir beton elde edilebilmektedir (Yerlikaya, 2005).

2.1. Reaktif Pudra Betonunun Üretim Amaçları ve Sağladığı Avantajlar

- Reaktif pudra betonu oldukça yüksek basınç, çekme, kesme mukavemetine sahiptir. Bu özelliği ile neredeyse çelik kadar güçlü bir yapısı vardır. Kazanmış olduğu bu dayanım özellikleri ile ince plak veya kabuk şeklinde ve hassas prefabrik elemanların üretiminde kullanımına izin verir.
- Yapısında bulunan çelik lifler kullanılan malzemenin inceliği sayesinde çok iyi tutunma ve aderans sağlar. Böylece yüksek oranda süneklik ve enerji yutma özelliği kazanır. Bu özelliği sayesinde deprem etkilerinde zararı en aza indirebilmekte kullanılabilir.
- Elde edilen kompozit malzeme 0.2 gibi çok düşük Su / Çimento oranına ve boşluk oranına sahip olduğu için su ve zararlı iyonların girişi büyük oranda engellenerek donma çözülme gibi yapı problemlerine çözüm getirir ve böylece betonun durabilitesini arttırmaktadır. Bu özellikleri ile geçirim oldukça düştüğü için nükleer atıkların depolandığı tesislerde kullanımı uygun olacaktır.

- Sünek davranış geliştirilmesinde lif takviyesinin desteğiyle ana donatının dışında kullanılan donatıların daha az kullanımına kapı açabilmektedir (Dabestani F., 2014) ;(Richard P. vd., 1995).

2.2. Reaktif Pudra Beton Dezavantajları

Reaktif pudra betonlarında çok düşük S/Ç oranı kullanıldığı için çimento dozu oldukça fazla olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durumun amacı ultra yüksek dayanım elde edebilmektir. Ancak çimentonun bu doz miktarı hidrasyon ısısı değerlerini olumsuz etkiler. Hidrasyon ısısının dengelenmesi probleminin beton tasarımında kullanılan mineral katkıları sayesinde büyük oranda önüne geçilse de bu durum rötreye sebep olabilir. Bunun yanında maliyeti yüksek olan bu beton, dayanım kriterleri yeterli olan yerlerde normal dayanımlı betonun yerini alabilmesi zor görünmektedir (“<https://insapedia.com/reaktif-pudra-beton-en-yuksek-dayanimli-beton/>”, 2024).

3. REAKTİF PUDRA BETONUNUN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Reaktif pudra betonlarında kullanılan malzemelerin mikro yapısına bağlı olarak C-S-H jel yapısı oldukça güçlenmekte ve dolayısı ile bu kompozit yapının dayanım değerleri de maksimum seviyeye ulaşmaktadır. Öğleki bu beton donatı olmaksızın yapılarda kullanılabilir bir güce erişmektedir. Kırılma enerjisi bakımından ise normal harçlara göre 240 kat daha fazla bir enerjiye karşı dayanım sağladığı görülmektedir. Bu özelliği ile deprem kuvvetlerinin sönmülendirilmesinde ve sünekliğin artırılmasında oldukça etkili olabileceğini ortaya koymaktadır. Normal dayanımlı, yüksek dayanımlı ve reaktif pudra betonu mukayesesinin yapıldığı Çizelge 1 aşağıda sunulmuştur (Matte V., 1999; Taşdemir M. A., 2004; Topçu İ. B. vd., 2018).

Çizelge 1. Normal dayanımlı, yüksek dayanımlı ve reaktif pudra betonu mukayesesi

Mekanik Özellikler	Basınç Dayanımı, MPa	Eğilme Dayanımı, MPa	Kırılma Enerjisi, J/m²	Elastisite Modülü, GPa
Normal Dayanımlı Beton	20 - 60	4 - 8	100 - 120	20 - 30
Yüksek Dayanımlı Beton	60 - 115	6 - 10	100 - 130	35 - 40
Reaktif Pudra Betonu	200 - 800	50140	10000 - 40000	60 - 75

Kaynak: Topçu İ. B. vd., 2018.

Reaktif pudra betonları dayanım ve dayanıklılık noktasında çelik ile kıyaslanabilecek yapıdadır. Bu özelliği ile kesme kuvvetlerine karşı direnci ve atıl yüklerin azaltılması, böylece daha büyük boyutlarda elemanlar üretilmesine olanak verir. Elde edilen daha elastik ve hafif yapı sayesinde atalet yüklerini ve kesitleri düşürerek yüksek elastikiyet kazandırır. Bu durum deprem anında daha fazla deprem enerjisini sönümleyerek yapıya avantaj kazandırmasını sağlar. Bunlara ilaveten düşük boşluk oranı sayesinde nükleer malzeme saklama ve depolama alanlarında kullanıma oldukça uygundur (Topçu İ. B. vd., 2018). Yüksek dayanımlı betonlarla reaktif pudra betonunu kıyasladığımızda görülen bazı üstün özellikler Çizelge 2 de verilmiştir (Matte V., 1999).

Çizelge 2. NDB ile RPB bazı özelliklerinin kıyası

Su Emmesi	7 kat küçük
Klorür İyonu Difüzyonu	25 kat küçük
Korozyon Hızı	8 kat küçük
Aşınma Kapasitesi	2.5 kat küçük

Kaynak: Topçu İ. B. vd., 2018.

4. REAKTİF PUDRA BETONU UYGULAMA ALANLARI

Reaktif pudra betonunun uygulama alanlarını genel olarak sıralayacak olursak

- Yapı dayanıklılığı açısından çelikle denk sayılabilecek sonuçlar vermesinden dolayı hassas prefabrike elemanların imalatında kullanımı uygundur.
- Çok yüksek basınç, kesme ve çekme dayanımı gerektiren yapıların inşasında kullanılır.
- Plak türünde veya çok ince imalat yapılması gereken yerlerde tercih edilir.
- Deprem bölgelerinde yapıların performansını arttırabilmek için yüksek süneklik ve enerjiyi yutabilme gibi özelliklerin geliştirilmesi üzerine tasarımlar yapılır. Reaktif pudra betonu çelik lifler ile çok iyi aderans sağladığı için bu tür yerlerde özellikle tercih edilir. Ayrıca bu lif takviyesi ikincil donatı kullanımını azaltmaya yardımcı olur.
- Bu kompozit betonun imalatında çok düşük S/Ç ($\approx 0,20$) oranı ve az boşluk miktarı bulunduğu için elemana zarar verebilecek dış kimyasalların girişi sınırlandırır. Böylece donma çözülme gibi durumların olumsuz etkilerini azaltır. Dolayısı ile uzun yıllar yapı hizmet vermeye devam eder (["https://cimsa.com.tr/formulhane/gri-cimento/reaktif-pudra-betonu-nedir/"](https://cimsa.com.tr/formulhane/gri-cimento/reaktif-pudra-betonu-nedir/), 2024a).

4.1. Reaktif Pudra Beton Uygulama Örnekleri

Ülkemizde şehir içi su giderlerinin tasarımında Taksim-Elmadağ'da reaktif pudra betonu ile hem çelik kapakların çalınma sorununa çözüm bulabilmek hem de taşıt yüklerini taşıyabilecek rögar kapak elemanları imal edilmiştir (Taşdemir, 2005).



Şekil 1. RPB ile geliştirilmiş rögar kapakları
(“<https://cimsa.com.tr/formulhane/gri-cimento/reaktif-pudra-betonu-nedir/>”, 2024b)

Şekil 2'deki yapı Kanada'daki Sherbrooke yaya köprüsüdür. Bu köprü RPB 200'den yapılmış ve 60 m. açıklık geçilmiştir. Köprüde aynı zamanda çelik kafes sistemlerde kullanılmıştır (“<https://cimsa.com.tr/formulhane/gri-cimento/reaktif-pudra-betonu-nedir/>”, 2024b).



Şekil 2. Kanada Sherbrooke yaya köprüsü
(“<https://cimsa.com.tr/formulhane/gri-cimento/reaktif-pudra-betonu-nedir/>”, 2024b)

Bu yaya köprüsü Fransa'daki Pont du Diable'dır. Tek açıklıklı 70 m uzunluğunda ve 1.8 m genişliğindedir (“<https://cimsa.com.tr/formulhane/gri-cimento/reaktif-pudra-betonu-nedir/>”, 2024b).



Şekil 3. Fransa Pont du Diable yaya köprüsü
(“<https://cimsa.com.tr/formulhane/gri-cimento/reaktif-pudra-betonu-nedir/>”, 2024b)



Şekil 4. Seonyu yaya köprüsü, Güney Kore
(“<https://www.betonvecimento.com/beton-2/ultra-yuksek-performansli-beton/>”, 2024)



Şekil 5. Sakata-Mirai Yaya Köprüsü Japonya
(“<https://insapedia.com/reaktif-pudra-beton-en-yuksek-dayanimli-beton/>”, 2024)

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

- Reaktif pudra betonları, geleneksel betonun üzerine geliştirilmiş olan yüksek dayanımlı betonun da dayanım değerlerinin üzerine çıkmayı başarmış yeni tür çimento içerikli kompozit bir malzemedir.
- Hafif malzeme üretiminin gerektiği ancak dayanımın da çok yüksek olmasının istendiği elemanlarda kullanımı uygundur.
- Reaktif pudra betonları konvansiyonel betonlara kıyaslandığında çok daha pahalıya mal olmaktadır.
- Reaktif pudra betonu ile üretilen elemanların, düşük boşluk oranı sebebiyle, sıvı gaz ve radyoaktif madde geçirimsizliği hemen hemen hiç yoktur. Dolayısıyla bu tür geçirimsizliğin kısıtlanması gereken alanlarda kullanımı uygun olacaktır.
- Yapısında kullanılan çelik lifler ile sünek bir davranış göstermektedir.

- Reaktif pudra betonlarının içeriğinde çimento oranı yüksektir. Bu özelliği ile çevreci bir yapıya sahip değildir. Bu noktada geliştirme çalışmaları yapılmalıdır.
- Reaktif pudra betonları tüm sayılan üstün özelliklerine rağmen ülkemizde maliyetinin yüksekliği sebebiyle pek fazla kullanım alanı bulamamaktadır.

6. KAYNAKLAR

- Beton ve Çimento (2024) Ultra Yüksek Performanslı Beton, Erişim Adresi: <https://www.betonvecimento.com/beton-2/ultra-yuksek-performansli-beton>. Erişim Tarihi: 31.10.2024
- Çimsa (2024) Reaktif Pudra Beton Nedir?, Erişim Adresi: <https://cimsa.com.tr/formulhane/gri-cimento/reaktif-pudra-betonu-nedir/>. Erişim Tarihi: 31.10.2024
- Dabestani F. (2014). Reaktif Pudra Betonlarında Çatlak Oluşumunun Kalıcılığa Etkisinin Araştırılması. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Dallaire, E. , Aitcin. P. C. (1998). Reactive Powder Concrete in Use, ASCE Journal of Civil Engineering, 68(1): 4-48.
- İnsapedia (2024) Reaktif Pudra Beton - En Yüksek Dayanımlı Beton., Erişim Adresi: <https://insapedia.com/reaktif-pudra-beton-en-yuksek-dayanimli-beton/>. Erişim Tarihi: 31.10.2024
- Karabulut, A. Ş. (2006). Reaktif Pudra Betonunun (Rpb) Özelliklerinin Mineral Katkılarla Geliştirilmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Matte V., Moranville. M. (1999). Durability of reactive powder composites: Influence of silica fume on the leaching properties of very low water/binder pastes. Cement and Concrete Composites, 21, 1-9.

- Richard, P. , Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concrete. Cement and Concrete Research., 25(7), 1501-1511.
- Taşdemir M. A. vd. (2002). Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı. İTÜ Dergisi, 1(2), 125-144.
- Taşdemir M. A., Kocatürk N., Yerlikaya M. (2004). Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler. Beton 2004 Kongresi, ss. 25-57. İstanbul.
- Taşdemir, M. A. , Bayramov, F., Yerlikaya, M. (2005). Yeni Kuşak Süperakışkanlaştırıcıların Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerdeki İşlevleri Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu Bildiriler, ss. 201-221, Ankara.
- Topçu İ. B., Gülbandılar E., Koca A. B. (2018). Reaktif pudra betonlarının basınç dayanımının anfis ile tahmini. Politeknik Dergisi, 21(1), 165-171.
- Topçu İ.B., Sarıkaya E., Akkan E. (2021). Reaktif Pudra Betonlarındaki Gelişmeler. ESOGÜ Müh Mim Fak Derg., 29(3), 440-449.
- Yerlikaya, M. (2005). Çelik tel donatılı betonların deprem etkisi altında davranışları. Kocaeli Deprem Sempozyumu Bildiriler Kitabı, ss. 302-304.

SÜRDÜRÜLEBİLİR YENİ NESİL BETONLARDAN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME¹

İbrahim PINARCI¹

1. GİRİŞ

Dünyada en çok kullanılan yapı malzemesi kuşkusuz betondur. Sürekli artan yapılaşma betondaki talebi de yükseltmiş ve dolayısıyla daha pratik ve hızlı üretilabilen hazır beton tercih edilmeye başlanmıştır. Her sektörde olduğu gibi beton sektöründe de yan sanayi olarak bilinen beton katkı malzemesi sektörü de ciddi gelişimler göstermiştir. Bu katkıların genel amacı betonun durabilite özelliklerini geliştirerek daha dayanıklı malzemeler üretilmesini sağlamaktır. Bu anlamda önceleri katkı ürünlerinin yerine su bağlayıcı oranında artış yoluyla işlenebilirlik sağlanıyordu. Sonuçta betonun kalitesinden taviz verilmek zorunda kalınıyordu. Bu soruna çözüm bulabilmek için akışkanlaştırıcı veya süper akışkanlaştırıcılar olarak tanımlanan kimyasal ürünler, düşük su/ bağlayıcı oranıyla işlenebilmeyi sağlamak için 1970’lerde kullanılmaya başlamıştır (Özyıldırım Ç. vd., 2003; Topçu İ. B. vd., 2008). Tokyo üniversitesinde kendinden yayılan ve sıkışabilen ilk beton tasarımı çalışmaları 1986’ da başlamış ve günümüze kadar gelişerek devam etmiştir (J. Bickley, 2000; K. Ozawa, 1989; Topçu İ. B. vd., 2008). Bangkok’da 1994’de yapılmış olan ACI çalıştay sonrası birçok çalışma başlamıştır (Topçu İ. B. vd, 2008). 1996 yılında KYB’ ye ilişkin makalelerin yayınlanması ile Amerika ve Kanada’ da

¹ Öğr. Gör. Dr., Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Pazaryeri Meslek Yüksekokulu, Endüstri Ürünleri Tasarımı Programı, ibrahim.pinarcı@bilecik.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9318-4325.

kullanımı artmıştır. 2005 yılında, Uluslararası Prefabrik Beton Üreticileri Birliği (BIBM), Avrupa Çimento Birliği (CEMBUREU), Avrupa Hazır Beton Birliği (ERMCO), Avrupa Beton Katkı Üreticileri Federasyonu (EFCA) ve Özel Yapı Kimyasalları ve Beton Sistemleri Avrupa Federasyonu (EFNARC) konsensüsü ile bir şartname ortaya koyulmuştur (Duyar O., 2006).

KYB' dan önce beton dökümünde yerleştirme ve sıkıştırma işlemleri yapılırken vibrasyon işlemi yapılması gerekliydi. Vibrasyon beton yapısındaki hava boşluklarını dışarı atabilmek, taneciklerin dengeli bir şekilde yerleştirebilmek ve düzgün bir beton yüzeyi elde edebilmek için şartlara uygun şekilde betona titreşim vermek şeklinde uygulanır. Bu işlem sayesinde konvansiyonel betonlara göre %30 civarında bir basınç dayanımı artışı sağlanmış olur. Ancak inşaa sırasında donatının çok sık olması, segregasyon ve kuma gibi bazı zorlaştırıcı durumlar olabilir. Böyle alanlarda vibrasyon neredeyse imkânsız hale gelir. Böyle durumlarda KYB kendi sıkışma ve yerleşme özelliği ile vibrasyon gerektirmeksizin tüm olumsuzlukları ortadan kaldırarak hem işleri kolaylaştırır hem de maddi tasarruf sağlar (Gülnihal A. vd., 2004; Gürdal H. vd., 2024; Özel C., 2018). Bunun yanında şehir merkezlerinde gerçekleştirilen yapım işlemlerinde vibrasyon gürültüsü problemine çözüm getirebilir. Tüm bu üstün özellikleri ile KYB'yi sık donatılı ulaşılması zor alanlarda, güçlendirme işlemlerinde, vibratör kullanımının zor olduğu yerlerde ve pürüzsüz beton istenen alanlarda kullanımı uygun olacaktır (Gürdal H. vd., 2024). Bu çalışmada KYB' ların tanımı, özellikleri ve deney yöntemleri araştırılmıştır.

2. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON

KYB'lar yüksek akıcılığa sahip döküldüğü kalıplara kendiliğinden, işlenebilirliğini kaybetmeden kolayca yerleşebilen beton türüdür. Bu beton türünde akışkanlığın artırılmasının yanında ayrışma, terleme ve kusma gibi betona zararlı durumlarda gelişmemelidir. Beton tasarlanırken ince malzeme oranını daha fazla tutmak, viskositeyi arttırmak, beton malzemelerinin homojen dağılımını sağlamak gerekir. İlaveten akışkanlık da süper akışkanlaştırıcılar sayesinde sağlanır. KYB su/bağlayıcı oranı oldukça düşük durabilite ve dayanım özellikleri oldukça yüksek olan yüksek dayanımlı bir beton türüdür (Okamura H., 1997; Özkul M.H., 2002; Topçu İ. B. vd., 2008). Daha dolu ve ayrışmamış bir KYB elde edebilmek için iki temel özelliğe dikkat etmek gerekir. Bunlar süperakışkanlaştırıcılar ile sağlanan doldurma yeteneği, ince malzeme oranının arttırılması ve viskosite düzenleyiciler ile sağlanan yüksek ayrışma direncidir (Özkul M.H., 2002). Bu şekilde bir tasarımla istenen KYB elde edilmiş olur.

KYB'da kendi kendine yerleşme ve yayılma özelliğinden dolayı sık donatıların arasına rahatlıkla girer. Böylece donatıyı iyi bir şekilde sarar boşluksuz bir yapı malzemesi elde edilerek durabiliteyi arttırır. Kalıp içerisinde tek noktadan döküldüğünde yükselebilmemesinin de getirdiği avantajdan dolayı özellikle deprem sonrası zarar görmüş yapıların güçlendirme işlemlerinde mükemmel bir çözüm olarak karşımıza çıkar.

KYB'da beton dökümü esnasında titreşim ve gürültü seviyesi vibrasyon yapılmamasından dolayı oldukça azalmaktadır. Bu çalışanları positif yönde etkilemektedir.

Prefabrik malzeme üretiminde işlemler çok daha kolay olacaktır.

Betonun dökümü boyunca oluşabilecek işçilik hatalarını en aza indirir.

Konvansiyonel betonlara kıyasla çok daha dayanıklıdır. Bunun sebebi geçirimsiz bir özellikte olmasıdır.

Geleneksel betonlarda şantiyede işlenebilmesi için ilave su katılma durumu görülebilmektedir. Dolayısıyla dayanım düşmektedir. Bu durum KYB' de olmamaktadır

Hava kabarcığı olmayan, çok düzgün yüzeyli ve ayrışmasız bir beton elde edilmiş olur

Daha iyi çalışma ortamı sağlarken maddi açıdan ve zamandan tasarruf sağlar

Yapıdaki taşıyıcı elemanların dökümünde konvansiyonel betona göre KYB elemanları beşte bir sürede işlemleri tamamlanmaktadır (Topçu İ. B. vd., 2008; Semioli W.J., 2001).

2.1. Taze Beton Özellikleri ve İşlenebilme

KYB kullanımında performansı taze beton özellikleri etkilemektedir ve bir ilişki içerisindedir. Betona kazandırılan bu özellik üç ana kıstasla değerlendirilir. Bunlar doldurma yeteneği, ayrışmaya karşı gösterilen direnç ve geçiş yeteneğidir. Bu kısımda kıstaslar hakkında kısa bir bilgi sunulacaktır (Ozawa K., 1989) (Gürdal H. vd., 2024).

2.1.1. Doldurma Yeteneği

Doldurma yeteneği kavramı betonun boşaltma noktasından ulaşabildiği uzaklık ve bu sıradaki akış hızı ile ilgilidir. KYB'den beklenen kendi özağırlığı ile şekil değiştirebilmesi ve deformasyon sağlamasıdır. Bunu değerlendirebilmek için yayılma deneyi kullanılır ve burada betonun yayılma çapı ve bu çapa ne kadar zaman diliminde ulaştığına bakılır. Doldurma yeteneğinin iyi olması söz konusu deformasyon ile deformasyon süresinin birbirine olan oranının dengeli olması demektir (Gürdal H. vd., 2024; Topçu İ. B. vd., 2008).

Beton kompozit bir malzemedir ve yapısında bağlayıcılar, ince ve kaba agregası gibi birçok çeşit malzeme barındırabilir. Bu malzemelerin hem akıcı hem de ayrışma olmaksızın yerleştirilmesi ciddi bir problemdir. Üstelik sürtünmenin de azaltılması gerekir. Bunun yanında çimento fazı iyi deforme olabilmesi sağlanmalıdır. Sonuçta karşılaşılan engeller karşısında ayrışmadan akıcılığın sağlanması ve doldurma özelliğinin artırılması gerekmektedir. Bunu sağlayabilmek süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanımı ve dengeli su/ çimento oranı ile mümkün olmaktadır. Ayrıca tanecikler arası sürtünmeyi azaltmak için kaba agregası hacmini azaltmak ve kullanılan agregası ve çimentoya göre optimum gradasyon sağlanmalıdır (Gürdal H. vd., 2024; Topçu İ. B. vd., 2008).

2.1.2. Ayrışmaya Karşı Direnç

Taze beton dökümü sırasında yapısındaki bileşenlerin homojenliğini kaybederek dağılması ve içeriğinin dengesiz bir hale gelmesi olayına ayrışma veya segregasyon denir. Özellikle sık donatılı alanlarda ayrışma daha belirgin bir şekilde görülebilir (Gürdal H. vd., 2024; Topçu İ. B. vd., 2008).

Kendiliğinden yerleşen betonlarda ister beton döküm öncesi ister yerleştirme sırasında terleme, çimento hamuru fazı veya agregası ayrışması, kaba agregasının engellemesi sonucu ayrışma, hava boşluğunu homojenliğini yitirmesi gibi ayrışmaların önlenmesi gerekmektedir.

Gerekli ayrışma direncinin sağlanabilmesi için ;

- Olabildiğince katı malzemelerin ayrışmasını önlemek
- Agregası içeriğini sınırlandırmak
- En büyük agregası çapını azaltmak
- Su / Çimento oranını düşürmek
- Viskosite artırıcı kullanmak

- Minimize edilmiş terleme miktarı
- Yüzey alanı daha geniş olan bağlayıcı kullanımı (Gürdal H. vd., 2024; Topçu İ. B. vd., 2008)

2.1.3. Geçiş yeteneği

Kendiliğinden yerleşen betonun görevini yapabilmesi için en önemli kriterler yeterli miktarda akıcılık ve ayrışmaya karşı gösterdiği mukavemettir. Fakat betonun yerleştirilmesi sırasında çok sık donatı ile karşılaşıldığında kaba agregalardan kaynaklı blokajlanma denilen problem ile karşılaşılabilir. Bunun temel sebebi agrega granülometrik dağılımındaki en büyük tane çapının çok büyük olması ve iri agregaların çok fazla olması olarak gösterilebilir. Geçiş yeteneğini arttırmanın etkili yolu kohezyon arttırmak, su/ çimento oranını düşürmek, viskosite arttırıcı kimyasallar kullanmak ve uygun dağılıma sahip agrega kullanımı şeklinde sıralamak mümkündür (Gürdal H. vd., 2024; Topçu İ. B. vd., 2008).

2.2. KYB Deney Yöntemleri

KYB üretiminde, taze haldeyken betonun akışkanlık, ayrışma, yerleşme ve sıkışma gibi özelliklerinin yeterliliğini araştırabilmek için laboratuvarlarda bir takım deneyler yapılır. Bu deneylerde belirlenmiş sınırlandırmalar bulunmaktadır. Söz konusu sınır değerleri Çizelge 2.1' de sunulmuştur.

Tablo 1. Deney tipleri ve sınır değerler

Deney Tipi, Ölçülecek Özellik	Birim	Sınır Değer Aralığı	
		En Küçük	En Büyük
Yayılma tablasında yayılma, Doldurma yeteneği	mm	650	800
Yayılma tablasında ilk 50 cm yayılma için geçen süre, Doldurma yeteneği	sn	2	5
V-hunisi, Doldurma yeteneği Ayrışmaya karşı direnç	sn	6	12
U-kutusu Yükselme miktarı ölçümü (H), Geçme yeteneği	mm	30	-
Doldurma kutusu, Geçme yeteneği	%	90	100

Kaynak: Aykan G., 2004.

2.2.1. Çökme-Yayılma (Slump-Flow) Deneyi

Taze beton halinde KYB'nin kendi ağırlığıyla yayılarak oluşturduğu durumda çapını ve deformasyondaki hızının ölçülmesini kapsayan deney yöntemidir.

Deneyde çökme hunisi ve 80 cm ebatlarında kare şekilde bir tabla kullanılır. (Şekil 2.1) (Aykan G., 2004; Topçu İ. B. vd., 2008).



Şekil 1. Çökme ve yayılma deney yapımı

Kaynak: Malzeme Bilimi., 2020.

Doldurma yeteneğinin ölçümüne en çok tercih edilen deney yöntemidir. Yayılma konisi tabla üzerine yerleştirilir beton sisleme olmaksızın doldurulur ve koni yukarıya doğru çekilerek betonun kendi ağırlığı ile yayılması beklenir. Yayılma durunca farklı iki noktadan yayılma çapı ölçülür (Şekil 1). KYB betonu için standartlara göre koni deneyi sonuncunda bu yayılma değeri 550 ile 850 mm aralığında olmalıdır. EFNARC'a göre ise bu değer 650 ile 800 mm arasında olması gerekmektedir (Duyar O., 2006; Topçu İ. B. vd., 2008).

2.2.2. V Hunisi (Akma Değerlendirme) Deneyleri:

V hunisi deneyi ile KYB'nin özel tasarlanmış bir düzenek içerisinde dar yapılmış olan ağız kısmından, kendi ağırlığıyla birim zamanda boşalması ve yayılması incelenir. Deneyin amacı betonun yerleşimi sırasında karşılaşacağı boşlukları kendisinin ne kadar iyi geçebildiğini değerlendirmektir. Şekil 2.'de görülen düzeneğin alt kapağı kapalı iken taze KYB sıkıştırma ve vibrasyona tabi tutulmadan yerleştirilip kapak açılır ve alttaki kaba numunenin dolma süresi ölçülür (Efnarc Association, 2002; Gürdal H. vd., 2024; Topçu İ. B. vd., 2008). Bir diğer şekilde akma değerlendirme değerini

bakmak için Abrams hunisine doldurulan numune çevresine 50 cm çaplı daire çizildikten sonra huni alınır ve bu çizilen çapa ne kadar zamanda ulaştığı kaydedilir (Efnarc Association, 2002; Topçu İ. B. vd., 2008). Beton akış hızı çok hızlı olmamalıdır çünkü bu durum ayrışma durumun ortaya çıkarabilir (Duyar O., 2006; Topçu İ. B. vd., 2008).

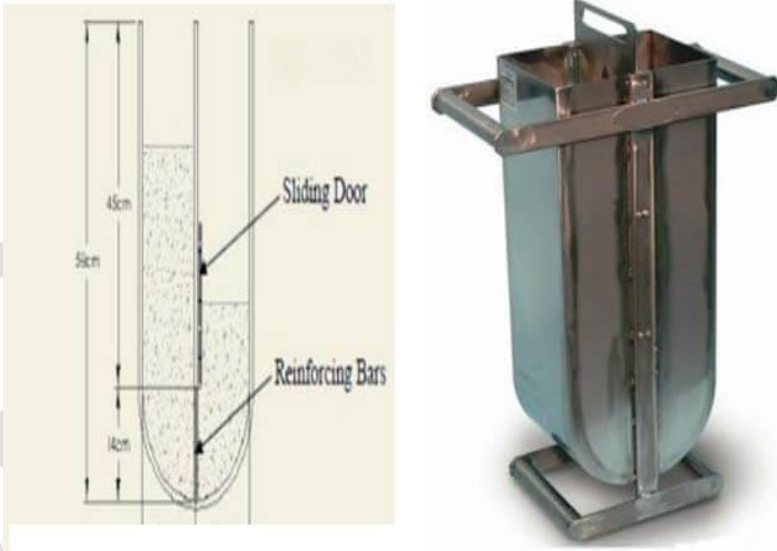


Şekil 2. V hunisi deney düzeneği

Kaynak: Şantiyede, 2023.

2.2.3. U Kutusu Deneyi

Bu deney için U şeklinde özel bir kutu sistemi geliştirilmiştir. Şekil 2.3' de gösterilen sistemin alt kısım ortasında bir kapak yer almaktadır. KYB numunesi bu sisteme sıkıştırma ve vibrasyon olmaksızın yerleştirilip bir dakika bekletilerek dinlendirilir. Projeye uygun şekilde seçilmiş donatılar da yerleştirilmiş bu sistem içerisinde daha sonra kapak açılır betonun kendi ağırlığı ile ilerlemesi gözlemlenir. Düzenegın her iki kolunda beton yükseklik farkının 30 cm geçmemeli ve deney 5 dk içerisinde tamamlanmış olmalıdır (Aykan G., 2004; Gürdal H. vd., 2024; Duyar O., 2006; Topçu İ. B. vd., 2008).



Şekil 3. U kutusu deney düzeneği

Kaynak: Volkan Atabey, 2024.

2.2.4. L Kutusu Deneyi

Bu deney için L şeklinde bir düzenek oluşturulmuştur (Şekil 2.4). Amaç KYB numunesinin doldurma, kendiliğinden yerleşme, ayrışmaya karşı direnç, geçiş yeteneği gibi özelliklerinin söz konusu düzenek içerisinde inceleyebilmektir. Düzenneğin alt ortasındaki kapak vardır. İç kısımda ise demir çubuklar bulunur. Kapak açılarak düzenneğin diğer kısmına geçişler gözlemlenir. Diğer bölüme 20 ve 40 cm ilerleme süreleri tespit edilip her iki tarafın kot farkı kaydedilir (Aykan G., 2004; Gürdal H. vd., 2024; Topçu İ. B. vd., 2008).



Şekil 4. L kutusu deney düzeneği

Kaynak: Şantiyede, 2023..

2.2.5. Doldurma Kutusu Deneyi

Akış hareketi ve yükselme özelliklerinin hazırlanan özel bir düzenek yardımıyla incelenmesini sağlayan bir deneydir (Şekil 2.5). Bu düzenneğin içerisinde çeşitli engeller vardır ve beton numune boşaltılarak her iki uçtaki kot farkı değerlendirilir (Gürdal H. vd., 2024; Topçu İ. B. vd., 2008).



Şekil 5. Doldurma kutusu deney düzeneği

Kaynak: UTEST, 2024.

3. SONUÇLAR

KYB üretimin zor olduğu, titizlik gerektiren vibrasyonun verimli kullanılamayacağı dar ve yoğun donatıya sahip elemanların üretiminde oldukça avantajlı bir seçenek olduğu görülmektedir. Üretimin tüm aşamalarında şartnameler çerçevesinde ciddi denetim ve hassasiyet gerekir. Beton imalatı sırasında taşıma, yerleştirme ve sıkıştırma başlı başına bir problemdir. İmal edilen kalıbın detayına bağlı olarak zorluk derecesi artabilir. Bu anlamda kalıbın tamamen kusursuz şekilde doldurulabilmesi, homojen dağılımının sağlanması, boşluklarının alınması ancak kaliteli bir işçilik ve titiz bir çalışma sağlanabilir. Bunun yanında donatı sıklığı kullanılan malzemenin granülometrik dağılımı da kaliteyi etkileyecektir. Standartlarda belirtilen doğru malzemeler doğru oranlarda ve iyi bir işçilik ve denetimle birlikte KYB' un avantajları net bir şekilde görülebilmektedir. KYB' larda kullanılacak olan kalıplar için

özellikle kafa yorulmalıdır. Bunun sebebi betonun çok akıcı kıvamda olmasıdır. Kalıp türü ve özellikle dönüş bölgelerindeki birleştirmeler, destekler incelikle imal edilmelidir. Aksi takdirde su kaybı ile birlikte istenilen sonuca ulaşılamayacaktır. Günümüz şartlarında işçilikten, zamandan ve maliyetten tasarruf, aynı zamanda çevreye verilen zararı minimize etme noktasında sağladığı katkılardan dolayı KYB' un kullanımı artarak devam etmektedir. KYB özellikle prefabrik yapı malzemeleri, dar ve sık donatı bulunan yapı kesitlerinde, büyük kesitli perde duvar ve döşemelerin imalatında kullanılmaktadır. Deprem etkisinde bulunan ülkemizde bu beton türünün yaygınlaştırılması gerektiği görülmektedir.

4. KAYNAKÇA

- Aykan G., Gürol G., Tezel O. O., Yüceer Z. (2004). Kendiliğinden Yerleşen Beton Deney Metodları ve Uygulama Örnekleri. *Hazır Beton Kongresi 2004, İstanbul, Bildiriler Kitabı*, 266–276.
- Bickley J., Khayat K.H., Lessard M. (2000). Performance of Self Consolidating Concrete for Casting Basement and Foundation Walls. *ACI Materials Journal*, 97(3), 374–380.
- Duyar O. (2006). Avrupa Kendiliğinden Yerleşen Beton Şartnamesi Işığında Tanımlar, Dizayn Yöntemi, Deney Metotları ve Mühendislik Özellikleri. *THBB Hazır Beton Dergisi*, 75, 46–52.
- Efnarc Association. (2002). *Specification and Guidelines for Self Compacted Concrete*.
- Gülnehal, A., Gürol, G., Tezel, O., O., Yüceer, Z., (2004). Kendiliğinden Yerleşen Beton Deney Metodları ve Uygulama Örnekleri, *BETON 2004 Kongresi*, Haziran 2004, İstanbul.
- Gürdal H., Yüceer Z. (2024). *Türkiye ve Dünyada Kendiliğinden Yerleşen Beton Uygulamaları*.
<https://www.thbbakademi.org/wp-content/uploads/2020/12/B2004.23.pdf>, Erişim Tarihi: 15.11.2024
- Malzeme Bilimi (2020). Kendiliğinden Yerleşen Beton Nedir? Özellikleri Nelerdir.<https://malzemebilimi.net/kendiliginden-yerlesen-beton-nedir-ozellikleri-nelerdir.html>. Erişim tarihi :15.11.2024.

- Okamura H. (1997). Self-Compacting High-Performance Concrete, *Concrete International*, 19(7), 50–54.
- Ozawa, K., Tagtermsirikul S., Maekawa K. (1989). Development of High Performance Concrete Based on the Durability Design of Concrete Structures. In *Proceedings of the Second East-Asia and Pasific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2)*, Vol.1, 445–450.
- Özel C. (2018). Kendiliğinden Yerleşen Betonda Mermer – Granit ve Andezit’in Agrega Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *SDU International Journal of Technological Sciences*, 10(1), 19–30.
- Özkul M.H. (2002). Beton Teknolojisinde bir devrim: Kendiliğinden Yerleşen- Sıkışan Beton. *THBB Hazır Beton Dergisi*, 52, 64–71.
- Özyıldırım Ç., Lane D.S. (2003). Investigation of Self Compacting Concrete”, Transportation Research Board 2003, Washington, USA. In *Transportation Research Board*.
- Semioli W.J. (2001). Self-Placing Concrete. *Concrete International*, 23(12), 69–72.
- Şantiyede (2023). Kendiliğinden yerleşen beton nedir? Nerelerde kullanılır. <https://santiyede.com/kendiliginden-yerlesen-beton-nedir-nerelerde-kullanilir>. Erişim tarihi :15.11.2024.
- Topçu İ. B., Bilir T., Baylavlı H. (2008). Kendiliğinden Yerleşen Betonun Özellikleri. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 21(1).

UTEST (2024). Doldurma Kutusu.
<https://www.utest.com.tr/tr/20627/Doldurma-Kutusu-Kajima-Deneyi>. Erişim tarihi :19.11.2024.

Volkan Atabey (2024). Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Kullanılan Deneyler.
<https://volkanatabey.com.tr/kendiliginden-yerlesen-betonlarda-kullanilan-deneyler/>. Erişim tarihi :17.11.2024.

EFFECT OF USING STONE DUST INSTEAD OF SAND ON THE PROPERTIES OF CONCRETE

Ahmet GÖKDEMİR¹

Fatih KARAÇOR²

1. GİRİŞ

Concrete is the most widely used construction material in the contemporary era. There is an increasing demand for concrete aggregate, which is in line with the increase in the use of concrete. The difficulties encountered in having access to sufficient and efficient amounts of natural aggregate, the necessity of preserving the environment, and the demand for high-strength concrete have necessitated the use of crushed stone in the concrete. It is, however, indispensable to have the crushed stone complete with stone dust whose size is less than $\phi 75\mu\text{m}$ [1].

In particular, a high quantity of stone dust is generated in the crushing process of the weak aggregate. Save the claystone; using such materials is beneficial in increasing the concrete compactness. On the other hand, the investigations are still in progress for its scope of use and degree of improvement to be provided on behalf of the concrete properties. Problems still need to be encountered with the workability of the lean dosage concretes produced by the crushed aggregate due to the low-

¹ Dr. Öğr. Üyesi, (Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü), ahmetgok@gazi.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2151-6228.

² Arş. Gör., (Kafkas Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü), fatihkaracor@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1201-7857.

level cohesion. As a result of the difficulty encountered in the workability, it is generally hard to pour and compact the concrete. All these difficulties might be solved by increasing the cement dosage and using additives; however, these solutions will have the disadvantage of increased cost. All these conditions call for introducing materials like stone dust that will fill materials without binders.

Recent years have witnessed increased studies on using the stone dust obtained as a byproduct in quarries during crushed stone as additive materials [3]. The affirmative influence of the calcareous stone dust is stated onto mortar and concrete properties by its fine structure [4,5]. Some researchers propose that the stone dust can be used by grinding with the clinker [6]. In contrast, others suggest that it can be used in the concrete to replace part of the cement or delicate part of the sand to increase its mechanical properties and strength [7], thus investigating such use regarding influence onto mortar and concrete properties [8,9]

1.1. Use of Stone Dust to Replace Concrete

Choi et al. studied the replacement perspective and influences of the stone dust to increase the microscopic structure and strength of alkali-active, fly ash, and ballast furnace slag. They proposed that the stone dust included in such mixtures at 10%, 20%, and 30% was beneficial for both strength and cost reduction [10]. Tia et al. suggested in their studies that the workability and strength of C60 concrete were increased when used complete with the stone dust at rates up to 3.5%, 7.0%, and 10.5%,14%) [11]. Fumoto and Yamada found out that the stone dust generated during crushed stone production increased the quality of the concrete, necessitating a high degree of fluidity [12]. Taşdemir states that so many researchers have worked on the cementation properties of calcareous stone dust. According

to the literature on concrete, including calcareous stone dust into cement clinker during grinding up to 5 to 6 % will not give rise to any negative influence [13]. Krstulović et al. conducted studies on the impact of the volumetric concentration of the calcareous stone dust on the mortar and concrete strength and concluded that there was an inverse relation between the volumetric ratio of the stone dust and the compressive strength [8]. Krstulović again suggested negative influences of the calcareous stone dust of non-pozzolana in character onto the compressive strength [9]. Ingram and Dougherty, however, asserted that the calcareous stone dust reacts with C3A in the cement composition to form calcium carbo-aluminates. Therefore, the physical and chemical properties were increased when combined with the cement containing high-degree C3A [6]. Bonavetti and Irassar found a method for improving the compressive strength of concrete by promoting the hydration of Portland cement by using three types of stone dust. They observed that better results could be obtained by replacing up to 10% of the calcareous stone dust in three types of concrete compared to regular cement. The best improvements in tensile strength concerning regular cement in advanced ages have been obtained as much as 20% for quartz, 15% for calcareous stone dust the calcareous, and 10% for granite. They also stated that the compressive strength was higher than the tensile strength, which could be expressed by the direct proportion [5]. Malhotra and Carrette noted that using the calcareous stone dust increased the cohesion in fresh concrete. It was also stated that the results obtained in the flow table test yielded better results than the regular cement and that the average flow value was 44 cm, which was determined as 35 cm for the calcareous stone dust [4]. According to Sakata et al., it is possible to produce highly fluent concrete by using super plasticizing chemical additives in the calcareous stone dust [14].

One of the most critical problems in using calcareous stone dust has been the increased drying shrinkage with increasing mixture ratio in the concrete [4,5]. Soroka and Stern investigated the compressive strength of concrete by replacing part of the cement with stone dust. They compared 3-, 7-, 28- and 90-day compressive strengths with regular concrete and obtained values close to the regular concrete with increasing tendency at advanced ages [15]. Mehdi and Mindess analyzed concrete's compressive strength and cost using superplasticizers at low water/cement ratios. They stated that the compressive strength close to the regular concrete was likely, and acceptable compressive strength could be achieved at low water/cement ratios at the expense of increased cost [16].

1.2. Use of Stone Dust to Replace Sand

In addition to replacing the cement, using the stone dust instead of the fine sand is also possible. For this purpose, the researchers conducted testing. To this end, Uchikawa et al. performed investigations by making use of calcareous stone dust, ballast furnace slag, and siliceous stone dust and concluded that it was possible to increase the plastic viscosity of the fresh concrete via the use of chemical additives [17].

Li and Zhu also investigated concrete shrinkage using stone dust instead of sand to make proto-machines. The targeted cube compressive strength was reached by replacing the sand with the stone dust between 3% and 16%. Furthermore, it was found that the concrete compressive strength's shrinkages were optimum by checking 3-, 7-, 14-, 28-, 60-, 90-, 120-, 150-, and 180-day compressive strengths with the standard method [18]. Su and Zhao used calcareous stone dust to produce ceramics.

The arc characterizes XRD and X-ray fluorescence analyses. The slag and calcareous stone dust mixture has been considered cost-effective [19]. Schwarz and Fryeburg study

source efficiency in the use of secondary raw materials. The stone dust is used here as secondary raw material for optimum benefit. The benefits obtained cover all process steps included in the production, i.e., preparation, forming, drying, cooking, transportation, etc. The results of the studies imply that there can be significant increases in the use of secondary raw materials in the production of ceramic products, etc, according to material consistency application [20]. Fang et al. search the degree of utilization of waste stone dust in producing artificial stones. They mix fine stone dust particles with waste silt and reach effective results against water impermeability. They observe that 28-day compressive strength can be doubled to 29.4. MPa by supplementing the stone dust used in artificial stone-aggregate production [21]. Zhou et al. work on compressive strength, workability, and impermeability, leading to using stone dust to produce concrete instead of sand. They conclude that it is possible to prepare low- and medium-strength concrete by supplementing the stone dust [22]. E. Ahmed and El-Kourid search for fresh and hardened concrete properties using wonderful sand at 3, 5, 7, 10, 15, and 20%, replacing Riyadh sand (natural and crushed stone). They conclude that the amount of the mixture water increases in line with the increasing quantity of wonderful sand to obtain 100-mm fixed slump concrete and that clamp values of the concrete with a water/cement ratio equal to 0.70 linearly decrease with an increase in the content of wonderful sand instead of regular sand. The compressive strength of fixed slump concrete drops with the increase of fine sand content used to replace the sand. Furthermore, it is observed that the drying shrinkage increases in line with the quantity of wonderful sand used for fixed-clamp crushed stone and natural sand concrete instead of regular sand. According to results from the studies performed on natural- and crushed stone concrete, excellent dust can be used in concrete aggregate at the rate of 5 to 10% of the weight of the sand. On the other hand,

these ratios can be increased from 7 to 15% if the workability correction is performed on the concrete with a water-reducing additive [23]. Bonavetti and Irassar search for the effect of adding 0 to 20% of stone dust to replace the sand onto the mortar. They observe that the higher the quantity of stone dust used to replace the fine sand, the higher the water quantity and suction percentages [5]. Ramyar, Çelik, and Marar search the effect of using stone dust in six various ratios into the concrete instead of fine aggregate on the air content, slump value as well as compressive strength, water suction capacity, permeability coefficient, and shrinkage of hardened concrete. They find that the higher the stone dust content, the lower the consistency; the higher the stone dust, the lower the air content. They also conclude that supplementing stone dust at 10% gives rise to maximum compressive strength and quantity of water suction close to the regular concrete [24]. However, Türker and Aydılek investigate the effects of partially using calcareous stone dust to replace the sand with fresh and hardened concrete. Using the calcareous stone dust obtained from three different sources increases the cohesion in fresh concrete. They also conclude that no significant change is likely in the 3-day compressive strength for Portland cement mortars containing the calcareous stone dust. However, compressive strength progressively increases, particularly for the mixtures complete with the calcareous stone dust until the 28th day, followed by discontinuation and regression. Calcareous stone dust at a rate of 5% doesn't significantly influences workability. The calcareous stone dust at 25% increases the hardening period [3]. Terzibaşoğlu performed comparative investigations on the hardening period, workability, consistency, temperature, unit volumetric weight of fresh concrete, and compressive strength of hardened concrete. The determination is made for the use of the calcareous stone dust up to 10%, making no significant influence on the mechanical strength of concrete, saving in fuel by using the

calcareous stone dust together with cement clinker during grinding or directly adding into the cement and thus ensuring environment protection. The conclusion is reached on the possibility of improving fresh concrete properties by using the calcareous stone dust and achieving better compressive strengths [24]. Özturan and Hacıkamiloğlu investigate the optimization and utilization of the stone dust in fresh and hardened concrete by making use of the stone dust to certain extend instead of the fine aggregate. They observe that the necessary water quantity increases to achieve fixed slump and that best workability is achieved by making use of fine aggregate at the rate of 45% and that an increase in the stone dust increases cohesion while decreasing the pumping ability, reducing air gap content and that compressive strength increases except the mixture containing 40% fine aggregate [24].

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. Material

The study uses crushed aggregate, CEM I 42.5 R, superplasticizer, calcareous stone dust, and main water as the construction material, binder, chemical additive and mineral additive, mineral additive, and mixing water, respectively. The aggregate, calcareous stone dust analysis and analysis of physical and chemical properties of the concrete and chemical additive are obtained from ÇİMSA laboratories.

Aggregate

The crushed stone used in the study is obtained from Kutludağ Madencilik Ltd. Şti., situated near Seyitgazi County, Eskişehir. Three aggregate grain classifications keep aggregate granulometry fixed, including 2-part gravel (11-22mm, 4-

11mm) and 1-part sand (0-4mm). These are provided in Table 1, Table 2, Table 3, and Figure 1.

Table 1. Concrete, specific weights

Aggregate Grain Size	0-0,25 mm Aggregate (Stone Dust)	0-4 mm Aggregate	4-11 mm Aggregate	11-22mm Aggregate
Weight Density	2,63	2,67	2,69	2,7

Table 2. Sieve analysis (% of under-sieve material)

Aggregate	Sieve and Percentages of Passing The Sieves									Fineness Module
	16	11.2	8	4	2	1	0.50	0.25	0.125	
11-22 mm	23	0	0	0	0	0	0	0	0	6.77
4-11 mm	100	32	2	0	0	0	0	0	0	5.98
0-4 mm	100	100	100	95	71	52	28	25	20	2.94

Table 3. Aggregate mixture ratios used in aggregate mixtures

0-4 mm	4-11 mm	11-22 mm	Sieve and Percentages of Passing The Sieves							Fineness Module	
			16	8	4	2	1	0.5	0.25		0.125
33	19	48	75	48	46	34	25	13	12	10	4.47

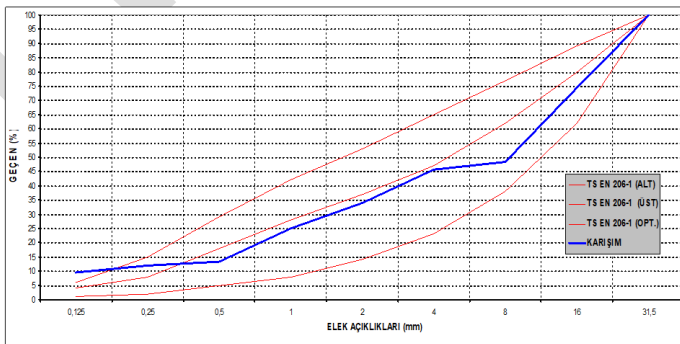


Figure 1. Aggregate mixture curve

Cement and mixing water properties

All these mixtures are prepared using CEM I 42.5 R cement of Eskişehir Çimento Fabrikası. A sufficient amount of cement is included in all concrete to prevent differentiation from forming in the cement bags. Table 4 lists the results of the testing performed according to TS EN 196-2 [25] (chemical properties) and TS EN 196-1 [26] (physical properties). Testing for determining physical and chemical properties is conducted by ÇİMSA laboratories. The main water of Eskişehir province prepares the mixtures.

Table 4. Cement laboratory analysis report

Type of Sample:	CEM I 42,5 R	Report No: 2023-8	
Receiving Date:	18-24/02/2023		
Coming Date to Laboratory:		Report Date: 03.03.2023	
Taking Place:	Delivery		
CHEMICAL ANALYSIS		PHYSICAL ANALYSIS	
Silicium dioxide (SiO ₂) (%)	20.05	Weight Density (g/cm ³)	3.12
Calcium oxide (CaO) (%)	64.36	Specific Surface (cm ² /g)	3460
Magnesium oxide (MgO) (%)	1.38	0.090 mm Sieve Residue %	2.2
Aluminium oxide (Al ₂ O ₃) (%)	5.14	0.045 mm Sieve Residue %	13.90
Iron oxide (Fe ₂ O ₃) (%)	2.59	Standard Consistency Water Content %	27
Sulphide oxide (SO ₃) (%)	2.87	Time of Initial Setting (Minute)	195
Loss on ignition (%)	2.80	Time of Final Set (Minute)	260
Sodium oxide (Na ₂ O) (%)	0.15	Expansion (Le Chatelier)	1
Potassium oxide (K ₂ O) (%)	0.52	STRENGTHS	
Chloride (Cl) smaller (%)	0.007	2 Days (N/mm ²)	23.5
Total Alkali (%)	0.49	7 Days (N/mm ²)	
		28 Days (N/mm ²)	
Total Admixture (Lime Stone) (%)	2.70		
Insoluble Matter (%)	0.20	NOTE:	
Free Lime (%)	1.00	Chemical Analysis According to TS EN 196-2 & TS EN 196-21	
L.S.F. (%)	97.58		
C3S (3CaO.SiO ₂)	59.05	Physical Analysis and Strengths According to TS EN 196-1	
C2S (2CaO.SiO ₂)	12.95		
C3A (3CaO.Al ₂ O ₃)	9.24		
C4AF (4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃)	7.88		

Additive

The study uses calcareous stone dust and superplasticizers as mineral additives. The calcareous stone dust used in the study is supplied from screening ø4 mm crushed stone with ø0,25 mm sieve of Eskişehir Kutludağ quarry operation. SF200 W superplasticizer is used, provided by Aydos Yapı Kimyasalları operation, as a chemical additive of the study. The results of the chemical additive are given in Table 5.

Table 5. Laboratory analysis report of chemical additive

Product		SF 200 W	
Lot No		190119	
Form No		153	
Manufacturing		07.02.2023	
Delivery Date		07.02.2023	
Customer Firm		ÇİMSA CEMENT INDUSTRY.	
Characteristic	Testing Method	Test Result	Acceptability Criteria
Homogeneity	Visual Testing	No Segregation.	Shouldn't Be Segregation
Color	Visual Testing	Burnt Sienna	Burnt Sienna
Relative Density 20°C (kg/l)	ISO 758	1.177	1.165 – 1.205
pH 20°C	ISO 4316	8.36	7.50 – 9.50
Solid Matter (%)	TS EN 480–8	34.95	33.50 – 9.50
Total Chloride (%)	ISO 1158	-	< % 0.10.(percentage by weight)
Water Soluble Chloride (%)	TS EN 480–10	0.055	< % 0.10.(percentage by weight)
Alkaline Content (Na2O) (%)	TS EN 480–12	0.99	Max. 5.0 (percentage by weight)
Usage Level: 0,7–1,8 %			

Concrete samples

Altogether, 24 samples are prepared for each six cubic samples for each type of mixture rate, whose dimensions are 15 x 15 x 15 cm. Stabbing bars are used to compact the samples. The samples are kept in the water at $20 \pm 2^\circ \text{C}$ for 7- and 28-day curing (Table 6).

Table 6. Plan of study

The Experiments Conducted	Sample's Age (Days)	The Number of Reference Concrete Samples	The Number of Concrete Samples Preparing with Stone Dust		
			Percentage of Calcareous Stone Dust (%)		
			7	10	15
Compressive Strength	7	2	2	2	2
	28	4	4	4	4
Ultrasonic Sound	7	2	2	2	2
Permeation Speed	28	4	4	4	4
Sample's Form and Sizes	(15x15x15) cm Cube				

Technical specifications of the fresh and hardened concrete samples prepared for compressive strength testing. Testing is performed on the samples for clamp and unit weight of fresh concrete and ultrasonic wave propagation speed, compressive strength, and unit weight for hardened concrete.

Devices of study

Figure 2 shows the Ele device and chargeable battery used in Ele make device used in Concrete Laboratory of the Department of Architecture, Faculty of Civil Engineering, Osmangazi University, whose electronic sensitivity (μs) and frequency of 50Hz.



Figure 2. Ultrasonic device used in the study

Emis E200 model device is used in pressure testing. Featuring a digital display and printout on paper, the device capacity is 300 tons, in the range between 0.001 and 300 tons, and it is complete with a fully automatic loading speed (Figure 3).



Figure 3. Device for pressure testing

2.2. Method

Preparing the samples necessary for testing, installing them into the mold, maintenance, and methods followed in the mechanical testing performance, such as ultrasonic transformation speed and pressure, are given as follows.

Concrete mixture calculation

The concrete mixture is calculated according to “TS 802 - Principles of Concrete Mixture Calculations”. The mixture features a particulate size of aggregate, water/cement ratio, and target compressive strength of 22.5, 0.55, and C30, respectively.

The concrete mixture is prepared with calcareous stone dust, which includes 7, 10, and 15% percent cement by volume used in one cubic meter of the concrete.

Preparing the concrete mixture

The precision electronic scale weights the concrete compositions obtained upon concrete mixture calculations. The mixture is prepared in the mixer by loading coarse aggregate, fine aggregate, and cement in the given order (for concrete containing stone dust, the cement and stone dust are mixed before including in the mixture). Then, dry mixing for about 30 seconds is performed. In the second step, water is combined with the chemical additive and added to the mixture. The mixture is then mixed for an additional 60 sec and kept for 30 sec before mixing in wet condition for 60 sec and pouring the concrete mortar into the molds [31].

Pouring concrete into moulds

The inner surface of the molds is coated with refined engine oil just before the mixture is poured into the mold using a shovel and trowel to make the mix completely homogenous. The concrete samples are poured into the molds to form 10 cm layers maximum. The mixture is poured into the mold in two layers for 15- or 20-cm³ cubes and three layers for 15/30 cm cylinders. Each mixture layer is stabbed after pouring into the mold 25 times with ø16 steel stabbing bars with the end rounded. The outer edges of the mold are flapped slightly with the mallet after compacting the concrete layers to get rid of the

air pocket by preserving the dragged air bubbles until the discharge of giant air bubbles ceases and filling the gaps left after inserting the compacting stab impacts.

Following the compacting process, the steel trowel or slicker removes excess mortar on top of the mold with the sharing motion, and the surface of the mortar is leveled carefully. The excess mortar at the edges of the mold is removed with the help of the trowel.

The mixture is protected against water loss from the mortar, ingress of the water, excessive temperature, and dissolution of the concrete structure during picking, transportation, pouring into the mold, and stabbing of the concrete [28,29,30].

Encoding concrete samples

It is essential to encode the test samples during the concrete production process. The test samples are provided with the type of concrete mixture, curing conditions, concrete production date, and other information as necessary.

Encoding the test samples during the test procedure is conducted as follows;

R: Normal (Reference) mixture

KU7: the calcareous stone dust to replace 7% cement

KU10; calcareous stone dust to replace 10% cement

KU7: the calcareous stone dust to replace 15% cement

Curing concrete samples

The concrete samples are kept to eliminate any adverse ambient conditions until sufficient curing is obtained for minimum hours and a maximum of 72 hours (3 days) or in the

climate with average temperatures up to 20 (± 2) °C or under ambient conditions without vibration or impact under elevated temperatures up to (25 ± 2) °C without any loss of moisture of the concrete. [31] (Figure 4).



Figure 4. Curing concrete samples

Empirical Works

Step-by-step performance of testing according to outstanding standards is given as follows;

Slump classification of the fresh concrete is performed by using the slump funnel with established dimensions as per TS EN 12350-2 [32]. In this way, the workability of the fresh concrete is classified via the fresh concrete via the clamp funnel method. This method fills the concrete into a truncated funnel whose dimensions are known. The clamp distance in the fresh concrete mass formed by lifting the clamp funnel upward is considered the consistency measure for the concrete. The difference in the height in between (in terms of mm) is regarded as the workability of the concrete [32].

The consistency test on fresh concrete is performed according to provisions provided under TS EN 12350-2 [32].

Ultrasonic testing performed on concrete samples consists of the rate of transmission of the ultrasonic wave through the concrete. The speed is measured electronically. The average wave propagation speed is obtained when the distance between the sensors is divided by the time of passage. The test

aims to find the concrete's propagation speed (km/sec) by measuring the impact that transforms into mechanical vibration (Table 7). [33-36].

The relevant equation is given below;

$$V = \ell / t$$

Where,

V: Ultrasonic speed (km/sec)

t: Passage period (second)

ℓ : Measured length (km)

Table 7. Determining concrete quality by ultrasonic testing

Speed of Voice (V) km/s	Concrete Quality
>4.5	Perfect
3.5-4.5	Well
3.0-3.5	Questionable
2.0-3.0	Weak
<2.0	Very Weak

Ultrasonic testing is performed according to ASTM C 597 [33] as follows;

The contact putty is applied on the transmitting and receiving tips at both ends of the ultrasonic device. The tips are pressed against the measuring points on the concrete, and the passage period is read in terms of microseconds (μ s) and converted into seconds. The measured passage period is transformed into the speed of voice according to the following equation.

$$V = 0.00015 / 0.0000328 = 4.573 \text{ km/s}$$

The compressive strength testing is performed on the concrete mortar samples prepared by pouring the concrete in 15 x 15 x 15 cm molds according to TS EN 12350-1 [28] and TS

EN 12390–2 [31] via the method as described under TS EN 12390–3.

During the compressive strength tests, loading speed is taken as 0.5 kN/sec according to TS 3287, and fracture load is obtained during load application on the sample until fracture. The compressive strengths of the samples are calculated as per Equation.

$$\sigma_b = F_b / (b \times h)$$

Where

σ_b = Compressive strength, MPa (N/mm²)

F_b = Fracture load, N

b = Sample width, mm (in this study, 50 mm)

h = Sample height, mm (in this study, 150 mm)

3. RESULTS AND DISCUSSION

The tables and figures below depict the results of sieve analyses, conformity of the mixture ratio to outstanding standards, effects of the calcareous stone dust added into the fresh concrete mixture, and its properties in various ratios.

3.1. Fresh Concrete Properties

Fresh concrete is the state of the concrete during the period when plastic consistency is preserved after the mixing operation of its constituents. There is a close relation with the permanent properties of the hardened concrete, including compressive strength, volumetric integrity, and endurance. For this reason, fresh concrete should feature established consistency and workability to ensure sufficient compactness of concrete without dissociation during transportation, pouring, and surface treatments [41].

Slump (consistency method)

The higher the quantity of calcareous stone dust, the lesser the degree of slump. There is an inverse proportion between the stone dust and the degree of slump. This might be attributed to an increase in the surface area of the concrete constituents while particulate size decreases. The necessary water quantity is directly proportional to the surface area. In this study, the amount of water is kept constant to assess the influence of the use of the calcareous stone dust on workability, and thus, the degree of slump is reduced. It was found that the slump for R-series samples is 16 cm, while this is 10 cm for KU15, the samples including 15% stone dust to replace cement. This is shown in Figure 5.

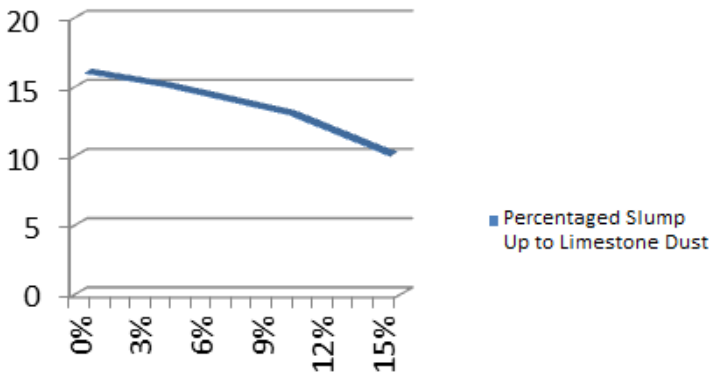


Figure 5. Relationship between the amount of stone dust and slump in limestone flour added to concrete.

Unit weight of fresh concrete

The unit weight of the fresh concrete increases with the quantity of stone dust. The unit weight of the fresh concrete is directly proportional to the amount of stone dust. This can be interpreted as the stone dust giving rise to a formation of

concrete featuring fewer gaps and reduced permeability. The unit weight of concrete increases with the increasing quantity of stone dust. The difference between the reference concrete with T.U. 7 is 13 kg/m³, which is increased to 17 kg/m³ for T.U. 10 and 23 kg/m³ for T.U. 15. Unit weight increases with increasing quantity of stone dust. Table 8 shows the unit weight of the concrete, including stone dust. The same values are illustrated in Figure 6.

■ The Effect of Limestone's Quantity (%) to Unit Weight of The Fresh Concrete (kg/m³)

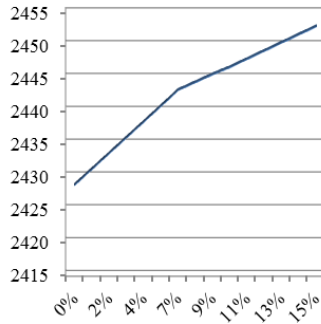


Figure 6. Quantity of stone dust vs. fresh concrete unit weight for concrete, including calcareous stone dust

Table 8. Quantity and properties of materials for regular and stone dust added to fresh concrete

Sample Code	Water/Cement Ratio	Stone dust percentage (%)	Amounts of Materials Used in 1m ³ Concrete							Fresh Concrete Properties		
			Cement Amount (kg/m ³)	Stone dust (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Chemical Additive	Sand (mm) 0-4	Gravel (mm) 4-11	Gravel (mm) 11-22	Slump, cm	Unit Weight (kg/m ³)	Concrete temperature (°C)
R	0.55	0	300	0	160	3.6	940	386	601	16	2429	17
KU7	0.55	7	279	21	160	3.6	945	386	600	14	2442	17
KU10	0.55	10	270	30	160	3.6	944	385	600	13	2446	17
KU15	0.55	15	255	45	160	3.6	943	385	599	10	2452	17

3.2. Properties of Hardened Concrete

Ultrasonic passage speed

The ultrasonic wave passage speed and concrete compressive strength do not directly relate to the ultrasonic wave passage speed. On the other hand, it is possible to establish a specific relation between the speed of ultrasonic waves and concrete density. High-density concrete is typically distinguished by its high compressive strengths. Furthermore, it has been possible to calculate the dynamic modulus of elasticity using ultrasonic wave speed along the longitudinal direction of the concrete or so-called P-waves [39, 40].

Determining a concrete's compressive strength precisely enough using the ultrasonic wave method is impossible. However, a general relation can be established on the concrete

quality using the ultrasonic wave method since the speed of the ultrasonic wave passing through the concrete is closely related to the gaps in the concrete. The difference in the ultrasonic wave speed passing through the reference, KU10 and KU15 concrete, is 0,134 km/sec, 0.088 km/sec, and 0.029 km/sec, respectively. The results of ultrasonic wave passage testing reveal that the ultrasonic wave passage speed is directly proportional to the compressive strength. These values are shown in Figures 7, 8, and 9.

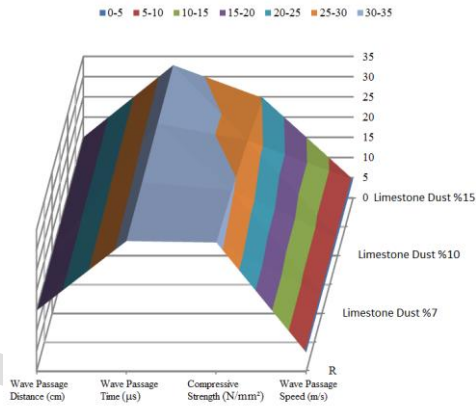


Figure 7. 7-day results of ultrasonic wave passage testing

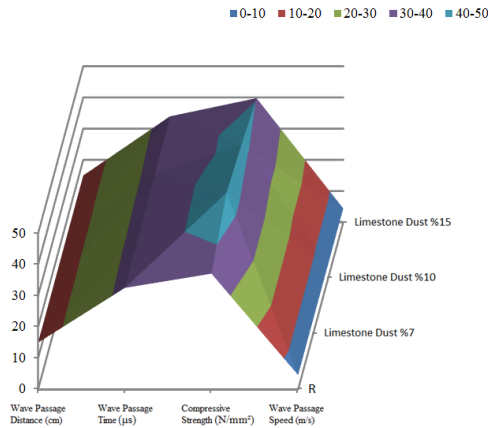


Figure 8. 28-day results of ultrasonic wave passage testing

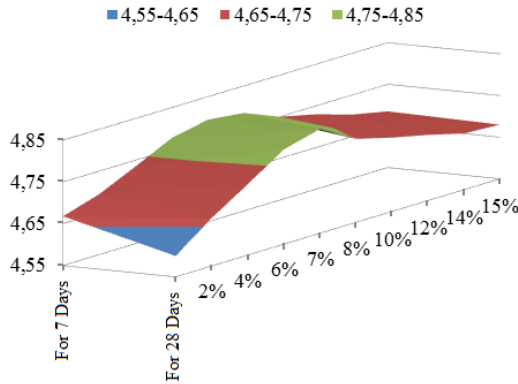


Figure 9. Quantity of stone dust and ultrasonic wave passage speed (km/sec) for concrete with calcareous stone dust

Compressive strength

The compressive strength is significant for the concrete, and the compressive strength test is one of the critical parameters used in checking the quality of concrete. Figure 10 shows the graphs depicting the calcareous stone dust's 7- and 28-day compressive strengths.

