

# İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA AKADEMİK TARTIŞMALAR

Editör: Doç.Dr. Emre TOPÇU

**yaz**  
yayınları

# **İnşaat Mühendisliği Alanında Akademik Tartışmalar**

**Editör**

Doç.Dr. Emre TOPÇU

**yaz**  
yayınları

2026

## **İnşaat Mühendisliği Alanında Akademik Tartışmalar**

Editör: Doç.Dr. Emre TOPÇU

---

### **© 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 978-625-8996-69-2

Haziran 2026 – 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](http://www.yazyayinlari.com)

[yazyayinlari@gmail.com](mailto:yazyayinlari@gmail.com)

## İÇİNDEKİLER

<b>Ulaşım Geotekniğinde İklim Değişikliğinin Altyapı Düzeyindeki Yansımaları ve İzleme, Modelleme ile Adaptasyon Stratejileri.....</b>	<b>1</b>
<i>Göknur BERBER NARİN</i>	
<b>Progressive Collapse in International Codes: A Comparative Assessment of Direct and Indirect Regulatory Approaches .....</b>	<b>27</b>
<i>Saffet KILIÇER</i>	
<b>Baraj Tipinin Seçimi.....</b>	<b>48</b>
<i>Sadettin TOPÇU</i>	
<b>Kentsel Ulaşımında Özel Araç Talebinin Yönetimi: Toplu Taşımaya Yönlendirme İçin Bir Analitik Çerçeve .....</b>	<b>68</b>
<i>Polat YALINIZ</i>	
<b>The Evolution of Drought Monitoring Methods: From Ground-Based Observations to Satellite-Based Systems .....</b>	<b>87</b>
<i>Emre TOPÇU</i>	
<b>Hicaz Railroad Ma'an Station Construction Technologies, Project Geometry, and Materials Information.....</b>	<b>108</b>
<i>Ahmet GÖKDEMİR, Elif TOMBAK</i>	
<b>1050 mm Legacy: The Architectural Structure and Material Characterization of The Damascus Hijaz Station.....</b>	<b>127</b>
<i>Ahmet GÖKDEMİR, Enes ESKİ</i>	

**Betonarme Yapı Elemanlarında Eğilme, Kesme ve  
Burulma Etkilerinin TS 500 ve TS En 1992-1-1  
Çerçevesinde Değerlendirilmesi .....143**

*Necim KAYA*

**Tablalı Betonarme Kirişlerde Gövde-Tabla Ara Yüz  
Kesmesinin Yapı Mekanîği Açısından  
Değerlendirilmesi.....161**

*Necim KAYA*

*"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."*

*"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."*

# ULAŞIM GEOTEKNİĞİNDE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN ALTYAPI DÜZEYİNDEKİ YANSIMALARI VE İZLEME, MODELLEME İLE ADAPTASYON STRATEJİLERİ

**Göknur BERBER NARİN<sup>1</sup>**

## 1. GİRİŞ

İklim değışikliği, ulaşım altyapısını yalnızca doğrudan çevresel etkilere maruz bırakmakla kalmayıp, yolları, demiryollarını, dolguları, geçiş bölgelerini ve ilgili toprak işlerini destekleyen geoteknik sistemleri giderek artan ölçüde dönüştürmektedir (Mndawe vd., 2015; Wang vd., 2020; Ng vd., 2024). Taşıyıcı zemin iklimsel açıdan istikrarsız hale geldiğinde, ortaya çıkan sonuçlar artık yalnızca altyapı altındaki malzeme davranışı ile sınırlı kalmamakta; ray geometrisindeki bozulmalar, kaplama yüzeyindeki hasarlar, istikrarsızlık, bakım maliyetlerinin artması ve uzun vadeli varlık performansındaki büyüyen belirsizlik gibi altyapı düzeyindeki yansımalara dönüşmektedir.

Güncel çalışmalar, bu altyapı düzeyindeki yansımaların mekânsal açıdan heterojen bir dağılım sergilediğini ve yerel zemin durumu, geometri, drenaj, maruziyet ve ısı-su rejimi tarafından güçlü biçimde koşullandırıldığını göstermektedir. Sert iklim değışkenlikleri karşısında mevcut ulaşım altyapısının yeterliliğini sorgulayan çalışmalar (Ng vd., 2024), altyapı altındaki su tablası değışimini ve uzun vadeli sızma bütçesini inceleyen araştırmalar (Kumar & Hayano, 2024) ile bölgesel

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi Ahmed-i Hani Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü, ORCID: 0000-0003-3168-4858.

ölçekte altyapı maliyetlerini değerlendiren çalışmalar (Suter vd., 2019) bu gerçeği açıkça ortaya koymaktadır. Sonuç olarak ulaşım geotekniği, performansın çevre, geomateryaller, izleme kanıtları, tahmin modellemesi ve mühendislik müdahalesinin gelişen bir bileşimi olarak ele alındığı daha geniş bir sistem perspektifine doğru yönelmektedir.

Bu arka plan doğrultusunda, mevcut bölüm altyapı düzeyindeki yansımalara ve izleme, modelleme ile adaptasyon stratejilerine odaklanmaktadır. Bölümün amacı, iklime duyarlı zemin davranışının nasıl koridor ölçeğinde bir varlık yönetimi sorununa dönüştüğünü ve literatürün bu sorunu giderek daha fazla entegre, dayanıklılık odaklı yaklaşımlar aracılığıyla nasıl ele aldığını sentezlemektir.

## **2. METHOD**

Bu bölüm, ulaşım altyapısının geoteknik performansına iklim değişikliğinin etkilerini inceleyen PRISMA tabanlı üst derlemeden türetilmektedir. Üst kanıt tabanı, iklimle ilgili, geoteknik ve ulaşım odaklı arama terimleri kullanılarak Web of Science ve Scopus kayıtlarından derlenmiştir. Derleme iş akışı 291 kayıt belirlemiş; tekrar içermeyen 244 kayıt elde edilmiş, tarama aşamasında 124 çalışma işaretlenmiş ve başlık normalleştirme ile tekrar doğrulama sonrasında 121 özgün teknik çalışma korunmuştur.

Mevcut bölüm, bağımsız olarak taranan yeni bir korpusu temsil etmemektedir. Bunun yerine, aynı kanıt matrisinin altyapı düzeyindeki sonuçlara ve dayanıklılık odaklı yanıt stratejilerine odaklanarak ikincil tematik bir yeniden gruplandırmasına dayanmaktadır. Çalışmalar, iklim etkenine, altyapı türüne, geoteknik soruna ve metodolojik katkıya göre özet düzeyinde kodlanmış; kodlama yapısı karşılıklı dışlayıcı olmayan biçimde kurgulanmıştır.

Yeniden gruplandırılmış kanıt tabanında 79 çalışma izleme veya uzaktan algılamayı, 64 çalışma modelleme veya tahmini ve 51 çalışma adaptasyon, stabilizasyon veya azaltımı ele almaktadır. Bu frekanslar, bölüm bölümlerini sistem düzeyindeki yansımalar, tanı yöntemleri, öngörü araçları ve değişen iklim koşullarında mühendislik müdahaleleri üzerine çerçevelemek için kullanılmıştır.

### **3. ALTYAPI DÜZEYİNDEKİ YANSIMALAR**

#### **3.1. Ray Geometrisi Bozulması ve Demiryolu Kullanılabilirliğinin Azalması**

İklim değişikliğinin demiryolu altyapısına en doğrudan ve ölçülebilir yansımalarından biri ray geometrisinin bozulmasıdır. Taşıyıcı zemin ısı veya su içeriği değişimleriyle deforme olmaya başladığında, bu etki ilk olarak ray doğrultusundaki eğimler, yatay hizalama hatası ve raylar arası genişlik değişimi biçiminde gözlemlenmektedir (Kaewunruen vd., 2018; Tang vd., 2024). Daimi donmuş zemin (permafrost) bölgelerinde gerçekleştirilen uzun vadeli izleme çalışmaları, zemin çökme hızının ve kalıcı deformasyonun küresel ısınma koşullarında dolgu yüksekliğine, buz açısından zengin permafrost tabakasının kalınlığına ve sahaya özgü ortalama yıllık zemin sıcaklığına bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini ortaya koymaktadır (Tang vd., 2024). Qinghai-Tibet Demiryolu boyunca yürütülen sayısal modelleme ve saha izleme çalışmaları bu bulguları doğrulamakta; permafrost tablasındaki yükselmenin ve buz içeriğinin yüksek olduğu tabakaların çözülmesinin birleşerek uzun vadeli sübidansa yol açtığını ve bu sürecin güzergâhın belirli kesimlerinde operasyonel güvenlik için kritik bir eşiğe yaklaşmaya başladığını göstermektedir (Wang vd., 2025; Jiang vd., 2024).

Donmuş olmayan ve mevsimsel olarak ıslak ortamlarda ise ray geometrisi bozulması farklı mekanizmalar aracılığıyla

gelişmektedir. Brezilya’da tropikal iklim koşullarında yürütülen sayısal analizler ve saha çalışmaları, zemin emme değişkenliğinin alt temel dayanıklı modülünü doğrudan etkilediğini ve bu etkinin ray geometrisi bozulmasına birincil katkı sağladığını ortaya koymuştur (Castro vd., 2021). Benzer bulgular, nem içeriği ve zemin emme değerinin mevsimsel yağış örüntülerine ve buharlaşmaya bağlı olarak düzenli dalgalanmalar sergilediği ağır yük taşıyan demiryolu zemin formasyonlarında da raporlanmıştır (Vandoorne vd., 2021). Dolayısıyla hem donmuş hem de donmamış ortamlarda ray geometrisi bozulması, yalnızca malzeme özellikleriyle değil; iklim sürücüsü, drenaj rejimi, yükleme geçmişi ve taşıyıcı zemin davranışı arasındaki bağlaşıklık ilişkisiyle açıklanmaktadır.

Uzun vadeli izleme çalışmaları aynı zamanda zemin çökme süreçlerinin mevsimsel olmaktan çıkıp kümülatif bir hal aldığını göstermektedir. Qinghai-Tibet Demiryolu’nun Beiluhe kesiminde gerçekleştirilen araştırmalar, tren kaynaklı titreşimlerin yüksek buz içerikli permafrost tabakaları üzerinde belirgin bir basınç etkisi yarattığını ve bu etkinin buzun erimesiyle birleşerek toplam çökmeyi kümülatif biçimde artırdığını kanıtlamıştır (Tang vd., 2024). Taş-kırma dolu yataklar gibi aktif soğutma sistemleri, bu bozulmayı yavaşlatabilmektedir; ancak söz konusu sistemlerin etkinliğinin mevcut ısınma koşulları altında giderek azaldığı bildirilmektedir (Jiang vd., 2024). Bu bulgu, hiçbir mühendislik önleminin süresiz geçerli olmadığını ve sistem performansının sürekli izlenmesi gereken dinamik bir süreç olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

### **3.2. Kaplama Yüzeyi Yanıtı, Yapısal Talep ve Yaşam Döngüsü Yükü**

Karayolu kaplamalarında iklim değişikliğinin etkisi, kaplama alt tabakasındaki zemin durumunun değişmesi aracılığıyla trafik yükleri ile çevresel kuvvetler arasındaki

dengeyi bozan dolaylı mekanizmalar üzerinden de işleyebilmektedir. Zemin dayanıklı modülünün azalması ya da nem içeriğinin artması, aynı trafik yükü altında kaplama katlarına iletilen gerilmeleri büyütür ve yorulma ve kalıcı deformasyon birikimini hızlandırmaktadır (Jibon vd., 2024; Mendoza-Sanchez vd., 2025). Deniz seviyesi yükselmesinden kaynaklanan yüzey altı su tablası yükselmesinin Kuzey Amerika'daki kıyı karayolu altyapıları üzerindeki etkisini modelleyen çalışmalar, kaplama servis ömründe önemli düzeyde kısalmalar öngörmektedir (Knott vd., 2017). Bu bağlamda alt temel tabakasının suya doyma oranı ve drenaj hızı, servis ömrünün en kritik belirleyicileri olarak öne çıkmaktadır.

Isı dalgalarının yaşandığı dönemlerde kaplama yüzeyindeki yüksek sıcaklıklar doğrusal sürekli beton kaplamalarda aksel kuvvetlerin birikmesine ve potansiyel burkulmaya zemin hazırlamaktadır. Sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen ayrıntılı analizler, kaplama kalınlığı, zemin yataklama katsayısı ve yüzey sürtünmesinin bu tür burkulmayı tetikleyecek kritik eşiği belirlemede belirleyici rol oynadığını göstermiştir (Yang & Bradford, 2017). Bu mekanizma, kaplama tasarımı açısından sıcaklık sınır koşullarını salt nem etkilerinin ötesine taşıyan ve daha da karmaşık bir sorun haline getiren bir boyutu temsil etmektedir. İklim projeksiyonları, ısı dalgası şiddetinin ve süresinin artacağını öngördüğünden, bu yapısal talep sorunu önümüzdeki yıllarda daha da belirginleşme eğilimindedir.

Yaşam döngüsü perspektifinden bakıldığında, iklim koşullarının kaplamalar üzerindeki birikmeli etkisi artan bakım talebi, erken yenileme gereksinimi ve işletim maliyetlerinde yükseliş biçiminde tezahür etmektedir. Seyrüsefer bozukluğunun yakıt tüketimine ve sera gazı salınımlarına katkısını araştıran kaplama-araç etkileşimi çalışmaları, kaplama yüzey kalitesiyle küresel ısınma potansiyeli arasında doğrudan bir bağ

kurulabileceğini vurgulamaktadır (Kim vd., 2019). Uzun vadeli kaplama izleme verileri kullanılarak yürütülen diğer analizler ise iklim bölgelerinin—özellikle yüksek yağış ve donma indeksi bileşenlerinin—pürüzlülük artışını ve beraberindeki çevresel maliyetleri nasıl farklılaştırdığını kanıtlamaktadır (Alam vd., 2020). Bu bulgular, kaplama tasarım ve bakım kararlarına iklim senaryolarının sistematik biçimde dahil edilmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

### **3.3. Değişen İklim Altında Dolgu, Şev ve Toprak İşi İstikrarsızlığı**

Toprak dolgular, şevler ve genel olarak toprak işleri altyapısı, doğrudan iklimsel maruziyet nedeniyle iklim değişikliğinin en savunmasız bileşenlerini oluşturmaktadır. Araştırmalar, aşırı yağış olaylarının, mevsimsel kuruma-ıslanma döngülerinin ve sıcaklık değişimlerinin şev stabilitesini, dolgu bütünlüğünü ve taşıyıcı zemin deformasyon örüntülerini farklı mekanizmalar üzerinden olumsuz etkilediğini göstermektedir (Stirling vd., 2017; Wu vd., 2024). Geoteknik santrifüj testleri ve yeni geliştirilen çevresel odalar aracılığıyla gerçekleştirilen deneyler, termik döngülerin dolgu deformasyonunu tetikleme biçimini, aşırı yağışın embankman eğimlerini istikrarsızlaştırma mekanizmalarını ve donma-çözülme döngülerinin şev bozunmasını nasıl hızlandırdığını nicel olarak ortaya koymuştur (Ng vd., 2024).

Demiryolu güzergâhlarında toprak işi hasar eğilimlerini kayıt altına alan uzun vadeli çalışmalar, dolgulardaki istikrarsızlığın büyük çoğunluğunun aşırı hava olaylarıyla değil; kümülatif su içeriği birikimi ve kil doldurma malzemelerinin boşluk suyu basıncı veya gözenek suyu basıncı tepkisiyle bağlantılı olduğunu ortaya koymuştur (Holt vd., 2025). Kil dolgulardan oluşan Britanya demiryolu şebekesinde gerçekleştirilen saha izlemeleri ve sayısal modellemeler, aşırı

ıslak kış mevsimlerinin gözenekli su basınçlarını kritik eşiğe yaklaştırdığını ve başarısızlık riskini artırdığını doğrulamaktadır (Briggs vd., 2013). Jeofizik yöntemlerin ve dört boyutlu elektrik öz direnç tomografisinin etkinliğini araştıran çalışmalar ise nem hareketinin izlenmesinde ve gizli hidratolojik yolların belirlenmesinde bu tekniklerin yüksek potansiyel taşıdığını kanıtlamıştır (Holmes vd., 2022).

Dağlık koşullar ve yüksek riskli güzergâhlar, toprak işi istikrarsızlığı açısından özellikle zorlu ortamlar oluşturmaktadır. Çöküntü ve taş düşmesi gibi jeolojik tehlikelerin giderek yaygınlaştığı Avusturya demiryolu ağında yürütülen istatistiksel değerlendirmeler, yüzeysel kaymalar ve beşeri kökenli dolgu başarısızlıklarının belirleyici kayıp mekanizmaları olduğunu ortaya koymuştur (Laimer, 2025). Hint ve Himalaya dağlık güzergâhlarında gerçekleştirilen kapsamlı incelemeler ise karayolu şevlerinde aşırı yağış kaynaklı kaymaların tehlike değerlendirmesinin iklim projeksiyonlarıyla nasıl entegre edilmesi gerektiğini tartışmaktadır (Dahiya vd., 2025). Söz konusu bulgular bir arada değerlendirildiğinde, değişen iklim altında dolgu ve şev istikrarsızlığının hem tasarım hem de işletim boyutlarında bütünlük bir risk yönetimi çerçevesini zorunlu kıldığını açıkça ortaya koymaktadır.

### **3.4. Malzeme Bozunumundan Sistem Düzeyinde Altyapı Riskine**

Bireysel geoteknik malzeme bozunumunun sistem düzeyinde altyapı riskine dönüşme süreci, genel olarak mekânsal heterojenlik ve güzergâh boyunca değişkenlik aracılığıyla işlemektedir. Tek bir güzergâh hattı boyunca farklı zemin tipleri, drenaj koşulları, maruziyet açıları ve yapı geometrileri bir arada bulunabilmekte; bu çeşitlilik, iklim etkilerinin farklı yerlerde farklı biçimlerde tezahür etmesine yol açmaktadır (Cui vd., 2024; Gao vd., 2022). Qinghai-Tibet Karayolu boyunca yürütülen

çalışmalar, benzer iklim koşulları altında bile zemin yüzeyi sıcaklığının ve su içeriğinin farklılaşabileceğini; bu durumun da deformasyon ve çökme örüntülerinde belirgin mekânsal farklılıklar yaratabileceğini göstermektedir (Cui vd., 2024).

Çoklu tehlike yaklaşımı, sistem düzeyindeki riski anlamak açısından giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Karayolu dolgularını nem girişi ve oyulmaya karşı kırılma işlevleri aracılığıyla analiz eden çalışmalar, iklim kaynaklı yüklenme senaryoları altında hasar olasılığının hesaplanabileceğini ortaya koymuş ve altyapı yöneticilerine ağ ölçekli savunmasızlık değerlendirmesi için pratik bir araç sunmuştur (McKenna vd., 2021). Benzer biçimde, permafrost bölgelerinde ulaşım altyapısı maliyetlerinin küresel projeksiyonları, yüksek ısınma senaryolarında pek çok ülkenin katlanacağı yaşam döngüsü değiştirme maliyetlerinin çarpıcı biçimde artacağını öngörmektedir (Suter vd., 2019).

Altyapı düzeyindeki riskin anlaşılması, geoteknik kanıt varlık yönetimi ve bakım önceliklendirme kararlarına bağlayan çerçevelerin geliştirilmesini de gerektirmektedir. Bu bağlamda yapısal olmayan varlıklar için kırılma analizi, varlık koşul değerlendirmesi ile artan iklim baskısı altında müdahale zamanlaması ve tekrar eden altyapı başarısızlığı örüntülerinden elde edilen dersler giderek artan bir ilgi görmektedir (Holt vd., 2024; McKenna vd., 2021). Bu bütünlük perspektif olmaksızın, bireysel geoteknik bozunum bulgularının sistem genelindeki risk değerlendirmesine dönüştürülmesi güçleşmekte; iklime dayanıklı ulaşım mühendisliği ise tutarlı ve etkin bir gerçeğe kavuşmamaktadır.

## **4. İZLEME, MODELLEME VE ADAPTASYON STRATEJİLERİ**

### **4.1. Uzaktan Algılama, Saha Enstrümantasyonu ve Jeofiziksel İzleme**

İklim değişikliğine bağlı geoteknik bozunumun tespitinde ve karakterizasyonunda izleme teknolojileri kritik bir işlev üstlenmektedir. İnSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) tabanlı yüzey deformasyon ölçümü, özellikle Qinghai-Tibet Demiryolu boyunca permafrost bölgelerinde, yüzeyin milimetrik ölçekte hareket haritalarını zaman serileri halinde üretmesiyle sahada yaygın kullanım alanı bulmuştur (Huo vd., 2025). Sentinel-1A ve TerraSAR-X görüntüleri gibi yüksek çözünürlüklü radar verileriyle bütünleştirilen bu teknikler; mevsimsel deformasyon örüntülerini, gölge-güneşli yamaç etkilerini ve bölgesel ölçekte iklim etkenlerinin zemin hareketine katkısını ayırt edebilmektedir (Wang vd., 2017). Uzaktan algılama ile iklim ve çevre değişkenlerini birleştiren makine öğrenmesi modelleri ise artık kısa vadeli deformasyon tahminleri ve erken uyarı sistemlerine entegre edilmektedir (Huo vd., 2025).

Saha enstrümantasyonu ise zemin sıcaklığı, nem içeriği, emme değeri ve gözenekli su basıncının sürekli kaydedilmesini sağlayarak uzaktan algılamanın erişemediği ayrıntıyı sunmaktadır. Demiryolu yataklarındaki nem ve emme değişimini mevsimsel ölçekte izleyen gerilimölçer ve kapasitans sensörü tabanlı araştırmalar, zemin emme değerinin yük taşıma kapasitesini yağışlı ve kurak dönemler arasında belirgin biçimde farklılaştırdığını ortaya koymuştur (Vandoorne vd., 2021). Yüksek çözünürlüklü izleme verilerinin yüzey deformasyon ölçümleriyle entegre edildiği ağ düzeyinde çalışmalar, mevcut izleme altyapısının geniş güzergâhlardaki çeşitli zemin koşullarını kapsamaktan uzak kaldığını gözler önüne sermektedir (Wang vd., 2025; You vd., 2025).

Jeofiziksel yöntemler, özellikle Elektrik Öz direnç Tomografisi (ERT) ve Sismik Yöntemler, temas gerektirmeyen geniş alan araştırmaları için giderek daha fazla başvurulan araçlar haline gelmektedir. Zamana bağlı ERT izlemesi (4B ERT), demiryolu kesimlerinde bitki örtüsünün nem dağılımı üzerindeki etkisini ve bunun sonucunda ortaya çıkan büzülme-şişme davranışını başarıyla karakterize etmiştir (Holmes vd., 2022). Benzer yaklaşımlar kıyı şevlerinin ve yüksek zemine sahip dağlık güzergâhların taranmasında da uygulanmış; özellikle kaplama altındaki permafrost dinamiklerini izlemede ERT'nin konvansiyonel zemin sıcaklığı izlemesine güçlü bir tamamlayıcı olduğu kanıtlanmıştır (Klyuev & Brigida, 2025). Sismik yöntemler açısından ise aktif tabaka karakterizasyonu kapsamında geliştirilen enstrümanlı dinamik konik penetrasyon deneyi (IDCP), soğuk bölgelerdeki altyapılarda mevcut güzergâh boyunca hızlı saha ölçümlerine imkân tanımaktadır (Byun vd., 2014).

#### **4.2. Eşleşik Sayısal Modelleme ve Öngörücü Performans Değerlendirmesi**

Eşleşik ısı-hidrolik-mekanik (THM) modelleme yaklaşımları, iklim sürücüsünü zemin durumu değişiklikleri ve altyapı deformasyonu ile sistematik biçimde ilişkilendirmek açısından ulaşım geotekniğinde standart araç konumuna gelmiştir. Permafrost dolgularında THM modelleme ile yürütülen sayısal çalışmalar, dolgu yüksekliğinin, buz içeriğinin ve yüzey maruziyetinin çözülme oturmasını birbirinden bağımsız olarak kontrol ettiğini doğrulamıştır (Tang vd., 2024; Tang vd., 2021). Ancak tek değişkenli sensitivite analizleri; buz açısından zengin permafrost, mevsimsel termik döngü ve tren kaynaklı yüklemenin bağlaşıklık olarak işlediği gerçek saha koşullarını yansıtmaktan çoğunlukla uzak kalmaktadır.

Doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine dayanan modelleme yaklaşımları, saha izleme verileriyle birleştirildiğinde demiryolu altyapısının iklim etkilerine yanıtını başarıyla nitelendirebilmektedir. Tropikal iklim koşullarında doygun olmayan zeminlere dayalı sayısal analizler gerçekleştiren çalışmalar, zemin emme değerinin dayanıklı modülü belirlemedeki baskın rolünü ve bunun güzergâh geometri bozulmasına nasıl yansıdığını ortaya koymuştur (Castro vd., 2021). İklim verisi girdili pavement altyapısı modellemesi ise nemli bölge yollarında zemin sıcaklık ve su içeriğinin birlikte değiştiği dönemlerde, geleneksel tasarım değerlerine kıyasla çok daha geniş bir dayanıklı modül aralığıyla karşılaştığını göstermektedir (Jibon vd., 2024). Bu bulgular, yapay zekâ ve makine öğrenmesiyle desteklenen tahmin modellerinin izleme verileriyle beslenerek gerçek zamanlı koşul değerlendirmesine entegre edilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Öte yandan, iklim ısınma senaryoları altında gelecek altyapı performansını öngörmeye yönelik modeller giderek daha fazla kabul görmektedir. Qinghai-Tibet Demiryolu boyunca farklı RCP senaryolarını (düşük: RCP2.6, yüksek: RCP8.5) değerlendiren termal rejim simülasyonları; yüksek ısınma senaryosunda dolgu taban dışında permafrostsuz koşullara 2030'lardan itibaren geçileceğini ve bu durumun mevsimsel çözülme, oturma ve uzun vadeli kullanılabilirlik kayıplarını birbirini izleyen aşamalar halinde tetikleyeceğini öngörmüştür (Chen vd., 2023). Permafrost tablasını tahmin etmek amacıyla iklim ve zemin sıcaklığı verilerini bütünleştiren makine öğrenmesi modelleri ise standart regresyon yöntemlerine kıyasla belirgin bir doğruluk artışı sağlamaktadır (Zhang vd., 2025).