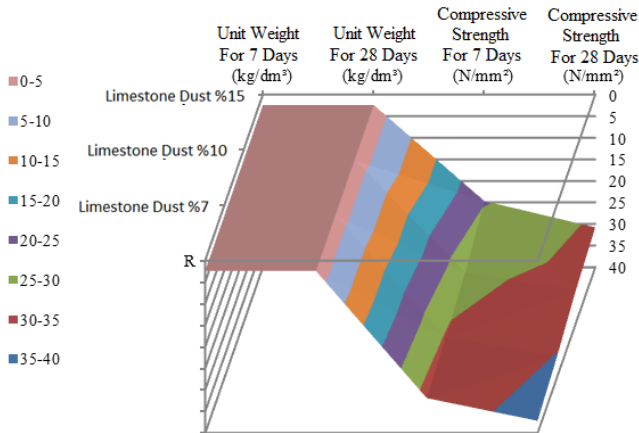


Figure 10. Quantity of stone dust for stone dust added concrete - compressive strength N/mm²).

4. CONCLUSION AND SUGGESTIONS

The general conclusions obtained for the properties of fresh and hardened concretes produced by adding stone dust in various ratios are listed as follows;

The higher the quantity of stone dust, the higher the water requirement.

Preparing the fresh concrete in a fixed water/ cement+ stone ratio has given rise to lesser slump and higher workability in direct proportion to the increase in the quantity of stone dust added to the concrete.

The quantity of stone dust is directly proportional to concrete unit weight.

7- and 28-day concrete compressive strengths are higher than regular concrete, which are produced by using the calcareous stone dust that replaces the cement at the rate of 7, 10, and 15% by volume.

The unit weight of hardened concrete increases when the stone dust included in the concrete mixture increases.

Ultrasonic wave testing performed on the hardened concrete is directly proportional to the results of the compressive strength values.

The inclusion of the stone dust has a discrete change in the concrete compactness. The concrete compactness calculated theoretically is directly proportional to the quantity of the stone dust.

- The study concludes that adding the stone dust into concrete reduces its compressive strength.

Considering the undesirable effects of using stone dust, it is highly recommended to go over the study using increased chemical additives.

5. KAYNAKÇA

- Ramyar, K., Çelik, T., Marar, K., “Taş Tozunun Beton Özelliklerine Olan Etkisi-Endüstriyel atıkların İnşaat Sektöründe kullanılması,” in *TMMOB İnş.Müh. Odası Bildiriler Kitabı*, Ankara, 1995, pp. 227-234.
- Uğurlu, A., “Taşunu Kullanımının Beton Özellikleri Üzerindeki Etkisi,” in *1. Ulusal Kırmataş Sempozyumu'96*, Ankara, 1996, pp. 305-306.
- Türker, F., Aydılek, M., “İlave mineral katkı olarak kalker esaslı taşınu malzemesini harç ve betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi,” in *T.M.M.O. İnş. Müh. Odası, 4.Ulusal Beton Kongresi, Beton Teknolojisinde Mineral ve kimyasal katkılar*, Ankara, 1996, pp. 347.
- Malhotra, V.M., and Carrette, G.G., “Performance of concrete incorporating limestone dust of partial replacement for sand”, *A.C.I. Journal*, vol 82, pp. 363-371, May-June 1985.
- Bonavetti, V.L., and Irassar, E.F., “The effect of stone dust concent in sand,” *Cement and Concrete Research*, vol 29, no 3, pp. 580-590, 1994.
- Ingram, K.D., ad Dougherty, K.E., “A Review limestone additions the portland cement and concrete,” *Cement&Concrete Composites*, vol. 13, pp. 165-170, 1991.
- Taşdemir, C., 1996, “Mikrofiller malzemelerin betnun mekanik özelliklerine etkisi,” in *T.M.M.O., İnş. Müh. Odası, 4.Ulusal Beton Kongresi, Beton teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar*, İstanbul, 1996, pp. 196.
- Krstulović, P., Komenic, N., and Popović, K., “A New approach in evalition of taşınu effect of cement, I. The effect on strength and workability of mortar and concrete,”

Cement and Concrete Research, vol. 24, no. 4, pp 721-727, 1994.

Krstulović, P., "A New approach in evalition of taşunu effect of cement, II. The effect on strength and workability of mortar and concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 24, no. 5, pp. 931-936, 1994.

Choi, S.J., Jun, S.S., Oh, J.E., Monteiro, P. J. M., "Properties of alkali-activated systems with Stone powder sludge," *Journal of Material Sysles and Waste Management*, vol. 12, no. 4, pp. 275-282, 2010.

Tian, J. P., Zhou, M.K., Cai, J.W., "Composition effects of FA and Stone powder in high strength concrete with machine-made sand," *Materials and Structures*, vol. 28, no. 3, pp. 55-60, 2006.

Fumoto, T., Yamada, M., "Applicability of crush Stone powder and recycled concrete powder to high-fluidity concrete," *Journal of Society of Materials Science*, vol. 51, no. 10, pp. 1105-1110, 2002.

Taşdemir, C., Atahan, N.H., "Taşunu malzemelerin betonun mekanik özelliklerine ve durabilitesi etkisi," in *I. Ulusal Kırmataş Sempozyumu*, İstanbul, 1996, pp. 251.

Sokata, K., Ayono, Y., and Ogawa, A., "Mixture proportioning for high flowable concrete incorporating limestone powder," in *5th International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, American Concrete Institute, 1995, pp 249-268.

Soraka, I., and Stern, N., "Calcerous fillers and the comperessive strength of portland cement," *Cement and Concrete Research*, vol. 26, pp. 367-376, 1976

- Mehdi, M., and Mindess, S., “Opt. Of high strength limestone taşunu cement mortars,” *Cement and Concrete Research*, vol. 26, no. 6, pp. 883-893, 1996.
- Uchikawa, H., Hanehara, S., and Hiras, H., “Inf. Microstructure on the physical properties of concrete prepared by substituting mineral powder for part of fine aggregate,” *Cement and Concrete Research*, vol. 26, no. 1, pp. 101-111, 1996.
- Li, F., Zhu, Q., “Drying shrinkage of concrete affected by content of Stone powder in proto-machine-made sand,” *Advanced Materials Research*, vol. 152-153, pp. 1176-1179, 2011.
- Su, D.G., Zhao, Y., “Preparation of ceramics from desulphurization slag and waste Stone powders,” *Journal of South China University of Technology (Natural Science)*, vol. 38, no. 7, pp. 117-121, 2010.
- Schwarz, T.A., Freyburg, S., “Evaluation of resource efficiency on the use of natural Stone powder in silicate ceramic bodies,” *ZI, Ziegelindustrie International/Brick and Tile Industry International*, vol. 63, no. 5, pp. 35-41, 2010.
- Fang, C. C., Ming, Y. L., Shang, L.L., Jyd, D.L., “Artificial aggregate made from waste Stone sludge and waste silt,” *Journal of Environmental Management*, vol. 91, no. 11, pp. 2289-2294, 2010.
- Zhou, M.K., Cai, J.W., Li, B.X., “Research on properties of concrete prepared with artificial sand containing Stone powder at high content,” *Key Engineering Materials*, vol. 302-303, pp. 263-268, 2006.
- Ahmed, E.A., and El-Kour, A.A., “Properties of concrete Incorporating natural of crushed stone very fine sand,” *ACI Mat. Jour.*, vol. 86, no. 4, pp. 417-424, 1989.

- Ramyar, K., Çelik, T., Marar, K., “Taş tozunun beton özelliklerine olan etkisi,” in *T.M.M.O. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması*, Ankara, pp. 227, 1995.
- Türk Standartları Enstitüsü, “Çimento Deney Metodları-Dayanımı (Bölüm: 1),” *Türk Standartları Enstitüsü*, EN 196-2, 2010.
- Türk Standartları Enstitüsü, “Çimento Deney Metodları-Çimentonun Kimyasal Analizi,” *Türk Standartları Enstitüsü*, EN 196-1, 2009.
- Türk Standartları Enstitüsü, “Beton Karışımı Hesap Esasları,” *Türk Standartları Enstitüsü*, 802 1985.
- Türk Standartları Enstitüsü, “Beton- Taze Beton Deneyleri-Bölüm 1: Numune Alma,” *Türk Standartları Enstitüsü*, EN 12350-1, 2002.
- Türk Standartları Enstitüsü, “Şantiyede Beton Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Bakımı,” *Türk Standartları Enstitüsü*, 3351, 1979.
- Türk Standartları Enstitüsü, “Beton Yapım, Döküm ve Bakım Kuralları (Normal Hava Koşullarında),” *Türk Standartları Enstitüsü*, 1247, 1984.
- Türk Standartları Enstitüsü, “Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması Ve Kürlenmesi,” *Türk Standartları Enstitüsü*, EN 12390-2, 2002.
- Türk Standartları Enstitüsü, “Beton- Taze Beton Deneyleri-Bölüm 2: Çökme (Slamp) Deneyi,” *Türk Standartları Enstitüsü*, EN 12350-2, 2002.

ASTM, “Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete,” *ASTM International*, C 597, 2002

Türk Standartları Enstitüsü, “Tahribatsız Muayene - Ultrasonik Muayene (UM) - Bölüm 1: Geçiş Tekniği,” *Türk Standartları Enstitüsü*, EN 583-1, 2002.

Türk Standartları Enstitüsü, “Tahribatsız Muayene - Ultrasonik Muayene- Bölüm 2: Hassasiyet ve Aralık Ayarı,” *Türk Standartları Enstitüsü*, EN 583-2, 2002.

Türk Standartları Enstitüsü, “Tahribatsız Muayene - Ultrasonik Muayene (UM) Bölüm 3: Genel Kurallar,” *Türk Standartları Enstitüsü*, EN 583-3, 2002.

Türk Standartları Enstitüsü, “Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini,” *Türk Standartları Enstitüsü*, EN 12390-3, 2003.

Türk Standartları Enstitüsü, “Betonun Eğilmede Çekme Deneyinden Çıkan Deney Numunesinin Parçaları Üzerine Basınç Dayanımı,” *Türk Standartları Enstitüsü*, 3287, 1979.

Yaman, I.O., Inci, G., Yesiller, N. and Aktan, H.M. “Ultrasonic pulse velocity in concrete using direct and indirect transmission,” *ACI Journal of Materials*, vol. 98, no. 6, pp. 450-457, 2001.

Malhotra, V.M., Carino, N.J., “Nondestructive Testing of Concrete,” *CRC Press* pp. 1-13, 2004.

Mindess, S., Young, J.F., and Darwin, D., “Concrete”. 2nd ed. Pearson Education, Inc. New Jersey, 2003.

ATIKSU SİSTEMLERİ VE HİDROLİK HESAPLAMALARI

Esin ACAR¹

1. GİRİŞ

Atıksu sistemleri şehirleşmenin ve sanayileşmenin artması ile oluşan atıkların toplanarak uzaklaştırılması esasına dayanmaktadır. Bu sebeple nüfus artışı ile orantılı olarak ihtiyaç duyulan altyapı sistemlerdir. Farklı özellikteki sistemler (ayrık, karışık) üzerine planlama yapılmakta ve muayene, şütlü ve yıkama baca sistemleri ile birlikte inşaa edilmektedirler.

Atıksu kanalları geometrik özellikleri, boru materyalleri, kanal boyuna eğimleri olmak üzere fiziksel parametrelerden yararlanılarak hesaplanmaktadır. Bu parametrelerden planlama aşamalarında yararlanılarak optimum sonuçlar elde edilmesi amaçlanmaktadır.

Atıksu debi hesaplamalarında evsel, endüstriyel ve sızma debileri kullanılmaktadır. Boru sistemlerinde hız ve eğim şartları göz önüne alınarak hidrolik hesaplamaları yapılmaktadır.

Farklı parametreler kullanılarak yapılan hesaplamalarda yük kayıpları ve boru pürüzlülükleri de dikkate alınmaktadır. Hidrolik hesap esaslarına göre doluluk oranları hesaplanarak planlamalar yapılmaktadır.

Bu sistemler uzun vadeli nüfus artış tahminlerine göre yapıldığı için belirlenen sürelerde ihtiyaçları karşılamaktadır.

2. ATIKSU (KANALİZASYON)

Kullanılmış sular ile yağmur sularını toplayan ve yerleşim bölgelerinden uzaklaştıran sistemlere “Atıksu Sistemleri” denir. Atıksu sistemlerinde zaman zaman kullanılmış sular ile yağmur suları tek kanalda toplanır. Bazı durumlarda da yağmur suları farklı kanal sisteminde, kullanılmış sular da farklı bir kanal sisteminde toplanmaktadır (Samsunlu, 1986).

2.1. Atıksu Sistemleri

Atıksu sistemleri, debi ve atıksu özelliklerine bağlıdır. Bu özellikler, meskûn bölgelerde kullanılmış suların ve endüstri ile ticari faaliyetlere göre değişmektedir. Özellikle yağışlı havalarda drenaj ve sızıntı suları atıksu kanallarına girmektedir. Bu durumda atık suyun özellikleri değişebilmektedir (Öztürk, 2017). Atıksu borularının döşenmesi Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Atıksu Borularının Döşenmesi

Atıksu sistemi, karışık ve ayrık olmak üzere iki tiptir (Erdemgil, 1976);

Karışık Sistem : Yağmur sularının oranı atıksulara göre oldukça fazladır. Atıksu sistemleri kapasitesi çok fazla olmadığı için atıksu kanal kesitleri yağmursularının etkisi ile dolabilmekte ya da büyük kesitlere gerek duyulmaktadır. Bu durum çok

ekonomik olmamakta ve kurak havalarda da akış hızının düşmesine neden olmaktadır. Düşük hızlar kesit tabanında çökelmelere sebep olmaktadır.

Ayrık Sistem: Atıksu kanalı altta, yağmur suyu kanalı ise üstte bulunmaktadır. Bu durumun en ekonomik hali yağmur suyunun yüzeyden serbest olarak akmasıdır. Yağmur suyu kanalı ile atıksu kanalı arasında min 30 cm olması gerekmektedir. Yağmur sularında min çap ϕ 30 luk olup, atıksularda min çap ϕ 20 liktir.

Bacalar: Bacalar atıksu tesislerinin en önemli parçalarıdır. Baca şekilleri (Erdemgil, 1976);

Muayene bacaları,

Şütler ve şütlü bacalar

Yıkama bacalarıdır.

Muayene Bacaları: Muayene bacaları sokaklarda kavşak noktalarda yön ve eğim değiştirdiği ve kanal sistemlerinin düz devam ettiği yerlerde 50-150cm arasında konulur. İki baca arasında mesafenin aşağıda yer alan değerleri aşması sonucu ek baca sistemleri konmaktadır.

<i>Çap (m)</i>	<i>Baca aralığı (m)</i>
0.20 - 0.50	50 m
0.60 - 0.80	70 m
0.90 – 1.40	100 m
1.40 ise	125 – 150 m

Muayene bacaları atıksu kanalının içindeki akımın kontrol edilmesini, kirli suların aerobik şartlar dahilinde kalması için gerekli oksijeni de sağlamaktadır. Ayrıca kanalların tıkanması durumunda açılmasını da sağlamaktadır (Samsunlu, 1986).

Şütlü Bacalar: Planlanan sokaktaki eğimlerin kabul edilenden daha çok olması durumunda şüt yapılmaktadır. Şütler iki şekilde; dıştan şütlü yapılar şeklinde veya içten şütlü bacalar şeklinde olabilir. 400 mm ye kadar olan çaplar için dıştan şütlü yapılar; 400 mm den büyük çaplar için ise içten şütlü yapılar inşa edilir. Şüt planlanan yerlere mutlaka muayene bacası konmalıdır. Şüt yüksekliği ise en fazla 2.00 m olmalıdır (Erdemgil, 1976).

Yıkama Bacaları: Yıkama bacaları ise kanalların yıkanmasını sağlamaktadır. Mecraların temizlenmesi amacıyla kullanılır., kanalları yıkamaya yarayan bacalardır. Atıksu hızının 0,50 m/s ve kanaldaki su düzeyinin 2 cm den düşük olması durumunda yıkama bacaları yapılmaktadır. Bu bacalar en fazla 500 mm ye kadar çapları olan kanalarda yapılmaktadır (Erdemgil, 1976).

2.2. Atık Su Kanallarının Geometri Şekilleri

Geometrinin hidrolik olarak en uygununun seçilmesi gerekmektedir. Atıksu debisine göre geometri seçilmesi ve inşaat işlerinin de bu kapsamda değerlendirilmesi gerekmektedir.

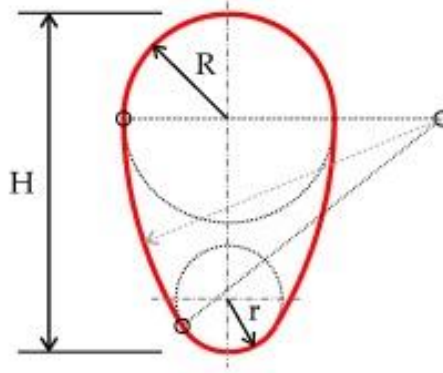
2.2.1. Dairesel Kesitli Atıksu Kanalları

Kanal kesitlerinde en yaygın olarak kullanılmaktadır Hem hidrolik açıdan hem de inşaatı bakımından en uygun seçimdir. Fakat kurak havalarda taban eğimi düşük olduğu için çamur ve çökelti malzemeleri dibe çökerek, birikime neden olurlar. Bu sebeple dairese kesitli kanallar (Şekil 2) küçük kesitlerde $\phi 500$ e kadar tercih edilmektedir.



2.2.2. Yumurta Kesitli Kanallar

Yumurta kesitli sistemler (Şekil 3) düşük su yüksekliklerinde diğer kesitlere göre daha fazla debi geçirmektedirler. Bu sebeple taban da çökme daha azdır. Fakat inşaat süreçleri daha maliyetli olmaktadır. Özellikle zemin sularının yüksek olduğu noktalarda inşaa edilmeleri güçtür.



Şekil 3. Yumurta kesit görünümü ((Picallo & ark. 2016)

3. ATIK SU SİSTEMLERİNDEKİ BORULAR

Atık su kanalları, farklı yapı malzemeleri olarak üretilabilmektedir. Bunlar beton, kargir, asbestli çimento, font ve çelik veya plastik boru çeşitleridir.

3.1. Beton Atıksu Boruları

En çok kullanılan yapı malzemeleridir (Şekil 4) kullanılır. Fakat betonun aşınmasına neden olacak endüstriyel suların bulunması halinde bu borular yerine plastik borular tercih edilmelidir.



Şekil 4. Beton Borular (MEB, 2011)

3.2. Kargir Kanallar

Yerinde dökme borular; agresif kullanılmış sularla, kum ve kanal gazı etkisiyle aşınır. Bunların ömürlerini fazlalaştırmak için iç tarafları özel kanal tuğlasıyla veya özel künk profilleri ile kaplanır. Kargir kanallar için normal kanal tuğlası, kemerin tepesi ve özengi kısımları içinde kamalı tuğlalar kullanılır. Kanalin alt tarafında daha çok ateş tuğlaları vardır. Kanalin sızdırmazlığını temin için derzlerin çok dikkatli ve ihtimamlı yapılması lazımdır. İnşaatın yavaş ilerlemesi ve el işçiliğinin çok olması nedeni ile bugün kargir kanallar kanal ağında pek kullanılmamaktadır (Erdemgil, 1976).

3.3. Asbestli Çimento Borular

Asbestli çimento borular asbest ve çimentodan meydana geliri. Bu borular basınçsız ve basınçlı pis su borusu olarak ve aynı zamanda bina iç tesisat borusu olarak kullanılır. Asbestli çimento borular, suların çevrıntili, çalkantılı hareketlerinden zarar görmezler. Sıcak ve soğuğu çok geçirmezler. Hafif olduklarından kolay taşınabilirler. Asbestli ve çimento borular, beton ve pişmiş killi künk borulardan daha uzun olarak imal

edilebildiğinden birleşim işleri az olur. Ayrıca bu borular korozyona karşı dayanıklıdır. Yalnız çarpmaya karşı mukavemetli olmadığından yükleme, nakliye, boşaltma işleri dikkatle yapılmalıdır (Erdemgil, 1976).

3.4. Font ve Çelik Borular

Atıksu borularının nehir yataklarında uzanan yerleri ile suları hiç sızdırmaması istenen kısımlar çelik borularla teşkil olunur. Font borular ise genellikle bina içindeki pis su tesislerinde ve avlu kanallarında kullanılır. Bununla beraber yol ve demir yolu kavşak yerlerinde yani büyük yüklerin geldiği bölgelerde, yeraltı su seviyelerinin ve bu suların normal kanalların içine girdiği heyelan yapabilecek yerlerde, hızların çok büyüdüğü ve buna bağlı olan aşındırıcı tesirin fazla olduğu bölgelerde, ters sifon ve pompa tesisleri civarındaki basınçlı su akıtan pis su kanallarında font borular kullanılır. Ayrıca baca kapakları da fontdan yapılır. Bunlar kullanmadan evvel asfaltlanır (Erdemgil, 1976).

3.5. Plastik (Korige-Koruğu) Borular

Plastik atıksu boruları (Şekil 5), bu boruların ağırlıkları azdır. Font ve sırlı künk borularla birleşimleri yapılabilir (Erdemgil, 1976).

Atıksu kanallarındaki doluluk oranı %40 - %60 alınır. Kanallara yeraltı suyu sızmiyorsa ve binalardan yağmursuyu gelmiyorsa bu oran %80 alınabilir. Eğer sızma ayrıca hesaplanıyorsa ve atıksu debisine ilave ediliyorsa bu takdirde de doluluk oranı %80 alınır. Ancak İSKİ yönetmeliğinde $h/D = 0,90$ alınmaktadır. Yağmursuyu kanallarında minimum akım hızı $0,75 - 0,90$ m/s ve maksimum akım hızı 4 m/s, Atıksu kanallarında minimum hız $0,50 - 0,60$ m/s ve maksimum hız $3,0$ m/s alınabilir (Şekerdağ, 2017).



Şekil 5. Plastik Borular (MEB, 2011)

4. ATIKSU DEBİLERİ

Atıksu debileri evsel, Endüstriyel ve sızma olarak ayrılmaktadır (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2027a- 2017b).

4.1. Evsel atıksu debisi

Evsel atıksu debileri aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır:

$$Q_{evsel,ort} = \frac{qP_G}{24 * 3600}$$

(1)

$Q_{evs,ort}$ Ortalama evsel atıksu debisi (L/sn)

q Kişi başına düşen ortalama günlük tüketim (L/kişi.gün)

P_G Tahmin edilen proje nüfusu

Kişi başına göre günlük kullanma suyu tüketimi Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Kişi başına düşen ortalama günlük su tüketimi

Nüfus (N, kişi)	Evsel su ihtiyacı
≤ 50.000	80 – 100
> 50.000 ve ≤ 100.000	100 – 120
> 100.000	120 – 140

4.2. Endüstriyel atıksu debisi

Endüstriyel atıksu debisi ortalama olarak aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır:

$$Q_{end,ort} = Z * F$$

(2)

$Q_{end,ort}$: Endüstriyel atıksu debisi (L/sn)

Z: Endüstriyel birim su tüketimi (L/sn.ha)

F: Atıksu toplama alanı (ha)

Endüstri çeşidine göre değişen su tüketim miktarları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Endüstriyel birim su tüketimi

Endüstri	Birim su
Küçük	0,5
Orta sanayi	1,0
Büyük	1,5

4.3. Sızma debisi

Sızma debisi ise aşağıda yer alan formülle hesaplanmaktadır:

$$Q_{sızma} = 0,1 * F$$

(3)

$Q_{sızma}$ Sızma debisi (L/sn)

F Atıksu alanı (ha)

4.4. Toplam atıksu debisi

Atıksu kanal sistemlerinde toplam atıksu debisi evsel, endüstriyel ve sızma debileri toplamıdır:

$$Q_{toplamort} = Q_{evsel,ort} + Q_{end,ort} + Q_{sızma}$$

5. HIZ VE EĞİMLER

Atıksu sistemlerinde katı maddelerin çökmesini önlemek amacıyla hızın 0,5 m/s üstünde olması gerekmektedir. Bir de bu hızın 3,5 m/s'yi geçmemesi önemlidir.

6. HİDROLİK HESAPLAR, YÜK KAYIPLARI ve BORU PÜRÜZLÜLÜĞÜ

Atıksu sistemleri planlamalarında kanalların üniform ve kararlı, türbülanslı akım olduğu kabul edilmektedir. Kanallarda bu akımlar Colebrook-White, Manning veya Kutter denklemleri ile hesaplanmaktadır (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2027a-2017b).

Sürtünme kayıpları: Borulardaki sürtünme yük kayıplarını hesaplamak amacıyla boru cidar pürüzlülüğü (k), Manning katsayısı (n) veya Kutter katsayısı (m) kullanılmaktadır.

Colebrook-White denklemi: Bu denklem tam dolu akışlardaki, dairesel kesitli borularda akış hızı aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır:

$$V = -2\sqrt{2gDJ_E} \log_{10} \left(\frac{k}{3,71D} + \frac{2,51\nu}{D\sqrt{2gDJ_E}} \right) \quad (4)$$

Burada;

- V ortalama hız (m/sn)
 g yerçekimi ivmesi m/sn^2
 D iç çapı (m)
 JE piyezometre çizgisi eğimi
 k boru pürüzlülük (m)
 ν yağmursuyunun kinematik viskozite (m^2/sn)

Manning denklemi: Bu denklem dairesel kesitli olan ve olmayan akımlar için kullanılır. Burada tam dolu yada kısmi dolu akışlarda, akış hızını hesaplamak için Manning denklemi kullanılır ve aşağıdaki formül kullanılmaktadır:

$$V = \frac{1}{n} R_H^{2/3} J_E^{1/2} \quad (5)$$

- n Manning katsayısı
 RH hidrolik yarıçap (m)
 JE piyezometre çizgisi eğimi

Kutter denklemi: Bu denklem, dairesel kesit ve farklı kesitli akımlar için akış hızını hesaplamak için kullanılır ve aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$V = c\sqrt{R_H J_E} \quad (6)$$

- RH hidrolik yarıçap (m)
 JE piyezometre çizgisinin eğimi
 c hidrolik yarıçap ve Kutter katsayısı sabiti

$$c = \frac{100\sqrt{R_H}}{m+\sqrt{R_H}}$$

(7)

m Kutter katsayısı

6.1. Yersel kayıplar

Yersel kayıplar kanalların birleştiği, kesit alanı değişikliğinin olduğu noktalarda kullanılır. Aşağıda yer alan denklemden yararlanılır:

$$h_L = \frac{1}{2g} k_L V^2 \quad (8)$$

h_L yersel yük kaybı (m)

k_L yük kaybı katsayısı

6.2. Toplam yük kaybı

Aşağıdaki denklem kullanılarak, (5) ve (6) ile hesaplanan hız tahminleri yaklaşık olarak karşılaştırılabilmektedir:

$$\frac{1}{n} = 4\sqrt{g\left(\frac{32}{D}\right)^{1/6}} \log_{10}\left(\frac{3,7D}{k}\right) \quad (9)$$

Burada

n Manning katsayısı

D Boru iç çapı (m)

k Borunun pürüzlülük (m)

Boru malzemelerine ait pürüzlülük katsayıları Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Farklı boru malzemeleri için pürüzlülük, Manning ve Kutter katsayıları

Malzeme	Pürüzlülük (k , mm)	Manning katsayısı (n)	Kutter katsayısı (m)
Asbestli çimento	0,025	0,011	0,12
Beton	0,3 – 3	0,013	0,20-0,35
Font	0,26	0,012	0,13
CTP	0,0015	0,009	0,12
Çelik	0,045	0,012	0,13

6.3. Boru pürüzlülüğü

Boru malzemelerine ait pürüzlülük katsayıları Tablo 4’te gösterilmiştir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2027a- 2017b).

Tablo 4. Boru malzemelerine göre pürüzlülük, Manning ve Kutter katsayıları

Malzeme	Pürüzlülük (k , mm)	Manning katsayısı (n)	Kutter katsayısı (m)
Asbestli çimento	0,025	0,011	0,12
Beton	0,3 – 3	0,013	0,20-0,35
Font	0,26	0,012	0,13
CTP	0,0015	0,009	0,12
Çelik	0,045	0,012	0,13

6.4. Doluluk oranı

Atıksu sistemleri en çok %50 doluluk oranı ile planlanmalıdır. Dairesel kesitlerde doluluk oranları konusunda aşağıda yer alan Denklem (10) ile Şekil 6 ile Şekil 7 kullanılmaktadır (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2027a- 2017b).

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{\theta - \sin\theta}{\theta} \right)^{2/3}$$

(10.a)

$$\frac{R_H}{R_{H,0}} = \frac{\theta - \sin\theta}{\theta}$$

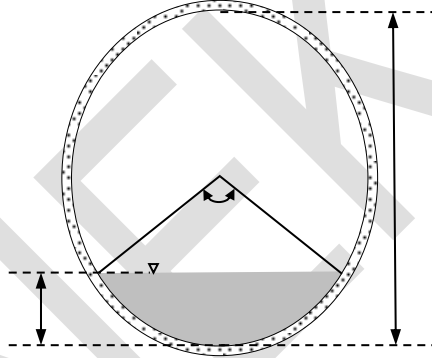
(10.b)

$$\frac{A}{Q_0} = \frac{1}{2\pi} (\theta - \sin\theta)$$

(10.c)

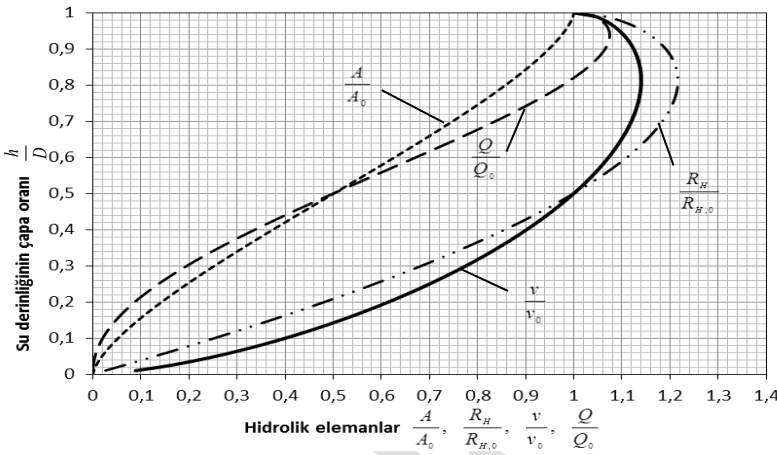
$$\frac{h}{D} = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{\theta}{2} \right)$$

(10.d)



Şekil 6. Dairesel kesit kısmi dolu akış özellikleri

θ	Su kesiti açısı (radyan).
D	Çap (m).
A_0	Tam dolu akış kesit alanı (m ²)
$R_{H,0}$	Tam dolu akış kanal hidrolik yarıçapı (m)
V_0	Tam dolu akış hızı (m/sn)
Q_0	Tam dolu akış debisi (m ³ /sn)
Q	Kanal debisi (m ³ /sn)
V	Kanal akış hızı (m/sn)
R_H	hidrolik yarıçap (m)
A	kesit alanı (m ²)
h	akış derinliği (m)



Şekil 7. Dairesel kesitli kanallarda hidrolik elemanlar

7. SONUÇ

Atıksu sistem planlamaları hem şehirleşme hem de endüstriyel atıkların uzaklaştırılması açısından oldukça önemlidir. Bu atıksuların çevresel boyutları açısından da habitata etkileri uzun vadeli olumsuz sonuçlara sebep olmaktadır.

Hidrolik hesaplamalar açısından gerekli görülen alanlar için planlamaların yapılması uzun vadeli ihtiyaçların karşılanması açısından önem kazanmaktadır. Bu hesaplamalarda kullanılacak parametrelerin belirlenmesi, malzeme özellikleri ve şartnamelere uygun projelendirmeler hem şehirleşme hem de sanayileşme planları bakımından önem taşımaktadır.

Atıksu sistemlerinin uzun vadeli çözümler üretilerek planlanması, kentsel altyapıların oluşturularak planlı yapılaşmaya da katkı sağlamaktadır. Aynı zamanda atıksu sistemleri hem olumlu çevresel etkiler bakımından hem de ülkelerin gelişmişlik düzeylerinin de bir göstergesidir.

8. KAYNAKLAR

- Erdemgil, N., Sırma, M., Yavuz, M. (1976). Su Getirme ve Kanalizasyon. Birsen Kitabevi Yayınları, İstanbul, 343 s.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2017a). Atıksu Toplama ve Uzaklaştırma Sistemleri Hakkında Yönetmelik, EK-1: Kanalizasyon Sistemlerinin Etüt, Planlama ve Projelendirilmesine İlişkin Teknik Esaslar, 52 s.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2017b). Yağmursuyu Toplama, Depolama ve Deşarj Sistemleri Hakkında Yönetmelik, EK: Yağmursuyu kanalizasyon sistemlerinin etüt planlama ve projelendirilmesine ilişkin usul ve esaslar, 71 s.
- MEB, Çevre Sağlığı Sıvı Atıkların İmhası (2011). https://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/S%C4%B1v%C4%B1%20At%C4%B1klar%C4%B1n%20İmhas%C4%B1.pdf (Erişim tarihi: 13.12.2024).
- Öztürk, İ. (2017). Atıksu Mühendisliği. Stilnet Basım, İSKİ Teknik Kitaplar serisi, İstanbul 583 s.
- Picallo R.M., Naves J., Anta J., Puertas J., Suárez J. (2016). Experimental and Numerical Analysis of Egg-Shaped Sewer Pipes Flow Performance, MDPI, 8, 587.
- Samsunlu, A. (1986). Su Getirme ve Kanalizasyon Yapıtlarının projelendirilmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, MM/ÇEV-86, EY, 97. İzmir.
- Şekerdağ, N. (2017). Su Getirme ve Kanalizasyon Problemleri. Nobel yayıncılık, Ankara, 291s.

EFFECTS OF STIFFENER LENGTH ON BEAM-TO-COLUMN CONNECTIONS IN STEEL STRUCTURES

Diego Andree VEGA SAMUDIO¹

Mehmet Fethi ERTENLİ²

Mehmet Haşim KISA³

1. INTRODUCTION

In steel structures, column-beam joints are critical points that directly affect the load-carrying capacity and stiffness of the structure. These joints are usually the most stressed parts under the effect of force, and excessive stresses occur, especially under high shear forces and bending moments. The use of stiffeners in these areas increases the stability of the connection by distributing the loads over a larger area and reduces local stress concentrations. In addition, stiffeners improve the rigid behavior of the members by preventing buckling of the column flange and stem and contribute to the overall durability of the structure.

The presence of stiffeners increases the moment capacity at the joints and strengthens the structure's resilience against unexpected loading situations. This is especially critical under dynamic loads such as earthquakes. In the literature, it is often emphasized that the use of stiffeners improves the mechanical behavior of joints and increases moment-rotation relationship (M-

¹ Graduate Student, Karabuk University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, ORCID: 0000-0002-7448-4445, diego.vega13@hotmail.com

² Asst. Prof., Karabuk University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, ORCID: 0000-0002-7310-8720, m.fethiartenli@karabuk.edu.tr

³ Asst. Prof., Karabuk University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, ORCID: 0000-0003-4769-2211, mhasimkisa@karabuk.edu.tr

ϕ) performance (Sağıroğlu, 2018; Akgönen & Güneş, 2017). For example, changing the dimensions and configurations of the stiffeners changes the ductility and energy absorption capacity of the joint, which in turn affects the overall performance of the structure (Özdemir et al., 2020). The stiffeners' effects on the earthquake performance of steel structures is also noteworthy. These elements help to maintain structural integrity by limiting plastic deformations in the joint regions (Uslu et al., 2021; Doğru & Akbaş, 2020). In addition, the use of stiffeners has been shown to provide higher moment capacity than conventional connection methods. İsmail et al. (2016) analyzed the effect of the length of column stiffeners on the performance of bolted end plate connections and reported that increasing this length significantly increases the moment capacity and initial stiffness. Haghollahi and Jannesar (2018) investigated the cyclic behavior of connections with different end plate sizes and stiffeners and showed that the presence of stiffeners increases the stiffness and strength of the connection. Studies by Abidelah et al. (2012) and Prinz et al. (2014) showed similar results, indicating that reinforced configurations can partially reduce ductility while increasing stiffness. In this context, Eldemerdash et al. (2012) investigated the effect of variations in stiffener length on the moment-rotation behavior of bolted joints with analytical models and presented a framework for design optimization. In addition, studies using FEM analyses play a critical role in understanding the complex mechanical behavior of bolted connections.

In engineering and academic studies, various methods such as experimental methods, Finite Element Analysis (FEA), Fuzzy Logic, Machine Learning, Artificial Neural Networks (ANN), Genetic Algorithms (GA), and parametric modeling are widely used, and these methods are applied independently or in an integrated manner to solve complex problems. Many studies are using these methods in literature (Ertenli and Köseoğlu,

2024; Battal Şal and Çubuk, 2022; Aydın et al., 2014; Ozalp and Esen, 2024; González et al., 2018; Yousefpour, 2017; Battal Şal et al., 2024). In this current parametric study, a finite element analysis program (ANSYS) was used as the fundamental method, analyses were performed, and findings were obtained.

The main objective in structural engineering is to ensure that the designed and constructed structures have sufficient stiffness, strength, and ductility. The length of the stiffeners used in the joint region of steel structures is an important parameter that shapes the moment-rotation behavior of bolted endplate steel joints. In this study, it is discussed that increasing the length of the stiffeners increases the moment capacity and stiffness of the connections but may have a potentially decreasing effect on the ductility. This information provided by numerical analysis allows for a safer and more durable design of steel structures.

2. MOMENT-RESISTANT CONNECTIONS

Moment-bearing connections can be formed in different types. One of the most widely preferred connection types is endplate moment-resistant connections. These connections are widely used in steel structures such as buildings and bridges due to their ability to transfer loads efficiently. Figure 1 shows a bolted steel endplate connection where some conventional components can be observed. The choice of the components that constitute the beam-column connection in steel structures directly affects the rotational and shear stiffness. Therefore, in recent years, the effect of each component on bolted end plate connections has been the subject of repeated investigations, either experimentally or numerically (Kövesdi et al., 2023; İsmail et al., 2016; Shi et al., 2008; Shi et al., 2007). This study investigates the effect of the variation in the length of the stiffener in the column on the stiffness of bolted end plate connections. Steel

Kövesdi, B. et al. (2023) performed a parametric numerical study using ABAQUS software to evaluate the effects of partial-length column stiffeners in bolted end plate connections of steel structures. The main objective of the study was to determine and compare the structural behavior of column-beam joints with full-length and partial-length stiffeners with lengths reduced by 10%-30%. From the results, it was concluded that partial stiffeners only affect the shear panel resistance component and do not affect the other components of the joint. Therefore, the researchers focused their studies on determining the damage mechanisms in the shear panel region. In Figure 2, it can be observed that in the shear plate region, in the case of partial-length stiffeners, no effective plastic joints are formed.

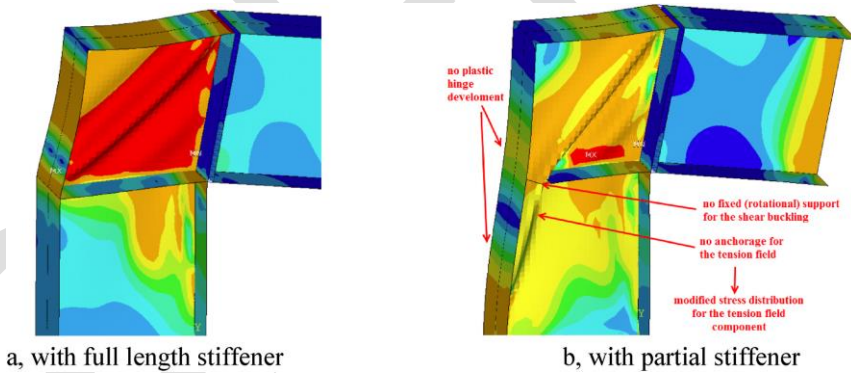


Figure 2. Bolted endplate joint simulation in ABAQUS (Kövesdi, B. et al., 2023).

3. FINITE ELEMENT ANALYSIS

This study presents a comprehensive parametric numerical analysis aimed at understanding the effect of column stiffener length, especially the transition from total length to partial length, on the moment-rotation ($M-\phi$) behavior of steel connections with bolted endplates. In the study, the mechanical behavior of the connections under various loading conditions is

simulated using finite element analysis software (ANSYS), which provides important insights for the optimum design of the stiffeners. The procedure performed consists of modeling and configuration of a calibration model, validation of the model by comparison with experimental findings, configuration and simulation of the remaining four models, and output and analysis of the results.

3.1. Calibration Model

The first step involved selecting an appropriate experimental model from existing literature to replicate within ANSYS Workbench. The chosen model for this project is based on the research presented by Shi, G. et al. (2007), specifically the SC1 specimen (flush type connection). Figures 3 to 5 show the column stiffeners, the arrangement of the bolts, the type of joint between the beam and the endplate, and the other components that constitute the connection. As can be seen in region A (100 mm above and 100 mm below the endplate), the column has the same thickness as the end plate.

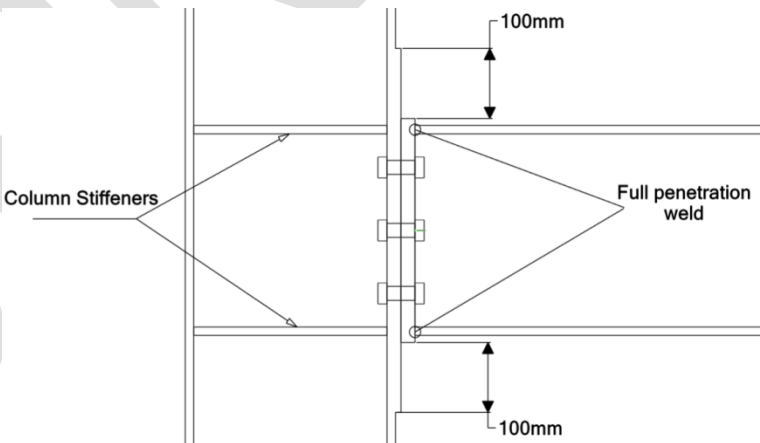


Figure 3. Joint components.

The dimensions of the cross-section of the beam are defined as follows: 300 mm for the depth, 8 mm for the web thickness, 12 mm for the flange thickness, and 200 mm for the flange width. For the column, the dimensions are the same except for the flange width, which is defined as 250 mm. As previously mentioned, the endplate and the specified zone of the column have the same thickness of 20 mm. The bolts have a diameter of 20 mm, and Figure 4 illustrates their placement within the connection. The thickness of the column stiffeners and the rest of the stiffeners are defined as 12 mm.

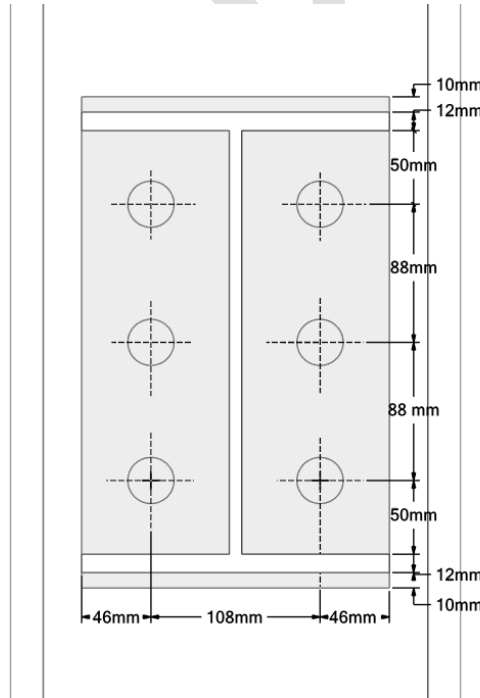


Figure 4. Bolt arrangement.

For the bolts, a trilinear elastic-plastic model was defined with a modulus of elasticity of 206 GPa and a yield stress equal to 995 MPa. The data points that were used to define the stress-plastic deformation relationship are shown in Table 1. A perfect

elastic-plastic model was defined for the endplate and the rest of the components, where the modulus of elasticity was defined as 204.2 GPa and 190.7 GPa and the yield stress as 363 MPa and 391 MPa, respectively.

Table 1. Stress-plastic strain definition for bolts.

Data Point	(1)	(2)	(3)
Stress (MPa)	995	1160	1160
Plastic Strain (%)	0	13.04	14.44

Using ANSYS SpaceClaim software, the modeling of the beam-column connection was performed. The details of the connection are shown in Figure 5. To optimize the model to reduce the number of finite elements, it was decided to cut it in the YX plane where symmetry exists (geometry, material orientation, loading, and response symmetries). A hexahedron mesh was defined for the bolts, the endplate/column/beam in the area close to the joint, and the column stiffeners a size of 5, 12, and 10 mm, respectively. Also, for the beam and column in the external area of the joint, a size of 30 mm was defined (Figure 6).

After the drawing and meshing step, it was necessary to define the interactions and behaviors of the different components within the model. This includes selecting appropriate contact types between the various components of the connection (e.g., endplate and column flange, bolt head, bolt hole). For the interaction between surfaces, ANSYS uses the augmented Lagrange formulation and the Multi-Point Constraint (MPC) method to simulate the contact behavior. In order to define contacts in ANSYS, the expected behavior of the contacts must be defined. Table 2 shows the type of contact defined in ANSYS.

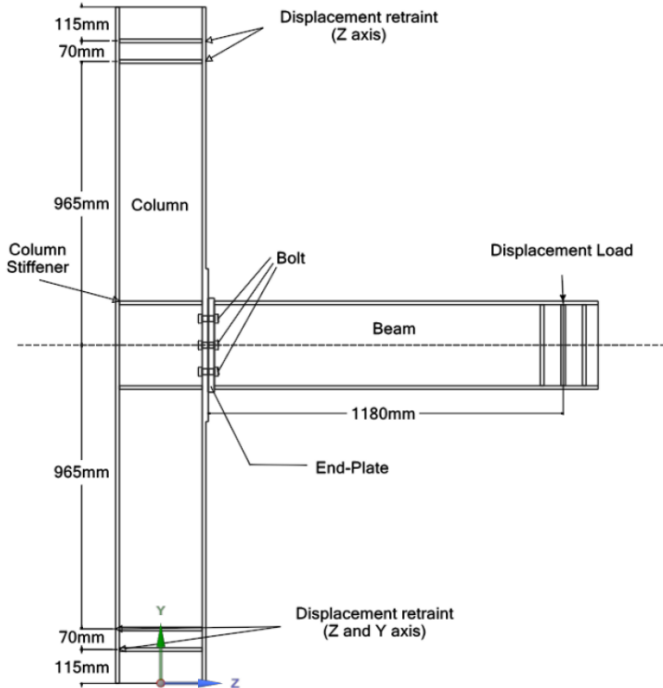


Figure 5. Model calibration geometry and loading arrangement.

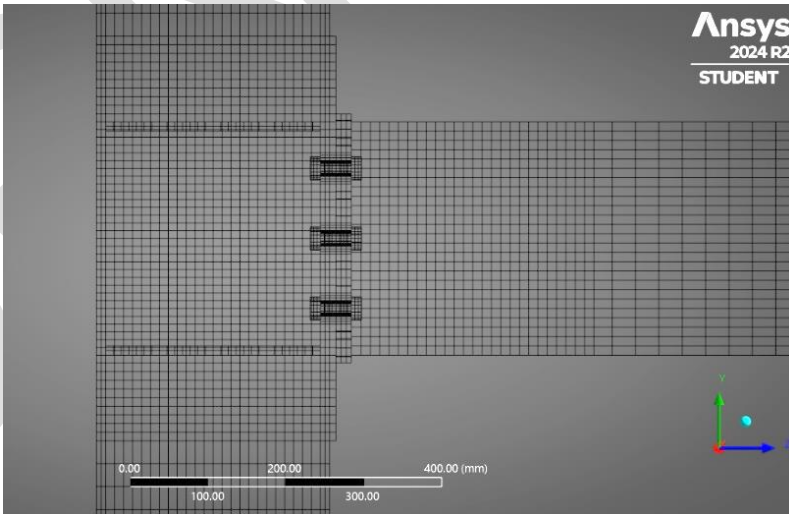


Figure 6. Connection mesh.

Table 2. Contact type definition in ANSYS.

Contact	Type
Stiffeners – Beam / Column	Bonded
Column – Endplate	Frictional (Coeff. = 0.44)
Endplate – Beam	Bonded
Bold shank – Bolt hole	Frictional (Coeff. = 0.20)
Bolt head/nut – Endplate / Column	Bonded

An essential part of performing a simulation is the correct setting of the boundary conditions, which should simulate the real conditions of the experimental specimen as closely as possible. To achieve this goal, the upper and lower zones of the column were constrained. In the lower zone, a displacement constraint was applied in the Y and Z axis, and in the upper section, only the displacement constraint for the Z axis was applied. The application of restriction with respect to the X-axis is not required for this case because a symmetry axis was applied with respect to this axis.

The expected behavior of these models is characterized by nonlinear responses involving both geometric and mechanical nonlinearity. To accurately determine the maximum capacity and maximum rotation of these connections, it is essential to employ a path-dependent approach. This requires the application of loads in the form of displacement, unlike the traditional experimental approach based on the application of force. The boundary conditions and the location of the load application can be observed in Figure 5.

3.2. Validation of the Calibration Model

Validation was performed by comparing the rotation-moment relationship ($M-\phi$) results of the simulated model and the experimental model presented by Shi, G. et al. (2008), as can be seen in Figure 7.

A comparison of the results obtained from the experimental specimen with those of the numerical model revealed that the maximum error in the moment was approximately 13%, while the error in the maximum capacity of the connection was -3.6%. Since the numerical and experimental analysis established a good agreement, it was concluded that this calibration model is suitable for reference.

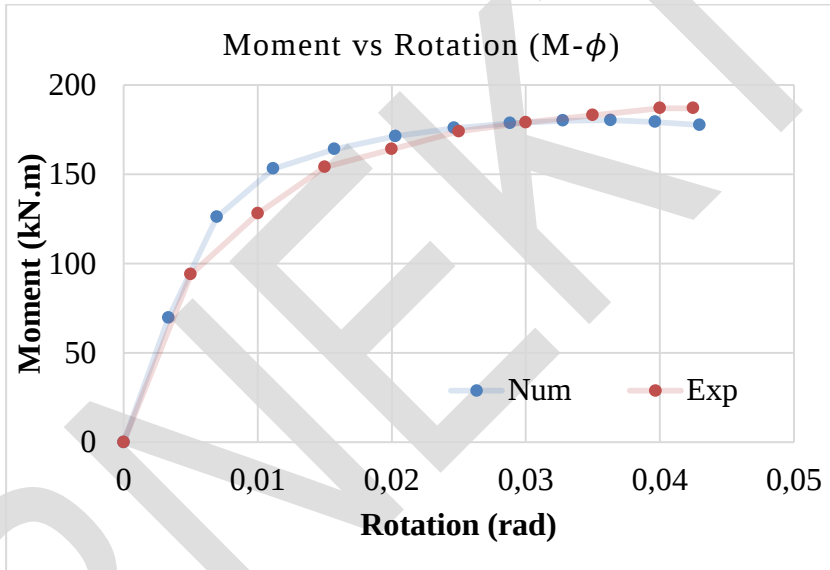


Figure 7. Comparison of moment rotation ($M-\phi$) of the experimental and numerical model.

4. PARAMETRIC STUDY

Within the scope of the study, the length of the stiffeners used in the column-beam connection zone was considered as a parameter. The stiffener lengths are analyzed as full length (extending completely between the flange and the web) and partial length. Following the validation of the calibration model, four additional models were developed: with partial-length stiffeners (75%, 50%, and 25% of the column depth) and one without stiffeners, as shown in Figure 8.

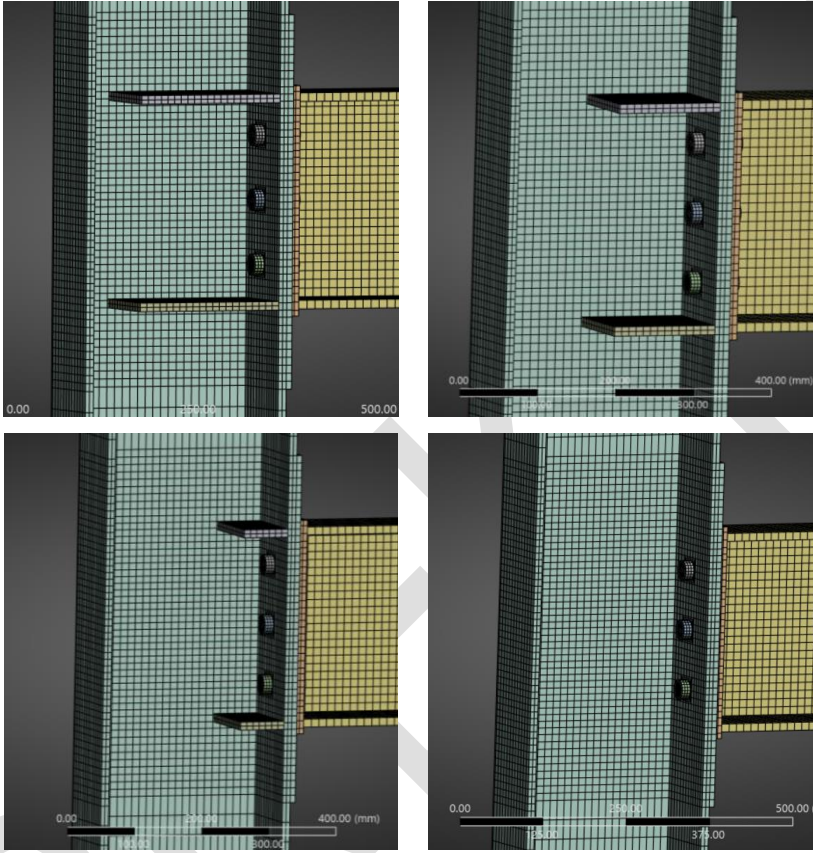


Figure 8. Connection models with varying stiffener lengths.

5. ANALYSIS OF THE RESULTS

As a result of the analysis, the main structural performance parameters of the connection, such as moment and rotational capacity and stiffness, were obtained.

The parametric analysis results revealed that the length of the column stiffness plate (stiffener) significantly affects the moment-rotation ($M-\phi$) behavior of steel connections with bolted face plates. The findings obtained within the scope of the study are analyzed in the following sections.

5.1. Moment and Rotational Capacity

The analyses showed that connections with longer column stiffeners exhibited moment capacities that were not significantly higher than connections with partial-length column stiffeners but significantly higher than those without stiffeners (Figure 9). This can be explained by the increased stiffness that longer stiffeners provide by spreading the applied loads over a larger area.

It was observed that the rotational capacity of the connections varies depending on the stiffener's length. Longer stiffeners increase the stiffness of the joint, resulting in less rotation of this region (Figure 9). This is critical in terms of increasing the resilience of structures against unexpected loads and reducing the risk of sudden collapse.

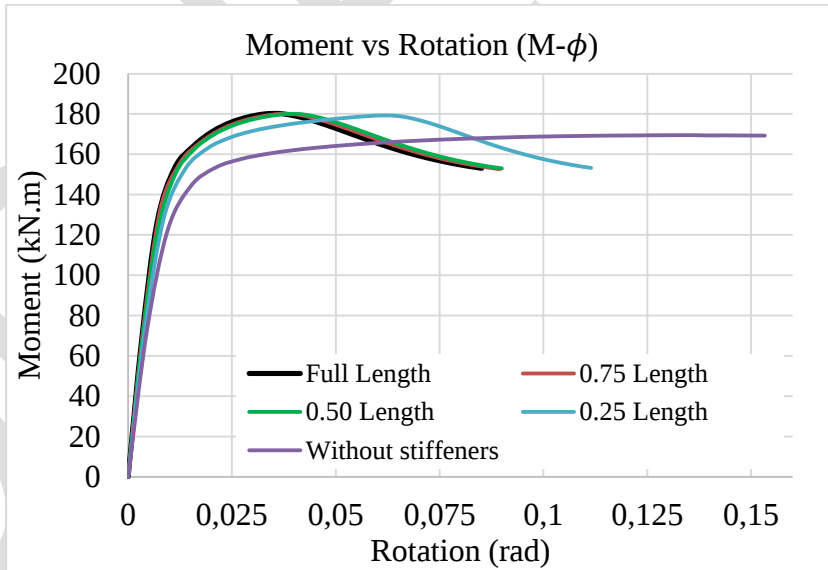


Figure 9. The moment-rotation (M-φ) relationship for specimens at the beam-column joint.

5.2. Connection Stiffness

The initial stiffness of the connections shows a positive relationship with the stiffener length. Connections with longer stiffeners exhibit a greater initial slope in the P- Δ curve, giving a more rigid response to the applied loads (Figure 10).

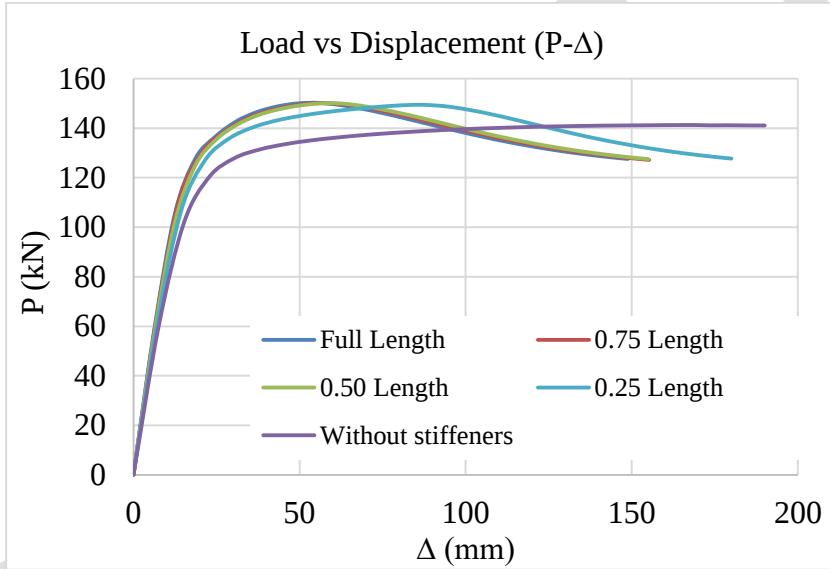


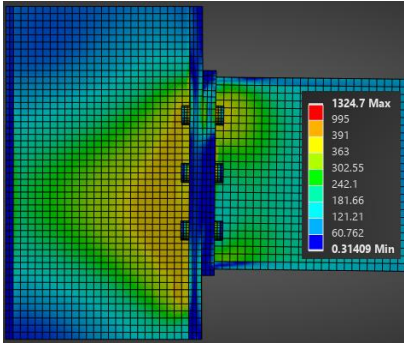
Figure 10. The load-displacement graphs for specimens at the beam end.

5.3. Failure Modes of Connections

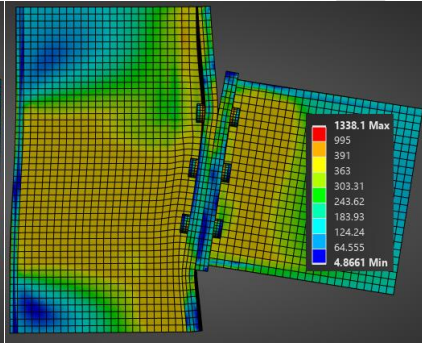
In the study, it was determined that different stiffener lengths affect the failure modes of the connections. While failure modes dominated by local buckling and shear effects were observed in connections with no or shorter stiffeners, failure modes such as yielding the endplate were observed in connections with longer stiffeners (Figure 11).

Yield State

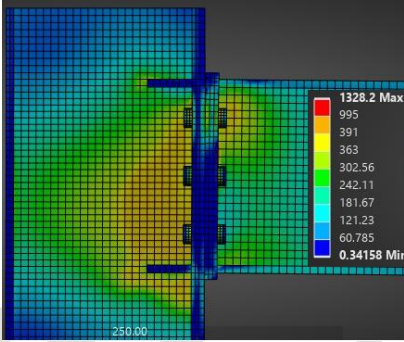
Maximum State



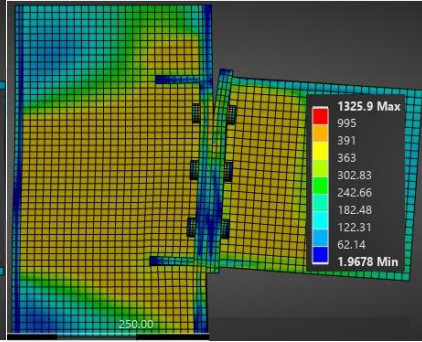
(a)



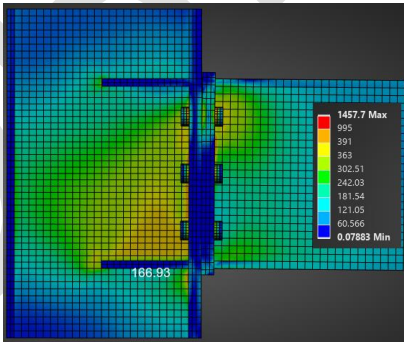
(b)



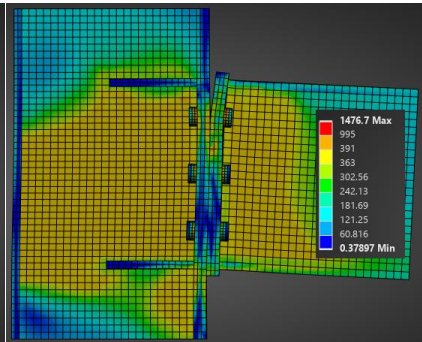
(c)



(d)



(e)



(f)

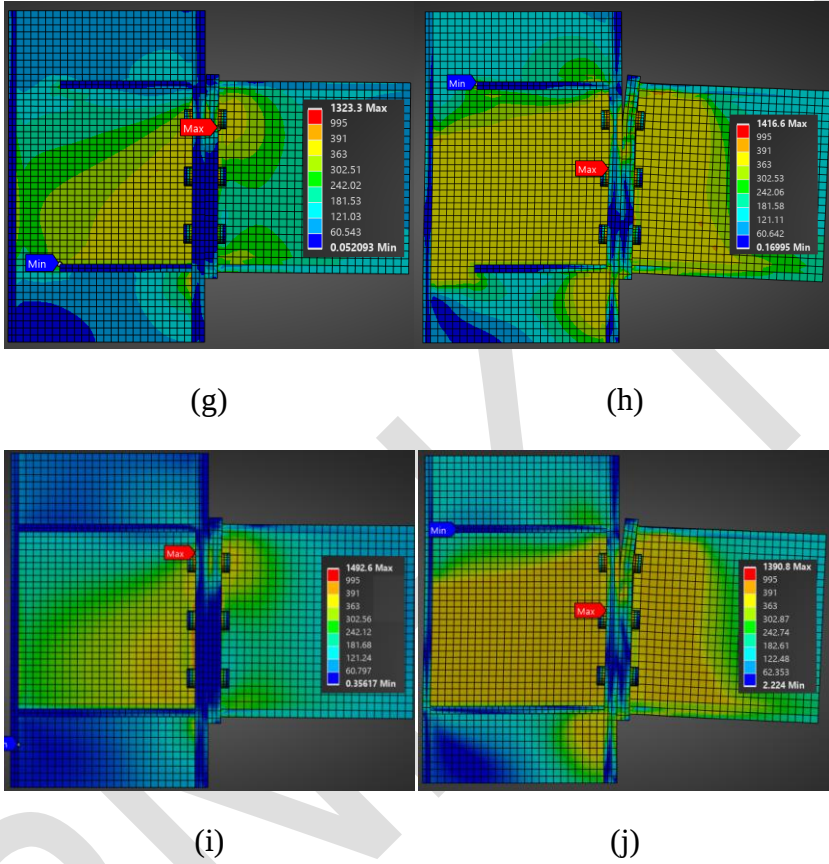


Figure 11. The specimens' equivalent stress states for yield and maximum points, respectively.

6. CONCLUSION

The pairs of forces caused by the moment effects on the beam section first act on the column flange where the beam endplate meets. Then, the forces are transferred to the flanges as shear forces with the help of bolts. After, it is transferred to the column web cross-section with the help of both direct and welded stiffeners. In the case of a full-length stiffener connection, the flexural capacity, including the left flange of the

column, is utilized. Therefore, the stiffness of the panel region against shear and bending becomes a determining factor concerning the moment capacity of the connection. As the capacity of the column and panel region increases, the damage in the joint is concentrated in the connected beam end region, and the behavior of the beam and bolts determines the loss of strength in the structure. In the numerical analyses performed to evaluate the behavior of these connections, the length of the stiffeners between the left and right flanges of the column (in the figures) is determined at certain ratios of the web height, and the effects of the stiffeners on the joint behavior are discussed. According to the findings obtained as a result of the analysis, the following conclusions were made.

- ❖ The stiffening of the panel region is significantly contributed by the stiffeners in the joint region. The beam end plate, which is relatively weaker, plays a role in determining the capacity of the connection with a stiffened panel area. In further loading steps, buckling of the beam web section occurs, reducing the bearing capacity of the structural system.
- ❖ Depending on their length, the stiffeners can spread the shear forces generated at the column flange by the pairs of forces exerted by the beam at the column flange across the entire panel plate to which they are welded.
- ❖ Increasing the length of the stiffeners prevents buckling of the flanges in the shear zone of the column connected to the beam, in other words, local buckling of the zone.
- ❖ The use of stiffeners in semi-rigid connections and the length of these ensures that the stress generated is

concentrated in the panel area. Otherwise, yield damage is observed in an expanded area.

- ❖ In semi-rigid connections, it is recommended to fully connect the flanges with stiffeners to ensure that the damage is limited in the panel area.
- ❖ It was found that the rotational capacity of the joint varies depending on the length of the stiffener used in the connection. It was observed that the rotations in the column flange increased when short stiffeners were used. In cases where no stiffeners were used, it was determined that the connection was subjected to larger rotational deformations in addition to the rotation in the beam due to damage to the column flange and deformations in the bolts. This indicates an increase in the ductility of the connection and shows that the model is consistent with the behavior expected in the literature. In addition, it was found that in the without stiffeners model, the rotations were concentrated in the column-beam joint region and in the regions of the column closest to the joint.
- ❖ In the models where stiffeners are used, distortions occur in the compression zones of the beam web at higher loading levels, but local distortions are not observed in the panel zone. On the other hand, it was found that local buckling also occurred in the panel region when without stiffeners.
- ❖ In the models where the stiffener length was reduced by 75%, it was observed that the moment capacity was maintained even at high displacements, although elongation occurred on the column web, beam end plate, and bolts. This has a positive impact on the performance of the joint elements when under load.

- ❖ In the absence of stiffeners, it was observed that the rotational deformations in the connection zone were significantly higher than in the other members. The main reason for this behavior is that distortions, especially in the column web and flange, adversely affect the connection performance. Local buckling in the column flange reduces the stiffness of the connection area, weakens the load transfer mechanism, and increases the rotational deformations at the connection point. In addition, it is understood that the distortions in the column web prevent the balanced distribution of loads in the connection zone, which directly affects the ductility capacity and overall stability of the connection. These results agree with similar studies in the literature and show that the lack of stiffness plates critically affects joint performance.

This parametric numerical study reveals that the stiffener length in the column is a critical parameter affecting the moment-rotation behavior of steel connections with bolted end plates. The findings indicate that optimization of the stiffener length can improve the performance of steel structural systems by regulating the stiffness, ductility, and moment capacity of the connections. These results provide important guidance for structural engineers in the design of steel structures.

7. REFERENCES

- Abidelah, A., Bouchair, A., & Kerdal, D. (2012). Experimental and analytical behavior of bolted end-plate connections with or without stiffeners. *Journal of Constructional Steel Research*, 76, 13-27. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.04.004>
- Akgönen, A. and Gunes, B. (2017). Finite element analysis of end-plate moment connections. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 17(2), 646-657. <https://doi.org/10.5578/fmbd.57564>
- Aydın, R., Yuksel, E., Yardımcı, N., Kısa, M. H., & Gokce, T. (2014). In-plane behaviour of beam-to-column connections of corrugated web I-sections. *Journal of constructional steel research*, 100, 183-196. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.04.013>
- Battal Şal, Ö., & Çubuk, K. (2022). Ulaştırma Projeleri Fizibilite Etütlerinde Bulanık Çok Kriterli Bir Değerlendirme Modeli. *Politeknik Dergisi*, 25(3), 1191-1199. <https://doi.org/10.2339/politeknik.881067>
- Battal Şal, Ö., Taştekin, E., & Akdoğan, B. (t.y.). Türkiye’de Motosiklet Şeridi Gerekliği ve Tasarım Önerisi. *Aksaray University Journal of Science and Engineering*, 8(2), 73-84. <https://doi.org/10.29002/asujse.1551693>
- Díaz, C., Victoria, M., Martí, P., & Querin, O. M. (2011). FE model of beam-to-column extended end-plate joints. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(10), 1578-1590. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.04.002>
- Doğru, S. and Akbas, B. (2020). Süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çelik çerçevelerin sismik enerji istemleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(3), 1111-1128. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.467172>

- Eldemerdash, M., Abu-Lebdeh, T., & Nasra, M. (2012). Finite element analysis of large capacity endplate steel connections. *Journal of Computer Science*, 8(4), 482-493. <https://doi.org/10.3844/jcssp.2012.482.493>
- Ertenli, M. F., & Köseoğlu, E. M. (2024). Geleneksel Bir Yapıdaki Ahşap Taşıyıcı Sistem Panelinin Yanal Yük Kapasitesinin Analizi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 16(1), 448-460. <https://doi.org/10.29137/umagd.1409739>
- González, N., Ortega, J., Gallardo, J., & Pittí, R. (2018, June). Recomendaciones Simplistas para el Desarrollo de Modelos Matemáticos de Elementos de Concreto Sometidos a Cargas Cercanas a la Falla. In *Memorias de Congresos UTP* (pp. 77-83).
- Haghollahi, A. and Jannesar, R. (2018). Cyclic behavior of bolted extended end-plate moment connections with different sizes of end plate and bolt stiffened by a rib plate. *Civil Engineering Journal*, 4(1), 200. <https://doi.org/10.28991/cej-030979>
- Ismail, R., Fahmy, A., Khalifa, A., & Mohamed, Y. (2016). Numerical study on ultimate behaviour of bolted end-plate steel connections. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13(1), 1-22. <https://doi.org/10.1590/1679-78251579>
- Kövesdi, B., Dunai, L., Pasternak, H., Li, Z., Oly, R., & Márai, P. (2023). Design of partial height web stiffeners in beam-to-column joints and influence of residual stresses induced by welding. *Results in Engineering*, 18, 101042. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101042>
- Sağiroğlu, M. (2018). Kiriş gövdesinde berkitmeli alın levhali birleşimlerin davranışının deneysel analizi. *Sakarya University Journal of Science*, 22(2), 502-508. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.310649>

- Shi, Y., Shi, G., & Wang, Y. (2007). Experimental and theoretical analysis of the moment–rotation behaviour of stiffened extended end-plate connections. *Journal of constructional steel research*, 63(9), 1279-1293. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.11.008>
- Shi, G., Shi, Y., Wang, Y., & Bradford, M. A. (2008). Numerical simulation of steel pretensioned bolted end-plate connections of different types and details. *Engineering Structures*, 30(10), 2677-2686. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.02.013>
- Uslu, F., Taşkın, K., & Saraçoğlu, M. (2021). Strength and ductility of concrete encased composite columns under axial force and moment. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(1), 333-344. <https://doi.org/10.21597/jist.789886>
- Ozalp, A. F., & Esen, I. (2024). Thermal buckling response of foam core smart sandwich nanoplates with electro-elastic and magneto-strictive layers. *Acta Mechanica*, 1-29. <https://doi.org/10.1007/s00707-024-04155-y>
- Özdemir, S., Baytak, T., Tosun, M., & Bulut, O. (2020). Çelik taban levhalarının bağlantı deliklerinde tasarıma aykırı geometrik değişimin gerilme dağılımına etkisi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*. <https://doi.org/10.31202/ecjse.655290>
- Prinz, G., Nussbaumer, A., Borges, L., & Khadka, S. (2014). Experimental testing and simulation of bolted beam-column connections having thick extended endplates and multiple bolts per row. *Engineering Structures*, 59, 434-447. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.10.042>

Trahair, N. S., Bradford, M. A., Nethercot, D., & Gardner, L. (2017). The behaviour and design of steel structures to EC3. CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781315273518>

Yousefpour, H., Gallardo, J. M., Helwig, T. A., & Bayrak, O. (2017). Innovative precast, prestressed concrete network arches: Elastic response during construction. Structural Concrete, 18(5), 768-780.
<https://doi.org/10.1002/suco.201600176>

EFFICIENT ENERGY USE IN THE PRODUCTION OF POZZOLANIC ADDITIVE CEMENT¹

Furkan TÜRK²

Ahmet YİĞİT³

Murat SAYDAN⁴

Ülkü Sultan KESKİN⁵

1. INTRODUCTION

Cement production is known to cause high energy costs and CO₂ emissions (Benhelal et al., 2012; Usón et al., 2013). In 2010, 2823 million metric tons (Mt) of CO₂ were emitted from cement production, accounting for about 5-8% of global CO₂ emissions. (Kajaste & Hurme, 2016; OECD, 2012). Since

¹ The authors are grateful to the Konya Cement AS, which made the production facility and laboratories suitable for this research. This study, presented as an abstract entitled “Yatay Valsli Değirmenlerde Üretilen Pozzolanik Katkılı Çimentonun Beton Performansına Göre Ekonomik Üretiminin Araştırılması” at the “IES’20 International Engineering Symposium | Engineering Applications in Industry (Virtual), December 5-6 and 10-13, 2020 at Izmir Democracy University, Izmir, Turkey”. This chapter is the full paper version of the above-mentioned “abstract paper”, expanded for publication as a book chapter.

² RA., Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Civil Engineering, Konya/Türkiye, Orcid: 0000-0002-8156-0354, fturk@ktun.edu.tr

³ PhD. Stu., Konya Technical University, Graduate Education Institute, Civil Engineering, Konya/Türkiye, Orcid: 0000-0002-4148-8036, yigitahm42@gmail.com

⁴ Dr., Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Civil Engineering, Konya/Türkiye, Orcid: 0000-0003-3598-468X, msaydan@ktun.edu.tr

⁵ Prof., Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Civil Engineering, Konya/Türkiye, Orcid: 0000-0002-9517-9116, uskeskin@ktun.edu.tr

cement production consumes high energy and threatens the environment, there are many studies in the literature on the use of substitutes in cement production, improved production facilities, alternative fuels, reduced CO₂ emissions, and efficient use of energy. (Akçaözoğlu & Güldür, 2017; Doğan & Demir, 2021; Ke et al., 2012; Naucér & Enkvist, 2009; Xu et al., 2012)

Various energy sources such as fossil fuels, electricity, alternative fuels are used in cement production (Albino et al., 2011). Although electricity accounts for 12% of the cement industry energy expenditure, it represents 50% of energy costs (CEMBUREAU, 2019). The total electrical energy consumed in various processes in cement production is 110-150 kWh/t, approximately 30% of which is used for raw material preparation and approximately 40% for final cement production by grinding cement clinker (Jankovic et al., 2004; Toprak et al., 2014). 50-60% of the cement production cost arises from the grinding process, and 20-40% of it is spent on electricity (Madloul et al., 2011). According to 2018 data, 40% of the world's electricity production is supplied from electricity production with coal. Moreover, 30% of the world's CO₂ emission is caused by coal electricity and heat generation (IEA, 2019).

It is possible to produce cement using different grinding techniques. Cement can be ground very finely in Horizontal roller mills (Horomill). These mills consume less energy than ball mills and provide capital costs savings (Buzzi, 1997; Marchal, 1995). In this study, an evaluation has been made on the compressive strength values of CEM II A M (P-L) 42 R type cement currently produced in Horomill located in the Konya Cement Factory. It has been investigated how the cement surface area's change affects compressive strength, standard consistency, setting time, particle size, and, consequently, energy consumption.

This research aimed to reduce energy consumption in cement production by preserving the compressive strength of concrete and cement, thus ensuring efficient energy use and reducing CO₂ emission. For this purpose, the separator revolution per minute (rpm) of the Horomill used in cement production was changed between 134-150, and cement with surface area in 3783-4470 cm²/g was produced. The optimum energy consumption has been investigated by comparing cement physical properties, energy consumption corresponding to hourly production amounts, and compressive strength.

2. MATERIALS AND METHODOLOGY

2.1. Insoluble residue in cement

The insoluble residue of cement was determined with hydrochloric acid and sodium carbonate according to TS EN 196 (Turkish Standards Institution, 2013). This method is a method in which the insoluble residue is determined by treating the cement with dilute hydrochloric acid solution and preventing soluble silicon dioxide precipitation as much as possible. The amount of insoluble residue was determined with equation 2.1.

$$IR = \frac{m_2}{m_1} \times 100 \quad (2.1)$$

IR: Insoluble residue, %

m₁: The amount of sample taken for testing, 1±0,005 g

m₂: Residual amount from the treatment of cement with the dilute hydrochloric acid solution, g

2.2. Blaine fineness

Blaine fineness (Bf) of cement was determined with an automatic Blaine device according to TS EN 196-6 (Turkish Standards Institution, 2020). Bf was determined with equation 2.2.

$$Bf = \frac{K}{\rho} \times \frac{\sqrt{e^3}}{\sqrt{1-e}} \times \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{0,1\eta}} \quad (2.2)$$

Bf: Blaine fineness, cm²/g

K: device constant

ρ: Density of cement, g/cm³

η: The viscosity of the air at the test temperature, Pa.s

t: Time, s

2.3. Particle size of cement

For the determination of 32 μm and 45 μm residual amounts of the samples, sieving was carried out by air entrainment for 3 minutes.

2.4. Standard consistency of cement

The standard consistency of cement has been measured with a manual Vicat device according to TS EN 196 (Turkish Standards Institution, 2017). The amount of water (ml) when the distance between the probe and the glass plate was 6±1 mm was recorded as the water demand for standard consistency.

2.5. Mechanical tests

Cement compressive strength tests were made according to TS EN 196 (Turkish Standards Institution, 2016), and concrete compressive strengths were made according to TS EN 12390 (Turkish Standards Institution, 2019). Mortar mixes were produced with CEN standard sand at a ratio of 1: 3 and with the water demand determined by the standard consistency test. The mixtures were taken into molds with dimensions of 40x40x160 mm, removed from the mold at the end of 24 hours, and placed in curing water at 20 ± 2 °C temperature. Compressive strengths of the prepared specimens for 2, 7, and 28 days were determined.

The mixtures prepared to determine the concrete compressive strength were put into molds of 150x150x150 mm in size. After 24 hours, they were removed from the molds and left in standard curing water. The compressive strengths of the concrete specimens for 3, 7, and 28 days were determined. Concrete mix proportions are shown in Table 2.1.

Table 2.1. Concrete mixing proportions

Materials	Type	Amount (kg/m ³)
Cement	CEM II/A 42,5R	339
Aggregate	0/4 mm	1005
	4/11,2 mm	207
	11,2/22,4 mm	620
	Total	1832
Superplasticizer		3,39
Water		165

3. RESULT AND DISCUSSION

3.1. Grinding and energy consumption

This study aims to determine the optimum working conditions according to the 28-day concrete compressive strength results of pozzolanic CEM II / A M (P-L) 42.5 R type cement produced in Horomill in Konya Cement Factory (Figure 3.1). Only the separator rpm was changed during production. Changing the separator rpm caused changes in hourly production amount and cement fineness. Types of cement produced by changing separator speed are given in Table 3.1, and their chemical analysis is given in Table 3.2.

Table 3.1. Hourly cement production and Blaine fineness according to separator speed

Sample	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
Rpm	150	148	146	144	142	140	138	136	134
Bf (cm ² /g)	4470	4312	4339	4285	4197	4121	4053	3813	3783
Production (t/h)	82	84	86	87	88	90	92	93	95

Table 3.2. Chemical analysis of the particulate raw material (% by mass)

Oxide compositions	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
SiO ₂	20,0	20,3	20,3	20,1	20,3	20,0	20,2	20,4	20,4
Al ₂ O ₃	4,8	4,9	4,9	4,8	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
Fe ₂ O ₃	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6	4,6
CaO	59,7	59,7	59,4	59,3	59,3	59,5	59,8	59,9	59,9
MgO	1,0	1,1	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
SO ₃	3,2	3,2	3,3	3,5	3,0	3,1	3,1	3,1	3,2
K ₂ O	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Na ₂ O	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Cl	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C ₃ A	5,0	5,2	5,1	5,1	5,2	5,1	5,2	5,2	5,3

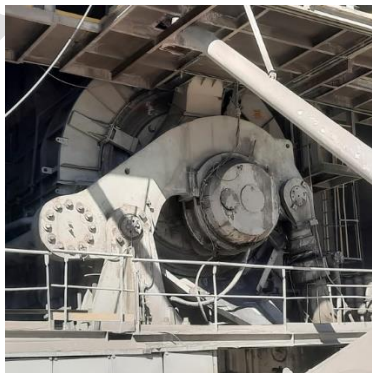


Figure 3.1. Horomill

The grinding process is a process that requires much energy and increases consumption by reducing the grain size. When the separator rpm was 150, cement with a fineness of 4470 cm²/g was obtained, and 34 kWh/t energy was consumed in this grinding. When the separator rpm was decreased, the cement fineness and the energy consumed diminish, whereas the hourly production amount increased, as expected. Energy consumption was determined with equation 3.1. The average energy consumption per ton is given in Figure 3.2.

$$E = \frac{x_2 - x_1}{m}$$

(3.1)

E: Energy consumption, kWh/t

x₁: The value initially read on the electrometer, kW

x₂: The value read on the electrometer at the end of grinding, kW

m: The amount of cement obtained after one hour of grinding, h/t

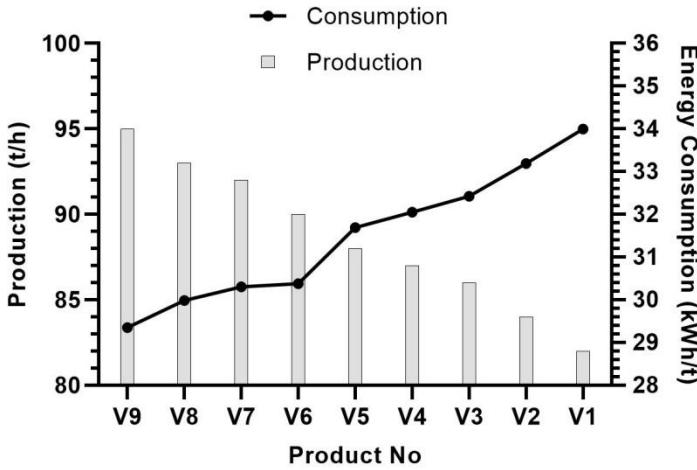


Figure 3.2. Energy consumption in cement production with different Blaine fineness

3.2. Physical properties of cement

The results of the experiment on the produced cement are summarized in Table 3.3. The Bf of the cement produced in 150 rpm, the highest revolution, was 4470 cm²/g, while the Bf of the cement produced in 134 rpm, which was the lowest revolution, was measured as 3783 cm²/g. When these results were examined, increasing the separator speed caused an increase in fineness and decreased production per hour.

When the 32-45 µm sieve results are examined, it is understood that the particle size increases with the increasing separator speed, and therefore the increasing surface area increases the water demand. As is known, chemical reactions in hydration slow down as the effective surface area decreases. In this study, it was determined that the initial setting times were prolonged in lower Bf cement. According to these results, this experimental study with different Bf cement is compatible with the literature (Kurdowski, 2014; Neville & Brooks, 1987; Taylor, 1997)

Table 3.3. Results of the experiments on the cement

Sample	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
Bf (cm²/g)	4470	4312	4339	4285	4197	4121	4053	3813	3789
32 μm (%)	0,6	0,9	0,8	1,2	1,2	2,0	2,5	3,2	5
45 μm (%)	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,7	0,7
IR (%)	20,0	20,3	20,3	20,1	20,3	20,0	20,2	20,4	20,4
Water demand (%)	29,9	29,8	29,5	29,3	29,3	29	29,1	29,3	29
Initial setting time (min)	175	180	180	175	195	195	200	200	215
Final setting time (min)	250	255	255	250	275	270	280	285	285

3.3. Compressive strength of cement

Cement compressive strength test results are summarized in Figure 3.3. As a result of this experimental study, cement with high surface area gained strength faster. In cement with a specific surface area of 4470 and 3783 cm²/g, there is a 31% difference in their 2-day strength. However, this difference decreased to 6% in 28 days' strength. Although the hydration mechanism is multifaceted, it is a fact that the specific surface area has a significant effect on early age strength (Celik, 2009; Frigione & Marra, 1976; Kuhlmann et al., 1985; Kurdowski, 2014).

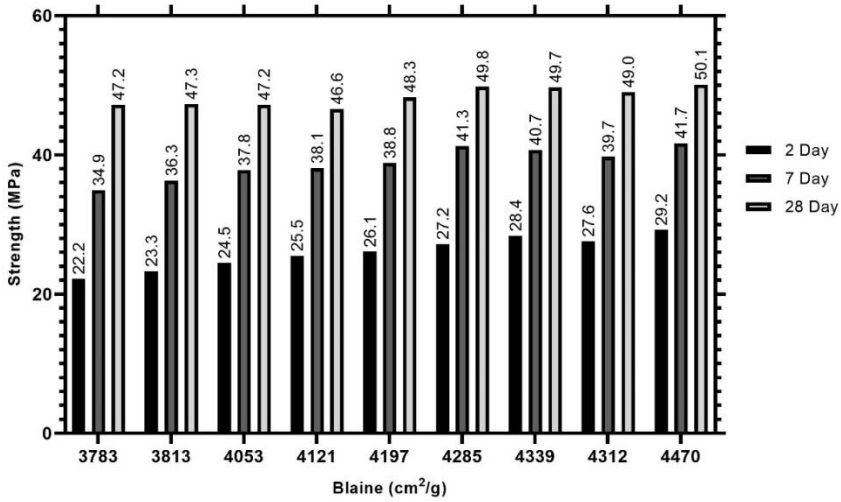


Figure 3.3. Compressive strength results of cement specimens

3.4. Compressive strength of concrete

The compressive strength results of concrete specimens produced with cement with different Bf are given in Figure 3.4. When the 3-day concrete compressive strength is examined, it is seen that concrete produced with cement with higher fineness gains more rapid strength, similar to cement tests. Fine-grained cement reacts faster with water due to high surface area, hydration speed increases, and the setting time is shortened. However, while grain fineness contributes at a high rate for early strength, it does not contribute the same rate to the late strength of concrete (Kavitha et al., 2014; Neville & Brooks, 1987; Saedi et al., 2019; Taylor, 1997).

When the compressive strengths of 28 days are examined, it is seen that the specimens produced with cement with a surface area of 3783 cm²/g gives only 6% lower strength than the specimens produced with cement with a surface area of 4470 cm²/g. However, it can be said that the 28-day compressive strength results of the specimens produced with cement in the

fineness range of 4050-4770 cm^2/g are roughly identical with a difference of 9 per thousand.

For high strength targets, over grinding of cement has not been observed to affect 28-day strength while increasing early age strengths. This situation can be explained as follows: As the grain size decreases, the number of particles that react increases, and this situation affects their early age strengths.

While approximately 34 kWh/t energy is needed to grinding pozzolanic CEM II A M (P-L) 42.5 R cement with a surface area of 4470 cm^2/g , 30.3 kWh/t energy is needed cement with a surface area of 4050 cm^2/g . Since the 28-day concrete compressive strength does not change, it can be said that unnecessary grinding increases the early age strength, there is no change in the 28-day strength, and this process causes an additional 3.97 kWh/t energy consumption. The 28-day concrete compressive strength and energy consumption are presented in Figure 3.5.

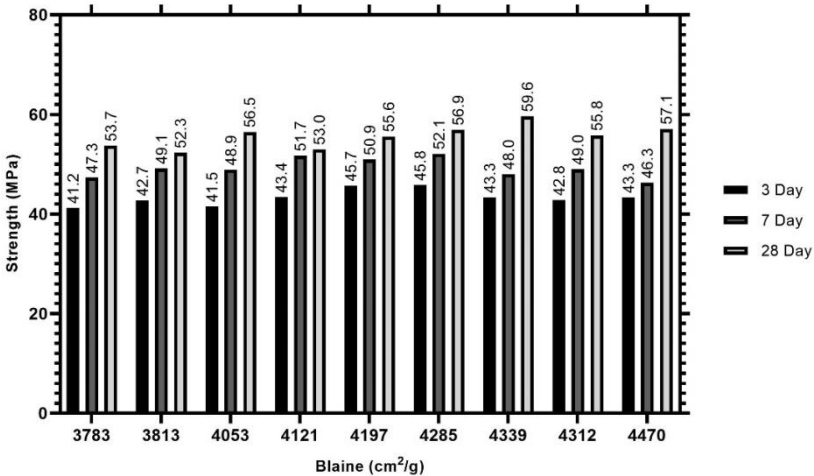


Figure 3.4. Concrete compressive strength

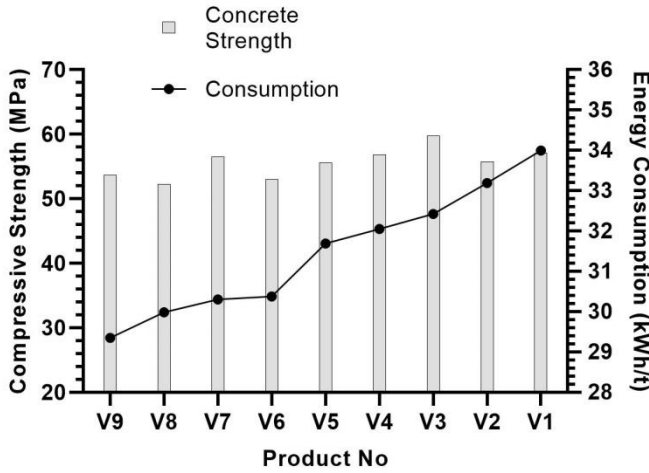


Figure 3.5. Energy consumption corresponding to 28-day concrete compressive strength

4. CONCLUSION

This study has been investigated to reduce energy consumption by maintaining concrete compressive strength in cement production. The following conclusion could be deduced from this study conducted in a cement production facility.

The increase in cement surface area causes an increase in strength at an early age, increased water demand, and a shortening of setting time.

When all other variables are kept constant, the 28-day concrete compressive strength of 4050-4400 cm²/g Bf specimens is almost identical. Considering that there is a difference of approximately 10 tons between the two products' hourly production values, it is revealed that the annual production capacity could be increased by approximately 150000 tons with identical energy consumption.

In the production of 1200000 tons of CEM II A M (P-L) 42.5 R cement per year, the operational targets could be reduced

from 4400 cm²/g to 4050 cm²/g; thus, energy cost could be reduced by 10%.

The equipment's economic life could be extended by avoiding excessive grinding, and maintenance costs could be reduced. Another advantage is the fact that production loss due to pollution could be minimized.

It could be concluded that the CO₂ emission resulting from electricity generation could be reduced, and energy savings could be achieved for a sustainable and clean environment in cement production, which already causes tremendous CO₂ emissions in the burning process.

5. REFERENCES

- Akçaözoğlu, K., & Güldür, E. Ş. (2017). Mikronize Kalsit ve Uçucu Kül Katkısının Beton Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17(2), 658–668. <https://doi.org/10.5578/fmbd.58620>
- Albino, V., Dangelico, R. M., Natalicchio, A., & Yazan, D. M. (2011). alternative energy sources in cement manufacturing.
- Benhelal, E., Zahedi, G., & Hashim, H. (2012). A novel design for green and economical cement manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 22(1), 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.09.019>
- Buzzi, S. (1997). The Horomill (R)-A new mill for fine communication. *ZKG INTERNATIONAL*, 50(3), 127.
- Celik, I. B. (2009). The effects of particle size distribution and surface area upon cement strength development. *Powder Technology*, 188(3), 272–276. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.05.007>
- CEMBUREAU. (2019). Acitivity Report 2019.
- Doğan, C., & Demir, İ. (2021). The Effect of Marble Powder and Fly Ash on Mechanical Properties of Cement Mortars. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(5), 1137–1145. <https://doi.org/10.35414/AKUFEMUBID.977280>
- Frigione, G., & Marra, S. (1976). Relationship between particle size distribution and compressive strength in portland cement. *Cement and Concrete Research*, 6(1), 113–127. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(76\)90056-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(76)90056-9)
- IEA. (2019). Global Energy & CO2 Status Report.

- Jankovic, A., Valery, W., & Davis, E. (2004). Cement grinding optimisation. *Minerals Engineering*, 17(11–12), 1075–1081. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.06.031>
- Kajaste, R., & Hurme, M. (2016). Cement industry greenhouse gas emissions - Management options and abatement cost. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4041–4052. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.055>
- Kavitha, S. P., Guruprasath, M., & Tangirala, A. K. (2014). Developing a soft sensor for fineness in a cement ball mill. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 3, 1019–1025. <https://doi.org/10.3182/20140313-3-IN-3024.00211>
- Ke, J., Zheng, N., Fridley, D., Price, L., & Zhou, N. (2012). Potential energy savings and CO₂ emissions reduction of China's cement industry. *Energy Policy*, 45, 739–751. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.036>
- Kuhlmann, K., Ellerbrock, H. G., & Sprung, S. (1985). Particle size distribution and properties of cement. Part I: strength of Portland cement. *ZKG International Cement-Lime-Gypsum*, Edition B, 38(4).
- Kurdowski, W. (2014). *Cement and Concrete Chemistry*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7945-7>
- Madloul, N. A., Saidur, R., Hossain, M. S., & Rahim, N. A. (2011). A critical review on energy use and savings in the cement industries. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 15, Issue 4, pp. 2042–2060). Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.005>
- Marchal, G. (1995). FCB breaks into Asian market with HOROMILL®. *World Cement*, 26(9), 22–25.

- Naucélér, T., & Enkvist, P.-A. (2009). Pathways to a low-carbon economy: Version 2 of the global greenhouse gas abatement cost curve. McKinsey & Company, 192(3).
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (1987). Concrete technology. Longman Scientific & Technical England.
- OECD, O. (2012). Environmental Outlook to 2050. <https://doi.org/10.1787/9789264122246-en>
- Saedi, M., Behfarnia, K., & Soltanian, H. (2019). The effect of the blaine fineness on the mechanical properties of the alkali-activated slag cement. Journal of Building Engineering, 26, 100897. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100897>
- Taylor, H. F. W. (1997). Cement chemistry (Vol. 2). Thomas Telford London.
- Toprak, N. A., Altun, O., Aydoğan, N., & Benzer, H. (2014). The influences and selection of grinding chemicals in cement grinding circuits. Construction and Building Materials, 68, 199–205. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.079>
- Turkish Standards Institution. (2013). TS EN 196 Method of testing cement - Part 2: Chemical analysis of cement.
- Turkish Standards Institution. (2016). TS EN 196 Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength.
- Turkish Standards Institution. (2017). TS EN 196 Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness.
- Turkish Standards Institution. (2019). TS EN 12390 Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens.

- Turkish Standards Institution. (2020). TS EN 196 Methods of testing cement - Part 6: Determination of fineness.
- Usón, A. A., López-Sabirón, A. M., Ferreira, G., & Sastresa, E. L. (2013). Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 23, pp. 242–260). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.024>
- Xu, J. H., Fleiter, T., Eichhammer, W., & Fan, Y. (2012). Energy consumption and CO₂ emissions in China's cement industry: A perspective from LMDI decomposition analysis. *Energy Policy*, 50, 821–832. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.08.038>

İNŞAAT VE YIKINTI ATIKLARININ BETONDA KULLANIMI ÜZERİNE BİR İNCELEME: TÜRKİYE ÖRNEĞİ

Rukiye KOÇKAR TUĞLA

1. GİRİŞ

Dünyanın, canlıların güvenle uzun yıllar yaşayabileceği bir yer olarak kalması için korunması gerekmektedir. Artan nüfus oranına paralel olarak yaşanan sıkıntılara karşı hem küresel hem de bölgesel anlamda birçok önlem alınmaktadır. Nüfus oranındaki artış ve buna bağlı olarak kentsel alanda yaşama isteği yapı stoğunda ciddi artışa neden olmuştur. Bu artış beraberinde yapısal atıklar sorununu doğurmuştur. Atıklar konusu dünyanın korunumu için üzerinde durulması ve önlem alınması gereken problemlerin başında gelmektedir.

Türkiye’de mevcut olan ve yeni inşa edilen yapıların büyük bir çoğunluğu betonarme malzemeden üretilmiştir. Betonarme yapıların inşasında hazır beton kullanılmaktadır. Türkiye Hazır Beton Birliği verilerine göre 2023 yılında Türkiye’de 610 adet hazır beton firması ve 1150 adet hazır beton tesisi bulunmaktadır. Bu firmalar tarafından 2023 yılında toplam 115 milyon m³ hazır beton üretimi yapılmıştır. Yine aynı yıl kişi başı hazır beton üretimi miktarı ise 1,35 m³/kişi/yıl olmuştur (THBB, 2023). Betonarme yapılar ortalama 50 yıl ömre sahiptir. Eskiyen ve dayanım kaybeden yapılar kentsel dönüşüm projeleri kapsamında yıkmakta yerine yeni betonarme yapılar yapılmaktadır. Kentsel dönüşüm yıkımları sırasında betonarme yapılardan inşaat ve yıkıntı atıkları: “İYA” (Construction and Demolition Waste-CDW) denilen büyük miktartlı atıklar oluşmaktadır. Kurallarına göre inşa edilmeyen yapıların

depremler sonrasında göçtükleri ve bu göçüklerin inşaat yıkıntı atıklarına sebep oldukları bilinmektedir.

Yakın zamanda Türkiye'nin güneyinde Kahramanmaraş ili Pazarcık ve Elbistan ilçeleri merkezli iki büyük ($M_w = 7.7$ ve $M_w = 7.6$ büyüklüğünde) deprem meydana gelmiştir. Kahramanmaraş Depremleri olarak bilinen bu büyük depremlerde 37.984 binanın yıkıldığı raporlanmıştır (AFAD, 2023). Yıkılan yapıların enkazı bir çevresel problem oluşturmuş ve çözüm arayışlarına başlanmıştır. Yapılan bilimsel araştırmalar ile Kahramanmaraş Depremleri sonrası 350-580 milyon ton inşaat ve yıkıntı atığı (İYA) olduğu belirtilmiştir. Bu atıkların yaklaşık 38 milyon tonu betonarme atığı sınıfında yer almıştır (Doğdu ve Alkan, 2023). Başka bir araştırmada ise yıkıntı atık miktarının, yaklaşık olarak 117 milyon ton ile 216 milyon ton arasında olduğu belirtilirken (Öztürk, 2023), bir diğer araştırmada atıkların kütsel olarak 97 milyon ton ve hacimsel olarak yaklaşık 120 milyon m^3 olduğu ifade edilmiştir (Temelli vd., 2023). Hatay ili özelinde ise yaklaşık 40 milyon ton kütsel ağırlığa sahip inşaat yıkıntı atığının olduğu açıklanmıştır (Temelli vd., 2023). İnşaat yıkıntı atıklarının büyük çoğunluğunu beton oluşturmaktadır. Ayrıca İYA'ların içinde beton haricinde kagir malzeme atıkları, metaller, camlar, mobilya parçaları gibi malzemeler ve asbest, kurşun gibi insan sağlığına zararlı bazı maddeler de bulunmaktadır (Temelli vd., 2023). Kütsel olarak sınıflandırıldığında atıkların yaklaşık %1,5'ini sağlığa zararlı tehlikeli maddelerin; %17'sini taş ve toprak gibi malzemelerin; %22'sini ahşap ile bitümlü malzemelerin ve %59'unu beton, tuğla, seramik ile kiremit gibi geri dönüşüm ihtimali olan malzemelerin oluşturduğu anlaşılmaktadır (Ramos ve Martinho, 2023).

Araştırmalara göre inşaat ve yıkıntı atığı miktarında ciddi bir artış görülmektedir. Bu atıkların çevresel sorun oluşturmaması için atık yönetimi konusu oldukça önemsenmektedir. Atık

yönetimine göre, deprem sonrası oluşan atıkların öncelikle bulundukları ortamdan kaldırılması, geçici depolama alanlarına götürülmesi, bu alanlarda atıkların ayrıştırılması ve mümkünse yeniden kullanımı ile geri dönüşümünün sağlanması, diğer atıkların ise tehlikelilik seviyesine göre ilgili yönetmelik kuralları dikkate alınarak bertarafının yapılması gerekmektedir (İTÜ, 2023). Ayrıca atıkların toplanma veya depolama alanlarına götürülmesi esnasında oluşan toz partiküllerinin insan sağlığına ve depolama alanlarında da tarımsal alanlara zarar vermemesi gerekmektedir. Bu işlemler esnasında işçi sağlığı ve iş güvenliği kurallarına dikkat edilmesi önemlidir (İTÜ, 2023).

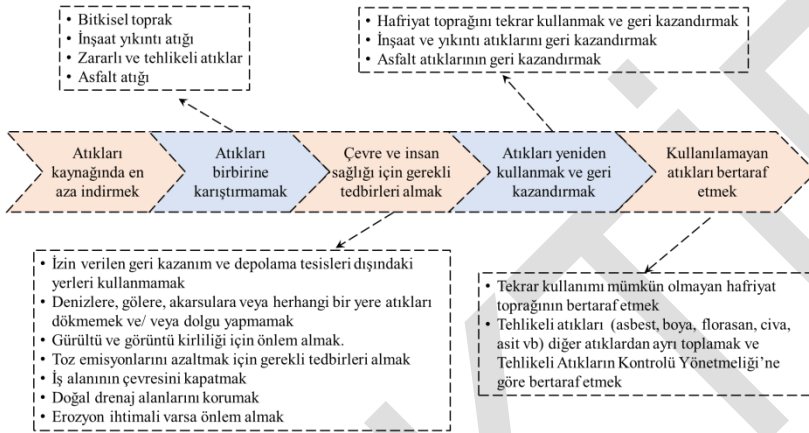
Çevresel etki, canlı sağlığı ve ekonomik açıdan bu atıkların değerlendirilmesi, sürdürülebilir bir işleyişe dahil edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada inşaat ve yıkıntı atıklarının Türkiye’de tekrar kullanımı konusu ele alınmış; beton atıklarının, beton içinde kullanımı irdelenmiştir. Bu kapsamda yapılan araştırmalar detaylıca incelenmiş, beton atıklarının beton içinde tekrar kullanımının sağladığı ekonomik ve çevresel katkı araştırılmıştır. Çalışma sonucunda Türkiye’de atık betonların nasıl değerlendirilebileceği konusunda öneriler sunulmuştur.

2. BETON ATIKLARI VE ATIK YÖNETİMİ

Atıklar, inşaat işleri sonrasında ve/veya yıkıntılar sonrasında karşımıza çıkan istenilmeyen ve çevre kirliliğine sebep olan maddelere verilen isimdir. İnşaat atıkları; bina, köprü, yol, baraj, tünel vb. her türlü alt ve üst yapının inşası sırasında ortaya çıkan atıkları ifade eder. Yıkıntı atıkları ise; her türlü alt ve üst yapının onarım ve güçlendirme çalışmaları gibi tamirata, tadilatı veya tamamen yenilenmesi, yıkımı veya bir doğa olayı sonucunda yapının yıkılması ile ortaya çıkan atıkları ifade etmektedir (Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği, 2004).

İnşaat ve yıkıntı atıkları sonucunda birçok farklı atık maddenin oluştuğu bilinmektedir. Bu atıkların büyük bir kısmını beton atıkları oluşturmaktadır (Ramos ve Martinho, 2023). Beton; su, bağlayıcı malzeme (genelde çimento), agrega ve bir takım kimyasal ve/veya mineral katkıları kullanılarak elde edilen, günümüzde yaygın olarak kullanılan betonarme yapıların ana girdi maddesidir. Betonarme yapıların inşaları ve yıkıntıları sonrası atıl durumda olan beton bileşenleri beton atığı olarak ifade edilmektedir.

İnşaat ve yıkıntı atığı grubunda yer alan beton atıklarının yönetimi katı atık yönetimi gibi düşünülmektedir. Atık yönetimi prosedürü basit anlamda, atıkların azaltılması, bu mümkün değilse atıkların yeniden kullanımı ile geri dönüşümünün sağlanması, geri kalan kısımlarının ise depolama alanlarında toplanması şeklinde açıklanabilir. Türkiye’de 2004 yılında çıkarılan “Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği” dikkate alınarak hazırlanan ve Şekil 1’de gösterilen iş akışı Türkiye’de inşaat ve yıkıntı atıkları yönetiminin temel kurallarını ve atık yönetimi için uygulanan döngüyü basitçe özetlemektedir. Bu yönetmeliğe göre atık yönetimi planlaması görevi mülki idarelere bırakılmıştır; olası doğal afetlere karşı mülki amirlerin önceden atık yönetimi planı yapmaları gerekmektedir. Bu planlama ile mülki amirlerin kendi yönetimlerinde bir kriz merkezi oluşturmaları, burada oluşabilecek atık miktarının belirleme çalışmaları yapmaları, bu atıkların nereye, nasıl taşınacağını planlamaları ve atıkların geri dönüşümleri için gerekli girişimleri yapmaları ve konuyu ilgili bakanlığa bilgilendirmeleri gerekmektedir (Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği, 2004).



Şekil 1. İnşaat ve yıkıntı atıkları yönetiminin temel kuralları

3. BETONLARIN ATIKLARININ GERİ DÖNÜŞÜMÜ

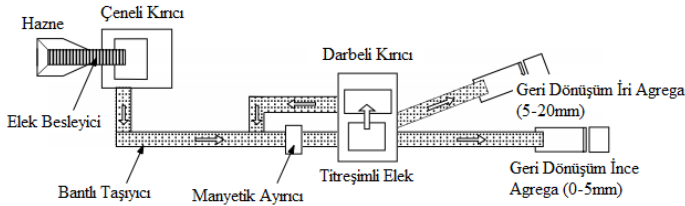
İnşaat ve yıkıntı atıkları sonucu oluşan betonların geri dönüşümü ve tekrar kullanılması sürdürülebilirlik kavramı açısından önemlidir. Betonun sürdürülebilir bir yapı malzemesi olması; bunun yanında beton üretilirken, kullanımı süresince ve sonrasında oluşan çevresel sorunların azaltılması bakımından birçok çalışma yürütülmektedir. Yapılan çalışmalarda beton atıkları, geri dönüştürülerek doğrudan beton içerisinde kullanılmaktadır. Geri dönüştürülmüş beton atıklarının beton içerisinde genellikle agrega olarak kullanıldığı görülmektedir. Buna ilaveten çimento üretiminde de bu atıkların değerlendirildiği bilinmektedir. Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği'nde (2004) belirtildiği gibi hafriyat toprak atıklarının kimyasal ve/veya pişirilebilirlik özellikleri uygun olduğu takdirde çimento üretiminde kil hammaddesi olarak kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalarda Kahramanmaraş Depremleri sonrasında çimento hammaddesi olarak

kullanılabilecek malzemelerin toplam kütlesi 57 milyon ton olarak belirlenmiştir (Temelli vd., 2023).

Bu çalışma kapsamında beton atıklarının Türkiye’de geri dönüşümü incelenmiştir. Beton atıklarının, beton üretiminde kullanımını konu edinen çalışmalar irdelenmiş ve beton atıklarının nasıl değerlendirildiği alt başlık altında detaylıca verilmiştir.

3.1. Türkiye’de Beton Atıklarının Değerlendirilmesi

Beton atıklarının değerlendirilmesi amacıyla Türkiye’de yapılan bilimsel çalışmalar incelendiğinde genellikle beton atıklarının beton içerisinde geri dönüştürülmüş agrega olarak kullanıldığı görülmektedir (Alghader vd., 2023; Aydın vd., 2021; Kılıç ve Gök, 2021; Demirel ve Şimşek, 2014; Korkut ve Şimşek 2021; Yentimur vd., 2022). İnşaat ve yıkıntı atıklarının artması ve bu atıkları değerlendirilme çabaları bilim insanlarını geri dönüştürülmüş beton agregaları kullanımına yönlendirmiştir. Ayrıca doğal agrega çıkarma maliyetinin yüksek olması ve olumsuz çevresel etkileri sebebiyle araştırmalarda geri dönüşüm agregalarının kullanımı tercih edilmektedir (Aligholi ve Yıldırım, 2023). Fakat atık betonların agrega olarak kullanılması için bazı geri dönüşüm işlemlerinin de uygulanması gerekir. Geri dönüşüm agregaları da tıpkı doğal agregalar gibi kırıcılar (çeneli veya darbeli) kullanılarak üretilmektedir. Kırıcılardan geçen inşaat ve yıkıntı atıkları daha sonra elekler kullanılarak istenilen boyutta hazırlanmaktadır (Yavan ve Bozbey, 2023). Atıkların geri dönüşüm agregası olarak işlenmesi sürecini gösterir temel bir proses örneği Şekil 2’ de verilmiştir.



Şekil 2. Geri dönüşüm agregası üretimi için uygulanan örnek bir proses (Eguchi vd., 2007)

Yapılan araştırma sonucunda, beton atıklarından elde edilen geri dönüşüm agregaları/atık beton agregaları farklı tür özel betonlar içinde de kullanılmıştır. Silindirle sıkıştırılmış beton (Kılıç ve Gök, 2021) ve kendiliğinden yerleşen beton (Alghader vd., 2023) atık beton agregalarının kullanıldığı özel betonlara örnek verilebilir. Bunun yanında bazı çalışmalarda beton üretiminde kullanılacak atık beton seçiminde hassas davranılmış ve belirli bir özelliği kriter olarak atık beton seçimi yapılmıştır. Örneğin yaşı ve basınç dayanım sınıfı (C30 gibi) belli olan (Demirel ve Şimşek, 2014) veya silindirle sıkıştırılmış (Kılıç ve Gök, 2021) gibi özel betonlardan elde edilen atık betonlar tercih edilmiş; bu atık betonlardan elde edilen agregalar kullanılarak beton tasarımları yapılmıştır.

İncelenen çalışmalarda atık betonların ince malzeme boyutuna getirildiği ve mineral /toz katkı malzemesi olarak kullanıldığı da görülmüştür. Atık betonlar belli mm boyuta sahip olacak şekilde işleme tabi tutulmuş ve toz haline getirilmiştir. Bu malzemelere çalışmalarda atık beton tozu denilmiştir (Ucuzcu, 2010; Koçkar Tuğla, 2020). Atık beton tozunun bağlayıcı malzemeye ikame olarak kullanıldığı (Koçkar Tuğla, 2020) ve farklı puzolanlar ile atık betonun birlikte kullanıldığı (Ucuzcu, 2010) farklı çalışmalar bulunmaktadır.

Çalışmalardan anlaşıldığı üzere atık betonun, beton içinde tekrar kullanımı hem kaba hem ince malzeme şeklinde

olmaktadır. Atık betonun, beton üretimi için sürdürülebilir bir malzeme olup olmadığı üretilen yeni betonlara yapılan taze ve sertleşmiş beton deneyleri sonucunda anlaşılmaktadır. Uygulanan taze ve sertleşmiş beton deneyleri, üretilen betonun türüne göre değişiklik göstermektedir. Kendiliğinden yerleşen betonlar ve silindire sıkıştırılmış betonların üretimi için gerekli olan özel deneylerin haricinde; atık beton kullanılarak üretilen betonlar için genel olarak slump deneyi ve basınç dayanımı testi yapılmıştır; çalışmanın kapsamına göre eğilmede çekme dayanımı, su emme, birim hacim ağırlık, ultrases geçiş hızı (UPV) ve elastisite modülü gibi deneylere de yer verilmiştir. Ayrıca üretilen betonların sertleşmiş beton özelliklerini tespit etmek için sayısal modellemelerde kullanılmıştır (Ulucan, 2024). Atık beton kullanılarak yapılan çalışmalarda betonların genellikle normal su içinde kür edildiği (Alghader vd., 2023; Koçkar Tuğla, 2020; Aydın vd., 2021) fakat kirece doymun su içinde kür edilen betonların olduğu da anlaşılmıştır (Kılıç ve Gök, 2021).

Araştırmalar sonucunda elde edilen bilgilere göre, atık beton kullanılarak üretilen betonlarda beton karışım suyunda artış (Demirel ve Şimşek, 2014) görülmüştür. Beton içinde atık beton kullanımının işlenebilirliği olumsuz etkilediği (Aydın vd., 2021); basınç dayanımı (Koçkar Tuğla, 2020) ve UPV değerlerini (Alghader vd., 2023; Kılıç ve Gök, 2021); dinamik elastisite modülünü ve birim hacim ağırlığı azalttığı; yüzey aşınma, beton boşluk hacmi ve su emme değerlerini artırdığı (Kılıç ve Gök, 2021) anlaşılmıştır. Fakat dayanım sınıfı yüksek atık betonlar kullanılarak üretilen betonların basınç dayanımlarının kontrol numunesi değerinden fazla saptmadığı görülmüştür. Bu sebeple beton içinde kullanılan atık betonların dayanım sınıfının deney sonuçlarını etkilediği düşünülmektedir (Alghader vd., 2023). Bu sonuçlara göre, atık betonun geri dönüştürülerek beton üretimine tekrar dahil edilmesi betonun bazı özelliklerini olumsuz etkilemiştir. Fakat bu olumsuz

etkilerin, örneğin dayanım ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirmek için atık beton agregası ile doğal agreganın birlikte kombinasyonun sağlanması (Kılıç ve Gök, 2021) ve işlenebilirliğin düzenlenmesi için akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılması gibi alınacak bazı önlemlerle azaltılabileceği ifade edilmiştir (Demirel ve Şimşek, 2014). Yapılan çalışmalar sonucunda varılan genel kanı; sürdürülebilirlik, çevresel etki ve ekonomik kazanımlar düşünüldüğünde atık betonun geri dönüştürülerek tekrar beton içinde kullanımının faydalı olabileceği yönündedir (Ulucan, 2024; Yavan ve Bozbey, 2023; Alghader vd., 2023; Kılıç ve Gök, 2021; Aydın vd., 2021; Demirel ve Şimşek, 2014; Demir, 2009; Koçkar Tuğla, 2020; Korkut ve Şimşek 2021; Yentimur vd., 2022).

Türkiye’de atık betonların yol yapım çalışmalarında kullanılabileceği de bilinmektedir (Ulusal Atık yönetimi ve Eylem Planı, 2023). Yapılan araştırmalar da yüksek basınç gerektirmeyen ve ağır vasıta yoğunluğunun az olduğu yerlerde kullanılan betonların üretimine atık betonun dahil edilmesinin çok daha uygun olduğu görüşü vardır (Kılıç ve Gök, 2021).

3.2. Beton Atıklarının Değerlendirilmesinin Ekonomik ve Çevresel Katkısı

Türkiye’nin afetlere dirençli yaşam alanları, sürdürülebilir çevre konularındaki hedefleri 2024-2028 dönemi On İkinci Kalkınma Planı’nında açıklanmıştır. Kalkınma planında “Sıfır atık yönetim sisteminin güçlendirilmesi, yeşil dönüşümün desteklenmesi, döngüsel ekonomiye geçiş ile toprak ve su kaynaklarının sürdürülebilir şekilde yönetilmesi yönünde çalışmaların” öneminin arttığı vurgulanmıştır (On İkinci Kalkınma Planı, 2023). Bu kapsamda yine çevre koruma politikaları göz önünde bulundurularak özellikle ham madde üretimi, tüketimi, tedariki ve atık yönetimi konularının standartlaştırılarak uygulanması planlanmaktadır. Bütün bu

planlamalar atık betonun geri dönüştürülerek tekrar beton üretimine dahil edilmesi ile sürdürülebilir bir döngü oluşmasını gerekli kılmaktadır.

Beton atıklarının tekrar beton üretiminde kullanımı, beton özelliklerini belli oranlarda olumsuz etkilese de, çevresel ve ekonomik anlamda olumlu katkıları vardır. İnşaat ve yıkıntı atıkları bertaraf edinceye kadar taşınma, depolama, ayrıştırma ve yeniden dönüştürme süreçlerinden geçer. Bu süreçlerin her birinde ciddi oranda enerji harcanır. Hem enerji tüketimi hem de maliyet açısından ülke ekonomisine de olumsuz etkileri vardır. Bunun yanında çevresel birçok probleme de sebep olur. Bu sebeplerden dolayı beton atıklarının taşınması, depolanması ve çevreye zarar vermeyecek bir şekilde bertaraf edilmesi için atık betonların dönüştürülerek beton içinde yeniden kullanımı, geri dönüşüm süreci ve sürdürülebilirlik açısından fayda sağlamaktadır (Kılıç ve Gök, 2024).

Beton üretiminde en fazla kullanılan malzeme agregadır. Betonun hacimsel olarak yaklaşık %65-70'i agregadan oluşmaktadır (Klee, 2009). Agregalar doğal ve yapay yollardan elde edilebilirler. Dünya genelinde kırılmış kayalardan elde edilen agregaların kullanımı yaygındır (UEPG; 2022). Bu agregaların üretimi, nakliyesi ve depolanması aşamaları hem enerji tüketimi hem de maliyet açısından önemlidir. Ayrıca doğal kaynakların geri dönüşü olmayan tahribi ile de çevresel sorunlara sebebiyet vermektedir. Bütün bu etkenler dünya ülkelerini farklı alternatifler geliştirmeye ve geri dönüştürülebilir malzemeler kullanmaya sevk etmiştir. UEPG, 2022 yılı verilerine göre dünyada yer alan bazı ülkelerin üretilen ve geri dönüştürülmüş agrega kullandıkları anlaşılmaktadır (Tablo 1). Bu verilere göre Türkiye'de toplam agrega üretici sayısı 1170, toplam agrega çıkarım sahası sayısı ise 1328'dir. Türkiye'de toplam agrega üretim miktarı 306 milyon tondur. Bu miktarın tamamı doğadan elde edilen agregalardan oluşmaktadır. Geri dönüştürülmüş

agrega kullanım miktarı Türkiye’de henüz yok denecek kadardır. Milli ekonomi ve doğal kaynakların korunumu sebebiyle Türkiye’de geri dönüştürülmüş agrega kullanımının yaygınlaştırılması gerekmektedir.

Tablo 1. Ülkelerin agrega kaynakları ve üretim miktarları (UEPG, 2022)

Ülkeler	Toplam Üretici (Şirket) Sayısı	Toplam Çıkartım Sahası Sayısı (Ocaklar ve Çukurlar)	Kum ve Çakıl (milyon ton)	Kırılmış Kaya (milyon ton)	Deniz Agregaları (milyon ton)	Üretilen Agregalar (milyon ton)	Geri Dönüştürülmüş Agregalar (milyon ton)	Toplam Üretim (milyon ton)
Belarus	100	80	30,5	27,2	0	0	0	58
Ireland	104	430	7	30	0	0	0	37
Spain	1053	1849	42,7	94,7	0	1,7	4,5	144
Austria	1069	1363	63	33	0	3	4	103
Italy	1120	2800	67	95	0	6	0	168
Turkey	1170	1328	25,2	280	0,3	0	0	306
Russia	1181	1485	480	330	0	15	0	825
Ukraine	125	140	8	45	0	0	0	53
Croatia	138	225	50	17	0	0	0	22
Denmark	141	382	42	0,6	7,5	1,9	4	56
Germany	1435	2728	253	210	11	23	80	577
EU-27 only	14936	24663	1110	1350	70	55	295	2880
Bosnia-Herzegov	15	30	11	4,5	0	0	0	16
Finland	1500	2140	23,5	49	0	0	4	77
EU-27+UK+EF	16305	26380	1164	1431	70	55	303	3023
Czech Rep	169	382	21	45	0	0	0	66
Slovakia	169	227	9,4	16,5	0	0,1	2,1	28
Albania	172	172	7	4,3	0	0	0	11
France	1735	3012	114	191	7,4	4,8	65,9	383
Estonia	191	290	10,2	6,5	0	0	0	17
42 Countries	19174	29836	1809	2142	71	70	303	4394
Israel	20	30	65	0	0	0	0	65
Serbia	20	65	15	10	0	0	0	25
Poland	2099	2899	172	86	0,8	3	6	268
Bulgaria	217	295	12,5	21,5	0	0	1	35
Netherlands	237	280	49,4	0	17,4	0	23,5	90
Portugal	253	254	6,3	44,3	0	0	0	51
Iceland	28	56	1,8	0,5	0,4	0	0	3
Montenegro	28	36	8	2,5	0	0	0	3
Moldova	30	70	1	3,5	0	0	0	5
Cyprus	32	32	0	9,5	0	0	0,4	10
Hungary	418	570	440	22	0	0	0	66
Greece	472	500	2	48,5	0	0,1	0,9	52
Malta	5	10	0,4	0,9	0	0	0,3	2
Switzerland	530	540	39,5	4,9	0	0	4,7	49
Latvia	55	105	10,1	2,8	0	0	0	13
UK	564	1204	42	137	18,7	7,3	66,6	272
Luxembourg	7	13	0,2	1,1	0	2,8	0	4
Lithuania	70	220	12,2	9,3	0	0	0	22
Sweden	704	1166	6,5	88,7	0	1	10,1	106
Belgium	79	112	6,2	38,4	7	0	21,9	74
North Macedonia (North)	8	20	2,1	3,4	0	0	0	6
Romania	807	1040	85,5	40,5	0	0	0	126
Norway	811	1121	12,3	75,5	0	0	3,4	91
Slovenia	93	135	2,6	11,5	0	0	0	14

Yapılan çalışmalarda; Türkiye’de yaşanan depremler sonrasında kayıtlara geçen hasarlı yapıların fazlalığına dikkat çekilmiştir. Özellikle 6 Şubat Kahramanmaraş Depremleri sonrasında 227.022 (yıkık/yıkılacak) yapının ağır hasarlı olduğu kayıtlara geçmiştir (BDTİM, 2023). Bu ağır hasarlı yapılardan, %60’ı betondan oluşan büyük miktarlarda yıkıntı atığı çıkmaktadır (Baycan, 2004). Bu atıkları mümkün olduğu kadar geri dönüştürmenin ve değerlendirmenin karbon emisyonu artışını engelleyeceği, zararlı yapısal atıkların doğaya zarar vermesinin önüne geçileceği gibi birçok çevresel faydanın yanında mili ekonomiye de katkı sağlayacağı düşünülmektedir (Kaplan ve Soyluk, 2024).

4. SONUÇ

Bu çalışmada inşaat ve yıkıntı atıklarının büyük çoğunluğunu oluşturan atık betonların tekrar beton içerisinde kullanımı kapsamında Türkiye’de yapılan bilimsel araştırmalar incelenmiştir. İncelenen çalışmalarda atık betonların beton içerisinde hem geri dönüştürülmüş agrega olarak hem de mineral (toz) katkı malzemesi olarak kullanıldığı görülmüştür. Beton içerisinde atık beton kullanımının genel olarak betonun mekanik özelliklerini, özellikle basınç dayanımını düşürdüğü yönünde bulgular vardır. Atık betonun işlenebilirliği de olumsuz etkilediği vurgulanmıştır. Fakat bu olumsuz sonuçların çözümü için bazı önerilerde de bulunulmuştur. Özellikle atık beton kullanılarak üretilecek betonlarda dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin güçlendirilmesi için atık betondan dönüştürülmüş agregaların doğal agregalarla ikameli olarak kullanılması ve işlenebilirliğin düzenlenmesi için akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılması önerilmiştir. Ayrıca çevresel etkiler göz önünde bulundurulduğunda atık betonun dönüştürülmüş agrega olarak kullanımının doğal agrega kaynaklarını tahripten koruduğu belirtilmiştir. Yüksek dayanım gerektirmeyen veya ağır vasıta

yoğunluğunun az olduğu yerlerde beton üretiminde atık beton kullanımının olumlu olacağı görüşü vardır.

Her sene oluşan atık beton miktarı göz önüne alındığında, atık betonun geri dönüşümünün ve tekrar kullanımının sağlanması çevre korunumu bakımından zaruri bir ihtiyaçtır. Atık betonun tekrar beton içinde kullanımı ile bu zaruri ihtiyaca cevap verilmiş; çevresel problemler azaltılmış, doğal kaynakların tahribi önlenmiş ve dolayısıyla ekonomiye katkı sağlanmış olacaktır. Kar-zarar ilişkisi dikkate alındığında atık betonun beton içinde tekrar kullanımının yararlı olduğu ve işe yaradığı sonucu ortaya çıkmaktadır. Betonun kendi için bir hammadde kaynağı olması ve sürdürülebilir bir malzeme olarak döngüye katılabilmesi için daha fazla bilimsel çalışma sonucuna ihtiyaç vardır. Fakat bu konuda Türkiye’de yapılan çalışma sayısının yeterli olmadığı söylenebilir. Atık betonların beton içinde tekrar kullanılması konusunda yapılacak çalışma sayılarının artırılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.

5. KAYNAKÇA

- Alghader A., Sarıışık A., Can S., (2023). Geri Dönüştürülmüş Beton Agregasının Kendiliğinden Yerleşen Betonun Performansına Etkisi, Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 8(2), 91-107.
- Aligholi, H. Z., and Yıldırım, A. K., Properties of Recycled Aggregates and Their Effects on Concrete, International Journal of Engineering Science and Application, 7(3). 48-55.
- Aydın, Ş., Çelik A.G., ve Güneş, İ., (2021). Geri Dönüştürülmüş Beton ve Tuğla Agregalarının Beton Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yer Altı Kaynakları Dergisi, 10(20), 11-22.
- Baycan, F. (2004). Emergency Planning for Disaster Waste: A Proposal based on the experience of the Marmara Earthquake in Turkey. 2004 International Conference and Student Competition on post-disaster reconstruction "Planning for reconstruction" Coventry, UK, April 22-23.
- Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi (BDTİM). (2023). Büyük Depremler, Son Erişim Tarihi: 14.03.2023 <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/deprembilgileri/buyuk-depremler/>
- Demir, İ., (2009). İnşaat Yıkıntı Atıklarının Beton Üretiminde Kullanımı ve Beton Özelliklerine Etkisi, AKÜ Fen Bilimleri Dergisi, 2, 105-114.
- Demirel, C., ve Şimşek O., (2014). C30 Sınıfı Atık Betonun Geridönüşüm Agregası Olarak Beton Üretiminde Kullanılabilirliği, Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2(2), 45-54.

- Doğdu G., Alkan S. N., (2023). Deprem Sonrası Oluşan İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Değerlendirilmesi: 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri, ACUJES 1(1), 38-50.
- Eguchi, K., Teranishi K., Nakagome, A., Kishimoto, H., Shinozaki, K., and Narikawa, M., (2007). Application of Recycled Coarse Aggregate by Mixture to Concrete Construction, Construction and Building Materials, 21, 1542-1551.
- İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ). (2023). 6 Şubat 2023 04.17 Mw Kahramanmaraş (Pazarcık, Türkoğlu), Hatay (Kırıkhan), ve 13.24 Mw7.7. Kahramanmaraş (Elbistan/Nurhak-Çardak) Depremleri Nihai Rapor. Son Erişim Tarihi: 02 12.2024. https://haberler.itu.edu.tr/docs/default-source/default-document-library/2023_itu_subat_2023_deprem_son_raporu.pdf?sfvrsn=1583fe76_2
- Kaplan, E. & Soyluk, A. (2024). Deprem sonrası atık yönetimi: atık betonun geri dönüşümü ve mimaride kullanımı için öneriler. Journal of Architectural Sciences and Applications, 9 (Special Issue), 140-162.
- Kılıç, İ., ve Gök S.G., (2021). Silindirle Sıkıştırılmış Atık Beton Agregasının Silindirle Sıkıştırılmış Beton Üretiminde Yeniden Değerlendirilmesi, BEÜ Fen Bilimleri Dergisi 10 (3), 999-1008.
- Klee, H. (2009). Report on the cement sustainability initiative, Recycling concrete. World Business Council for Sustainable Development. Son Erişim Tarihi: 17 Aralık 2024. <https://docs.wbcsd.org/2009/07/CSI-RecyclingConcrete-Summary.pdf>

- Koçkar Tuğla, R., (2020). Kendiliğinden Yerleşen Betonda Atık Beton Tozu Etkisinin İncelenmesi, Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 3(1), 53-62.
- Korkut, M.K., ve Şimşek, O., (2021). İri Agregası Olarak İnşaat Yıkıntı Atığı, İnce Agregası Olarak Doğal ve Kırmı Kum Kullanılan Betonun Bazı Mühendislik Özelliklerinin İncelenmesi, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 13(2), 508-520.
- Öztürk, M. (2023). Afet sonrası yıkıntı atıkları yönetimi. Şantiye, 399, 93-96. Son Erişim Tarihi: 02.12.2024 <https://edergi.santiye.com.tr/399/#p=100>.
- Ramos, M. & Martinho, G. (2023). An Assessment of the Illegal Dumping of Construction and Demolition Waste, Cleaner Waste Systems, 4. DOI: 10.1016/j.clwas.2022.100073
- T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. On İkinci Kalkınma Planı (2024-2028). (2023). Son Erişim Tarihi: 18 Aralık 2024. https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/12/On-Ikinci-Kalkinma-Plani_2024-2028_11122023.pdf
- T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı. (2004). Hafriyat Toprağı İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği Resmi Gazete, Tarih: 18 Mart 2004, Sayı: 25406.
- T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı. (2023). Ulusal Atık Yönetimi ve Eylem Planı. Son Erişim Tarihi: 18 Aralık 2024. https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/haberler/ulusal_at-k_yonet-m--eylem_plan--20180328154824.pdf
- T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı (AFAD). (2023), Son Erişim Tarihi 02.12.2024 https://deprem.afad.gov.tr/assets/pdf/Kahramanmaraş%20Depremi%20%20Raporu_02.06.2023.pdf

- Temelli, U.E., Sezgin, N. ve Özdoğan Cumalı, B. (2023). Afet Zamanlarında İnşaat Yıkıntı Atıklarının Belirlenmesi ve Atıkların Değerlendirilmesi: Kahramanmaraş Depremi Örneği. *Anadolu Çev. ve Hay. Dergisi*, 8(2), 225-232.
- Türkiye Hazır Beton Birliği (THBB). (2023). Son Erişim Tarihi: 02 Aralık 2024. <https://www.thbb.org/media/788915/thbb-sektor-istatistikleri-2023.pdf>
- Ucuzcu, T., (2010). Kendiliğinden Yerleşen Beton Dökümündeki Gecikmelerin Beton Özelliklerine Etkisi, Y.lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- UEPG. Aggregates Europe, (2022). Son Erişim tarihi: 17 Aralık 2024 <https://www.aggregates-europe.eu/facts-figures/figures/>
- Ulucan, M., (2024). Deprem Yıkıntı Atıkları ve Uçucu Kül Kullanılarak Üretilen Atık Betonların Taze Beton Özelliklerini Tahmin Eden Sayısal Model Geliştirilmesi, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 36(1), 193-199.
- Yavan, O., ve Bozbey, İ., (2023). Sürdürülebilir İnşaat Sektörü İçin Geri Dönüşüm Beton Agregası, *Kırklareli University Journal of Engineering and Science*, 9(1). 155-165.
- Yentimur, M., Kütük-Sert, T., Kütük, S., Hacımustafa, A., Kaya, E., Harbutoğlu, H. & Aktaş, S. (2022). Bor ve Bor Atığının İnşaat Yıkıntı Atığı ile Normal Beton Üzerindeki Etkileri. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology (JICIVILTECH)*, 4(2), 47-60.

TÜRKİYE YAPI DENETİM SİSTEMİNİ GELİŞTİRME VE İYİLEŞTİRME ÇALIŞMALARI: YAPI DENETİM PROGRAMI ÖZELİNDE BİR İRDELEME

Rukiye KOÇKAR TUĞLA

1. GİRİŞ

Türkiye’de, 17 Ağustos 1999’da Gölcük (Kocaeli) ve 12 Kasım 1999’da Düzce depremleri diye bilinen Doğu Marmara depremleri yaşanmış; bu depremlerde yaklaşık 18.000 vatandaş can kaybına uğramış ve 100.000 üzerinde hasarlı bina tespit edilmiştir (BDTİM, 2023). 6 Şubat 2023 tarihinde ard arda yaşanan Pazarcık–Elbistan (Kahramanmaraş) (Mw:7.7 ve Mw:7.6) depremleri ile 11 il (Kahramanmaraş, Hatay, Gaziantep, Malatya, Diyarbakır, Kilis, Şanlıurfa, Adıyaman, Osmaniye, Adana ve Elazığ) etkilenmiş ve çevre illerde de (Bingöl, Kayseri, Mardin, Tunceli, Niğde ve Batman) depremin etkisi hissedilmiştir. Kahramanmaraş depremlerinde resmi rakamlara göre, 50.783 kişi hayatını kaybetmiş ve 115.353 kişi yaralanmıştır. Yine resmi kayıtlara göre 37.984 binanın yıkıldığı raporlanmıştır (AFAD, 2023). AFAD tarafından hazırlanan deprem raporuna göre bu rakamlar içinde bulunduğumuz yüzyılda Türkiye’de meydana gelmiş en büyük deprem olarak bilinen 1939 Erzincan Depremi (Mw: 7.9) ve 1999 Kocaeli Depreminde (Mw: 7.6) yaşanan kayıplardan çok daha fazladır (AFAD, 2023). Sonuçları çok ağır olan bu depremler sonrasında bilim insanları tarafından araştırmalar yapılmış ve araştırmalar sonucunda sorunun yapım kurallarına uyulmadan yapılan denetimsiz yapılardan kaynaklandığı tespit edilmiştir (AFAD, 2023; Yılmaz, M. ve Köymen, E. 2020).