### **4.3. Isıl, Hidrolik, Yapısal ve Malzeme Tabanlı Adaptasyon Önlemleri**

İklim değişikliğine yönelik adaptasyon stratejileri, soğuk ve sıcak bölgelerdeki değişken tehdit koşullarına uyum sağlamak amacıyla kapsamlı bir önlem yelpazesini kapsamaktadır. Kırıcı taş yataklı ve termosifon donanımlı embankmanlar gibi termik kontrol sistemleri, Qinghai-Tibet güzergâhında permafrost sıcaklığını düşürmek için onlarca yıldır uygulanmakta ve uzun vadeli saha izleme verileriyle etkinlikleri kanıtlanmış bulunmaktadır (Cheng vd., 2009; Tang vd., 2021). Öte yandan, demir-dışbükey termosifon (TPCT) performansının iklim ısınmasına bağlı olarak zayıfladığının raporlanması; mevcut önlemlerin, değişen iklim koşullarına uyum sağlayan dinamik ve uyarlanabilir bir tasarım anlayışıyla yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır (Hou vd., 2022).

Drenaj iyileştirme ve su yönetimi, iklime duyarlı güzergâhlarda en yüksek uygulanabilirlik potansiyeline sahip adaptasyon kategorilerini oluşturmaktadır. Güzergâh boyunca su birikintisi alanlarının belirlenmesini ve bu durumun zemin hastalıklarıyla ilişkilendirilmesini inceleyen çalışmalar; tıkalı veya yetersiz tasarlanmış drenaj sistemlerinin, özellikle sıcaklık yükselmesiyle birlikte permafrost bölgelerinde altyapı tabanı / subgrade bozunumunu nasıl hızlandırdığını açıkça ortaya koymaktadır (Cui vd., 2024). Deniz seviyesinin yükselmesinin yüzeyaltı su tablasını etkilediği kıyı karayollarına ilişkin çalışmalar ise zemin türü ve kaplama yapısına bağlı kırılma sınıflandırmalarının adaptasyon planlamasını verimli biçimde yönlendireceğini vurgulamaktadır (Knott vd., 2017).

Malzeme tabanlı adaptasyon yaklaşımları arasında zemin stabilizasyonu, yüksek performanslı doldurma malzemeleri ve iklim dayanımına yönelik kaplamalar değerlendirilebilir. Kireç ile stabilize edilmiş laterit zeminlerin mevsimsel ıslanma-kuruma

döngüleri altındaki dayanıklılık performansını araştıran çalışmalar, kısa vadeli mukavemet kazanımının uzun vadeli iklim maruziyetinde korunması için en uygun bağlayıcı içeriğinin belirlenmesinin kritik önem taşıdığını göstermektedir (Razali vd., 2023). Genişleme özelliğindeki kil alttemellerinde kaplama mevsimsel nem dalgalanmasının baskın deformasyon etkeni olduğu durumlarda, tasarım parametrelerine iklim ayarlı zemin emme modellerinin dahil edilmesi kaplama hizmet ömrünü uzatmaktadır (Jibon vd., 2024). Bu bulgular, malzeme seçimi ve zemin iyileştirme kararlarının, saha koşullarına ve iklim yoluna özgü, kapsamlı yaşam döngüsü performansı değerlendirmesi temelinde alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

#### **4.4. Kapalı Döngü Dayanıklılık: İzleme, Modelleme ve Müdahaleyi Birbirine Bağlamak**

Geoteknik kanıtı, öngörü modelleme ve mühendislik müdahalesini tek bir entegre çerçevede birleştirme hedefi, iklim dayanıklılığı alanındaki en kritik metodolojik geçiş olarak karşımıza çıkmaktadır. Geleneksel yaklaşım; bağımsız varlık incelemesi, statik tasarım kontrolü ve reaktif bakım gibi birbirinden kopuk aşamalar olarak tasarlanmıştır. Buna karşın yeni nesil çalışmalar, saha ölçümlerinin modeli sürekli güncelleyen bir girdi işlevi gördüğü, model çıktılarının ise risk yorumunu ve müdahale zamanlamasını yönlendirdiği dinamik geri besleme döngüleri önermektedir (Armstrong vd., 2024; You vd., 2025).

Uzaktan algılamayı çevresel değişkenlerle ve zemin sıcaklığı geri bildiriyle bütünleştiren sistemler bu vizyona en çok yaklaşan örnekleri temsil etmektedir. Permafrost çökmesinin mevsimsel örüntülerini uzaktan izleyerek uyarı eşikleri ve müdahale tetikçileri üretmek için uydu platformlarını saha sensörleriyle birleştiren hibrit sistemler geliştirilmiş ve pratikte test edilmiştir (Huo vd., 2025; Holmes vd., 2022). Ancak bu tür

sistemlerin bütünleşik karar desteğine dönüştürülmesi; bakım önceliklendirme, bütçe döngüsü ve kurumsal kararlar açısından hâlâ zorlu bir süreç olmaya devam etmekte ve kapalı döngünün bu son halkası güzergâh yönetiminde en kırılgan nokta olmayı sürdürmektedir.

Stratejik geoteknik varlık yönetimi perspektifinden bakıldığında, büyük ölçekli altyapı sahipleri ağ genelinde risk profili oluşturmaya ve müdahale zamanlamasını optimize etmeye yönelik çerçeveler geliştirmektedir. Bu çerçeveler çoğunlukla zemin parametrelerindeki belirsizliği istatistiksel yöntemlerle ele alarak olasılıksal başarısızlık değerlendirmeleri üretmekte ve önleyici tedbirlerin geç müdahaleye kıyasla ekonomik avantajını hesaba katmaktadır (Armstrong vd., 2024). İklim değişkenliğinin bu çerçevelere entegrasyonu, zamana bağlı zemin durumu evrimi ve buna bağlı performans bozunumunu hesaba katacak biçimde risk yönetimini temelden yeniden yapılandırmayı gerektirmektedir. Bu dönüşüm, izleme, modelleme ve adaptasyonun ayrı disiplinler olarak değil; birbirini sürekli besleyen bir döngü olarak kurgulandığı ulaşım geotekniğinin çekirdeğini oluşturmaktadır.

## **5. ARAŞTIRMA BOŞLUKLARI VE GELECEK YÖNELİMLER**

### **5.1. Sınırlı Uzun Vadeli Saha Doğrulaması**

İzleme, modelleme ve adaptasyon alanlarında kaydedilen belirgin ilerlemeye karşın, mevcut literatürdeki en kritik eksiklik çoklu iklim döngüsünü kapsayan uzun vadeli saha doğrulama verilerinin yetersizliğidir. Mevcut çalışmaların büyük bölümü, birkaç yıllık gözlem pencerelerinden elde edilen kısa izleme serilerine ya da yalnızca birkaç iklim senaryosunu inceleyen vaka çalışmalarına dayanmaktadır (You vd., 2025; Chen vd., 2023). Geoteknik performansın farklı iklim gerçekleştirmelerine nasıl

tepki verdiğini kavrayabilmek için, oturma ve deformasyon eğilimlerini birbirini izleyen ısınma aşamalarına göre inceleyen, on yılı aşan çok dönemli izleme serilerine ihtiyaç duyulmaktadır (Tang vd., 2024).

Bu eksiklik, hem tahmin modellerini hem de adaptasyon değerlendirmelerini doğrudan etkilemektedir. Modelleme çalışmalarında, kısa süreli ölçüm verilerine dayalı kalibrasyon süreçleri; bağlaşıklık süreçlerin farklı iklim yollarında nasıl evrildiğini gereği gibi yansıtmayabilmektedir. Benzer biçimde, adaptasyon önlemlerinin başlangıçta umut verici sonuçlar vermesi, bu önlemlerin uzun vadeli ısınma trendleri altında da etkinliğini sürdürdüğüne dair güvence sağlamamaktadır (Hou vd., 2022). Termosifon çalışmalarından elde edilen bulgular ve diğer proaktif soğutma sistemlerinin analizleri; bu sistemlerin, koşulların kötüleştiği tam da en çok ihtiyaç duyulduğu dönemde etkinlik yitirebileceğini ortaya koymaktadır. Bu gerçek, araştırma tasarımı açısından köklü bir paradigma dönüşümünü zorunlu kılmaktadır: performansın yeni iklim koşullarına yanıtı statik bir özellik olarak değil, dinamik ve sürekli evrimleşen bir süreç olarak ele alınmalıdır.

Uzun vadeli saha doğrulamasının sistematik biçimde sağlanabilmesi; birden fazla iklim bölgesini kapsayan performans izleme ağlarının kurulmasını, geoteknik parametrelerin ve altyapı koşullunun sürekli kayıt altına alındığı referans güzergâhların belirlenmesini ve mevcut veri silolarının bütünlük analize olanak verecek şekilde açılmasını gerektirmektedir. Böyle bir altyapı olmaksızın, hem iklime duyarlı tasarım standartlarının hem de güzergâh düzeyinde uyum kararlarının güçlü bir kanıt temeline oturtulması mümkün olmayacaktır.

## **5.2. Adaptasyon Önlemlerinin İklimler ve Varlık Tipleri Arasında Transferliliği**

İkinci önemli araştırma boşluğu, başarılı adaptasyon önlemlerinin farklı iklim bölgeleri ve altyapı türleri arasındaki aktarılabilirliğine ilişkin yetersiz anlayıştır. Kanıt tabanının önemli bir kısmı, permafrost güzergâhlarına —özellikle Qinghai-Tibet Platosuna— özgü araştırmalardan oluşmakta; bu durum ise elde edilen bulguların mevcut ısınma trendlerine paralel biçimde kuruma başlayan eski donmuş zemin güzergâhlarına, mevsimsel donma-çözülme bölgelerindeki yüksek hız demiryollarına veya kaplama temelli sistemlere ne ölçüde uyarlanabileceğini belirsiz kılmaktadır.

Farklı iklim bağlamlarında zemin iyileştirme yöntemlerinin karşılaştırmalı performansı da henüz yeterince anlaşılmamıştır. Kireç stabilizasyonunu ıslanma-kuruma döngüleri altında değerlendiren çalışmalar; başarının, kil mineralojisi ve iklim tipine göre belirgin farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuştur (Razali vd., 2023). Benzer şekilde, donma-çözülme direnci için tasarlanmış granüler malzemeler tropikal veya yarı kurak bağlamlarda farklı bir davranış sergileyebilmektedir. Transferlilik sorunu, raporlama örüntülerinde de kendini göstermektedir: akademik literatür, düşük hacimli karayollarına, toprak doldurma sistemlerine ve tropikal ya da yarı kurak güzergâhlara kıyasla pahalı koridor sistemlerinde uygulanan yüksek teknoloji çözümleri orantısız biçimde ön plana çıkarmaktadır.

Bu boşluğun kapatılması, adaptasyon önlemlerinin uygulanabilirlik koşullarını —zemin tipi, iklim kuşağı, su içeriği rejimi, trafik yükleme sınıfı ve bakım kapasitesi gibi faktörler açısından— sistematik biçimde belgelemeyi gerektirmektedir. Altyapı tipleri ve iklim bölgeleri genelinde transferlilik koşullarını açıkça tanımlayan sentez çalışmaları, uygulayıcılara

bağlam temelli seçim kriterlerinden yoksun genel yönergelerin çok ötesine geçen, pratik ve kanıta dayalı bir yol haritası sunabilecektir.

### **5.3. Altyapı Yönetiminde Karar Odaklı Çerçeveslere Duyulan İhtiyaç**

Son olarak, iklim değişikliğinin geoteknik sonuçlarını somut altyapı yönetimi kararlarıyla ilişkilendiren karar odaklı çerçevelerin geliştirilmesi hâlâ yeterince olgunlaşmamış bir araştırma alanı olmayı sürdürmektedir. Mevcut araştırma üretimi, malzeme karakterizasyonuna, tehlike tanımlamasına ve performans modellemesine yoğunlaşmaktadır; ancak bu bilginin müdahale zamanlaması, bakım önceliklendirmesi, yatırım kararları ve dayanıklılık tasarımı açısından uygulanabilir çıktılara nasıl dönüştürüleceği büyük ölçüde belirsiz kalmaktadır (Armstrong vd., 2024).

Geoteknik varlık bozunumunun hem başarısızlık riskini hem de erken müdahalenin ekonomik cazibesini değerlendirerek optimal müdahale zamanlamasını belirleme yönündeki yaklaşımlar umut verici olmakla birlikte, bunların iklim kaynaklı değişkenlikle birleştirilmesi hâlâ gelişim aşamasındadır (Armstrong vd., 2024). Kalıcı deformasyonun ya da servis ömrü kaybının hangi eşiğin aşımıyla tetikleneceğini belirleyen sınır durum değerlendirmeleri ile karar destek sistemleri, güzergâh ölçeğinde iklim kırılganlığı değerlendirmelerinden yararlanan uygulayıcılara büyük kolaylık sağlayabilecektir.

Uygulamaya hazır çerçevelerin geliştirilmesi; sahadan elde edilen geoteknik verilerin iklim projeksiyonları ve varlık koşul değerlendirmeleriyle sentezlenmesini, performans bozunum modellerinin bakım karar döngülerine entegre edilmesini ve geoteknik bilginin karar alıcıların anlayabileceği ve harekete geçebileceği risk puanları ya da kırılganlık sınıflandırmalarına dönüştürülmesini zorunlu kılmaktadır. Bu

entegrasyon, iklime dayanıklı ulaşım altyapısının yalnızca teknik bir başarı olmakla kalmayıp, yönetsel açıdan da sürdürülebilir bir hedef haline gelmesinin önkoşuludur.

## **6. SONUÇLAR**

Bu bölüm, 121 özgün teknik çalışmadan oluşan PRISMA taranmış üst korpusun tematik yeniden gruplandırması aracılığıyla altyapı düzeyindeki yansımaları ve dayanıklılık odaklı yanıt stratejilerini sentezlemiştir. Gözden geçirilen kanıtlar, iklime duyarlı geoteknik bozunumun salt bir zemin altı malzeme sorunu olmadığını açıkça ortaya koymaktadır: taşıyıcı zemin çevresel açıdan istikrarsız hale geldiğinde, ortaya çıkan etkiler doğrudan kullanılabilirliğe, güvenliğe, bakım yüküne ve yaşam döngüsü altyapı performansına yansımaktadır.

Literatürün işaret ettiği en sık tekrarlayan altyapı sonuçları şunlardır: demiryolu koridorlarında ray geometrisinin bozulması, karayolu sistemlerinde artan kaplama tepkisi ve yapısal talep, dolgu ve şevlerde istikrarsızlaşma ile değişen iklim maruziyeti altında proaktif bakımın zorunlu hale gelmesi. Bu sonuçlar yüksek düzeyde sahasına özgü bir karakter taşımakta ve aynı güzergâh boyunca bile önemli heterojenlik sergilemektedir; bu durum, geleneksel sabit tasarım varsayımlarının uzun vadeli varlık yönetimi için giderek yetersiz kaldığını ortaya koymaktadır.

İkinci önemli sonuç metodolojik niteliktedir. Alan, tümleşik izleme, modelleme ve adaptasyon çerçevelerine doğru açık bir yönelim sergilemektedir. Uzaktan algılama, saha enstrümantasyonu, jeofiziksel tanı, ısı-su-mekanik yorumlama ve eşleşik öngörü modelleme, operasyonel kriz noktasına ulaşmadan önce bozunumu tespit etmek ve yorumlamak amacıyla giderek daha sık bir arada kullanılmaktadır. Isıl kontrol sistemleri, drenaj iyileştirme, yapısal optimizasyon ve malzeme

tabanlı stabilizasyon gibi adaptasyon önlemleri umut verici sonuçlar vermektedir; ancak etkinlikleri yerel geometriye, bakım koşuluna, maruziyet düzeyine ve iklim yoluna güçlü biçimde bağımlı kalmaya devam etmektedir.

Bu bulgular bir arada değerlendirildiğinde, iklime dayanıklı ulaşım geotekniğinin kapalı döngülü karar çerçevelerine doğru ilerlemesi gerektiği ortaya çıkmaktadır: gözlem modelleri güncellemeli, modeller risk yorumunu yönlendirmeli ve müdahaleler gelişen saha kanıtına göre zamanlanmalıdır. Araştırmanın önümüzdeki aşaması, uzun süreli izlemeyi güçlendirmeli, model transferliliğini iyileştirmeli ve geoteknik kanıtı bakım önceliklendirmesi ile altyapı yönetimi kararlarına daha açık ve doğrudan biçimde bağlamalıdır

## **KAYNAKÇA**

- Alam, M. R., Hossain, K., & Bazan, C. (2020). A systematic approach to estimate global warming potential from pavement vehicle interaction using Canadian Long-Term Pavement Performance data. *Journal of Cleaner Production*, 273, 123106. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123106>.
- Armstrong, J., Helm, P., Preston, J., & Loveridge, F. (2024). Economics of geotechnical asset deterioration, maintenance and renewal. *Transportation Geotechnics*, 45, 101185. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101185>.
- Briggs, K. M., Smethurst, J. A., Powrie, W., & O'Brien, A. S. (2013). Wet winter pore pressures in railway embankments. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 166(5), 451–465. <https://doi.org/10.1680/geng.11.00106>.
- Byun, Y.-H., Yoon, H.-K., Kim, Y. S., Hong, S. S., & Lee, J.-S. (2014). Active layer characterization by instrumented dynamic cone penetrometer in Ny-Alesund, Svalbard. *Cold Regions Science and Technology*, 104–105, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.04.003>.
- Castro, G., Pires, J., Motta, R., Bernucci, L., Marinho, F., & Merheb, A. (2021). Unsaturated numerical analysis of a railroad track substructure considering climate data. *Transportation Geotechnics*, 31, 100662. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100662>.
- Chen, R., von Deimling, T. S., Boike, J., Wu, Q., & Langer, M. (2023). Simulating the thermal regime of a railway embankment structure on the Tibetan Plateau under climate change. *Cold Regions Science and Technology*,

212, 103881.  
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103881>.

- Cheng, G., Wu, Q., & Ma, W. (2009). Innovative designs of permafrost roadbed for the Qinghai-Tibet Railway. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 52(2), 530–538. <https://doi.org/10.1007/s11431-008-0291-6>
- Cui, F. Q., Zhu, Y., Liu, X. N., Chen, J. B., Mu, K., & Liu, Z. Y. (2024). Characteristics and influence rules of roadside ponding along the Qinghai-Tibet Highway. *Water*, 16(7), 954. <https://doi.org/10.3390/w16070954>
- Dahiya, N., Pandit, K., Sarkar, S., & Pain, A. (2025). Various aspects of rockfall hazards along the mountain roads in India: A systematic review. *Indian Geotechnical Journal*, 55, 2007–2029. <https://doi.org/10.1007/s40098-024-01015-3>
- Gao, Y., Chai, M., Ma, W., Li, Y., Chen, W., & Mu, Y. (2022). Variation of water bodies along highways in the Qinghai-Tibet Plateau over the past 20 years: A case study of G109 and G219. *Journal of Water and Climate Change*, 13(10), 3515–3531. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.141>
- Holmes, J., Chambers, J., Wilkinson, P., Dashwood, B., Gunn, D., Cimpoiaşu, M., Uhlemann, S., Kuras, O., Abbott, J., Boyd, J., Williamson, P., Meldrum, P., Kirkham, M., Huntley, D., Ash, J., Whiteley, J., Morton, R., & Donohue, S. (2022). 4D electrical resistivity tomography for assessing the influence of vegetation and subsurface moisture on railway cutting condition. *Engineering Geology*, 307, 106790. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106790>.
- Holt, S. J., Griffiths, I. W., Fielder, S., Garelick, J., Milne, C., O'Rourke, R., Savill, F., & Payne, I. (2025). Railway

embankment failure trends and monitoring: Lessons learned from the Anglia route. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering*, 178(1), 64–77. <https://doi.org/10.1680/jcien.24.00947>

Hou, Y. D., Wu, Q. B., Zhang, M. L., & Zhou, F. X. (2022). Thermal and deformational repairing effect of crushed rock revetment acting as reinforcement along Qinghai-Tibet railway in permafrost regions. *Advances in Climate Change Research*, 13(3), 421–431. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2022.03.001>

Huo, T., He, Y., Liu, Y., Yang, W., Zhang, L., Chen, H., Fang, Y., Gao, B., & Zhang, X. (2025). InSAR-based surface deformation analysis and trend prediction in permafrost areas along the Qinghai-Tibet Railway using Sentinel-1A and environmental factors. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 18, 9297–9320. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2025.3554388>

Jiang, G. L., Fu, Z. T., Men, X. Y., Zhao, H. T., Gao, S. R., Liu, Y. Z., & Wu, Q. B. (2024). Climate warming is likely to weaken the performance of two-phase closed thermosyphon on the Qinghai-Tibet Plateau. *Advances in Climate Change Research*, 15(1), 90–100. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2024.01.001>

Jibon, M., Sourav, M. A. A., Mahedi, M., Kim, S., Ceylan, H., & Velasquez, R. (2024). Heavy rainfall and moisture susceptibility of pavement foundation: A case study coupling finite element method and MnROAD moisture monitoring data. *Transportation Geotechnics*, 48, 101312. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101312>

Kaewunruen, S., Lopes, L. M. C., & Papaalias, M. P. (2018). Georisks in railway systems under climate uncertainties

by different types of sleeper/crosstie materials. *Lowland Technology International*, 20(1), 77–86.

- Kim, R. E., Kang, S., Spencer, B. F., Al-Qadi, I. L., & Ozer, H. (2019). Impact of pavement roughness and deflection on fuel consumption using energy dissipation. *Journal of Engineering Mechanics*, 145(8), 04019059. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001653](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001653)
- Klyuev, R. V., & Brigida, V. S. (2025). Improving monitoring of landslide processes on mountain slopes in the presence of transport infrastructure. *Geology and Geophysics of Russian South*, 15(3), 66–78. <https://doi.org/10.46698/VNC.2025.39.32.001>
- Knott, J. F., Elshaer, M., Daniel, J. S., Jacobs, J. M., & Kirshen, P. (2017). Assessing the effects of rising groundwater from sea level rise on the service life of pavements in coastal road infrastructure. *Transportation Research Record*, 2639(1), 1–10. <https://doi.org/10.3141/2639-01>
- Kumar, M., & Hayano, K. (2024). Variation of the groundwater table within Indian railway embankments in consideration of climate change. *Sustainability*, 16(14), 6143. <https://doi.org/10.3390/su16146143>
- Laimer, H. J. (2025). From mass movements to mitigation measures: A statistical evaluation of landslides in the Austrian Federal Railway Network. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 118(1), 281–299. <https://doi.org/10.17738/ajes.2025.0016>
- McKenna, G., Argyroudis, S. A., Winter, M. G., & Mitoulis, S. A. (2021). Multiple hazard fragility analysis for granular highway embankments: Moisture ingress and scour. *Transportation Geotechnics*, 26, 100431. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100431>

- Mendoza-Sanchez, J. F., Alonso-Guzman, E. M., Martinez-Molina, W., Chavez-Garcia, H. L., Soto-Espitia, R., Delgado-Alamilla, H., & Adame-Valenzuela, E. (2025). Development of a practical tool to consider climate and climate change in subgrade resilient modulus for road pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s42947-025-00529-0>
- Mndawe, M. B., Ndambuki, J. M., Kupolati, W. K., Badejo, A. A., & Dunbar, R. (2015). Assessment of the effects of climate change on the performance of pavement subgrade. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, 7(2), 111–115. <https://doi.org/10.1080/20421338.2015.1023649>
- Ng, C. W. W., Wang, Y., Zhang, S., & Zhang, Q. (2024). Effects of climate change on soil embankments for transport infrastructure. *Transportation Geotechnics*, 48, 101324. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101324>
- Razali, R., Rashid, A. S. A., Lat, D. C., Horpibulsuk, S., Roshan, M. J., Rahman, N. S. A., & Rizal, N. H. A. (2023). Shear strength and durability against wetting and drying cycles of lime-stabilised laterite soil as subgrade. *Physics and Chemistry of the Earth*, 132, 103479. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103479>
- Stirling, R. A., Glendinning, S., & Davie, C. T. (2017). Modelling the deterioration of the near surface caused by drying induced cracking. *Applied Clay Science*, 146, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.06.003>
- Suter, L., Streletskiy, D., & Shiklomanov, N. (2019). Assessment of the cost of climate change impacts on critical infrastructure in the circumpolar Arctic. *Polar Geography*,

42(4), 267–286.

<https://doi.org/10.1080/1088937X.2019.1686082>

- Tang, C.-X., Zhu, Z.-Y., Luo, F., He, Z.-H., Zou, Z.-Y., & Guo, Z.-H. (2021). Deformation behaviour and influence mechanism of thaw consolidation of embankments on the Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions. *Transportation Geotechnics*, 29, 100574. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100574>
- Tang, C.-X., Zhu, Z.-Y., Ma, Y., Yao, Z., Tan, Q.-T., Liu, Z.-Y., Xu, J., & Zheng, S.-C. (2024). Numerical simulation for vibration-induced settlement and permanent deformation accumulation in permafrost subgrades of the Qinghai-Tibet Railway. *Computers and Geotechnics*, 167, 106047. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.106047>
- Vandoorne, R., Gräbe, P. J., & Heymann, G. (2021). Soil suction and temperature measurements in a heavy haul railway formation. *Transportation Geotechnics*, 31, 100675. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100675>
- Wang, C., Zhang, Z., Zhang, H., Wu, Q., Zhang, B., & Tang, Y. (2017). Seasonal deformation features on Qinghai-Tibet railway observed using time-series InSAR technique with high-resolution TerraSAR-X images. *Remote Sensing Letters*, 8(1), 1–10. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2016.1225170>
- Wang, Q., Wen, Z., Zhou, Z., Gao, Q., Hao, X., & Chen, L. (2025). Study on the mechanism of subgrade deformation of the Qinghai-Tibet railway in permafrost regions based on multisource data. *Transportation Geotechnics*, 55, 101678. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2025.101678>
- Wang, S. J., Niu, F. J., Chen, J. B., & Dong, Y. H. (2020). Permafrost research in China related to express highway

construction. *Permafrost and Periglacial Processes*, 31(3), 406–416. <https://doi.org/10.1002/ppp.2053>

Wu, X., Lin, Z., Niu, F., Shang, Y., & Fan, X. (2024). Cumulative frost heave and hydrothermal process of the high-speed railway subgrade under extreme climate conditions in northwest China. *Transportation Geotechnics*, 48, 101297. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101297>

Yang, G., & Bradford, M. A. (2017). A refined modelling for thermal-induced upheaval buckling of continuously reinforced concrete pavements. *Engineering Structures*, 150, 256–270. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.06.005>

You, Y. H., Wang, X., Dong, J., Zhang, D., Zhang, Z., Chen, K., Guo, L., Wang, C., & Yu, Q. H. (2025). Investigation of the permafrost beneath the subgrade of Qinghai-Tibet railway using electrical resistivity tomography. *Engineering Geology*, 358, 108413. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.108413>

Zhang, Y. Z., Liang, S. J., Chen, J. B., Wang, M., Jia, M. T., & Jiang, Y. T. (2025). Enhancing artificial permafrost table predictions using integrated climate and ground temperature data: A case study from the Qinghai-Xizang highway. *Cold Regions Science and Technology*, 229, 104341. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2024.104341>

# **PROGRESSIVE COLLAPSE IN INTERNATIONAL CODES: A COMPARATIVE ASSESSMENT OF DIRECT AND INDIRECT REGULATORY APPROACHES**

**Saffet KILIÇER<sup>1</sup>**

## **1. INTRODUCTION**

Progressive collapse can be defined as the propagation of an initial local and limited damage in a structure through chain-like load redistribution mechanisms within the structural system. Therefore, progressive collapse is not merely a problem of individual member resistance. Rather, it is a multi-parameter structural safety problem in which continuity, primary load paths, ductility, structural integrity, and alternative load path capacity must be evaluated together. The literature emphasizes that terms such as “progressive collapse”, “disproportionate collapse”, “robustness”, “integrity”, and “redundancy” are not always used with identical meanings; therefore, terminological clarity itself constitutes a distinct area of discussion. Recent studies and review papers show that this conceptual complexity and uncertainty are not limited to the theoretical level, but also directly affect design approaches, analysis methods, and acceptance criteria.

When the historical development of academic studies and the growing interest in progressive collapse are examined, it is seen that this subject has largely gained momentum following major structural damage cases, collapse incidents, and the

---

<sup>1</sup> Asst. Prof., Artvin Çoruh University, Faculty of Engineering, ORCID: 0000-0002-5445-0352.

political consequences associated with such failures. After the Ronan Point collapse, the concepts of structural integrity and disproportionate collapse became more prominent in the United Kingdom. Subsequently, following the Oklahoma City bombing and the September 11 attacks, more systematic guidelines and analysis methods were developed, particularly in the United States. Indeed, in the United Kingdom, Approved Document A (2013), which is currently in force, directly addresses “Disproportionate Collapse” as a performance requirement. It clearly states that a building should not collapse to a disproportionate extent in the event of an accident. In the United States, GSA guidelines and DoD documents define the issue not merely as a general safety principle, but as a design problem that must be verified through specific scenarios.

Terrorist attacks and unexpected loading conditions have led design approaches to develop over time along two main axes. The first is the indirect design approach, which includes preventive measures such as tie forces, structural integrity, key elements, and structural robustness. The second is the direct design approach, which is based on explicit analysis procedures such as member removal scenarios, alternative load path analysis, and linear or nonlinear static and dynamic assessments. These approaches are more extensively addressed in United States guidelines. One of the most influential early documents published by NIST, Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings, explains the acceptable risk approach through threat definition, event control, and structural resistance components. Li et al. criticized the simplifications of the tie force method in existing codes, particularly because of the use of large coefficients, and proposed an improved and revised tie force method. In parallel, the GSA guidelines provide a detailed framework for the alternative load path approach. Eurocode 1-7, on the other hand, presents a robustness-based

framework through the limitation of local damage under accidental actions, key element design, ductility, and alternative load paths.

Numerical studies show that progressive collapse is not merely a matter of verbal or conceptual definitions, but also a research topic closely related to both material behavior and structural system mechanisms. Studies have particularly focused on reinforced concrete frames, beam–slab systems, flat slab–column systems, and steel frames. Following column loss, the load-resisting behavior of structural systems may evolve from flexural action to catenary action, while slab systems may develop membrane action. The review of reinforced concrete systems by Yagob et al. (2009) and the experimental review study by Alshaikh et al. (2020) indicate that joint regions, slab contribution, and shear failure are decisive factors in column-loss scenarios. Some studies also show that punching shear and post-punching behavior, particularly in flat slab–column systems, play a critical role in resistance against progressive collapse.

A significant portion of existing studies focuses either on the behavior of specific structural systems under particular scenarios or on the accuracy of specific analysis procedures. However, only a limited number of studies have examined the extent to which international codes explicitly address progressive collapse, the countries in which the terms “progressive collapse” or “disproportionate collapse” are used directly, and the countries in which the issue is regulated mainly through concepts such as “accidental actions”, “robustness”, “structural integrity”, “tying systems”, or “key elements”. For example, in the United Kingdom, the issue is still explicitly regulated under the heading of “disproportionate collapse”, whereas Eurocode 1-7 addresses it through the limitation of local damage and a structural robustness-based approach. In the United States, the ASCE/SEI 76-23 standard has been published, and the 2026 version of UFC

3-301-01 has adopted this standard, thereby expressing the concept of “disproportionate collapse mitigation” in a more explicit manner. This situation indicates that international comparisons should consider not only the question of whether a provision exists, but also how explicit that provision is, which terminology is used, and through which design tools it is made applicable.

When the existing literature is examined, it is seen that several key studies provide important knowledge on progressive collapse. One of these, NISTIR 7396, presents a general assessment of progressive collapse in terms of the acceptable risk approach, indirect and direct design methods, and provisions in different national standards. In the European context, the report *Guidance on the Design for Structural Robustness*, published by the JRC, addresses the concept of robustness from both conceptual and technical perspectives and provides a basis for developing a more harmonized approach in Europe by examining existing guideline and code provisions. Similarly, Abdelwahed (2019) presents a review study that discusses the causes, analysis methods, and design approaches related to progressive collapse in buildings by synthesizing the existing literature. Ellingwood et al. (2007) provided a comprehensive framework for reducing the potential for progressive collapse in structures, including threat identification, structural continuity, alternative load paths, local resistance, and detailing principles. Nair (2006) emphasized that disproportionate collapse should be understood as a failure in which the resulting damage is excessive and chain-like in relation to the initial cause, highlighting the role of structural continuity and tie strength in preventing such collapses. Kiakojourı et al. (2020) comprehensively evaluated analytical, experimental, and numerical approaches to progressive collapse in framed structural systems, together with collapse mechanisms, triggering events, and robustness enhancement techniques, thereby identifying

future research needs. Elkady et al. (2024) presented a comprehensive review of the historical development of progressive collapse research, current analysis and design approaches, and emerging future research needs. Byfield et al. (2014) evaluated progressive collapse research together with regulatory developments and summarized its historical evolution, key events, research trends, and principal code-based approaches. Ellingwood (2006) is a fundamental study that addresses the probabilistic assessment of progressive collapse risk triggered by abnormal loads and the incorporation of risk mitigation strategies into design practice and standards. Starossek and Haberland (2010) systematically defined the terminology used in the field of disproportionate collapse and established a conceptual framework among key terms such as robustness, vulnerability, and continuity, proposing a performance-based prevention approach in this context. Kılıçer (2025) examined the progressive collapse behavior of a reinforced concrete structure using the enhanced local resistance (ELR) method and presented a comparative assessment of UFC 4-023-03 and the Turkish Building Earthquake Code 2018. In another study, Kılıçer (2025) investigated the effects of weapon systems on structural damage and progressive collapse through the case of Belgorod Oblast and presented important findings in terms of structural safety. Kılıçer and Özgan (2026) evaluated the risk of progressive collapse in reinforced concrete structures by considering soil–structure interaction. In the study, the Winkler model was used to analyze the effect of soil behavior on the structural system response, and the role of soil flexibility in the progressive collapse mechanism was demonstrated. Kılıçer and Temuçin Kılıçer (2026) assessed the robustness of existing reinforced concrete buildings against progressive collapse in different provinces and geographical regions using the tie-force method, providing a comparative evaluation in terms of structural robustness. Bitá et al. (2019), on the other hand, examined how practitioners use existing codes

and guidelines at the global scale based on survey data, particularly revealing practice trends in the United States, Canada, Europe, and Australia/New Zealand. However, none of these studies provides a systematic country-based comparison of the codes of approximately twenty-seven countries in terms of “progressive collapse definition”, “main terminology used”, “direct or indirect regulatory approach”, and “regulatory explicitness”. Therefore, building on these studies, this chapter aims to fill this gap within a specific framework that focuses on a broad set of country examples, the distinction between direct and indirect regulatory approaches, definition and terminology comparison, and regulatory explicitness. In this respect, the study extends the general background provided by existing reviews and reports to a more comprehensive and comparative level of code analysis. Thus, it makes the position of progressive collapse in international regulations more visible, classifiable, and discussable.

## **2. METHODOLOGY**

In this study, the sections of the codes of twenty-seven selected countries that either most closely express the concept of progressive collapse or directly present it as a conceptual issue or an analysis method were examined. Care was taken to include countries from almost every continent. The codes considered for the twenty-seven countries, listed alphabetically, are as follows: CIRSOC 101-25 (Argentina), Code of the Republic of Belarus on Architectural, Town-Planning and Construction Activities (Belarus), ABNT NBR 8681 (Brazil), National Building Code of Canada 2020 (Canada), NCh433.Of1996 Mod.2012 (Chile), Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (Colombia), Egyptian Code for Calculation of Loads and Forces in Structural and Building Works (Egypt), EN 1991-1-7:

Eurocode 1 (EU countries), Ghana Building Code (Ghana), Code of Practice for Structural Use of Concrete 2013 and Code of Practice for Structural Use of Steel 2011 (Hong Kong), National Building Code of India 2016 (India), Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (Iran), Building Standards Act (Japan), National Building Code 2024 (Kenya), New Zealand Building Code, Clause B1: Structure (New Zealand), National Building Code (Nigeria), Ministry of Housing, Construction and Sanitation regulations (Peru), Qatar Construction Specifications (Qatar), SP 385.1325800.2018 (Russia), Saudi Code for Structural Design Loads, Seismic, and Wind (Saudi Arabia), Building Control Acts (Singapore), SANS 10160-1 (South Africa), KDS 41 12 00 (South Korea), Turkish Building Earthquake Code (Türkiye), Dubai Building Code (UAE), Approved Document A: Structure (United Kingdom), and ASCE/SEI 76-23, UFC 4-023-03, and UFC 3-301-01 (United States). The selected countries include both developed and developing countries, and an effort was made to include regulatory examples from different geographical regions and continents. Thus, codes and regulatory approaches from different parts of the world were examined. The analysis focused on the sections of these codes that include direct references to progressive collapse or to related sub-concepts. Where more than one code existed for the same country, the code most closely related to structural collapse, structural safety, or progressive collapse-related concepts was selected. The extent to which progressive collapse is explicitly addressed and the main terminology used in each code were then evaluated. Although it is already known that countries approach progressive collapse in different ways, a comparison of this scope has not been previously presented in the literature. Most existing studies focus on specific structural systems, analysis methods, United States-, United Kingdom-, or European Union-based guidelines, or limited country examples. The originality of this study lies in its

comparative evaluation of how progressive collapse is defined in international codes, which concepts are used to represent it, and which design tools are associated with it across a broad country sample. The data obtained in this study are presented in Table 1 in terms of explicitness level and main terminology. Countries classified as High include analysis methods for progressive collapse, through which the resistance of a structure against progressive collapse can be assessed. The Moderate-High level refers to cases in which explicit progressive collapse terminology is accompanied by more clearly defined design tools such as structural integrity, key elements, alternative load paths, or similar provisions. The Moderate category includes countries in which the term progressive collapse is used directly or where strong indirect expressions are present. The Low-Moderate level refers to countries where the term progressive collapse is not used directly, but where the issue is indirectly addressed through concepts such as continuity, structural integrity, load path, or robustness. The Low level refers to countries where the term progressive collapse is not used directly and where the issue is either addressed only through weak indirect expressions or not addressed at all.

### **3. CONCLUSION**

When the relevant codes of twenty-seven different countries are examined, it is observed that each country either approaches progressive collapse indirectly through different terminology or addresses concepts that are closely related to progressive collapse, even if no specific analysis method is provided. The main terminology and explicitness level related to progressive collapse for each country are presented in Table 1.

**Table 1. Regulatory Explicitness and Main Terminology Related to Progressive Collapse in International Codes**

No	Country	Explicitness	Main T.*
1	Argentina	Low-Moderate	AA/SS
2	Belarus	Low-Moderate	CS/SR
3	Brazil	Low-Moderate	EA/SS
4	Canada	Low-Moderate	SI/R/GS
5	Chile	Low	SS
6	Colombia	Low-Moderate	SS/RR
7	Egypt	Low-Moderate	EL/SS
8	EU**	Moderate	AA/R/SI/TP
9	Ghana	Low	SI/GS
10	Hong Kong	Moderate-High	SI/PC/KE
11	India	Moderate	PC/R/I
12	Iran	Low-Moderate	SS/C
13	Japan	Low-Moderate	SS/R
14	Kenya	Low-Moderate	SI
15	New Zealand	Low-Moderate	LP/R
16	Nigeria	Low	BS/SE
17	Peru	Low	SS
18	Qatar	Low-Moderate	SI/AL
19	Russia	High	PC
20	Saudi Arabia	Low-Moderate	SS/AL
21	Singapore	Moderate	AA/R/TP
22	South Africa	Low-Moderate	SI/R
23	South Korea	Low-Moderate	SS/R
24	Türkiye	Low-Moderate	AL/SI
25	UAE	Moderate	SR/AL
26	UK	High	DC
27	US	High	DCM/PC

\*AA: *Accidental Actions*, AL: *Accidental Loading*, BS: *Building Safety*, C: *Continuity*, CS: *Construction Safety*, DC: *Disproportionate Collapse*, DCM: *Disproportionate collapse mitigation*, EA: *Exceptional Actions*, EL: *Exceptional Loads*, GS: *General Safety*, I: *Integrity*, KE: *Key Elements*, LP: *Load Path*, PC: *Progressive Collapse*, R: *Robustness*, RR: *Resistance Requirements*, SE: *Structural Efficiency*, SI: *Structural integrity*, SR: *Structural Robustness*, SS: *Structural Safety*, TP: *Tie Provisions*.

\*\* The row “EU countries” refers to countries such as Germany, France, Italy, Spain, Portugal, the Netherlands, Belgium, Sweden, Denmark, Finland, Austria, Poland, the Czech Republic, Slovakia, Slovenia, Estonia, Latvia, Lithuania, Romania, Croatia, and Greece,

This comparative framework demonstrates that progressive collapse differs significantly among countries not only as a structural analysis problem, but also in terms of code language, performance expectations, and design verification approaches. For Argentina, although CIRSOC 101-25 does not directly address progressive collapse as a concept or as an analysis method, it refers to load paths, continuity, events that may lead to accidental actions, and structural safety. In Belarus, the regulatory approach is generally based on construction safety and structural safety, and no specific analysis method related to progressive collapse is proposed. According to the accessible sources, the Brazilian code refers to exceptional actions, considers catastrophic effects, and emphasizes structural safety. However, it does not provide a direct concept for progressive collapse; rather, it addresses structural safety under exceptional actions. In Canada, although the concept of progressive collapse is mentioned, its scope remains at the level of structural safety and is not regulated as an independent and detailed progressive collapse standard. Therefore, the terms structural integrity, robustness, and general safety used for Canada in the table reflect concepts such as structural integrity, local damage, alternative load paths, and tie elements. Since the codes of Chile and Egypt generally focus on seismic activity, the concept of progressive collapse is not further detailed, and structural safety remains the primary concern. Colombia also emphasizes a general safety approach. For European Union countries, although progressive collapse is not directly addressed in Eurocode 1 and its annexes, key elements, ties, robustness, and accidental actions are included. These concepts indirectly represent progressive collapse through a multi-component framework; however, no specific design analysis methods are provided. According to official and semi-official information, the Ghana Building Code mainly includes uniform building standards and minimum requirements, while limited information is available regarding

progressive collapse. In the Hong Kong codes, terms such as structural integrity, key elements, and progressive collapse appear in a manner similar to Eurocode. The Indian code includes special loads and accidental loads, and also refers to the concept of progressive collapse. In Iran, construction provisions are generally based on resistance to lateral loads and connections between structural elements. Since these provisions partially reflect progressive collapse-related considerations, Iran is classified as Low-Moderate in the table. In Japan, rather than directly addressing progressive collapse, the codes strongly regulate structural safety, particularly through stringent requirements for the seismic behavior of high-rise buildings. In Kenya, buildings are required to be designed to resist various hazards such as earthquakes, floods, and fire. Although the issue is not explicitly addressed in New Zealand, the code is essentially based on general performance and structural safety principles. Nigeria addresses general building safety. In Peru, general load provisions, seismic design, and structural safety are more prominent than progressive collapse. Qatar also appears to focus on structural safety within the framework of general building rules. Unlike many other countries, Russian codes directly refer to progressive collapse. They state that buildings should satisfy structural safety and stability requirements and that certain important building groups should be resistant to progressive collapse. In Saudi Arabia, when evaluated together with the general code framework, the regulations provide provisions on structural reliability and the loads to be considered in structural design; however, no direct expression related to progressive collapse is found. In Singapore, there are indirect definitions and expressions close to concepts such as accidental actions and local collapse. In South Africa, although there are no explicit progressive collapse provisions, general loads, limit states, and reliability-based structural safety are addressed. In South Korea, as in several other countries, structural safety and robustness are

emphasized, but progressive collapse is not treated as a primary regulatory issue. In Türkiye, similar to many developing countries, the code addresses seismic behavior, structural loads, and structural integrity; however, no direct provision related to progressive collapse is included. In the United Arab Emirates, there are definitions close to disproportionate collapse, as well as provisions related to progressive collapse design methods. In the United Kingdom, progressive collapse is addressed through subtopics such as tying provisions and column removal. In the United States, unlike most other countries, the codes and guidelines include design methods and almost all major subtopics related to progressive collapse. The percentage distribution of explicitness levels among the examined countries is presented in Table 2.

**Table 2. Distribution of Progressive Collapse Explicitness Levels by Country**

Explicitness Level	Number of the countries	Percentage %
Low	4	14.81
Low-Moderate	15	55.56
Moderate	4	14.81
Moderate-High	1	3.70
High	3	11.12

Among the examined countries, 55.56% are classified at the Low-Moderate explicitness level. This indicates that a considerable proportion of the countries fall within this intermediate-low range and that progressive collapse is not yet addressed through sufficiently explicit and detailed regulatory provisions in many national codes. Only three countries are classified at the High level, suggesting that detailed progressive collapse design models and analysis-based provisions are mainly developed in a limited number of countries. The Low and Moderate levels each account for 14.81%, indicating that these categories remain relatively limited within the overall distribution.

The countries examined within the scope of this study were reclassified by continent in order to reveal regional tendencies in the regulatory explicitness levels related to progressive collapse. In this context, the distribution of explicitness levels by continent is presented in Table 3.

**Table 3. Continental Comparison of Progressive Collapse Explicitness in International Codes\***

Continent	L	LM	M	MH	H	Tendency
Africa	2	3	0	0	0	Mostly indirect and weakly developed provisions
Asia	0	6	3	1	0	Mostly indirect, but with several moderate or stronger examples
Europe	0	1	1	0	2	Comparatively stronger
N. America	0	1	0	0	1	Mixed. One indirect and one highly explicit framework
S. America	2	3	0	0	0	Mostly indirect and low to moderate provisions
Oceania	0	1	0	0	0	Indirect performance based approach
Total	4	15	4	1	3	

\*The explicitness levels Low, Low-Moderate, Moderate, Moderate-High, and High are abbreviated in the table as L, LM, M, MH, and H, respectively.

The predominance of the Low-Moderate level among the examined continents indicates that progressive collapse is generally not addressed through direct analysis procedures. Instead, it is mostly treated indirectly through definitions and related concepts such as structural integrity, robustness, accidental actions, continuity, or general structural safety. The fact that Africa and South America are mainly represented by Low and Low-Moderate levels shows that provisions related to progressive collapse remain relatively limited in these regions. Asia presents a more heterogeneous pattern, including Low-Moderate, Moderate, and Moderate-High levels. Europe shows a stronger regulatory tendency due to the presence of High-level examples. North America, represented by one Low-Moderate and

one High-level regulatory framework, exhibits a mixed structure. Since Oceania is represented only by New Zealand, the assessment for this continent should be considered limited.

Overall, these findings indicate that many national codes require a more comprehensive regulatory model for progressive collapse, one that integrates common terminology, minimum robustness requirements, and both direct and indirect design approaches. Expanding the number of countries examined may provide a broader basis for evaluating global regulatory tendencies. However, based on the current findings, it can be anticipated that an enlarged country sample would likely increase the dominance of the Low and Low-Moderate explicitness levels.

## REFERENCES

- Abdelwahed, B. (2019). A review on building progressive collapse, survey and discussion. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00264. doi:10.1016/j.cscm.2019.e00264
- ABNT NBR 8681: Actions and Safety of Structures-Procedure - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2025). *ABNT NBR 8681: Actions and safety of structures-Procedure*.
- Alshaikh, I. M. H., Abu Bakar, B. H., Alwesabi, E. A. H., & Akil, H. M. (2020). Experimental investigation of the progressive collapse of reinforced concrete structures: An overview. *Structures*, 25, 881–900. doi:10.1016/j.istruc.2020.03.018
- André, J., Anghileri, M., Belletti, B., Biondini, F., Caspeepe, R., Demonceau, J., Izzuddin, B., Martinelli, P., Molkens, T., O'Connor, A., Parisi, F., Sio, J., Sousa, M. L., & Thienpont, T. (2024). *Guidance on the design for structural robustness* (JRC138689; EUR 32018 EN). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/525706>
- Approved Document A: Structure-HM Government. (2013). *Approved Document A: Structure*.
- ASCE/SEI 76-23: Standard for Mitigation of Disproportionate Collapse Potential in Buildings and Other Structures-American Society of Civil Engineers. (2023). *ASCE/SEI 76-23: Standard for mitigation of disproportionate collapse potential in buildings and other structures*. doi:10.1061/9780784415931
- Bitá, H. M., Huber, J. A. J., Voulpiotis, K., & Tannert, T. (2019). Survey of contemporary practices for disproportionate

- collapse prevention. *Engineering Structures*, 199, 109578. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109578>
- Building Control Act, Approved Document-Building and Construction Authority. (2009). *Approved Document*.
- Building Standards Act-Japan. (1950). *Building Standards Act*.
- Byfield, M., Mudalige, W., Morison, C., & Stoddart, E. (2014). A review of progressive collapse research and regulations. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings*, 167(8), 447–456. doi:10.1680/stbu.12.00023
- CIRSOC 101-25 (2025). *CIRSOC 101-25: Reglamento argentino de cargas permanentes y sobrecargas mínimas de diseño para edificios y otras estructuras*
- Code of Practice for Structural Use of Concrete 2013 (2020)- Buildings Department. (2020). *Code of Practice for Structural Use of Concrete 2013 (2020 Edition)*.
- Code of Practice for Structural Use of Steel 2011 (2023) - Buildings Department. (2023). *Code of Practice for Structural Use of Steel 2011 (2023 Edition)*.
- Code of the Republic of Belarus on Architectural, Town-Planning and Construction Activities-Republic of Belarus. (2023). *Code of the Republic of Belarus on architectural, town-planning and construction activities*.
- Dubai Building Code-Dubai Development Authority. (2021). *Dubai Building Code*
- Egyptian Code for Calculation of Loads and Forces in Structural and Building Works (ECP 201)- Housing and Building National Research Center. (2012). *Egyptian code for calculation of loads and forces in structural and building works (ECP 201)*.

- Ellingwood, B. R. (2006). Mitigating risk from abnormal loads and progressive collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 20(4), 315–323. doi:10.1061/(ASCE)0887-3828(2006)20:4(315)
- Ellingwood, B. R., Smilowitz, R., Dusenberry, D. O., Duthinh, D., Lew, H. S., & Carino, N. J. (2007). *Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings* (NISTIR 7396). National Institute of Standards and Technology. doi:10.6028/NIST.IR.7396
- Elkady, N., Augusthus Nelson, L., Weekes, L., Makoond, N., & Buitrago, M. (2024). Progressive collapse: Past, present, future and beyond. *Structures*, 62, 106131. doi:10.1016/j.istruc.2024.106131
- EN 1991-1-7: Eurocode 1-Actions on Structures-Part 1-7: General Actions-Accidental Actions-European Committee for Standardization. (2006). *EN 1991-1-7: Eurocode 1-Actions on structures-Part 1-7: General actions-Accidental actions*.
- Ghana Building Code (GS 1207:2018)-Ghana Standards Authority. (2018). *Ghana Building Code (GS 1207:2018)*.
- GSA, General Services Administration. (2016). *Alternate path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance*. U.S. General Services Administration.
- Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings Permanent Committee for Revising the Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings. (2007). *Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings*.
- KDS 41 12 00: Building Design Loads-Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2022). *KDS 41 12 00: Building design loads*.