Depremler sonrası ortaya çıkan ağır tablo karşısında yapıların denetlenmesi konusu gündeme gelmiştir. Yasal olarak 3194 sayılı İmar Kanunun 28. maddesinde fenni mesullük getirilmiş fakat Marmara depremi sonrası bu uygulamanın yetersiz olduğu görülmüş ve 03.02.2000 tarihli ve 595 sayılı Kanun Hükmünde Kararname düzenlenmiştir. Bu düzenleme; Anayasa Mahkemesince iptal edilmiş, yerine 29.06.2001 tarihli ve 4708 sayılı Yapı Denetimi Hakkında Kanun çıkarılmıştır (YDUE, 2012; 4708 Sayılı Yapı Denetim Hakkında Çıkarılan Kanun, 2001). 12.08.2001 tarih ve 24491 sayılı Resmî Gazete’de Yapı Denetimi Uygulama Yönetmeliği yayımlanmış ve böylece yapı denetimin yasal sınırları belirlenmiştir (Yapı Denetimi Uygulama Usul ve Esasları Yönetmeliği, 2001).

Hazırlanan yönetmeliklerde yapı denetim sisteminin işleyişi düzenlenmiş ve yapı denetimin görev ve sorumluluk alanları belirlenmiştir. Yapı denetim alanında yaşanan bu gelişmeler ile sahada görev alacak teknik ara eleman ihtiyacı doğmuştur. Bu ihtiyaca cevap vermek üzere Yükseköğretim Kurumları devreye girmiş ve İnşaat Bölümü adı altında “Yapı Denetim Programı (YDP)” açılmıştır. Yükseköğretim kurumlarının açılış amacı ilgi ve becerileri doğrultusunda ülke kalkınmasına ve ihtiyacına katkı sağlayacak bilgi ve beceriye sahip bireyler yetiştirmektir (2547 Sayılı Yükseköğretim Kanunu, 1981). Bu bireyler bilgi birikimi ve aldığı öğretim ile ilişkili olarak yerine göre ülkenin ekonomik, sosyal ve kültürel alanda gelişme ve kalkınmasına katkıda bulunmak ayrıca dünyadaki çağdaş ve evrensel gelişmeye de ayak uyduracak bilgi ve teknolojiyi üretmek ve kullanmakla sorumludurlar (2547 Sayılı Yükseköğretim Kanunu, 1981).

Yapı Denetim Programları; Yapı Denetimi Uygulama Yönetmeliği gereğince, beyaz yaka diye adlandırılan mimarların/mühendislerin kontrolünde; çizilen projelerin mevzuata uygun olup olmadığını kontrol eden, proje

detaylarının ve hesaplarının doğru olup olmadığını saptayan, bazı resmi prosedürlerin takibini yapan ve gerekli resmi belgelerin olup olmadığını denetleyen, varsa eksik ve hataların düzeltilmesini sağlayan teknik personelin yetiştirildiği programlardır. Ülke genelinde yapı denetimi kapsamının geniş olması sebebiyle Yapı Denetim Programlarında yetiştirilecek teknik elemana çok fazla ihtiyaç olacak düşüncesi ve öngörüsü ile Türkiye’de birçok üniversitede Yapı Denetim Programı açılmış (Tuğla R, 2017a) ve bu programların kontenjanları doluluk seviyesini ulaşmıştır. Fakat zaman içerisinde programlara ilginin azaldığı, bazı üniversitelerde bu programların kapandığı görülmüştür (ÖSYM, 2022). Oldukça fazla ihtiyaç duyulması beklenen bir alanda bu gelişmenin yaşanması beklenmedik bir sonuçtur ve araştırılması gerekmektedir.

Bu çalışma, Türkiye’de bulunan bütün Yapı Denetim Programlarının mevcut durumlarını incelemek ve ortak sorunlarının gündeme getirilmesine öncülük etmek; Yapı Denetim Programlarının varlığına dikkat çekmek, yeni yapılacak yönetmelik çalışmalarına katkı sağlamak; yapı denetim tekniklerinin sıkıntılarını dile getirmek, teknik ara eleman yetiştirmek kadar bu elemanların istihdama dahil edilmesinin de Türkiye’nin geleceği bakımından önemli olduğuna vurgu yapmak amacıyla hazırlanmıştır. Bu amaçla hazırlanan çalışmada Yapı Denetim Programları ele alınmış; bu programların yapı denetim sistemi içindeki dünden bugüne yeri ve rolü incelenmiştir.

2. YAPI DENETİM PROGRAMLARINA GENEL BAKIŞ

Yapı Denetim Programları, 12.08.2001 tarih ve 24491 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan Yapı Denetimi Uygulama Yönetmeliği gereğince, mimarların/mühendislerin sevk ve

idaresi altında; hazırlanan projelerin mevzuata uygunluğunu, detay ve hesapların doğruluğunu, proje sahiplerinin sicil durum belgelerinin varlığını denetleyen, varsa eksik ve hataların düzeltilmesini sağlayan teknik elemanların yetiştirildiği programlar olarak tanımlanmaktadır.

Yapı Denetim Programları 2 yıl öğretim süresine sahiptir. Bu programdan mezun olan öğrencilere “Yapı Denetim Teknikeri” unvanı verilmektedir. Yapı denetim teknikeri unvanına sahip teknik elemanlar; yapı denetim kuruluşları, yapı laboratuvarları, müteahhitlik işleri, inşaat firmaları, proje büroları ve/veya kamu kurum/kuruluşlarında çalışabilecek nitelik ve bilgi düzeyine sahip olarak yetiştirilmektedir. Ancak mevcut durumda özellikle yapı denetim işlerinin yürütüldüğü kurum/kuruluş bünyesinde çalışma alanları kısıtlıdır.

3. YAPI DENETİM UYGULAMALARINDA YAPI DENETİM PROGRAMLARININ YERİ VE ROLÜ

4708 Sayılı Yapı Denetim Hakkında Çıkarılan Kanun’un

1. Maddesi’nde yapı denetim sisteminin amacı “can ve mal güvenliğini teminen, imar plânına, fen, sanat ve sağlık kurallarına, standartlara uygun kaliteli yapı yapılması için proje ve yapı denetimini sağlamak ve yapı denetimine ilişkin usul ve esasları düzenlemektir” şeklinde tanımlanmıştır (4708 Sayılı Yapı Denetim Hakkında Çıkarılan Kanun, 2001). 4708 sayılı Kanunun 2. Maddesi’nde ise yapı denetim kuruluşları ve görevlerinden bahsedilmiş; “Yapı denetim kuruluşlarının nama yazılı ödenmiş sermayelerinin tamamının, mimar veya mühendisler ile ait olması zorunludur. Yapı denetim kuruluşları; denetçi mimar ve mühendisler ile yardımcı kontrol elemanları istihdam eder. (Ek cümle:10/6/2022-7410/15 md.) Yetmiş beş yaşını dolduran denetçi mimar ve mühendisler ile *yardımcı kontrol elemanları*,

yapı denetim kuruluşu adına, şantiye mahallinde *yapının denetimi görevini yürütemezler*” şeklinde denetleme yetki sınırları çizilmiştir. Madde 2 (n) bendinde yardımcı kontrol elemanı olarak adlandırılan teknik elemanın “denetçi mimar ve mühendislerin sevk ve idaresi altında görev yapacak olan mimar ve mühendisler ile Bakanlıkça sınırları belirlenen yapı grubu ve inşaat alanına kadar olan yapılarda mimar ve mühendisler yerine yapı denetimi faaliyetlerine katılabilen teknik öğretmen, yüksek tekniker, *tekniker* ve teknisyenleri” ifade ettiği açıklanmıştır (4708 Sayılı Yapı Denetim Hakkında Çıkarılan Kanun, 2001). Madde 1 (n) bendi kapsamına göre *yapı denetim teknikerleri yardımcı kontrol elemanı* olarak görev alabilecek teknik elemanlar arasında yer almaktadır. Yardımcı kontrol elemanı olarak görev yapan bir yapı denetim teknikeri 12.08.2001 tarih ve 24491 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan Yapı Denetimi Uygulama Yönetmeliği’ne göre toplam inşaat alanı 15.000 m² olan yapıları denetleme yetkisine sahipken (Yapı Denetimi Uygulama Usul ve Esasları Yönetmeliği, 2001); bu yetki, 26778 Sayılı Resmi Gazete yayımlanan Yapı Denetimi Uygulama Yönetmeliği (2008) ile değiştirilmiş; yapı denetim teknikerlerinin yardımcı kontrol elemanı olarak görev alacağı denetim yetkisi bulunduğu inşaat alanı sınırı 8.500 m²’ye düşürülmüştür (Yapı Denetimi Uygulama Yönetmeliği, 2008). Bu veri 28 Ocak 2016 tarihli ve 29607 sayılı Yapı Denetimi Uygulama Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik ile değiştirilmiş ve yapı denetim teknikerinin denetimine tabi toplam inşaat alanı 10.000 m²’ olarak güncellenmiştir (Yapı Denetimi Uygulama Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik, 2016). Geline son noktada değişiklik bununla sınırlı kalmamış; 2018 yılında yapılan düzenleme ile yönetmelik “Teknik öğretmen, yüksek tekniker, tekniker ve teknisyenler her yıl Bakanlık tarafından yayımlanan Mimarlık ve Mühendislik Hizmet Bedellerinin Hesabında Kullanılacak Yapı Yaklaşık Birim Maliyetleri Hakkında Tebliğe göre III. Sınıf B Grubuna (dâhil) kadar olan ve inşaat alanı 13.500

m²'yi geçmeyen bir yapının denetimi üstlenildiğinde, yapı denetim kuruluşunda yardımcı kontrol elemanı olarak görevlendirilebilir” maddesi ile belirtilen yapı denetim teknikerinin yardımcı kontrol elemanı olarak denetleme yetkisi inşaat alanı 8.500 m² olan yapıların denetimi ile sınırlandırılmıştır (Yapı Denetimi Uygulama Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik, 2018). Yönetmeliğin ilk halinde Laboratuvar İzin Belgesi Teknik Şartnamesi EK 2 Madde 3.3’ de “Laboratuvar görevlerini yerine getirmek, kalite sisteminden veya deney prosedürlerinden sapmaları tanımlamak ve bu sapmaları önleyecek veya en aza indirecek faaliyetleri başlatmak için gerekli yetkileri ve kaynakları olan; beton deneyleri esas olmak üzere ilgili yapı malzemesi kalite kontrolü konusunda Bakanlıkça verilmiş laboratuvar denetçi belgesine sahip en az bir mühendis ile en az iki yapı öğretmeni veya *yapı teknikeri* veya teknisyene sahip olmalıdır” şeklinde bir görev dağılımı mevcuttur. Daha sonra yapılan düzenlemelerde bu bilgiye rastlanmamaktadır.

Yapılan yönetmelik revizelerinde yapı denetim teknikeri denetleme yetki sınırlarının mütemadiyen azaltıldığı ve çalışma alanlarının daraltıldığı görülmektedir. Bu durum Yapı Denetim Programlarına olan öğrenci ilgisinin azalmasına sebep olmuştur. Türkiye’de 2016 yılında; 10 tanesi vakıf üniversitelerinde, 44 tanesi devlet üniversitelerinde olmak üzere toplam 54 (ikinci öğretim dahil) meslek yüksekokulunda Yapı Denetim Programının aktif öğretim verdiği; programa ayrılan kontenjan sayısının 1979 kişi olduğu ve bu programların doluluk oranının %90’lar da olduğu görülmüştür (Tuğla, R. 2017a; 2017b; ÖSYM, 2022). 2022 yılı YÖK verilerine göre ise devlet üniversitelerinde yer alan toplam 28 meslek yüksekokulunda Yapı Denetim Programı bulunduğu, vakıf üniversitelerinde ise Yapı Denetim Programının hiç yer almadığı anlaşılmıştır (Tablo 1). 2022 yılında Yapı Denetim Programlarına 1099 kontenjan ayrılmış, bu kontenjanın tamamına öğrenciler yerleşerek program %100

doluluk oranına ulaşmıştır (YÖK, 2023). Program sayılarındaki ve beraberinde programı tercih eden öğrenci sayılarındaki azalmaların sebebi, yapı denetim teknikerlerinin görev alanlarının daraltılması ve denetleme yetkilerinin azaltılmasıdır.

Tablo 1. Yapı Denetim Programı bulunan yükseköğretim kurumları, meslek yüksekokulları ve öğrenci sayıları (YÖK, 2023).

Üniversitesi	Meslek Yüksekokulu	Yılı	Öğretim Süresi	Yerleşen Öğrenci Sayısı
<u>Afyon Kocatepe Üniversitesi</u>	Emirdağ MYO	2022	2 Yıllık	31
<u>Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi</u>	Doğubayazıt Ahmed-i Hani MYO	2022	2 Yıllık	21
<u>Akdeniz Üniversitesi</u>	Teknik Bilimler MYO	2022	2 Yıllık	72
<u>Akdeniz Üniversitesi - (İÖ)</u>	Teknik Bilimler MYO	2022	2 Yıllık	52
<u>Artvin Çoruh Üniversitesi</u>	Borçka Acarlar MYO	2022	2 Yıllık	26
<u>Batman Üniversitesi</u>	Kozluk MYO	2022	2 Yıllık	41
<u>Bitlis Eren Üniversitesi</u>	Teknik Bilimler MYO	2022	2 Yıllık	29
<u>Eskişehir Teknik Üniversitesi</u>	Porsuk MYO	2022	2 Yıllık	62
<u>Fırat Üniversitesi</u>	Elâzığ Organize Sanayi Bölgesi MYO	2022	2 Yıllık	26
<u>Fırat Üniversitesi</u>	Karakoçan MYO	2022	2 Yıllık	31
<u>Hitit Üniversitesi</u>	Teknik Bilimler MYO	2022	2 Yıllık	31
<u>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi</u>	Teknik Bilimler MYO	2022	2 Yıllık	62
<u>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi</u>	Yalvaç Teknik Bilimler MYO	2022	2 Yıllık	41
<u>Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi</u>	Andırın MYO	2022	2 Yıllık	31
<u>Kastamonu Üniversitesi</u>	Abana Sabahat Mesut Yılmaz MYO	2022	2 Yıllık	36
<u>Kayseri Üniversitesi</u>	Tomarza Mustafa Akıncıoğlu MYO	2022	2 Yıllık	41

İnşaat Mühendisliğinde İleri Araştırmalar

<u>Kırklareli Üniversitesi</u>	Pınarhisar MYO	2022	2 Yıllık	26
<u>Kilis 7 Aralık Üniversitesi</u>	Teknik Bilimler MYO	2022	2 Yıllık	31
<u>Kütahya Dumlupınar Üniversitesi</u>	Kütahya Teknik Bilimler MYO	2022	2 Yıllık	41
<u>Malatya Turgut Özal Üniversitesi</u>	Hekimhan Mehmet Emin Sungur MYO	2022	2 Yıllık	31
<u>Manisa Celâl Bayar Üniversitesi</u>	Turgutlu MYO	2022	2 Yıllık	52
<u>Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi</u>	Niğde Teknik Bilimler MYO	2022	2 Yıllık	52
<u>Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi</u>	Teknik Bilimler MYO	2022	2 Yıllık	36
<u>Samsun Üniversitesi</u>	Kavak MYO	2022	2 Yıllık	52
<u>Selçuk Üniversitesi</u>	Kadınhanı Faik İçil MYO	2022	2 Yıllık	31
<u>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi</u>	Sivas Teknik Bilimler MYO	2022	2 Yıllık	41
<u>Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi</u>	Teknik Bilimler MYO	2022	2 Yıllık	47
<u>Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi</u>	Alaplı MYO	2022	2 Yıllık	26

Yapı denetim teknikerleri, mühendis/mimar diye adlandırılan beyaz yaka çalışma gurubu ile inşaat işçileri/ustaları arasında köprü görevinde olan teknik elamanlardır. Yapı denetim teknikerleri, mühendis veya mimardan aldıkları teknik talimatları, uygulanması gereken projeleri, yapılması gereken işleri, yenilikleri, dikkat edilmesi gereken hususları inşaatı uygulayan işçilere doğru aktarmakla yükümlü teknik dile hakim personellerdir. Şantiyelerde uygulamanın doğru yapılıp yapılmadığını kontrol edebilecek teknik bilgi ile mezun olan bu sebeple denetlemeye yardımcı olabilecek sorumluluğu almaya yetkin kişilerdir.

4. YAPI DENETİM TEKNİKLERİNİN YAŞADIĞI SORUNLAR VE BU SORUNLARA KARŞI GELİŞTİRİLEN ÇÖZÜM ÖNERİLERİ

Yakın zamanda yaşadığımız (6 Şubat 2023) Kahramanmaraş depremleri sonrasında yapı denetim alanında yönetmelikler olmasına rağmen yapı denetimin sahada uygulanma aşamasında hala eksikliklerin mevcut olduğu görülmüştür. Yapı denetiminde yaşanan bu eksikliklerin, sadece mimar/mühendis meslek grubundan oluşan teknik personelle çözülemeyeceği; bu eksikliklerin çözümü için beyaz yaka ile işçi sınıfı arasında köprü görevinde olacak ve sahada her daim görev yapabilecek, mesleki bilgi ve tecrübeye sahip kalifiye ara elemana da ihtiyaç olduğu açıktır. Durum böyle iken ülkemizde zaten teknik ara eleman ihtiyacını karşılamak amacıyla kurulmuş olan meslek yüksekokullarında yetişmiş teknikerlerin yapı denetimi sahalarından uzak tutulması kabul edilebilir ve anlaşılabilir bir durum değildir. Bu sebeple Yapı Denetim Programlarının etkinliğinin artırılması, yapı denetim teknikerlerinin sorumluluk alanlarının genişletilmesi, görev tanımlarının net bir şekilde yapılması ve aktif olarak inşaat alanlarında görev almalarının sağlanması elzemdir. Mevcut yönetmeliklerde yer alan ve yapı denetim teknikerlerinin karşılaştığı sıkıntılı durumların tespit edilmesi; yeni yapılacak yönetmeliklerde bu sıkıntılı durumların tekerrür etmemesi ve çözüme kavuşturulması bakımından gereklidir. Tüm bu sebepler doğrultusunda Yapı Denetim Programı mezunlarının karşılaştığı sorunlar ve bu sorunlara getirilebilecek çözüm önerileri aşağıda kısaca sıralanmıştır:

1. Yapı Denetimi Uygulama Yönetmeliği (YDUY)'ne (2008) göre Yapı Denetim Programından mezun olan yapı denetim teknikerlerinin yapı denetim kuruluşu açmadığı ve/veya ortak olamadığı anlaşılmaktadır (4708 Sayılı Yapı Denetim Hakkında Çıkarılan Kanun, 2001: Madde 2).

ÇÖZÜM: Yapı Denetim Kuruluşları kendi içerisinde iş alanlarına göre kategorize edilmeli, belirli işlerde ve belirli yapıların denetlenmesi kapsamında ve denetçi mimar/mühendis bulundurmak koşulu ile yapı denetim teknikerlerine de yapı denetim kuruluşlarına ortak olma hakkı tanınmalıdır.

2. Yapı denetim teknikerleri yapı denetim kuruluşunda “Denetçi” olarak görevlendirilememekte ve denetçi belgesi alamamaktadırlar (YDUY, 2008: Madde 14/2).

ÇÖZÜM: Yapı denetim teknikerlerinin mesleki deneyimleri ve nitelikleri göz önüne alınmalı, mesleki bilgi düzeylerini ölçebilen merkezi bir sınava tabi tutulmalı ve başarılı olan yapı denetim teknikerlerine denetçi belgesi alma hakkı tanınmalıdır.

3. Yapı denetim teknikerlerinin doğrudan yapı denetim yetkisi bulunmamakta; denetçi mimar ve/veya denetçi mühendisin sevk ve idaresi altında yardımcı kontrol elemanı olarak görev almaktadır (YDUY, 2008: Madde 15).

ÇÖZÜM: Mesleki deneyimi ve yeterliliği ölçüsünde yapı denetim teknikerlerine belli şartlarda ve belli oranlardaki toplam inşaat alanlarında denetleme izni ve imza yetkisi verilmelidir.

4. Yapı denetim teknikerlerinin yardımcı kontrol elemanı olarak sınırsız bir çalışma yetkisi bulunmamakta; yapılan her yeni yönetmelikte denetleme alanları daraltılmaktadır. Yapı denetim teknikerleri, Yapı Denetimi Uygulama Yönetmeliğinde yapılan son değişiklikle (2018) her yıl Bakanlık tarafından yayımlanan Mimarlık ve Mühendislik Hizmet Bedellerinin Hesabında

Kullanılacak Yapı Yaklaşık Birim Maliyetleri Hakkında Tebliğe göre III. Sınıf B Grubuna (dâhil) kadar olan ve inşaat alanı 13.500 m²'yi geçmeyen bir yapının denetimi üstlenildiğinde, yapı denetim kuruluşunda sadece 8.500 m²'lik bir inşaat alanı için yardımcı kontrol elemanı olarak görevlendirilmektedirler (YDUY, 2008: Madde 15/4).

ÇÖZÜM: Yapı denetim teknikeri olarak mezun olan bir öğrencinin okula başlamadan önce haiz olduğu haklar daraltılmamalı, verilen yetkiler elinden alınmamalı, görev alanları için net bir tanımlama yapılmalı, denetlemeye tabi inşaat alanları genişletilmeli, yardımcı kontrol elemanı olarak mimar/mühendisin yanında belli bir sayıda teknikerin zorunlu olarak görev alması sağlanmalıdır.

5. Aynı alanda ve aynı proje dahilinde olmak üzere denetçi mimarlar ve mühendisler ile yardımcı kontrol elemanı mimar ve mühendisler üzerlerinde başka bir iş olmamak koşuluyla denetleme yetkisine sahip oldukları inşaat alanı sınırını aşabileceği fakat kendileri için belirlenen yetki sınırının altına düşene kadar başka bir yapının denetim işini üstlenemeyeceği belirtilmiştir. (YDUY, 2008: Madde 15/5)

ÇÖZÜM: İlgili madde kapsamına sadece mimar/mühendis yardımcı kontrol elemanları değil diğer yardımcı kontrol elemanı statüsündeki meslek mensupları yani teknik öğretmenler, inşaat ve yapı denetim teknikerleri de alınmalıdır.

6. Yapı denetim kuruluşunca istihdamı zorunlu teknik personel listesine bakıldığı zaman bu personeller

arasında yapı denetim teknikerlerinin yer almadığı görülmektedir (YDUY, 2008: Madde 16)

ÇÖZÜM: 360.000 m² denetleme yetkisine sahip olan denetçi mimar ve/veya mühendisin denetleme alanlarına tam anlamıyla yetişemeyeceği, her işin başında duramayacağı ve/veya her iş kalemini kontrol edemeyeceği açıktır. Bu sebeple denetçi mimar/mühendise eşlik edecek yardımcı kontrol eleman istihdamı zorunlu olmalı ve her bir bina için en az 1 veya daha fazla yapı denetim teknikerinin görevlendirilmesi/çalıştırılması kanuni olarak yasal hale getirilmelidir.

7. 30702 sayılı ve 2 Mart 2019 Tarihli Şantiye Şefleri Hakkında Yönetmelik Madde 6 (c) bendinde yapı denetim teknikerinin toplam 5 *katı ve yapı inşaat alanı 1.500 m²'yi geçmeyen* yerlerde şantiye şefi olarak görev alacağı açıklanmıştır. Görüldüğü üzere yapı denetim teknikerlerinin bu kapsamda da çalışma alanı kısıtlanmıştır. İlgili yönetmeliğe göre; Bakanlıkça belirlenen mimarlık hizmetlerine esas yapı sınıflarındaki yapılarda, kamu kurum ve kuruluşlarınca yapılan veya yaptırılan yapılarda, ilaveten spor tesisleri, sinema, tiyatro, konser salonu, kongre merkezi, müze, eğitim kurumu, yurt, sağlık tesisi, haberleşme ve ulaşım tesisleri, itfaiye, karakol, kışla, cezaevi, enerji üretim ve dağıtım tesisleri, kuleler, hangar yapıları ile bazı özel yapı türlerinde (palplanş, kazık, zemin ankrajı, deprem yalıtımı ve benzeri temel sistemleri ve iksa yapıları ile kazı işlerinde, jet-grout, zemin sıkıştırma ve benzeri zemin iyileştirme işlerinde, yıkım işlerinde, kayadan oyma depo işlerinde, ayaklı su depoları işlerinde, deprem yalıtımlı bina işlerinde, ardgermeli-öngermeli yapı elemanı içeren bina gibi) yapı denetim

teknikerlerin görev alması engellenmiştir (Şantiye Şefleri Hakkında Yönetmelik, 2019).

ÇÖZÜM: Yapı denetim teknikerlerinin şantiye şefi olarak görev alabileceği toplam inşaat alanı artırılmalıdır. Bu madde de sıralanan yapılardan yapı denetim teknikerlerini uzak tutmak yerine ilgili inşaat alanlarının ihtiyacı doğrultusunda teknikerlerin yetiştirilmesi için eğitim öğretim programlarının uygun ve yeterli hale getirilmesi hedeflenmelidir. Bu hedef doğrultusunda teknikerlerin yetiştirilmesi planlanmalıdır. Bunun için örneğin, Yapı Denetim Programlarının mevcut öğretim sistemi güncellenmeli, yeni eğitim programları oluşturulmalıdır. Ders dağılımları, ders içerikleri yenilenmeli, teorik derslerin yanında uygulama alanlarına ağırlık verilmelidir. İşyeri eğitimi (yaz stajı) adı altında verilen uygulamalı eğitim yerine 2(+1) öğretim sistemine geçilmelidir. Burada 2 yıl öğrenci meslek yüksekokulunda öğretimini tamamlarken, +1 yıllık süresinde doğrudan şantiye ortamında çalışarak uygulamalı eğitimini almalıdır. Yapı denetim teknikerlerinin özel yapı alanlarında çalışmalarını kısıtlamak yerine; eğitim ve öğretimlerine önem verilmeli, mesleki bilgi ve tecrübelerinin artırılması sağlanmalı ve bunun sonucunda uzmanlık alanlarına göre genişletilmiş çalışma alanları oluşturulmalıdır.

8. Şantiye şefi olarak aynı anda en fazla 5 ayrı yapım işinin şantiye şefliğinin üstlenilebileceği (Madde 7 (3)), mimar veya mühendis unvanlı şantiye şeflerinin aynı anda üstleneceği farklı yapım işlerinin tamamının yapı inşaat alanı toplamı 30.000 m²'yi geçemeyeceği, fakat yapım işinin tek ruhsata bağlı veya toplu yapı niteliğinde olması halinde yapı inşaat alanı sınırı uygulanmayacağı Şantiye Şefleri

Hakkında Yönetmelik Madde 7/4'de belirtilmiştir (Şantiye Şefleri Hakkında Yönetmelik, 2019).

ÇÖZÜM: Mevcut yönetmelikte mimar/mühendise tanımlanan yetki sınırı gerçek koşullarda uygulanabilir değildir. Yani bir şantiye şefi tek başına aynı anda 30.000 m²'deki işleri yürütebilecek, kontrol edebilecek, takip edebilecek bir insan üstü güce sahip değildir. 30.000 m²'de görevlendirilen mimar/mühendis ünvanlı bir şantiye şefinin belirtilen alandaki işlere istese bile hakkıyla zaman ayıramayacağı gerçektir. Bu durum çoğu zaman şantiye şefi görmeden sadece işi uygulayan usta/işçi bilgisiyle imalat yapılmasına ve hatalı/güncel olmayan yapım teknikleri ile yapıların inşa edilmesine sebebiyet vermektedir. Bu sebeple mimar/mühendis ünvanlı şantiye şeflerinin iş yoğunluklarının azaltılması onlara yardımcı olacak teknik ekiplerin kurulması sağlanmalıdır. Bu teknik ekiplerde ilgili iş alanına göre teknikerler istihdam edilmelidir. Yönetmelikle yasal çerçevesi belirlenmeli ve mimar/mühendis ünvanlı şantiye şefinin yanına her alanda en az bir tekniker görevlendirilmelidir. Örneğin tesisat işleri için makine/elektrik teknikerleri, kaba ve ince yapı işleri için inşaat ve/veya yapı denetim teknikeri çalıştırılmalıdır.

9. Mevcut sistemde yapı müteahhitliği yapmak için eğitim durumuna, öğretim türüne bakılmaksızın sadece iş bitirme belgesi/karnesi ile çok büyük çaplı yapılar yapılmaktadır.

ÇÖZÜM: İnşaat ile ilgili herhangi bir bölümü okumayan hiç kimse yapı müteahhiti olamamalıdır. İleri düzeyde uzmanlık alanı isteyen inşaat sektörü artık sadece parası olanların tercih edebildiği bir istihdam alanı olmaktan çıkarılmalıdır. İşin ehli, eğitimini almış, uygulama

alanlarında deneyimli mimarlar/inşaat mühendisleri ve fiili olarak on yıl İnşaat/Yapı denetim teknikeri olarak çalışmış uzman kişilerin sadece müteahhitlik yapması sağlanmalıdır. Bu koşulları taşımayan müteahhitlerin iş yapması engellenmeli, müteahhitlik belgeleri iptal edilmelidir. Mevcut durumda donanımsız müteahhitler tarafından yapılmış/yapılıyor olan yapılar da sıkı bir denetimden geçirilmelidir. Yapı ile ilgilenilen her bir meslek alanı için eğitimlere önem ve öncelik verilmelidir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, Türkiye Yükseköğretim Kurumları bünyesinde öğretim veren Yapı Denetim Programlarının mevcut durumu, bu programdan mezun olan yapı denetim teknikerlerinin istihdam olanakları, program özelinde tespit edilen sorunlar tartışılmış ve bu sorunlara bazı çözüm önerileri sunulmuştur.

Bu çalışmanın temel amacı, hali hazırda kurulu olan Yapı Denetim Programlarının Türkiye'nin ihtiyaç duyduğu teknik ara eleman gereksinimini karşılamak üzere aktifleşmesini, yetiştirilen donanımlı teknik elemanların inşaat sahalarında, yapı denetim kuruluşlarında ve özel/kamu kurum ve kuruluşlarında istihdam edilebilmesini sağlamaktır. Teknikerler, mimar/mühendislere alternatif olarak yetiştirilen teknik elemanlar değildir. Bilakis teknikerler, mimarların/ mühendislerin işini kolaylaştıracak yardımcı destek elemanlarıdır. Mimarlar/mühendisler ile uygulayıcı personel (usta/kalfa/işçi) arasında teknik dili aktaran bir nevi tercüman görevindedirler. Bu sebeple burada talep edilen, dile getirilen görüşler mimarların/mühendislerin yetki alanlarının daraltılıp, yerine teknikerlerin görevlendirilmesi üzerine değildir. Burada vurgulanmak istenilen, mevcut yönetmeliklerde verilen yetkilerin kullanıldığı ve ona göre uygulamaların yapıldığı yapı denetim sisteminin tam işlemediğine dikkat çekmek; Yapı

Denetim Programlarının yapı denetimi alanında yaşanan eksikliklerin giderilmesine katkı sağlamaya hazır olduklarını, yapı denetim alanında görev almak istediklerini ifade etmektir.

Sonuç olarak, yapı denetimi sistemindeki olumsuzluklar 6 Şubat Kahramanmaraş depremlerinden sonra çok daha fazla görünür olmuştur. Bu durumdan elbette çıkarılacak çok sonuç vardır. Ancak olaya yapı denetim açısından bakılacak olunursa açıkça görünen odur ki yapı denetim kuruluşları denetlemede yetersiz kalmaktadırlar. Detaylarını yukarıda uzun uzun anlatılan görev ve yetki alanları denetçi bir mimar veya mühendis için işin içinden çıkılamayacak büyüklüktedir. Mutlaka teknik destek gerekmektedir. Bu teknik destek içinde ara elemanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Yapı Denetim Programlarında yetişen teknikerlerin ara eleman olarak mimarların/mühendislerin yanında görevlendirilmesi zaruri bir ihtiyaç olarak görülmelidir. Bu durumun kanun ve/veya yönetmeliklerle şeklinin belirlenmesi, denetçi mimar/mühendis ile şantiye şefi mimar/mühendis kontrolünde ve yapı laboratuvarlarında yapı denetim tekniklerinin bulundurulması zorunlu olmalıdır. Böylece Yapı Denetim Programları kuruluş amaçlarını gerçekleştirmiş ve Türkiye'deki yapı denetim alanında görülen eksikliklerin bir kısmı da çözüme kavuşmuş olacaktır. Depreme karşı dirençli yapıların oluşturulması amacıyla yapılan/yapılacak çalışmalara hali hazırda bulunan Yapı Denetim Programları mezunlarının da dahil edilmesi ülke ekonomisine katma değer sağlayacaktır.

6. KAYNAKÇA

- BDTİM. (2023). Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi. Son Erişim Tarihi:14.03.2023
<http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/deprem-bilgileri/buyuk-depremler/>
- AFAD. (2023, 2 Haziran). 06 Şubat 2023 Pazarcık-Elbistan (Kahramanmaraş) Mw: 7.7–Mw: 7.6 Depremleri Raporu. Deprem ve Risk Azaltma Genel Müdürlüğü Deprem Dairesi Başkanlığı, Son Erişim Tarihi: 09.07.2024
https://deprem.afad.gov.tr/assets/pdf/Kahramanmaraş%20Depremi%20%20Raporu_02.06.2023.pdf ()
- Yılmaz, M. & Köymen, E. (2020). Türkiye’de Yapı Denetim Sistemi ve Sorunları Üzerine Teorik Bir İnceleme. Journal of Social and Humanities Sciences Research, 7(50), 330-339.
- YDUE, (2012). Çevre ve Şehircilik bakanlığı Rehberlik ve Teftiş Başkanlığı Yapı Denetimi Uygulama Eğitimi. Son Erişim Tarihi: 08.07.2024
<https://docplayer.biz.tr/4975959-Yapi-denetimi-uygulamalari-egitimi.html>
- Yapı Denetimi Uygulama Usul ve Esasları Yönetmeliği, (2001, 12 Ağustos). 24491 Sayılı Resmî Gazete. Son Erişim Tarihi: 04.07.2024
<https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2001/08/20010812.htm#2>.

- 4708 Sayılı Yapı Denetim Hakkında Çıkarılan Kanun. (2001, 13 Temmuz). 24461 Sayılı Resmî Gazete. Son Erişim Tarihi: 04.07.2024.
<https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=4708&MevzuatTur=1&MevzuatTertig=5>
- 2547 Sayılı Yükseköğretim Kanunu. (1981,06 Kasım). 17506 Sayılı Resmî Gazete. Son Erişim Tarihi:08.07.2024)
<https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=2547&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5>
- Yapı Denetimi Uygulama Yönetmeliği (2008, 05 Şubat). 26778 Sayılı Resmî Gazete. Son Erişim Tarihi: 08.07.2024.
<https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=11951&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>
- Yapı Denetimi Uygulama Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik. (2016, 28 Ocak). 29607 Sayılı Resmî Gazete. Son Erişim Tarihi: 08.07.2024
<https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2016/01/20160128.pdf>
- Yapı Denetimi Uygulama Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik, (2018, 29 Aralık). 30640 Sayılı Resmi Gazete. Son Erişim Tarihi: 08.07.2024.
<https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/12/20181229-2.htm>
- Tuğla, R. (2017a). Türkiye’de meslek yüksekokullarındaki müfredat farklarının öğrenciler üzerindeki etkileri. IX.International Congress of Educational Research, Ordu, Turkey, 810-823.
- Tuğla, R. (2017b). Yapı Denetimi Programı Özelinde Meslek Yüksekokullarında Verilen Eğitimin İş Dünyasına Katkılarının İncelenmesi. IX. International Congress of Educational Research, Ordu, Turkey, 824-833.

- ÖSYM. (2022). Tercih Kılavuzu. Son Erişim Tarihi: 04.07.2024. <https://www.osym.gov.tr/TR,23885/2022-yuksekokretim-kurumlari-sinavi-yks-yuksekokretim-programlari-ve-kontenjanlari-kilavuzu.html>
- YÖK. (2023). Önlisans Atlası. Son Erişim Tarihi: 13.03.2023. <https://yokatlas.yok.gov.tr/meslek-onlisans.php?b=30117>
- Şantiye Şefleri Hakkında Yönetmelik (2019, 2 Mart) 30702 sayılı Resmi Gazete. Son Erişim Tarihi: 09.07.2024 <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/03/20190302-2.htm>

BETON ÜRETİMİNDE TARIMSAL ATIK KÜLLERİN KULLANIMI

İlknur BEKEM KARA¹

1. GİRİŞ

Beton; çimento, iri agrega, ince agrega ve suyun, gerekli durumlarda kimyasal ve mineral katkı veya lifin hesaplar neticesinde ve belirli bir üretim teknolojiye uygun olarak belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilir. Başlangıçta plastik kıvamda olup zamanla çimentonun hidrasyonu sebebiyle katılaşp, istenilen şekil alarak sertleşen kompozit bir yapı malzemesidir (Şimşek, 2015). Beton, en yaygın kullanılan inşaat malzemesidir ve üretiminde çok büyük miktarda doğal kaynak kullanılmaktadır (Bekem Kara, 2020a). Betondaki temel bağlayıcı malzeme çimentodur ve betonun hacimce %10-15'ini oluşturur (Griffiths et al., 2023). Beton karışımında çimentonun en pahalı ve en çok enerji tüketen malzeme olduğu bilinmektedir (Bekem Kara, 2021; Kara et al., 2023). Çimento endüstrisi, toplam endüstriyel enerjinin yaklaşık %12-15'ini kullanmaktadır. Ek olarak atmosfere salınan toplam sera gazı emisyonlarının %5-7'sinden sorumludur (Khan et al., 2022). Çevresel ve ekonomik faktörler göz önüne alındığında, çimento endüstrisinde karbondioksit emisyonlarında bir azalma oldukça arzu edilen bir durumdur (Sensale and Viacava, 2018).

Beton ile ilgili birçok çalışma, çimentonun kısmi olarak ek malzemeler ile değiştirilmesini içermektedir (Khalife et al., 2024; Sarangi and Suganya, 2024; Zhao et al., 2024). Özellikle

¹ Doç. Dr. İlknur BEKEM KARA, Artvin Çoruh Üniversitesi, Borçka Acarlar Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, ilknurbekem@artvin.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9193-624X.

atık malzemelerin çimentoya ikamesi ile hem atıkların oluşturduğu çevre kirliliğinin hem de çimento üretim maliyetinin azaltılması amaçlanmaktadır (Bekem Kara, 2020a, 2020b). Dünya nüfusu ile birlikte atık malzemelerinde sürekli artış gösterdiği göz önünde bulundurulduğunda atıkların çok fazla tüketilen beton gibi bir malzemede içerisinde değerlendirilmesi oldukça dikkat çekicidir. Çünkü araştırmacılar çalışmalarında çimento matrislerinin ağır metalleri etkili bir şekilde tutmak için kimyasal bağlanma ve fiziksel hapsedme sağladığını bildirilmektedir (Argane et al., 2016; Cocke, 1990; Hacımustafaoğlu et al., 2023).

Son yıllarda, tarımdan kaynaklanan katı atıkların çimentoya ikame olarak kullanılması yeni araştırmaların odak noktası olmuştur. Yapılan çalışmalarda tarımsal atıkların çimento için uygun bir kısmı ikame olduğu bildirilmiştir (Biricik et al., 1999; Katare and Madurwar, 2020). Tarımsal atıkların, uygun şekilde işlendiğinde ve yakıldığında, yeterli miktarda kireç ve silika içeriğine sahip olduğu ve çimentonun kısmi ikamesi olarak kullanılabileceği belirtilmektedir (Gudainiyan and Kishore, 2023).

Bu çalışmada ülkemizde (Türkiye) ortaya çıkan tarımsal atıkların miktarları belirlenerek, kullanım alanının kısıtlı olduğu bazı atıkların yakılması ile elde edilen küllerin çimentoya ikamesini incelenmiştir.

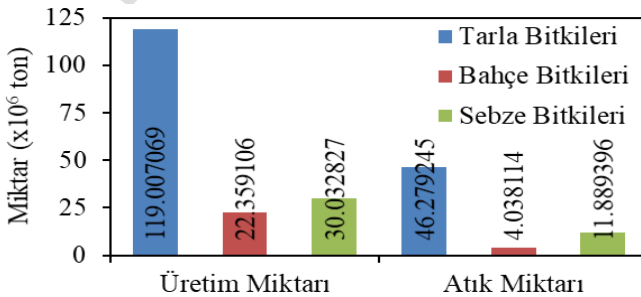
2. TARIMSAL ATIK

Tarım, dünya genelinde stratejik öneme sahip en büyük ve en yaygın iş sektörlerinden birisidir. Dünya nüfusunun sağlıklı ve yeterli beslenmesi için gerekli olan gıda maddelerini üreterek kritik bir rol oynayan tarım sektörü aynı zamanda tarıma dayalı endüstrilerin hammadde ihtiyacını karşılamaktadır (Avşar and Çevik, 2023). Tarımsal üretime paralel olarak ürün

üretimi ve işlenmesinden kaynaklanan büyük miktarda tarımsal atık meydana gelmektedir (Khalife et al., 2024). Bu büyük miktarlardaki atıklar genellikle çöplüklere atılır (Škrbić et al., 2020) veya yakılır. Dolayısıyla artan çevre kirliliğine neden olur (Arora et al., 2023).

2.1. Türkiye Tarımsal Atık Miktarı

Türkiye, toplam kara yüzeyinin neredeyse yarısını temsil eden 380890 km²'lik bir tarım arazisine sahiptir (World Bank, 2024). Bu tarım arazilerinde T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na bağlı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü verilerine göre yılda toplam 171399002 ton bitkisel üretim yapılmaktadır. Tarla, bahçe ve sebze bitkilerinden sırasıyla 119007069, 22359106 ve 30032827 ton üretim gerçekleşmektedir (BEPA, 2024). Türkiye, önemli bir tarımsal ürün üreticisi ve ihracatçısıdır ve dünyanın yedinci büyük tarım üreticisi, özellikle çeşitli ürünlerin en büyük üreticilerinden ve ihracatçılarından biri olarak bilinmektedir (Cakirli Akyüz and Theuvsen, 2021). Üretime paralel tarla, bahçe ve sebze ürünleri kaynaklı atıklar oluşmaktadır. Ülkemizde oluşan bu atıklar toplam üretim miktarın %36.3'ü (62206754 ton) kadardır. Şekil 1'de tarımsal üretim miktarları ve oluşan atık miktarları sunulmuştur.

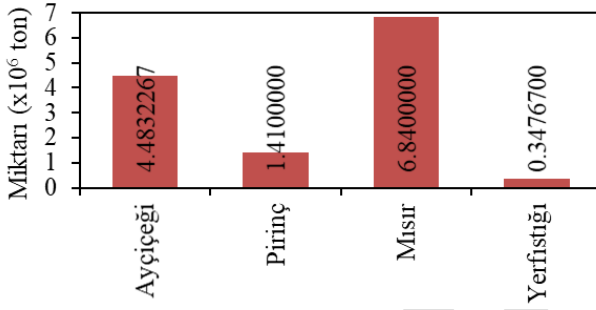


Şekil 1. Tarımsal üretim ve atık miktarı

Kaynak: (BEPA, 2024).

Tarımsal atık, yürütülen tarımsal faaliyetlerin türüne bağlıdır. Atık, tarlada ürün kalıntılarında meydana gelebileceği gibi, tarıma dayalı endüstrilerden kaynaklı olabilir (Maji et al., 2020). Bu atıklar, ekonomik değerleri toplama, taşıma ve işleme maliyetinden daha düşük olmasına rağmen insanlara fayda sağlayabilecek maddeler içerebilir. Bu atıkların bileşimi, sisteme ve ilgili tarımsal faaliyetlerin türüne bağlıdır (Paul et al., 2019). Atıklardan kurtulmak için genellikle ucuz ancak çevre dostu olmayan bir seçenek olan tarla yakma yaygın olarak kullanılır. Ancak, çevreye zararlı is parçacıkları ve sera gazlarının emisyonunun yanı sıra, tarla artıklarının açık havada yakılması topraktaki azot, fosfor, potasyum ve kükürt gibi bitki besin maddelerinin kaybına yol açar. Ürünün işlem görmesi sonrasında oluşan atıklar ise çoğunlukla açık bir alana dökülür ve kontrol edilmez (Pandey and Kumar, 2022). Tarımsal atıkların değerlendirilmesi söz konusu olduğunda gelişmiş ülkeler, tarımsal atıkların işlenmesi ve değerlendirilmesi açısından genellikle gelişmekte olan ülkelerin önündedir. Gelişmekte olan ülkeler ise daha çok tarımsal atıkların uygun şekilde kullanılmasına dikkat etmektedir (He et al., 2020).

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na bağlı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü verilerine göre en fazla atık miktarı, tarla bitkilerinde yaklaşık olarak 46 milyon tondur. Tarla bitkileri incelendiğinde ise 60 üründen 35 ürünün (silajlık mısır, yonca ve lavanta vb.) atık miktarı bulunmamaktadır. Arpa ve buğday gibi ürünlerin ise atık olarak adlandırılan kalıntıların ülkemizde hayvan yemi olarak kullanıldığı bilinmektedir (Ünlü et al., 2023). Kullanım alanının kısmen kısıtlı olduğu ayçiçeği, pirinç, mısır ve ter fıstığı atıkları toplamda 13 milyon atık miktarına sahip olduğu hesaplanmıştır (Şekil 2). Bu atıkların değerlendirilmesi özellikle çevreye verilen zararlarından dolayı önemli bir husustur.



Şekil 2. Çimentoya ikame için seçilmiş ürünlerin atık miktarları

Kaynak: BEPA, 2024.

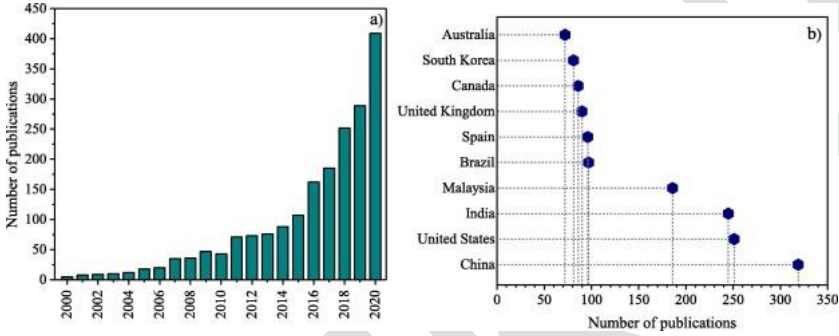
Tarımsal atıkların değerlendirilmesine ilişkin bir alan da inşaat sektörüdür. Özellikle, çimento üretiminde doğal kaynakların hızla azalması, yüksek enerji tüketimi ve çevresel etkileri nedeniyle araştırmacılar çimento miktarını kısmen tarımsal atıklar ile azaltmayı hedefleyen araştırmalara odaklanmıştır. Bu çalışmada, ülkemizde atık miktarlarının yüksek ancak kullanım alanının kısıtlı olduğu ayçiçeği, pirinç, mısır ve yer fıstığı atıklarının çimentoda değerlendirilebilirliği araştırılmıştır.

3. BETONDA TARIMSAL ATIKLARIN KULLANIMI

Tarımsal atık küllerinin çimento yerine kullanımı üzerine araştırmalar son yıllarda artmıştır (Şekil 3).

Tarımsal atıkların kontrollü bir ortamda yakılması, kontrolsüz açık alanda yakma ile ilişkili kirliliği azaltan bir yöntemdir. Ayrıca gelişmekte olan ülkelerde elektrik üretmek için buhar enerjisine katkıda bulunur ve bu süreçte üretilen artık kül yeniden kullanılabilir (Memon et al., 2018). Tarımsal atıklardan enerji elde edilmesi ve devamında oluşan külün kimyasal ve fiziksel özellikleri ve göz önüne alındığında, büyük

miktarlarda çimento tüketilen beton sektöründe değerlendirilmesi büyük önem kazanmaktadır (Charitha et al., 2021).



Şekil 3. Tarımsal atıklardan elde edilmiş küllerin çimentoda kullanımı ile ilgili a) yıllara göre b) ülkelere göre yayın sayıları

Kaynak: Charitha et al., 2021.

Bu bölüm, tarımsal atıkların beton üretiminde çimentoya ikame edilmesi için kullanılabilir malzemeye dönüştürülmesi ve çimentoya ikame edilebilirliğini kapsamaktadır. Bu çalışmada incelenen tarımsal atık külleri atık miktarı ve sınırlı kullanıma sahip tarımsal ürün atıklarından (ayçiçeği sapı, ayçiçeği kabuğu, pirinç kabuğu, mısır sapı, mısır koçanı ve yerfıstığı kabuğu) seçilmiştir. Bu atıkların külleri ile yapılan çalışmalarda kullanılan küllerin kimyasal bileşenleri uçucu kül (TS EN 450-1, 2013) ve doğal puzolan (TS 25, 2008) standartlarında verilen değerler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, atık küllerin çimentoya ikamesi ile elde edilen mukavemet sonuçları verilmiştir.

3.1. Tarımsal Atıklardan Kül Elde Edilmesi

Küllerde gözlenen mineraller ve silikatlar bitkiler tarafından büyüdüğü topraktan elde edilir ve bu bileşiklerin miktarı bitkinin büyüdüğü toprağa bağlıdır (Memon and Khan, 2018). Ayrıca üretim yöntemleri ve teknikleriyle yakından

ilişkilidir. En çok kullanılan tarımsal atıklardan biri olan pirinç kabuğu külü üretim çalışmalarında yanma sıcaklığının kül üzerindeki etkisi Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Yanma sıcaklığının pirinç kabuğu külüne etkisi.

Sıcaklık (°C)	Külün Yapısı	Özgül Yüzey Alanı (m ² /g)
> 500	Parçacıklar gözenekli yapıya sahip ve küresel veya küresel şekildedir.	0.5–2.1
500-600	1 µm'den küçük ince gözenekli kristal taneciklerin varlığı vardır, muhtemelen amorf ve kristalin durum arasındaki dönüşümü gösterir.	76-122
600-700	Amorf parçacıklar ve gözenek çapı en yüksektir.	100-150
700-800	Kısmen kristal, mercan biçimli kristallerin oluşumu.	6-10
800-900	Kristal.	<5
900-1000	Mercan biçimli kristallerin oluşumu arttı ve giderek daha ince ve önemli ölçüde eridi	-

Kaynak: (Fapohunda et al., 2017).

Tablodan da anlaşılacağı üzere yakma işlemi kül üretiminde önemli bir aşamadır. Yakma kadar öğütme koşulları da, küllerin incelik ve yüzey alanında önemli bir yere sahiptir. Külün önemli bir özelliği olan özgül yüzey alanı, gözeneklerden ve malzemenin boyutundan etkilenir. Bir malzemenin öğütme süresinin artmasıyla parçacık boyutunun küçüldüğü ve benzer şekilde parçacık boyutu azaldıkça özgül yüzey alanının arttığını kanıtlamıştır. Ayrıca, gözeneklerin varlığı özgül yüzey alanını artırır. Ayrıca puzolanik malzemenin etkinliği özgül yüzey alanına bağlıdır (Memon and Khan, 2018).

Tarımsal atıkların çimentoya ikame edilmesi atığın değerlendirilmesi bakımından önemlidir. Ancak elde edilen küllerin yakma sıcaklığı, yakma süresi ve öğütme koşulları gibi

teknik detayların külün verimliğinde önemli bir yere sahip olduğu açıktır. Bu bakımdan kül üzerinde doğrudan etkiye sahip optimum yakma gereksinimleri (sıcaklık-zaman) ve optimum öğütme süreleri farklı yapılara sahip her tarımsal atık için önemli bir konudur.

3.1. Tarımsal Atık Külün Çimentoya İkame Edilmesi

Bu bölümde, ayçiçeği sapı külü (ASK), ayçiçeği kabuğu külü (AKK), pirinç kabuğu atığı külü (PKAK), mısır sapı külü (MSK), mısır koçanı külü (MKK) ve yerfıstığı kabuğu külü (YKK) ile yapılan çalışmalar yer almaktadır.

3.1.1. Ayçiçeği Sapı Külü

Ayçiçeği başlıca yağ bitkilerinden biridir. Ayçiçeği üretimin ardından bitkinin sapsarı atık oluşturmaktadır. Ayçiçeği kaynaklı atıklar yılda yaklaşık 4.5 milyon ton kadardır. Atıkların yakılması ile elde edilen küller çimentoya ikame olarak değerlendirilmektedir. Ayçiçeği sapından elde edilmiş bazı küllerinin kimyasal bileşenleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. ASK’nın kimyasal bileşenleri

Kimyasal Bileşenler (%)	ASK1	ASK2	TS EN 450-1	TS 25
CaO	5.46	17.0		
SiO ₂	63.83	26.0		
Al ₂ O ₃	9.68	2.23		
Fe ₂ O ₃	2.79	1.19		
K ₂ O	1.17	17.1		
Na ₂ O	0.24	0.22		
SO ₃	1.11	4.63	≤ 3.00	≤ 3.00
MgO	6.23	6.65	≤ 4.00	≤ 5.00
Cl	-	-	≤ 0.10	≤ 0.10
Kızdırma Kaybı	3.35	23.53	≤ 5-9	
Na ₂ O _{eq}	1.01	11.47	≤ 5.00	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	76.3	29.42	≥ 70.00	≥ 70.00

Kaynak: (Aksoğan et al., 2016; Darweesh, 2020).

Betonda kullanılan uçucu kül ve doğal puzolan standartlarında istenilen kimyasal bileşen değerleri Tablo 2’de verilmiştir. ASK2’e ait kimyasal bileşenlerin limit değerleri sağlamadığı ancak ASK1’nin MgO dışında limit değerlere uygun olduğu görülmüştür. Bu durumun atığın küle dönüştürülme şartları ile oluştuğu düşünülmektedir. Ayrıca yapılan çalışmalarda küllerin özgül ağırlığı çimentodan düşük, yüzey alanları ise çimentodan yüksektir (Aksoğan et al., 2016; Darweesh, 2020).

Tabloda verilen çalışmaların dayanım sonuçları incelendiğinde ASK2 karışımlarda %2.5 ve %5 olarak kullanılmıştır. ASK2 oranı arttıkça 7 günlük basınç dayanımları azalmış, 28 ve 180 günlük basınç dayanımları ise artmıştır. %2.5 ASK2 basınç dayanımını artırırken, %5 ASK2 ikame azaltmıştır. Dolayısıyla uygun oranın %2.5 ile %5 arasında olduğu rapor edilmiştir (Aksoğan et al., 2016).

ASK1 650 °C’de elde edilmiş, çimentoya kütlece %6, %12, %18, %24 ve %28 olarak kullanmıştır. Külün çimentodan ince olması karışım suyu ihtiyacını ve çimentonun priz sürelerini kademeli olarak arttırmıştır. En yüksek basınç dayanımının %24 ASK2 ikamesi ile elde edildiği görülmüştür. %24’e kadar ASK2’nin çimentonun fizikokimyasal ve mekanik özellikleri üzerinde herhangi bir olumsuz etki yaratmadan uygulanabilir olduğu rapor edilmiştir (Darweesh, 2020).

Bir başka çalışmada ise ASK ile %2,5, %5, %7,5, %10, %15, %20 ve %30 hacimce çimento ikamesi yapılmış, külün betonun dayanım ve dayanıklılığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, ASK bütün ikame oranlarında betonun basınç ve çekme dayanımı değerlerini düşürmüş, ancak donma-çözülme döngüleri altında ve hidroklorik asidin etkisi altında betonun dayanıklılığını iyileştirmiştir (Şerbănoiu et al., 2021).

3.1.2. Ayçiçeği Kabuğu Külü

Ayçiçeği tohumlarının yağının çıkarılması esnasında ayçiçeği kabuğu atık olarak ortaya çıkmaktadır. 2.7 milyon ton atık kapasitesi olduğu belirtilmektedir (Balat, 2005). Ayçiçeği kabuğundan elde edilmiş küllerinin kimyasal bileşenleri Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. AKK’nın kimyasal bileşenleri

Kimyasal Bileşenler (%)	AKK1	AKK2	AKK3	TS EN 450-1	TS 25
CaO	23.33	12.82	13.13		
SiO ₂	2.03	50.36	51.25		
Al ₂ O ₃	0.41	10.54	10.24		
Fe ₂ O ₃	0.73	15.19	14.95		
K ₂ O	21.35	-	2.86		
Na ₂ O	0.33	-	0.73		
P ₂ O ₅	3.48	-	-		
MnO	0.12	-	-		
SO ₃	14.51	-	0.92	≤ 3.0	≤ 3.0
MgO	7.73	3.99	4.27	≤ 4.0	≤ 5.0
Cl	0.71	-	-	≤ 0.1	≤ 0.1
Kızdırma Kaybı	25.54	1.31	1.65	≤ 5-9	
Na ₂ O _{eq}	14.38	-	2.61	≤ 5.0	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	3.17	76.09	76.44	≥ 70.0	≥ 70.0

Kaynak: (Amin et al., 2024; Grubeša et al., 2019; Shahbazpanahi and Faraj, 2020).

Tablo 3’de verilen AKK1’e ait kül yağ fabrikasında ayçiçeği kabuğunun yakıt olarak kullanılması sonucu oluşan küldür. AKK2 ve AKK3 çalışmalarda verilen küller ise sırasıyla 400 °C ve 600°C sıcaklıklarda kontrollü yakma ile elde edilmiştir. Kontrollü yakım yapılan AKK2 ve AKK3’e ait özgül ağırlık ve yüzey alanları fabrikadan temin edilen külden (AKK1) daha büyük değerlere sahiptir. Ayrıca kimyasal

bileşenler incelendiğinde kontrollü yakım ile edilen AKK2 ve AKK3 TS EN 450-1 ve TS 25 değerlerine kısmen uygun iken fabrikada yakıt olarak kullanılan AKK1 gerekli olan limitleri sağlamamaktadır.

AKK1 %5, %7.5 ve %10, AKK2 %5, %10, %15 ve %20, AKK3 ise %10, %20, %30 ve %40 olarak çimentoya ikame edilmiştir. Elde edilen sonuçlar kül ikamesinin betonların işlenebilirliğini azalttığını göstermektedir. Farklı çalışmalarda kullanılan AKK1, AKK2 ve AKK3 küllerine ait ölçülen yüzey alanların ikame edilen çimentodan yüksek, özgül ağırlıklarının ise düşük olması karışım suyunun kül tarafından tutulduğunu göstermektedir (Amin et al., 2024; Grubeša et al., 2019; Shahbazpanahi and Faraj, 2020). %15 AKK2 ikamesinin nihai basınç dayanımını %27.3 arttırdığı rapor edilmiştir. %10, %20 ve %30 oranlarında AKK3 ikamesi, referans beton karışımına kıyasla artan basınç dayanımıyla sonuçlanmıştır (Amin et al., 2024; Grubeša et al., 2019; Shahbazpanahi and Faraj, 2020).

3.1.3. Pirinç Kabuğu Külü

Pirinç endüstrisinin yan ürünü olan pirinç kabuğu, yüksek silisyum içeriğine sahiptir ve doğal olarak parçalanması zordur. Atığın bertarafı için sıradan işlemler çevreye zarar vermektedir. Bazı durumlarda, pirinç kabuğunun uygun şekilde yakılması ısı ve elektrik gibi enerji kaynakları için kullanılabilir (Fapohunda et al., 2017). Çimentoya kısmi bir alternatif olma potansiyeli açısından incelenen biyolojik olarak elde edilen küller arasında pirinç bazlı küller en umut verici olanlar arasındadır (Miller et al., 2019). Pirinç kabuğundan elde edilmiş küllerinin kimyasal bileşenleri Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4. PKAK kimyasal bileşenleri

Kimyasal Bileşenler (%)	PKAK1	PKAK2	PKAK3	TS EN 450-1	TS 25
CaO	0.30	0.49	1.5		
SiO ₂	83.00	96.7	93.1		
Al ₂ O ₃	2.00	1.01	0.3		
Fe ₂ O ₃	0.01	0.05	0.2		
K ₂ O	0.7	0.91	2.3		
Na ₂ O	-	0.26	0.06		
P ₂ O ₅	0.62	-	-		
MnO	0.12	-	-		
SO ₃	0.02	-	-	≤ 3.0	≤ 3.0
MgO	0.10	0.19	0.6	≤ 4.0	≤ 5.0
Cl	0.03	-	-	≤ 0.1	≤ 0.1
Kızdırma Kaybı	13.15	4.81	0.8	≤ 5-9	
Na ₂ O _{eq}	0.46	1.52	1.57	≤ 5.0	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	85.01	96.23	93.60	≥ 70.0	≥ 70.0

Kaynak: (Miller et al., 2019; Olutoge and Adesina, 2019; Zhu et al., 2019).

PKAK'ın kimyasal bileşenlerinden SiO₂'nin büyük ölçüde değişmediğini yaklaşık olarak %85 ila %95 aralığında olduğu görülmektedir. PKAK'da diğer oksitlerle birlikte az miktarda CaO bulunmaktadır. PKAK örnekleri için SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ toplamının %70'i aşması, külün yüksek puzolanik özelliklere sahip uçucu kül ile aynı kategoride olduğunu göstermektedir (Fapohunda et al., 2017). Mevcut araştırmaların çoğu, PKAK'ın amorf yapısının betonda yüksek mukavemet geliştirmek için uygun olduğunu ortaya koymuştur (Antiohos et al., 2013; Olutoge and Adesina, 2019).

PKAK, parçacıkları içinde makro ve mezo gözenekler içerir ve incelik arttıkça özgül yüzey alanı da artar. İnce PKAK çimentodan daha fazla su emer ve suyu gözeneklerinde depolar, böylece serbest suyun azalmasına ve çökme değerinin

düşmesine neden olduğu bilinmektedir (Fapohunda et al., 2017; Makul and Sua-iam, 2018; Miller et al., 2019).

PKAK'ın betonda çimento yerine kullanılmasının betonun mukavemet ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirdiği, çimento tasarrufu nedeniyle malzeme maliyetini düşürdüğü, atık malzemelerin bertarafıyla ilgili çevresel faydalar sağladığı ve CO₂ emisyonlarını azalttığı bilinmektedir (Nehdi et al., 2003; Ramasamy, 2012; Sensale, 2006). PKAK kontrollü koşullar altında yakıldığında ve PKAK'ın inceliği artırıldığında yüksek reaktif PKAK elde edilir. Bu reaktivlik, yüksek amorf silika içeriğine ve parçacıkların gözenekli yapısı tarafından yönetilen çok büyük yüzey alanına atfedilir. Kontrolsüz yakma koşulunda ve önceden öğütme yapılmadığında, yüksek karbon içeriği nedeniyle daha düşük kalitede artık PKAK üretilir. Yüksek karbon içeriği, su talebinde artışa yol açar ve harç ve betonun daha koyu bir renge sahip olmasına neden olur. Ancak, uygun bir parçacık boyutuna öğütülerek artık PKAK'ın puzolanik reaktivliği iyileştirilebilir (Djamaluddin et al., 2018; Sensale, 2006).

3.1.4. Mısır Sapı Külü

Tarımsal bir faaliyetin yan ürünü olan mısır bitkisinin sapıdır ve net tahıl üretiminin yaklaşık %50'sini oluşturur (Zhang et al., 2012). Ülkemizde 5.7 milyon ton mısır üretilmektedir. Üretim ve sonrasında atığın büyük miktarda oluşumu uygun bertaraf tartışmalarını beraberinde getirmektedir. Birçok araştırmacı, çimento için tamamlayıcı olarak çeşitli tarımsal atıkların kullanımını araştırmış ve PKAK gibi umut verici sonuçlar elde edilmiştir. Benzer şekilde araştırmacılar mısır sapını yakarak elde edilen külü çimentoya ikame olarak değerlendirme çalışmalarını yürütmektedir. Mısır sapından elde edilmiş küllerinin kimyasal bileşenleri Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. MSK kimyasal bileşenleri

Kimyasal Bileşenler (%)	MSK1	MSK2	MSK3	TS EN 450-1	TS 25
CaO	5.0	5.40	4.8		
SiO ₂	64.8	52.30	78.4		
Al ₂ O ₃	9.4	16.29	0.8		
Fe ₂ O ₃	2.9	2.42	3.1		
K ₂ O	6.5	6.20	2.4		
Na ₂ O	-	0.50	0.2		
P ₂ O ₅	-	1.30	3.00		
MnO	-	0.09	-		
SO ₃	0.7	1.65	1.5	≤ 3.0	≤ 3.0
MgO	5.1	3.70	5.4	≤ 4.0	≤ 5.0
Cl	-	0.50	-	≤ 0.1	≤ 0.1
Kızdırma Kaybı	1.5	9.10	4.9	≤ 5-9	
Na ₂ O _{eq}	4.28	4.58	1.78	≤ 5.0	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	77.10	71.01	82.30	≥ 70.0	≥ 70.0

Kaynak: (Li et al., 2021; Memon et al., 2020; Salem et al., 2022).

Puzolanik aktiviteyi yöneten ana madde, Tablo 5'de görüldüğü gibi oldukça yüksek olan SiO₂ miktarıdır. SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ toplamı nihai mukavemet üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu toplamın %70'den az olmaması istenir. İncelenen çalışmalardaki küller limit değerinin üstünde bir SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ toplamına sahiptir.

MSK2 çimentoya %5, %10 ve %15 ikame edilmiştir. Çalışmada %10 MSK karışımının erken yaşlarda basınç dayanımı referansa göre azalma gösterirken (7.gün %15, 28. Gün %11), ileriki yaşlarda arttırdığı rapor edilmiştir (Salem et al., 2022).