- Kılıçer, S. (2025). *Progressive collapse analysis of a reinforced concrete structure using the enhanced local resistance (ELR) method: A comparison of UFC 4-023-03 and the Turkish Earthquake Code (TEC 2018)*. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 11(2), 513–525. <https://doi.org/10.21324/dacd.1656403>
- Kılıçer, S., & Can, Y. (2025). *Effect of natural disasters on progressive collapse in steel structures: Cold-formed steel example*. *Cihannüma Journal of Technology, Engineering and Natural Sciences Academy*, 3(2), 68–91. <https://doi.org/10.55205/joctensa.3220241807092>
- Kılıçer, S., & Özgan, K. (2026). Evaluation of progressive collapse risk in reinforced concrete structures considering soil–structure interaction via the Winkler model. *Structural Engineering International*. <https://doi.org/10.1080/10168664.2025.2586842>
- Kılıçer, S., & Temuçin Kılıçer, S. (2026). *Progressive-collapse robustness assessment of existing reinforced concrete buildings in diverse geographical regions using the tie-force method*. *Buildings*, 16(5), 1090. <https://doi.org/10.3390/buildings16051090>
- Kiakojourı, F., De Biagi, V., Chiaia, B., & Sheidaii, M. R. (2020). Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects. *Engineering Structures*, 206, 110061. [doi:10.1016/j.engstruct.2019.110061](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110061)
- Li, Y., Lu, X., Guan, H., & Ye, L. (2011). An improved tie force method for progressive collapse resistance design of reinforced concrete frame structures. *Engineering Structures*, 33(10), 2931–2942. [doi:10.1016/j.engstruct.2011.06.017](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.06.017)

- Ministry of Housing, Construction and Sanitation. (2006). *National building regulations: Standard E.020 loads*.
- Nair, R. S. (2006). Preventing disproportionate collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 20(4), 309–314. doi:10.1061/(ASCE)0887-3828(2006)20:4(309)
- National Building Code-Federal Republic of Nigeria. (2006). *National Building Code*.
- National Building Code of Canada 2020- Canadian Commission on Building and Fire Codes. (2020). *National Building Code of Canada 2020*. National Research Council of Canada.
- National Building Code of India 2016 — Bureau of Indian Standards. (2016). *National Building Code of India 2016*.
- National Building Code 2024-National Construction Authority. (2024). *National Building Code 2024*.
- NCh433.Of1996 Mod.2012: Diseño Sísmico de Edificios-Instituto Nacional de Normalización. (2012). *NCh433.Of1996 Mod.2012: Diseño sísmico de edificios*
- New Zealand Building Code, Clause B1: Structure-Ministry of Business, Innovation and Employment. (n.d.). *New Zealand Building Code, Clause B1: Structure*.
- Qatar Construction Specifications 2014 (QCS 2014)-Public Works Authority. (2014). *Qatar Construction Specifications 2014 (QCS 2014)*.
- Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) — Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10)*.
- SANS 10160-1: Basis of Structural Design and Actions for Buildings and Industrial Structures-Part 1: Basis of

Structural Design- South African Bureau of Standards. (2011). *SANS 10160-1: Basis of structural design and actions for buildings and industrial structures-Part 1: Basis of structural design.*

Saudi Code for Structural Design Loads, Seismic, and Wind (SBC 301)-Saudi Building Code National Committee. (2024). *Saudi Code for Structural Design Loads, Seismic, and Wind (SBC 301).*

SP 385.1325800.2018: Protection of Buildings and Structures against Progressive Collapse. Design Rules. Basic Provisions-Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation. (2018). *SP 385.1325800.2018: Protection of buildings and structures against progressive collapse. Design rules. Basic provisions.*

Starossek, U., & Haberland, M. (2010). Disproportionate collapse: Terminology and procedures. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 24(6), 519–528. doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000138

Turkish Building Earthquake Code (2018)-Disaster and Emergency Management Presidency, Ministry of Interior of the Republic of Türkiye. (2018). *Turkish Building Earthquake Code.*

UFC 3-301-01: Structural Engineering-U.S. Department of Defense. (2026). *UFC 3-301-01: Structural engineering (Change 5)*

*UFC 4-023-03: Design of buildings to resist progressive collapse (Change 4).* (2024, June 10). U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, & Air Force Civil Engineer Support Agency

Yagob, O., Galal, K., & Naumoski, N. (2009). Progressive collapse of reinforced concrete structures. *Structural Engineering and Mechanics*, 32(6), 771–786. doi:10.12989/sem.2009.32.6.771

# **BARAJ TİPİNİN SEÇİMİ<sup>1</sup>**

**Sadettin TOPÇU<sup>2</sup>**

## **A. BARAJ TİPLERİN SINIFLANDIRILMASI**

### **4.1. Genel**

Barajlar, sınıflandırma amacına bağlı olarak farklı kategoriler altında ele alınabilir. Bu el kitabında, barajların üç temel sınıflandırma kapsamında incelenmesi uygun görülmektedir: kullanım amacına göre, hidrolik tasarımına göre ve yapımında kullanılan malzemeye göre sınıflandırma.

### **4.2. Kullanım Amacına Göre Sınıflandırma**

Barajlar, hizmet edecekleri temel işleve göre depolama barajları, derivasyon barajları ve taşkın kontrol barajları olarak sınıflandırılabilir. Bu ana sınıflandırmalar, barajın üstleneceği özel işlevler dikkate alınarak daha ayrıntılı biçimde de ele alınabilir.

Depolama barajları, suyun bol olduğu dönemlerde suyu biriktirmek ve su arzının yetersiz kaldığı dönemlerde kullanmak amacıyla inşa edilir. Bu dönemler mevsimsel, yıllık ya da daha uzun süreli olabilir. Örneğin, birçok küçük baraj kurak yaz aylarında kullanılmak üzere ilkbahar aylarındaki akışları depolar.

Depolama barajları, içme ve kullanma suyu temini, rekreasyon, balıkçılık ve yaban hayatı, hidroelektrik enerji

---

<sup>1</sup> Bu bölüm, United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation tarafından yayımlanan Design of Small Dams adlı eserin “Chapter 4: Selection of Type of Dam” başlıklı bölümünden Türkçeye çevrilmiştir. Çeviride özgün metnin teknik anlamı ve mühendislik terminolojisi korunmaya çalışılmıştır.

<sup>2</sup> Doç. Dr. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, İnşaat Bölümü  
ORCID: 0000-0003-1306-2502.

üretimi ve sulama gibi farklı kullanım amaçlarına göre ayrıca sınıflandırılabilir. Bir depolama barajının hizmet edeceği özel amaç ya da amaçlar, çoğu zaman yapının tasarımını doğrudan etkiler. Beklenen rezervuar seviye değişimleri veya izin verilebilir rezervuar sızıntısı gibi tasarım ölçütleri de bu amaçlara bağlı olarak belirlenebilir. Şekil 4-1’de küçük bir toprak dolgu depolama barajı, Şekil 4-2’de ise hem derivasyon hem de depolama amacıyla kullanılan bir beton ağırlık yapısı gösterilmektedir.

Derivasyon barajları, genellikle suyu hendeklere, kanallara veya diğer iletim sistemlerine yönlendirmek için gerekli su seviyesini ve hidrolik yükü sağlamak amacıyla inşa edilir. Bu barajlar, sulama projelerinde, akarsu suyunun akış hâlindeki bir dereден kanal dışındaki bir depolama rezervuarına aktarılmasında, belediye ve sanayi kullanımlarında veya bu amaçların birlikte yer aldığı projelerde kullanılabilir. Şekil 4-3’te tipik bir küçük derivasyon barajı gösterilmektedir.

Taşkın kontrol barajları, taşkın akışını geciktirmek ve ani taşkınların etkisini azaltmak amacıyla inşa edilir. Bu barajlar genel olarak iki ana tipe ayrılır. Birinci tipte su geçici olarak depolanır ve mansaptaki kanalın taşıma kapasitesini aşmayacak bir debiyle, bir çıkış yapısı aracılığıyla kontrollü biçimde bırakılır. İkinci tipte ise su mümkün olduğunca uzun süre tutulur ve geçirgen kıyılara ya da temele sızmasına izin verilir.

İkinci tip taşkın kontrol barajlarının temel amacı yeraltı suyu beslenmesini artırmak olduğundan, bu yapılar kimi zaman yeraltı suyu besleme barajı veya yeraltı suyu besleme seddesi olarak da adlandırılır. Bazı taşkın tutma barajları ise sediment tutmak amacıyla inşa edilir; bu tür yapılar genellikle rusubat tutucu barajlar olarak adlandırılır.

Küçük projelerde büyük ölçekli projelere göre daha az yaygın olmakla birlikte, barajlar çoğu zaman birden fazla amaca

hizmet edecek şekilde tasarlanır. Birden çok amacın söz konusu olduğu durumlarda, rezervuar hacmi genellikle her bir kullanım amacı için ayrı ayrı tahsis edilir. Yaygın bir çok amaçlı proje tipi, depolama, taşkın kontrolü ve rekreasyon işlevlerini bir arada bulundurur.

### **4.3. Hidrolik Tasarıma Göre Sınıflandırma**

Barajlar, hidrolik tasarım bakımından iki ana gruba ayrılabilir: üzerinden akım geçmesine izin verilen barajlar ve üzerinden akım geçmesi öngörülmemeyen barajlar.

Üzerinden akım geçmesine izin verilen barajlar, suyun kret üzerinden veya kret boyunca yer alan dolusavaklar aracılığıyla geçirilmesine olanak verecek şekilde tasarlanır. Bu tip barajlarda en yaygın kullanılan yapı malzemesi betondur.

Üzerinden akım geçmesi öngörülmemeyen barajlar ise suyun kret kotunu aşmayacağı kabulüyle tasarlanır. Bu yaklaşım, baraj yapımında kullanılacak malzeme seçeneklerini genişletir ve toprak dolgu ile kaya dolgu barajların da uygulanmasına imkân verir.

Birçok projede bu iki tasarım yaklaşımı birlikte kullanılarak kompozit baraj yapıları oluşturulur. Örneğin, üzerinden akım geçmesine izin verilen bir beton ağırlık barajı ile toprak dolgu sedde bölümleri aynı yapı içinde birlikte yer alabilir. Şekil 4-4, Bureau of Reclamation, yani Amerika Birleşik Devletleri İslah Bürosu tarafından inşa edilmiş bu tür bir kompozit yapıyı göstermektedir.

### **4.4. Malzemeye Göre Sınıflandırma**

Tasarım yöntemlerinin ele alınmasında en yaygın kullanılan sınıflandırma, barajın yapımında kullanılan malzemeye dayanır. Bu sınıflandırma aynı zamanda temel tasarım tipini de ifade eder. Örneğin “beton ağırlık barajı” veya “beton kemer barajı” gibi adlandırmalar bu kapsamdadır.

Bu metnin kapsamı, günümüzde en yaygın olarak inşa edilen baraj tipleriyle; yani toprak dolgu, kaya dolgu ve beton ağırlık barajlarıyla sınırlıdır. Beton kemer, beton payandalı ve ahşap barajlar gibi diğer baraj tiplerine ise, tasarımlarının neden bu metinde ayrıntılı olarak ele alınmadığı açıklanarak kısaca değinilmektedir.



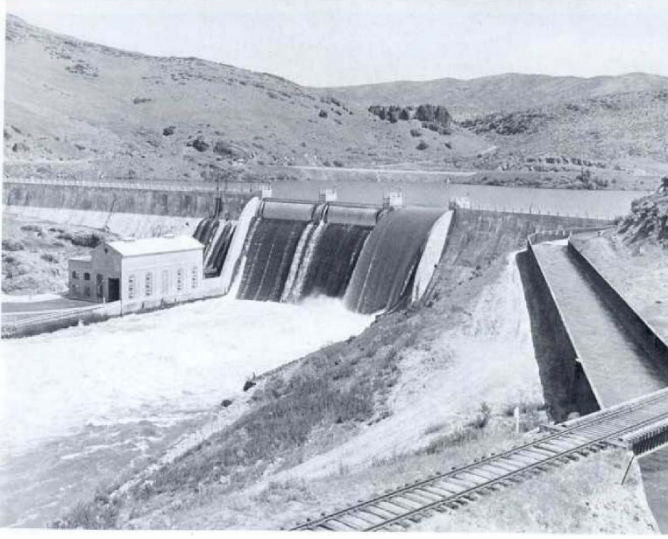
**Şekil 4-1. Oregon’da Crescent Creek üzerinde yer alan ve küçük bir toprak dolgu depolama barajı olan Crescent Lake Barajı.**

#### **4.5. Toprak Dolgu Barajlar**

Toprak dolgu barajlar en yaygın baraj tipidir. Bunun başlıca nedeni, bu barajların inşasında zorunlu kazılardan elde edilen malzemelerin ve çok az işlem gerektiren yerel doğal malzemelerin kullanılabilmesidir. Zorunlu kazı malzemelerinin ve yakın çevreden sağlanan ödünç malzemenin büyük miktarlarda kullanılabilmesi, toprak dolgu barajlar açısından önemli ekonomik üstünlükler sağlar. Ayrıca toprak dolgu barajların temel ve topografya gereksinimleri, diğer baraj tiplerine göre daha az sınırlayıcıdır.

Depolama amacıyla inşa edilen barajlar arasında toprak dolgu barajların, diğer baraj tiplerine kıyasla daha yaygın biçimde yapılmaya devam etmesi beklenmektedir. Bunun başlıca nedenlerinden biri, büyük ölçekli su depolama projeleri sonucunda beton yapılar için elverişli sahaların giderek azalmasıdır. Bu durum, özellikle sulama amacıyla suyun korunmasının temel bir gereklilik olduğu kurak ve yarı kurak bölgelerde daha belirgindir.

Toprak dolgu baraj sınıflandırması birkaç farklı tipi kapsasa da, toprak malzemelerin kazılması, taşınması ve sıkıştırılmasına yönelik modern ekipmanların gelişmesi, silindire sıkıştırılmış dolgu tipini daha ekonomik hâle getirmiştir. Bu gelişme, yarı hidrolik ve hidrolik dolgu tiplerinin büyük ölçüde yerini silindire sıkıştırılmış dolguların almasına neden olmuştur. Bu durum özellikle nispeten az miktarda malzemenin işlendiği küçük yapıların inşası için geçerlidir; çünkü bu tür işlerde verimli hidrolik işlemler için gerekli büyük tesislerin kurulması ekonomik değildir. Bu nedenle, bu metinde yalnızca silindire sıkıştırılmış toprak dolgu baraj tipi ele alınmaktadır. Silindire sıkıştırılmış toprak dolgu barajlar, 6. bölümde açıklandığı üzere “homojen”, “zonlu” veya “diyaframlı” olarak ayrıca sınıflandırılır.



**Şekil 4-2. Idaho’da Payette Nehri üzerinde yer alan beton ağırlık tipinde bir depolama ve derivasyon yapısı olan Black Canyon Barajı.**

Toprak dolgu barajlar, dolusavak ve çıkış tesisleri gibi yardımcı yapılara ihtiyaç duyar. Bu baraj tipinin başlıca dezavantajı, yeterli dolusavak kapasitesi sağlanmadığında, üzerinden akan suyun aşındırıcı etkisiyle zarar görebilmesi ve hatta tamamen yıkılabilesidir.

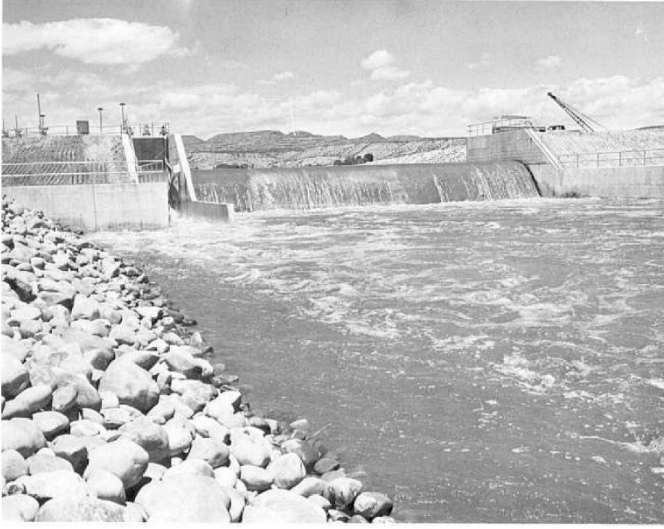
Baraj yeri ana akarsu yatağı dışında değilse, inşaat sırasında akarsuyun baraj yerinden güvenli biçimde uzaklaştırılması gerekir. Bu amaçla akarsu, baraj gövdesinin içinden geçen bir galeriyle veya baraj yerinin etrafından dolaşan bir tünelle derivasyona alınabilir. Beton barajlarda genellikle bir derivasyon tüneli veya galerisi kullanılır. Bunun yanında, inşaat sırasında beton bloklar üzerinden kontrollü aşmaya olanak sağlayacak ek düzenlemeler de yapılabilir.

Dolgu barajlarda ise bazen, barajın açıklığının bir ya da iki yanında kalan bölümleri inşa edilirken nehrin baraj yerinden geçebilmesi için geçici bir açıklık bırakılır. İnşaat sırasındaki

derivasyon uygulamaları 11. Bölümde daha ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

#### **4.6. Kaya Dolgu Barajlar**

Kaya dolgu barajlar, stabiliteyi sağlamak için farklı boyutlardaki kaya malzemelerinden, su geçirimsizliğini sağlamak için ise geçirimsiz bir membrandan oluşur. Bu membran; memba yüzünde yer alan geçirimsiz bir toprak kaplama, beton plak, asfalt beton kaplama, çelik plaklar, başka geçirimsiz elemanlar veya baraj gövdesi içinde yer alan geçirimsiz ince bir toprak çekirdek olabilir.



**Şekil 4-3. Utah, Duchesne yakınlarında Duchesne Nehri üzerinde yer alan küçük bir derivasyon yapısı olan Knight Derivasyon Barajı.**

Toprak dolgu barajlarda olduğu gibi, kaya dolgu barajlar da suyun baraj üzerinden aşması durumunda hasar görebilir veya yıkılabilir. Bu nedenle, aşmayı önleyecek yeterli kapasitede bir dolusavağa sahip olmaları gerekir. Bunun istisnası, kaya dolgu kaplaması özellikle aşmaya dayanacak şekilde tasarlanmış çok alçak derivasyon (mamba batardosu) barajlarıdır.

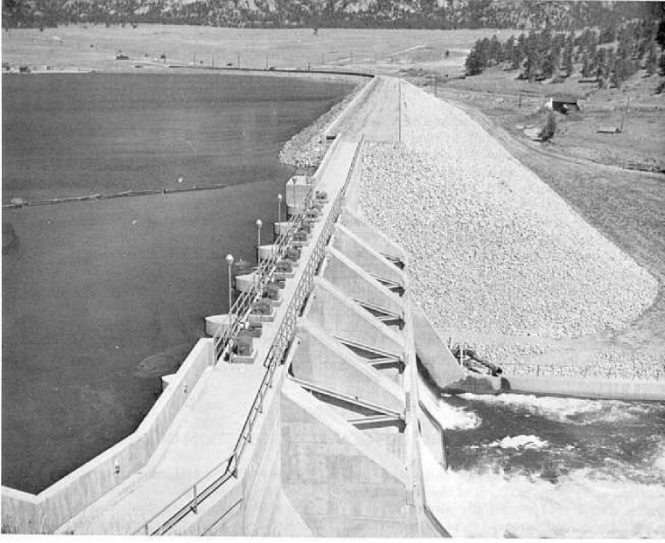
Kaya dolgu barajlar, geçirimsiz membranda yırtılmaya yol açabilecek düzeyde oturma meydana getirmeyecek sağlam temeller üzerine inşa edilmelidir. Bu nedenle, bu barajlar için en uygun temel koşulları genellikle kaya temeller veya sıkıştırılmış kum-çakıl temellerdir.

Kaya dolgu baraj tipi, kaliteli kaya malzemesinin bol olduğu uzak sahalarda, uygun zemin malzemesinin sınırlı bulunduğu yerler, uzun süreli ve yoğun yağışların toprak dolgu baraj inşasını güçleştirdiği bölgeler veya beton baraj inşasının çok maliyetli olacağı sahalarda için uygundur. Kaya dolgu barajlar tropikal iklimlerde yaygın olarak kullanılır; çünkü inşaatları uzun süreli yüksek yağış koşullarına daha elverişlidir.

#### **4.7. Beton Ağırlık Barajları**

Beton ağırlık barajları makul derecede sağlam kaya temelinin bulunduğu sahalarda için uygundur. Bununla birlikte, yeterli su kesme ve geçirimsizlik önlemleri alındığında, alçak yapılar alüvyal temeller üzerine de oturtulabilir. Bu barajlar, üzerinden akım geçen dolusavak kremleri olarak kullanılmaya oldukça elverişlidir. Bu üstünlükleri nedeniyle, toprak dolgu veya kaya dolgu barajların dolusavaklarında ya da derivasyon barajlarının üzerinden akım geçen bölümlerinde sıkça tercih edilirler.

Ağırlık barajları planda düz veya eğrisel olabilir. Eğrisel planlı bir baraj, bazı durumlarda hem maliyet hem de güvenlik açısından üstünlük sağlayabilir. Örneğin, barajın eğriliği yapının bir bölümünün daha sağlam bir temel üzerine yerleştirilmesine olanak tanıyabilir ve bu da gerekli kazı miktarını azaltabilir.



**Şekil 4-4. Colorado’da Big Thompson Nehri üzerinde yer alan ve toprak dolgu ile beton ağırlık yapısının birleşiminden oluşan Olympus Barajı. Beton bölümü, dolusavağı ve bir kanala ait çıkış yapısını içermektedir.**

Silindirle sıkıştırılmış beton (RCC) kullanılarak beton baraj inşa etme yaklaşımı geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Amerika Birleşik Devletleri’nde ve diğer ülkelerde çeşitli RCC barajları inşa edilmiştir. Bununla birlikte, bu el kitabında RCC teknolojisi ve tasarım yöntemleri ele alınmamaktadır; çünkü bu yöntemler ve yaklaşımlar görece yenidir ve gelişimini sürdürmektedir.

#### **4.8. Beton Kemer Barajlar**

Beton kemer barajlar, mesnetler arasındaki açıklığın baraj yüksekliğine oranla çok büyük olmadığı ve mesnetlerdeki kaya temelin kemer itkisini güvenli biçimde karşılayabildiği sahalar için uygundur.

Bu kapsamda iki tip kemerli baraj tanımlanabilir: tek kemerli barajlar ve çok kemerli barajlar. Tek kemerli baraj, bir kanyonu tek bir yapı olarak geçer ve genellikle kret uzunluğunun baraj yüksekliğine oranı en fazla 10:1 olacak şekilde

sınırlandırılır. Tasarımında, gerekli görüldüğünde her iki mesnette küçük itki blokları veya kret boyunca uygun bir noktada dolusavak yer alabilir.

Çok kemerli baraj ise iki farklı biçimde tasarlanabilir. Arizona'daki Bartlett Barajı örneğinde olduğu gibi, payandalar arasında 50 feet veya daha kısa açıklık geçen, kalınlığı üniform silindirik gövdelerden oluşabilir. Diğer bir seçenek ise birkaç yüz feet aralıklarla yerleştirilmiş masif payandalar tarafından taşınan birden fazla tek kemerli barajdan oluşan sistemdir.

Barajın amacı, tasarım ve inşaat kararlarını doğrudan etkiler. Yapının 50 yıllık hizmet ömrü beklenen kalıcı büyük bir baraj mı, yoksa 5 yıllık yararlı ömrü olan geçici bir batardo mu olduğu, tasarım ve inşaat süresini, baraj ve temel içindeki malzemelerin kalitesini, temel iyileştirmelerini ve hidrolik koşulları belirleyen önemli bir etkidir.

Yapısal ve ekonomik bakımdan, rijit zemin, çakıl veya iri yuvarlak taşlar üzerine oturan bir kemer barajı tasarlamak uygun değildir. Kemer barajlarının stabilitesi, gerek baraj kesitinin gerekse beton-kaya temas yüzeyinin görece ince olması nedeniyle, genellikle kaldırma basıncından önemli ölçüde etkilenmez.

Tarihsel olarak, hem kalıcı hem de geçici beton barajlar, inşaat sırasında ve sonrasında kısmen ya da tamamen su altında kalma koşullarına dayanacak şekilde tasarlanmıştır.

Kemer baraj tasarımı uzmanlık gerektirdiğinden, bu kitapta bu konu ayrıntılı olarak ele alınmamaktadır. Tasarım, yükler, analiz yöntemleri, güvenlik katsayıları ve benzeri konular için Bureau of Reclamation yayını olan *Design of Arch Dams* adlı esere başvurulmalıdır.

#### **4.9. Beton Payandalı Barajlar**

Payandalı barajlar, düz plaklı ve çok kemerli yapılardan oluşur. Masif ağırlık barajlarına kıyasla yaklaşık yüzde 60 daha az beton gerektirirler. Ancak kalıp işçiliği ve donatı çeliği gereksinimindeki artış, çoğu zaman beton tasarrufunu dengeler.

İşçilik maliyetlerinin malzeme maliyetlerine oranla daha düşük olduğu 1930'lu yıllarda çok sayıda payandalı baraj inşa edilmiştir. Buna karşılık, işçilik maliyetlerinin yüksek olduğu koşullarda bu tip barajların inşaat maliyeti genellikle diğer baraj tipleriyle rekabet edemez.

Payandalı barajların tasarımı, büyük ölçüde bu alana özgü deneyimden kaynaklanan bilgi ve mühendislik yargısına dayanır. Bu nedenle ve günümüz koşullarında payandalı barajların uygulama alanı sınırlı olduğundan, bu barajların tasarımı bu metinde ele alınmamaktadır.

#### **4.10. Diğer Tipler**

Yukarıda belirtilenlerin dışında başka baraj tipleri de inşa edilmiştir. Ancak bunlar çoğu durumda belirli bir yerel gereksinimi karşılamakta veya deneysel nitelik taşımaktadır. Bazı örneklerde, hem barajın kaplama ya da döşeme bölümünde hem de taşıyıcı çerçevesinde yapısal çelik kullanılmıştır.

Ayrıca 1920'den önce, özellikle Kuzeybatı'da çok sayıda ahşap baraj inşa edilmiştir. Ancak ahşap barajlarda gereken işçilik miktarı ve yapının kısa hizmet ömrü birlikte değerlendirildiğinde, bu baraj tipi modern inşaat koşullarında ekonomik olmaktan uzaktır. Bu nedenle ahşap barajlar ve diğer yaygın olmayan baraj tipleri bu metinde ele alınmamaktadır.

## **B. BARAJ TİPİ SEÇİMİNİ YÖNLENDİREN FİZİKSEL ETKENLER**

### **4.11. Genel**

Planlama ve tasarımın erken aşamalarında, saha seçimi ve baraj tipi dikkatle değerlendirilmelidir. Belirli bir baraj yeri için yalnızca tek bir baraj tipinin veya yardımcı yapının uygun olduğu durumlar oldukça istisnaidir. Genellikle, bir baraj tipinin en uygun ve en ekonomik seçenek olduğunun gösterilebilmesi için farklı baraj ve yardımcı yapı tiplerine ilişkin ön tasarımlar ile maliyet tahminlerinin hazırlanması gerekir. Bu nedenle, saha seçimi ve baraj tipiyle ilgili kararlar yeterli etüde dayanmıyorsa, projenin gereğinden pahalıya mal olması olasıdır.

Baraj tipinin seçimi, planlamacılar, hidrologlar, geoteknik mühendisleri, hidrolik mühendisleri, yapı mühendisleri ve jeologlar gibi farklı disiplinlerden uzmanların birlikte çalışmasını gerektirir. Bu iş birliği; topografya, jeoloji ve temel koşullar, mevcut malzemeler, hidroloji ve deprensellik gibi fiziksel etkenlerin doğru değerlendirilmesi ve buna bağlı olarak ekonomik, güvenli ve uygulanabilir tasarımların geliştirilebilmesi açısından zorunludur.

Dolusavak deşarjlarından korunma, çıkış tesislerine ilişkin sınırlamalar, inşaat sırasında akarsuyun derivasyonu, iş gücü ve ekipman temini, sahaya erişilebilirlik, sahanın fiziksel özellikleri, barajın amacı ve baraj güvenliği gibi hususlar nihai baraj tipi seçimini etkiler. Çoğu durumda nihai seçim, incelenen farklı baraj tiplerinin inşaat maliyetlerinin karşılaştırılmasına dayanır. Aşağıdaki paragraflarda, baraj tipi seçiminde etkili olan başlıca fiziksel etkenler açıklanmaktadır.

### **4.12. Topografya**

Topografik değerlendirmeler, baraj yeri ve rezervuar alanının yüzey biçimini, sahaya erişimi ve inşaat malzemelerine

ulaşılabilirliği kapsar. Topografya ilk baraj tipi seçimini büyük ölçüde belirler. Yüksek ve kayalık yamaçlar arasından akan dar bir dere, doğal olarak kaya dolgu veya üzerinden akım geçen beton baraj seçeneğini gündeme getirir. Buna karşılık, alçak ve hafif dalgalı ovalar toprak dolgu barajı için daha elverişli koşullar sunar. Ara koşullarda ise kompozit yapılar gibi farklı seçenekler değerlendirilebilir. Sonuç olarak, baraj tipi seçiminde topoğrafya büyük önem taşır.

Topografya yardımcı yapıların seçimini de önemli ölçüde etkileyebilir. Örneğin doğal geçitler veya topografik eşikler mevcutsa, dolusavağın bu alanlardan geçirilmesi mümkün olabilir. Rezervuar çevresi, baraj yüksekliğine kıyasla yüksek ve kesintisiz ise, açık kanal tipi veya tünel tipi bir dolusavak gerekebilir. Dolusavakla ilgili bu tür hususlar baraj tipinin seçimini de etkileyebilir. Derin ve dik yamaçlı bir kanyonda, kaya dolgu baraj için ayrı bir dolusavak inşa etmek yerine, üzerinden akım geçen dolusavaklı bir beton baraj yapmak daha ekonomik olabilir.

#### **4.13. Jeoloji ve Temel Koşulları**

Farklı kaya ve zemin türlerinin temel ve inşaat malzemesi olarak uygunluğu, baraj tipi seçiminde dikkate alınması gereken temel jeolojik konular arasındadır. Bir baraj yerindeki temel jeolojisi, çoğu zaman o saha için hangi baraj tipinin uygun olduğunu belirler. Tabakaların dayanımı, kalınlığı ve eğimi; geçirgenlik; eklem ve çatlak sistemleri ile faylanma gibi özellikler baraj tipi seçiminde önemli rol oynar. Aşağıda yaygın olarak karşılaşılan bazı temel türler açıklanmaktadır.

##### **(a) Kaya temeller**

Önemli jeolojik kusurlardan arınmış, görece yüksek kayma dayanımına sahip, erozyona ve sızmaya dirençli sağlam kaya temelleri, üzerlerine inşa edilebilecek baraj tipi açısından az sayıda sınırlama getirir. Bu durumda belirleyici etken genellikle

malzeme ekonomisi veya toplam proje maliyetidir. Ayrışmış kayanın kaldırılması; kaya eklemlerinin ve çatlakların enjeksiyonla geçirimsiz hâle getirilmesi çoğu zaman gereklidir. Kil şeylleri, bazı kumtaşları, ayrışmış bazaltlar ve benzeri daha zayıf kayalar ise baraj tasarımı ve inşasında önemli sorunlar doğurabilir ve seçilecek baraj tipini güçlü biçimde etkileyebilir.

### **(b) Çakıl temeller**

İyi sıkıştırılmış çakıl temeller, toprak dolgu veya kaya dolgu barajlar için uygundur. Ancak çakıl temelerde yüksek hızlarda su sızıntısı görülebileceğinden, sızmayı kontrol altına almak amacıyla geçirimsizlik perdeleri veya benzeri önlemler uygulanmalıdır.

### **(c) Silt veya ince kum temeller**

Silt veya ince kum temeller, uygun şekilde tasarlandığında alçak beton ağırlık barajları ve toprak dolgu barajları için kullanılabilir. Ancak bu tür temeller genellikle kaya dolgu barajlar için uygun değildir. Tasarım açısından başlıca kaygılar: farklı oturma, doygunluk sonrasında zeminde göçme olasılığı, kaldırma kuvvetleri, borulanmanın önlenmesi, aşırı sızma kayıpları ve mansap dolgu topuğundaki temel zeminin erozyona karşı korunmasıdır.

### **(d) Kil temeller**

Kil temeller, toprak dolgu barajların oturtulması için kullanılabilir. Ancak bu temellerin görece düşük kayma dayanımına sahip olması, dolgu şevlerinin daha yatık tasarlanmasını gerektirir. Baraj altındaki kil temeller ayrıca önemli ölçüde konsolidasyon oturmasına uğrayabilir. Daha yatık şev gerekliliği ve kil temellerin fazla oturma eğilimi nedeniyle, kil temel üzerine kaya dolgu baraj inşa etmek genellikle ekonomik değildir. Kil temeller çoğu zaman beton ağırlık barajları için de uygun değildir. Temel tabakalarının

konsolidasyon özelliklerini ve üst yükleri taşıma kapasitelerini belirlemek için genellikle temel malzemesi üzerinde doğal durumunu temsil eden deneyler yapılması gerekir.

#### **(e) Üniform olmayan temeller**

Zaman zaman, yukarıda tanımlanan temel türlerinden herhangi birine tam olarak uyan, yeterince üniform bir temel koşulu bulunmayabilir. Bu gibi durumlarda barajın kaya ve yumuşak zemin gibi farklı özelliklere sahip malzemelerden oluşan üniform olmayan bir temel üzerine oturtulması gerekebilir. Bununla birlikte, bu tür koşullar çoğu kez özel tasarım önlemleri ve uygun temel iyileştirme yöntemleriyle giderilebilir. Çok olağandışı görünmeyen baraj yerleri dahi, deneyimli mühendislerin değerlendirmesini gerektiren özel sorunlar ortaya çıkarabilir.

Yukarıda belirtilen temel iyileştirme yöntemlerinin ayrıntıları, toprak dolgu, kaya dolgu ve beton ağırlık barajlarının tasarımına ilişkin ilgili bölümlerde, sırasıyla 6., 7. ve 8. bölümlerde verilmiştir.

#### **4.14. Mevcut Malzemeler**

Farklı baraj tipleri için gerekli başlıca malzemeler, çoğu zaman baraj sahasında veya sahanın yakın çevresinde bulunabilir. Bunlar genel olarak şu şekilde sıralanabilir:

- Dolgu yapımında kullanılacak zemin malzemeleri,
- Dolgu ve anroşman için kullanılacak kaya malzemeleri,
- Beton agregası olarak kullanılacak kum, çakıl ve kırmataş.

Özellikle büyük miktarlarda kullanılan inşaat malzemelerinin uzak mesafelerden taşınması proje maliyetini önemli ölçüde artırır. Bu nedenle, malzeme taşıma giderlerinin azaltılması veya tamamen ortadan kaldırılması, toplam proje

maliyetinin düşürülmesinde önemli bir etkidir. Çoğu durumda en ekonomik baraj tipi, uygun nitelikteki malzemenin makul bir mesafe içinde ve yeterli miktarda temin edilebildiği baraj tipidir.

Beton yapımına uygun kum ve çakılın yerel olarak, makul bir maliyetle ve hatta proje sahası içinde bulunması, beton baraj seçimini destekleyen önemli bir avantajdır. Benzer şekilde, kaya dolgu için uygun kaya malzemesinin yakın çevrede bulunması da kaya dolgu baraj seçimini daha elverişli hâle getirir.

Sonuç olarak, nihai yapının güvenliğinden, verimliliğinden ve kalitesinden ödün vermeden proje maliyetini azaltabilecek tüm yerel malzeme kaynakları dikkatle değerlendirilmelidir.

#### **4.15. Hidroloji**

Hidrolojik çalışmalar, 4.2. Bölümde depolama barajları kapsamında belirtilen proje amaçlarını inceler. Baraj ve yardımcı yapı tipinin seçimini yönlendiren hidrolojik etkenler ile ekonomik etkenler arasında yakın bir ilişki vardır. Akım özellikleri ve yağış rejimi, suyun kontrolü ve derivasyonu üzerindeki etkileri ve inşaat süresini uzatabilmeleri nedeniyle inşaat maliyetini önemli ölçüde etkileyebilir. Derivasyon için büyük tünellerin gerekli olduğu durumlarda, bu tünellerin tünel dolusavağa dönüştürülmesi en ekonomik dolusavak alternatifi olabilir.

#### **4.16. Dolusavak**

Dolusavak, barajın yaşamsal öneme sahip yardımcı yapılarından biridir. Çoğu zaman dolusavağın boyutu, tipi ve konumuna ilişkin doğal kısıtlamalar baraj tipinin seçiminde belirleyici olur. Dolusavak gereksinimleri, saha koşullarından, barajın tipinden veya büyüklüğünden bağımsız olarak, esasen yüzey akışı ve akarsu akım özellikleri tarafından belirlenir. Geçirilmesi gereken taşkınların büyüklüğü, seçilecek dolusavak tipini doğrudan etkiler. Bu nedenle, büyük taşkın potansiyeline

sahip akarsularda dolusavak baskın yapı hâline gelebilir ve baraj tipi seçimi ikincil bir değerlendirme olarak ele alınabilir.

Büyük bir dolusavağın inşaat maliyeti, çoğu zaman toplam proje maliyetinin önemli bir bölümünü oluşturur. Bu gibi durumlarda, dolusavak ile barajın tek bir yapıda birleştirilmesi istenebilir. Bu da üzerinden akım geçen beton bir barajın seçilmesini destekler. Ayrı dolusavak kanallarından çıkan kazı malzemesinin baraj dolgusunda kullanılabilirdiği bazı durumlarda ise toprak dolgu baraj avantajlı olabilir. Dolusavak gereksiniminin küçük olduğu projelerde, dar baraj yerlerinde bile toprak dolgu veya kaya dolgu barajlar çoğu kez uygun seçenekler hâline gelir.

Toprak veya kaya dolgu barajlar üzerine, üzerinden akım geçen beton dolusavakların inşa edilmesi genel olarak önerilmez. Çünkü bu tür tasarımlarda arıza riskini azaltmak için daha muhafazakâr tasarım kabullerine ve ek güvenlik önlemlerine ihtiyaç duyulur. Bu uygulamada karşılaşılan başlıca sorunlardan biri, rezervuar yükleri etkimeye başladıktan sonra dolgu ve temelde farklı oturmaların meydana gelebilmesidir. Bu farklı oturmalar beton yapıda düzensizliklere ve çatlaklara yol açabilir. Ayrıca beton kanalda oluşabilecek çatlaklar veya derz açıklıkları, suyun kanaldan dolgu içine sızmasına neden olabilir. Bu durum, çevredeki dolgu malzemesinde borulanma veya yıkanma riskini artırır. Bunun yanında, dolusavak inşaatına başlanmadan önce dolgu gövdesinin tamamen tamamlanmış olması gerekir. Tüm bu nedenlerle, toprak veya kaya dolgu barajlar üzerinde beton dolusavak tasarlanması özel dikkat gerektirir ve çoğu durumda tercih edilmez.

Bu etkenlere ek olarak, kaplama kalınlığının artırılması, donatı çeliği miktarının çoğaltılması, su kesme düzenlemeleri, derz işlemleri, drenaj ve ön yükleme gibi daha muhafazakâr inşaat ayrıntıları maliyeti artırır. Bu nedenle dolusavak tasarımında

genellikle alternatif çözümler tercih edilir. Bu çözümler, yapının mesnetlerdeki doğal malzeme üzerinden veya içinden geçirilmesini ya da baraj altına galeri şeklinde yerleştirilmesini içerebilir.

En yaygın ve tercih edilen dolusavak düzenlemelerinden biri, dolusavağın baraj gövdesi dışında, bir veya iki mesnetten açılan bir kanal üzerinden ya da barajdan uzak bir noktadan geçirilmesidir. Böyle bir konum seçildiğinde, baraj üzerinden akımın geçmesi öngörülmeyen tipte tasarlanabilir. Bu da toprak dolgu ve kaya dolgu yapılarını seçenekler arasına katar. Buna karşılık, barajdan uzakta uygun bir dolusavak yeri bulunamıyorsa, üzerinden akım geçen dolusavağı içerebilecek bir baraj tipinin seçilmesi gerekebilir. Bu durumda dolusavak, ana nehir kanalının yalnızca bir bölümünü kaplayacak şekilde yerleştirilebilir; barajın geri kalan kısmı ise toprak, kaya veya betondan oluşabilir. Şekil 4-4'te gösterilen Olympus Barajı bu tip bir yapıya örnektir.

#### **4.17. Deprem**

Baraj deprem etkilerine maruz kalabilecek bir bölgede yer alıyorsa, tasarımın ek yükleri ve artan gerilmeleri karşılayacak şekilde yapılması gerekir. Toprak dolgu, kaya dolgu ve beton ağırlık barajları için deprem tasarımına ilişkin hususlar sırasıyla 6., 7. ve 8. bölümlerde ele alınmaktadır. Deprem bölgelerinde, baraj tipinin seçimi ve baraj tasarımı bu tür yapılarda deneyimi olmayan kişiler tarafından üstlenilmemelidir.

### **C. HUKUKİ, EKONOMİK VE ESTETİK DEĞERLENDİRMELER**

#### **4.18. Yasal Kısıtlamalar**

Seyrüsefere elverişli akarsuların sularının kontrolüne ilişkin yasal kısıtlamalar bulunmaktadır. Bu tür akarsularda suyun

derivasyonu veya kontrolüne yönelik planlar ABD Ordusu Mühendisler Birliği'nin onayına tabidir. Baraj inşası ve işletmesiyle ilgili, yapı tipinin seçimini etkileyebilecek çok sayıda başka federal ve eyalet düzenlemesi de vardır.

Hemen her eyalette, belirli büyüklüğün üzerindeki tüm baraj ve rezervuarların tasarımını, inşasını ve işletilmesini düzenleyen yasalar ve yönetmelikler bulunmaktadır. Elli eyaletten herhangi birinde baraj inşa etmeyi planlayan mühendisler veya mal sahipleri, ayrıntılı tasarımlara geçmeden önce ilgili eyalet makamlarıyla iletişime geçmelidir.

#### **4.19. Amaç ve Fayda-Maliyet İlişkisi**

Bir barajın hizmet edeceği amacın dikkate alınması, çoğu zaman en uygun baraj tipini işaret eder. Örneğin, baraj tipi seçimi; barajın temel işlevinin sulama, enerji veya içme suyu amacıyla sürekli ve güvenilir depolama sağlamak; taşkınları tutarak kontrol etmek; akarsu akımını düzenlemek; ya da depolama işlevi olmayan bir derivasyon barajı veya savak olarak görev yapmak üzere belirlenmesine bağlı olabilir.

Güvenli ve işlevsel bir barajın inşa edilemeyeceği saha sayısı oldukça azdır. Ancak birçok durumda, sahaya özgü koşullar proje maliyetini kabul edilebilir düzeyin üzerine çıkarabilir. Bu nedenle uygun baraj yerlerinin araştırılması, bir projenin sağlayacağı faydalarla orantılı bir maliyetle gerçekleştirilip gerçekleştirilemeyeceğini belirlemede çoğu zaman temel etkidir.

Hidroelektrik enerji üretimi, sulama ve su temini gibi amaçlara yönelik projelerden elde edilecek faydaların değerlendirilmesi için kabul görmüş yöntemler bulunmaktadır. Buna karşılık, taşkın kontrolü projelerinde bu değerlendirme yöntemleri daha az belirgindir. Rekreasyon projelerinin değerini ölçmek için ise genel kabul görmüş tatmin edici bir ölçüt bulunmamaktadır.

Rekreasyon amaçlı bir projenin gerekçelendirilmesi, projeden yararlanacak nüfusun büyüklüğüne, bölgede yer alan benzer projelerin konumuna ve bölgedeki gelişme eğilimine bağlı olarak yapılmalıdır. Bu kapsamda, bölgedeki değer artışı veya değer kaybı eğilimleri de dikkate alınmalıdır. Tüm bu değerlendirmeler, proje maliyeti ve mevcut finansman olanaklarıyla birlikte ele alınmalıdır.

Bir projenin yapılması istense bile, hizmet edeceği nüfus sınırlıysa, pahalı bir sahanın geliştirilmesi ekonomik açıdan haklı gösterilemeyebilir. Başka bir durumda ihtiyaç daha büyük olabilir; ancak nüfusun azalması veya mülk değerlerinin düşmesi gibi eğilimler de karar sürecinde dikkate alınmalıdır. Her iki durumda da seçilecek çözümün mümkün olduğunca düşük maliyetli olması gerekir. Bu tür koşullarda, küçük depolama kapasitesine sahip alçak bir baraj uygun bir seçenek olabilir.

#### **4.20. Estetik**

Genel olarak her yapı tipi işlevsel amacına uygun, tamamlanmış ve işçilik açısından düzgün bir görünüme sahip olmalıdır. Tamamlanmış yüzeylerin doğrultusu ve dokusu tasarım gerekleriyle uyumlu olmalı; göze hoş görünmeyen düzensizlikler içermemelidir.

Estetik değerlendirmeler, özellikle rekreasyon amacı ön planda olan yapılarda, yapı tipinin seçiminde önemli bir rol oynayabilir.

# **KENTSEL ULAŞIMDA ÖZEL ARAÇ TALEBİNİN YÖNETİMİ: TOPLU TAŞIMAYA YÖNLENDİRME İÇİN BİR ANALİTİK ÇERÇEVE<sup>1</sup>**

**Polat YALINIZ<sup>2</sup>**

## **1. GİRİŞ**

Günümüzde hızlı kentleşme, nüfus artışı ve ekonomik gelişmeler, kent içi ulaşım sistemleri üzerinde önemli baskılar oluşturmaktadır. Özellikle plansız gelişen şehirlerde, kent merkezlerine yönelen özel araç trafiği, trafik sıkışıklığı, çevresel kirlilik ve erişilebilirlik sorunlarını beraberinde getirmektedir. Bu durum, sürdürülebilir ulaşım politikalarının önemini giderek artırmaktadır. Bu bağlamda ulaşım planlaması, yalnızca altyapı geliştirmeyi değil, aynı zamanda ulaşım talebinin yönlendirilmesini ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda sistemin yeniden yapılandırılmasını da içermektedir (Broadus & Cervero, 2019).

Kent merkezlerine yönelen özel araç trafiğinin trafik sıkışıklığı, çevresel sorunlar ve erişilebilirlik baskısı yarattığı çeşitli çalışmalarda ortaya konulmaktadır (Elker, 2002; Yalınız, 2006). Özellikle plansız gelişen kentlerde, özel araç kullanımındaki artışın ulaşım sistemleri üzerinde önemli baskılar oluşturduğu bilinmektedir (Gülgeç, 1998; Yalınız, 2006). Kent merkezine yönelen özel araç talebinin kontrol altına

---

<sup>1</sup> Kitap bölümü Polat Yalınız'ın Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora tezinden üretilmiştir.

<sup>2</sup> Dr.Öğretim Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0003-0373-9727.

alınması, sürdürülebilir ulaşım politikalarının temel amaçlarından biri olarak değerlendirilmektedir (Yalınız, 2006).

Kent merkezleri, sosyal ve ekonomik aktivitelerin yoğunlaştığı alanlar olup, aynı zamanda ulaşım sistemlerinin en fazla zorlandığı bölgeler olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, özel araç kullanımının azaltılması ve toplu taşıma sistemlerinin teşvik edilmesi, sürdürülebilir ulaşımın temel hedefleri arasında yer almaktadır.

Bu çalışmada, kent merkezine gelen özel araç kullanıcılarının toplu taşımaya yönlendirilme potansiyelinin belirlenmesine yönelik bir model önerilmektedir. Çalışmanın temel amacı, hangi koşullar altında ve hangi oranlarda özel araç kullanıcılarının toplu taşımaya kayabileceğini ortaya koymaktır.

Bu bölümün amacı, kent merkezine yönelen özel araç talebinin yönetilebilmesi için izlenebilecek analitik ve aşamalı bir yaklaşımı ortaya koymaktır. Bu kapsamda, önce özel araç kullanımının kent içi ulaşım üzerindeki etkileri ele alınmakta, ardından talep yönetiminde kullanılacak politika araçları açıklanmakta ve son olarak özel araç kullanıcılarının toplu taşımaya yönlendirilmesine yönelik model temelli bir yol haritası sunulmaktadır.

## **2. SÜRDÜRÜLEBİLİR ULAŞIM VE KENT İÇİ SORUNLAR**

Kent içi ulaşımında özel araç kullanımının giderek artması, yalnızca trafik sıkışıklığına yol açan bir durum değil, aynı zamanda çevresel, ekonomik ve mekânsal sonuçlar doğuran çok boyutlu bir sorundur. Özel araç odaklı ulaşım yapısı; enerji tüketiminin artmasına, hava kirliliğinin yoğunlaşmasına, kamusal alanların park alanı olarak kullanılmasına ve kent içi erişilebilirliğin zayıflamasına neden olmaktadır. Özellikle kent

merkezlerinde yoğunlaşan bu baskı, ulaşım sisteminin verimliliğini azaltmakta ve mevcut altyapının yetersiz kalmasına yol açmaktadır.

Kent merkezleri, ticaret, hizmet, yönetim ve sosyal yaşam faaliyetlerinin yoğunlaştığı alanlar olmaları nedeniyle yüksek düzeyde yolculuk çekmektedir. Ancak bu alanların fiziksel kapasitesi sınırlıdır ve çoğu durumda yeni yol alanı üretmek ya da taşıt kapasitesini sürekli artırmak mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, kent merkezine yönelen özel araç talebinin yalnızca altyapı yatırımlarıyla değil, talep yönetimine dayalı politikalarla da ele alınması gerekmektedir.

Sürdürülebilir ulaşım yaklaşımı, ulaşım sorunlarının çözümünde yalnızca arz artırıcı müdahaleleri esas almamaktadır. Aynı zamanda, ulaşım talebinin yönlendirilmesi de bu yaklaşımın temel bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bu kapsamda, özel araç kullanımının azaltılması, toplu taşımanın teşvik edilmesi, park politikalarının yeniden düzenlenmesi ve erişim yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi önem kazanmaktadır. Dolayısıyla kent içi ulaşım sorunlarının çözümünde temel yaklaşım, daha fazla taşıt hareketine alan açmak değil, mevcut yolculuk talebini daha verimli, dengeli ve sürdürülebilir biçimde yönetmek olmalıdır.

Sürdürülebilir ulaşım, ulaşım ihtiyaçlarının çevreye zarar vermeden, ekonomik ve sosyal dengeleri koruyarak karşılanmasını amaçlayan bir yaklaşımdır (Banister, 2008). Bu yaklaşım kapsamında;

- Özel araç kullanımının azaltılması
  - Toplu taşımanın teşvik edilmesi
  - Alternatif ulaşım türlerinin geliştirilmesi,
- ön plana çıkmaktadır.

Kent merkezlerinde yaşanan başlıca sorunlar şunlardır:

- Trafik sıkışıklığı
- Yetersiz yol kapasitesi
- Yol kenarı park problemleri
- Düzensiz kentsel gelişim.

Özellikle yol kenarı park uygulamaları, trafik akışını olumsuz etkileyerek kapasite düşüşüne neden olmaktadır. Bu nedenle talep yönetimi stratejileri (örneğin park politikaları ve fiyatlandırma) kritik rol oynamaktadır.

## **2.1. Talep Yönetimi Yaklaşımının Kent İçi Ulaşım Politikalarındaki Yeri**

Kent içi ulaşım sorunlarının çözümünde uzun yıllar boyunca ağırlıklı olarak arz yönlü yaklaşımlar benimsenmiştir. Yeni yol yapımı, kavşak kapasitesinin artırılması ve taşıt trafiğini rahatlatmaya yönelik fiziksel düzenlemeler, ulaşım planlamasının temel araçları arasında görülmüştür. Ancak özellikle büyük ve orta büyüklükteki kentlerde, yalnızca altyapı kapasitesinin artırılmasına dayalı bu yaklaşımın uzun vadede kalıcı bir çözüm üretmediği görülmüştür. Çünkü artan kapasite, çoğu durumda yeni özel araç yolculuklarını teşvik etmekte ve kısa süre sonra benzer sıkışıklık düzeyleri yeniden ortaya çıkmaktadır.

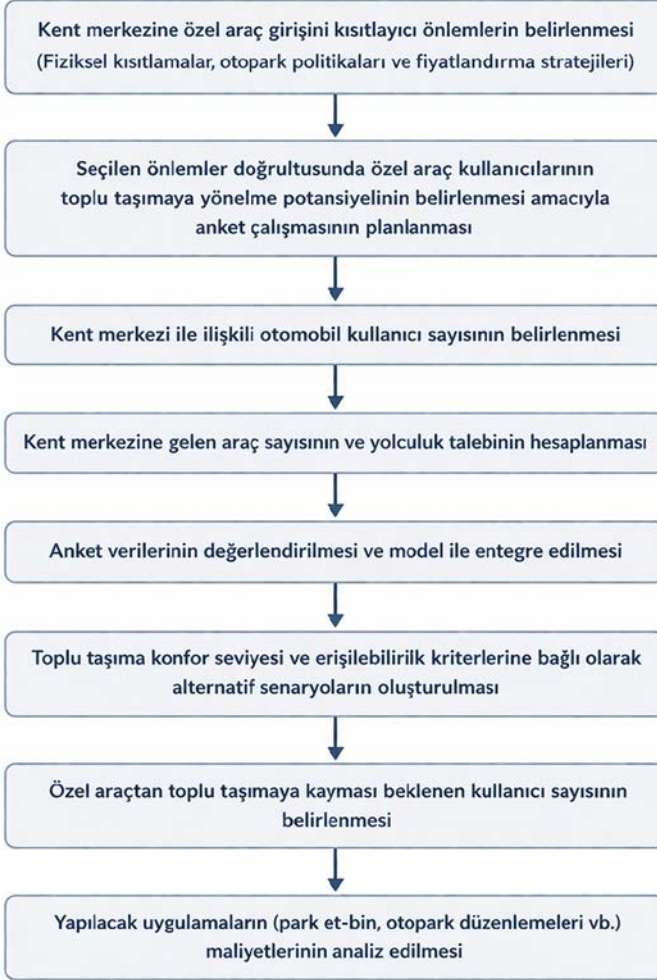
Bu nedenle günümüzde ulaşım planlamasında, talep yönetimi yaklaşımı giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Talep yönetimi, mevcut yolculuk talebinin zaman, tür, güzergâh ve erişim biçimi açısından daha verimli biçimde yönlendirilmesini esas almaktadır (Meyer, 1999). Bu yaklaşım, kent merkezlerine yönelen özel araç baskısının azaltılması, toplu taşımanın teşvik edilmesi ve kamusal alanların daha dengeli kullanılması açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Özellikle kent merkezleri gibi fiziksel kapasitesi sınırlı alanlarda, talep yönetimi politikaları yalnızca trafik sıkışıklığını azaltmak için değil; aynı zamanda erişilebilirliği artırmak, çevresel etkileri sınırlamak ve ulaşım türleri arasında daha dengeli bir dağılım sağlamak için de kullanılmaktadır. Bu kapsamda park politikaları, fiyatlandırma stratejileri, araç erişim kısıtlamaları, aktarma sistemleri ve toplu taşıma hizmet kalitesini artırmaya yönelik düzenlemeler, talep yönetiminin temel araçları arasında yer almaktadır.