Başka bir çalışmada 500 °C'de 2 saat kalsine ve 120 dakika öğütülen MSK3'ün, puzolanik malzemeler için fiziksel, mekanik ve kimyasal gereksinimlerini karşıladığı ve dolayısıyla

sürdürülebilir çimento esaslı malzemelerde puzolan olarak uygulanabileceği sonucuna varılmıştır (Memon et al., 2020).

3.1.5. Mısır Koçanı Külü

Mısır koçanı, mısır tanelerinin altındaki silindirik odunsu kısımdır. Mısır tanelerinin hasat edilmesinden sonra ortaya çıkar. Mısır koçanının belirli bir önemli kullanım alanı yoktur ve bir tarım atığı olarak kabul edilir. Genellikle yakıt olarak kullanılır ve nihayetinde atmosferdeki CO₂ miktarının artmasına neden olur (Pinto et al., 2012). Bu tarım atığı için yenilikçi uygulamalar bulmak, alternatif, uygun fiyatlı ve sürdürülebilir bir ürünle sonuçlanabilir. Mısır koçanından elde edilmiş küllerinin kimyasal bileşenleri Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. MKK kimyasal bileşenleri

Kimyasal Bileşenler (%)	MKK1	MKK2	MKK3	TS EN 450-1	TS 25
CaO	11.57	2.95	4.15		
SiO ₂	66.38	20.10	63.3		
Al ₂ O ₃	7.48	0.95	7.31		
Fe ₂ O ₃	4.44	0.75	1.55		
K ₂ O	4.97	38.1	5.29		
Na ₂ O	0.41	0.27	0.18		
P ₂ O ₅	-	5.49	4.29		
SO ₃	1.07	0.56	1.05	≤ 3.0	≤ 3.0
MgO	2.06	2.42	2.67	≤ 4.0	≤ 5.0
Cl	-	4.23	-	≤ 0.1	≤ 0.1
Kızdırma Kaybı	-	23.60	5.4	≤ 5-9	
Na ₂ O _{eq}	3.68	25.34	3.66	≤ 5.0	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	78.30	21.80	72.16	≥ 70.0	≥ 70.0

Kaynak: (Adesanya and Raheem, 2009; Memon and Khan, 2018; Shakouri et al., 2020).

Tablo 6 incelendiğinde MKK1 ve MKK3 yüksek SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ toplamına sahip iken MKK2 %21.80 olarak

sunulmuştur. MKK2 oldukça yüksek K_2O ve kızdırma kaybına sahiptir. Küllerin üretilmesinde yakma koşulları incelendiğinde MKK2'nin kontrolsüz olarak yakıldığı görülmektedir. MKK1 öğütüldükten sonra yerel bir fırında ve yaklaşık 8 saatte $650^\circ C$ 'de küle dönüşmüştür. Öğütülmüş MKK2 açık bir fırında kontrolsüz yakılmıştır. Yanma işlemi sırasında yapılan ölçümler yanma sıcaklığının $600^\circ C$ ile $700^\circ C$ arasında değiştiği belirtilmiştir. MKK3 ise 2 saat boyunca $500^\circ C$ de yakılarak elde edilmiştir.

MKK1 ağırlıkça çimento klinkerine %0, %2, %4, %6, %8, %10, %15 ve %20 olarak ikame edilmiştir. MKK1 karışımı betonun basınç dayanımı, erken kürlenme yaşlarında referans betondan daha düşüktür ancak sonraki yaşlarda önemli ölçüde iyileşir ve daha yüksek bir dayanım yüzdesi kazanır. MKK1 için optimum ikame oranı %8 olarak tespit edilmiştir. Dayanım kazanımının maksimum faydasından yararlanmak için betonun en az 120 gün kürlenmesi gerektiği vurgulanmıştır. Ayrıca dayanım gelişimi ve kaydedilen düşük hidratasyon ısısı nedeniyle, kütle beton işlerinde uygulanabilir olduğu ifade edilmiştir (Adesanya and Raheem, 2009). MKK2'nin yüksek potasyum oksit içeriği çimento hidratasyon sürecini olumsuz yönde etkilediği ve betonda düşük basınç dayanımı gelişimine neden olduğu rapor edilmiştir. MKK3'ün yer aldığı farklı sıcaklık ve sürelerde kül üretiminin incelendiği çalışmada ise yakma ve öğütme koşulları, puzolanın kalitesini doğrudan etkilediği belirtilmiştir. Bu nedenle, öncelikle MKK optimum yakma gereksinimlerinin belirlenmesi ve ardından optimum öğütme süresini tayinin belirlenmesi gerektiğini vurgulamaktadır (Memon and Khan, 2018). Böylelikle MKK'nın çimento bazlı malzemelerde başarılı bir şekilde kullanılması, kül bertarafının sürdürülebilirlik sorunlarını çözebilir ve aynı zamanda enerji ve doğal kaynakların korunmasına yardımcı olacağı söylenmektedir.

3.1.6. Yer fıstığı Kabuğu Külü

Yer fıstığı, gıda sektöründe ham madde olarak kullanılmakta olup toplam ağırlığının %40'ı kadar atık oluşturur (Kumar et al., 2021). Bu atıklar genelde hayvan yemi olarak kullanılmaktadır. Fıstık kabuğu, %27-33 lignin, %12-16 hemiselüloz ve %34-45 selüloz ile yüksek karbon içeriğine sahiptir (Saini et al., 2021). Diğer atıklar gibi fıstık atıklarının çimentoda kullanımı üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Yer fıstığı kabuğundan elde edilmiş küllerinin kimyasal bileşenleri Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. YKK kimyasal bileşenleri

Kimyasal Bileşenler (%)	YKK1	YKK2	YKK3	TS EN 450-1	TS 25
CaO	14.30	5.0	8.69		
SiO ₂	46.08	49.0	16.3		
Al ₂ O ₃	12.42	12.0	6		
Fe ₂ O ₃	14.0	8.2	1.7		
K ₂ O	15.46	2.04	16		
Na ₂ O	0.05	9.02	10		
SO ₃	0.64	6.21	6.3	≤ 3.0	≤ 3.0
MgO	2.0	6.74	7	≤ 4.0	≤ 5.0
Cl	-	-	-	≤ 0.1	≤ 0.1
Kızdırma Kaybı	4.85	4.0	-	≤ 5-9	
Na ₂ O _{eq}	10.22	10.36	20.53	≤ 5.0	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	72.50	69.20	24.00	≥ 70.0	≥ 70.0

Kaynak: (Ikumapayi et al., 2021; Lakshmi and Sagar, 2017; Sani et al., 2023).

YKK1'in SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ toplamının %70'den fazla olmasından dolayı iyi bir puzolan olduğu çalışmada vurgulanmıştır. YKK2 ve YKK3'te ise SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ toplamı sırasıyla %69.20 ve %24.0 seviyelerinde kalmıştır.

YKK1 500-700 °C aralığında, YKK2 ve YKK3 650 °C'de yakılmıştır. Yakım süresi YKK2 için 2 saat verilmiş, diğer çalışmalarda bilgiye rastlanmamıştır (Ikumapayi et al., 2021; Lakshmi and Sagar, 2017; Sani et al., 2023).

YKK1 %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında çimento ikamesi ile kullanıldığı çalışmada 28. günkü en yüksek basınç dayanımı %10 YKK1 ikamesi ile elde edilmiştir. Yazarlar %15'e kadar YKK1'in kullanılabilir olduğunu bildirmişlerdir. YKK2'nin %8, %12 ve %16 oranlarında kullanılması ile en yüksek basınç dayanımı %8 YKK2 ile elde edilmiştir. %5, %10, %15, %20, %25, %30 ve %35 oranlarda kullanılan YKK3 külü ile elde edilen çalışmada ise %10'nun iyi bir performans sergilediği belirtilmiştir (Ikumapayi et al., 2021; Lakshmi and Sagar, 2017; Sani et al., 2023). YKK için optimum ikame oranının yaklaşık %10 olduğu görülmektedir.

4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada ülkemizde ortaya çıkan tarımsal atıklar incelenmiş ve çalışma en fazla atık oluşumuna neden olan ayçiçeği, pirinç, mısır ve yer fıstığı ürünleri ile sınırlandırılmıştır. Beton üretiminde ayçiçeği sapı külü, ayçiçeği kabuğu külü, pirinç kabuğu atığı külü, mısır sapı külü, mısır koçanı külü ve yerfıstığı kabuğu külü kullanımına ilişkin son yıllarda yapılan deneysel araştırmalarda ki külün kimyasal özellikleri ve dayanım gelişimine etkisi irdelenmiştir. Yapılan literatür taraması ile elde edilen sonuçlar şunlardır:

İncelenen tarımsal atık külleri arasında beton üretiminde çimento ikamesi ile en çok kullanılan pirinç kabuğu külüdür. Literatürde pirinç kabuğu külünün puzolanik özellik taşıdığı, beton dayanım ve dayanıklılığını olumlu yönde etkilediği ortaya konmuştur.

Çalışmalarda tarımsal atık küllerin optimum ikame oranlarının birbirinden farklı olduğu görülmüştür. Bu durumun küllerin elde edilmesi sırasında uygulanan yöntemlere bağlı olduğu aşıkardır. Külün elde edildiği yakma sıcaklığı ve süresi kimyasal kompozisyonu değiştirmektedir. Bu durum puzolanik özelliği etkilemektedir. Ayrıca yakma işlemi sonrası öğütme şartlarına bağlı olarak tarımsal atık küllerin fiziksel özellikleri (özellik ağırlık ve incelik) de değişmekte ve beton dayanımını etkilemektedir.

Genel olarak incelenen çalışmalarda küllerin fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre dolgu veya puzolanik etki ile betonun özelliklerini iyileştirdiği ve ekonomik üretim sağladığı görülmektedir.

Tarımsal atıkların betonda kullanımı ile ilgili bundan sonra gerçekleştirilecek çalışmalarda küllere ait detaylı karakterizasyon analizleri yapılması önerilmektedir. Tarımsal atık üzerinde önce termogravimetrik (TGA-DTA) analiz yapılmalı ve tarımsal atık yakma sıcaklığı ve süresi araştırılmalıdır. Elde edilen küllerin XRF testi ile kimyasal bileşenleri incelenmeli, XRD testi ile minerallerin yapısı tespit edilmelidir. Ayrıca fiziksel olarak tane dağılımı, özgül ağırlık ve incelik belirlenmelidir. Tarımsal atık küllerin karakterizasyon testi sonrasında puzolanik aktivite deneyi gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

Ayrıca, yapılan literatür taraması sonucunda bazı çalışmalarda tarımsal atık külü ikamesi ile erken yaş beton dayanım değerlerinde düşüş görülmüştür. Bu bağlamda külün nano silika gibi nano bir malzeme ile hibrit şekilde kullanılması önerilmektedir.

Tarımsal atık küllerinin beton içinde değerlendirilmesinin çimento kaynaklı CO₂ emisyonlarını, tarımsal atıkla oluşacak çevre kirliliğini ve beton maliyetini azaltabileceği böylelikle sürdürülebilirliğin artırılmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

5. KAYNAKÇA

- Adesanya, D. A. and Raheem, A. A. (2009). A study of the workability and compressive strength characteristics of corn cob ash blended cement concrete. *Construction and Building Materials*, 23(1), 311–317.
- Aksoğan, O., Binici, H. and Ortlek, E. (2016). Durability of concrete made by partial replacement of fine aggregate by colemanite and barite and cement by ashes of corn stalk, wheat straw and sunflower stalk ashes. *Construction and Building Materials*, 106, 253–263.
- Ünlü, A., Arslan, Z. F. Arslan, R. and Ceylan, F. (2023). Ülkesel ve Bölgesel Ölçekte Türkiye'nin Bitkisel Atık Miktarları. *Düzce Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 1(1), 26–37.
- Amin, M., Zeyad, A. M., Agwa, I. S., and Heniegal, A. M. (2024). Effect of peanut and sunflower shell ash on properties of sustainable high-strength concrete. *Journal of Building Engineering*, 89, 109208.
- Antiohos, S. K., Tapali, J. G., Zervaki, M., Sousa-Coutinho, J., Tsimas, S., and Papadakis, V. G. (2013). Low embodied energy cement containing untreated RHA: A strength development and durability study. *Construction and Building Materials*, 49, 455–463.
- Argane, R., Benzaazoua, M., Hakkou, R., and Bouamrane, A. (2016). A comparative study on the practical use of low sulfide base-metal tailings as aggregates for rendering and masonry mortars. *Journal of Cleaner Production*, 112, 914–925.

- Arora, J., Ramawat, K. G., Mérillon, J.-M., Arora, J., and Mérillon, J.-M. (2023). *Disposal of Agricultural Waste and Its Effects on the Environment, Production of Useful Metabolites and Energy: Potential and Challenges*. 3–20.
- Avşar, Y., and Çevik, B. (2023). Biyokompozit Üretiminde Takviye Elemanı Olarak Kullanılan Tarımsal Atıkların İncelenmesi ve Türkiye’deki Tarımsal Atık Potansiyeli. *Düzce Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 1(1), 15–25.
- Balat, M. (2005). Use of biomass sources for energy in Turkey and a view to biomass potential. *Biomass and Bioenergy*, 29(1), 32–41.
- Bekem Kara, I. (2020a). Çay Endüstrisi Atık Küllerinin Beton Üretiminde Değerlendirilmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8, 983–992.
- Bekem Kara, I. (2020b). Kalsitin Çimento İkame Malzemesi Olarak Kullanımının Basınç Dayanımına Etkisi. *Journal of Investigations on Engineering & Technology*, 3(1), 10–16.
- Bekem Kara, I. (2021). Doğal ve kalsine pilekinin karakterizasyonu, puzolanik aktivitesi ve çimento harçlarının mekanik özelliklerine etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(1), 555–570.
- BEPA. (2024). T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Biyokütle Enerjisi Potansiyeli Atlası. <https://bepa.enerji.gov.tr/>
- Biricik, H., Aköz, F., Berktaş, I., and Tulgar, A. N. (1999). Study of pozzolanic properties of wheat straw ash. *Cement and Concrete Research*, 29(5), 637–643.

- Cakirli Akyüz, N., and Theuvsen, L. (2021). Organic agriculture in Turkey: status, achievements, and shortcomings. *Organic Agriculture*, 11(4), 501–517.
- Charitha, V., Athira, V. S., Jittin, V., Bahurudeen, A., and Nanthagopalan, P. (2021). Use of different agro-waste ashes in concrete for effective upcycling of locally available resources. *Construction and Building Materials*, 285, 122851.
- Cocke, D. L. (1990). The binding chemistry and leaching mechanisms of hazardous substances in cementitious solidification/stabilization systems. *Journal of Hazardous Materials*, 24(2–3), 231–253.
- Darweesh, H. H. M. (2020). Influence of sun flower stalk ash (SFSA) on the behavior of Portland cement pastes. *Results in Engineering*, 8, 100171.
- Djamaluddin, A. R., Caronge, M. A., Tjaronge, M. W., Rahim, I. R., and Noor, N. M. (2018). Abrasion resistance and compressive strength of unprocessed rice husk ash concrete. *Asian Journal of Civil Engineering*, 19(7), 867–876.
- Fapohunda, C., Akinbile, B., and Shittu, A. (2017). Structure and properties of mortar and concrete with rice husk ash as partial replacement of ordinary Portland cement – A review. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(2), 675–692.
- Griffiths, S., Sovacool, B. K., Furszyfer Del Rio, D. D., Foley, A. M., Bazilian, M. D., Kim, J., and Uratani, J. M. (2023). Decarbonizing the cement and concrete industry: A systematic review of socio-technical systems, technological innovations, and policy options.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 180, 113291.

Grubeša, I. N., Radeka, M., Malešev, M., Radonjanin, V., Gojević, A., and Siddique, R. (2019). Strength and microstructural analysis of concrete incorporating ash from sunflower seed shells combustion. *Structural Concrete*, 20(1), 396–404.

Gudainiyan, J., and Kishore, K. (2023). A review on cement concrete strength incorporated with agricultural waste. *Materials Today: Proceedings*, 78, 396–402.

Hacımustafaoğlu, T., Kütük Sert, T., and Bekem Kara, I. (2023). Çay Fabrikalarında Açığa Çıkan Kömür Küllerinin Beton Yollarda İnce Agregat Olarak Değerlendirilmesi. *Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4(2), 196–207.

He, J., Kawasaki, S., and Achal, V. (2020). The Utilization of Agricultural Waste as Agro-Cement in Concrete: A Review. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 6971, 12(17), 6971.

Ikumapayi, C. M., Arum, C., and Alaneme, K. K. (2021). Reactivity and hydration behavior in groundnut shell ash based pozzolanic concrete. *Materials Today: Proceedings*, 38, 508–513.

Kara, C., Kutuk, S., and Kutuk-Sert, T. (2023). Improvement of the durability of concrete by substitution of raw ground colemanite. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02393.

- Katare, V. D., and Madurwar, M. V. (2020). Design and investigation of sustainable pozzolanic material. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118431.
- Khalife, E., Sabouri, M., Kaveh, M., and Szymanek, M. (2024). Recent Advances in the Application of Agricultural Waste in Construction. *Applied Sciences* 2024, Vol. 14, Page 2355, 14(6), 2355.
- Khan, M. A., Aslam, F., Javed, M. F., Alabduljabbar, H., and Deifalla, A. F. (2022). New prediction models for the compressive strength and dry-thermal conductivity of bio-composites using novel machine learning algorithms. *Journal of Cleaner Production*, 350, 131364.
- Kumar, M., Rai, D., Bhardwaj, G., Upadhyay, S. N., and Mishra, P. K. (2021). Pyrolysis of peanut shell: Kinetic analysis and optimization of thermal degradation process. *Industrial Crops and Products*, 174, 114128.
- Lakshmi, N. V., and Sagar, P. S. (2017). Study on partial replacement of groundnut shell ash with cement. *Challenge Journal of Concrete Research Letters*, 8(3), 84–90.
- Li, Q., Zhao, Y., Chen, H., Zhao, P., Hou, P., Cheng, X., and Xie, N. (2021). Effect of waste corn stalk ash on the early-age strength development of fly ash/cement composite. *Construction and Building Materials*, 303, 124463.
- Maji, S., Dwivedi, D. H., Singh, N., Kishor, S., and Gond, M. (2020). Agricultural Waste: Its Impact on Environment and Management Approaches. *Microorganisms for Sustainability*, 18, 329–351.

- Makul, N., and Sua-iam, G. (2018). Effect of granular urea on the properties of self-consolidating concrete incorporating untreated rice husk ash: Flowability, compressive strength and temperature rise. *Construction and Building Materials*, 162, 489–502.
- Memon, S. A., and Khan, M. K. (2018). Ash blended cement composites: Eco-friendly and sustainable option for utilization of corncob ash. *Journal of Cleaner Production*, 175, 442–455.
- Memon, S. A., Khan, S., Wahid, I., Shestakova, Y., and Ashraf, M. (2020). Evaluating the Effect of Calcination and Grinding of Corn Stalk Ash on Pozzolan Potential for Sustainable Cement-Based Materials. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020(1), 1619480.
- Memon, S. A., Wahid, I., Khan, M. K., Tanoli, M. A., and Bimaganbetova, M. (2018). Environmentally Friendly Utilization of Wheat Straw Ash in Cement-Based Composites. *Sustainability* 2018, Vol. 10, Page 1322, 10(5), 1322.
- Miller, S. A., Cunningham, P. R., and Harvey, J. T. (2019). Rice-based ash in concrete: A review of past work and potential environmental sustainability. *Resources, Conservation and Recycling*, 146, 416–430.
- Nehdi, M., Duquette, J. and El Damatty, A. (2003). Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(8), 1203–1210.
- Olutoge, F. A., and Adesina, P. A. (2019). Effects of rice husk ash prepared from charcoal-powered incinerator on the

strength and durability properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 196, 386–394.

Pandey, A., and Kumar, B. (2022). Utilization of agricultural and industrial waste as replacement of cement in pavement quality concrete: a review. *Environmental Science and Pollution Research* 29:17, 29(17), 24504–24546.

Paul, S. C., Mbewe, P. B. K., Kong, S. Y., and Šavija, B. (2019). Agricultural Solid Waste as Source of Supplementary Cementitious Materials in Developing Countries. *Materials* 2019, Vol. 12, Page 1112, 12(7), 1112.

Pinto, J., Cruz, D., Paiva, A., Pereira, S., Tavares, P., Fernandes, L., and Varum, H. (2012). Characterization of corn cob as a possible raw building material. *Construction and Building Materials*, 34, 28–33.

Ramasamy, V. (2012). Compressive strength and durability properties of Rice Husk Ash concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16(1), 93–102.

Sensale, G. R. (2006). Strength development of concrete with rice-husk ash. *Cement and Concrete Composites*, 28(2), 158–160.

Saini, S., Chand, P., and Joshi, A. (2021). Biomass derived carbon for supercapacitor applications: Review. *Journal of Energy Storage*, 39, 102646.

Salem, S., Hamdy, Y., Abdelraouf, E. S., and Shazly, M. (2022). Towards sustainable concrete: Cement replacement using Egyptian cornstalk ash. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01193.

- Sani, J. E., Goddey, O. A., Kevin, O. K., and Anthony, R. (2023). Durability of concrete made with groundnut shell ash as cement replacement. *Materials Today: Proceedings*, 86, 145–149.
- Sarangi, S., and Suganya, O. M. (2024). A comprehensive review of the physical and mechanical characteristics of agricultural by-products as cementitious alternatives in the production of sustainable concrete. *Materials Today Sustainability*, 27, 100882.
- Sensale, G. R. de, and Viacava, I. R. (2018). A study on blended Portland cements containing residual rice husk ash and limestone filler. *Construction and Building Materials*, 166, 873–888.
- Șerbănoiu, A. A., Grădinaru, C. M., Cimpoeșu, N., Filipeanu, D., Șerbănoiu, B. V., and Cherecheș, N. C. (2021). Study of an Ecological Cement-Based Composite with a Sustainable Raw Material, Sunflower Stalk Ash. *Materials 2021*, Vol. 14, Page 7177, 14(23), 7177.
- Shahbazpanahi, S., and Faraj, R. H. (2020). Feasibility study on the use of shell sunflower ash and shell pumpkin ash as supplementary cementitious materials in concrete. *Journal of Building Engineering*, 30, 101271.
- Shakouri, M., Exstrom, C. L., Ramanathan, S., and Suraneni, P. (2020). Hydration, strength, and durability of cementitious materials incorporating untreated corn cob ash. *Construction and Building Materials*, 243, 118171.
- Şimşek, O. (2015). *Beton ve Beton Teknolojisi* (5. Baskı). Seçkin Yayıncılık.

- Škrbić, S., Ašonja, A., Prodanović, R., Ristić, V., Stevanović, G., Vulić, M., Janković, Z., Radosavac, A., and Igić, S. (2020). Analysis of Plant-Production-Obtained Biomass in Function of Sustainable Energy. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 5486, 12(13), 5486.
- TS 25. (2008). *Doğal puzolan (tras)-Çimento ve betonda kullanılan-Tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri*. Türk Standardları Enstitüsü.
- TS EN 450-1. (2013). *Uçucu Kül - Betonda kullanılan - Bölüm 1: Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri*. Türk Standardları Enstitüsü.
- World Bank. (2024). Agricultural Land (Sq. Km) - Türkiye. https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.AGRI.K2?name_desc=false&locations=TR
- Zhang, Y., Ghaly, A. E., and Li, B. (2012). Physical Properties of Corn Residues. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 8(2), 44–53.
- Zhao, J., Sufian, M., Abuhussain, M. A., Althoey, F., and Deifalla, A. F. (2024). Exploring the potential of agricultural waste as an additive in ultra-high-performance concrete for sustainable construction: A comprehensive review. *Reviews on Advanced Materials Science*, 63(1).
- Zhu, H., Liang, G., Xu, J., Wu, Q., and Zhai, M. (2019). Influence of rice husk ash on the waterproof properties of ultrafine fly ash based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 208, 394–401.

YAPI YIKIMI

Sevil AY¹

1. GİRİŞ

İnşaat sektörü günümüzde gelişmekte olan çoğu ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de ekonominin en önemli sektörlerinden birini oluşturmaktadır. İnşaat sektörünü genel olarak; inşaat malzemelerinin tasarımı, üretimi, inşaatın projelendirilmesi, inşaat yapım aşamaları, bakım işleri ve yıkım işleri gibi birçok faaliyeti kapsayan oldukça geniş bir sektör olarak tanımlamak mümkündür.

Fiziki açıdan ülkemizin büyük bir kısmı deprem ve tabii afetler nedeni ile tehdit altındadır. Yapılarımızın bir kısmı bu nedenler ile yıkılarak can ve mal kaybına neden olmaktadır. Bir kısım yapılarımız ise afetler sonrasında kullanılamayacak hale gelerek bu yapılarımızın yıkılması zorunlu olmaktadır. Ayrıca yapıların kullanım ömürlerinin dolması, kaçak yapılaşma, çarpık kentleşme, plansız yapılaşma, güncel yönetmeliklere uygunsuzluk gibi nedenlerle bu gibi yapıların ya tekrar projelendirilerek yenilenmesi, onarılması, güçlendirilmesi ya da yıkılması gerekmektedir.

Ülkemizde yapıların daha çok betonarme taşıyıcılı ve kagir duvarlardan inşa edilmesi, bu tip yapılarda yıkımın nasıl olacağı sorusunu gündeme getirmektedir. Betonarme yapılara 1950’li yıllarda geçiş yapan ülkemizde bu yapıların yeterince eskidiği göz önüne alınırsa, yıkım konusu oldukça önem kazanmaktadır. 2000’li yıllarda yapılan yıkım çalışmaları, genel

¹ Öğretim Görevlisi, Artvin Çoruh Üniversitesi, Borçka Acarlar MYO, İnşaat Bölümü, sevilay@artvin.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3290-2343.

olarak kısmi yada küçük çapta yürütülen gecekonduların yıkımlarından oluşmaktaydı. O yıllarda artan sayısı ile dikkat çeken ve gecekondular adı ile bilinen kaçak yapıların yıkımı oldukça aktif bir şekilde yürütülmekteydi (Abanuz, 2005).

İnsanlık tarihi kadar eskiye dayanan inşaat yapıları çalışmalarını düşünülürken, yıkım işlerinin de o kadar eski zamanlara dayandırılması mümkün olabilmektedir. Şehir planlaması ve kentsel dönüşüm çalışmaları ön planda tutulduğunda ise yıkım işlerinde dünya çapında bir yükseliş söz konusudur. Bununla beraber deprem kuşağında bulunan ülkemiz de sadece son on beş yılda yapı/bina güvenlik önlemlerinin sağlanması veya güvenli yaşam çevrelerinin oluşturulması amacıyla kentsel dönüşüm adı altında toplu olarak yapı yıkım çalışmalarının yapıldığı görülmektedir (Yılmaz, 2016).

Yapıların yaşam süreci; planlama, tasarım, yapım, bakım/onarım ve kullanım ömrü sonrası yıkım olarak 5 aşamadan oluşmaktadır. Betonarme bir yapının kullanım ömrü 40-90 yıl arasındadır. Ayrıca deprem, patlama, yangın ve diğer doğal afetler, kentsel dönüşüm çalışmaları ya da yapı sahiplerinin istekleri gibi sebeplerle yapıların, kullanım ömürleri tamamlanmadan yıkımları söz konusu olacaktır. Dolayısı ile bir yapının yıkım nedeni sadece malzemeler, yapısal sorunlar değil sosyal, yaşamsal, ekonomik sorunlar veya çevresel etmenler de olabilmektedir (Yılmaz, 2016).

Bir yapının veya enkazının ortadan kaldırılması için faydalanılacak yöntemler yıkım, söküm ve de-montaj tekniğinin bir kaçının bir arada kullanılması ile mümkün olabilmektedir. De-montaj; bir yapıyı oluşturan elemanların sökülmesi işlemidir ve yapısızlaştırma olarak bilinmektedir (Güven, 2019).

Kentsel dönüşüm; uluslararası literatürlerde “kentsel yenileme” ülkemizde ise yenileme dönüşümüyle sağlandığı için “kentsel dönüşüm” ismi ile adlandırılarak, kentin bazı yönlerden

eskimiş, yaşanılabilirliği azalmış alanlarının yapılacak düzenlemeler ile yenilenmesinin sağlandığı uygulamalar olarak tanımlanabilir (Usalan, 2017).

Planlı yapı yıkımı ile sökülü yapı malzemelerinin niteliklerine göre değişebilmektedir. Ahşap yapılarda sökülüp yeniden kullanım oranı yüksekken, çelik yapılar ağırlıkları nedeni ile oldukça zor sökülüp, yıkılmaktadır. Yığma yapılarda ise yatayda ve düşeyde yer alan taşıyıcı sistem malzemelerinin özelliğine göre, yıkılmalarında zorluklar bulunmaktadır. Betonarme yapılar ise, donatılı betona sahip olmaları nedeni ile sökülüm işlemlerinin ve yıkımının en zor olduğu yapı türü olarak belirtilebilir (Güven,2019).

Dolayısı ile her yapının kendine göre farklı bir yıkım metodu söz konusudur. Çünkü günümüzde yapılar hem yapı malzemeleri, hem yapıların kütleleri/boyutları, hem de bulundukları çevre koşulları açısından birbirinden çok farklı olabilmektedir. Bu sebeple yapı yıkımında her zaman kullanılabilecek kesin bir yöntemden bahsetmek pek mümkün olamamaktadır.

Ülkemizde, nüfusun artışı, yerleşim alanlarının darlığı, kırsal alanlardan şehirlere göç gibi nedenlerle oluşan konut ihtiyacı ile birlikte yapı yıkımı gittikçe daha da önem kazanmıştır.

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, günümüzde yapıların inşa tekniklerinde gelişmeler artarak devam ettiği gibi yapı yıkım teknikleri de her geçen gün gelişmektedir. Yapı yıkımında insan gücü ve basit el aletleri ile başlayan yıkım süreci artık farklı yöntemlerle sürdürülmektedir. Yıkım yöntemlerini şöyle gruplandırmamız mümkündür; El ile yıkım, Makine ile yıkım, Kimyasal maddeler yardımı ile yıkım, Yüksek basınçlı su jeti ile yıkım (Şekil. 1)

Şekil 1. Genel Yıkım yöntemleri

A) *El ile Yıkım*



Kaynak: (Ertaş, 2016)

B) *Makine ile Yıkım*



Kaynak: (Koca, 2006)

C) *Kimyasal Maddeler Yardımı ile Yıkım*



Kaynak: (Ertaş, 2016)

D) *Yüksek basınçlı Su Jeti ile Yıkım*



Kaynak: (Güven, 2019)

Ayrıca, bu yöntemler dışında; ayırma aletleri, lazer ile kesme, özel kimyasallar, mikrodalgalarla parçalama gibi yöntemlerde bulunmaktadır.

Yıkım yöntemlerini yukarıda da belirttiğimiz gibi bazı kesimler dört ana grupta ifade ederken TS 13633'e göre yıkım yöntemleri sırasıyla; El ile (Şekil 1.A), Makine ile (Şekil 1.B), Kompakt makineler ile, Uzaktan kontrol edilen makineler ve robotik cihazlarla, Yüksek erişimli makineler ile, Delme ve testere ile kesme ile, Kule ve diğer yüksek erişimli vinçlerle, Kimyasal maddelerle (Şekil 1.C), İple çekerek yıkım, Patlayıcılarla yıkım, Sıcak kesmeyle, Yüksek basınçlı su jeti ile (Şekil 1.D) ve Metal tozu kullanarak kesim olarak verilmiştir.

Kaba yıkım yöntemlerinden olan hidrolik çekiç veya bir topla darbe oluşturarak kırma işlemlerinin gerçekleştirildiği yıkım yöntemleri çoğu ülkede hala popülerliğini korumaktadır. Yıkım faaliyetleri doğrultusunda geliştirilen çok sayıda yöntemler bulunmasına rağmen yıkım işleri için en uygun koşulları sağlayan yöntemin seçilmesi zorunluluğu oluşmaktadır. Yapılacak olan bir yıkım işinde kullanılabilecek en optimum yöntemin seçilmesinde, bazı etkenlerin dikkate alınması gerekmektedir. Bunlardan bazıları; yıkım işlerinin maliyeti, yıkım projesinin zaman sınırlılıkları, yapıdaki beton ve betonarmenin kalitesi, yıkılacak yapının veya elemanlarının geometrisi, boyutu ve konumu, yıkım yapılacak çevre, yıkım sonrasında oluşacak enkazın tekrar kullanımı, ulaşım ile katı atığın depolanmasıdır (Elliot and Woolf, 2001).

Bu etkenler arasında en önemlileri yıkımın maliyeti ile yıkılacak olan yapının ebatlarıdır. Diğer faktörler bu iki önemli etken doğrultusunda şekillenmektedir. Onarım çalışmalarında da kullanılan kısmi yıkımlar için, kullanılan beton kalitesi tercih edilecek yıkım yöntemini belirlemede önemli rol oynamaktadır. Son yıllarda, yıkım işlerinde toplumun ihtiyaçlarını karşılamak amacı ile bir takım çalışmalar yapılarak yeni yöntemler geliştirilmiştir. Günümüzde yapıların yıkım sürecinde tamamen veya kısmi yıkımının gerçekleştirilmesi amacı ile değişik yöntemler geliştirilmiştir (Bassett, 1982; Lauritzen and Petersen, 1991; Koca, 2006).

2. YAPI YIKIM YÖNTEMLERİ

Yıkım yöntemini belirlemedeki önemli unsurlardan biri, yapıyı oluşturan elemanların kısmi ya da tamamen tekrar kullanımının olup olmadığı veya geri dönüşüme imkan verip vermeyeceği konusudur. Kısmi geri dönüşüm yapılan seçici yıkımlar var olan yapının bir kısım elemanlarının tekrar

kullanım için sökülmesini veya geri dönüştürülmesini içermektedir. Yıkım yöntemini belirleyen bir diğer unsur yapının sistemidir. Bu hususta bazen zaman kaynaklı maliyet kaybı olmayacak bir seçici yıkıma imkân olamayacağı gibi, bazen de zaman kaynaklı büyük bir ekonomik zarara yol açabileceği anlarda hızlı yıkım yöntemlerinden olan makineler ile yıkıma ya da patlayıcı yıkıma elverişli durumlar oluşabilmektedir. Her yıkım yöntemi, kendi yıkım şartlarına en uygun yöntem olarak gelişmekte ve bu gelişim doğrultusunda araç ve teçhizat türlerini geliştirme ihtiyacını oluşturmaktadır (Güven, 2019).

2.1. El İle Yıkım

Kat eksiltilerek yapılan yıkım yöntemi binanın çatı katından zemin katına kadar olan ve birer kat azaltılarak yapılan yıkım sürecidir. El ile yıkımda malzeme ve yıkım süreci yıkılacak yapının özellikleri ile çevre unsurlarına bağlıdır. El ile yıkım yapılırken bütün konsol yapılar, balkon çıkıntıları, verandalar, saçaklar öncelikli olarak yıkılır. Çatılarda binanın üstünde asansör yuvası, su deposu gibi alanlar önce yıkılmalıdır. Yıkım; binada katların orta noktası ile döşemelerden, kolonlara ve kirişlere doğru yapılır. Önce konsollar sonra ikinci derece kirişler, daha sonra ana kirişler yıkılır. Taşıyıcı duvarlara göre yük taşımayan duvarlar öncelikli olarak yıkılır. Kolon ve kirişlerin sökülmesi tamamlandıktan sonra, üstten itibaren yıkılır. Betonarme yapılarda el ile yıkım için kaya matkabı kullanılmaktadır (Şekil 1.A).

Aşağı yönde yıkım yapılırken, yapı atıklarının bir bölgede birikmesi ile atık yığınının oluşması, çalışmaları aksatmaya veya kiriş, döşeme gibi önemli taşıyıcı elemanların çökmesine sebebiyet verebilecektir. Bu gibi durumlarda, üst katlarda toplanan atıkların alt katlara taşınması amacı ile

döşemelerde belirlenen bölgelere delikler oluşturulmalı veya bu hususlar için bacalar yapılmalıdır (Güven, 2019).

2.1.1. El İle Yıkım Tekniğinde Kullanılan Aletler

El ile yıkım işlemine başlanmadan önce öncelikli tedbirler alınmalı, yüksek çalışma alanlarında yıkım için güvenli bir konumda başlayacak yer olmadığı durumlarda, mevcut çalışma alanının kurallarına uyularak daha emniyetli bir çalışma ortamının oluşturulması gereklidir. Bu teknikte kullanılan malzeme ne ölçüde küçük ve oldukça az kişi tarafından kullanılan bir ekipmansa, o ölçüde güvenli bir yıkım veya söküm yapılabilecektir.

A) Elmas Disk Kesici



B) El Çekiçleri



C) Elmas Tel Testere



Şekil 2. El ile yıkım tekniğinde kullanılan aletler

Kaynak: Güven, 2019.

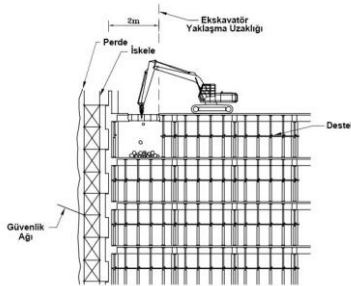
a) Elmas Disk Kesici (Elmas Bıçak): Disk kesici, betonarmeleri kesme özelliği ile >1000 mm çaplara sahiptir (Şekil 2.A). Büyük çapları ile yıkım anında karşılaşılabilecek olan kalın betonarme elemanların kesilip yıkımın ilerlemesi hızlandırılarak kolaylaştırılacaktır (Güven, 2019).

b) El Çekiçleri: Kısmi veya aşamalı olarak yapılan tam yıkımlarda kullanılabilir (Şekil 2.B). Yıkım anında yapı dikey elemanlar ve yatay elemanların birleşim noktalarından zayıflatılması ile yıkılır. El çekicinin benzinli, elektrikli, hidrolik ve pnömatik olarak dört türü bulunmaktadır (Güven, 2019).

c) Elmas tel testere: Betonarme yapı elemanını blok parçalara bölerek taşınabilir oranda küçültülmesini hedefleyen bu araçlar elektrik, benzin veya mazot ile çalışmaktadırlar. İki yönlü çalışma ve değişken hız ayarı sunan bir çark sistemine sahip olması tercih edilme nedenleri arasındadır. Hidrolik sistemle çalışan bu testereler, hemen her kalınlığı kesebilmektedir. Baraj, köprü gibi kalın beton yapılarda planlanan ağır yıkımlar için çok kullanışlıdırlar. Elmas tel testerenin en önemli parçası (Şekil 2.C) görülen telidir. Ayrıca çok az ses, titreşim ve toz çıkarması ile yıkım çalışmaları için uygun bir araç olmaktadır (Güven, 2019).

2.2. Makine İle Yıkım

Makine ile yıkım, elle yıkım süreci ile benzer özellikler göstermektedir. Burada ilk aşama ekskavatörün bir vinç aracılığı ile bina tepesine taşınmasıdır. Taşınan ekskavatör konsollar üzerinde ve köşelerde veya bu noktalara yakın konumlarda durmamalıdır. Makine ile yıkımda öncelikli olarak konsollar, saçaklar, verandalar, iç duvarlar daha sonra döşeme ve kirişler yıkılır (Şekil 3). Bir rampa veya taşıma yöntemi ile makine aşağıya indirilir. Bina üst katındaki yapı elemanları da yıkılarak veya kesilerek bir kat eksiltilmektedir (Ertaş, 2016).



Şekil 3. Döşeme ve kirişlerin yıkımı

Kaynak: (Ertaş, 2016)

Yıkım işlemlerinde Avrupa ülkeleri ile Japonya’da bu yöntem sık kullanılırken ülkemizde daha dar kapsamda uygulanmaktadır. Makine ile yıkım uygulamalarında dikkat edilmesi gereken unsurlar; yıkım tekniğini içeren, yapı ile çevre koşullarının gözetilerek hazırlanmış olan proje, yıkım tekniğine uygun makine ve teçhizatlar, kalifiye personeller ile güvenlik tedbirlerine uyulmasıdır (Güven, 2019).

2.2.1. Makine İle Yıkım Tekniğinde Kullanılan Aletler

a) Delme (sondaj) ve kesme: Genellikle kapalı alanlardaki betonarme yapı elemanlarını kesip zayıflatarak, kesilen parçaları taşıyarak kısmi ya da tam yıkım için kullanılan yöntemdir. Gürültü, toz ve titreşim oluşmadan, istenilen bölgelerden, belirli şekil ve büyüklükte kesim ve delme işlemleri yapılabilmektedir (Şekil 4). Ayrıca kalorifer, su tesisatı, kapı pencere açılımları, baca, doğalgaz ve asansör delikleri gibi işlerde de kullanılabilmektedir (Güven, 2019).

Yıkım teknikleri açısından delme ve kesme araçları: Elmas kesici (karot) ile delme (Şekil 4.A), Elmas yol ve zemin kesicisi (Şekil 4.B), Elmas parça kesicisi (Şekil 4.C), El ile tutulan halka zincirli kesici (Testere), Tungsten matkabı, Elmas tel kesicidir (Şekil 4.D)

A) Elmas kesici
- Karot alma
makinesi



B) Elmas yol ve
zemin kesici



C) Elmas parça
kesici



D) Elmas tel
kesici



Şekil 4. Delme ve Kesme Aletleri

Kaynak: (Güven, 2019)

b) Uzaktan kontrol edilebilen makine ve robotik cihazlar: Potansiyel tehlike barındıran durumlarda, yıkım personellerinin tehlikeli unsurlardan uzak tutulması amacıyla geliştirilen bir makinadır (Şekil 5.A). Bu araçlar kumandalı veya kabloyla uzaktan kontrol edilmesiyle personellerin tehlikeli alandan uzaklaştırılması ile riskleri minimize etmektedir. Bu yöntem kontrollü yıkım projeleri için önemli çözüm seçenekleri sunmasının yanı sıra diğer yöntemlere oranla ciddi yararlar sağlamaktadır (Güven, 2019).



Şekil 5. Uzaktan kontrol edilebilir ve kompakt makineler

Kaynak: Güven, 2019.

c) Kompakt makineler: Yukarıdan aşağıya kat eksiltmede başlı başına kullanılabilir. Yüksek erişimli makineler ile yetişilemeyen yükseklikteki yapıların, makul kat seviyesine kadar eksiltilmesi durumlarında kısmi bir yıkım tekniği olarak ta kullanılır. Tonajı 1-9 ton arasındaki mini ekskavatörler (Şekil 5.B), 4-10 ton ağırlığa sahip beko-loderler gibi çeşitli makineler ile yapı üzerinde kesme, istifleme, taşıma ve sıyırma gibi işlemler için kullanılabilirler (Güven, 2019).

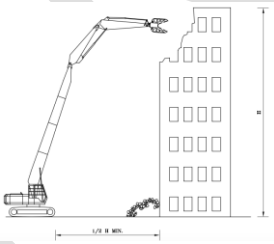
d) Uzun erişimli makineler: Özellikle tehlikeli yapıların yıkımına uygun olan bu yöntem ile yapı elemanlarının uzun erişimli hidrolik yıkım sistemini itmesiyle yıkım sağlanır. Uzun erişimli makine zeminden istenilen herhangi bir yükseklikteki bölgelere ulaşabilmektedir (Şekil 6.A) . 15m ve

daha fazla yükseklikteki yapıların yıkımına göre tasarlanmış makinelerdir. Yıkım süreleri dikkate alındığında bu yöntem diğer yöntemlere oranla daha hızlıdır ve yıkım esnasında yapının statik bütünlüğünü bozmadan yıkım sağlandığı için daha emniyetlidir (Ertaş, 2016; Güven, 2019).

e) Kule tipi ve diğer uzun menzilli vinçlerle yıkım:

Yüksek yapıların yıkımı esnasında oluşan enkaz atıklarının yıkım alanından başka bir alana taşınması veya bazı araçların bulunduğu alanda farklı bir konuma taşınması için Şekil 6'daki gibi bir uzun menzilli vinç veya kule vinç kullanılabilir. Yapıların yıkımı için kullanılan kule tipi ve diğer uzun menzilli vinçler, daha hızlı yıkım sağlarken zaman bakımından da faydalı olabilmektedir (Güven, 2019).

İskelet yapısı ahşap olan yapılarda, ayırık nizam betonarme yapılarda, köprülerde ve minarelerde bu araçların kullanımı, risk, zaman ve maliyet yönlerinden daha makul olacaktır.



Şekil 6. Uzun erişimli ezici ile Kule vinç

A) Kaynak: (Ertaş, 2016)

B) Kule vinç

f) Kajima kesme ve kaldırma yöntemi ile yıkım: Japon kökenli Kajima firmasının 65-75 metre yüksekliğe sahip 17-20 katlı eski merkez binalarını yıkım kararı ile bu teknik geliştirilmiştir. Tam yıkım kullanımına uygun olarak geliştirilen

yöntemin çevreci olması ve güvenli bir yöntem olması yıkım ve enkaz hafriyat işlerinin de bir arada ilerleyebilmesini sağlar. Ancak bu doğrultuda makine ve patlayıcılarla yapılan yıkım tekniklerine oranla işler daha yavaş ilerlemektedir (Şekil 7) (Güven, 2019).



Şekil 7. Kajima yöntemi ile yıkım

Kaynak: Güven, 2019.

2.3. Kimyasal Maddeler ile Yıkım

Sadece eğitilmiş personellerle belirli gözetimler altında yapılabilen, alanında uzmanlık gerektiren bir faaliyet olup bir takım kimyasal maddelerin kullanılmasıyla gerçekleştirilir (Güven, 2019).

a) Sıcak Kesme: Bu teknik, sürtünme, kıvılcım, alev gibi yeterli ısı üreten çeşitli yöntemleri kapsamaktadır. Bu yöntemlerde oksit yakıtlı gazlar ve disk öğütücüler kullanılır. Bir yapıyı zayıflatmak veya parçalamak için ısıyı, araç olarak kullanan sıcak kesme yöntemleri; termik kesici ve termik reaksiyon uygulamaları olarak verilebilir. Şekil 8.A'da çelik yapı elemanlarının tümü, termik yöntemlerle bölümlere ayrılarak yıkım gerçekleştirilmektedir (Güven, 2019).

b) Patlayıcı kullanmak sureti ile kontrollü yıkım: Yıkım ile ilgili yapılan çalışmalarda, en çok çalışılan konular arasında patlatma uygulamaları yer almaktadır. Patlatma teknolojisinin gelişmesiyle patlatma metodu yıkım işlerinde

yoğun bir şekilde kullanılmıştır (Şekil 1.C; Şekil 8.B). Avantajlarına göre kullanımına bakıldığında en çok faydalı olacağı binalar, yüksek ve geniş binalar, endüstriyel binalar ve terk edilmiş madencilik binaları olabilir. Yıkım esnasında patlayıcı kullanmak diğer tekniklere kıyasla uzunluk, kalınlık, boyut ve ulaşılabilirlik konularında avantajlı iken, güvenlik önlemlerinin yeterli oranda önemsenmediği durumlarda şiddeti ve zararı oldukça yüksek risk oluşturabilir. Bu riskli durumlardan dolayı patlatma ile yıkım tekniği hala diğer tekniklere göre pek tercih edilmemektedir (Ertaş, 2016).

A) Sıcak Kesme



B) Patlayıcı ile kontrollü yıkım



Şekil 8. Kimyasal maddeler ile yıkım yöntemleri

Kaynak: (Güven, 2019)

c) Patlatma ile yıkım: Bu teknik genellikle alt katlarda bulunan taşıyıcı elemanların patlayıcı yardımıyla, geri kalan taşıyıcı sistemlerin artan basınç ve moment yükünün etkisi ile kendi ağırlık merkezine doğru çöktürülmesini hedefleyen yıkım tekniğidir (Özyurt, 2013). Yapıların patlayıcılar ile yıkım tekniğinin, geleneksel yıkım tekniklerine kıyasla birçok avantajı ve dezavantajı bulunmaktadır. Yapıların patlayıcı ile yıkım teknikleri ile ilgili avantajları; genellikle yüksek yapılarda kullanıldığında düşük masraflı olması ve diğer yıkım yöntemlerine kıyasla hızlı olması, inşaat iş makinelerini kullanmak için yeterli alana sahip olunmayan durumlarda kullanılabilir olması, kullanırken kontrolünün basit olması ve

oluşacak iş kazalarında en az duruma indirilebilmesi, yıkım esnasında oluşacak patlatmadan dolayı çabuk olması ve daha güvenilir olmasıdır (Alagöz, 2022).

Yapıların patlayıcı ile yıkım tekniklerinin dezavantajları ise şu şekildedir. Yıkım esnasında patlayıcı kullanıldığından dolayı tehlike riski oluşturması, Patlayıcı malzeme kullanıldığından dolayı yakın çevresindeki yapılara zarar verebilir olması, Patlatmayla yapılacak yıkım da teknik aksaklardan dolayı yıkım gerçekleşmeme ihtimali, Patlatmayı yapacak ekibin konuyla ilgili yeterli donanıma sahip olmaması vb (Alagöz, 2022).

2.4. Yüksek Basınçlı Su Jeti

İskeleti betonarme olan yapılar, bitümlü zeminler yüksek basınçlı su jeti (Şekil 9) ile kısmi onarım ya da tam yıkım yıkılabilmektedir. Kompresörle çalışarak basınçlı su ileten mekanizma, bu mekanizmaya bağlı hortum ve redüksiyon şeklindeki su jeti tabancasından oluşan bu sistem, elemanın kesilerek ayrıştırılmasına imkan tanımaktadır (Şekil 1.D). Suyun yüksek hızda betona, bitümlü zemine çarpması ile kesme işlemini optimum seviyede yapabilmesi için, sıvı tankına çeşitli katkı maddeleri ve aşındırıcılar ilave edilebilmektedir. Bu yöntem toz yayılması konusunda diğer tekniklere oranla daha avantajlı olup kimyasal yöntemlere kıyasla yangın riski açısından daha güvenlidir (Güven, 2019).



Kaynak: (Güven, 2019)

3. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Yapılarda yıkım; öncesi ve sonrası ile birer projedir. Yıkım projesi oluşturulurken farklı yıkım yönteminden yararlanmak mümkündür. Ayrıca bir yıkım alanının farklı bölgelerinde çeşitli yıkım yöntemleri birlikte kullanılabilir. Yıkım projesi hazırlanırken dikkat edilecek en önemli konu can güvenliğidir, can güvenliğini sağlayabilmek ve korumak amacı ile öncelikle risk değerlendirmeleri yapılmalıdır.

Bir yapının tam yıkımıyla kısmi yıkımı arasında ciddi farklar söz konusudur. Kısmi yıkımda, çevrede bulunan yapıların zarar görmemesi ve mevcut betonarme yapı elemanlardaki donatıların ise bozulmadan kalması istenir. Bu şekilde ki kısmi yıkımlar; konut ve arabalar gibi hassas alanlara minimum mesafeyle yıkımı planlanan yapıda bölümlerin art arda ve küçük bölümler halinde yıkılmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, bu tür yıkımlarda yıkımın çevresine zarar vermeyecek şekilde oldukça dikkatli planlamalar yapılmalıdır. Bu yıkım türünde uygun yöntemin seçimini, projesini ve çevresini irdelleyen bir planlama yapılması gerektiğinden için maliyetler fazlasıyla yüksek olabilmektedir (Koca, 2006).

Yapıların yıkımı planlı veya plansız olarak iki şekilde karşımıza çıkmaktadır. Ülkemizde, günümüz kentsel dönüşüm faaliyetleri ve riskli yapıların güvenli yapılara dönüştürülmesi amacı ile yıkımları planlı yıkımlara verilebilecek örneklerdir.

Yıkım yöntemlerinin sayısı, yıkım işlemlerinin tehlikeli ve bir çok ölçüte bağlı olması nedeni ile fazladır. Bu ölçütlerden bazılarını, yıkılacak binanın üretiminde kullanılan malzemeler, yıkılacak binanın konumu, binanın yükseklik ve geometrisi, maliyet ve zaman gibi kriterler oluşturmaktadır. Yıkım işinin iş sağlığı ve güvenliği hususunda en önemli noktası doğru yıkım yöntemini belirlemektir. Her yöntemin hem avantajları hem de

dezavantajları vardır. Birden çok tekniğin birlikte kullanımı tercih edilen durumda her yıkım yönteminde güvenlik önlemleri ayrı ayrı dikkate alınmalıdır (Ertaş, 2016).

Kaba yıkım yöntemlerinin çevre ve çalışanlar üzerinde ciddi olumsuz etkilere sahip olabilmesi ile yeni yöntemler araştırılmaya başlanmıştır. Bu etkilerin bertaraf edilmesi nedeni ile geliştirilen yeni yıkım yöntemlerinin onarım faaliyetlerindeki başarısında katkıda bulunan etmen kısmi yıkımlarda kullanılan mini patlatmalardır. Bu teknikle birlikte yapılarda onarım ve tekrar inşası için uygulanacak olan yıkım işlemlerinden çok yüksek faydalar sağlanabilmektedir (Elliot and Woolf, 2001).

Patlayıcı kullanılarak yapılan yıkım işlemleri ile yıkım çalışmalarında sürekli olarak tercih edilen geleneksel yıkım teknikleri karşılaştırıldığı zaman patlayıcılar ile yapılan yıkımların kullanım ve maliyet bakımından avantajları çok daha net görülmektedir (Tablo 1) (Koca, 2006).

Tablo 1. Yıkım Tekniklerinin Karşılaştırılması

Yıkım metodu	Yıkım projesi zamanı	Maliyet	Çevre üzerindeki olumsuz etkiler	Risk
Çelik küre ile	Uzun	Yüksek	Fazla	Düşük
Çelik topaç ile	Çok uzun	Orta	Çok az	Yüksek
Kırıcı ile	Kısa	Çok yüksek	Az	Çok düşük
Patlayıcı ile	Çok kısa	Çok kısa	Fazla	Yüksek

Tablo 1'e göre, patlayıcı kullanımı ile yapılan yıkımlarda maliyet ve zaman konularında geleneksel yıkım tekniklerine kıyasla kullanılabilirliği çok yüksekken, çevre etkileri ve taşıdığı riskler olarak çok düşük kullanım sağlayacağı görülmektedir. Fakat önceden de belirtildiği üzere kontrollü patlatma kriterleri esas alınarak planlanan bu tekniğin güvenilirliği yükseltilebilmekte ve geleneksel yıkım yöntemlerine oranla daha az çevre etkisi oluşturan oldukça yüksek emniyet

barındıran çalışmalar yapılabilmesi gibi avantajlarının yanı sıra geleneksel yıkım tekniklerine oranla, patlayıcıların başlı başına potansiyel tehlikeleri ve oluşturabilecekleri risklerden ötürü dezavantajları da bulunmaktadır (Koca, 2006).

Sonuç olarak seçici yıkım süreçlerinin teknik ve ekonomik açılardan araştırıldığı görülmektedir. Bazı çalışmalarda, seçici yıkım yöntemlerinin toplam maliyetinin geleneksel yıkım yöntemlerine göre %10 oranında azaltıldığını göstermiştir. Çevresel bir bakış açısından, seçici yıkım, yeniden kullanım ve geri dönüşüm oranlarını artırabildiği için 'sürdürülebilir' kalkınmayı sağlamaktadır Ancak bazı çalışmalar, seçici yıkımın iyi çevresel performans gösterdiğini ancak geleneksel yıkıma kıyasla daha az ekonomik fayda sağladığını öne sürmektedir (Lund & Yost, 1997; Roussat at al., 2009; Coelho & de Brito, 2011 ; Tatiya at al. 2018; Pantini & Rigamonti, 2020; Wu at al., 2021).

Geleneksel yıkım tekniklerinin avantajları dikkate alındığında patlayıcılarla yıkım tekniklerinin avantajları;

- Özellikle çok katlı yapılara uygulandığında çok daha düşük maliyet sağlaması,
- Daha hızlı bir uygulama olması,
- Trafik akışının olduğu bölgelerde yürütüldüğü zaman daha güvenli bir uygulama olması,
- Yıkım alanında, dar alanda makinelerin kullanımının zor olacağı yerlerde uygulanabilir oluşu,
- İş kazalarının en az seviyeye indirilmesi,
- Toz yayılımı ve gürültünün kontrol altına alınabilmesi,
- Yıkım sonrası atıkların bölümler halinde kolayca kaldırılmasıdır.

Bu yöntemin uygulama esnasında karşı karşıya kalınan bazı sorunlar söz konusu olabilmektedir. Bunlar; patlayıcı, statik ve güvenlik gibi konularda uzman ve kalifiye ekip gerektirmesi, yıkımı planlanan yapıların projelerinin bulunmaması ve malzemeleri hakkında bilgi sahibi olunmaması, patlatma ruhsatı ve patlayıcıların taşınması için gerekli olan evrakların temin süresinin uzun olması ve çevredeki unsurlara zarar verme riskinin olmasıdır.

4. KAYNAKÇA

- Abanuz, F. (2005). Eskimiş betonarme yapılarda yıkımın planlanması. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 166 s.
- Alagöz, S. (2022). Simulation Program For Controlled Demolition Of Buildings. TAS Journal, 2(4), 50–57.
- Bassett, C. (1982). Demolition. Construction Press, Longman House, pp. 39-40, Burnt Mili, Essex., UK.
- Coelho, A. & de Brito, J. (2011). Economic analysis of conventional versus selective demolition-A case study. Resour. Conserv. Recycl., 55, pp. 382-392, 10.1016/j.resconrec.2010.11.003
- Elliot, R. J. & Woolf, R. (2001). Demolition Blasting of Reinforced Concrete Structures. Proceedings of the 1 st World Conference on Explosives & Blasting Technique, Munich, pp. 397-403.
- Ertaş, M.H. (2016). Yıkım işlerinde risk analizi ve risk değerlendirmesi için yeni bir yöntem önerisi. Yayınlanmış Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, 318 s.
- Güven, F. (2019). Betonarme yapıların yıkımı ve yıkım tekniklerinin uygulanabilirlik, zaman ve maliyet açılarından irdelenmesi. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi. Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye, 91 s.
- Koca, O. (2006). Patlayıcı maddelerle kontrollü yapı yıkımı. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 165 s.

- Lauritzen, E. & Petersen, M. (1991). Partial Demolition by Mini Blasting. Concrete Journal, pp. 43-46, England.
- Lund, E. & Yost, P. (1997). Deconstruction—building disassembly and material salvage: The Riverdale case study. NAHB Research Center, Upper Marlboro, Maryland
- Özyurt, M. C. (2013). Patlayıcı Madde Kullanılarak Yapıların Kontrollü Yıkılması ve Verimliliğinin İncelenmesi. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi.
- Pantini, S. & Rigamonti, L. (2020). Is selective demolition always a sustainable choice?. Waste Manag., 103, pp. 169-176, 10.1016/j.wasman.2019.12.033
- Roussat, N., Dujet, C. and Méhu, J. (2009). Choosing a sustainable demolition waste management strategy using multicriteria decision analysis. Waste Manag., 29 (1), pp. 12-20, 10.1016/j.wasman.2008.04.010
- Tatiya, A., Zhao, D., Syal, M., Berghorn, G.H. and LaMore, R. (2018). Cost prediction model for building deconstruction in urban areas. J. Clean. Prod., 195, pp. 1572-1580, 10.1016/j.jclepro.2017.08.084
- Usalan, H. (2017). Kentsel dönüşümün çevresel boyutları. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 53s.
- Wu, H., Zuo, J., Zillante, G. and Duan, H. (2021). Environmental impacts of cross-regional mobility of construction and demolition waste: An Australia Study. Res. Cons. Recycl., 174 (105805).
- Yılmaz, Z. (2016). Güçlendirme / yıkım – yapım kararının belirlenmesine yönelik bir model önerisi. Yayınlanmış Doktora tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Trabzon, Türkiye, 263

DÖNÜŞEN ŞEHİRLER İLE YÜKSELEN ASBEST RİSKLERİ

Yavuz Selim HATİPOĞLU

1. GİRİŞ

Asbest doğal olarak oluşan, dayanıklı lifli yapısı sayesinde ısıya, aside, aşınmaya ve kimyasal etkilere karşı oldukça dayanıklı bir mineral türüdür. Asbestin birçok benzersiz özellikleri bir arada bulundurması ve oldukça ekonomik bir malzeme olması başta inşaat malzemeleri olmak üzere, otomotiv, tekstil ve gemi inşaatı gibi birçok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmasına imkan tanımıştır (Aryal & Morley, 2024; Stevenson vd., 2023; Taygun, 2016).

Asbest genellikle krizotil, amosit, tremolit, krokidolit, antofilit ve aktinolit olmak üzere altı ana türe ayrılır. Bu altı asbest türünün her biri farklı risk seviyelerine sahiptir. Örneğin mavi asbest bilinen krokidolit ve kahverengi asbest olarak bilinen amosit, diğer asbest türlerine göre daha tehlikeli olarak kabul edilmektedir. Mavi ve kahverengi asbest türlerinden solunan liflerinin çok ciddi sağlık sorunlarına yol açtığı bilinmektedir (Järvholm & Burdorf, 2024).



Şekil 1. Asbest Türleri

Endüstriyel Devrim ile kullanım alanları ve miktarı hızla artan asbest, 20. yüzyılın ortalarında 3000'den fazla üründe kullanılmıştır (Metin, 2019; Taygun, 2016). Ancak asbest kullanımının artması ve kullanılan malzemelerin bu denli çeşitlenmesi ne yazık ki, asbestin insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerini daha net ortaya koymuştur. Özellikle asbest liflerinin solunması sonucu ortaya çıkan akciğer kanseri, mezotelyoma ve asbestoz gibi ciddi hastalıkların çoğaldığı görülmüştür (Güneş et al., 2017; Järholm & Burdorf, 2024). Asbest kaynaklı oluşan bu ve daha birçok sağlık riskleri nedeniyle günümüzde birçok ülke asbest kullanımını yasaklamış, var olan asbestin güvenli bir şekilde sökülmesi, taşınması ve bertaraf edilmesi için de katı düzenlemeler getirmiştir (Aryal & Morley, 2024; Metin, 2019; Stevenson vd., 2023).

Türkiye'de 1930 ile 2010 yılları arasında toplam 1.180.508 ton asbest kullanıldığı tahmin 2010 yılında açıklanan TÜİK verilerinde ifade edilmektedir. Bu kullanımın en yoğun olduğu dönem ise 1980-1989 yıllarında gerçekleşmiş ve 425.476 ton asbest kullanılmıştır (Turan & Alpaydın, 2023). Çok geniş kullanım alanına sahip asbest, özellikle yapı malzemelerinde dayanıklılık ve yalıtım gibi özellikleri bir arada bünyesinde barındırdığından dolayı, sıklıkla tercih edilmiştir. Fakat asbestin insan sağlığına ciddi olumsuz etkileri ortaya çıktıktan sonra, dünya genelinde olduğu gibi ülkemizde de kullanımdan yasaklanması yönünde adımlar atılmıştır. Ülkemizde asbestin kullanımı, üretimi ve pazarlanması yasaklamıştır. Bu yasaklamayla birlikte asbest içeren malzemelerin güvenli bir şekilde sökülmesi, taşınması ve bertaraf edilmesi için gerekli yönetmelikler ve düzenlemeler getirilmiştir.

Kentsel dönüşüm şehirlerin modernizasyonu, yaşam kalitesinin iyileştirilmesi, deprem sırasında can ve mal kaybının önlenmesi için gerekli ve önemli bir süreçtir. Ne yazık ki 2010 yılından önce inşa edilmiş birçok yapıda asbest içeren

malzemelerin bulunma olasılığı çok yüksektir. Eski binaların yıkım veya yenilenmesi sırasında asbest liflerinin ortama yayılması hem çalışanlar hem de çevrede yaşayan halk için ciddi sağlık tehlikeleri oluşturabilir (Akboğa Kale vd., 2017; Taygun, 2016; Tetik vd., 2024; Uraz & Altıntop, 2020). Türkiye'de hızla devam eden kentsel dönüşüm projelerinde yapı stoğunun 1880-2010 yılları arasında inşa edildiği düşünülürse durum daha da ciddi hal almaktadır. Bu nedenle toplumda asbestle ilgili farkındalığın artırılması, güvenli söküm ve bertaraf yöntemlerinin uygulanması, denetimlerin çoğaltılması ve ilgili tüm tarafların eğitimi büyük önem taşımaktadır (Bayraktar, 2019; Şenyiğit vd., 2004).

Asbest liflerinin atmosfere yayılması çevre üzerinde ciddi ve kalıcı olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Asbest lifleri rüzgar ve su aracılığıyla geniş bir alana yayılabilir. Bu lifler hava yoluyla solunarak insan sağlığını tehdit edebilirken, toprakta uzun süre varlık gösterebilir ve ekosistemlere zarar verebilir. Asbestin su kaynaklarına karışması su kalitesini bozmakla birlikte suyla temasa geçen organizmalar için büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Dolayısıyla bu durum sucul canlıların hayatta kalma koşullarını zorlaştırarak biyolojik çeşitliliği olumsuz etkileyebilir. Ayrıca asbestin doğada bozulmadan kalması bitki örtüsünün de zarar görmesine ve toprak verimliliğinin de düşmesine neden olabilir. Asbestin yayılmasına bağlı olarak hayvanların yaşam alanları tahrip olabilir, hayvanlar bu maddelere maruz kaldığında sağlıklarını ve üreme kapasitelerini kaybedebilirler. Asbestin güvenli şekilde bertaraf edilmemesi sadece mevcut nesilleri değil, gelecekteki nesilleri de etkileyebilecek ekolojik ve çevresel sorunlara neden olabilir.

Bu kitap bölümü asbestin sağlık riskleri, çevresel etkileri, kentsel dönüşüm projelerinde asbest yönetimi, güvenli söküm ve bertaraf yöntemleri gibi konuları ele alarak bu alandaki bilgi eksikliğini gidermeyi ve farkındalığı artırmayı amaçlamaktadır.

2. ASBESTİN İNSAN SAĞLIĞINA ETKİLERİ

Asbeste maruz kalmanın etkileri genellikle uzun bir latent dönemin ardından ortaya çıkar ve çoğu zaman geri dönüşümü olmayan sorunlara yol açabilir (Mossman & Gee, 1989). Mikroskobik boyutlara sahip asbest lifleri solunum yoluyla vücuda girdiklerinde akciğerlere ve diğer organlara ulaşarak tedavisi mümkün olmayan ciddi sağlık sorunlarına neden olabilirler (Güneş vd., 2017; Järnholm & Burdorf, 2024; Mossman & Gee, 1989). Bu asbest lifleri akciğer dokusuna yerleşerek kronik iltihaplanmaya, fibrozise ve zamanla da kansere neden olabilirler (Güneş vd., 2017). Asbestin neden olduğu sağlık sorunları arasında asbestoz, akciğer kanseri, mezotelyoma ve plevral plaklar hastalıkları sayılabilir (Broström vd., 2024; Järnholm & Burdorf, 2024). Asbest maruziyeti riski, özellikle eski binaların yıkımı, restorasyonu, onarımı veya bakımı sırasında daha da artmaktadır (Tetik vd., 2024; Üzmezoğlu & Ocaktan, 2017). Bu nedenle, kentsel dönüşüm projelerinde mevcut yapıların asbest içerip içermediğinin tespiti ve asbestli malzemelerin güvenli bir şekilde sökülmesi, bertaraf edilmesi hayati önem taşımaktadır (Üzmezoğlu & Ocaktan, 2017).