Bu bölümde önerilen analitik çerçeve de esasen bu yaklaşım üzerine kurulmaktadır. Başka bir ifadeyle amaç, kent merkezine yönelen özel araç talebini yalnızca ölçmek değil; aynı zamanda bu talebin hangi politika araçları ve hangi hizmet koşulları altında toplu taşımaya yönlendirilebileceğini sistematik bir biçimde değerlendirmektir.

### **3. ÖZEL ARAÇ KULLANICILARININ TOPLU TAŞIMAYA YÖNLENDİRİLMESİ**

Bu bölümde sunulan yaklaşım, belirli bir kente özgü uygulama sonuçlarından ziyade, farklı kentsel bağlamlara uyarlanabilir bir analiz ve planlama çerçevesi sunmayı amaçlamaktadır. Bu nedenle, anket uygulamalarına ilişkin detaylı soru setleri yerine, veri toplama sürecinin kapsamı ve içeriği metodolojik düzeyde ele alınmıştır. Şekil 1.'de kent merkezine yönelen özel araç kullanıcılarının toplu taşımaya yönlendirilmesine yönelik metodolojik çerçeve ve analiz süreci gösterilmiştir.



**Şekil 1. Kent merkezine yönelen özel araç kullanıcılarının toplu taşımaya yönlendirilmesine yönelik metodolojik çerçeve ve analiz süreci (Yalınız, 2006'dan uyarlanmıştır).**

Özel araç kullanıcılarının toplu taşımaya yönlendirilmesi, sürdürülebilir ulaşım politikalarının en önemli bileşenlerinden biridir. Bu süreç, Şekil 1'de gösterildiği üzere kısıtlayıcı önlemlerin belirlenmesi, kullanıcı davranışlarının veri toplama yoluyla değerlendirilmesi ve model/senaryo temelli

talep yönetimi aşamalarını içeren bütüncül bir analiz çerçevesinden oluşmaktadır.

### **3.1. Kısıtlayıcı Önlemler**

Kent merkezine araç girişini azaltmaya yönelik önlemler şunlardır:

- Fiziksel kısıtlamalar (yaya bölgeleri)
- Otopark politikaları
- Fiyatlandırma stratejileri.

Bu önlemler birlikte uygulandığında daha etkili sonuçlar vermektedir.

Bu önlemler, tek başlarına uygulandıklarında sınırlı etki oluşturabilmektedir. Örneğin yalnızca park ücretlerinin artırılması, yeterli toplu taşıma alternatifi bulunmadığında kullanıcı davranışında beklenen değişimi yaratmayabilir. Benzer biçimde yalnızca fiziksel kısıtlama getirilmesi de, erişim ihtiyacını ortadan kaldırmadığı için kullanıcıların farklı alanlarda yeni sorunlar üretmesine neden olabilir. Bu nedenle kısıtlayıcı önlemlerin bir bütün olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Talep yönetiminde başarı, çoğu zaman birden fazla politika aracının eşgüdüm içerisinde uygulanmasına bağlıdır. Park kısıtlamaları, fiyatlandırma stratejileri ve toplu taşıma hizmet iyileştirmeleri birbirini desteklediğinde, kullanıcıların özel araçtan vazgeçme eğilimi daha belirgin hale gelmektedir. Bu durum, yalnızca zorlayıcı önlemler ile değil, aynı zamanda alternatif ulaşım biçimlerinin çekiciliğinin artırılması ile açıklanabilir.

Bu çerçevede kent merkezlerinde uygulanacak politikaların, erişim kısıtı getiren önlemler ile hizmet kalitesini yükselten önlemler arasında denge kurması gerekir. Aksi halde

kullanıcılar açısından sistem adil, kabul edilebilir ve uygulanabilir görünmeyebilir. Dolayısıyla önerilen metodolojik çerçeve içerisinde, kısıtlayıcı önlemler yalnızca tekil müdahaleler olarak değil; kullanıcı davranışları üzerindeki birleşik etkileri bakımından değerlendirilmelidir.

### **3.2. Veri Toplama ve Davranışsal Değerlendirme Yaklaşımı**

Bu çalışmada, özel araç kullanıcılarının toplu taşımaya yönlendirilmesine yönelik stratejilerin geliştirilmesinde veri toplama süreci önemli bir aşama olarak ele alınmaktadır. Bu kapsamda anket çalışmaları, kullanıcı davranışlarının ve tercih eğilimlerinin belirlenmesinde temel araçlardan biri olarak önerilmektedir.

Ancak bu bölümde belirli bir anket uygulaması ya da örnek anket formu sunulmamaktadır. Bunun yerine, farklı kentlerde uygulanabilecek esnek ve uyarlanabilir bir yöntem çerçevesi ortaya konulmaktadır. Çünkü her kentin ulaşım yapısı, kullanıcı profili ve sorun alanları farklılık göstermekte olup, kullanılacak anket sorularının da bu yerel koşullara göre şekillendirilmesi gerekmektedir.

Bu doğrultuda, önerilen yaklaşım kapsamında anket çalışmalarının aşağıdaki başlıkları kapsayacak şekilde tasarlanması önerilmektedir:

- Özel araç kullanım alışkanlıklarını,
- Park etme davranışlarını,
- Toplu taşımaya yönelik tutumları,
- Farklı politika senaryolarına karşı kabul düzeylerini ölçmeye yönelik olarak tasarlanması önerilmektedir.

Dolayısıyla bu bölümde sunulan yaklaşım, belirli bir uygulamaya bağlı kalmadan, araştırmacı ve uygulayıcılara kendi

çalışma alanlarına uygun veri toplama sürecini tasarlayabilecekleri bir metodolojik çerçeve sunmaktadır.

### **3.3. Kent Merkezi ile İlişkili Otomobil Kullanıcılarının Belirlenmesine Yönelik Model ve Parametreler**

Kent merkezi ile ilişkili otomobil kullanıcılarının belirlenmesi, özel araç talebinin yönetilmesine yönelik geliştirilecek stratejilerin temelini oluşturmaktadır. Bu nedenle, analiz sürecinin ilk aşamalarından biri, kent merkezine yönelen özel araç kullanımının nicel olarak ortaya konulmasıdır. Şekil 1’de verilen süreç kapsamında model aşamasına geçilmektedir.

Bu kapsamda geliştirilen model, kentsel yolculuk davranışlarını etkileyen temel parametrelerin birlikte değerlendirilmesine dayanmaktadır. Model kapsamında kullanılan başlıca parametreler aşağıda verilmiştir:

- **Nüfus ( $P$ ):** Çalışma alanında yaşayan toplam nüfusu ifade eder. Nüfus, ulaşım talebinin temel belirleyicisidir ve geleceğe yönelik projeksiyonlarda dikkate alınmalıdır.

- **Hareketlilik ( $M$ ):** Kişi başına düşen ortalama günlük yolculuk sayısını ifade eder. Bu değer, kentnin sosyo-ekonomik yapısına ve ulaşım alışkanlıklarına bağlı olarak değişmektedir.

- **Türlere Göre Otomobil Kullanım Oranı ( $A_{ms}$ ):** Günlük yolculuklar içerisinde özel otomobil kullanımının payını ifade eder.

- **Kent Merkezine Çekilen Yolculuk Oranı ( $\alpha$ ):** Toplam yolculuklar içerisinde kent merkezine yönelen yolculukların oranını ifade eder. (Yalınız, 2006)

Bu parametreler birlikte değerlendirilerek, kent merkezi ile ilişkili otomobil kullanıcı sayısı aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilmektedir:

$$M_{ok}=P \times M \times A_{ms} \times \alpha \quad (\text{Yalınız, 2006}) \quad (1)$$

Burada;

- $M_{ok}$ : Kent merkezi ile ilişkili otomobil kullanıcı sayısı
- $P$ : Nüfus
- $M$ : Hareketlilik
- $A_{ms}$ : Otomobil kullanım oranı
- $\alpha$ : Kent merkezine çekilen yolculuk oranı olarak tanımlanmaktadır.

Bu eşitlik, kent merkezine yönelik özel araç talebinin temel bileşenlerini bir araya getirerek, ulaşım planlamasında kullanılabilir pratik ve uygulanabilir bir model sunmaktadır.

Modelin sağlıklı bir şekilde uygulanabilmesi için, kent genelinde yolculuk üretim ve çekim değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, kent ulaşım planlarında yaygın olarak kullanılan zon bazlı analiz yaklaşımı tercih edilmelidir. Kent, analiz bölgelerine ayrılarak her bir bölge için;

- Nüfus
- İstihdam
- Eğitim kurumları
- Sağlık tesisleri
- Gelir düzeyi

gibi değişkenler dikkate alınarak yolculuk üretim ve çekim değerleri hesaplanmalıdır.

Elde edilen bu değerler doğrultusunda, kent genelindeki toplam yolculuk sayısı ile kent merkezine yönelen yolculuk sayısı belirlenerek aralarındaki oran ortaya konulmaktadır. Bu oran, modelde önemli bir çarpan olarak kullanılmakta ve kent

merkezi ile ilişkili otomobil kullanıcılarının belirlenmesinde doğrudan etkili olmaktadır.

Ayrıca, ulaşım sistemlerinin dinamik yapısı göz önünde bulundurularak analiz sürecinde zaman boyutunun da dikkate alınması gerekmektedir. Bu kapsamda model, yalnızca mevcut durumu değil, belirli dönemler için öngörülen değişimleri de kapsayacak şekilde kurgulanmalıdır. Böylece model, farklı senaryolar altında güncellenebilir ve uzun vadeli planlamalarda etkin bir şekilde kullanılabilir.

Kent merkezi ile ilişkili otomobil kullanıcı sayısının doğru bir şekilde belirlenmesi, özel araç kullanımının azaltılmasına yönelik politika ve stratejilerin geliştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu aşamada elde edilen veriler, sonraki aşamalarda gerçekleştirilecek senaryo analizleri ve toplu taşımaya yönlendirme stratejilerinin temel girdisini oluşturmaktadır.

### **3.4. Kent Merkezi ile İlişkili Otomobil Sayısının Belirlenmesi**

Kent merkezi ile ilişkili otomobil kullanıcı sayısının belirlenmesinden sonra, bir sonraki aşama bu kullanıcıların oluşturduğu özel araç talebinin taşıt bazında ortaya konulmasıdır. Bu aşama, kent merkezine yönelen toplam otomobil sayısının tahmin edilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Çünkü ulaşım politikalarının uygulanabilirliği, yalnızca yolcu sayısının değil, aynı zamanda bu yolculukları üreten araç sayısının da bilinmesini gerektirir.

Bu kapsamda, kent merkezi ile ilişkili otomobil kullanıcı sayısının otomobil doluluk oranı ile birlikte değerlendirilmesi gerekir. Otomobil doluluk oranı, belirli bir zaman diliminde özel araç başına düşen ortalama kişi sayısını ifade etmektedir. Kent genelinde farklı noktalarda, özellikle zirve saatlerde yapılacak trafik sayımları ve gözlem çalışmaları aracılığıyla bu oran

belirlenebilir. Böylece kent merkezi ile ilişkili otomobil kullanıcı sayısı, araç bazına indirgenerek kent merkezine yönelen otomobil sayısı hesaplanabilmektedir.

Bu yaklaşım, yalnızca mevcut özel araç baskısının nicel olarak ortaya konulmasına değil, aynı zamanda uygulanacak park yönetimi, erişim kısıtlaması ve toplu taşıma teşvikleri gibi politikaların etki alanının belirlenmesine de katkı sağlamaktadır. Dolayısıyla otomobil sayısının belirlenmesi, ulaşım talep yönetimi stratejilerinin mekânsal ve işlevsel düzeyde planlanabilmesi açısından temel bir aşamadır.

### **3.5. Merkeze Gelen ve Gün İçinde Park Eden Araçların Değerlendirilmesi**

Kent merkezine gelen tüm özel araçlar, aynı davranışsal özelliklere sahip değildir. Bu nedenle analiz sürecinde, kent merkezine yönelen araçların yalnızca giriş yapan toplam araç sayısı üzerinden değil, gün içerisinde merkezde park etme davranışı gösteren araçlar üzerinden ayrıca değerlendirilmesi gerekir. Özellikle yol kenarı park sorunlarının yoğunlaştığı merkez alanlarda, bu araç grubu kentsel trafik işleyişi üzerinde doğrudan belirleyici olmaktadır.

Gün içinde kent merkezinde park eden araçların belirlenmesi, park talebinin büyüklüğünü ortaya koyduğu gibi, “park et-bin” türü uygulamaların potansiyel kullanıcı kitlesini de tanımlamaktadır. Bu çerçevede, kent merkezine gelen araçların ne kadarının kısa süreli erişim amacıyla, ne kadarının ise uzun süreli park amacıyla merkezde bulunduğu belirlenmesi önemlidir. Böyle bir ayırım, özellikle toplu taşıma ile entegrasyon stratejilerinin geliştirilmesinde planlamacıya önemli avantajlar sağlar.

Bu aşamada elde edilen veriler, kent merkezinde otopark düzenlemelerinin yeniden yapılandırılması, ücretlendirme politikalarının geliştirilmesi ve merkez dışı aktarma alanlarının

planlanması için temel veri niteliğindedir. Aynı zamanda bu değerlendirme, hangi kullanıcı grubunun toplu taşımaya yönelmeye daha yatkın olduğunun anlaşılmasına da yardımcı olmaktadır.

### **3.6. Senaryo Tabanlı Talep Yönetimi Yaklaşımı**

Özel araç kullanıcılarının toplu taşımaya yönlendirilmesine yönelik politikaların etkili biçimde değerlendirilebilmesi için senaryo tabanlı bir yaklaşım benimsenmelidir. Çünkü kullanıcı davranışları, yalnızca mevcut koşullara değil, aynı zamanda uygulanacak politikaların niteliğine ve toplu taşıma sisteminin sunduğu hizmet düzeyine göre de değişmektedir. Bu nedenle farklı politika bileşimleri altında ortaya çıkabilecek davranışsal tepkilerin önceden analiz edilmesi gerekir. Bu bölüm Şekil 1’de sunulan akışın senaryo oluşturma aşamasını oluşturmaktadır.

Senaryo yaklaşımı kapsamında, kent merkezinde uygulanabilecek kısıtlayıcı önlemler ile toplu taşımanın çekiciliğini artırıcı düzenlemeler birlikte ele alınabilir. Örneğin yol kenarı parkın kaldırılması, park ücretlerinin artırılması, merkez dışı aktarma noktalarının oluşturulması, toplu taşıma hizmet sıklığının iyileştirilmesi ve araç içi konfor koşullarının geliştirilmesi gibi müdahaleler, farklı senaryolar halinde değerlendirilebilir.

Bu senaryoların temel amacı, özel araç kullanıcılarının hangi koşullarda toplu taşımaya geçmeye daha istekli olacaklarını belirlemektir. Böylece tek bir politika aracına dayalı yaklaşımlar yerine, birbiriyle uyumlu ve davranışsal olarak desteklenen politika setleri geliştirilebilir. Senaryo tabanlı değerlendirme, özellikle ulaşım planlamasında karar vericilere alternatifler arasında karşılaştırma yapma ve önceliklendirme imkânı sunmaktadır.

### **3.7. Toplu Taşımaya Kayma Potansiyelinin Değerlendirilmesi**

Toplu taşımaya kayma potansiyelinin belirlenmesi, geliştirilen modelin en önemli çıktılarından biridir. Bu değerlendirme, kent merkezine gelen özel araç kullanıcılarının ne kadarının belirli koşullar sağlandığında toplu taşımayı tercih edebileceğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle söz konusu aşama, hem ulaşım talep yönetiminin başarısını ölçmek hem de uygulanacak politikaların beklenen etkisini nicel biçimde ifade etmek açısından önemlidir.

Kullanıcıların toplu taşımaya yönelimleri üzerinde birçok etken rol oynamaktadır. Bunlar arasında toplu taşımanın erişilebilirliği, bekleme süresi, konfor düzeyi, güvenilirliği, aktarma kolaylığı ve seyahat süresi gibi hizmet düzeyi göstergeleri ön plana çıkmaktadır. Bunun yanında, kent merkezindeki park olanaklarının sınırlandırılması ve özel araç kullanım maliyetinin artırılması da kullanıcı tercihlerinde etkili olabilmektedir (Zhang et al., 2023).

Bu bağlamda, toplu taşımaya kayma potansiyeli yalnızca zorlayıcı politikaların sonucu olarak değil, aynı zamanda toplu taşımanın cazibesinin artırılmasıyla da ilişkili olarak ele alınmalıdır. Son yıllarda gelişen yeni nesil ulaşım hizmetleri ve dijitalleşme temelli mobilite çözümlerinin kullanıcı tercihleri üzerinde etkili olduğu görülmektedir (Shaheen & Cohen, 2020). Bu durum, politika üretiminde yalnızca kısıtlayıcı önlemlerin değil, aynı zamanda hizmet kalitesini artırmaya yönelik düzenlemelerin de birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

### **3.8. Uygulama İçin Yol Haritası**

Kent merkezine yönelen özel araç talebinin yönetimi, tek aşamalı bir müdahaleden ziyade, birbirini tamamlayan adımlardan oluşan bütüncül bir planlama süreci gerektirir. Bu

nedenle geliştirilen analitik çerçeve, uygulayıcılar için aşamalı bir yol haritası sunmalıdır.

İlk aşamada, kent merkezinde özel araç kullanımını etkileyen temel sorun alanları belirlenmelidir. Bu kapsamda trafik sıkışıklığı, yol kenarı park yoğunluğu, erişilebilirlik sorunları ve toplu taşıma hizmet düzeyi gibi unsurlar analiz edilmelidir. İkinci aşamada, kullanıcı davranışlarını anlamaya yönelik veri toplama süreci yürütülmeli; anketler, gözlemler ve sayımlar yoluyla özel araç kullanıcılarının tercih yapıları ortaya konulmalıdır.

Üçüncü aşamada, kent merkezi ile ilişkili otomobil kullanıcıları ve otomobil sayıları model yardımıyla hesaplanmalı; böylece müdahale alanının nicel boyutu belirlenmelidir. Dördüncü aşamada ise farklı senaryolar geliştirilerek, uygulanabilecek politika araçlarının etkileri karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmelidir. Son aşamada, elde edilen bulgular doğrultusunda yerel koşullara en uygun politika bileşimi belirlenmeli ve bu bileşim kademeli biçimde uygulamaya aktarılmalıdır.

Bu yol haritası, yalnızca mevcut sorunlara müdahale etmeyi değil, aynı zamanda gelecekte artması muhtemel ulaşım talebini de öngörerek uzun vadeli planlama yapılmasını mümkün kılmaktadır. Böylece kent merkezine yönelik özel araç baskısı daha yönetilebilir hale gelmekte ve sürdürülebilir ulaşım hedeflerine daha gerçekçi bir şekilde yaklaşılabilir.

### **3.9. Yöntemin Farklı Kentler İçin Uygulanabilmesi**

Bu bölümde sunulan yaklaşım, belirli bir kente özgü uygulama sonuçları üretmekten ziyade, farklı kentsel bağlamlara uyarlanabilecek bir planlama çerçevesi önermektedir. Kentlerin nüfus yapısı, mekânsal gelişim biçimi, toplu taşıma düzeyi, otomobil sahipliği oranı ve merkez alanlarının işlevsel özellikleri birbirinden farklı olduğu için, özel araç talebinin

yönetimine yönelik geliştirilecek stratejilerin de yerel koşullara duyarlı olması gerekmektedir.

Bu açıdan bakıldığında önerilen modelin en önemli avantajlarından biri, temel yapısını koruyarak farklı kentler için yeniden kurgulanabilmesidir. Modelde kullanılan nüfus, hareketlilik, otomobil kullanım oranı ve kent merkezine çekilen yolculuk oranı gibi parametreler, yerel verilerle yeniden tanımlanabilir. Aynı şekilde veri toplama sürecinde kullanılacak anket başlıkları, gözlem yöntemleri ve senaryo bileşenleri de her kentin ulaşım sorunlarına göre güncellenebilir.

Örneğin toplu taşıma sisteminin gelişmiş olduğu bir kentte, kullanıcıların toplu taşımaya geçiş kararında hizmet sıklığı ve konfor düzeyi daha belirleyici olabilirken; toplu taşıma altyapısının sınırlı olduğu kentlerde park et-bin sistemleri, çevresel erişim çözümleri ve aktarma kolaylığı daha önemli hale gelebilir. Benzer biçimde, tarihi kent merkezlerine sahip yerleşimlerde fiziksel erişim kısıtlamaları daha güçlü bir araç olarak kullanılabilirken, yaygın gelişmiş kent dokularında fiyatlandırma ve otopark yönetimi ön plana çıkabilir.

Bu nedenle bölümde geliştirilen analitik yapı, tek tip bir çözüm önermekten çok, karar vericilere ve araştırmacılara yerel koşullara göre özelleştirilebilecek esnek bir değerlendirme sistemi sunmaktadır. Bu özellik, önerilen yaklaşımın yalnızca teorik değil, aynı zamanda pratik planlama süreçlerinde de kullanılabilir olmasını sağlamaktadır.

#### **4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME**

Kent merkezine yönelen özel araç talebinin yönetimi, günümüz kent içi ulaşım planlamasının en önemli başlıklarından biridir. Artan nüfus, hareketlilik ve otomobil sahipliği, özellikle merkez alanlarda trafik sıkışıklığını, park sorunlarını ve

erişilebilirlik baskısını artırmaktadır. Bu nedenle özel araç kullanımının yalnızca altyapı artırımı yoluyla değil, talep yönetimi odaklı politikalarla ele alınması gerekmektedir.

Bu bölümde ortaya konulan analitik çerçeve, özel araç kullanıcılarının toplu taşımaya yönlendirilmesine yönelik sistematik bir yaklaşım sunmaktadır. Önerilen yapı; kısıtlayıcı önlemlerin belirlenmesi, kullanıcı davranışlarının değerlendirilmesi, kent merkezi ile ilişkili otomobil kullanıcı sayısının modellenmesi ve senaryo analizleri yoluyla toplu taşımaya kayma potansiyelinin belirlenmesi aşamalarından oluşmaktadır. Bu yönüyle yaklaşım, hem kuramsal hem de uygulamaya dönük bir planlama aracı niteliği taşımaktadır.

Ayrıca bu yaklaşım, farklı kentler için uyarlanabilir bir yapı sunmaktadır. Kentin nüfus yapısı, yolculuk alışkanlıkları, merkez çekim gücü ve toplu taşıma hizmet düzeyi gibi değişkenler dikkate alınarak model yeniden kurgulanabilir. Böylece bölümde sunulan çerçeve, yalnızca belirli bir örneğe dayalı olmaktan çıkmakta; daha geniş ölçekte sürdürülebilir ulaşım politikalarının geliştirilmesine katkı sağlayabilecek genellenebilir bir yöntem haline gelmektedir.

Kent merkezine yönelen özel araç talebinin yönetimi, yalnızca ulaşım mühendisliği açısından değil, aynı zamanda kentsel yaşam kalitesi, çevresel sürdürülebilirlik ve kamusal alan kullanımı açısından da değerlendirilmesi gereken çok boyutlu bir konudur. Bu nedenle geliştirilecek politikaların teknik hesaplara dayanması kadar, kullanıcı davranışlarını ve yerel yönetimlerin uygulama kapasitesini dikkate alması da önem taşımaktadır. Bu bölümde önerilen yaklaşım, söz konusu çok boyutlu yapıyı gözeterak özel araç talebinin azaltılmasına yönelik kararların daha sistematik ve karşılaştırılabilir biçimde alınmasına katkı sunmaktadır.

Ayrıca, bu çerçeve gelecekte yapılacak ampirik çalışmalar için de bir temel oluşturmaktadır. Bölümde tanımlanan veri toplama başlıkları, model parametreleri ve senaryo oluşturma ilkeleri, farklı kentlerde uygulanacak araştırmalar için başlangıç noktası olarak kullanılabilir. Böylece önerilen yöntem, yalnızca kavramsal bir açıklama sunmakla kalmayıp, ileride geliştirilecek uygulamalı çalışmaların metodolojik altyapısını da oluşturmaktadır.

Sonuç olarak, kent merkezlerinde özel araç talebinin azaltılması ve toplu taşımanın teşvik edilmesi için geliştirilecek politikaların, davranışsal verilerle desteklenen analitik modellere dayanması büyük önem taşımaktadır. Bu tür yaklaşımlar, karar vericilere yalnızca mevcut durumu açıklamakla kalmaz; aynı zamanda hangi müdahalenin hangi ölçüde etkili olabileceğine ilişkin öngörü sunarak daha rasyonel ve sürdürülebilir ulaşım kararlarının alınmasına yardımcı olur.

## **KAYNAKÇA**

- Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, 15(2), 73–80.
- Broadbuss, A., Cervero, R. (2019). Transportation planning. In N. L. Long, S. W. French, & B. B. Stein (Eds.), *The Routledge Handbook of International Planning Education*. Routledge.
- Elker, C. H. (2002). *Ulaşımında Politika ve Pratik*. Ankara: Gölge Ofset Matbaacılık.
- Gülgeç, İ. (1998). *Ulaşım Planlaması*. Bursa: Özsan Matbaası.
- Meyer, M. D. (1999). Demand management as an element of transportation policy: Using carrots and sticks to influence travel behavior. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 33(7–8), 575–599.
- Shaheen, S., Cohen, A. (2020). Mobility on demand (MOD) and mobility as a service (MaaS): Early understanding of shared mobility impacts and public transit partnerships. *Demand for Emerging Transportation Systems* (pp. 37–59). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815018-4.00003-6>
- Yalınız, P. (2006). *Kentsel Ulaştırımda Otomobil Kullanıcılarının Toplu Taşımaya Yönlendirilmesi: Çevresel Etkileri İçeren Analiz ve Planlama*, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Zhang, H., Zhang, L., Liu, Y., & Zhang, L. (2023). Understanding travel mode choice behavior: Influencing factors analysis and prediction with machine learning method. *Sustainability*, 15(14), 11414. <https://doi.org/10.3390/su151411414>

# **THE EVOLUTION OF DROUGHT MONITORING METHODS: FROM GROUND- BASED OBSERVATIONS TO SATELLITE- BASED SYSTEMS**

**Emre TOPÇU<sup>1</sup>**

## **1. INTRODUCTION**

Drought, while a natural component of the hydrological cycle, has become a more pronounced and destructive environmental process in recent years due to the increasing impacts of climate change and human activities on a global scale. The decrease in the amount of precipitation, irregularities in the temporal and spatial distribution of rainfall, and rising temperatures are among the key factors directly affecting the formation of drought. However, anthropogenic factors such as population growth, urbanization, the intensification of agricultural irrigation activities, and the unplanned use of water resources have caused drought to evolve from merely a natural event into a complex environmental and socio-economic problem. Drought, unlike other natural disasters, is a process that does not develop suddenly, progresses slowly, and whose effects accumulate over time. Therefore, it is often defined in the literature as a "slow-onset disaster." (Wilhite, 2000). This characteristic of drought makes early detection difficult and often leads to its effects being noticed late. Especially the delayed effects observed on hydrological systems necessitate that drought analyzes be evaluated not only with short-term data but also with

---

<sup>1</sup> Assoc. Prof. Dr., Kafkas University, Faculty of Engineering and Architecture, Civil Engineering Department, ORCID: 0000-0003-0728-7035.

long-term observation series. Drought can be defined in different ways from different disciplinary perspectives. Meteorological drought is characterized by a prolonged lack of precipitation in a specific area, while agricultural drought is related to the insufficient soil moisture necessary for plant growth. Hydrological drought, on the other hand, is defined by reductions in river flows, lake levels, and groundwater resources (Dracup et al., 1980). Socio-economic drought, on the other hand, encompasses the impacts of water scarcity on economic activities and social life. This multidimensional structure makes the process of monitoring and analyzing drought quite complex (Wilhite and Glantz, 1985; Mishra and Singh, 2010). Drought monitoring studies refer to a set of methods developed to accurately assess this complex structure. These methods aim to determine the formation process, intensity, duration, and spatial distribution of drought. However, when the methods of drought monitoring are examined historically, it is seen that the developments in this field are largely dependent on advancements in data collection technologies and analytical capacities. In the early periods, analyzes based solely on terrestrial observations were insufficient for assessing drought on a regional and global scale due to limited data capacity. Index-based approaches developed to overcome these limitations have enabled drought to be expressed in a standardized manner and have allowed for comparable analyzes between different regions. In the subsequent process, the use of geographic information system (GIS) technologies added a spatial dimension to drought analysis and made it possible to map drought distributions over large areas. However, since these methods are largely dependent on terrestrial data, issues such as data deficiency and irregular station distribution have persisted. With the development of satellite technologies, a significant paradigm shift has occurred in drought monitoring studies. Thanks to remote sensing methods, large areas can be continuously and regularly monitored, which allows for a better

understanding of the temporal and spatial dynamics of drought. Especially vegetation indices, soil moisture data, and surface temperature measurements have become important data sources in drought analysis. However, the reliance of satellite data on indirect measurements necessitates the evaluation of these data alongside ground observations. Nowadays, drought monitoring studies are conducted using multidimensional approaches based on the integration of different data sources. The combined use of terrestrial observations, satellite data, and hydrological model outputs ensures that drought analyzes become more reliable and comprehensive. Additionally, machine learning and artificial intelligence techniques play a significant role in the development of drought prediction and early warning systems by enabling the analysis of large data sets. In this section, the historical development of drought monitoring methods is addressed within a framework extending from terrestrial observations to satellite-based and integrated systems. The advantages, limitations, and application areas of each approach are examined in detail, and the fundamental components of modern drought monitoring systems are presented. In this context, the study aims to systematically present the evolution of methods used in the field of drought monitoring, providing a conceptual framework for methods to be developed in the future.

## **2. APPROACHES BASED ON GROUND OBSERVATIONS**

The first and most fundamental stage in the historical development of drought monitoring studies is ground-based observation data collection systems. This approach is based on the direct measurement of atmospheric and hydrological processes, constituting the oldest and most reliable data sources for drought analysis. Meteorological variables such as

precipitation amount, air temperature, relative humidity, wind speed and direction, sunshine duration, and evaporation, as well as hydrological parameters like river discharge, lake levels, and groundwater levels, constitute the fundamental components of these systems. Ground observation systems are generally conducted thru meteorological stations and hydrometric measurement points. Meteorological stations continuously monitor atmospheric conditions to produce long-term data series, while flow observation stations track changes in river discharges. Groundwater observation wells, on the other hand, contribute to the determination of hydrological drought by monitoring changes in aquifer systems. These measurement networks form the basic data infrastructure for drought analysis. The most significant advantage of terrestrial observations is that they provide high accuracy and reliability due to being based on direct measurements. The measured data directly represent physical processes, thereby minimizing uncertainties arising from modeling or prediction processes. This situation makes terrestrial data indispensable, especially in hydrological analyzes. Additionally, long-term observation records are of great importance in determining the frequency and severity of droughts. However, terrestrial observation systems also have significant limitations. The most fundamental issue is the limited spatial coverage. Since measurement stations are generally positioned at specific points, they are insufficient to represent the heterogeneous structure of large areas. Especially in mountainous regions with complex topography and semi-arid areas, the large distance between stations reduces the representativeness of the data. This situation makes it difficult to accurately determine the spatial distribution of drought. Another important limitation is related to data continuity and data quality. Malfunctions in measurement devices, lack of maintenance, and human errors can create gaps and inconsistencies in data sets. Especially in long-term analyzes, such data gaps directly affect the reliability of the

results. In addition, the complete absence of stations or their insufficient number in some regions makes the data deficiency even more pronounced. Another disadvantage of terrestrial observations is the high cost of data collection and operation. The installation of new stations, the maintenance of existing systems, and the data management processes require significant economic resources. This situation is a significant factor that limits the expansion of observation networks, especially in developing countries. The use of local data in drought analysis is generally based on the application of specific threshold values and statistical methods. For example, periods that fall below the long-term average rainfall values can be defined as drought. However, such approaches make it difficult to compare different climate regions and do not provide a standard evaluation framework. These limitations have paved the way for the development of more advanced and systematic methods in drought monitoring studies. Especially the problems of data deficiency and spatial representation have led researchers to index-based approaches where drought can be quantitatively expressed. In this context, while terrestrial observations continue to be an important data source in the development of subsequent methods, they have ceased to be a sufficient analytical tool on their own. Today, terrestrial observations are still considered an indispensable component of drought monitoring studies. However, these data are generally used in conjunction with satellite-based observations and modeling techniques, thereby obtaining more comprehensive and reliable analyzes. This situation indicates that the role of terrestrial observation systems in drought monitoring studies continues to evolve. In conclusion, ground-based observation approaches form the foundation of drought monitoring studies and maintain their importance today due to the high accuracy they provide. However, limitations such as spatial coverage, data continuity, and cost render the use of these methods alone insufficient and necessitate the development of

more advanced analytical techniques. This development process has laid the groundwork for the emergence of index-based approaches, which represent the next stage in the evolution of drought monitoring methods.

### **3. DEVELOPMENT OF INDEX-BASED APPROACHES**

The limitations of drought analyze based on terrestrial observations, particularly their inadequacies in producing comparable results across different regions and time periods, have necessitated the development of new methods to quantitatively express drought. In this context, the index-based approaches developed have marked a significant milestone in drought monitoring studies and have allowed for the standardized assessment of drought. Indexes numerically express the severity, duration, and frequency of drought by combining different hydro-meteorological variables into a single scale. When examining the development of drought indices, it is observed that the first comprehensive approach was the Palmer Drought Severity Index (PDSI). PDSI is a model based on the principle of water balance that evaluates precipitation, temperature, and soil properties together. This index defines drought conditions based on the disruption of the balance between water supply and demand in a specific region. The most significant advantage of the PDSI is that it is sensitive not only to precipitation data but also to hydrological processes such as evapotranspiration and soil moisture. However, despite this advantage, the complex calculation structure and fixed parameters of the PDSI limit its applicability in different climate regions. It is particularly noted that the index's performance is low in semi-arid and tropical regions (Palmer, 1965; Alley, 1984). Developed to overcome the limitations of the PDSI, the Standardized Precipitation Index

(SPI) has become one of the most widely used methods in drought analysis. SPI is based solely on precipitation data and expresses the deviation of precipitation from the long-term average by standardizing it over a specific time scale (e.g., 1, 3, 6, 12 months). This approach allows for direct comparison between different regions. The most significant advantage of SPI is its ease of calculation and low data requirements. Therefore, it can even be applied in regions where data deficiency is common (McKee et al., 1993). Another important feature of SPI is that it allows for analysis at different time scales. Short time scales reflect meteorological drought, while long time scales better represent hydrological drought processes. This situation allows for the separate evaluation of different stages of drought. However, the fact that SPI is based solely on precipitation data causes it to overlook the effects of temperature increases and evapotranspiration processes. This situation constitutes a significant limitation, especially in regions where the effects of climate change are pronounced. Developed to address this deficiency, the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) offers a more comprehensive assessment of drought analysis by incorporating the temperature effect. SPEI is based on the water balance approach and takes into account the difference between precipitation and potential evapotranspiration. In this way, the impact of rising temperatures on water demand is integrated into drought analysis. SPEI stands out as an important tool, especially in examining the effects of global warming on drought (Vicente-Serrano et al., 2010). Index-based approaches have not been limited to meteorological data alone; over time, different indices evaluating hydrological and agricultural droughts have also been developed. For example, the Standardized Streamflow Index (SSI), based on river discharges, is used in the assessment of hydrological drought. Similarly, soil moisture-based indices play an important role in determining agricultural drought. These developments have made it possible

to evaluate the different components of drought analysis separately. However, some limitations of index-based approaches persist. These methods are largely dependent on terrestrial data and struggle to produce reliable results in areas with data scarcity. Additionally, the fact that different indices produce different results can create uncertainty in drought assessment. This situation indicates that the use of a single index is insufficient and that a multi-index approach is more appropriate.

#### **4. GIS-BASED SPATIAL ANALYSIS APPROACHES**

An important methodological leap in drought analysis has occurred with the use of geographic information systems (GIS) technologies. Ground-based observations and index-based approaches, while they can reveal the temporal dimension of drought to some extent, have limitations in accurately representing the spatial distribution. GIS technologies have addressed this deficiency, enabling the analysis of the spatial dynamics of drought and creating a new paradigm in drought monitoring studies. GIS-based approaches allow for the collection, analysis, and visualization of different types of data on the same platform. Thanks to these systems, point data obtained from meteorological stations can be generalized to large areas, and the regional distribution of drought can be expressed thru maps. Especially the determination of the spatial distribution of drought indices is of great importance for decision-makers. Such analyzes can be directly used in areas such as water resources management, agricultural planning, and disaster risk assessment. One of the most critical steps in GIS-based drought analyzes is the conversion of point data into spatial surfaces. This transformation is generally carried out thru interpolation methods. Interpolation is a statistical approach that allows for the

estimation of unknown areas based on known data points. In this context, the most commonly used methods include inverse distance weighting (IDW), spline, and kriging. The IDW method calculates the value of a point based on the distances of the surrounding observation points. In this method, nearby points have higher weights and have a greater influence on the estimated value. IDW, although a simple and fast method in terms of computation, may not provide reliable results in some cases due to its failure to consider the spatial correlation structure. The spline method, on the other hand, aims to mathematically model the surface smoothly and is particularly used in the representation of continuous variables. However, this method may not fully reflect the spatial structure of the data and may tend to over-smooth. The Kriging method is considered one of the most advanced interpolation techniques in GIS-based drought analyzes. This method takes into account not only the distance but also the spatial correlation between the data. Kriging produces more reliable predictions by modeling the relationship between data points using variogram analysis. Therefore, it yields more successful results compared to other methods, especially in areas with a heterogeneous structure (Goovaerts, 1997). GIS technologies are not limited to interpolation; they also allow for multi-criteria analyzes to be conducted. The simultaneous evaluation of different data layers (precipitation, temperature, soil type, land use, etc.) allows for a more comprehensive analysis of drought risk. Such analyzes are particularly used in the creation of regional drought sensitivity maps. Another significant advantage of GIS-based approaches is that they facilitate the visualization of results. Thru maps, graphs, and thematic visuals, the spatial distribution of drought can be clearly presented. This situation enables decision-makers and policymakers to better understand the risk of drought and develop appropriate strategies. However, there are some limitations to GIS-based drought analyzes. The accuracy of these methods largely depends on the

quality of the data set used. Insufficient data density, irregular station distribution, and measurement errors can lead to significant uncertainties in interpolation results. Additionally, the fact that different interpolation methods produce different results can make the interpretation of analyzes difficult. Another limitation is that GIS-based analyzes are generally static in nature. These analyzes mostly use data from a specific time period and may not fully reflect the dynamic nature of drought. This situation makes it difficult to track temporal changes and necessitates a continuous data flow. In conclusion, GIS-based spatial analysis approaches represent a significant development stage in drought monitoring studies. These methods provide significant contributions to determining the spatial distribution of drought and identifying risk areas. However, limitations such as data dependency and static analysis structure indicate that these methods alone are not sufficient. This situation has encouraged the development of remote sensing methods with broader area coverage capacity and the ability to provide continuous data, accelerating the transition to the next stage in the evolution of drought monitoring methods.

## **5. REMOTE SENSING AND SATELLITE-BASED APPROACHES**

The development of remote sensing technologies has created one of the most significant turning points in drought monitoring studies. While terrestrial observations and GIS-based analyzes provide a certain degree of spatial representation, they fall short in continuously and high-resolution monitoring of large areas. Satellite-based systems have largely eliminated this deficiency, making it possible to conduct drought analyzes on a global scale and with high temporal resolution. This situation has allowed drought to be addressed not only as a local or regional

event but also as a process that can be monitored on a global scale. Remote sensing is based on determining surface properties by making measurements in different bands of the electromagnetic spectrum without coming into contact with the Earth's surface. These measurements are particularly used in monitoring parameters directly related to drought, such as vegetation cover, soil moisture, and surface temperature. The wide area coverage capacity and regular data production provided by satellite data enable a detailed analysis of the temporal development of drought. One of the most commonly used remote sensing indicators in drought monitoring studies is the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). NDVI is calculated using reflectance values measured in the red and near-infrared bands and reflects the density and health of vegetation. While healthy and dense vegetation is represented by high NDVI values, an increase in plant stress under drought conditions is observed as a decrease in NDVI values. Therefore, NDVI is used as an effective tool, especially in monitoring agricultural drought (Rouse et al., 1974). In addition to NDVI, different derivative indices such as the Enhanced Vegetation Index (EVI) and the Vegetation Health Index (VHI) have also been developed. These indices are designed to reduce atmospheric effects and to determine changes in vegetation cover more accurately. Especially, it evaluates plant stress more comprehensively by combining VHI, NDVI, and surface temperature data. Another important application of remote sensing data is the monitoring of soil moisture. Soil moisture is a critical parameter in terms of the hydrological and agricultural dimensions of drought. Satellite-based soil moisture measurements are conducted thru microwave sensors. These sensors can collect data without being affected by atmospheric obstacles such as cloud cover and can determine soil moisture distribution over large areas. Soil moisture data play an important role, especially in detecting the early stages of drought. Surface temperature data is also used as an important parameter in drought

analysis. Rising temperatures accelerate evapotranspiration processes and increase water loss. Satellite-based surface temperature measurements contribute to the monitoring of evaporation processes and the identification of water stress. These data, especially when used in conjunction with NDVI, enable a more comprehensive assessment of drought conditions. One of the most important advantages of remote sensing data is the continuous and regular production of data. Satellite systems create time series data by observing the same region at regular intervals, allowing for detailed monitoring of the temporal development of drought. This situation is of great importance in determining the onset, development, and cessation of drought events. However, remote sensing methods also have some limitations. Firstly, these data are based not on direct measurements but on reflection values and model-based calculations. This situation causes them to contain a certain level of uncertainty. Additionally, cloud cover and atmospheric conditions can negatively affect the data collection of some sensors. Especially optical sensors cannot provide data under dense cloud cover. Another important limitation is the need for local validation of remote sensing data. The reliability of satellite data is tested by comparing it with terrestrial observations, and its accuracy is enhanced thru calibration processes. Therefore, instead of using remote sensing methods alone, evaluating them in conjunction with terrestrial observations yields more accurate results. In recent years, more comprehensive drought analyzes have begun to be conducted by using data obtained from different satellite systems together. The use of multiple sensors allows for the combination of the advantages of different data sources, resulting in higher accuracy outcomes. This approach highlights the importance of data integration in drought monitoring studies. In conclusion, remote sensing and satellite-based approaches have brought about a significant transformation in drought monitoring studies, enabling the continuous and high-resolution

monitoring of large areas. These methods contribute to a better understanding of the spatial and temporal dynamics of drought. However, their reliance on indirect measurements and calibration requirements necessitate the use of these methods alongside ground observations. This situation has laid the groundwork for the next stage in the evolution of drought monitoring methods, which is the development of integrated and multi-source approaches.

## **6. INTEGRATED AND MODERN APPROACHES**

When examining the historical development of drought monitoring methods, it is clearly seen that analyzes based on a single data source or method are insufficient to fully reflect the complex and multidimensional nature of drought. This situation has necessitated the development of integrated approaches that utilize different types of data and analysis techniques together. Today, drought monitoring studies are based on multilayered systems where ground observations, satellite data, and numerical model outputs are evaluated together. The main objective of integrated approaches is to combine the advantages of different data sources to achieve more reliable, comprehensive, and higher accuracy results. While terrestrial observations provide high accuracy, satellite data offers the advantage of wide area coverage, and modeling techniques allow for predictions in areas where data is lacking. The combined use of these three fundamental components provides a significant quality improvement in drought analyzes. In this context, data fusion techniques stand out as one of the most critical components of integrated drought monitoring systems. Data fusion refers to the process of combining data obtained from different sources and evaluating it within a single analytical framework. In this process, appropriate integration methods are applied by considering the

resolutions, accuracy levels, and time intervals of different data sets. For example, by combining satellite data with high spatial resolution and terrestrial measurements with high accuracy, data sets optimized in terms of both accuracy and coverage can be created. Another important component of integrated approaches is hydrological and climate models. These models mathematically represent the different components of the water cycle, enabling the simulation of drought processes. Especially in regions where there is a lack of data, model outputs are used as an important supporting element in drought analyzes. However, the accuracy of the model results largely depends on the quality of the data sets used and the proper calibration of the model parameters. In recent years, the use of machine learning and artificial intelligence methods in drought monitoring and prediction studies has significantly increased. These methods contribute to a better understanding of drought processes due to their ability to analyze complex relationships within large datasets. Especially the algorithms used in the analysis of time series data can learn from past data to predict future drought conditions (Mishra and Singh, 2011). Among machine learning methods, algorithms such as artificial neural networks, support vector machines, and decision trees stand out. These methods have the capacity to evaluate different types of data within the same model and can successfully model non-linear relationships. The deep learning techniques developed in recent years, on the other hand, can produce highly accurate predictions, especially on large datasets, and are creating a new paradigm in drought analysis. Another important application area of integrated drought monitoring systems is early warning systems. Early warning systems ensure the early identification of drought risk and the timely implementation of necessary measures. These systems analyze information obtained from different data sources to assess the probabilities of drought occurrence and provide information to decision-makers. Especially in the agricultural

sector, early warning systems play a critical role in reducing crop losses. However, the implementation of integrated approaches also brings some challenges. The integration of different data sources raises issues of data compatibility and standardization. Additionally, using data sets with different resolutions together can complicate the analysis processes. Therefore, data preprocessing, quality control, and calibration processes are of great importance for the success of integrated systems. Another significant challenge is related to computational costs. Processing large datasets and running complex models require high computational power. However, the development of cloud computing technologies in recent years has made it possible to carry out such analyzes more quickly and at a lower cost. In conclusion, integrated and modern approaches represent the most advanced stage in drought monitoring studies. These approaches enable a more accurate and comprehensive assessment of drought processes by utilizing different data sources and analysis techniques together. However, challenges such as data integration, model calibration, and computational costs constitute the areas that need improvement in these methods. In the future, advancements in artificial intelligence and big data technologies are expected to contribute to the further development of drought monitoring systems.

## **7. COMPARATIVE EVALUATION OF METHODS**

The historical development of drought monitoring methods reflects a process in which different data sources and analysis techniques have emerged sequentially and evolved over time to complement each other. In this process, terrestrial observations, index-based approaches, GIS-based spatial analyzes, remote sensing techniques, and integrated systems have contributed to the understanding of different dimensions of

drought. However, each of these methods, while offering certain advantages, also contains various limitations. Therefore, the comparative evaluation of methods in drought monitoring studies is of critical importance for determining appropriate analysis strategies. Ground-based observation-based approaches represent the data sources that provide the highest accuracy in drought analysis. These methods reliably reflect physical processes because they are based on direct measurements. Especially in hydrological analyzes, data such as river flows and groundwater levels reveal the true impacts of drought. However, the most significant disadvantage of terrestrial observations is their limited spatial coverage. In regions where the number of stations is insufficient, data representation weakens, and this negatively affects the accuracy of drought analyzes. Additionally, issues such as data continuity and measurement errors are also among the limitations of this method. Index-based approaches offer a significant advantage by allowing drought to be expressed in a standardized manner. Thanks to these methods, comparisons can be made between different regions and time periods, and drought severity can be evaluated numerically. Especially indices like SPI and SPEI are widely used in drought analysis (McKee et al., 1993; Vicente-Serrano et al., 2010). However, these methods are largely dependent on terrestrial data and are limited in areas where data is lacking. Additionally, the ability of different indices to produce varying results can create uncertainty in drought assessment. GIS-based spatial analysis approaches play an important role in determining the spatial distribution of drought data. These methods enable the spatial analysis of drought risk by allowing point data to be represented on a field basis. Especially interpolation techniques make it possible to make predictions in areas where there is a lack of data. However, the accuracy of GIS-based analyzes largely depends on data quality. Low station density and irregular data distribution can reduce the reliability of these methods. Additionally, the generally static nature of these

analyzes leads to an insufficient representation of the temporal dynamics of drought. Remote sensing and satellite-based approaches offer significant advantages in drought monitoring studies, such as wide area coverage capacity and continuous data production. Thanks to satellite data, drought can be monitored on a regional and global scale, and temporal changes can be analyzed in detail. Parameters such as NDVI, soil moisture, and surface temperature play an important role in assessing different aspects of drought. However, the fact that satellite data relies on indirect measurements and is affected by atmospheric conditions constitutes some limitations of these methods. Therefore, satellite data needs to be calibrated with ground observations. Integrated and modern approaches combine the advantages of different methods to achieve more comprehensive and reliable results. These systems are based on the combined use of terrestrial observations, satellite data, and model outputs. Thanks to data fusion techniques, different data sets are combined, and the accuracy of the analyzes is increased. Additionally, machine learning and artificial intelligence methods play an important role in drought prediction. These approaches, especially in the analysis of large datasets, demonstrate high performance. However, integrated approaches also involve some challenges. The harmonization of different data sources, ensuring data quality, and accurately determining model parameters directly affect the success of these systems. Additionally, high computational requirements can make the implementation of these methods difficult. However, technological advancements and the widespread adoption of cloud computing systems are making it easier to overcome such challenges. The comparative evaluation of drought monitoring methods clearly shows that a single method is not sufficient for all conditions. Therefore, the most effective approach today is the development of multi-source analysis systems that utilize different methods together. These systems produce more balanced results in drought analyzes by

providing both high accuracy and wide spatial coverage. In conclusion, the comparison of drought monitoring methods facilitates the understanding of the strengths and weaknesses of each approach and contributes to the identification of appropriate analysis strategies. It is expected that future drought monitoring systems will be designed based on the integration of these methods and will focus on improving data quality. In this context, interdisciplinary approaches and technological innovations will continue to play a decisive role in drought analysis.

## **8. CONCLUSION**

Drought monitoring methods have evolved from terrestrial observations to index-based approaches, GIS technologies, and satellite-based systems, now integrated with data fusion and artificial intelligence for more accurate analyses. Since drought is a multi-dimensional process involving meteorological, agricultural, and hydrological components, no single method is sufficient. A combined use of ground observations, satellite data, and modeling techniques ensures more reliable results. Despite these advances, key challenges remain: data deficiency, particularly in developing countries, irregular station distribution, and inconsistencies in integrating different data sources continue to hinder analysis accuracy. Satellite data, while offering broad spatial coverage, relies on indirect measurements and requires calibration with ground observations. Machine learning and deep learning methods have brought significant progress in drought prediction and early warning systems; however, they demand large, high-quality datasets to function effectively. Early warning systems are especially critical for protecting agricultural production and sustainably managing water resources. For Türkiye specifically, while notable progress has been made, improvements are still

needed in data integration, institutional coordination, and technological infrastructure. Expanding observation networks, enhancing satellite data utilization, and fostering inter-institutional data sharing remain top priorities. Looking ahead, the convergence of hydrology, meteorology, remote sensing, and data science, supported by big data and cloud computing, will enable more precise, integrated, and predictive drought monitoring systems, ultimately contributing to sustainable water management and drought risk reduction.