2.1. Asbestoz

Asbestoz asbest liflerinin solunması sonucu akciğerlerde skar dokusu (fibrozis) gelişimiyle meydana gelen çok ciddi bir hastalıktır (Aryal & Morley, 2024; Bayraktar, 2019; Güneş vd., 2017; Järnholm & Burdorf, 2024). Vücudun bağışıklık sistemi solunumla alınan bu asbest liflerini yabancı cisim olarak algılar ve bu liflere karşı iltihaplanma sürecini başlatır (Güneş vd., 2017). Bu kronik iltihaplanma süreci akciğer dokusunda skarlaşmaya (fibrozis) ve zamanla akciğerlerin esnekliğini ve gaz alışveriş kapasitesinin önemli ölçüde azalmasına yol açar (Bayraktar, 2019; Mossman & Gee, 1989). Asbestoz genellikle

uzun süreli ve yoğun asbest maruziyetinden sonra 10 ile 30 yıl gibi bir latent dönemin ardından ortaya çıkar (Järholm & Burdorf, 2024).

Asbestoza yakalanan kişilerin günlük yaşam aktiviteleri ciddi şekilde etkilenebilir. Hastalığın klinik belirtileri arasında nefes darlığı (özellikle fiziksel efor sırasında), kalıcı kuru öksürük, göğüs ağrısı, çabuk yorulma, iştah kaybı ve kilo kaybı yer alır (Järholm & Burdorf, 2024). Maalesef asbestozun ilerlemesini durduracak bir tedavi bulunmamaktadır. Bu hastalıkta tedavi yaklaşımı var olan semptomların hafifletilmesi, solunum fonksiyonlarının desteklenmesi ve hastaların yaşam kalitesinin artırılması olarak ifade edilebilir (Bolan et al., 2023).

2.2. Akciğer Kanseri

Asbest maruziyeti akciğer kanserine yakalanma riskini önemli ölçüde artıran etkenlerden biridir. Kişinin sigara kullanması riskin daha da artmasına yol açabilir. Asbest lifleri akciğer hücrelerinin DNA'sına zarar verir ve bu durum da kanserin oluşumuna neden olmaktadır. Bu hastalığın klinik belirtileri arasında kalıcı öksürük, kanlı balgam, göğüs ağrısı, nefes darlığı, ses kısıklığı, iştahsızlık ve kilo kaybı gibi belirtiler yer almaktadır. Asbest liflerinin solunması nedeniyle oluşan akciğer kanseri toplumda oldukça sık görülen önemli bir toplum sağlığı sorunudur (Stevenson vd., 2023).

Akciğer kanseri tedavisi hastanın genel sağlık durumu ve kanserin evresine göre değişiklik gösterir. Cerrahi müdahale, kemoterapi, radyoterapi, immünoterapi ve hedefe yönelik tedaviler uygulanabilmektedir. Hastalığın tedavi başarısının artmasında erken teşhis oldukça önemlidir.

2.3. Mezotelyoma

Mezotelyoma akciğerleri, karın boşluğunu ve kalp zarı gibi organları saran zarlarda gelişen agresif bir kanser türüdür

(Sinkler vd., 2020). Mezotelyomanın belirtileri etkilenen organın zarına bağlı olarak değişiklik gösterir. Örneğin plevral mezotelyoma (akciğer zarı kanseri) nefes darlığı, göğüs ağrısı ve inatçı öksürüğe neden olabilir (Järholm & Burdorf, 2024). Peritoneal mezotelyoma (karın zarı kanseri) ise karın ağrısı, şişkinlik ve kilo kaybı belirtilerini gösterir. Perikardiyal mezotelyomada (kalp zarı kanseri) göğüs ağrısı ve düzensiz kalp ritimleri gibi belirtiler görülebilir (Mossman & Gee, 1989). Mezotelyoma tedavisi tıpkı akciğer kanseri tedavisinde olduğu gibi hastanın genel sağlık durumu ve kanserin evresine göre değişiklik gösterir. Kanser hastalarına uygulanan yöntem ve metotlar uygulanır.

2.4. Plevral Plaklar

Plevral plaklar asbest liflerinin plevraya ulaşması ve inflamatuvar bir reaksiyona neden olması sonucu oluşurlar. Bu hastalık genellikle herhangi bir semptom göstermeyen asbest maruziyetinin en sık görüldüğü hastalıklardandır. Plevral plaklar herhangi bir belirti göstermediğinden genellikle rutin göğüs röntgenleri veya BT taramaları sırasında tesadüfen tespit edilirler (Bolan vd., 2023). Tek başına plevral plakların varlığı herhangi bir fonksiyonel bozukluğa neden olmaz ve genellikle tedavi gerektirmez. Bununla birlikte, plevral plakların varlığı, kişinin geçmişte asbeste maruz kaldığını gösterir ve diğer asbestle ilişkili hastalıklar açısından dikkatli bir izlem gerektirebilir.

2.5. Plevral Efüzyon

Plevral efüzyon plevral boşlukta sıvı birikmesi sonucu oluşan bir hastalıktır (Karkhanis & Joshi, 2012). Asbest maruziyetinin olması plevral efüzyona neden olan faktörlerden biridir (Çiftci vd., 2018). Plevral efüzyon, nefes darlığı, göğüs ağrısı ve öksürük gibi klinik belirtiler gösterebilir (Kass vd.,

2007). Bulguların şiddeti, efüzyonun boyutuna ve altta yatan nedene bağlı olarak değişiklik gösterebilir (Karkhanis & Joshi, 2012). Küçük efüzyonlar genellikle asemptomatik olmasına karşın büyük efüzyonlar ciddi solunum sıkıntısına neden olabilir (Kastelik, 2013). Plevral efüzyonun teşhisi fizik muayene, göğüs röntgeni, ultrason ve BT taraması gibi görüntüleme yöntemleri gerçekleştirilir (Na, 2014). Asbest kaynaklı efüzyonlarda asbest maruziyetinin ortadan kaldırılması esastır.

3. KENTSEL DÖNÜŞÜM SÜRECİNDE ASBEST MARUZİYETİ VE YÖNETİMİ

Türkiye’de nüfus artışı, hızlı kentleşme ve yaşanan büyük depremlerden sonra güvenli yapı isteği gibi kritik etkenler nedeniyle yoğun bir kentsel dönüşüm süreci başlamıştır. Kentsel dönüşüm süreçleri özellikle eski ve riskli yapıların yıkılarak yerine daha modern, dayanıklı konutların inşa edilmesini, altyapının iyileştirilmesini ve genel olarak yaşam kalitesinin yükseltilmesini hedeflemektedir (Aydın & Orçan, 2023; Efe vd., 2024).

Kentsel dönüşüm fikrinin Türkiye’de özellikle 1999 yılında yaşanan yıkıcı Marmara Depremi sonrası gündeme gelmiş ancak 2023 yılında yaşanan büyük Kahramanmaraş depremleri ve beklenen İstanbul depremine hazırlık gibi etkenler günümüzde bu süreci daha da hızlandırmıştır. Yaşanan bu deprem felaketleri mevcut yapı stoğunun ne kadar güvensiz olduğunu gözler önüne sermiş ve dolayısıyla da afet riski taşıyan bölgelerde dönüşüm ihtiyacını ortaya koymuştur (Yolcu, 2021). Fakat kentsel dönüşüm sürecinin en etkili parametrelerinden biri daha güvenli yapılar inşa etmek olsa da diğer taleplerde günümüzde kentsel dönüşüm talebini artırmaktadır. Örneğin gecekondü bölgelerinin iyileştirilmesi, sosyal imkanları yüksek konforlu projelerde insanların yaşamak istemesi, gelişen

teknoloji ve imkanlara çevrenin uyum sağlayabilmesi için yaşam alanlarının revizyona girmesi ve tarihi alanların yenilenmesi gibi pek çok talepten dolayı farklı çerçeveleri de kapsamaya başlamıştır. Bu taleplerin yerine getirilebilmesi için çıkarılan 6306 sayılı "Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun" kentsel dönüşüm projelerine yasal bir zemin sağlayarak bu sürecin resmi, hızlı ve düzenli bir şekilde yürütülmesine katkı sağlamıştır.

Ne yazık ki kentsel dönüşüm projeleri eski yapıları modern ve yaşam kalitesini artıran yapılara dönüştürürken bir yandan da eski binalardaki sağlığa zararlı maddeler nedeniyle sağlık ve çevre sorunlarına yol açabilir. Dünya inşaat sektöründe dayanıklılığı, yalıtım özellikleri ve düşük maliyeti nedeniyle 1950'lerden 1980'lere kadar çok yaygın olarak kullanılan ve tercih edilen asbest bu risklerin başında gelmektedir (Kale vd., 2017).

Türkiye'de asbest kullanımı 2010 yılında yasaklanmış olsa da 2010 yılından önce ve özellikle de 1950-1980 yılları arasında inşa edilen binalar asbest gibi zararlı malzemeleri içermektedir. Asbest yapılarda özellikle çatı kaplamaları, boru izolasyonları, tavan ve zemin kaplamalarında sıklıkla tercih edilmiş ve kullanılmıştır (Tetik vd., 2024). Yıkım veya onarım işlemleri sırasında havaya karışan asbest liflerinin solunum yoluyla insan vücuduna girerek uzun vadede sağlık sorunlarına yol açabilmektedir (Üzmezoğlu & Ocaktan, 2017). Dönüşüm sırasında çevreye yayılan asbest liflerinin solunması akciğer kanseri, asbestoz ve mezotelyoma gibi ölümcül hastalıklarla yol açtığı artık kesinleşmiştir (Güneş vd., 2017; Järholm & Burdorf, 2024). Hem yıkım işçileri hem de yıkımın gerçekleştiği çevre sakinleri asbestin olumsuz etkilerine en çok maruz kalanlardır. Dolayısıyla kentsel dönüşüm sürecinin sağlık ve güvenlik sorunları oluşturma potansiyeli yüksektir (Aydın & Orçan, 2023; Efe vd., 2024; Taygun, 2016; Yolcu, 2021).

Asbest tedavisi olmayan sağlık sorunlarına yol açan ciddi bir malzeme olduğu için asbest ile ilgili çalışmalarda eğitim almış yetkili kişilerin var olması elzendir. Bu nedenle asbestin tespiti, sökümü ve bertarafı için yetkilendirilmiş uzman ekiplerin, özellikle de Asbest Söküm Uzmanlarının, bu süreci yönetmesi gereklidir (Metin, 2019; Mogan & Güngör, 2023). 2013 yılında ıkarılan Asbestle alışmalarda Sağlık ve Güvenlik nlemleri Hakkında Yönetmelik kapsamındaki prosedürler, bu sürecin güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamaktadır.

Asbest içeren malzemelerin kontrolsüz yıkımla ortama yayılmasını önlemek için asbest tespit süreci titizlikle yönetilmeli, envanter çalışması yapılmalı, negatif basınç, izolasyon, ıslak söküm gibi teknikler kullanılmalıdır. Bertaraf işlemi lisanslı özel araçlar kullanılarak ve lisanslı tesislerde gerçekleştirilmeli, taşıma çift katmanlı torbalama ve etiketleme gibi uluslararası standartlara uygun şekilde gerçekleştirilmelidir (Bolan vd., 2023). Asbest sökümü ve bertarafı, kentsel dönüşüm projelerinde sadece yasal bir zorunluluk değil aynı zamanda etik de bir sorumluluktur.

Asbest kaynaklı risklerin yönetimi için etkin bir denetim mekanizması ve kamuoyu bilinçlendirmesi gereklidir. Aynı zamanda yerel yönetimlerin de vre ve insan sağlığını koruyarak projeleri hayata geçirmesi büyük önem taşmaktadır. Asbest içeren yapı malzemelerinin sökümü ve bertarafı uzman ekipler tarafından, ilgili yönetmeliklere uygun şekilde ve gerekli tüm sağlık ve güvenlik önlemleri alınarak gerçekleştirilmelidir (Anonim, 2020).

3.1. Asbestin Bina ve Yapılardaki Kullanımı

Isıya, ateşe, kimyasallara ve aşınmaya dayanıklılığı, yalıtım özellikleri, ekonomik ve kolay ulaşılabilir olması nedeniyle birçok farklı yapı malzemesinde asbest tercih edilmiştir. Özellikle 1930ile 1980 yılları arasında inşaat

sektöründe asbest kullanımı zirveye ulaşmıştır (Tetik vd., 2024). Asbestin binalarda ve yapılardaki yaygın kullanım alanları şunlardır (Anonim, 2020):

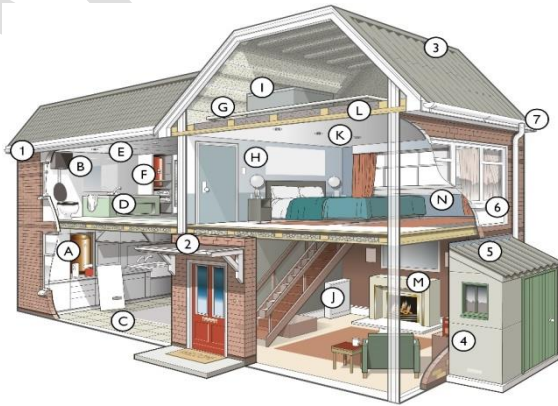
Çatı Kaplamaları: Asbestli çimento levhalar çatı kaplamalarında yaygın olarak kullanılmıştır. Bu levhalar, dayanıklı ve ucuz olmaları nedeniyle tercih edilmiştir.

Cephe Kaplamaları: Asbestli çimento levhalar aynı zamanda dış cephe kaplamalarında da kullanılmıştır. Özellikle yüksek binalarda ısı yalıtımı sağlamak amacıyla tercih edilmiştir.

Boru İzolasyonu: Asbestin ısıya dayanıklı ve yalıtım malzemesi olması boru izolasyonunda kullanılmasını sağlamıştır. Sıcak su boruları, buhar boruları ve baca sistemlerinde asbestli izolasyon malzemeleri çokça tercih edilmiş ve kullanılmıştır.

Zemin Kaplamaları: Asbestli vinil yer karoları ve yapıştırıcılar zemin kaplamalarında yaygın olarak kullanılmıştır.

Tavan Kaplamaları: Asbestli akustik tavan karoları ses yalıtımı sağlamak için kullanılmıştır.



Şekil 2. Binalarda asbest bulunabilecek yerler (HSE, 2024).

İç Mekân: A. Asbest yalıtım panosu (AYP), B. Tuvalet rezervuarı, C. Asbest kağıdı ve bitüm yapıştırıcı ile desteklenmiş vinil yer karoları, D. Asbest yalıtım panosu (AYP) veya asbest çimentolu banyo panelleri, E. AYP tavan panelleri, F. AYP havalandırma dolabı ve/veya kazanın püskürtme izolasyon kaplaması, G. Boru izolasyonu, H. AYP bölme duvarı, I. Asbest çimentolu su tankı, J. Sigorta kutusunun arkasında AYP, K. Dokulu dekoratif kaplama, L. Gevşek dolgu izolasyonu, M. Şöminenin arkasında AYP, N. İç pencere panellerinde AYP veya asbest çimento.

Dış Mekân: AYP veya asbest çimentolu saçak ve pervazlar, 2. Çatı keçesi, 3. Asbest çimentolu çatı kiremitleri/levhaları, 4. Asbest çimentolu paneller, 5. Profilli asbest çimentolu levhalar, 6. Dış pencere panellerinde AYP veya asbest çimento, 7. Oluklar ve asbest çimentolu iniş boruları.

3.2. Asbest İçeren Malzemelerin Tespiti ve Analizi

Asbest içeren malzemelerin tespit ve analizinin yapılması asbestle ilgili risklerin yönetimi ve insan sağlığının korunması açısından kritik bir öneme sahiptir (Aryal & Morley, 2024). Yanlış veya eksik tespit hem işçilerin hem de toplum sağlığını riske atabileceğinden asbest türünün ve miktarının doğru bir şekilde tespit edilmesi, uygun sökülme ve bertaraf yöntemlerinin belirlenmesi oldukça önemlidir.

Asbest tespiti genellikle iki aşamada gerçekleştirilir:

1. *Ön Tarama ve Numune Alma:* Bu aşamada binanın yaşı, yapımında kullanılan malzemeler ve asbest bulunma olasılığı yüksek alanlar gibi etkenler dikkate alınarak bir ön tarama gerçekleştirilir. Asbest şüphesi olan malzemelerden asbest liflerinin ortama yayılmasını önlemek için numune alma işlemi hassas ve dikkatli bir şekilde yapılmalıdır (Kale vd., 2017).

Alınan numuneler hava geçirmez kaplarda muhafaza edilmeli ve analiz için yetkilendirilmiş laboratuvarlara gönderilmelidir (Uraz & Altıntop, 2020).

2. *Laboratuvar Analizi:* Alınan numuneler çeşitli yöntemler kullanılarak laboratuvar ortamında analiz edilir. En yaygın kullanılan analiz yöntemleri şunlardır:

Polarize Işık Mikroskobu: Bu yöntem asbest liflerinin optik özelliklerini inceleyerek asbestin türünü ve miktarını belirler. PLM, hızlı ve düşük maliyetli bir yöntemdir. Fakat bazı durumlarda diğer yöntemlerle doğrulama gerektirebilir (Bayraktar, 2019).

Taramalı Elektron Mikroskobu: Bu yöntem asbest liflerinin yüzey yapısını ve kimyasal bileşimini detaylı bir şekilde incelemek için kullanılır. Bu yöntem ile asbestin türü kesin olarak belirlenebilir (Uraz & Altıntop, 2020).

X-ışını Kırınımı: X-ışını Kırınımı (XRD) asbest minerallerinin kristal yapısını analiz ederek asbestin türünü ve miktarını belirleyen bir yöntemdir. Bu yöntem, özellikle karmaşık numunelerin analizinde daha etkilidir (Uraz & Altıntop, 2020).

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi: FTIR olarak ismi kısaltılan bu yöntem ile asbest liflerinin kimyasal bağları analiz edilerek asbest türü belirlenir (Uraz & Altıntop, 2020).

Asbest tespiti ve analizi uzmanlık gerektiren bir süreçtir ve bu işlemler eğitilmiş ve deneyimli kişiler tarafından yürütülmelidir.

3.3. Asbest Yönetimi ve Bertarafı

Daha önce de bahsedildiği üzere kentsel dönüşüm projeleri şehirlerin modernizasyonu ve yaşam kalitesinin artırılması amacıyla gerçekleştirilen süreçlerdir. Ancak bu projelerin uygulanması sırasında eski yapıların yıkımı ya da renovasyonunda asbest gibi tehlikeli maddelerin mevcudiyeti ve çevreye yayılma ihtimali nedeniyle öngörülme riskler doğurabilmektedir. Asbestin insan sağlığı üzerinde geri döndürülemez ölçüde yarattığı etkiler nedeniyle asbest yönetimi ve bertarafının önemi bu dönüşüm projelerinde kritik bir öneme sahip olmaktadır.

Asbestin doğru ve güvenli bir şekilde yönetilmemesi hem işçilerin hem de çevre sakinlerinin sağlığını tehlikeye atabileceği gibi asbest atıklarının da uygun olmayan şekilde bertaraf edilmesi toprak ve su kirliliğine yol açarak ekosistemlere zarar verebilmektedir (Bolan vd., 2023). Bu nedenle, kentsel dönüşüm projelerinde süreçlerinde asbest yönetiminin sağlanması hem insan sağlığı hem de çevre koruma açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu bağlamda asbest yönetimi aşağıdaki aşamaları içeren kapsamlı bir süreç olarak ele alınmalıdır:

Risk Değerlendirmesi: Asbest sökümünden önce uzmanlar tarafından detaylı bir risk değerlendirmesi yapılmalıdır. Bu değerlendirme ile asbestin türü, miktarı, yeri ve durumu belirlenir.

Planlama ve Projelendirme: Asbestli malzemelerin sökümü, taşınması ve bertarafı için analiz ve inceleme sonucu elde edilen verilerle güvenli ve etkili bir plan hazırlanmalı ve bu plan uzman ekipler tarafından onaylanmalıdır.

Çalışma Alanının Hazırlanması: Asbestin söküleceği alan veya bölge liflerinin yayılmasını önlemek için izole edilir.

Bu işlem sırasında genellikle plastik örtüler ve negatif basınçlı havalandırma sistemleri kullanılır (Yeşilyurt, 2016).

Kişisel Koruyucu Donanımlar (KKD): Asbest sökümünde çalışan tüm personel uygun KKD'ler kullanmak zorundadır.

Söküm İşlemleri: Asbest içeren malzemeler özel eğitilmiş ve sertifikalı personel tarafından sökülmalıdır.

Atık Taşıma ve Bertarafı: Asbest atıkları tehlikeli atık yönetmeliğine uygun olarak taşınır ve yetkili bertaraf tesislerinde imha edilir.

Temizlik ve Kontrol: Söküm işlemi tamamlandıktan sonra çalışma alanı ve çevresi titizlikle temizlenir. Hava kalitesi ölçümleri yapılarak asbest liflerinin tamamen temizlendiğinden emin olunur (Uraz & Altıntop, 2020).

Belgelendirme ve Raporlama: Tüm söküm ve bertaraf süreci detaylı bir şekilde belgelenir ve ilgili kurumlara raporlanır. Bu durum şeffaflığı sağlamada ve gelecekte olası sorunların tespit edilmesine önemli yer tutar.

Denetim ve İzleme: Asbest söküm faaliyetlerinin ilgili mevzuat ve standartlara uygun olarak gerçekleştirilip gerçekleştirilmediğinin denetlenmesi, hava, su ve toprak kalitesinin izlenmesi gerekmektedir (Kale vd., 2017).

Kentsel dönüşüm projelerinde asbest yönetiminin planlanması, gerçekleştirilmesi ve bu kültürün topluma yayılması sadece bir sağlık ve güvenlik meselesi değil, aynı zamanda bir sosyal sorumluluktur. Asbestin doğru yönetimi ve bertarafı günümüz de gelecek nesillerimizin sağlığını ve çevresini koruyarak sürdürülebilir bir kentsel gelişime önemli katkı sağlar.

3.3.1. Risk Değerlendirmesi

Asbest içeren yapılarda söküm ve bertaraf işlemlerine başlamadan önce kapsamlı bir risk değerlendirmesi yapmak elzem bir konudur. Bu değerlendirme sonucunda asbestin türü, miktarı, konumu ve mevcut durumu gibi faktörler belirlenir. Olası sağlık ve çevresel riskleri minimize etmek için risk değerlendirilmesinden elde edilen bilgilen ışığında planlama ve projelendirme çalışmaları yapılır. Aynı zamanda işçi sağlığı, halk sağlığı ve çevre koruması için risk değerlendirmesi yasal bir zorunluluktur (Aryal & Morley, 2024; Mogan & Güngör, 2023).

Risk değerlendirmesi, aşağıdaki aşamaları içeren sistematik bir süreçtir:

Asbestin Mevcudiyetinin Tespiti: Bu aşama, binadaki tüm malzemelerin incelenerek asbest içerip içermediğinin belirlenmesini kapsar. Yapıların riskli olup olmadığının tespiti, "Asbestle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Yönetmeliği" ve "İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu" hükümlerine göre yapılır.

Asbest Türünün ve Miktarının Belirlenmesi: Asbestin türü ve miktarı söküm ve bertaraf işlemlerinin doğru bir şekilde planlanmasında kritik öneme sahiptir. Asbestin türünün (krizotil, amfibol vb.) ve miktarının doğru tespiti, uygun güvenlik önlemlerinin ve kişisel koruyucu donanımların seçilmesi için gereklidir (Sen, 2015). Asbest Atık Yönetimi Yönetmeliği'ne göre tehlikeli atık olarak sınıflandırıldığından taşıma ve bertaraf süreçlerinde özel prosedürler uygulanmasını zorunludur.

Maruz Kalma Düzeyinin Değerlendirilmesi: Asbestli işlerde çalışanların ve sökümün yapıldığı bölgedeki çevre sakinlerinin asbest liflerine maruz kalma düzeyinin belirlenmesi, riski minimize etmek için alınacak önlemlerin belirlenmesinde önemlidir. Asbestle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri

Yönetmeliği maruz kalma düzeyine göre kullanılacak KKD'leri belirlemektedir.

Çevresel Etkilerin Değerlendirilmesi: Asbestin yalnızca insan sağlığı üzerindeki etkileri değil çevreye olan etkileri de dikkate alınmalıdır. Asbest liflerinin toprak ve suya karışması çevre kirliliğine ve ekosistemlerin bozulmasına yol açabilir. Bundan dolayı söküm ve bertaraf işlemleri süresince çevresel etkilerin minimize edilmesi için gerekli önlem ve tedbirler muhakkak alınmalıdır. Çevre Kanunu ve Atık Yönetimi Yönetmeliği bu tür çevresel değerlendirmelerin yapılmasını ve asbestin çevreye zarar vermesini önlemek için uygun yönetim prosedürlerinin uygulanmasını zorunlu kılmaktadır.

İşçi Sağlığı ve Güvenliği: Risk değerlendirmesinde işçi sağlığı ve güvenliği önceliklidir. Çalışanların asbestle doğrudan temasını önlemek için KKD kullanımı, eğitim ve güvenlik protokolleri gibi önlemler alınmalıdır (Yeşilyurt, 2016). İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ve Asbestle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Yönetmeliği asbestle çalışan personelin korunması için gerekli güvenlik önlemlerini ve denetim sürelerini düzenlemektedir.

3.3.2. Planlama ve Projelendirme

Asbest sökümünde planlama ve projelendirme güvenli ve etkili bir süreç için kilit rol oynamaktadır. Bu aşama işçi güvenliği, halk sağlığı ve çevre korumasını sağlamak amacıyla asbestle ilgili tüm güvenli çalışma prosedürlerinin, alınacak önlemlerin ve kullanılacak yöntemlerin detaylı bir şekilde planlanmasını içerir (Anonim, 2020). Başarılı bir asbest söküm yönetimi doğru ve kapsamlı bir planlamaya dayanır. Bu planlama sadece tehlikenin tespiti ve alınması gereken önlemler değil, aynı zamanda asbestin güvenli bir şekilde bertaraf

edilmesi için gerekli tüm prosedürleri de kapsar (Mogan & Güngör, 2023; Stevenson vd., 2023).

Asbest söküm planlaması aşağıdaki aşamaları içerir:

Söküm Yöntemlerinin Belirlenmesi: Asbestin söküm yöntemi malzemenin türüne, bulunduğu yerin erişilebilirliğine, miktarına ve risk değerlendirmesine bağlı olarak belirlenir. Asbestin hava yoluyla yayılmasını önlemek için özel yöntemler kullanılır. Söküm alanı, negatif basınçlı havalandırma sistemleri ve plastik örtüler gibi önlemlerle izole edilmelidir.

Güvenlik Önlemlerinin Belirlenmesi: Planlama sürecinde, işçilerin korunması için gerekli güvenlik önlemleri belirlenir. Bu önlemler, kişisel koruyucu donanımların seçiminden iş yeri güvenliği prosedürlerine kadar geniş bir yelpazeyi kapsar.

Ekipman ve Malzeme Seçimi: Asbest söküm ve bertaraf işlemlerinde kullanılacak ekipman ve malzemelerin doğru seçimi güvenliği ve verimliliği artırır. Bu ekipmanlar arasında havalandırma sistemleri, koruyucu kıyafetler ve söküm araçları bulunur. Ekipman ve malzeme seçiminde, sağlık ve güvenlik gereksinimlerine uyulması gerekir.

Zaman Çizelgesi ve İleriye Dönük Risk Yönetimi: Planlama aşamasında söküm işlemlerinin tamamlanma süresi belirlenir ve olası riskler için önceden tedbirler alınır. İşin süresi ve takvimi de bu aşamada planlanır (Taygun, 2016). Bu, risklerin minimize edilmesi için önemlidir.

3.3.3. Çalışma Alanının Hazırlanması

Asbest sökümü sırasında çalışma alanının hazırlanması asbestin çevreye yayılmasını önlemek ve işçi güvenliğini sağlamak için hayati öneme sahiptir. Bu aşama titizlikle ve dikkatle gerçekleştirilmelidir.

Alanın İzolasyonu ve Hava Sistemleri: Söküm yapılacak alan asbest liflerinin havaya karışmasını önlemek için tamamen izole edilmelidir. İzole alan hava sızdırmaz ve çalışan sayısının dikkate alındığı uygun boyutlara göre tasarlanmalıdır. Bu genellikle negatif basınçlı havalandırma sistemleri ve Polietilen örtüler kullanılarak sağlanır (Aryal & Morley, 2024; Yeşilyurt, 2016). İzolasyon yöntemlerinin uygulanmasını Asbestle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Yönetmeliği zorunlu kılmaktadır.

Güvenlik İşaretleri ve Erişim Kontrolü: Söküm alanına yalnızca yetkili kişilerin girmesine izin verilmeli ve alanın çevresi uygun güvenlik işaretleriyle belirlenmelidir. İşçi güvenliği için bu durum hayati önem taşımaktadır.

Söküm alanına giriş çıkış: İzole edilmiş söküm alanına giriş ve çıkışlar özel olarak oluşturulmuş geçitlerle kontrol altına tutulmalı ve gerekli güvenlik önlemleri alınmalıdır. Çalışma alanına giriş ve çıkışlarda içeriden herhangi kontaminasyon çıkmaması için güvenlik ekipmanlarının tüm yüzeyleri dikkatlice temizlenmeli ve asbeste maruz kalan tüm cilt çıkış bölmesinde oluşturulan duş bölmesinde yıkanmalıdır. Temizlenemeyen veya temizlenmesi mümkün olmayan herhangi bir ekipman asbestli atık olarak imha edilmelidir. Asbestli alandan temiz alana koruyucu kıyafetler ile çıkılması yasaktır.

Alanın Temizlenmesi: Söküm öncesinde çalışma alanı temizlenmeli ve asbest liflerinin yayılmasını önleyecek şekilde düzenlenmelidir. Çalışma alanındaki tüm tehlikeli maddeler ve atıklar önceden temizlenmeli ve bu temizlik işlemi uygun denetimler altında gerçekleştirilmelidir. Atık Yönetimi Yönetmeliği bahsi geçen temizlik işlemlerinin nasıl yapılacağına dair kurallar belirlemiştir.

3.3.4. Kişisel Koruyucu Donanımlar

Asbest sökülme ve bertaraf işlemleri sırasında çalışanların güvenliği için uygun KKD kullanımı zorunludur. Asbest lifleri solunum yoluyla vücuda girerek ciddi sağlık sorunlarına neden olabileceğinden işçilerin asbest liflerinden korunması için belirli güvenlik önlemlerine sahip koruyucu ekipmanlar kullanılmalıdır (Güneş vd., 2017). Bu KKD'ler genellikle tek kullanımlıktır. KKD'lerin doğru şekilde kullanılması işçilerin asbest liflerinden korunmasını büyük ölçüde sağlar.

Asbest ile çalışmalarda kullanılması gereken KKD'ler genel olarak aşağıdaki gibidir:

1. *Solunum Koruma Ekipmanları:* Asbest bulunan alanlarda çalışanlar P3 koruma seviyesine sahip tam yüz maskeleri gibi solunum koruyucu takmalıdır. Bu maskeler FFP3 koruma seviyesine sahip minimum 20 veya daha üzeri koruma faktörüne sahip, partiküllere karşı koruyucu olmalıdır (Yeşilyurt, 2016).
2. *Koruyucu Giysiler:* İşçilerin vücutlarının asbest lifleriyle doğrudan temas etmesini önlemek için tek kullanımlık, anti-statik özelliğe sahip ve partiküllere karşı koruyucu giysiler giyilmelidir. Asbestli alana her giriş için yeni bir korucu elbise giyilmelidir. Koruyucu elbiseler TS EN ISO 13982-1'e göre Tip 5 ve TS EN 13034 'e göre Tip 6 standartlarını karşılamalıdır. Koruyucu elbiseler ile yıkanabilir bağciksız çizmeler/botlar tercih edilmelidir.
3. *Gözlük ve Eldivenler:* Asbest liflerinin gözlerle temasını engellemek için koruyucu gözlükler ve ellerin korunması için eldivenler kullanılmalıdır. Bu durum işçi sağlığı ve güvenliği açısından oldukça önemlidir.

3.3.5. Söküm İşlemleri

Asbestin güvenli bir şekilde sökülmesi süreci uzman ekipler tarafından uygulanan özel teknikler ve güvenlik önlemleri gerektirir. Söküm işlemi sırasında asbest liflerinin yayılmasını önlemek için özel yöntemler kullanılmalı ve kullanılan ekipmanlar ile yöntemler hem çevreyi hem de işçileri koruyacak şekilde tasarlanmalıdır.

Söküm işleminin aşamalarını şu şekilde sıralamak mümkündür:

1. *Söküm Yöntemlerinin Seçimi:* Asbest içeren malzemenin türüne göre uygun söküm yöntemi seçilmelidir (İŞ, n.d.). Söküm sırasında asbest liflerinin yayılmasını önlemek için negatif basınçlı havalandırma ve toz kontrol sistemleri kullanılmalıdır (Aryal & Morley, 2024).
2. *Ekipman ve Güvenlik Önlemleri:* Söküm sırasında kullanılan ekipmanların düzgün çalıştığından ve güvenli olduğundan emin olmak için düzenli bakım ve kontroller yapılmalıdır.

3.3.6. Atık Yönetimi ve Bertarafı

Asbest sökümü sırasında ortaya çıkan atıkların güvenli bir şekilde toplanması, taşınması ve bertaraf edilmesi, çevresel ve sağlık risklerini en aza indirmek için elzemdir. Asbest atıkları tehlikeli atık olarak sınıflandırıldığından özel prosedürlerle işlenmelidir. Atık Yönetimi Yönetmeliği asbest atıklarının güvenli bir şekilde taşınması ve bertarafı için gerekli prosedürleri belirlemiştir.

Asbest atıkları çift katmanlı, sızdırmaz ve dayanıklı torbalara veya konteynerlere uygun şekilde paketlenmeli ve etiketlenmelidir. Asbest atıkları yalnızca yetkili taşımacılar

tarafından uygun güvenlik önlemleri alınarak taşınmalı ve lisanslı bertaraf tesislerine gönderilmelidir.

3.3.7. Denetim ve İzleme

Asbest söküm ve bertaraf faaliyetlerinin ilgili mevzuat ve standartlara uygun olarak gerçekleştirilip gerçekleştirilmediği sürekli olarak denetlenmeli ve izlenmelidir. Denetim ve izleme hem çevresel etkilerin minimize edilmesi hem de halk ve çalışan sağlığının korunması için gereklidir. Ayrıca yapılan işlemlerin yasal uygunluğunun sağlanması ve gelecekteki sorunların önlenmesine de katkıda bulunur.

Denetim sürecinin başlıkları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

1. *Bağımsız Denetimler:* Bağımsız denetim kuruluşları tarafından asbest söküm süreçlerinin her aşaması denetlenerek uygulanan yöntemlerin yasal düzenlemelere uygunluğunu değerlendirir (Aryal & Morley, 2024). Bu denetimin kapsamı işçi güvenliği, çevre güvenliği ve asbestli malzeme bertarafını içerir (Sen, 2015).
2. *Hava, Su ve Toprak Kalitesinin İzlenmesi:* Söküm işleminden sonra çevreye asbest lifi yayılmalarını önlemek amacıyla hava kalitesinin izlenmesi önem arz etmektedir. Asbest sökümünün gerçekleştirildiği bölgelerde hava örnekleri alınarak asbest liflerinin havadaki konsantrasyonu ölçülür. Ayrıca ilgili alandan su ve toprak örnekleri alınarak asbestin bu ortamlara bulaşıp bulaşmadığı kontrol edilir (Cecchetti vd., 2005).
3. *Çevresel Etkilerin İzlenmesi:* Asbest söküm işlemleri sonrasında çevresel etkilerin izlenmesi ve kayıt altına alınması önemlidir (Cecchetti vd., 2005). Bu süreçte hava, su ve toprak örneklerinin yanı sıra, asbestin

Çevredeki biyolojik ve ekolojik alanlara etkileri de değerlendirilmelidir (Bolan vd., 2023).

3.4. Asbest Söküm Sürecinde Çevresel Etki Değerlendirmesi

Asbest söküm faaliyetlerinin çevresel ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle asbest söküm projelerinin başlamasından önce kapsamlı bir çevresel etki değerlendirmesi yapılması yasal bir zorunluluktur (Altıntaş, 2023). Çevresel etki değerlendirmesi öncelikle söküm sürecinde kullanılacak yöntemlere, asbest türlerine, miktarına ve binadaki konumuna uygun olarak belirlenmesini gerektirir. Farklı asbest türleri farklı risk seviyeleri taşır ve bu durum hem söküm yöntemlerinin hem de güvenlik önlemlerinin planlanmasında belirleyici rol oynar (Mogan & Güngör, 2023; Uraz & Altıntop, 2020). Örneğin, çatıdaki asbestin sökümü ile zemindeki bir izolasyondan sökümü farklı teknikler ve önlemler gerektirir.

Hava kalitesinin düzenli olarak izlenmesi, asbest liflerinin havaya karışıp karışmadığını tespit etmek açısından kilit rol oynamaktadır. Benzer şekilde su kaynaklarına ve toprağa yönelik de gerekli kontroller yapılmalı, olası kirlilik durumunda uygun temizleme veya bertaraf yöntemleri uygulanmalıdır (Şenyiğit vd., 2004; Tetik vd., 2024). Toprak kirliliği tespit edildiğinde kontamine olmuş toprağın kazılarak uzaklaştırılması veya yerinde stabilizasyonu gibi yöntemler tercih edilebilir.

Çevresel izleme çalışmaları yalnızca hava, su ve toprak kalitesi ile ilgili değildir. Aynı zamanda gürültü ve titreşim gibi diğer çevresel faktörleri de kapsamaktadır.

Çevresel etki değerlendirmesinde acil durumlar için detaylı bir plan hazırlanmalı ve asbest liflerinin beklenmedik bir şekilde yayılması gibi durumlara karşı gerekli tedbirler

alınmalıdır. Hazırlanan Acil Eylem Planı düzenli tatbikatlarla test edilmeli ve ihtiyaç duyulduğunda güncellenmelidir.

Son olarak asbest söküm sürecinde çalışanların ve çevre sakinlerinin eğitimi hayati önem taşımaktadır. İşçiler asbest riskleri ve alınması gereken güvenlik önlemleri hakkında bilgilendirilmelidir. Çevre sakinleri ise süreç hakkında ve yapılması gerekenler hakkında bilinçlendirilmelidir. Bu tür eğitim ve bilgilendirme faaliyetleri asbest söküm sürecinin çok daha güvenli ve çevreye duyarlı bir şekilde gerçekleştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Çevresel etki değerlendirmesi, bilimsel verilere ve risk analizine dayalı olarak uluslararası standartlara ve yerel düzenlemelere uygun şekilde yapılmalıdır. Bu, sürdürülebilir bir çevre ve sağlıklı bir toplum için temel bir gerekliliktir (Stevenson vd., 2023).

4. SONUÇ

Asbest, 19. yüzyılın sonlarından itibaren üstün fiziksel özellikleri sayesinde “sihirli mineral” olarak adlandırılmış ve inşaat ile sanayi sektörlerinde yaygın şekilde kullanılmıştır. Isıya, elektriğe ve kimyasal maddelere karşı dayanıklılığı, bu maddeyi vazgeçilmez kılmıştır. Ancak, 20. yüzyılın ortalarından itibaren yapılan bilimsel araştırmalar, asbestin ciddi sağlık sorunlarına neden olduğunu ve kanserojen özellik taşıdığını ortaya koymuştur. Bu bilimsel bulguların ardından asbestin “sihirli mineral” olarak adlandırılması terk edilmiş ve sağlık üzerindeki ölümcül etkilerine dikkat çekmek amacıyla “öldürücü toz” olarak anılmaya başlanmıştır.

Asbest maruziyetine bağlı hastalıklar genellikle uzun latent dönemlere sahip olduklarından erken teşhisi genellikle zorlaşmakta ve pek mümkün olmamaktadır. Mezotelyoma,

asbestoz ve akciğer kanseri gibi hastalıkların tedavisi ilerlemiş evrelerde mümkün olmamakta ve maalesef bu durum sadece bireylerin yaşam kalitesini değil, aynı zamanda toplum sağlığını da ciddi şekilde tehdit etmektedir (Stevenson vd., 2023).

Kentsel dönüşüm süreçlerinde eski binaların yıkımı ve restorasyonu sırasında asbest içeren malzemelerin varlığı genellikle ihmal edilen bir risk olarak karşımıza çıkmaktadır. 2010 yılı öncesi inşa edilen binalar asbestin yaygın olarak kullanıldığı dönemlerdir. Eski yapıların dönüşüm sürecinde asbest türünün ve miktarının doğru bir şekilde tespit edilmesi, güvenli şekilde sökülmesi ve bertaraf edilmesi büyük önem taşımaktadır. Kentsel dönüşüm projelerinin etkili bir şekilde uygulanabilmesi için asbestin uygun şekilde yönetilmesi halk sağlığı ve çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda asbestin söküm ve bertaraf süreçlerinin profesyonel bir yaklaşımla yürütülmesi, sağlık üzerindeki riskleri minimize ederken çevresel zararları da önemli ölçüde azaltacaktır.

Asbestle ilişkili sağlık sorunlarının önlenmesinde en kritik faktör maruziyetin ortadan kaldırılmasıdır. Kentsel dönüşüm süreçlerinde eski binalardan asbestin sökülmesi iş sağlığı ve güvenliği süreçlerinin yüksek düzeyde uygulanmasıyla sağlanabilir (Yeşilyurt, 2016). Ayrıca kentsel dönüşüm süreçlerinde asbestin varlığı hakkında toplumun bilinçlendirilmesi de oldukça önemli bir etkidir.

Asbestin sökümü ve bertarafı sırasında çevresel etkiler de dikkate alınmalıdır. Asbestin yanlış şekilde bertaraf edilmesi toprak ve su kirliliği gibi çevresel sorunlara yol açabilmektedir. Bu nedenle asbestin güvenli bir şekilde sökülmesi ve bertaraf edilmesi için oluşturulan yasal düzenlemeler ve denetimler titizlikle uygulanmalıdır.

Asbestle mücadele sağlık üzerindeki etkilerinin yanı sıra, ekonomik kayıpların önlenmesi açısından da önemli bir yere sahiptir. Asbestle ilişkili hastalıkların tedavi masrafları, iş gücü kayıpları ve çevresel temizlik maliyetleri gibi ekonomik yükler devlet ve toplum üzerinde ciddi bir yük meydana getirebilir (Stevenson vd., 2023).

Sonuç olarak Asbest maruziyeti yalnızca bireylerin sağlığı üzerinde ciddi tehditler oluşturmakla kalmayıp çevresel etkiler ve ekonomik istikrar açısından da önemli sorunlara neden olmaktadır. Asbestin atmosfere salınması, toprak ve su kaynaklarına karışması, çevre kirliliğini artırarak ekosistem üzerinde uzun vadeli olumsuz etkilere neden olmaktadır. Bu durum sağlık sorunlarının artışında, iş gücü kayıplarında ve sağlık sistemlerine binen yüksek maliyetlerde kendini göstermektedir. Sorunun çözümü için sağlık hizmetlerinin, yasal düzenlemelerin, çevresel koruma politikalarının, iş sağlığı ve güvenliği kurallarının uygulanması ve toplumsal farkındalığın artırılmasını gerektiren çok boyutlu bir yaklaşıma ihtiyaç vardır. Özellikle kentsel dönüşüm süreçlerindeki eski yapıların asbest içeriği konusunda bilgi eksikliği riskin daha da büyümesine neden olmaktadır. Bu bağlamda alınacak kararlar ve uygulanacak politikalar mevcut nesillerin yaşam kalitesini artırırken gelecekte daha sağlıklı ve sürdürülebilir bir çevrenin oluşumuna olanak sağlayacaktır.

5. KAYNAKÇA

- Akboğa Kale, Ö., Gürcanlı, G. E., & Baradan, S. (2017). Asbestos exposure and prevention methods in urban renewal process. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23(6), 694-706. <https://doi.org/10.5505/pajes.2016.66049>
- Altıntaş, Ö. (2023). *Kentsel Dönüşüm Sürecinde Asbest Maruziyetinin İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından İncelenmesi*. Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Anonim. (2020). *Asbest Söküm Çalışmaları*. Chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://guvenliinsaat.csgeb.gov.tr/media/x0kmst3e/asbest_sokum.pdf
- Aryal, A., & Morley, C. (2024a). Mitigation of Contamination and Health Risk: Asbestos Management and Regulatory Practices. *İçinde Sustainability (Switzerland)* (C. 16, Sayı 22). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su16229740>
- Aydın, Y., & Orçan, M. (2023). Dünyadan ve Türkiye’den Örneklerle Kentsel Dönüşüm. İçinde M. Orçan & Y. Aydın (Ed.), *Türkiye’de Kentsel Dönüşüm*. Çizgi Kitapevi. <https://www.researchgate.net/publication/376851639>
- Bayraktar, C. (2019a). *Yıkım Aşamasındaki Binaların Asbest Riskleri Yönünden İncelenmesi*. İstanbul Esenyurt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bayraktar, C. (2019b). *Yıkım Aşamasındaki Binaların Asbest Riskleri Yönünden İncelenmesi*. İstanbul Esenyurt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Bolan, S., Kempton, L., McCarthy, T., Wijesekara, H., Piyathilake, U., Jasemizad, T., Padhye, L. P., Zhang, T., Rinklebe, J., Wang, H., Kirkham, M. B., Siddique, K. H. M., & Bolan, N. (2023). Sustainable management of hazardous asbestos-containing materials: Containment, stabilization and inertization. *Science of the Total Environment* (C. 881). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163456>
- Broström, A., Harboe, H., Fonseca, A. S., Frederiksen, M., Kines, P., Bührmann, W., Hjort Bønløkke, J., & Jensen, K. A. (2024). Asbestos fiber levels from remediation work. *Social Science Research Network (SSRN)*. <https://ssrn.com/abstract=4966881>
- Cecchetti, G., Fruttero, A., & Conti, M. E. (2005). Asbestos reclamation at a disused industrial plant, Bagnoli (Naples, Italy). *Journal of Hazardous Materials*, 122(1-2), 65-73. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2005.02.014>
- Çiftci, F., Bilgin, G., Özcan, A. N., Doğan, Ö., Yüksel, A., Erol, S., Çiledağ, A., & Kaya, A. (2018). The diagnostic role of pentraxin-3 in the differential diagnosis of pleural effusions. *Turkish Journal of Medical Sciences*, 48(6), 1167-1174. <https://doi.org/10.3906/sag-1710-115>
- Efe, S., Peker Yildızan, A., Mehmet Kiriş, H., Üyesi, Ö., Üniversitesi, S. D., Bilimi Ve Kamu, S., & Bölümü, Y. (2024). Türkiye’de Kentsel Dönüşümü Yeniden Düşünmek. *İçinde Çağdaş Yerel Yönetimler Dergisi, Cilt* (C. 33).
- Güneş, M., Güneş, A., İlbeyli, N., Kaya, B., Üniversitesi, A., Fakültesi, F., Bölümü, B., Fakültesi, M., Mühendisliği Bölümü, J., & Yazar, S. (2017). *Asbest Maruziyeti ve Etkileri*. www.nobel.gen.tr

- HSE, H. and S. E. (2024). *Diagrams showing where asbestos can occur in buildings*.
<https://www.hse.gov.uk/asbestos/diagrams.htm>
- Järvholm, B., & Burdorf, A. (2024a). Asbestos and disease – a public health success story? *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, 50(2), 53-60.
<https://doi.org/10.5271/sjweh.4146>
- Kale, Ö. A., Gürcanlı, G. E., & Baradan, S. (2017). Asbestos exposure and prevention methods in urban renewal process. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23(6), 694-706.
<https://doi.org/10.5505/pajes.2016.66049>
- Karkhanis, V. S., & Joshi, J. M. (2012). Pleural effusion: Diagnosis, treatment, and management. *Open Access Emergency Medicine*, 4, 31-52.
<https://doi.org/10.2147/OAEM.S29942>
- Kass, S. M., Williams, P. M., & Reamy, B. V. (2007). Pleurisy. *American Family Physician*, 75(9), 1357-1364.
<https://www.aafp.org/pubs/afp/issues/2007/0501/p1357.html>
- Kastelik, J. (2013). Current Management of Pleural Disorders. *American Medical Journal*, 4(1), 110.
- Metin, U. Y. (2019a). *Günümüzde Türkiye’de Yapılan Asbest Söküm İşlerinin İş Sağlığı ve Güvenliği Yönünden İrdelenmesi ve Risk Analizi Çalışması*. İstanbul Gedik Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü.
- Mogan, Ö., & Güngör, C. (2023). Asbest Söküm İşleri Risk Değerlendirmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 11(4), 1758-1770.
<https://doi.org/10.29130/dubited.1261328>

- Mossman, B. T., & Gee, J. B. L. (1989). Asbestos-related diseases. *The New England journal of medicine*, 320(26), 1721-1730.
<https://doi.org/10.1056/NEJM198906293202604>
- Na, M. J. (2014). Diagnostic tools of pleural effusion. İçinde *Tuberculosis and Respiratory Diseases* (C. 76, Sayı 5, ss. 199-210). Korean National Tuberculosis Association.
<https://doi.org/10.4046/trd.2014.76.5.199>
- Sen, D. (2015). Working with asbestos and the possible health risks. İçinde *Occupational Medicine* (C. 65, Sayı 1, ss. 6-14). Oxford University Press.
<https://doi.org/10.1093/occmed/kqu175>
- Sinkler, M. A., Ullah, A., Wehrle, C. J., Ibrahim, M. A., & White, J. (2020). Primary Pleural Epithelioid Angiosarcoma With Extensive and Rapid Metastasis to Brain and Bilateral Adrenal Glands. *Cureus*.
<https://doi.org/10.7759/cureus.9982>
- Stevenson, S. P., Barron, O., Pakenham, A., & Hashinaka, M. (2023a). Understanding and Ending the Lethal Asbestos Legacy. *Sustainability (Switzerland)*, 15(3).
<https://doi.org/10.3390/su15032507>
- Şenyiğit, A., Tanrikulu, A. Ç., & Eren Dağlı, C. (2004a). Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde Halen Asbestli Toprak Kullanan Ailelerin Asbest Konusundaki Bilgileri ve Asbeste Bakışları. *Solunum Hastalıkları Dergisi*, 15, 76-80. <https://www.researchgate.net/publication/237301293>
- Taygun, G. T. (2016a). Kentsel Dönüşümde Asbest Riski. *Mimarlık Dergisi*, 390.
<http://www.mimarlikdergisi.com/index.cfm?sayfa=mimarlik&DergiSayi=404&RecID=3962>

- Tetik, Y. Ö., Zümrüt, İ. B., Çamurcu, A. G., Kale, Ö. A., & Baradan, S. (2024a). Measurement and removal of asbestos in residential dwellings to be demolished—urban transformation experience in Izmir, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(6), 9857-9866. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31819-4>
- Turan, H., & Alpaydın, Z. (2023). Management of Asbestos Risk in the Process of Removing Earthquake-Wrapped Materials. *the Journal of Academic Social Sciences*, 142(142), 155-178. <https://doi.org/10.29228/asos.70149>
- Uraz, C., & Altıntop, S. (2020a). Bina Yıkım İşlerinde Asbest Maruziyetinin Değerlendirilmesi. *NWSA Academic Journals*, 15(4), 218-235. <https://doi.org/10.12739/nwsa.2020.15.4.1a0464>
- Üzmezoğlu, B., & Ocaktan, M. E. (2017). Urban transformation process and asbestos exposure to construction demolition workers: Review. *İçinde Türkiye Klinikleri Journal of Medical Sciences* (C. 37, Sayı 2, ss. 90-97). Türkiye Klinikleri. <https://doi.org/10.5336/medsci.2017-54822>
- Yeşilyurt, D. (2016). *Binalarda Yapılacak Asbest Söküm Çalışmalarının İş Sağlığı ve Güvenliği Yönünden Değerlendirilmesi*.
- Yolcu, F. (2021). Türkiye’de Kentsel Dönüşümün Yasalar ve Aktörler Üzerinden Dönemsel Olarak Değerlendirilmesi. *Journal of Planning*, 393-401. <https://doi.org/10.14744/planlama.2021.46504>

GEPOLİMERİN İNŞAAT SEKTÖRÜNDEKİ YERİ ve GELECEĞİ¹

Serdar KORKMAZ¹

Gökhan EKİNCİOĞLU²

1. GİRİŞ

İnşaat sektörü, modern toplumların temel taşlarından biridir ve küresel ekonomide önemli bir role sahiptir. Ancak, inşaat sektörü aynı zamanda çevresel ayak izi, özellikle de karbon dioksit emisyonları açısından büyük endişelere yol açmaktadır. Dünya genelinde inşaat faaliyetleri, toplam karbon emisyonlarının önemli bir bölümünü oluşturur ve bu durum sektör içerisinde sürdürülebilirlik arayışlarını zorunlu kılar.

Günümüzde araştırma alanları dikkate alındığında tüm sektörlerde olduğu gibi inşaat sektöründe de “sürdürülebilirlik” en ön sıralarda yer almaktadır. Sürdürülebilirlik genel anlamıyla çevresel yaşam döngüsünü en az düzeyde olumsuz etkileyen günümüzde ve gelecekte yaşayacak olan insan ve canlıların ihtiyaçlarını karşılamayı esas alan bir konu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle yapılan çalışmalarda “sürdürülebilirlik” çevre dostu ve yeşil teknoloji olarak anılmaktadır (Bilodeau ve Malhotra, 2000).

İnşaat sektörü sürekli gelişim içerisinde. Bu gelişim;

- insan nüfusunun artışı,

1 Öğr. Gör. Dr. Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Kaman Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, skorkmaz@ahievran.edu.tr, ORCID: 0000-0001-8521-7513.

2 Doç. Dr. Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Kaman Meslek Yüksekokulu, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, gekincioglu@ahievran.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9377-6817.

- yeni yerleşim alanlarının açılması,
- ihtiyaçların ve yaşam tarzının değişmesi,
- mevcut yapıların yenilenmesi,
- altyapı ve üstyapı uygulamaları,
- enerji üretimi için yapılan tesisler,
- kamu ve sosyal yapılar,
- ulaşım, üretim, konaklama, eğitim v.b. dinamik etmenler,
- alternatif malzeme ve yapım yöntemleri gibi daha birçok alandan etkilenmektedir.

Sürekli ihtiyaç duyulan/yenilenmesi gereken yapı sistemlerinin üretiminde doğal kaynakların verimli kullanılması amacıyla sanayide gerçekleşen üretim sürecinde ortaya çıkan, atık olarak adlandırılan artık malzemelerin değerlendirilmesi ve üretime kazandırılması bu nedenle büyük önem taşımaktadır.

Dünya genelinde milyonlarca ton endüstriyel artık ortaya çıkmaktadır. Bu durum her geçen yıl artış göstermektedir. Bu artıkların çevreye ve ekoloji sisteme zarar vermeden zamanla güvenli depolanması ya da çevreye zararsız biçimde yok edilmesi maliyetlerin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle artık malzemelerin yeni yöntemler kullanılarak üretime kazandırılması büyük önem arz etmektedir. Dünya genelinde endüstriyel üretim sonucu yılda 600 milyon ton uçucu kül, yılda 25 milyon ton yüksek fırın cürufu artık olarak ortaya çıkmaktadır (Dzięcioł ve Radziemska, 2022; Türker v.d., 2009). Bu artık malzemelerin üretimde değerlendirilmesi adına özellikle son 30-40 yılda birçok araştırma yapılmıştır. Yapılan araştırmalar artık malzemelerin çimento ve beton endüstrisinde kullanımının durabilite ve basınç dayanımı gibi olumlu etkiler verdiğini göstermiştir.

Bu bağlamda, geleneksel inşaat malzemeleri üzerine yapılan eleştiriler, alternatif ve çevre dostu malzemelerin araştırılmasını teşvik etmiştir. Bu noktada geopolimerler, bu ihtiyaca yanıt veren yenilikçi malzemeler arasında öne çıkmaktadır.

Geopolimer teknolojisi, 1970’lerde kimyager Joseph Davidovits tarafından geliştirilmiştir. Davidovits, belirli alüminosilikat kaynaklarına alkali çözeltiler uygulayarak, çevre dostu ve yüksek dayanımlı bir inorganik polimer üretmeyi başarmıştır. Bu malzemeler, geopolimer adını alarak inşaat sektöründe yeni bir dönemin kapılarını aralamıştır. Geopolimerlerin en çarpıcı özelliği, Portland çimentosuna alternatif olmaları ve karbon ayak izini önemli ölçüde azaltmalarıdır. Geopolimer kullanımı bu noktada döngüsel ekonomi kavramına da katkıda bulunmaktadır.

Geopolimerlerin yapısal özellikleri, yüksek basınç ve sıcaklık altında bile mükemmel mekanik ve kimyasal direnç sunar. Bu özellikler, geopolimerleri özellikle ağır endüstriyel uygulamalar, yüksek yangın riski taşıyan yapılar ve kimyasal madde depolanması gereken alanlar için ideal kılmaktadır. Ayrıca, asidik ortamlarda Portland çimentosunun aksine bozulmadan durabilirler. Bu durum da onları endüstriyel atık depolama gibi özel uygulamalar için uygun hale getirir.

Geopolimer teknolojisinin çevresel avantajları, sadece düşük karbon emisyonları ile sınırlı değildir. Bu malzemeler, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel yan ürünleri değerlendirerek çevresel sürdürülebilirliği artırır. Uçucu kül, kömür yanma tesislerinden çıkan bir artıktır ve genellikle çevresel bir sorun olarak görülür. Geopolimer üretiminde bu tür artıkların kullanılması, hem artık yönetimi sorununa bir çözüm sunar hem de çimento üretiminde gereken doğal kaynak tüketimini azaltır.

Gelişen dünyada, Geopolimer uygulamaları giderek daha fazla tanınmakta ve tercih edilmektedir. Örneğin, Avustralya’da, uçucu kül bazlı geopolimerler kullanılarak yapılan yollar ve havaalanı pistleri, bu teknolojinin başarısını göstermektedir. ABD’de ise çeşitli üniversiteler ve araştırma kurumları, geopolimer betonun farklı uygulamalarını test etmektedir. Bu çalışmalar, geopolimerlerin sadece çevresel değil, aynı zamanda ekonomik faydalar sağlayabileceğini de ortaya koymaktadır.

Geopolimer teknolojisinin daha geniş çapta benimsenmesi için bazı engeller mevcuttur. Bu engeller arasında;

- geopolimer üretim süreçlerinin standardizasyonunun eksikliği,
- malzeme özelliklerinin çeşitlilik göstermesi ve
- inşaat sektöründeki var olan alışkanlıkların değişim direnci yer alır.

Yukarıda belirtilen hususlara ek olarak sürekli artan çevresel baskılar ve sürdürülebilir malzeme talebi, geopolimerleri gelecekte daha önemli hale getirecektir.

Bu çalışmanın temel amacı, endüstriyel simbiyoz yaklaşımı ile endüstriyel artıkların inşaat sektöründe kullanılabilirliğinin önünü açan geopolimerler hakkında genel bilgi vermektir.

2. GEOPOLİMERİN TASARIMI ve ÖZELLİKLERİ

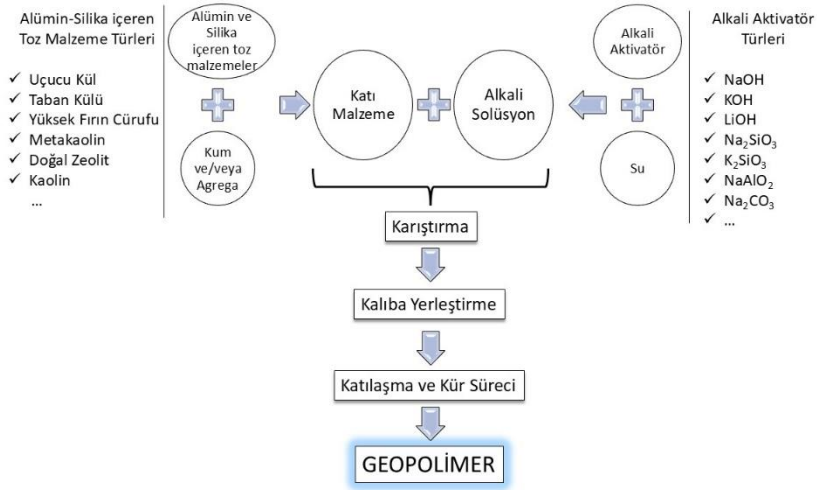
2.1. Geopolimer Tasarımı

Geopolimer inşaat sektörü ve yapı malzemeleri literatüründe “çevre dostu çimento tipi bağlayıcı” olarak kabul edilmektedir (Hamdane vd., 2021). Günümüzde araştırmacılar

uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu gibi artık malzemeleri kullanarak geopolimer üretimi üzerine uygulamalar gerçekleştirmişlerdir. Bu sayede;

- atıkların üretime kazandırılması,
- artık yönetiminin etkinliğinin artırılması,
- sürdürülebilir artık ve çevre yönetimine destek olunması,
- hammadde ve doğal kaynakların korunması ve
- küresel CO₂ salınımının kontrol alınması gibi konularda önemli bir yol kat edilmiştir. (Şenol, 2022)

Geopolimer üretimi geleneksel beton üretiminden farklı olarak alkali aktivatör kullanılarak yapılmaktadır. Geopolimer üretiminde kullanılan alkali aktivatör ve toz malzeme isimleri Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Geopolimer üretiminde kullanılan malzemeler (Korkmaz, 2024)

Geopolimer üretimi genel olarak dört aşamadan oluşmaktadır. Bunlar;

- alkali solüsyonun hazırlanması (alkali solüsyon molarite hesabına göre hazırlanmaktadır.)
- alüminosilikat malzeme, kum ve/veya agreganın alkali solüsyonla karıştırılması,
- oluşan bağlayıcı hamurun/harcın ya da betonun kalıba yerleştirilmesi,
- kürleme süreciyle geopolimer yapısının tamamlanması.

Geopolimer üretiminde alkali aktivatör su ile karıştırılarak farklı molaritelere sahip çözeltiler (solüsyonlar) elde edilebilir. Hazırlanan solüsyon alümin ve silika içeren genellikle yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı olmak üzere puzolan malzemelerle ve kum/agrega ile birleştirildiğinde geopolimer harç/geopolimer beton meydana gelir. Üretilen geopolimer kalıplara yerleştirildikten sonra ısı kürü ya da ortam küründe olgunlaştırılırlar. Yapılan çalışmalarda optimum ısı kürü sıcaklığı, optimum ısı kürü süresi, optimum ortam kürü süresi gibi koşullar günümüzde ilgili araştırmacılar tarafından araştırılmaktadır.

Geopolimer üretiminde kullanılan aktivatör türlerinden bazıları Tablo 1' de verilmiştir. Geopolimer üretiminde en çok tercih edilen aktivatörler ise NaOH, Na_2SiO_3 ve KOH' dır.

Tablo 1. Geopolimer üretiminde en çok kullanılan alkali aktivatörlerin özellikleri (Korkmaz, 2024)

Özellik	Na ₂ SiO ₃	KOH	NaOH
Molekül ağırlığı (g/mol)	122,06	56,11	39,99
Yoğunluk (g/cm ³)	2,61	2,04	2,13
Genel Yapısı	Yeşilimsi-Mavimsi Sıvı veya Beyaz katı	Beyaz-Katı	Beyaz Kristal
Kaynama Noktası	83 °C	1327 °C	1388 °C
Erime Noktası	1088 °C	360 °C	318 °C
Suda çözünürlük (g/L)	1390	1210	418

Tablo 1 incelendiğinde NaOH’ ın en düşük molekül ağırlığına sahip olduğu görülmektedir. Sodyum silikat ise en yüksek yoğunluk değerine sahip alkali aktivatördür. Piyasada en kolay ve ekonomik olarak temin edilebilecek alkali aktivatör NaOH’ dır. Bu nedenle geopolimer uygulamalarında daha çok tercih edilmektedir.

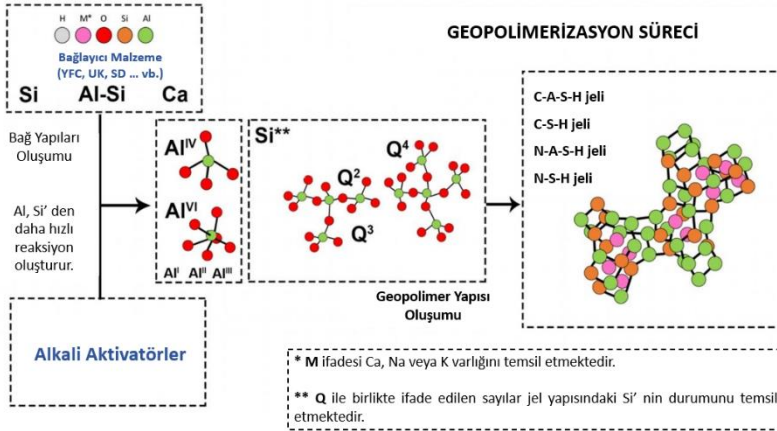
Geopolimer uygulamaları beton ve çimento üretimine alternatif olarak geliştirilmiştir. Son yirmi yılda yapılan çalışmalar incelendiğinde “geopolimer beton”, “geopolimer beton uygulamaları” ve “sürdürülebilir geopolimer beton” başlıkları içeren 6000’ den fazla bilimsel araştırma yapıldığı görülmektedir (Shehata vd., 2022).

Geopolimer üretim süreci geleneksel beton üretiminin hammaddesi olan çimentonun üretiminden kaynaklı olumsuz sera gazı etkilerini en aza indirebilmek amacıyla geliştirilmeye çalışılmaktadır. Geopolimer üretiminde cüruf gibi endüstriyel atıkların kullanılmasıyla portland çimentosu üretiminde ortaya çıkan sera gazı miktarından yaklaşık %80 oranında daha azdır (Van vd, 2012).

2.2. Geopolimerlerin Özellikleri

Geopolimer Sistemler, son beş yıllık dönemde endüstri ve inşaat sektöründeki araştırmacıların yoğun biçimde üzerine çalıştığı bir konudur. Bu özel malzemeler, polimerik malzemelerin kimyasal reaksiyonu sonucunda elde edilen inorganik bileşiklerdir. Kendine has özellikleri sayesinde birçok alanda önemli bir rol oynamaktadırlar. Gerek yüksek dayanıklılık ve kimyasal dirençleri, gerekse çevre dostu olmaları gibi avantajlar ile göze çarpmaktadırlar. Ayrıca, enerji tüketimini azaltarak çevre üzerinde olumlu etkiler sağladıkları da bilinmektedir.

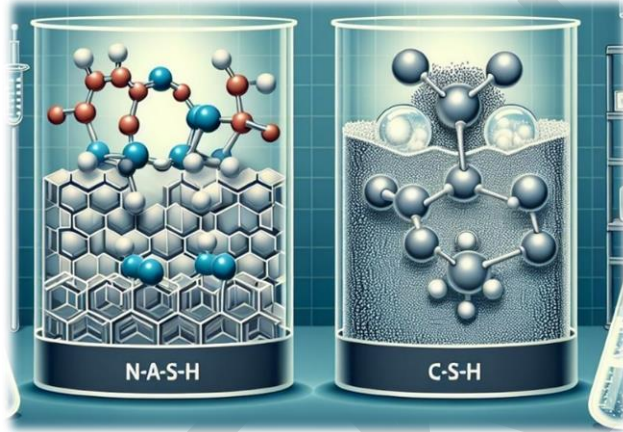
Geopolimerizasyon; geopolimer üretiminde meydana gelen bağ yapısı oluşumuna verilen isimdir. Geopolimerizasyon sürecinde alkali aktivatörler toz malzeme bünyesindeki silis, alümin ve kalsiyum oksitleri çözerek reaksiyon sürecini başlatır. Şekil 2’ de geopolimerizasyon süreci gösterilmiştir.



Şekil 2. Geopolimerizasyon Süreci (Mahmood vd., 2021)

Geopolimer reaksiyonu sürecinde üç boyutlu bağ yapıları gözlenir. Bu sayede geopolimer dayanım kazanmaya başlar. Şekil 3’ de gösterildiği gibi geopolimer sistemlerin

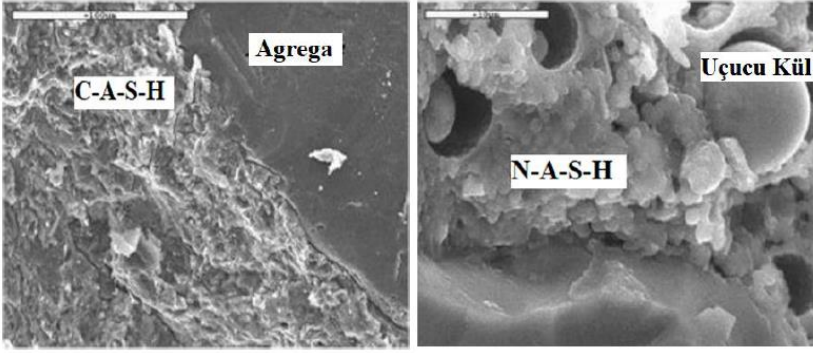
içyapısında kalsiyum alümina silikat hidrat (C-A-S-H) ve sodyum alümina silikat hidrat (N-A-S-H) jelleri oluşur.



Şekil 3. Jel yapılarının gösterimi

Portland çimentosu hidratasyonunda ana reaksiyon ürününü C-S-H jelidir. C-S-H jeli hidratasyon sonrası mekanik dayanımı sağlamaktadır. C-S-H jelinin yanı sıra portlandit, ettringit ve kalsiyum mono sülf alüminat, diğerlerinin yanı sıra, ikincil ürünler olarak oluşur (Taylor, 1997). Bu ürünler SEM görüntüleri ile belirlenebilmektedir. Uçucu kül ve metakaolin gibi silika ve alümina bakımından zengin ve düşük kalsiyum içeren malzemeler alkali aktivasyonda kullanılırsa ana reaksiyon ürününü C-S-H jelleri değil N-A-S-H jelleri oluşturur. N-A-S-H jelleri amorf alkali alüminosilikat hidratın çökmesine yol açar. Bu tür geopolimer sistemlerde ikincil reaksiyon ürünlerini zeolitler oluşturur (Fernández-Jiménez v.d., 2006).

Şekil 4’de taramalı elektron mikroskobu kullanılarak elde edilen C-A-S-H ve N-A-S-H jellerine ait görüntüler bulunmaktadır.



Şekil 4. C-A-S-H ve N-A-S-H jelleri SEM görüntüleri (Garcia-Lodeiro vd. 2013).

C-A-S-H jellerinin beyaz ve bulutumsu bir yapıda olduğu; N-A-S-H jellerinin ise yuvarlak tanecikli ve birbirine üzüm tanelerine benzer şekilde yapışık bir görüntüsü olduğu görülmektedir. N-A-S-H jelleri genellikle düşük kalsiyum içerikli bağlayıcı malzemeler ile reaksiyona girerek bağ oluşumu sağlarken; C-A-S-H jelleri ise daha yüksek kalsiyum içeriğine sahip bağlayıcı malzemeler ile reaksiyona girerek bağ oluşumu gerçekleştirmektedirler (Liu vd., 2019). Bu bağ oluşumları sayesinde geopolimerler yüksek dayanım özelliği gösterirler.

Geopolimerlerin yüksek dayanımlarının yanı sıra

- yangına dayanıklılık,
- hafiflik ve yalıtkanlık gibi üstün özellikleri de bulunmaktadır.

Bu özellikler, özellikle inşaat sektöründe kullanıldıkları zaman büyük bir fark oluşturmaktadır. İnşaat projelerinde yaygın bir şekilde kullanılan geopolimerler, yapıların güvenli ve dayanıklı olmasını sağlamaktadır.

Geopolimerler, gelişmiş malzemelerin öncüsü olarak kabul edilmektedir. Özellikleri ve kullanım alanları sayesinde inşaat sektöründe yüksek talep görmektedirler. Hızlı bir şekilde

gelişen teknoloji ve inovasyon sayesinde geopolimerlerin özellikleri de sürekli olarak iyileştirilmektedir.

Geopolimerler modern inşaat projelerinde yavaş yavaş önemli bir yer edinmekte ve malzeme teknolojisi alanında büyük bir yenilik vadetmektedir (Eren, 2020, Şenol, 2024).

3. GEOPOLİMERLERİN AVANTAJLARI

Geopolimerlerin karbondioksit salınımını azaltan ve artık malzeme kullanımı sağlayan bir üretim sunması dışında geleneksel yöntemlerle üretilen malzemelere göre çeşitli avantajları bulunmaktadır. Öncelikle, geleneksel malzemelere göre geopolimerlerin daha hafif ve dayanıklı olmaları dikkat çekicidir. Ayrıca, geopolimerler;

- suya,
- kimyasallara ve
- çevresel etkilere karşı daha dirençlidirler.

Bu özellikleri sayesinde uzun ömürlü ve dayanıklı yapılar inşa etmek mümkün olmaktadır.

Geopolimerler aynı zamanda yüksek sıcaklık dayanımı gösterirler ve yangına karşı dirençli yapılar oluşturulmasına olanak tanırırlar. Tüm bu avantajlar, geopolimerlerin inşaat sektöründe tercih edilmesini sağlamaktadır.

Geopolimerler, farklı uygulamalarda kullanılabilmesi sayesinde çeşitlilik sunar. Örneğin,

- yol yapımında,
- köprülerde,
- havaalanlarında ve
- diğer yapı projelerinde kullanılabilir.

Geopolimerler daha az bakım gerektiren ve daha az maliyetli olabilecek uzun ömürlü bir çözüm sunar. Bütün bu nedenlerle, geopolimerler, modern inşaat sektöründe büyük bir öneme sahiptir ve gelecekte daha da yaygın bir şekilde kullanılması beklenmektedir.

Geopolimerlerin kullanımı, neredeyse sınırsız potansiyele sahiptir ve bu da inşaat sektöründe büyük bir çeşitlilik sunar. Geopolimerler, yapı malzemeleri olarak kullanılırken, çok çeşitli şekillerde uygulanabilmektedir. Örneğin, mobil ve hareketli ofisler, sergi alanları ve hatta geçici konutlar gibi daha esnek yapılar inşa etmek mümkündür.

Tablo 2’ de literatürde yapılan çalışmalar araştırılarak Geleneksel Beton-Geopolimer Beton karşılaştırması yapılmıştır.

Tablo 2. Geleneksel Beton Geopolimer Beton Performans Karşılaştırması

<i>Özellik</i>	<i>Geleneksel Beton</i>	<i>Geopolimer Beton</i>
Asit Saldırısı	Daha düşük direnç	Daha yüksek direnç
Basınç Dayanımı	Düşük	Yüksek
Büzülme	Daha düşük	Orta
CO₂ Emisyonu	Yüksek	Düşük
Çekme Dayanımı	Düşük	Yüksek
Tekrarlı Donma Çözülme	Duyarlı	Daha az duyarlı
Durabilite Direnci	Daha düşük	Daha yüksek
Priz Süresi	Yavaş	Daha hızlı
Porozite	Daha düşük	Orta
Su Emme	Kısmen düşük	Orta
Yalıtım Özelliği	Sınırlı	Daha iyi
Yangın Özelliği	Sınırlı	Daha iyi

Toplamda on iki özellik üzerinden yapılan karşılaştırmada geleneksel beton büzülme, porozite ve su emme özellikleri ile geopolimer betondan daha iyi performans göstermektedir. Geopolimer beton ise asit saldırısı, basınç dayanımı, CO₂ emisyonu, çekme dayanımı, tekrarlı donma çözülme, durabilite direnci, priz süresi, yalıtım ve yangın özelliği olmak üzere geleneksel betona kıyasla toplamda dokuz özellikte daha iyi performans göstermektedir (Farooq vd., 2021; Hassan, Arif ve Shariq, 2020; Kumar ve Revathi, 2020; Kurtoglu vd., 2018; Olivia ve Nikraz, 2012; Korkmaz, 2024).

Geopolimer üretiminde artık malzemelerin kullanılması, artıkların depolanma ve çevresel olumsuz etkilerini minimize etmek için önemli bir adım olarak görülmektedir. Beton ve harç içerisinde üretimi çevreci olmayan, yüksek enerji sarfıyatı, maliyet artışı, CO₂ salınımı ve doğal hammaddelerin tüketimi ile üretilen çimentonun yerine geopolimerlerin kullanılabilir olduğunun belirlenmesi küresel ısınma etkilerini azaltmak için önemli bir etkidir. Geopolimer üretiminde çevreye salınan sera gazı miktarı geleneksel beton üretiminde çevreye salınan sera gazı miktarına kıyasla %80 daha azdır (Van Zijl vd., 2012).

Geopolimerlerin kullanımıyla, gelecekte daha sürdürülebilir ve enerji verimli yapılar inşa etmek mümkün olacak ve inşaat sektörü daha yeşil bir geleceğe doğru ilerleyecektir.

4. SONUÇ ve GENEL DEĞERLENDİRME

Geopolimerlerin inşaat sektöründeki önemi giderek artmaktadır. Bu özel malzemeler, geleneksel beton ve çimento uygulamalarına göre birçok avantaj sunmaktadır. Öncelikle, geopolimerlerin dayanıklılığı ve mukavemeti geleneksel malzemelere kıyasla daha yüksektir. Ek olarak, geopolimerlerin yangın direnci, kimyasal dayanıklılık ve ses yalıtımı gibi

özellikleri de göze çarpmaktadır. Bu nedenle, inşaat sektöründe geopolimerlerin kullanımı, yapıların daha güvenli, sağlam ve uzun ömürlü olmasını sağlar. Ancak, geopolimerlerin yaygın olarak kullanılabilmesi için sektördeki farkındalığın artırılması ve teknolojik altyapının güçlendirilmesi gerekmektedir. Bu malzemeler hakkında daha fazla bilgi ve eğitim verilerek geopolimerlerin avantajları ve kullanım alanlarının daha iyi anlaşılması sağlanmalıdır. Ayrıca, geopolimer malzemelerin üretimi için gerekli tesislerin ve ekipmanların kurulması ile sektördeki üretim kapasitesinin arttırılarak, geopolimerlerin daha yaygın bir şekilde kullanılması desteklenmelidir.

Geopolimerlerin sürdürülebilirlik ve çevresel etkileri dikkate alınmalıdır. Bu malzemeler, çevreye daha az zarar veren ve enerji tüketimini azaltan özelliklere sahiptir. Bununla birlikte, geopolimer üretim süreçlerini optimize etmek, artıkları azaltmak ve geri dönüşümü teşvik etmek önemlidir. Geopolimerlerin çevresel etkilerini azaltmaya yönelik endüstriyel standartlar ve yönergeler geliştirilerek, sektörde sürdürülebilir uygulamaların yaygınlaşması sağlanabilir. Bu bağlamda, inşaat sektöründeki paydaşların iş birliği içinde olması çok önemlidir.

Geopolimer malzemelerin kullanımını teşvik etmek için sektördeki tüm aktörlerin bir araya gelip ortak projeler geliştirmesi gerekmektedir. Yerel yönetimler, üniversiteler, araştırma kuruluşları ve özel sektör temsilcileri arasında yapılacak iş birlikleri ile geopolimerlerin benimsenmesi ve kullanımının artırabileceği düşünülmektedir.

Sonuç olarak, inşaat sektöründe geopolimer malzemelerin kullanımı desteklenmeli, geopolimerlere yönelik araştırmalar ve inovasyonlar teşvik edilmelidir. Bu sayede, yapıların dayanıklılığı, sürdürülebilirliği ve enerji verimliliği açısından daha üstün bir geleceğe doğru ilerlemek mümkün olabilecektir.

5. KAYNAKÇA

- Bilodeau, A. ve Malhotra, V. M. (2000). High-volume fly ash system: concrete solution for sustainable development. *Materials Journal*, 97(1), 41-48.
- Dzięcioł, J. ve Radziemska, M. (2022). Blast Furnace Slag, Post-Industrial Waste or Valuable Building Materials with Remediation Potential?. *Minerals*, 12(4), 478.
- Eren, Ş. (2020). Endüstriyel Atık Bazlı Jeopolimer Betonda Atık Döküm Kumunun Doğal Agregaya Yerine İkame Edilerek Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 8(3), 746-757.
- Farooq, F. Jin, X. Javed, M. F. Akbar, A. Shah, M. I. Aslam, F. ve Alyousef, R. (2021). Geopolymer concrete as sustainable material: A state of the art review. *Construction and Building Materials*, 306, 124762.
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, Á., Sobrados, I., & Sanz, J. (2006). The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes. *Microporous and Mesoporous materials*, 91(1-3), 111-119.
- Garcia-Lodeiro, I. Donatello, S. Fernández-Jimenez, A. ve Palomo, A. (2013). Basic principles of hybrid alkaline cements. *Chem. Mater. Res*, 4, 12-14.
- Hassan, A. Arif, M. ve Shariq, M. (2020). Influence of microstructure of geopolymer concrete on its mechanical properties—A review. *Advances in Sustainable Construction Materials and Geotechnical Engineering: Select Proceedings of TRACE 2018*, 119-129.
- Hamdane, H. Tamraoui, Y. Mansouri, S. Oumam, M. Bouih, A. El Ghailassi, T. ve Hannache, H. (2021). Statistical modeling of geopolymers from dual-alkali activation of

un-calcined phosphate sludge and their potential applications as sustainable coating materials. *Journal of Cleaner Production*, 283, 125421.

Korkmaz, S. (2024). Hibrit Yüksek Fırın Cürufu ve Toz Perlit Bağlayıcılı Hafif Geopolimer Kompozitlerde Manyetize Suyun Etkisi. *Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi*, 235 s.

Kumar, M. L. ve Revathi, V. (2020). Microstructural properties of alkali-activated metakaolin and bottom ash geopolymer. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(5), 4235-4246.

Kurtoglu, A. E. Alzebaree, R. Aljumaili, O. Nis, A. Gulsan, M. E. Humur, G. ve Cevik, A. (2018). Mechanical and durability properties of fly ash and slag based geopolymer concrete. *Advances in concrete construction*, 6(4), 345.

Liu, Y. Shi, C. Zhang, Z. ve Li, N. (2019). An overview on the reuse of waste glasses in alkali-activated materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 144, 297-309.

Mahmood, A. Noman, M. T. Pechočiaková, M. Amor, N. Petrú, M. Abdelkader, M. Militki, J. Sozcu, S. ve Hassan, S. Z. U. (2021). Geopolymers and fiber-reinforced concrete composites in civil engineering. *Polymers*, 13(13), 2099.

Olivia, M. ve Nikraz, H. (2012). Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Materials & Design (1980-2015)*, 36, 191-198.

Shehata, N. Mohamed, O. A. Sayed, E. T. Abdelkareem, M. A. ve Olabi, A. G. (2022). Geopolymer concrete as green building materials: Recent applications, sustainable

development and circular economy potentials. *Science of the Total Environment*, 155577.

Şenol, A. F. (2022). Yeşil beton teknolojisinde atık malzemelerin kullanımı ve üretim yöntemlerinin incelenmesi. *1st International Conference on Innovative Academic Studies (ICIAS 2022)*. Konya, Türkiye, 10-13 Eylül.

Şenol, A.F. (2024). Yeni Nesil Beton Teknolojileri: son Trendler. *3 rd International Conference on Engineering, Natural and Social Sciences*, 16-17 Mayıs 2024, Konya, Türkiye, 623-629.

Taylor, H. F. (1997). *Cement chemistry* (Vol. 2, p. 459). London: Thomas Telford.

Türker, P. Erdoğan, B. Katnaş, F. ve Yeğınobalı, A. (2009). Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri. *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği ARGE*, Y03.03.

Van Zijl, G. P. Wittmann, F. H. Oh, B. H. Kabele, P. Toledo Filho, R. D. Fairbairn, E. M. ve Lepech, M. D. (2012). Durability of strain-hardening cement-based composites (SHCC). *Materials and structures*, 45, 1447-1463.

AUTODESK VEHICLE TRACKING İLE OTOPARK ANALİZİ: KAMPÜS ÖRNEĞİ

Özlem BATTAL ŞAL¹

Alican ERGİN²

1. GİRİŞ

Kent içi ulaşım planlaması yapılırken mevcut ulaşım alt yapılarının planlanmasının yanı sıra göç sonrası oluşabilecek yoğunlukla mevcut durumun yetersiz olduğu görülmektedir. Bu konuda belediyeler kendi bünyelerinde çözümler üretip iyileştirme çalışmaları geliştirse de kentte yaşayan insanların ihtiyaçlarını karşılayacak, alışkanlıklarına uyum sağlayabilecek yerleşim planlamalarının yapılması gittikçe daha büyük ve karmaşık sorunlara sebep olmaktadır. Üniversite yerleşkeleri de şehirler gibi ulaşım yönünden talep merkezleri olmaktadır. Bu yerleşkeler planlanırken alanların verimli kullanılması gerekmektedir. Yerleşke içi ulaşımın yanı sıra yerleşkeye olan erişim ve yerleşkeden kent merkezlerine olan ulaşım için de bilimsel gelişmeleri de teknolojiyi temel alan önerilerle planlanmalıdır.

Otopark ihtiyacı öncelikle kent içi ulaşımında problem olarak gözüксе de kampüslerdeki otopark sorunu halen önemin korumaktadır. Bireysel araç sahipliliğindeki artış kent içi ulaşımın modellenmesinde dikkate alınırken, kampüs

¹ Dr.Öğretim Üyesi (Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü), ozlembattal@karabuk.edu.tr, ORCID: 0000-0002-2308-7933

² Lisansüstü Öğrenci, (Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü), alicanergin03@gmail.com, ORCID: 0009-0004-3397-2882.

yerleşkelerinde otopark ihtiyacı olan akademik ile idari personel ve öğrencilerin araçlarını bulundukları fakülte ya da kurum binası yakına park etme talebi dikkate alınmalıdır. Ancak kampüs yerleşkelerindeki yaşam biçimi, alışkanlıklar, kampüs hareketliliği ve ortaya çıkan ulaşım problemleri gün geçtikçe önemini artırmaktadır. Kampüs yerleşkelerindeki otopark soruna çözümler bulunması kampüs hareketliliğine sürdürülebilir çözümler getirebilecektir.

Üniversite kampüslerinde yapılan otopark iyileştirme ve park planlarına bakacak olursak, (Selim, 2011) tarafından Ege Üniversitesi Kampüsünde incelenmiş ve yaşanan otopark sorunlarının giderilmesi için anket çalışması ile elde edilen veriler çözümlendikten sonra sayısallaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yerleşkede yaşanan ulaşım sorunlarına önerilerde bulunulmuştur. (Ji & ark, 2014) Limerick Üniversitesinde, Akıllı Ulaşım Sistemleri ile bütünleşmiş bir bulut tabanlı otopark hizmeti ile otoparkların doluluk durumlarını mobil uygulama ile sürücülere durum haritası şeklinde sunmuşlardır. (Akyüz, 2016)'de çalışmasında Yıldız Teknik Üniversitesi kampüs yerleşkesindeki otopark problemlerini tespit etmiştir. Anket çalışması ile otopark problemlerini belirledikten sonra regresyon analizi yaparak ulaşım sorunlarına getirilebilecek çözüm önerilerini listelemiştir. (Hassan & Husian, 2019), Irak'ın Al-Nahrain üniversitesinde araştırma yaparak artan araç sayısının otopark kapasitesine oranla yaşanan sorunlara çözümde sürdürülebilir öneriler sunmuştur. Katlı otopark sisteminin mevcut sorunlar en verimli çözüm olabileceğini vurgulamışlardır. (Ulvi, 2019) Gazi Üniversitesi'nin Maltepe Kampüsü'nde yaptığı anketi yorumlayarak yolculuk alışkanlıklarını ve davranışları belirlemiştir. Kampüs yerleşkesine ulaşım öncesi park yerini rezerve etmelerini sağlayabilen bir mobil uygulamayı (Brown & Hong, 2019) çalışmalarında geliştirerek park yeri arama sürecini kısaltmaya ve süreyi verimli kullanmaya teşvik etmişlerdir.

Kampüs yerleşkelerinde otopark sorunları hakkında yapılan çalışmaları özetleyecek olursak anket çalışması ile sorunlar tespit edilerek istatistik programından veriler analiz edilmiştir. Elde edilen sayısallaştırma sonrası çevreci, sürdürülebilir, kullanımı kolay, ulaşım davranışlarına uyum sağlayan önerileri sıralamışlardır. Mobil uygulama ile park yeri seçme sürecini kısaltmayı ve zamanı verimli kullanmayı hedefleyen çalışmalar da yer almaktadır. Bu bölümde ise Autodesk Vehicle Tracking yazılımının otopark alanlarının planlanmasında önemli olan manevra alanlarının kampüs yerleşkesinde nasıl kullanılabileceğini adım adım anlatılmıştır.

2. AUTODESK VEHICLE TRACKING PROGRAMI

Autodesk Vehicle Tracking, mühendisler ve tasarımcılar için ulaşım altyapı projelerinde taşıt hareketlerini simüle etme ve analiz etme imkânı sunan kapsamlı bir yazılımdır. Bu program özellikle manevra analizi, dönel kavşak tasarımı, otopark düzenlemesi ve raylı sistem tasarımı gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Autodesk Vehicle Tracking, otopark ve altyapı projelerinin tasarım sürecini kolaylaştıran güçlü entegrasyon, kapsamlı araç kütüphaneleri ve etkili raporlama özellikleri ile öne çıkmaktadır. Yazılım, AutoCAD ve Civil 3D ile bütünleşmiş bir şekilde çalışarak mevcut CAD çizimlerinin kolayca içe aktarılmasını ve doğrudan analiz yapılmasını mümkün kılmaktadır. Böylece tasarım süreçleri hızlanmaktadır. Program bünyesinde yer alan geniş araç kütüphaneleri, farklı araç türleri için önceden tanımlanmış taşıt profilleri sunmaktadır. Taşıt profilleri, araçların boyutları, dönüş yarıçapları ve diğer fiziksel özellikleri kullanarak simülasyonlar oluşturmaktadır. Ayrıca, yazılımın sunduğu raporlama ve

görselleştirme araçları, analiz sonuçlarını gösteren detaylı raporlar ve üç boyutlu görsellerle sunarak daha iyi kararlar alınmasına ve projelerin etkin bir şekilde yönetilmesine olanak tanımaktadır. Autodesk Vehicle Tracking programı bu özellikleri ile hem analizin doğruluğu artırmakta hem de planlama ve analiz süreçlerini daha verimli hale getirmektedir.

2.1. Autodesk vehicle tracking programındaki analizler

2.1.1. Taşıt yolu analizi:

Farklı taşıt türlerinin (arabalar, otobüsler, kamyonlar, raylı sistem araçları ve uçaklar) yol veya belirli bir alanda hareketlerinin simülasyonu yapılabilmektedir. Manevra alanlarını hesaplayarak taşıtların dönüşleri için ihtiyacı olan mesafeleri/alanları görselleştirmektedir. Tüm analizleri, yolun geometrik ve fiziksel özelliklerini dikkate alarak gerçekleştirmektedir.

2.1.2. Dönel kavşak tasarımı:

Dönel kavşakların tasarım ve düzenleme süreçlerini hazırlanmasında da kullanılmaktadır. Araçların dönüş hareketleri, hızları ve güvenli dönüş açıları incelenerek kavşak geometrisinin en iyi duruma getirilmesini sağlamaktadır.

2.1.3. Otopark planlaması:

Autodesk Vehicle Tracking, otopark tasarımında önemli kolaylıklar sunan bir yazılımdır. Farklı araç türlerinin dönüş yarıçaplarını ve manevra alanlarını analiz ederek otopark düzeninin işlevselliğini artırmaktadır. Park alanlarının tasarımında yerel veya uluslararası standartlara uygun bir şekilde planlamaya olanak tanımaktadır. Tek yönlü veya çift yönlü trafik akışını destekleyen şerit düzenleri ve güvenli yaya yolları tasarlanabilmektedir. Ayrıca rampalar, virajlar ve yükseklik sınırlamaları gibi engellerin araç hareketleri

üzerindeki etkilerini simülasyonla analiz ederek otoparkın erişilebilirliğini ve güvenliğini değerlendirmektedir. Otopark alanı içerisinde ve çevresindeki trafik akışını analiz ederek sıkışıklıkları önlemeye, bekleme sürelerini azaltmaya ve acil durum araçları için erişim yollarını optimize etmeye yardımcı olmaktadır. Bu analizler, görsel sunumlar ve detaylı raporlarla desteklenerek, otopark planlamasının sadece bir tasarım değil, aynı zamanda simülasyonlarla doğrulanmış bir çözüm olmasını sağlamaktadır.

2.1.4. Demiryolu ve hafif raylı sistem analizi:

Demiryolu araçlarının hareket yollarını simülasyonla analiz etmektedir. İstasyon düzenlemeleri, hat geometrisi ve araç hızları gibi parametreler üzerinde incelemeler yapmaktadır.

2.1.5. Havaalanı planlaması:

Uçakların park alanları, taksi yolları ve manevralarını inceleyerek havaalanı tasarımlarını daha verimli hale getirmektedir.

2.2. Yazılımın avantajları

Autodesk Vehicle Tracking, otopark ve altyapı projelerinin tasarımında sunduğu avantajlarla dikkat çekmektedir. Bu avantajları özetleyecek olursak;

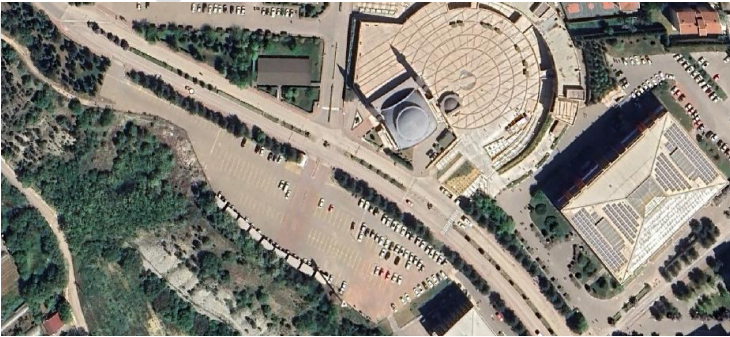
- Zaman tasarrufu sağlarken karmaşık analizleri otomatikleştirerek mevcut tasarım ve analiz süreçlerine göre çok daha hızlı sonuçlar elde edilmesine olanak tanımaktadır.
- Güncel taşıt verilerini kullanarak simülasyonlar yaptığı için hazırlanan tasarımların güvenilirliğini de artırmaktadır.

- Entegre tasarım imkânı sağlar; diğer analiz programları ile uyumlu çalışarak tasarım sürecini tek bir platformda bir araya getirebilmektedir.
- Yapılan analizler ile verimliliği artırmaktadır.
- Alan kullanımını ve trafik akışını optimize ederek hem işlevsel hem de estetik açıdan etkili tasarımlar oluşturmaktadır.
- Mühendislik ve planlama süreçlerinde daha güvenilir ve etkin sonuçlarıyla altyapı projelerinde de güvenilir ve etkili bir çözüm sunmaktadır.

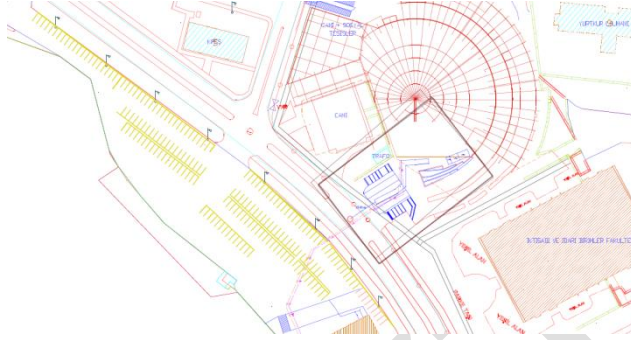
3. UYGULAMA

3.1. Uygulama alanı

Bu bölümde, Karabük Üniversitesi'nin merkez kampüsündeki otoparklardan yoğunluğun en fazla yaşandığı merkez otoparkına analiz yapılmıştır (Şekil 1). Kampüs ait mevcut vaziyet planı üzerinden Vehicle Tracking yazılımı ile incelenmiştir (Şekil 2). Otoparkta karşılaşılabilecek 5 sorun proje üzerinde gerçek araç boyutlarıyla simüle edilmiş ve otopark tasarımındaki sıkıntılar belirlenmiştir.



Şekil 1: Analiz yapılan otopark

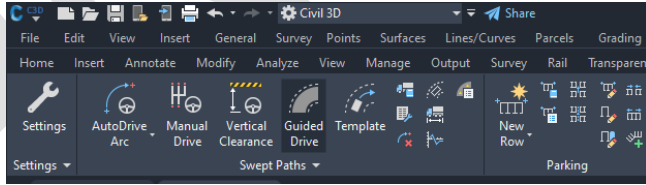


Şekil 2. Analiz yapılan otoparkın otoparkın vaziyet planı

3.2. Kampüs yerleşkesinin vehicle tracking ile analizi

3.2.1. Uygulama adımları

Bu bölümde Karabük Üniversitesi Demir Çelik Kampüsü içerisinde yer alan merkez otoparkın Autodesk Vehicle Tracking yazılımı ile analizi yapıldı. Analizin uygulama adımları aşamalar halinde yazılarak görsellerle desteklendi. Çalışmaya başlamadan önce analiz için gerekli olan ayarların seçilmesiyle başlanıldı (Şekil 3).

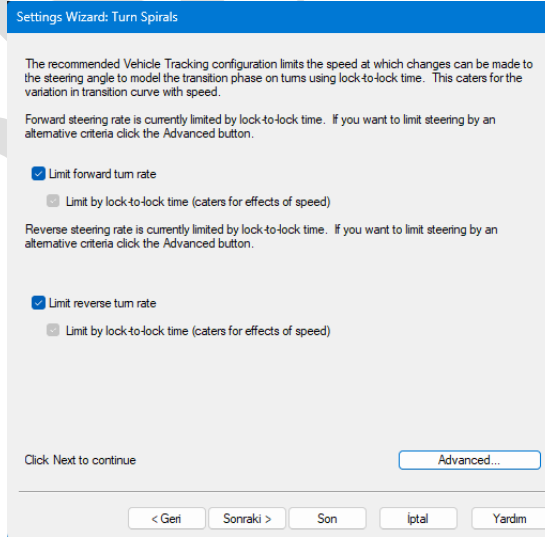


Şekil 3. Autodesk Vehicle Tracking program arayüzü ve ayarlar sekmesi

Adım 1.Direksiyon ayarları

Autodesk Vehicle Tracking'deki lock-to-lock süresi, araç manevralarındaki direksiyon açısı değişikliklerini modellemek için kullanılan önemli bir parametredir. Bu süre, aracın direksiyonunun maksimum sol konumdan maksimum sağ konuma geçmesi için geçen zamanı temsil etmektedir ve araç

davranışlarını daha gerçekçi hale getirmek için hız ve araç tipi gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Geçiş aşaması modellenmesi, bu süreyi kullanarak aracın dönüş sırasında direksiyon açısındaki kademeli değişimin simülasyonudur. Özellikle yüksek hızlarda dönüş geçişlerinin doğru bir şekilde yansıtılmasını sağlamaktadır. Varsayılan olarak, ileri direksiyon hızı, lock-to-lock süresine göre sınırlanmakta, bu da araçların aniden bir yöne yönelmesini engellemekte ve direksiyonun gerçek dünyadaki gibi çalışmasını sağlamaktadır. Ancak, eğer bu varsayılan süre ihtiyacı karşılamıyorsa, Advanced düğmesine tıklanarak direksiyon hızını kontrol etmek için alternatif kriterler belirlenebilmektedir (Şekil 4). Bu sayede, hız duyarlı direksiyon gibi özel parametreler ayarlanabilmektedir. Bu yapılandırmalar, simülasyonları daha gerçekçi hale getirirken, özel senaryolar için de değiştirilebilmektedir. Sonuç olarak, lock-to-lock süresi, genel kullanım için uygun olsa da gelişmiş ayarlar aracılığıyla daha ayrıntılı ve özel araç dinamiği modellemeleri yapılabilmektedir.

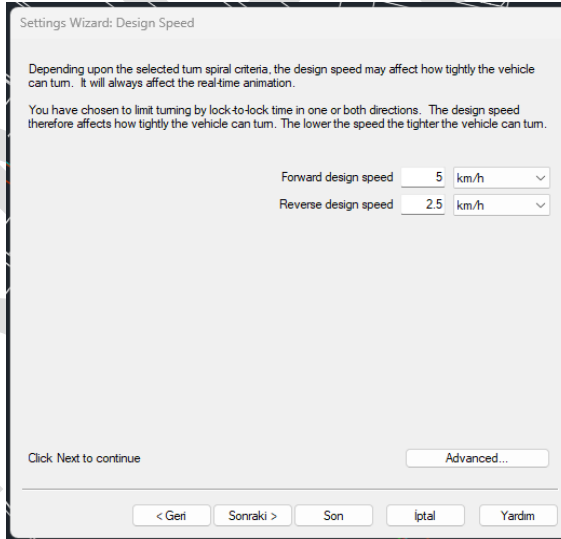


Şekil 4. Direksiyon dönüş ayarı

Adım 2.Tasarım hızı ayarları

Seçilen dönüş kriterlerine bağlı olarak, tasarım hızı, aracın ne kadar mesafede döneceğini etkileyebilmektedir. Tasarım hızı her zaman gerçek zamanlı simülasyonu etkilemektedir.

Eğer dönüşü lock-to-lock süresi ile sınırlamayı seçtiyseniz, bu sınırlama aracın dönüş kapasitesini belirlemektedir. Bu durumda tasarım hızı aracın ne kadar mesafede döneceğini etkilemektedir. Hız ne kadar düşük olursa, araç o kadar kısa mesafede dönebilmektedir. Yani düşük hızda, araç daha keskin dönüşler yapabilir, yüksek hızda ise dönüş daha geniş olmaktadır. Bu etki, dönüş hareketlerinin ve animasyonunun doğruluğunu ve gerçekçiliğini sağlamaktadır.



Şekil 5. Tasarım hızı ayarları

Adım 3 Güvenlik sınırlamaları

Autodesk Vehicle Tracking, araçların davranışlarını mümkün olduğunca doğru bir şekilde modellemeye

çalışmaktadır. Ancak, yazılımda herhangi bir güvenlik faktörü bulunmamaktadır, yani simülasyonlar sadece aracın fiziksel özelliklerine dayalıdır ve herhangi bir güvenlik önlemi hesaba katılmaz. Bu sekmelerde aracın dönüş kapasitesini, hızını, dönüş yarıçapını, römorklu araçlarda römork ve çekici arasındaki açığı sınırlandırılabilir (Şekil 6 ve Şekil 7).

Settings Wizard: Steering Limits

Vehicle Tracking models the behavior of vehicles as accurately as possible. It incorporates no safety factors or margins of any kind.

Steering is currently not limited. You may enable as many or as few of the following limits as you wish.

☐ Limit steering to percent 80 %

☐ Limit steering to angle 30 deg

☐ Limit steering to radius 10 m Inner Wheel

Click Next to continue

Advanced...

< Geri Sonraki > Son İptal Yardım

Şekil 6. Güvenlik sınırlamaları ayarı-1

Settings Wizard: Articulation Limits

Vehicle Tracking models the behavior of vehicles as accurately as possible. It incorporates no safety factors or margins of any kind.

Articulation angles are currently not limited. You may enable as many or as few of the following limits as you wish.

☐ Limit articulation to percent 80 %

☐ Limit articulation to angle 45 deg

Click Next to continue

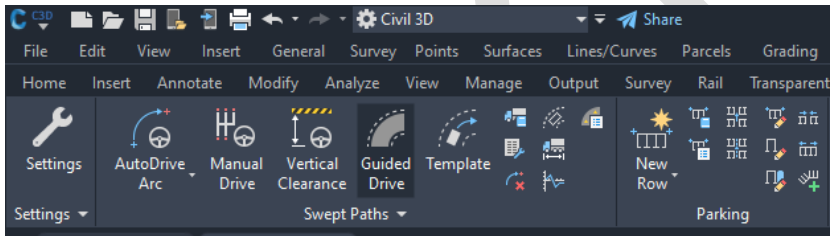
Advanced...

< Geri Sonraki > Son İptal Yardım

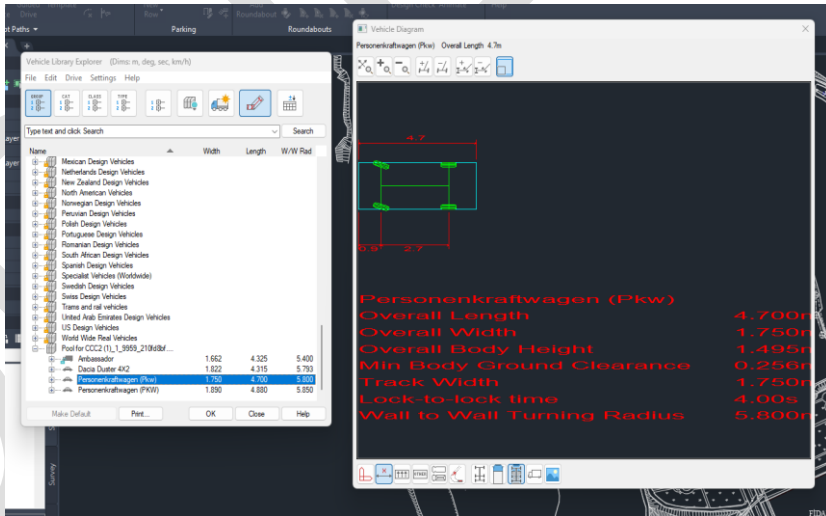
Şekil 7. Güvenlik sınırlamaları ayarı-2

Adım 4. Araç kütüphanesi araç seçimi

Otopark analizine başlanılmadan önce genel kullanım için programın varsayılan ayarları kullanıldı. Daha sonra araç kütüphanesi sekmesinden German Design Vehicles başlığı altındaki Türkiye’de kullanılan binek araçlara çok yakın ölçülerde olan Personen kraft wagen(Binek Araçlar) seçildi (Şekil 8 ve Şekil 9).

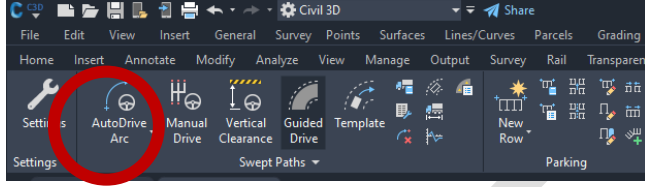


Şekil 8. Araç türü seçimi sekmesi



Şekil 9. Araç kütüphanesinde taşıt olarak binek otomobilin seçilmesi

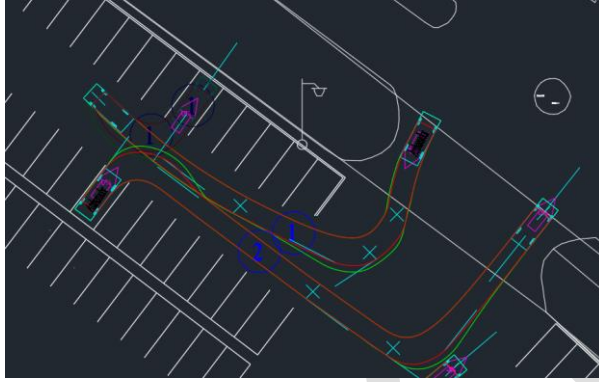
Adım 5. Taşıt yolu belirlenmesi



Şekil 10. Taşıt yolu belirlenmesi için kullanılan komut

Auto Drive Arc, Autodesk Vehicle Tracking yazılımında araçların dönüşlerini simüle etmek için kullanılan bir araçtır (Şekil 10). Bu özellik, aracın dönüş yolunu otomatik olarak hesaplayarak, dönüşlerdeki dairesel yolu veya yay hareketini modellemeye yardımcı olmaktadır. Auto Drive Arc, aracın dönüş hareketlerini belirli bir yarıçapla simüle etmekte; bu sayede dönüşün ne kadar keskin veya geniş olacağını otomatik olarak belirlemektedir. Özellikle karmaşık dönüş manevralarının simülasyonunda önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, dönüşlerin doğru ve gerçekçi bir şekilde modellenmesini sağlamak için araçların dönüş yollarının geometrisini tanımlamaktadır. Kullanıcılar, dönüş yolunun çapını veya aracın dönüş hızını manuel olarak ayarlama imkanına da sahiptir. Auto Drive Arc, park alanları, otopark tasarımları ve yolculuk planlaması gibi projelerde yol planlaması ve tasarımında kullanılmaktadır. Bu sayede, araçların dönüş yolları doğru bir şekilde tasarlanabilir ve optimize edilebilmektedir. Sonuç olarak, bu özellik simülasyon süreçlerini önemli ölçüde geliştirmektedir.

Bu aşamada Auto Drive Arc komutu ile kampüsün merkez otoparkında vaziyet planında çizilen tasarım üzerinde 5 farklı araç yolu oluşturulmuştur.



Şekil 11. 1 ve 2 numaralı simülasyonların oluşturulması

1 ve 2 numaralı simülasyonlarda, 1 numaralı aracın park yerine girmesi ve 2 numaralı aracın aynı anda park yerinden çıkmasıyla güzergahların çakıştığı tespit edilmiştir (Şekil 11). Sorunun, park sıralarının birbirine fazla yakın olmasından kaynaklandığı saptandı. Bir diğer husus ise 1 numaralı aracın park yerine doğru manevra ile girebilmesi için önündeki 2 araçlık park yerine kadar ilerlemesi gerekmektedir. Bu ilerleme ise diğer araçların giriş çıkışlarına engel olabileceğinden park yeri açılarının tasarımda yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir.



Şekil 12. 3 ve 4 numaralı simülasyonların oluşturulması

3 ve 4 numaralı simülasyonlarda araçlar park yerlerine giriş ve çıkışlarda aynı anda hareket etmeleri halinde bir az önceki simülasyonda olduğu gibi yetersiz mesafe aralığında dolayı çakışmaktadır (Şekil 12). Bunun için iki otopark sırası arasındaki mesafe artırılmalıdır. 4 numaralı simülasyon özelinde araç park yerine giriş yaparken tek hamlede girememektedir. Tek hamlede girmesi halinde dönüş yolu gösteren yeşil çizgi sağ tarafındaki araç parkına girmektedir. Bu sebeple bu sıradaki park genişlikleri yeterli değildir. İki veya üç hamlede parka giriş yapmak otopark trafiğini artıracak ve trafik güvenliğini tehlikeye atacaktır.

5 ve 6 numaralı simülasyonlarda kırmızı okla gösterilen bölgede otopark sınırı daraldığından 2 araç yan yana hareket edememektedir (Şekil 13). Bu bölgede park yerinden çıkan bir araç parka yeni gelen bir araçla karşı karşıya kalıp trafiği kilitleyecektir. Bu bölge iki aracın aynı anda hareket etmesine yetersiz mesafe nedeniyle mümkün değildir. Bu yüzden bu bölgeye giriş ve çıkışlar tek taraflı olarak veya park açıları değiştirilerek yeniden tasarlanmalıdır.



Şekil 13. 5 ve 6 numaralı simülasyonların oluşturulması

4. SONUÇLAR

Otopark ihtiyacı öncelikle kent içi ulaşımında problem olarak gözüktüğü de kampüslerdeki otopark sorunu halen önemin korumaktadır. Bireysel araç sahipliğindeki artış kent içi ulaşımın modellenmesinde dikkate alınırken, kampüs yerleşkelerinde otopark ihtiyacı olan akademik ile idari personel ve öğrencilerin araçlarını bulundukları fakülte ya da kurum binası yakına park etme talebi dikkate alınmalıdır. Ancak kampüs yerleşkelerindeki yaşam biçimi, alışkanlıklar, kampüs hareketliliği ve ortaya çıkan ulaşım problemleri gün geçtikçe önemini artırmaktadır. Kampüs yerleşkelerindeki otopark soruna çözümler bulunması kampüs hareketliliğine sürdürülebilir çözümler getirebilecektir. Teknoloji çağında yaşıyor olmamız sebebiyle bilimsel gelişmeleri kullanarak güncel programlar ile sorunlar çözümlenmelidir. Autodesk Vehicle Tracking, mühendisler ve tasarımcılar için ulaşım altyapı projelerinde taşıt hareketlerini simüle etme ve analiz etme imkânı sunan yazılımdır.

Bu bölümde, Karabük Üniversitesi'nin merkez kampüsündeki otoparklardan yoğunluğun en fazla yaşandığı merkez otoparkına analiz yapılmıştır. Vaziyet planı üzerinden Vehicle Tracking yazılımı ile analiz yapılmış olup her bir adımı program ekranının görseller üzerinden desteklenerek anlatılmıştır.

Otoparkta karşılaşılabilecek 5 sorun, proje üzerinde gerçek araç boyutlarıyla simüle edilmiş ve otopark tasarımındaki sıkıntılar belirlenmiştir. Yapılan simülasyonlar otopark tasarımı bazı önemli eksikliklerin ve sıkıntıların bulunduğunu ortaya koymuştur: Park sıralarının birbirine fazla yakın olması, park genişliklerinin yetersizliği ve dönüş alanlarındaki sıkışıklık gibi sorunlar, otoparkın verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasını engellemektedir. Bu tespitler doğrultusunda, park sıralarının arasındaki mesafenin artırılması, park genişliklerinin iyileştirilmesi ve otopark trafiğini engellemeyecek şekilde

yeniden tasarlanması gerekmektedir. Ayrıca, park yerlerinin giriş ve çıkışlarının daha düzenli ve güvenli hale getirilmesi için, özellikle dar bölgelerdeki tasarımda değişiklikler yapılmalıdır. Böylece, otopark tasarımı daha fonksiyonel ve güvenli hale getirilebilir, araçların rahatça park edebilmesi ve çıkabilmesi sağlanabilir.

Autodesk Vehicle Tracking yazılımı, otopark ve altyapı projelerinin tasarım sürecini kolaylaştıran güçlü entegrasyon, kapsamlı araç kütüphaneleri ve etkili raporlama özellikleri ile öne çıkmaktadır. Yazılımın sunduğu raporlama ve görselleştirme araçları, analiz sonuçlarını gösteren detaylı raporlar ve üç boyutlu görsellerle sunarak daha iyi kararlar alınmasına ve projelerin etkin bir şekilde yönetilmesine olanak tanımaktadır. Böylece tasarım süreçleri hızlanmaktadır. Program ile hem yapılan analizlerin doğruluğu artırmakta hem de planlama ve analiz süreçlerini daha verimli hale getirilmektedir.

5. KAYNAKLAR

- Akyüz, M. H. (2016). Kent içi üniversite kampüslerinde Otopark planlaması ve yönetimi: Yıldız teknik üniversitesi merkez kampüsü örneği. Y. Lisans Tezi. *Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye*.
- Brown, D., & Hong, S. (2019). A Design Of An Automated Parking System On A Smart Campus. *Issues in Information Systems*, 20(2).
- Husian, M., & Hassan, S. (2019). Sustainability consideration in multistory car parking design University multistory car parking as an example. *Proceeding of ICCEET* https://www.researchgate.net/publication/336145071_Sustainability_consideration_in_multistory_car_parking_design_University_multistory_car_parking_as_an_example.
- Ji, Z., Ganchev, I., O'Droma, M., & Zhang, X. (2014, August). A cloud-based intelligent car parking services for smart cities. In *2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS)* (pp. 1-4). IEEE.
- Selim, C. (2011). Otopark Alanlarının Planlama ve Tasarım İlkeleri: Ege Üniversitesi Yerleşkesi Örneği. Ege Üniversitesi. *Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, 222s*.
- Ulvi, H. (2019). Üniversite Yerleşkesi İçin Yolculuk Davranış Analizi: Gazi Üniversitesi Maltepe Yerleşkesi Örneği. *OPUS International Journal of Society Researches*, 11(18), 1566-1588.

PASİF ENERJİ SÖNÜMLEME SİSTEMLERİ

Gülhan İNCE¹

Hüseyin Hakan İNCE²

1. GİRİŞ

Pasif enerji dağıtma sistemleri 1980'lerin ortalarından beri teorik olarak geliştirilmekte olup 1990'ların ortalarından itibaren uygulamalarda hızlı bir artış görülmüştür. Kuzey Amerika'da, bu cihazlar yaklaşık 103 binada ve birçok köprüde, güçlendirme uygulamalarında veya yeni inşaatlarda kullanılmıştır (Castaldo, 2014; Soong & Spencer, 2002)

Pasif enerji cihazlarının gelişimi, 17 Ocak 1994'te Northridge'de meydana gelen ve 13 ila 44 milyar dolarlık hasara yol açan deprem ve ayrıca 17 Ekim 1989'da 5,6 ila 6 milyar dolarlık hasara neden olan Loma Pietà depremiyle başlamıştır (Afsari, 2019).

Pasif enerji sönmüleyici cihazlar rüzgâr ve deprem gibi dış etkiler sonucu yapıya giren enerji nedeniyle meydana gelen iç kuvvetleri ve yer değiştirmeleri kontrol eden mekanik cihazlardır (Mubuli, 2021). Yapıya ek olarak yerleştirilen bu cihazlar, deprem enerjisi yapısal elemanlara ulaşmadan önce sönmüleyerek yapısal elemanların hasar görmesini önlemeyi amaçlar.

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, gulhanince@mehmetakif.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-4887-2900

² Dr. Öğr. Üyesi, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, hakanince@mehmetakif.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-1503-1742

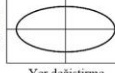
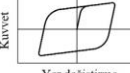
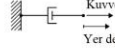
Pasif kontrol sistemlerinin temel çalışma prensibi, dış etkilerden kaynaklanan enerjinin bir kısmının yapı içerisinde dağıtılması esasına dayanır. Bu sistemler aynı zamanda bu enerjiye karşılık olarak daha yüksek sönümleme kuvvetleri üretirler.(Alnayhoum, 2024; Leung vd., 2008; Saaed vd., 2015). Pasif cihazlar genellikle iki bitişik kat arasındaki çapraz elemanlara yerleştirilir. Bina üzerinde bir sönümleme kuvveti üretmek için doğrudan bu katların yer değiştirmesini kullanırlar (Vaseghi vd., 2009).

Pasif sönümleme sistemleri hem yeni yapıların hem de mevcut yapıların sönüm, rijitlik ve enerji tüketim kapasitesini arttırabilmekte, bu nedenle mevcut yapıların güçlendirilmesi ve yeni yapılacak yapıların tasarımında kullanılmaktadır.

Pasif kontrol sistemlerinin diğer pek çok sisteme göre bakımı kolay maliyeti düşüktür. Pasif cihazlar yapının davranışına bağlı olarak sönümleme özelliklerini değiştiremez ve bu nedenle çalışmak için herhangi bir güç veya kontrol algoritması gerekli değildir (Vaseghi vd., 2009). Bu nedenle deprem esnasında meydana gelebilecek bir elektrik kesintisi bir sorun oluşturmaz.

Pasif sönümleme sistemlerinin özellikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 1’de verilmiştir.

Pasif enerji sönümleyici sistemler çalışma prensipleri ve enerji tüketim mekanizması farklılıklarına göre genel olarak hıza bağlı sönümleyiciler ve yer değiştirmeye bağlı pasif sönümleyiciler iki gruba ayrılabilir.

	Viskoz sıvı	Viskoelastik	Metalik	Sürtünme
Genel yapı				
İdeal histeretik davranış				
İdeal mekanik model			-	
Avantajlar	- Küçük yer değiştirmelerde aktif olur - Minimal dengeleyici kuvvet - Basit modelleme - Sıcaklıktan etkilenmeyen özellikler	- Küçük yer değiştirmelerde aktif olur - Dengeleyici kuvvet sağlama - Doğrusal davranış - Basit modelleme - Güçlü uzun vadeli davranış	- Kararlı histeretik davranış - Uzun vadeli güvenilirlik - Ortam sıcaklığından etkilenmez - Uygulama mühendislerinin tanıdığı malzemeler ve davranışlar	- Çevrim başına büyük enerji dağılımı - Ortam sıcaklığından etkilenmez
Dezavantajlar	- Visköz sıvının sızma ihtimali	- Sınırlı deformasyon kapasitesi - Sıcaklık ve frekansa bağlı özellikler	- Depremden sonra hasar gören ekipman (değiştirilmesi gerekebilir) - Doğrusal olmayan davranış; doğrusal olmayan analiz gerektirebilir	- Kaygan ara yüzey koşulları zamanla değişebilir - İleri boyutta doğrusal olmayan davranış yapının modunu değiştirebilir ve doğrusal olmayan analiz gerektirebilir - Dengeleyici kuvvet sağlanmadığı takdirde kalıcı yer değiştirmeler olur

Şekil 1. Pasif enerji sönümleme sistemlerinin özellikleri

Kaynak: (Lago vd., 2019)

2. HIZA BAĞLI SÖNÜMLEYİCİLER

Hıza bağlı sönümleyicilerin davranışı, yapı veya yapı elemanının etkiyen kuvvetin hızına bağlıdır. Her bir deprem seviyesi için farklı kuvvetler uygulayarak sismik etkiye karşı koyarlar.

2.1. Visköz Sıvı Sönümleyiciler

Uzun yıllardır askeri alanlarda ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan viskoz sıvı sönümleyiciler, günümüzde inşaat mühendisliğindeki yapısal uygulamalar için de uyarlanmıştır. Visköz sıvı sönümleyicilerin bu kadar hızlı bir şekilde uygulamaya konulmasının en önemli nedenlerinden biri, bu sönümleyicilerin askeri alanda uzun yıllardır başarıyla kullanılıyor olmasıdır. Soğuk Savaş'ın 1990'da sona ermesinden hemen sonra, günümüzde de çok yaygın olarak kullanılan viskoz

sıvı sönümleyici tipinin (yani sıvı kontrol delikli sönümleyicilerin) arkasındaki teknoloji açığa çıkmış ve bu teknoloji sivil kullanım için ulaşılabilir olmuştur (Lee & Taylor, 2001)). Geliştirilen viskoz sıvı sönümleme teknolojisinin sivil yapılara uygulanması, bu sönümleyicilerin çelik çerçeveli bir binaya (Constantinou & Symans, 1993) ve izolatörlü bir köprü yapısına (Tsopelas vd., 1994) uygulanmasına ilişkin ilk araştırma projelerinin tamamlanmasından kısa bir süre sonra nispeten kolay olmuştur (Castaldo, 2014).

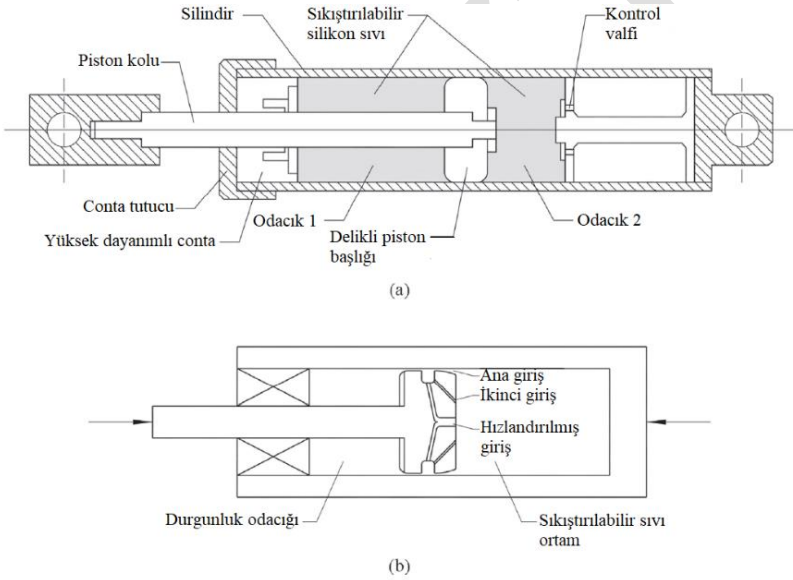
Viskoz sıvı sönümleyiciler, yapısal titreşimleri azaltmak için kullanılan pasif kontrol sistemleridir. Özellikle deprem ve rüzgar gibi dinamik yükler altında yapıların güvenliğini ve performansını artırmak amacıyla kullanılırlar. Mekanik tasarımlarındaki basitlik, dayanıklılık ve düşük bakım gereksinimleri nedeniyle mühendislik yapılarında geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Şekil 2’de bir yapıdaki viskoz sıvı sönümleyici uygulaması görülmektedir.



Şekil 2. Viskoz sıvı sönümleyici uygulaması

Kaynak: (TaylorDevices, 2024)

Şekil 3’de şematik çizimi gösterilen viskoz sıvı sönümleyiciler, temel olarak içinde viskoz bir sıvı (genellikle silikon bazlı yağ) bulunan bir silindir ve bu silindir içinde hareket eden bir pistondan oluşur. Piston üzerinde veya silindirin içinde, sıvının bir odacıktan diğerine akışını sağlayan bir veya daha fazla orifis (delik) bulunur (Constantinou & Symans, 1993; Spencer & Nagarajaiah, 2003).



**Şekil 3. Viskoz sıvı sönümleyicinin şematik çizimleri: (a) boy kesit
(b) piston başlığındaki sıvı kontrol delikleri (orifisler)**

Kaynak: (Lu vd., 2018)

Yapıya dinamik bir yük uygulandığında (örneğin deprem sırasında), yapıda oluşan göreceli hareketler pistonun silindir içinde hareket etmesine neden olur. Pistonun bu hareketi, viskoz sıvının boşluklardan geçerek bir odacıktan diğerine akmasına yol açar. Pistonun hızıyla doğru orantılı bir sönümleme kuvveti (yay benzeri) oluşur. Bu davranış, viskoz direnç karakteristiğine sahiptir ve doğrusal bir sönümleme sağlar. Sıvının akışı sırasında oluşan viskoz direnç, enerjinin ısıya dönüşerek

dağılmasına ve böylece yapıdaki titreşimlerin sönümlenmesine neden olur (Constantinou & Symans, 1993). Sönümleyici, geleneksel bir yay hareketine benzer şekilde çalışır. Ancak enerjiyi depolamak yerine viskoz akış yoluyla enerjiyi dağıtır, bu da sistemin titreşimlerini kontrol eder (Soong & Dargush, 1997).

Tasarım için dikkate alınması gereken faktörler şunlardır:

Sıvının viskozitesi: Sönümleme performansı, kullanılan sıvının viskozitesine doğrudan bağlıdır. Viskozite, sıvının akmaya karşı direncini ifade eder. Daha yüksek viskozite, daha fazla sönümleme anlamına gelir, ancak aynı zamanda pistonun hareket etmesi için daha fazla kuvvet gerektirir. Sıcaklık değişimleri viskoziteyi etkileyebilir, bu nedenle sönümleyici tasarımında sıcaklık etkileri dikkate alınmalıdır.

Orifis (delik) geometrisi: Orifislerin sayısı, şekli, boyutu ve yerleşimi sönümleyicinin performansını etkileyen önemli faktörlerdir. Orifis geometrisi, sıvının akış hızını ve dolayısıyla sönümleme kuvvetini belirler (Symans & Constantinou, 1998). Viskoz sönümleyiciler genellikle doğrusal sönümleme davranışı gösterirler, yani sönümleme kuvveti hızla orantılıdır. Ancak, orifis geometrisini değiştirerek doğrusal olmayan sönümleme davranışı da elde edilebilir.

Yükün frekansının etkisi: Viskoz sönümleyicilerin sönümleme performansı, uygulanan yükün frekansına bağlıdır. Genellikle, daha yüksek frekanslarda daha etkili sönümleme sağlarlar. Düşük frekanslı yüklerde enerji sönümleme etkisi sınırlı olabilir, ancak bu tür frekanslarda ek kontrol sistemleriyle birleştirilebilir.

Viskoz sönümleyiciler, yüksek binalar, köprüler, enerji tesisleri, endüstriyel yapılar ve tarihi yapıların güçlendirilmesi gibi geniş bir uygulama alanında kullanılmaktadır. Özellikle

deprem bölgelerinde ve rüzgar etkisinin yüksek olduğu bölgelerde yapıların performansını artırmak için etkili bir çözümdür.

Viskoz sıvı sönümleyicilerin avantajları:

- Yüksek kuvvet ve yer değiştirme kapasitesi.
- Yüksek enerji dağıtma kapasitesi ve sönümleme performansı.
- Düşük frekanslarda yapıya ek rijitlik getirmediğinden yapının doğal frekansını önemli ölçüde değiştirmeden sönümleme sağlanabilir. Bu da yapının diğer dinamik özelliklerini olumsuz etkilemeden sönümleme performansını artırmaya olanak tanır.
- Basit doğrusal analiz yöntemleri ile modellenebilir, bu da mühendislik hesaplamalarını kolaylaştırır.
- Diğer bazı sönümleme cihazlarına kıyasla nispeten basit tasarım ve kurulum.
- Mevcut yapılara uyarlanabilir.

Viskoz sıvı sönümleyicilerin dezavantajları:

- ✓ Piston ve silindir arasındaki sızdırmazlık elemanları, zamanla aşınabilir ve bu durum sıvı kaybına yol açabilir. Sızıntılar, sönümleyicinin performansını doğrudan etkiler ve yapı güvenliğini riske atabilir. Bu sebeple bakım ve denetim gerektirir.
- ✓ Sıvının viskozitesi sıcaklık değişimlerinden etkilenebilir. Bu etki genellikle orta düzeydedir, ancak aşırı sıcaklık farklarında performansı etkileyebilir. Bu nedenle, farklı iklim koşullarında kullanılacak sönümleyiciler için uygun sıvı seçimi önemlidir.

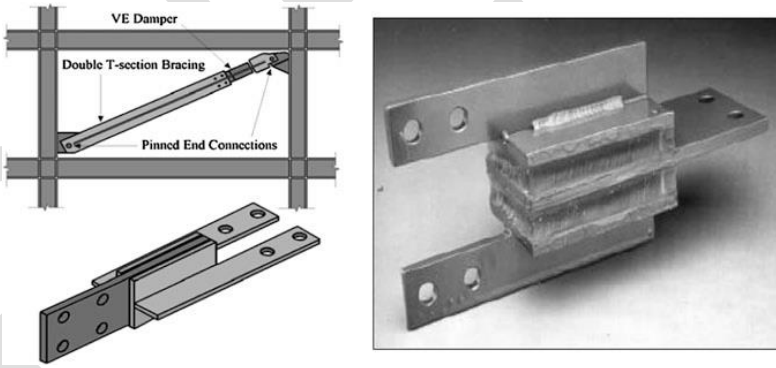
- ✓ Viskoz sönümleyicilerde kullanılan silikon bazlı sıvılar ve hassas mekanik parçalar gibi malzemeler üretim maliyetlerini artırır. Buna ek olarak bakım ve denetim maliyetleri de düşünüldüğünde diğer sönümleyicilere kıyasla daha yüksek maliyetlidirler.

2.1.1. Viskoelastik (VE) Sönümleyiciler

Viskoelastik malzemelerin titreşim kontrolü için ilk uygulamaları uçak gövdelerinde titreşim kaynaklı yorulmayı kontrol etmek için uçaklarda kullanıldığı 1950'lere kadar uzanmaktadır. O zamandan beri, uçaklarda ve havacılık yapılarında titreşimi azaltmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. İnşaat mühendisliği alanındaki uygulamalar, 1969 yılında New York'taki Dünya Ticaret Merkezi'nin ikiz kulelerinin herbirine rüzgar yüklerine karşı direnci arttırmak için 10.000'den fazla viskoelastik sönümleyicinin yerleştirilmesiyle başlamıştır. Viskoelastik sönümleyicilerin sismik uygulamaları daha yakın bir geçmişe sahiptir. Sismik uygulamalar için, rüzgar kaynaklı titreşimlerin azaltılması için gerekenlerle karşılaştırıldığında genellikle daha büyük sönümleme artışları gereklidir. Ayrıca, yapıya giren enerji genellikle daha geniş bir frekans aralığına yayılır ve bu da viskoelastik malzemelerin daha efektif bir şekilde kullanılmasını gerektirir. Yapısal uygulamalarda kullanılan viskoelastik malzemeler, genellikle kesme deformasyonuna maruz kaldıklarında enerjiyi dağıtan kopolimerler veya camsı maddelerdir. Tipik bir viskoelastik sönümleyici çelik levhalarla bağlanmış viskoelastik katmanlardan oluşmaktadır (Şekil 4). Bir yapıya monte edildiğinde, yapısal titreşim dış çelik başlıklar ve merkez levha arasında bağıl harekete neden olduğunda kesme deformasyonu ve dolayısıyla enerji dağılımı gerçekleşir. (Castaldo, 2014).

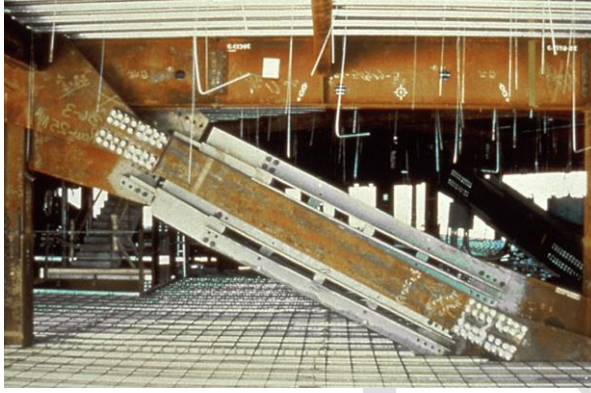
Çelik levhalar yapıya şevron veya diyagonal çaprazla bağlanır. Sönümleyicinin bir ucu diğerine göre yer değiştirdikçe

viskoelastik malzeme kayarak çevreye yayılan ısıнын oluşmasına neden olur. Viskoelastik malzemeler doğaları gereği hem esneklik hem de viskozite sergilerler. Sönümleyicinin çalışma prensibi hem viskoz hem de elastik davranış özelliklerini bir arada barındıran malzemelerle ilişkilidir. Bu cihazlar, enerji sönümleme ve geri yükleme kapasitesi sayesinde yapısal titreşimleri etkili bir şekilde azaltır. Viskoelastik sönümleyiciler, içerdikleri viskoelastik malzemenin kayma deformasyonuna uğraması sonucu enerjiyi sönümler. Malzeme, dış yük etkisiyle şekil değiştirirken gerilme-şekil değiştirme çevrimi sırasında enerjinin bir kısmını ısıya dönüştürerek sistemden uzaklaştırır. Malzemenin elastiklik özelliği şekil değişimi sonrasında orijinal formuna geri dönmesini sağlar (Symans vd., 2008). Şekil 5’de ABD’deki Columbia Tower binasındaki viskoelastik sönümleyici uygulaması görülmektedir.



Şekil 4. Tipik viskoelastik sönümleyici düzeneği

Kaynak: (Castaldo, 2014)



Şekil 5. Columbia Tower binasındaki viskoelastik damper uygulaması

Kaynak: (Lago vd., 2019)

Viskoelastik malzeme, viskoelastik sönümleyicilerin performansını ve dayanıklılığını belirleyen en kritik bileşendir. Bu malzeme sönümleyicinin dinamik mekanik özelliklerini doğrudan tayin eder. Yapılardaki kompleks şartlar ve ortam göz önüne alındığında, sönümleyicide kullanılacak viskoelastik malzemelerin bazı özel gereksinimleri karşılaması hedeflenir (Shu vd., 2022). Bunlar:

- 1- Yüksek sönümleme ve büyük kayıp faktörü;
- 2- Düşük ısı üretimi ve yüksek ısı dağıtma verimliliği;
- 3- İstikrarlı çalışma performansı;
- 4- Geniş sıcaklık aralığı;
- 5- İyi dayanıklılık (korozyon önleyici, oksidasyon önleyici özellikler vb.).

Viskoelastik bir malzeme, sıcaklığın sabit olması koşuluyla geniş bir gerilme aralığında doğrusal davranır. Büyük şekil değiştirmelerde, sönümlenen büyük miktardaki enerji nedeniyle önemli miktarda ısınma meydana gelir. Oluşan ısı malzemenin mekanik özelliklerini değiştirir ve malzemenin genel davranışı doğrusal olmaktan çıkar. Betonarme bir yapıya

viskoelastik sönümleyicilerin eklenmesi, betonarme elemanların çatlamasının erken aşamalarında enerjiyi dağıtabilir ve elemanlarda hasar gelişimini azaltabilir. Viskoelastik sönümleyicilerin bazı özellikleri şunlardır (Bishay-Girges, 2004):

- Sınır veya etkinleştirme kuvveti seviyesi yoktur, bu nedenle yapı elastik kalırken tüm deprem etkisi ve rüzgar seviyeleri için enerji sönümlerler.
- Yapısal davranışı iyileştirmek amacıyla bina çerçevelerine önemli ölçüde sönümleme sağlamak üzere monte edilirler. Sönümleyicilerin histeretik özellikleri; kayma gerilmesi seviyesinin, titreşim frekansının, sönümleyici malzeme tipinin, kalınlığının ve sıcaklığının fonksiyonudur.
- Yapının başlangıç rijitliğini arttırlar. Rijitleştirme etkisi yanal deformasyonların daha iyi kontrol edilmesini sağlarken, aynı rijitleştirme yapıya gelen deprem kuvvetlerinin daha büyük olmasına yol açabilir.

Viskoelastik sönümleyiciler geri yükleme özelliklerine sahiptir ve metalik, viskoz ve sürtünmeli damperlerin aksine düşük yer değiştirmelerde etkinleşirler (Behnamfar & Almohammad-albakkar, 2023). Viskoelastik sönümleyicilerin viskoz sıvı sönümleyicilere göre avantajı, viskoelastik sönümleyicilerin ilave rijitliğinin yapının yer değiştirmesini azaltarak sismik yükler altında elastik davranma olasılığını artırmasıdır (Shu vd., 2024).

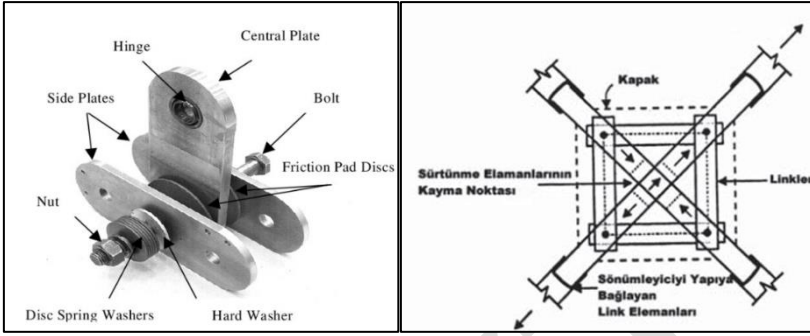
3. YER DEĞİŞTİRMEYE BAĞLI SÖNÜMLEYİCİLER

Yer değiştirmeye bağlı sönümleyicilerin davranışı, yapı veya yapı elemanının yaptığı deplasmana bağlıdır. Bu sönümleyicilerin performansı hızdan ve yapıya etkiyen kuvvetin frekansından bağımsızdır.

3.1. Sürtünmeli Sönümleyiciler

Sürtünmeli sönümleyiciler en yaygın türlerinden biridir ve ilk olarak 1980 yılında Kanadalı araştırmacılar Avtar P. Pall ve arkadaşları (Pall vd., 1980) tarafından otomotiv frenleme analogisine dayalı olarak geliştirilmiştir. Bu cihazların amacı “kırmak yerine frenleyerek” bina hareketlerini yavaşlatmaktır (Pall & Marsh, 1982).

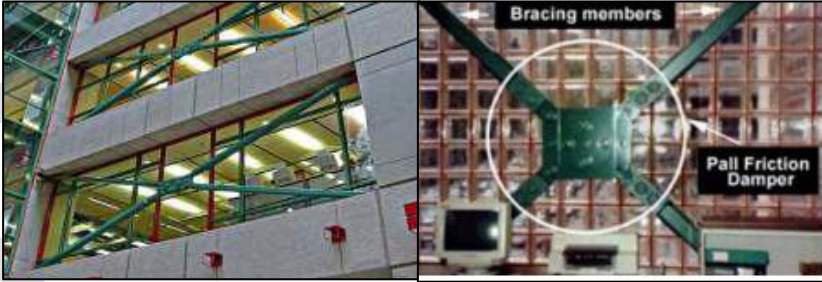
Bu sönümleyicilerin çalışma prensibi birbirine göre kayan iki katı arayüzey arasında gelişen sürtünme dirence dayanır (Vaseghi vd., 2009). Bu damperler, şiddetli depremler esnasında (önceden belirlenmiş optimum yük) ana yapısal elemanların elastik davranışını korumak (veya en azından akmayı geciktirmek) için, ana yapısal elemanların akmasından hemen önce kaymaktadır. Ayrıca, sürtünme sönümleyicisi ile sönümlenen yapının doğal periyodu titreşimin genliği ile değişir, bu da yapıdaki rezonansı önler; bu nedenle, deprem durduğunda yapı neredeyse orijinal konumuna geri döner (Jaisee vd., 2021; Pasquin vd., 2004). Şekil 6’da sürtünme tipi sönümleyici gösterilmiştir.



Şekil 6. Sürtünme tipi sönümleyici

Kaynak: (Aldemir & Aydın, 2005)

Sürtünmeli sönümleyicilerin en popülerlerinden olan Pall sönümleyicileri, Montreal'deki Concordia Üniversitesi Kütüphanesi (Şekil 7) ve Kanada'daki Montreal Kumarhanesi olmak üzere mevcut ve yeni binalarda kullanılmıştır (Titirla, 2023).



Şekil 7. Concordia Üniversitesi Kütüphane binası

Kaynak: (Gote & Dhamge, 2019; Warnotte vd., 2007)

Sürtünme damperleri, çevrim yükleme başına büyük bir enerji dağılımı ve ortam sıcaklığına karşı duyarsızlık sağlarken, kayan arayüz koşulları zamanla değişebilir ve güçlü doğrusal olmayan davranışları nedeniyle daha yüksek modları uyarabilir ve doğrusal olmayan analiz gereklidir.

Şekil 8’de sürtünmeli sönümleyici ile güçlendirilmiş Seoul - Güney Kore’deki bir okul binası gösterilmiştir.



Şekil 8. Sürtünmeli sönümleyici ile güçlendirilmiş Seoul - Güney Kore’deki okul binası

Kaynak: (Damptech, 2024)

3.2. Metalik Akma Sönümleyicileri

Metalik akma sönümleyicileri, deprem sırasında ortaya çıkan enerjiyi metalin özellikle de yumuşak çelik ve alüminyum gibi malzemelerin plastik deformasyonu yoluyla sönümleyen etkili mekanizmalardan biri olarak kabul edilmektedir (Soong & Dargush, 1997). Bu damperler (sönümleyiciler), sismik enerjiyi tüketme amacıyla ilk kez Kelly vd. ve Skinner vd. (Kelly vd., 1972; Skinner vd., 1974) tarafından ortaya atılmış, kavramsal ve deneysel çalışmalarla geliştirilmiştir. Yapılan çalışmalar, metalik sönümleyicilerin deprem enerjisini büyük oranda tüketebilme yeteneğini ortaya koymuş ve sonraki araştırmalar için temel oluşturmuştur. Metalik damperlerin tasarımında iki önemli faktör dikkatle ele alınmalıdır. İlki, akma sonrası deformasyon aralığı, damperin erken yorulma olmaksızın yeterli bir yükleme döngüsüne sahip olmasını sağlamak için yeterli olması, ikincisi ise tekrarlı elastik olmayan deformasyon altında

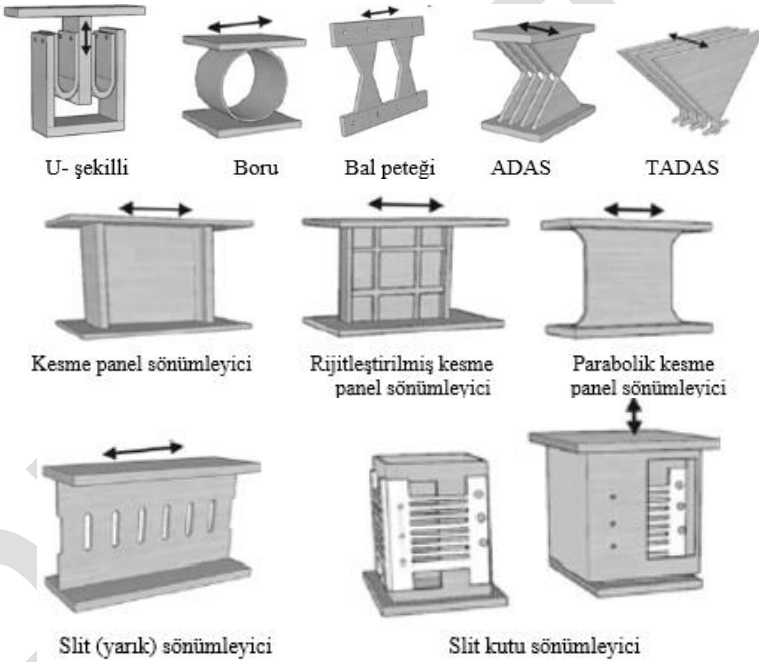
kararlı bir şekilde histeretik davranışa sahip olmalıdır (Saaed vd., 2015).

Enerjinin tüketimi metalin çevrimsel yükleme altında doğrusal olmayan şekil değiştirmeler yapmasına dayanan metalik sönümleyiciler, kesme akması veya eğilme akması veya bunların kombinasyonu şeklinde enerji tüketim mekanizmaları geliştirerek enerji tüketebilirler. Kesme mekanizmasına sahip damperler genellikle daha yüksek yanal dayanım, rijitlik ve daha az kararlı histeretik davranışa sahipken, eğilme mekanizmasına sahip damperler genellikle önemli ölçüde süneklik ve kararlı histeretik davranış sunarlar, ancak daha düşük yanal dayanım ve rijitliğe sahiptir. Daha yüksek yanal dayanım ve rijitliğin yanı sıra kararlı enerji dağıtımı ile sünekliğin gerekli olduğu durumlarda, her iki kesme- eğilme mekanizması kombinasyonu uygun bir çözüm olacaktır (Bajaj & Agrawal, 2023). Bu sönümleyiciler U şekilli, X şekilli, üçgen, boru, bal peteği şekilli, slit, panel, gibi farklı geometriye sahip metaller kullanılarak tasarlanabilmektedir (Şekil 9).

Metalik akma sönümleyicileri arasında en popüler olan ikisi sisteme ilave sönüm ve ilave rijitlik kazandıran ADAS (Adding damping and stiffness) ve TADAS (Triangular-plate Added Damping and Stiffness) sönümleyicileridir. Whittaker vd. (Whittaker vd., 1991) tarafından geliştirilen ADAS sönümleyicileri, X şeklindeki birbirine paralel bir dizi çelik levhadan oluşmakta ve ters V şeklindeki çelik çaprazlar ile giriş arasına yerleştirilmektedir. ADAS sönümleyicinin gelişmiş hali olan TADAS (Tsai vd., 1993) sönümleyicileri ise benzer şekilde birbirine paralel bir dizi üçgen şeklindeki çelik levhadan oluşmaktadır.

Metalik sönümleyiciler orta ve şiddetli depremler sırasında elastik olmayan davranışı ile bir sigorta gibi davranarak yapının yapısal elemanlarının elastik davranış

göstererek hasardan korumasını hedefler. Bu sönümleyiciler diğer sönümleyici türlerine kıyasla kararlı histeretik davranış göstermeleri, davranışlarının hızdan bağımsız oluşu, ortam sıcaklığına karşı direnç ve güvenilirliğe sahip olması, üretimi için ileri teknoloji gerektirmemesi ve deprem sonrası kolayca değiştirilebilmesi gibi avantajlara sahiptir.



**Şekil 9. Metalik sönümleyiciler a. Eğilme sönümleyicileri
b. Kesme sönümleyicileri c. Diğer akma sönümleyicileri**

Kaynak: (Bajaj & Agrawal, 2023)

Metalik sönümleyicilerin uygulamaları 1960'ların sonunda Japonya'da ve 1970'lerin başında Yeni Zelanda'da başlamış, son zamanlarda ise İtalya ve Amerika Birleşik Devletleri'nde artış göstermiştir (Titirla, 2023). Şekil 10'da İtalya- Vibo Valentia'da metalik akma sönümleyici kullanılarak güçlendirilmiş bir okul binası görülmektedir.



a. Çapraz sistemi ve damper



b. Güçlendirilmiş binanın dış görünüşü

Şekil 10. Metalik akma sönümleyici ile bina güçlendirmesi

Kaynak: (Ferraioli vd., 2023)

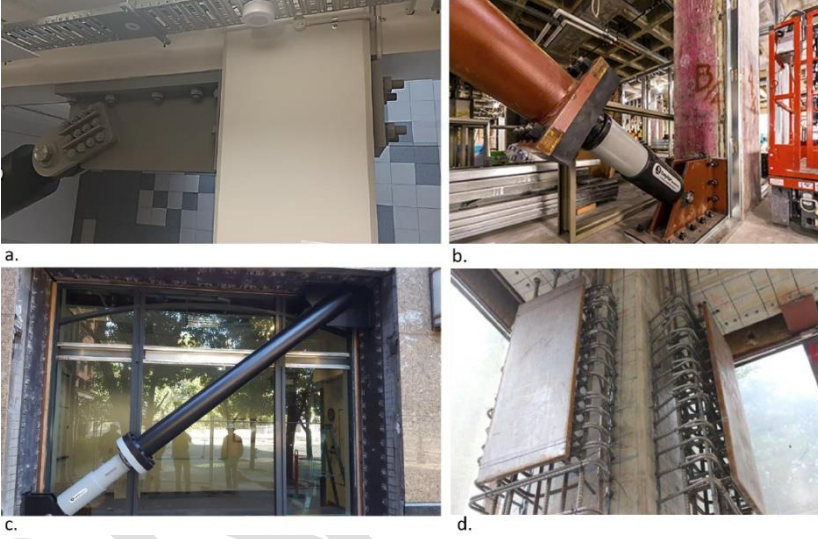
4. PASİF SÖNÜMLEYİCİLERİN MEVCUT BETONARME ÇERÇEVELERE MONTAJI

Sönümleyicilerin mevcut betonarme yapılara bağlanması zorlayıcı olabilmektedir. Donatının yoğun olduğu kiriş-kolon birleşiminin köşesinde, sönümleyiciye ve çapraz elemana bağlanan köşe levhalarının montajı için bir çelik levha sistemi gereklidir. Bunun için geliştirilen bazı çözümler şunlardır (Canney vd., 2023).

- Kirişlerin ve kolonların her iki tarafına veya etrafına yerleştirilmiş, cıvatarla veya epoksi ankrajlarla bağlanmış çelik plakalar (Şekil 11a ve 11b)
- Transfer kuvvetlerini dağıtmak ve sıkışık bağlantı alanından kaçınmak için beton çerçeve içinde epoksi

veya genişlik/yükseklik boyunca ankrajlı ikincil bir çelik çerçeve. (Şekil 11c)

- Çelik gömme plakaları yerleştirmek için mevcut kolona dübellenen yeni inşaat demiri kafesleri (Şekil 11d)



Şekil 11. Mevcut betonarme çerçevelere sönümleyici eklemeye yönelik çeşitli uygulama örnekleri

Kaynak: (Canney vd., 2023)

5. SONUÇ

Pasif enerji sistemleri, depreme dayanıklı binaların tasarımı veya mevcut binaların güçlendirilmesinde kullanılan yenilikçi yöntemler arasındadır. Yapıya etkiyen sismik etkileri azalmakta önemli rol oynar. Pasif enerji sönümleme sistemleri arasında yer alan viskoz sıvı, viskoelastik, metalik akma ve sürtünmeli sönümleyiciler sahip oldukları farklı avantajlar ile çeşitli uygulama alanları sunar.

Pasif enerji sistemleri kullanıldıkları yapıların enerji tüketim kapasitesi ve rijtilik gibi özelliklerine önemli katkı sağlarlar ayrıca diğer pek çok sisteme göre bakımı kolay ve maliyeti düşüktür. Özellikle geleneksel yöntemlere göre üretim, yapım yıkım işlerinin hafıflığı göz önüne alındığında sürdürülebilir, çevre dostu binalar tasarlamak için yapı mühendisliği alanındaki yenilikçi çözümler ortaya koymaktadır.

6. KAYNAKÇA

- Afsari, L. (2019). Seismic Analysis Model of V or X Braced Frames Using Friction Damper on Concrete Buildings. Eskişehir Osmangazi University.
- Aldemir, Ü., & Aydın, E. (2005). Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Yeni Yaklaşımlar. Türkiye Mühendislik Haberleri, 1(435), 81-89.
- Alnayhoum, F. S. M. A. (2024). Optimum Multiple Tuned Mass Dampers For Soft Story Structures. İstanbul University.
- Bajaj, M., & Agrawal, P. (2023). A State-of-the-Art Review on Metallic Dampers Based on Different Yielding Mechanism. Proceedings of 17th Symposium on Earthquake Engineering (Vol. 1), 329, 569-586. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1608-5_41
- Behnamfar, F., & Almohammad-albakkar, M. (2023). Development of Steel Yielding Seismic Dampers Used to Improve Seismic Performance of Structures: A Comprehensive Review. International Journal of Engineering, 36(4), 746-775. <https://doi.org/10.5829/IJE.2023.36.04A.13>
- Bishay-Girges, N. W. (2004). Seismic Protection of Structures Using Passive Control System [Ph.D Thesis]. University of Canterbury.
- Canney, N. E., Eriksen, K. B., & Tiapon, A. T. (2023). A review of the state of practice for fluid viscous damper applications in North America and New Zealand. Proceedings of the 2023 New Zealand Society for Earthquake Engineering Annual Technical Conference. NZSEE 2023 Annual Conference, New Zealand.

- Castaldo, P. (2014). Integrated Seismic Design of Structure and Control Systems. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-02615-2>
- Constantinou, M. C., & Symans, M. D. (1993). Experimental Study of Seismic Response of Buildings with Supplemental Fluid Dampers. *The Structural Design of Tall Buildings*, 2(2), 93-132. <https://doi.org/10.1002/tal.4320020203>
- Damptech. (2024). Project 1 Seoul, South Korea School Retrofitting with Toggle Bracing System. Damptech | Earthquake Protection. <https://www.damptech.com/south-korea>
- Ferraioli, M., Lauro, G. D., Crisci, P., Laezza, G., Lavino, A., & Bellantoni, C. (2023). Seismic retrofit of a RC building using metallic yielding dampers: A case study. *Procedia Structural Integrity*, 44, 982-989. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.01.127>
- Gote, A. A., & Dhamge, D. N. R. (2019). Seismic Evaluation of Reinforced Concrete Structure with Friction Damper. 06(04).
- Jaisee, S., Yue, F., & Ooi, Y. H. (2021). A state-of-the-art review on passive friction dampers and their applications. *Engineering Structures*, 235, 112022. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112022>
- Kelly, J. M., Skinner, R. I., & Heine, A. J. (1972). Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 5(3), Article 3. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.5.3.63-88>

- Lago, A., Trabucco, D., & Wood, A. (2019). Damping Technologies for Tall Buildings. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815963-7.00001-4>
- Lee, D., & Taylor, D. P. (2001). Viscous damper development and future trends. *The Structural Design of Tall Buildings*, 10(5), 311-320. <https://doi.org/10.1002/tal.188>
- Leung, A. Y. T., Zhang, H., Cheng, C. C., & Lee, Y. Y. (2008). Particle swarm optimization of TMD by non-stationary base excitation during earthquake. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37(9), 1223-1246. <https://doi.org/10.1002/eqe.811>
- Lu, Z., Wang, Z., Zhou, Y., & Lu, X. (2018). Nonlinear dissipative devices in structural vibration control: A review. *Journal of Sound and Vibration*, 423, 18-49. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.02.052>
- Mubuli, A. (2021). Bina Türü Yapılar İçin Pasif Sönümleyici Sistemlerin Optimizasyonu ve Analizi [Doktora Tezi]. İstanbul Üniversitesi.
- Pall, A. S., & Marsh, C. (1982). Response of Friction Damped Braced Frames. *Journal of the Structural Division*, 108(6), 1313-1323. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0005968>
- Pall, A. S., Marsh, C., & Fazio, P. (1980). Friction Joints for Seismic Control of Large Panel Structures. *PCI Journal*, 25(6), 38-61.
- Pasquin, C., Leboeuf, N., Pall, R., & Pall, A. (2004). Friction Dampers for Seismic Rehabilitation of Eaton's Building, Montreal. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada.

- Saaed, T. E., Nikolakopoulos, G., Jonasson, J.-E., & Hedlund, H. (2015). A state-of-the-art review of structural control systems. *Journal of Vibration and Control*. <https://doi.org/10.1177/1077546313478294>
- Shu, Z., You, R., & Xie, Y. (2024). Viscoelastic Dampers for Vibration Control of Building Structures: A State-of-Art Review. *Journal of Earthquake Engineering*, 28(12), 3558-3585. <https://doi.org/10.1080/13632469.2024.2345180>
- Shu, Z., You, R., & Zhou, Y. (2022). Viscoelastic Materials for Structural Dampers: A Review. *Construction and Building Materials*, 342, 127955. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127955>
- Skinner, R. I., Kelly, J. M., & Heine, A. J. (1974). Hysteretic dampers for earthquake-resistant structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 3(3), 287-296. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290030307>
- Soong, T. T., & Dargush, G. F. (1997). *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*. Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/Passive+Energy+Dissipation+Systems+in+Structural+Engineering-p-9780471968214>
- Soong, T. T., & Spencer, B. F. (2002). Supplemental energy dissipation: State-of-the-art and state-of-the-practice. *Engineering Structures*, 24(3), 243-259. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00092-X](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00092-X)
- Spencer, B. F., & Nagarajaiah, S. (2003). State of the Art of Structural Control. *Journal of Structural Engineering*, 129(7), 845-856. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:7\(845\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:7(845))

- Symans, M. D., Charney, F. A., Whittaker, A. S., Constantinou, M. C., Kircher, C. A., Johnson, M. W., & McNamara, R. J. (2008). Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments. *Journal of Structural Engineering*, 134(1), 3-21. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:1\(3\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:1(3))
- Symans, M. D., & Constantinou, M. C. (1998). Passive Fluid Viscous Damping Systems for Seismic Energy Dissipation. *ISET Journal of Earthquake Technology*, 35(4), 185-206.
- TaylorDevices. (2024). Fluid Viscous Dampers for Buildings and Bridges. <https://www.taylordevices.com/products/fluid-viscous-dampers/>
- Titirla, M. D. (2023). A State-of-the-Art Review of Passive Energy Dissipation Systems in Steel Braces. *Buildings*, 13(4), 851. <https://doi.org/10.3390/buildings13040851>
- Tsai, K.-C., Chen, H.-W., Hong, C.-P., & Su, Y.-F. (1993). Design of Steel Triangular Plate Energy Absorbers for Seismic-Resistant Construction. *Earthquake Spectra*, 9(3), 505-528. <https://doi.org/10.1193/1.1585727>
- Tsopelas, P., Okamoto, S., Constantinou, M. C., Ozaki, D., & Fujii, S. (1994). NCEER-TAISEI Corporation research program on sliding seismic isolation systems for bridges: Experimental and analytical study of systems consisting of sliding bearings, rubber restoring force devices and fluid dampers (Technical Report NCEER-94-0002). The National Center for Earthquake Engineering Research.
- Vaseghi, J., Navaei, S., Navayinia, B., & Roshantabari, F. (2009). A Parametric Assessment of Friction Damper in

Eccentric Braced Frame. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 3(10), 361-365.

Warnotte, V., Stoica, D., Majewski, S., & Voiculescu, M. (2007). State of the art in the pounding mitigation techniques. *Intersections*, 4(3), Article 3. <http://www.intersections.tuiasi.ro/index.php/JIIR/article/view/262>

Whittaker, A. S., Bertero, V. V., Thompson, C. L., & Alonso, L. J. (1991). Seismic Testing of Steel Plate Energy Dissipation Devices. *Earthquake Spectra*, 7(4), 563-604. <https://doi.org/10.1193/1.1585644>

GÖZENEKLİ MALZEMELERİN ISIL İLETKENLİK PERFORMANSI ÜZERİNE BİR İNCELEME

Elif Tuğçe KOCABEYOĞLU¹

Fuat KÖKSAL²

1. GİRİŞ

Malzemelerin ısı iletkenlik performansı, çeşitli mühendislik ve bilimsel disiplinlerde önemli bir parametre olarak kabul edilmektedir. Isıl iletkenlik, bir malzemenin ısıyı iletme kapasitesini belirleyerek enerji verimliliği, termal yönetim ve yalıtım uygulamalarında kritik bir rol oynamaktadır. Malzemelerin yapısal özellikleri, özellikle de iç yapılarındaki gözeneklilik, ısı iletkenlik üzerinde doğrudan etki yapmaktadır. Gözenekli malzemeler, yüksek poroziteye sahip olmaları nedeniyle ısıyı iletme kapasitesinde sınırlamalar ortaya çıkarmaktadır. Bu tür malzemeler, içinde bulundurdukları hava veya diğer gazlar sayesinde ısının yayılmasını engelleyerek daha düşük ısı iletkenlik değerleri sergilemektedir (Basu vd., 2010; Yüksel & Avcı, 2010).

Isıl iletkenlik ve ısı transferi, mühendislik ve bilimsel alanlarda çok çeşitli uygulama alanlarına sahiptir. Isıl iletkenliği yüksek olan malzemeler, ısıyı hızlı bir şekilde iletme ve dağıtmak için kullanılır. Örneğin, elektronik cihazlarda, mikroçiplerin aşırı ısınmasını önlemek amacıyla ısı iletkenliği

¹ Öğr. Gör. Dr., Yozgat Bozok Üniversitesi, Yozgat Meslek Yüksekokulu, İnşaat, e.tugce.kocabeyoglu@yobu.edu.tr e.tugce.kocabeyoglu@yobu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4077-9779.

² Prof. Dr., Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik - Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, fuat.koksal@bozok.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3436-1694.

yüksek malzemeler tercih edilir (Callister, 2014). Bu malzemeler, ısıнын cihazlardan uzaklaştırılmasını sağlayarak verimliliği artırır. Bunun yanı sıra, ısı transferi, enerji tasarrufu sağlamak amacıyla yalıtım malzemelerinde de kullanılır. Yalıtım malzemelerinin ısıl iletkenlikleri düşük olmalıdır, böylece ısı kaybı engellenir. İnşaat sektöründe kullanılan cam yünü, polistiren ve mineral yün gibi malzemeler, düşük ısıl iletkenlikleri ile ısıyı dışarıya iletmez ve enerji verimliliğini artırır (Çengel, 2018).

Literatürde, gözenekliliğin malzemelerin ısıl iletkenlik performansı üzerindeki etkilerini inceleyen pek çok çalışma bulunmaktadır. Gözenekli malzemelerin termal özelliklerini anlamak amacıyla çeşitli modeller geliştirilmiştir. Özellikle, nano ölçekli gözenek yapısına sahip malzemeler, düşük ısıl iletkenlikleri ile dikkat çekmektedir. Bu malzemeler, ısı yalıtımı sağlama amacıyla yaygın olarak kullanılmakta olup, enerji verimliliği açısından potansiyel taşımaktadır (Zhou & Cheng, 2012). Gözenek boyutunun küçülmesi, genellikle ısıl iletkenliğin azalmasına yol açarken, büyük gözeneklerin varlığı ise ısıнын daha hızlı iletilmesine sebep olmaktadır (Salkhordeh vd., 2015). Bu bağlamda, gözenek yapısının optimize edilmesi, malzemenin termal performansının iyileştirilmesine yönelik önemli bir araştırma alanı sunmaktadır.

Son yıllarda yapılan araştırmalar, aerogeller, nanoparçacıklar ve kompozit malzemeler gibi yüksek poroziteye sahip yapıların ısıl iletkenlik üzerindeki etkilerini daha derinlemesine incelemiş ve bu malzemelerin termal özelliklerini optimize etmek için çeşitli stratejiler geliştirilmiştir (Basu vd., 2010).

2. ISIL İLETKENLİK VE ISI TRANSFERİ

Isı transferi ve ısı iletkenlik, ısı enerjisinin bir yerden başka bir yere taşınmasıyla ilgili iki önemli kavramlardır. Bu iki kavram sıklıkla birbiriyle karıştırılsa da, farklı anlamlar taşımaktadır. Isı transferi, ısıнын bir noktadan diğerine taşınma sürecini ifade ederken (Çengel, 2015), ısı iletkenlik ise bir malzemenin ısıyı iletme yeteneğini ölçen bir fiziksel özelliktir (Incropera & DeWitt, 2007).

2.1. Isı Transferi

2.1.1. Isı transferi mekanizmaları

Isı transferi, gözenekli malzemelerde üç temel mekanizma üzerinden gerçekleşmektedir. Bu mekanizmalar malzemenin termal performansını doğrudan etkilemekte ve gözenekli yapının karakteristiğine bağlı olarak farklı oranlarda katkı sağlamaktadır (Yüksel, 2010).

2.1.1.1. İletim yoluyla ısı transferi

İletim, gözenekli malzemelerde katı iskelet üzerinden gerçekleşen temel ısı transfer mekanizmasıdır. Gözenekli ortamlarda iletim, malzemenin katı fazı ve gözeneklerdeki akışkan faz üzerinden gerçekleşir. Malzemenin efektif ısı iletkenliği, bu iki fazın kombinasyonundan etkilenmektedir (Demirkıran & Ekinci, 2012).

2.1.1.2. Taşınım yoluyla ısı transferi

Taşınım mekanizması, gözenekli yapı içerisindeki akışkan hareketi ile gerçekleşen ısı transferini kapsamaktadır. Bu süreç, akciğerlerdeki kan dolaşımından jeotermal sistemlerdeki akışkan hareketine kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir (Yüksel, 2010). Gözenekli ortamlarda taşınım olayı, Darcy yasası temelinde incelenmekte ve akışkanın

geçirgenlik özelliklerine bağlı olarak değişmektedir (Yusufoğlu, 2016).

2.1.1.3. Işınım yoluyla ısı transferi

Işınım yoluyla ısı transferi, elektromanyetik dalgalar veya fotonlar vasıtasıyla gerçekleşmektedir (Yüksel & Avcı, 2010). Gözenekli malzemelerde ısınım etkisi, özellikle yüksek sıcaklıklarda önem kazanmaktadır. Deneysel çalışmalar, ısınımın efektif ısıl iletkenliğe etkisinin arttığını göstermiştir 20-30°C üzerindeki sıcaklıklarda (Demirkıran & Ekinci, 2012).

2.2. Isıl İletkenlik

Isı iletkenlik, bir malzemenin ısının bir noktadan diğerine iletme kapasitesini belirleyen bir fiziksel özelliktir. Başka bir deyişle, bir malzemenin sıcaklık farkından dolayı ısıyı ne kadar hızlı iletebileceğini gösterir ve Fourier'in ısı iletimi yasasına dayanır. Isıl iletkenlik, genellikle k sembolü ile gösterilir ve birim olarak **watt/metrekelvin (W/mK)** kullanılır (Çengel, 2018). Fourier ısı iletim yasası, malzeme içerisindeki ısı akışının, malzemenin ısıl iletkenliği, alanı ve sıcaklık farkı ile orantılı olduğunu belirtir (Fourier, 1822). Fourier'in yasası şu şekilde ifade edilebilir:

$$Q = -k \times A \times \frac{\Delta T}{d}$$

Burada Q =iletken ısı miktarını, k =ısıl iletkenliği, A =alanı, ΔT =sıcaklık farkını ve d =malzemenin kalınlığını temsil eder (Çengel, 2018). Bu denklem, bir malzemenin ısı iletme kapasitesinin, sıcaklık farkına ve malzemenin fiziksel özelliklerine bağlı olarak nasıl değiştiğini açıkça gösterir.

Metalik malzemeler, serbest taşıma elektronları sayesinde yüksek ısıl iletkenliğe sahipken, yalıtkanlar daha düşük ısıl iletkenliğe sahiptir. Örneğin, bakır ve alüminyum gibi

metaller yüksek ısı iletkenlik değerlerine sahipken, cam yünü ve plastikler gibi malzemeler düşük ısı iletkenlik gösterir (Callister, 2014).

2.2.1. Isı iletkenliği etkileyen bazı parametreler

2.2.1.1. Gözeneklilik

Gözeneklilik, bir malzeme içindeki toplam boşluk hacminin malzemenin toplam hacmine oranı olarak tanımlanır ve sıfıra yakın değerlerden bire yakın değerlere kadar değişebilir (Akkoyunlu, 2013).

Gözenekli malzemeler, yapılarında %20-95 arasında hava, kalan kısımlarında ise üretildiği malzemenin yoğun halini bulunduran yapılardır (Öztürk, 2020). Malzemelerin fiziksel özellikleri gözeneklilikten doğrudan etkilenir ve bu özellik, malzemenin performansını belirleyen en kritik parametrelerden biridir (Akkoyunlu, 2013). Son yıllarda yapılan araştırmalar, gözenekli yüzeylerde ısı geçişinin düz yüzeylere göre üç kat daha fazla olabileceğini göstermiştir (Demir, 2020).

Gözenekli yapının ısı transferine etkisi, malzemenin türüne ve gözenek karakteristiğine göre değişkenlik gösterir. Etkin ısı iletim katsayısı; katı matrisin özelliklerine, gözeneklerin boyutuna, dağılımına ve boşluklardaki akışkanın haline bağlı olarak değişmektedir (Demir, 2020).

2.2.1.1.1. Gözenek yapısının etkisi

Gözenekli malzemelerin karakterizasyonunda, gözenek yapıları önemli rol oynamaktadır. Malzemelerde gözenek yapısı üç temel formda bulunabilir:

- a. Sürekli gözenekler (açık gözenekler)
- b. İzole gözenekler (kapalı gözenekler)
- c. Yarı sürekli gözenekler (açık ve kapalı, karma gözenekler)

Bu yapılar arasında, izole gözeneklerin termal iletkenliği en düşük değere sahiptir (Kaya, 2021). Gözenekli yapının optimizasyonu, malzemenin kullanım amacına göre bu parametrelerin dikkatli bir şekilde ayarlanmasını gerektirir.

a. Sürekli gözenekler (açık gözenekler)

Açık gözenekler, boşlukların birbirine bağlı olduğu, malzeme yüzeyinden başlayarak içeriye doğru uzanan ve dış ortamla bağlantılı olan boşluklardır. Bu gözenekler, malzemenin ısı iletkenlik değerlerini (W/mK) önemli ölçüde etkiler (Gibson & Ashby, 1997).

b. Kapalı gözenekler

Kapalı gözenekler, malzeme içinde izole edilmiş, dış ortamla bağlantısı olmayan boşluklardır (Çelik, 2022). Bu tip gözenekler, özellikle yalıtım uygulamalarında tercih edilir çünkü içlerindeki durgun hava sayesinde düşük ısı iletkenlik değerleri sunarlar. Kapalı gözenekli yapılar, metalik köpüklerde ve yalıtım malzemelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Arslan, 2020).

c. Yarı sürekli gözenekler (açık ve kapalı, karma gözenekler)

Karma gözenek yapıları, hem açık hem de kapalı gözeneklerin bir arada bulunduğu sistemlerdir. Bu yapılar, malzemenin kullanım amacına göre optimize edilebilir. Gözenekli magnezyumda yapılan araştırmalar, karma gözenek yapısının gözeneksiz yapıya kıyasla daha yüksek sönümleme katsayısına sahip olduğunu göstermiştir (Çelik, 2022).

2.2.1.1.2. Gözenek boyutunun etkisi

Gözenek boyutu, bir malzemenin iç yapısındaki boşlukların fiziksel büyüklüğünü tanımlar ve malzemenin ısı

iletkenlik performansını doğrudan etkileyen bir parametredir (Basu vd., 2010; Yüksel & Avcı, 2010; Zhou & Cheng, 2012). IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) sınıflandırmasına göre, gözenekler boyutlarına göre üç ana kategoriye ayrılır: mikro gözenekler (yarıçapı 1 nm'den küçük), mezo gözenekler (yarıçapı 1-25 nm arası), ve makro gözenekler (yarıçapı 25 nm'den büyük) (Yılmaz, 2021).

Küçük gözenekler genellikle nanometre (nm) veya mikrometre (μm) boyutlarında olup, malzemenin iç yapısında sınırlı hava veya gaz hareketi sağlar. Bu tür gözenekler, ısıнын yayılmasını zorlaştırarak, düşük ısı iletkenlik değerlerine yol açar (Basu vd., 2010; Yüksel & Avcı, 2010; Zhou & Cheng, 2012).

Büyük gözenek boyutları ise genellikle mikrometre (μm) boyutlarından daha büyük olup, ısıнын iletimine daha fazla olanak tanır. Büyük gözenekler, havanın veya diğer gazların daha serbest hareket etmesine olanak sağlar, bu da ısıнын malzeme içinde daha hızlı yayılmasına yol açar. Sonuç olarak, büyük gözeneklere sahip malzemeler, genellikle daha yüksek ısı iletkenlik değerleri gösterirler (Salkhordeh vd., 2015). Ancak, büyük gözeneklerin varlığı, malzemenin yapısal bütünlüğünü zayıflatabilir ve dayanıklılığını olumsuz yönde etkileyebilir (Zhou & Cheng, 2012). Bu nedenle, malzemenin termal performansını iyileştirmek amacıyla, küçük ve büyük gözenek boyutlarının optimal bir şekilde tasarlanması önemlidir. Bu optimizasyon, istenilen ısı iletkenlik özelliklerini sağlamak için kritik bir faktördür (Basu vd., 2010; Yüksel & Avcı, 2010; Salkhordeh vd., 2015).

Farklı gözenek boyutlarıyla yapılan çalışmalarda, ısı iletkenliği optimize etmek için gözenek boyutunun belirli bir aralıkta tutulması gerektiği vurgulanmıştır (Liu vd., 2015).

Tablo. 1. Yapılan çalışmalardaki gözenek boyutu-ısıl iletkenlik katsayısı arasındaki ilişki.

Gözenek Boyutu	Malzeme Türü	Isı İletkenlik Katsayısı (W/mK)
Mikro gözenek (Lu, X. ve Hüssein, H., 2020).	Aerojel	0.02–0.03
Mezo gözenek (Incropera ve DeWitt, 2007)	Aktif Karbon	0.05–0.15
Makro gözenek (Doroodchi, E., vd. 2016)	Seramik Köpük	0.10–0.30

Gözenek boyutunun küçültülmesi, gözenek sayısında artış anlamına gelir ve bu durum malzemedeki gözenek duvarlarının toplam yüzey alanını artırır (Firebrick, 2023). Bu artış, ışınlı ısı transferinin verimliliğinde azalmaya neden olur. Ancak, gözenek çapı 1 μm 'den büyük olan gözenekli malzemeler için Loeb modeli geçerlidir (Firebrick, 2023).

a. Mikro gözenekler

Mikro gözenekler, çapı 2 nanometreden küçük olan boşluk yapılarıdır (Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği - IUPAC). Bu boyuttaki gözeneklerde, hava molekülleri serbestçe hareket edemez ve gözenek duvarlarında adsorbe edilir (Firebrick, 2023). Bu özellik, malzemenin ısıl iletkenliğini önemli ölçüde etkiler. Moleküler arası enerji aktarımı ile ısı transferi baskındır ve iletim mekanizması etkili olur (Lu & Hüssein, 2020).

b. Mezo gözenekler

Mezo gözenekler, çapı 2 ila 50 nanometre arasında değişen boşluk yapılarıdır (Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği - IUPAC). Sıcaklık farkları nedeniyle konvektif taşınım meydana gelebilir (Doroodchi et al., 2016).

c. Makro gözenekler

Makro gözenekler, 50 nanometreden büyük çapa sahip boşluklardır. Bu gözeneklerde ısı transferi mekanizması daha karmaşıktır. Araştırmalar, gözenek boyutunun küçülmesiyle malzemenin ısı yalıtım özelliklerinin arttığını göstermiştir (Firebrick, 2023). Makro gözenekli yapılarda ısı transferi şu şekilde gerçekleşir: Daha küçük gözenek boyutu, hava taşınımının genliğini azaltarak konvektif ısı transferinin verimliliğini düşürür (Firebrick, 2023). Radyasyon etkileri artar ve özellikle yüksek sıcaklıklarda bu mekanizma öne çıkabilir (Bear, 1972).

2.2.1.1.3. Gözenek dağılımının etkisi

Gözenek dağılımı, malzemelerin ısı iletkenlik performansını belirleyen temel faktörlerden biridir. Gözeneklerin malzeme içindeki yerleşimi ve dağılım karakteristiği, ısı transfer mekanizmalarını doğrudan etkiler.

a. Homojen dağılım

Homojen dağılım, gözeneklerin malzeme içinde eşit ve düzenli bir şekilde yerleştiği yapıyı ifade eder. Bu tür dağılımda, malzemenin her noktasında benzer termal özellikler gözlemlenir. Homojen dağılımlı malzemelerde ısı iletkenlik değerleri 0.01-0.1 W/mK aralığında değişmektedir (Yüksel & Avcı, 2010). Gazbeton gibi yapı malzemelerinde homojen gözenek dağılımı, malzemenin %69-88 arasında gözeneklilik oranına sahip olmasını sağlar (Doğan, 2018).

b. Heterojen dağılım

Heterojen dağılım, gözeneklerin malzeme içinde düzensiz ve değişken boyutlarda dağıldığı yapıyı tanımlar. Bu yapıda, malzemenin farklı bölgelerinde farklı termal özellikler gözlemlenir. Heterojen dağılımlı malzemelerde şu özellikler öne çıkar:

Gözenek dağılımının ısı iletkenlik performansına etkisi, malzemenin kullanım amacına göre optimize edilebilir. Araştırmalar, yoğunluk artışının gözenek yapısını etkilediğini göstermektedir. Örneğin, 16 kg/m^3 yoğunluktan 20 kg/m^3 yoğunluğa geçişte, yoğunluk %25 artmasına rağmen ısı iletkenlikteki artış sadece %3.22 seviyesinde kalmaktadır (Uzun & Ünal, 2023).

Malzemelerde gözenek dağılımının karakterizasyonu için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. BET analizi ve cıva porozimetresi gibi teknikler, gözenek dağılımının hassas ölçümünü sağlar Anadolu Üniversitesi. (2022). Bu ölçümler, malzemenin mikro, mezo veya makro boyutta gözenek içerip içermediğini belirlemede kullanılır (Anadolu Üniversitesi, 2022).

Homojen dağılımlı gözenek yapısı, ısı transferini minimize ederek yalıtım performansını artırır. Örneğin, seramik malzemelerde gözenek dağılımının optimizasyonu ile %2-4 arasında hata payıyla efektif ısı iletkenlik değerleri elde edilebilmektedir (Doğan, 2018).

2.2.1.2. Kristal yapı etkisi

Kristal yapıya sahip malzemeler amorf yapıdaki malzemelere kıyasla daha yüksek ısı iletkenliği göstermektedir (Tablo 2.2) (Dağıdır, Sarper & Erdinç, 2022). Kristal yapıdaki düzenlilik, fononların hareketini kolaylaştırarak ısı transferini artırmaktadır İç yapıda kusurların ve safsızlıkların azalması,

termal iletkenliği olumlu yönde etkilemektedir (Isı iletkenliği-
Wikipedia, t.y.).

**Tablo 2. Yapısal özelliklere göre ısı iletkenlik performansı
(Dağıdır, Sarper & Erdinç, 2022).**

Yapısal Özellik	Isı İletkenlik Etkisi (w/mk)	Performans Değişimi
Düzenli Kristal	0.8 - 1.2	Yüksek
Yarı Kristal	0.4 - 0.7	Orta
Amorf Yapı	0.1 - 0.3	Düşük

2.2.1.3. Sıcaklık değişiminin etkisi

Sıcaklık değişimi, gözenekli malzemelerin ısı iletkenliğini doğrudan etkilemektedir. Deneysel çalışmalar, alüminyum ve bakır ile desteklenmiş gözenekli yalıtım malzemelerinde 20-30°C üzerindeki sıcaklıklarda ısı iletkenliğin daha hızlı arttığını göstermiştir (Yüksel, 2010). Düşük sıcaklıklarda (5°C ve altı) ise desteklenmemiş malzemelere göre ısı iletkenlikte üçte bir oranına kadar azalma gözlenmiş (Yüksel, 2010) ve tablo 2.3 'de verilmiştir.

Tablo 3. Sıcaklığa göre ısı iletkenlik değişimi (Yüksel, 2010).

Sıcaklık Aralığı	Isı İletkenlik Değişimi
< 5°C	%33 azalma
20-30°C	Hızlı artış
> 35°C	Maksimum artış

2.2.1.4. Nem etkisi

Nem, gözenekli malzemelerin ısı performansını etkileyen en kritik çevresel faktörlerden biridir. Bağlı nem ve sıcaklığa bağlı olarak yalıtım performansı yaklaşık iki kat azalabilmektedir (Ökten, Özdemir, Öztürk, Demir & Özdemir, 2022). Özellikle taş yünü gibi gözenekli yalıtım malzemelerinde; maksimum ısı iletkenlik artışı %90, bağlı nem ve 35°C'de gözlenmiştir (Ökten, Özdemir, Öztürk, Demir & Özdemir, 2022). Yalıtım kalınlığının 10 cm seviyelerine çıkması gerekebilmektedir (Ökten, Özdemir, Öztürk, Demir & Özdemir, 2022). Bağlı nemin artışı, malzemenin ısı direncini önemli ölçüde düşürmektedir (Uğur, Demirdağ & Şengün, 2003).

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE MODELLEME YÖNTEMLERİ

Gözenek boyutunun ısı iletkenlik üzerindeki etkisini anlamak için çeşitli deneysel çalışmalar ve modelleme teknikleri kullanılmaktadır.. Farklı araştırmalar, gözenek boyutunun yanı sıra gözeneklerin dağılımı, şekli ve bağlı yoğunluğu gibi parametrelerin de termal iletkenlik üzerinde belirgin etkiler yarattığını göstermektedir. Salkhordeh vd. (2015), poroziteyi artıran malzemelerin ısı iletkenlikteki değişimlerini modellemiş ve gözenek boyutunun, porozitenin genel etkisini nasıl şekillendirdiğini tartışmışlardır. Benzer şekilde, Lee vd. (2016), gözenek boyutunun yanı sıra, malzemenin mikro yapısının ısı iletkenlik performansını nasıl değiştirdiğini detaylı bir şekilde incelemişlerdir.

3.1. Gözenekliliğin Ölçüm Yöntem ve Teknikleri

Karakterizasyon teknikleri, gözenekli malzemelerin yapısal özelliklerinin belirlenmesini sağlamaktadır. Karakterizasyon çalışmaları, gözenekli malzemelerin termal iletkenliğinin (w/mk)

gözenek yapısıyla doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Özellikle yalıtım malzemelerinde, gözenek karakterizasyonu optimum performans için belirleyici rol oynamaktadır (Beckstein, 2022). Deneysel çalışmalar, maksimum sapmanın yaklaşık %10 olduğunu ve farklı ölçüm yöntemlerinin birbiriyle tutarlı sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır (Beckstein, 2022). Modern ölçüm yöntemleri, malzemelerin gözenek yapısını nanometre seviyesinde analiz etme imkanı sunmaktadır.

3.1.1. Doğrudan ölçüm teknikleri

Doğrudan ölçüm teknikleri, malzemelerin gözenek yapısını fiziksel yöntemlerle belirler. BET (Brunauer-Emmett-Teller) analizi, gözenekli malzemelerin yüzey alanı ve gözenek boyut dağılımını belirlemede yaygın olarak kullanılır (Kalemtas & Eken, 2017). Bu teknik, özellikle 2-50 nm aralığındaki mezogözenek yapıların analizinde etkilidir (Can, t.y.).

Yüzey alanı analizi, BET (Brunauer-Emmett-Teller) tekniği kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem, azot gazı adsorpsiyonu ile m^2/g cinsinden spesifik yüzey alanını belirlemektedir (Erciyes Üniversitesi-taum. t.y.). Güvenilir sonuçlar için yaklaşık 500 mg numune kullanılması ve ölçüm öncesi en az 16 saat süreyle vakum koşullarında gaz giderme işlemi uygulanması gerekmektedir (İstanbul Teknik Üniversitesi-itülabs, t.y.).

Cıva porozimetresi, makro gözenekliliği ve geniş mezo gözenekliliği analiz etmek için kullanılan bir diğer doğrudan ölçüm tekniğidir (Başkan, t.y.). Bu yöntemde, gözenek çapı ile uygulanan basınç arasında doğrudan bir ilişki bulunur.

3.1.2. Dolaylı ölçüm teknikleri

Dolaylı ölçüm teknikleri, gözenek yapısını ikincil parametreler üzerinden analiz eder. Gaz adsorpsiyonu, gözenekli malzemelerin yüzey ve gözenek karakterizasyonunda kullanılan

önemli bir metottur (Başkan, t.y.). BJH (Barrett, Joyner & Halenda) yöntemi, 2-50 nm aralığındaki gözenek boyutlarını hesaplamak için kullanılır (Can, t.y.).

Helyum piknometrisi, malzemelerin görünen ve iskelet yoğunluğunu ölçmek için kullanılan bir tekniktir (Başkan, t.y.).

3.1.3. Görüntüleme yöntemleri

Modern görüntüleme teknikleri, gözenekli yapıların detaylı analizine imkan tanır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve geçirimli elektron mikroskobu (TEM), morfoloji ve yüzey analizinde kullanılan temel tekniklerdir (Kaya, 2021). Bu yöntemler, gözenek yapısının üç boyutlu karakterizasyonunu sağlar.

Görüntü işleme teknikleri, gözeneklilik oranının veya örtme oranının tespitinde kullanılır (Akaç, 2022). Derin öğrenme algoritmaları ile desteklenen modern görüntüleme sistemleri, klasik görüntü işleme yöntemlerine göre daha başarılı sonuçlar vermektedir (Ervural, Ertuş & Ceran, 2024). Gözenekli malzemelerin porozite değerinin belirlenmesinde kullanılan fiziksel yöntemler genellikle maliyetli cihazlar gerektirir (Ervural, Ertuş & Ceran, 2024). Bu nedenle, görüntü işleme teknikleri maliyet etkin bir alternatif sunar. U-Net mimarisi gibi özelleşmiş evrişimli sinir ağları, mikroskop görüntülerini segmentlere ayırarak gözenekli bölgeleri belirler ve gözeneklilik değerlerini hesaplar (Ervural, Ertuş & Ceran, 2024).

4. SONUÇ

Küçük gözenekler, ısıнын yayılmasını zorlaştırarak, düşük ısıl iletkenlik değerlerine yol açar (Basu vd., 2010; Yüksel & Avcı, 2010; Zhou & Cheng, 2012). Büyük gözenek boyutları ise havanın veya diğer gazların daha serbest hareket etmesine olanak sağlar, bu da ısıнын malzeme içinde daha hızlı

yayılmasına yol açar. Sonuç olarak, büyük gözeneklere sahip malzemeler, genellikle daha yüksek ısıl iletkenlik değerleri gösterirler (Salkhordeh vd., 2015). Bu nedenle, malzemenin termal performansını iyileştirmek amacıyla, küçük ve büyük gözenek boyutlarının optimizasyonu önemlidir. (Basu vd., 2010; Yüksel & Avcı, 2010; Salkhordeh vd., 2015). Yapılan araştırmalar yoğunluk artışının gözenek yapısını etkilediğini göstermektedir (Uzun & Ünal, 2023). Ayrıca düzgün dağılımlı gözenek yapısı, ısı transferini minimize ederek ısıl iletkenlik performansını arttırmaktadır (Doğan, 2018).

Gözenekli malzemelerin ısıl iletkenlik performansı, yalıtım uygulamalarından enerji depolama sistemlerine kadar birçok endüstriyel alanda belirleyici rol oynamaktadır. Malzemelerin W/mK cinsinden ölçülen ısıl iletkenlik değerleri, gözeneklerin boyutu, şekli, dağılımı ve yoğunluğu gibi özelliklerden doğrudan etkilenmektedir. Aynı zamanda bu malzemelerin ısıl iletkenliği, kullanılan materyalin tasarımı ile de doğrudan ilişkilidir. Gözenekli malzemelerin ısıl iletkenliği, malzemenin genel performansını ve enerji verimliliğini etkilemektedir.

5. KAYNAKÇA

- Akaç, N.K. (2022). Dokuma kumaşlarda bağımsızlığın görüntü işleme yöntemiyle analizi (Yayınlanmamış yüksek lisans tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Akkoyunlu, S.D. (2013). Polimer kullanılarak sentezlenen mezogözenekli silika eldesi ve karakterizasyonu (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü). <https://polen.itu.edu.tr/items/aa959655-501c-4ccd-a681-f0b9dbd563b3>
- Anadolu Üniversitesi. (2022). Yüzey alanı ölçümü ve gözeneklilik dağılımı analizi cihazı. Erişim adresi: <https://aubibam.anadolu.edu.tr/analizler/cihaz-ve-donanimlar/yuzey-alani-olcumu-ve-gozeneklilik-dagilimi-analizi-cihazı>
- Arslan, D. (2020). Gözenekli malzemelerin sonumlamaya etkisi. Scribd. <https://www.scribd.com/document/500582518/gozenekli-malzemelerin-sonumlemeye-etkisi>
- Başkan, Z. (t.y.). KM343-4 yeni kendine özgü özellikler - Karakterizasyon teknikleri . Scribd. Erişim adresi: <https://www.scribd.com/document/641986339/km343-4-yeni-gozenekli-malzemeler-characterization-techniques>
- Basu, S., vd. (2010). Thermal conductivity of nanofiber structures: The effect of porosity. International Journal of Heat and Mass Transfer, 53(17-18), 3889-3896. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.04.029>
- Bear, J. (1972). Dynamics of Fluids in Porous Media. Elsevier.
- Beckstein, F. (2022). Isı akış ölçer ve düzenli sıcak plakayı kullanarak kendi içindeki betonun termal karakterizasyonu: Yoğunluğun termal iletkenlik üzerindeki etkisi. Testin Analiz Edilmesi . <https://www.scribd.com/document/641986339/km343-4-yeni-gozenekli-malzemeler-characterization-techniques>

://analyzing -testing .netzsch .com /tr /application -
literature /isi -akis -olcer -ve -korumali -sicak -plaka -
yontemini -kullanarak -gozenekli -betonun -termal -
karakterizasyonu -yogunlugun -termal -iletkenlik -
uzerindeki -etkisi

Beckstein, F. (2023). Gazbetonun LFA ile termal karakterizasyonu. Testin Analiz Edilmesi . <https://analyzing -testing .netzsch .com /tr /application - literature /lfa -araciligiyla -havalandirilmis -betonun - termal -karakterizasyonu>

Bor, A.Ş. & Bor, E.T. (2010). Toz metalurjisi yöntemiyle kontrolli TiNi ve Ti-6Al-4V alaşımı üretimi ve karakterizasyonu (Proje No. 108M118). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

Callister, W.D. (2014). Materials Science and Engineering: An Introduction (9th ed.). Wiley.

Can, E. (t.y.). KMB 324 Katalizör Karakterizasyon Yöntemleri. Dr. Öğr. Üyesi. Erişim adresi:file:///C:/Users/pc/Downloads/KMB324-%20Characterization%20-%20K%C4%B1s%C4%B1m%201%20(2).pdf

Çelik, C. (2022). Gözenekli malzemelerin uygulamaları. Fen Bilimleri Dergisi, 8(1), 1-7. [https://fenbildergi.aku.edu.tr/1101/015701\(1-7\).pdf](https://fenbildergi.aku.edu.tr/1101/015701(1-7).pdf)

Çengel, Y. A. (2015). Isı ve Kütle Transferi. McGraw-Hill.

Çengel, Y.A. (2018). Isı ve Kütle Taşınımı (4. baskı). McGraw-Hill Education.

Dağıdır, K., Sarper, B., & Erdinç, M.T. (2022). Sıralı tip boru demetinde gözenekli malzeme gözenek yoğunluğu ve kalınlığının ısı transferi ve basınç düşümüne etkilerinin sayısal olarak incelenmesi. Düzce Üniversitesi Metalurji

- ve Malzeme Mühendisliği Dergisi, 24(71), 447-461.
<https://doi.org/10.21205/deufmd.2022247111>
- Demir, A. (2020). Polimer bazlı malzemelerin özellikleri. Malzeme Bilimleri Dergisi, 12(3), 45-60. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/579308>
- Demir, S. (2023). Nanoparçacıkların Gözenekli Malzemelerdeki Etkisi. Nanoteknoloji ve Malzeme Dergisi.
- Demirkıran, N. & Ekinci, E. (2012). Sol-jel kaplama çözeltisi bileşiminin hidrojen peroksit tepkilerine etkisi. Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi / Karaelmas Bilim ve Mühendislik Dergisi , 2(2), 18-23.
- Doğan, B. (2018). Gazbetonun malzemesinin ısı iletkenliğinin farklı gözeneklilik oranlarında incelenmesi. Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 3(2), 39-51.
- Doğan, M. (2021). Alüminyum Alaşımlarının Isıl İletkenlik Performansı ve Uygulamaları. Metalurji ve Materyal Bilimleri Dergisi.
- Doroodchi, E., vd. (2016). Gözenekli ortamlarda konvektif ısı transferi. Uluslararası Isı ve Kütle Transferi Dergisi, 98, 353-372.
- Eurolab (2024). Gözenekli yapı testi. <https://www.laboratuar.com/sektorel/medikal/gozenekli-yapi-testi/>
- Erciyes Üniversitesi. (t.y.). Yüzey analiz ve porozite (BET) cihazı. Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi. <https://taum.erciyes.edu.tr/yuzey-analiz-ve-porozite-cihazı-bet>
- Ervural, S., Ertuş, E.B. & Ceran, H.F. (2024). Porozite analizine derin öğrenme yaklaşımı: U-Net ile dinamik eşikleme

[Gözenek analizine derin öğrenme yaklaşımı: U-Net ile dinamik eşikleme]. KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi , 27(3). <https://acikerisim.karatay.edu.tr/yayin/1753385&dil=3>

Firebrick, J. Önemli faktörler nelerdir? (2023).. <https://tr.jucosfirebrick.com/info/what-are-the-important-factors-that-affect-the-90119823.html>

Gibson, L.J., & Ashby, M.F. (1997). Hücresel Katılar: Yapı ve Özellikler . Cambridge Üniversitesi Yayınları.

Hengko. (2023). Sinterleme Nedir? Hakkında Tüm Temel Bilgiler? Hengko. Erişim adresi: <https://www.hengko.com/tr/news/all-basic-information-about-what-is-sintering/>

Hengko. (2023). Bilmeniz gereken kendinizi korumalı medya nedir? Hengko. Erişim adresi: <https://www.hengko.com/tr/news/porous-media-nedir-bilmeniz-gerekir/>

Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2007). Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Wiley.

İstanbul Teknik Üniversitesi. (t.y.). BET analizi. İTÜLABS [.https://itulabs.itu.edu.tr/Deney/Detay/679](https://itulabs.itu.edu.tr/Deney/Detay/679)

Kalemtas, A., & Eken, T. Y. (2017). MMM303 Metalurji ve Malzeme Laboratuvarı I Föyü. Bursa Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü. Erişim adresi:https://depo.btu.edu.tr/dosyalar/metalurji/Dosyalar/Foy_Ayşe_Kalemtas_Deney_No_4_11_03_2017.pdf

Kaya, E. (2021). Metalurjik süreçlerin optimizasyonu üzerine bir çalışma (Yüksek lisans tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü). <https://cdn.bartın.edu.tr/metalurji/d7ee7cd9-f063-4669-8e1c-393503ed6ffb>

- Kaya, M., akmak, ., Akkuş, A., Elibol Anna, E. & Km, M. (2022). Toz metalurjisi ile üretilen kendi TiZr alaşımasının mekanik özellikleri ve biyouyumluluğu üzerine sinterleme özelliklerinin etkileri. BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi , 9(1), 71-79. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.992744>
- Lu, X., & Hüssein, H. (2020). Termal uygulamalarda gözenekli malzemeler. Malzeme Araştırmalarındaki Gelişmeler, 12(3), 45-67.
- Ökten, K., zdemir, A.O., ztrk, E., Demir, H. & zdemir, M. (2022). Ortam bağıl nemi ve sıcaklığının yn yn malzemelerinin performans üzerindeki etkileri. Politeknik Dergisi, 25 (2), 723-731. <https://doi.org/10.2339/politeknik.793362>
- Özel, M. & akmak, F.A. (2023). Farklı faz yönlendirmeli bina dış duvarlarında parçalanan malzemelerin ısı kazancına etkisi görülür. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi , 35(1), 413-424. <https://doi.org/10.35234/fumbd.1210192>
- Öztürk, M. (2020). Polimer bazlı kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine bir alışma (Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü). <https://acikerisim.sakarya.edu.tr/bitstream/20.500.12619/76901/1/T03918.pdf>
- Salkhordeh, M., vd. (2015). Effect of porosity on the thermal conductivity of materials. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 7(3), 031014. <https://doi.org/10.1115/1.4031127>
- Uğur, İ., Demirdağ, S. & şengün, N. (2003). Mermer türlerinin ısı iletkenliği üzerine teknik bir araştırma. TÜRKİYE'de

IV. MERMER SEMPOZYUMU: MERSEM'2003
Bildiriler Kitabı (s. 173-187). 18-19 Aralık 2003.

Uzun, İ., & Ünal, P. (2023). Isıl iletkenliğin farklı yoğunluktaki EPS ürünleri için değişimi. Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 10(1), 1-10.

Wikipedia. Isı iletkenliği. (t.y.). https://tr.wikipedia.org/wiki/Isı_iletkenliği

Yılmaz, B. (2021). Kompozit malzemelerin dayanıklılığı. Mühendislik Dergisi, 15(2), 100-110. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/590657>

Yüksel, N. (2010). Gözenekli yapılarda yapı ve işletme sahibinin ısı yayılımının etkisinin incelenmesi (Doktora tezi). Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yüksel, N. & Avcı, A. (2010). Gözenekli malzemelerin etken ısı iletkenlikleri üzerine mevcut çalışmalar. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi , 25(2), 331-346.

Yüksel, O., & Avcı, H. (2010). Gözenekli malzemelerin ısı iletkenlik performanslarının modellenmesi. Türk Fen Bilimleri Dergisi, 13(1), 23-31.

Yusufoğlu, Y. (2016). Vakumlu izolasyon panelleri için nano gözenekli malzeme geliştirilmesi. Ufuk Avrupa . Erişim adresi: <https://ufukavrupa.org.tr/tr/basari-hikayeleri/vakum-izolasyon-panelleri-icin-nano-gozenekli-malzeme-gelistirilmesi>

Zhou, J., & Cheng, X. (2012). Nanomaterials and thermal conductivity: The effect of nanoporosity. Journal of Nanotechnology, 23(2), 025705. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/2/025705>

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİNDE İLERİ ARAŞTIRMALAR

yaz
yayınları

YAZ Yayınları

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3

İscehisar / AFYONKARAHİSAR

Tel : (0 531) 880 92 99

yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com