## REFERENCES

- Alley, W.M. (1984). The Palmer Drought Severity Index: Limitations and assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(7), 1100–1109. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<1100:TPDSIL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<1100:TPDSIL>2.0.CO;2)
- Dracup, J.A., Lee, K.S. and Paulson, E.G. (1980). On the definition of droughts. *Water Resources Research*, 16(2), 297–302. <https://doi.org/10.1029/WR016i002p00297>
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York.
- McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17–22 January 1993, Anaheim, CA. American Meteorological Society, 179–184.
- Mishra, A.K. and Singh, V.P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1–2), 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- Mishra, A.K. and Singh, V.P. (2011). Drought modeling – A review. *Journal of Hydrology*, 403(1–2), 157–175. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.049>
- Palmer, W.C. (1965). *Meteorological Drought*. Research Paper No. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C., 58 pp.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. and Deering, D.W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the 3rd ERTS Symposium*, NASA SP-351, 1, 48–62.

- Vicente-Serrano, S.M., Beguía, S. and López-Moreno, J.I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Wilhite, D.A. (2000). Drought as a natural hazard: Concepts and definitions. In: Wilhite, D.A. (Ed.), *Drought: A Global Assessment*. Routledge, London and New York, Vol. 1, 3–18.
- Wilhite, D.A. and Glantz, M.H. (1985). Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10(3), 111–120.

# **HICAZ RAILROAD MA'AN STATION CONSTRUCTION TECHNOLOGIES, PROJECT GEOMETRY, AND MATERIALS INFORMATION**

**Ahmet GÖKDEMİR<sup>1</sup>**

**Elif TOMBAK<sup>2</sup>**

## **1. INTRODUCTION**

The Hejaz Railroad has secured its place in history as one of the largest and most costly infrastructure projects undertaken by the Ottoman Empire in the early 20th century. In the literature, while the project's financing models, Pan-Islamism policies, and military strategic aspects are often highlighted, the technical dimensions behind this vast network, such as engineering genius, construction technologies, and material logistics, symbolize the true success of the project. Under the leadership of the German Chief Engineer, Meissner Pasha, and his team, this "technical anatomy" transformed the 1320-kilometer main line between Damascus and Medina from merely a series of tracks into an engineering triumph developed against the challenging desert topography. The geometry of the line, the strength properties of the construction materials used, and the unique solutions developed to address climatic challenges elevated the Hejaz Railroad above the global engineering standards of the time. Within this technical discipline, Ma'an Station is positioned as the

---

<sup>1</sup> Assoc. Prof. Dr., Gazi University, Faculty of Technology, Civil Engineering Department, ORCID: 0000-0003-2151-6228.

<sup>2</sup> Master's Student., Gazi University, Institute of Science, ORCID: 0009-0001-9402-6302.

most critical and strategic junction of the line in the Jordanian geography. Ma'an, considered the largest "lung" of the tracks extending south from Damascus before reaching Medina, served as the main construction and logistics center where operational processes such as locomotive maintenance, water, and coal supply were managed. With its commissioning in 1904, this station gained an identity as an oasis of technology in the middle of the desert. Architecturally, Ma'an Station is a complex that combines the Ottoman esthetic with local stone craftsmanship. This vast complex, extending from passenger buildings to massive water towers, from repair workshops to staff quarters, is proof that the line was not only a transportation project but also a permanent settlement and civilization project. During the years of World War I, the station became the keystone of military logistics, serving as a garrison ensuring the southern security of the line; during the Arab Revolt, it formed the most crucial defense line in the struggle to keep the railroad operational without interruption. After the Empire withdrew from the region, Ma'an Station underwent a political transformation by serving as the headquarters for King Abdullah I during the founding phase of Modern Jordan. Today, this place, which stands as a "museum-station" with its century-old Ottoman locomotives silently resting on the tracks and its stone buildings preserving their original texture, is one of the strongest witnesses carrying the technical heritage of the Hejaz line into the present. This study aims to highlight the engineering achievements of the Hejaz Railroad and the vital role of this strategic station in the historical process, specifically focusing on Ma'an Station, from an academic perspective.

## **2. RESEARCH METHOD**

In this study, a qualitative research method was adopted to evaluate the effects of the Ma'an Station, one of the strategic stops of the Hejaz Railroad, on urban development, military logistics, and architectural character from a holistic perspective. The research process was structured on the assumption that the station is not just a transportation structure, but also a "railway heritage" that triggers the socio-political and spatial transformation of the region. In this context, the functional transformation and architectural identity of the station throughout historical processes have been attempted to be revealed thru an in-depth analysis of qualitative data. The primary data collection technique of the research consists of a comprehensive literature review. Within the scope of the study, Ottoman archival documents, German engineering reports, and national and international academic publications written on the Hejaz Railroad have been systematically examined. Especially the theoretical approaches regarding railroad architecture, station typologies, and the characteristic features of early 20th-century Ottoman public buildings have been used as a fundamental framework to understand the unique structure of Ma'an Station. In the later stages of the study, the focus shifted to the analysis of visual data in addition to written sources. Spatial readings have been conducted thru historical plans, station diagrams, period photographs, and topographic maps found in the literature. The positioning of technical units such as water towers, repair workshops, and dormitories located within the Ma'an Station complex has been interpreted to understand the station's operational capability as a logistics center. Visual data has been matched with textual data to focus on the unique architectural details and engineering solutions of the structure. All the obtained data were evaluated using a comparative and descriptive analysis method. Ma'an Station; by comparing it architecturally and

functionally with other important stops on the line (Damascus, Amman, Medina), the unique "technical anatomy" and strategic position of this station within the Hejaz line have been clarified. As a result, based on the information distilled from the literature, the study was completed by creating a theoretical synthesis on the station's historical heritage and its museum identity in the modern era.

### **3. WORK AREA: MA'AN PROVINCE AND STATION CAMPUS**

Ma'an, which forms the center of the research area, is a province located in the southern part of Jordan and is the largest administrative region in the country in terms of land area. Covering an area of approximately 32,832 km<sup>2</sup>, which is nearly 37% of the country's land, this vast geography borders Saudi Arabia to the east and the provinces of Aqaba and Tafilah to the west. Ma'an, throughout history, has been referred to as the "gateway to the desert" and has become one of the most critical transit points for both caravan routes and modern transportation axes. Ma'an, due to its strategic location on ancient trade routes and pilgrimage paths, has maintained its status as a regional center throughout history. Located at an altitude of approximately 1100 meters above sea level, this settlement, established on a desert plateau, has been at the center of transportation networks due to its access to water resources and its key position on the north-south axis, despite the harsh climate conditions. This strategic depth clearly illustrates why Ma'an was chosen as a "main operational center" in the technical and military planning of the Hejaz Railroad project. In terms of administrative structure, Ma'an is divided into four main districts (Liva) within the modern administrative system of the Hashemite Kingdom of Jordan, and the provincial center is also the area where the railroad heritage is



#### **4. THE LOGISTICAL HEART OF THE HIJAZ RAILROAD: MA'AN STATION**

The Hejaz Railroad (1900-1908) was the last major engineering endeavor of the Ottoman Empire and one of the most visionary infrastructure projects implemented in the early 20th century. Spanning approximately 1320 kilometers between Damascus and Medina, this project showcased a technical success with its 1050 mm narrow gage, preferred for logistical and cost advantages. The project was not limited to laying tracks; the bridges, tunnels, and culverts developed to overcome the challenging desert topography created a "technical anatomy" that symbolized the technical maturity of Ottoman engineering at that time. The primary motivation behind the construction of the line was to connect the Islamic world in accordance with the policy of Pan-Islamism and to reinforce the central authority's influence over the holy lands. Strategically, the line revolutionized civil transportation by reducing the arduous pilgrimage journey, which traditionally took about 40 days, to 4-5 days, and also provided rapid military deployment capability to the region. From an operational perspective, the Hejaz Railroad was designed as a self-sufficient integrated logistics system in the middle of the desert. The stations built along the route, equipped with water supply, fuel storage, and telegraph communication, have become modern focal points that transformed the socio-economic landscape of the region. Within this logistics chain, each stop has been designed according to a specific hierarchy; the technical maintenance of the trains and personnel needs have been managed with an industrial discipline that ensures the sustainability of the line.



**Figure 2. Ma'an Station (Robinson, 1918)**

## **5. STRATEGIC LOCATION AND CAMPUS PLAN**

The Hejaz Railroad was constructed with an engineering discipline far ahead of its time, developed to withstand the challenging climate and terrain conditions brought by the desert topography. The choice of a 1050 mm narrow gage, which determined the general characteristics of the line, both accelerated material logistics and optimized construction costs. The steel sleepers used in the rail laying process were offered as a solution to the deformation of wooden sleepers caused by the desert heat; the water drainage systems and viaducts along the route were constructed using high-strength masonry techniques to ensure the geometric continuity of the line. This engineering genius has transformed the line into not just a transportation route, but an integrated technological system that transcends the desert. Located at the very heart of this vast network, the Ma'an Station is positioned at the midpoint of the 1320-kilometer route between Damascus and Medina, at an elevation of approximately 1000 meters above sea level. It is located on a strategic plateau. Ma'an has been designed as an operational center where both the northern and southern segments of the line intersect, due to its geographical location. The station complex has a fully equipped

"campus" type layout, including the main station building, locomotive repair workshops, coal depots, massive water towers, and staff accommodations. This layout plan shows that the station is not just a stop, but also an autonomous industrial island that meets all the needs of the personnel and technical equipment. In the technical planning of the facility, operational speed and maneuverability have been prioritized. The geometry of the tracks has been connected to the station area with wide-radius curves to allow heavy locomotives to maneuver without difficulty; thus, the uninterrupted flow of logistics has been ensured.



**Figure 3. Ma'an Station Campus (Jordan Tourism Board, 2023)**

## **6. ARCHITECTURAL CHARACTER AND STRUCTURAL MATERIAL ANALYSIS**

The architectural identity of Ma'an Station is a characteristic reflection of the "late Ottoman public architecture" that combines civil and military building standards in the late period of the Ottoman Empire. In the construction of the buildings, yellowish and beige limestone quarried locally in accordance with the region's geological structure were used. Buildings constructed using the masonry technique stand out with

their thick wall structures that provide natural insulation against the extreme temperature differences of the desert climate. This choice of material has provided the station with both an esthetically pleasing appearance that harmonizes with its surroundings and structural strength that has allowed it to stand for an extraordinarily long time. In the exterior arrangements of the buildings, functionality and simplicity are at the forefront. The flat arch forms used in the windows and door openings showcase the "Neoclassical" touches where the Ottoman architectural tradition is blended with European influences. On the roofs, cradle roof systems covered with Marseille-type tiles, considered the signature of railroad architecture, were preferred. These steep roofs, although rarely, were designed to drain winter rainfall in the region and also give the buildings a characteristic silhouette. In the interiors high ceilings and wide spans aimed to maximize natural ventilation and enhance the comfort of the staff. Another noteworthy element in the structural analysis of the station is the harmonious combination of stone and metal. Especially the cast iron components used in the window frames of the main buildings and the load-bearing columns in the interiors are examples of the application of the industrial revolution of the period in the Ottoman context. The large block stones used at the foundation level of the buildings increase the stability of the structure, while the refined craftsmanship toward the upper floors indicates that the stone was worked with an artistic esthetic. This architectural language has transformed Ma'an Station from an ordinary transportation stop into a permanent monumental work reflecting the technical discipline of the Hejaz line. The Ma'an Station complex is not a single building, but rather a collection of complex groups of structures that respond to different functional needs. Toward the end of the war, Ma'an, despite sieges and attacks, became one of the last strategic points in the region to be abandoned by the Ottomans. The station's infrastructure, managed with military discipline, played a vital role in the retreat

processes and the evacuation of the wounded. The conversion of some buildings into temporary hospitals and ammunition depots during the war years once again proved how flexible and resilient the station's architecture was. This historical excerpt shows that Ma'an Station is not only a technical success but also a symbol of an empire's determination to maintain its logistical capabilities even under the most challenging conditions. Following the withdrawal of the Ottoman Empire from the region, Ma'an Station transformed into a political center witnessing the birth pangs of modern Jordan's history. In 1920, Emir (later King) Abdullah I arrived in Ma'an from Hejaz and chose the station buildings there as his temporary headquarters and "government center."



**Figure 4. Ma'an Station Open-Air Museum, Hejaz Railroad Locomotive No. 52 (Jordan Heritage Archive, 2022)**

## **7. FIRST-CLASS STATION TYPOLOGY AND ARCHITECTURAL SYNTHESIS ON THE HIJAZ LINE**

The stops along the Hejaz Railroad route are divided into three main classes based on the logistical load they undertake, their strategic location, and the service capacity they offer. Ma'an Station is in the "First Class Station" category, which is at the top of this hierarchy. This classification symbolizes that the station

serves not only as a passenger stop but also as an administrative center, a technical maintenance base, and a large military garrison. As a first-class station, Ma'an is one of the main nodes ensuring the operational continuity of the line, and its architectural program has been designed to accommodate this multifaceted functionality. The architectural character of the station is an original synthesis of "Late Ottoman Architecture" and "German Neoclassicism." This hybrid style is a combination of the Westernization trend in the Ottoman state structures of the period and the technical esthetics of the German engineers involved in the construction of the line. The train station building, with its massive form, symmetrical facade arrangement, and the elegance of local stone craftsmanship, presents a monumental stance. In terms of structural organization, the train station building offers a sharp functional distinction between the floors. The ground floor of the building is dedicated to public and operational functions such as spacious passenger lounges, ticket counters, and telegraph offices, while the upper floor is more designed as a private living space.

## **8. MA'AN STATION CARRIAGE SYSTEM AND CONSTRUCTION TECHNOLOGY**

The buildings in the Ma'an station complex represent high-quality examples of the traditional masonry construction technique skillfully applied in the late Ottoman public architecture. The walls that carry the main load of the buildings are designed to be approximately 70-80 cm thick in accordance with static requirements and climatic necessities. This massive thickness provides a mass rigidity that not only supports vertical loads but also increases the structure's resistance to regional tremors. The structural solidity provided by the masonry system is the most fundamental technical factor in Ma'an's preservation

of its physical integrity for over a century. In the arrangement of the walls, a "double-skin" (sandwich) system that combines esthetics with functionality has been adopted. On the exterior of the structure, finely crafted limestone blocks obtained from local quarries were preferred. On the inner surface, the core structure of the wall was created using rubble stone fill, which is a more economical yet durable solution. This hybrid masonry technique, while preserving the monumental and smooth appearance of the outer facade, prevents cracking by optimizing the building's flexibility thru the mortar-filled core of the wall. One of the greatest advantages provided by this load-bearing system is its excellent thermal insulation capacity. The extreme day-night temperature differences characteristic of desert climates are mitigated by the high thermal capacity (thermal mass) of the 80 cm thick stone walls. The stone walls, which trap the heat of the sun during the day, keep the interior cool; at nite, they slowly release this heat, balancing the indoor temperature. This masonry technology at the Ma'an Station is not just an engineering choice; it is also a passive climate control genius developed against harsh natural conditions. The most critical element that holds the stone blocks together in the Ma'an station structures is the modified form of traditional horasan mortar adapted to the regional conditions. To enhance the static stability of the walls, advanced engineering solutions such as "tenon" and "mortise" systems have been used in the interlocking arrangement of the stone blocks. Especially in the corner and window arch keystones, interlocking mechanical forms were preferred to prevent the stones from slipping. In some critical junction points, metal (iron) clamps were used, which were placed in grooves opened into the stones and fixed with poured lead. In conclusion, Ma'an Station is a holistic work where the rational plan of the ground floor and the disciplined architectural language of the facade come together. Each stone trim, arched opening, and flooring detail is a signature that carries the technical standards of the Hejaz Railroad and the

Ottoman's visionary engineering understanding into the present day. This structural character has transformed Ma'an from merely a railroad station into a monument of industrial heritage, where function is blended with esthetics and traditional materials are combined with modern techniques. The circular stone water towers, which are the most critical structures ensuring the operational continuity of steam locomotives, are the most iconic elements rising vertically in the Ma'an Station complex. The cylindrical form of these towers is not just an esthetic choice; it is an advanced engineering solution that minimizes the harsh wind loads of the desert and evenly distributes the massive hydrostatic pressure created by the water inside the wall surface using the principle of "hoop stress." The massive cast iron water tank positioned at the top of the tower safely transfers the load to the ground thru special cushion beams embedded in the stone body. This structural arrangement is a complete masterpiece of hydraulic engineering, allowing water to be quickly discharged to locomotives using the force of gravity. When examined in terms of technical anatomy, the cut stone craftsmanship used in the construction of the water towers and the piping inside reveal the precision of the Ottoman railroad technology. To prevent the water inside the tank from being affected by temperature changes and to avoid evaporation, the thermal mass provided by the stone body was utilized. These towers, which worked in conjunction with hinged water casks that could fill the locomotives' water tanks (tender) within minutes, served as the "technical lungs" of the line. Today, these towers are among the most solidly standing structures that represent the industrial heritage of the Hejaz Railroad and prove the technological efficiency of a century ago.

## **9. STRUCTURAL DAMAGES AND MATERIAL DETERIORATIONS OBSERVED IN THE MA'AN STATION STRUCTURES**

The structures on the Ma'an Station campus are facing various types of structural deterioration due to the extreme desert climate and periods of abandonment they have been exposed to for over a century. The most noticeable damage observed in the stone walls is the physical loss of material, referred to as "surface loss" and "spalling." Thermal stresses caused by high temperatures during the day and sudden cooling at night have led to the growth of capillary cracks within the limestone and the separation of the stone surfaces into layers. Additionally, the "erosion effect" created by sand particles carried by the wind has weakened the outer shell of the structure by causing the joint fillings on wind-exposed facades to empty and the corners of the stone blocks to lose their form. Another critical type of damage observed in strategic and technical structures is "corrosion" and "biological degradation" in metal and wooden components. The cast iron tanks in the water towers and the steel trusses in the workshop buildings have entered a rusting process due to the effects of moisture and oxidation, causing thinning in the metal sections and a reduction in load-bearing capacity. The wooden supports in the roof systems, however, have been subjected to rot due to leaking rainwater and pest attacks, causing them to deform over time. Before the restoration process, these chronic damages have been recorded as elements threatening the static balance of the structure, and the current interventions aim to stop these deteriorations and preserve the structural integrity.



**Figure 5. Ma'an Station Material Analysis and Restoration Report (Source: Gema Art International, 2012)**

## **10. PROTECTION STRATEGIES AND RESTORATION INTERVENTIONS FOR MA'AN STATION**

The transfer of the historical buildings located on the Ma'an Station campus to future generations depends on the scientific intervention methods determined within the framework of the main field of study of building restoration. The "micro-injection" method is of critical importance for addressing material losses and joint voids, which are among the primary factors threatening structural integrity. The aim is to fill the empty joints and micro-gaps between the stone blocks with injection materials that are compatible with the original mortar, lime-based, and sulfate-free. This method aims to restore the mass rigidity of the structure while ensuring structural continuity without disrupting the natural breathability of the stone texture. For static issues such as deep cracks and separations in the structure, the "stitching" technique is recommended. In this method, the stone blocks on both sides of the crack are mechanically bonded to each other using stainless steel rods and special binding epoxies. This intervention creates a reinforcement layer that is not visible from the outside while rebalancing the static loads of the structure. Respecting traditional construction techniques, this method offers

a static solution in harmony with the stone's own dynamics, instead of irreversible interventions like reinforced concrete. The most sustainable phase of restoration is the "adaptive reuse" strategy. The preservation of Ma'an Station as a "Railway Museum" not only maintains the historical identity of the structure but also gives it a modern function. In this process, the most delicate balance is the integration of modern comfort conditions such as air conditioning and lighting into the structure without damaging the original stone and wooden texture. The transportation of utility lines thru recyclable channels and providing maximum protection with minimal intervention to the structure will preserve Ma'an's industrial heritage value while making it a living cultural hub. Restoration works carried out on monumental structures like Ma'an Station bring with them deep discussions on the axis of "fidelity to the original" and "structural necessity." Interventions such as micro-injection and structural stitching, proposed within the framework of the main field of study of building restoration, seem indispensable for ensuring static stability. However, the irreversible nature of these applications is a subject of debate among conservation theorists. Although the compatibility of lime-based mortars with the original stone texture appears flawless on paper, the differences in the material's aging process pose a risk of visual and structural heterogeneity in the long term. Especially the stitching of structural cracks with stainless steel rods, although seen as a savior from a modern engineering perspective, is an intervention that limits the stone's natural flexibility. At this point, the fundamental question to be asked is: Should we transform the structure into an unshakable mass by modern standards, or should we proceed with more flexible, traditional methods that respect its natural movement capability, which it has exhibited for a century? The interaction of modern steel rods with the microclimate within the stone is described by some experts as "an intervention in the spirit of the structure," and the importance of

less invasive methods is emphasized. The process of repurposing, while aiming to preserve Ma'an Station as a "Railway Museum," also brings with it the pressure of "comfort conditions" on the architectural heritage. Integrating modern ventilation, electrical, and heating systems into a historical building often means piercing the original wall texture or closing off ceiling voids. The effort to museumify the structure, while turning it into a living space, risks transforming the building's "silent and raw" historical atmosphere into a consumer object. Another aspect of the discussion is the economic and social sustainability of the restoration. In a settlement like Ma'an, on the edge of the desert, how much do high-tech restoration methods align with the region's local resources in terms of sustainability? In scenarios where the local population is not involved in the restoration process and these technical interventions are carried out solely by external experts, the structure becomes alienated from the community, and the awareness of preservation cannot be disseminated to the grassroots. Real preservation is possible not only thru chemical injections but also by integrating the structure into the daily life of the local people. In conclusion, the restoration of Ma'an Station is not just a technical engineering problem, but a philosophical choice.

## **11. CONCLUSION**

The data examined throughout this study demonstrate that Ma'an, with its strategic location, comprehensive campus plan, and hierarchical structure groups, is the most critical logistical base of the Hejaz line. Architecturally, Ma'an Station offers a remarkable synthesis of local material usage and universal engineering solutions. 80-centimeter-thick double-walled stone walls, providing thermal insulation and structural rigidity, challenge the desert climate; while European-sourced steel roof

trusses and complex water tower systems brought the advanced industrial technology of the era to the region. This hybrid structure has emerged as a unique "technical anatomy" by blending the Ottoman's traditional stone craftsmanship heritage with the requirements of the modern industrial revolution. The transformation of the station throughout history shows that it is not just a technical facility, but also a political symbol. The role it played as a military garrison and logistical refuge during the darkest days of World War I continued as it served as headquarters for King Abdullah I during the establishment phase of modern Jordan. The transformation of a transportation structure into an administrative center during the founding phase of the state has turned Ma'an Station from a technical heritage into a national memory site. The restoration and repurposing efforts carried out today are the most vital steps taken to preserve Ma'an Station as a "railway museum." Micro-injection, stone stitching, and mortar analysis conducted by institutions like Gema Art International have ensured the preservation of the structure's original texture and its transmission to future generations. However, the preservation process should not be limited to physical interventions; the industrial heritage value carried by the station should be made sustainable by integrating with the cultural consciousness of the local people. Ultimately, Ma'an Station is a living history lesson with its century-old locomotives quietly standing on the tracks of the Hejaz Railroad, its still-standing stone water towers, and its administrative building that has become a museum. This research reveals that each layer of the station, from its technical details to its historical depth, has steadfastly maintained its place in the history of modernization in the Middle East. Ma'an is not just a stop belonging to the past today; it is hailed as one of the most valuable pieces of humanity's shared cultural heritage at the intersection of engineering, architecture, and political history.

## **REFERENCES**

- Deradkeh, S. M. (2011). The Hijaz Railway, 1914 [Harita]. Tasarım: C. Kohlmayer. bpb (Bundeszentrale für politische Bildung).
- Gema Art International. (2012). Material Analysis and Structural Strengthening of Ma'an Railway Station. Gema Art Official Project Archive.
- Jordan Heritage. (2022). Hejaz Railway Museum in Ma'an - Locomotive No. 52 Inventory. Jordan Heritage Digital Library.
- Jordan Tourism Board (JTB). (2023). The Founding King's Residence and Ma'an Industrial Heritage Museum. Visit Jordan Official Archive.
- Robinson, G. H. (1918). Jordan - Ma'an Station 1918 [Fotoğraf Arşivi]. GH-R / Hicaz Demir Yolu Tarihi Koleksiyonu.

# **1050 mm LEGACY: THE ARCHITECTURAL STRUCTURE AND MATERIAL CHARACTERIZATION OF THE DAMASCUS HIJAZ STATION**

**Ahmet GÖKDEMİR<sup>1</sup>**

**Enes ESKİ<sup>2</sup>**

## **1. INTRODUCTION**

The Damascus Station has been a concrete proof of the style that combines the Ottoman's modern local architectural identity with Neoclassical Arab (Damascus-Andalusian) architecture. On the exterior facade of the Train Station, local stones such as durable and esthetic basalt and limestone, characteristic of the Damascus region, were used. The stones have been meticulously crafted to evoke the tradition of "ablaq" in traditional Islamic architecture, which involves the arrangement of stones in different colors. At the main entrance, there is a series of three arches that monumentalize the building. On the upper parts of these arches and on the facade, turquoise-colored tiles were used to emphasize the Ottoman touch. Additionally, the arches form the part that determines the structure's statics. The small towers rising at both ends of the Damascus Train Station building, resembling a fortress, symbolize the structure's military and administrative authority. The interior of the station, in contrast to the hard stone texture of its exterior, features an

---

<sup>1</sup> Assoc. Prof. Dr., Gazi University, Faculty of Technology, Civil Engineering Department, ORCID: 0000-0003-2151-6228.

<sup>2</sup> Master's Student., Gazi University, Institute of Science, ORCID: 0009-0001-8317-0966.

extremely elegant and "palatial" craftsmanship. The most striking feature of the interior is the carved ceilings made with craftsmanship. These ceilings are inspired by the traditional mansion architecture of Damascus. The colored glass (stained glass) used in the windows refracts the incoming light, creating a mystical atmosphere. These glasses are usually adorned with geometric patterns. The main waiting hall of the station features a floor made of high-quality marble and patterned tiles, creating a spacious and clean area for passengers. The majority of the steel rails and fasteners used in the railroad line of the Damascus Train Station were imported from Europe (especially from the Krupp factories in Germany). However, the wrought iron craftsmanship on the balconies and window railings of the station building showcases the skill of local artisans. In addition to traditional tiles on the roof, steel construction supports, which were the modern engineering solution of the time, were also used. The Clock Tower, located right in the center of the station building, symbolized the introduction of the concept of "modern times" to the region at that time. The muqarnas (honeycomb-like decoration) details seen at the entrances and ceiling corners confirm the building's adherence to Islamic architectural heritage (Özyüksel, 2000).



**Figure 1. Damascus Hijaz Railroad Station Building**  
(<https://archives.saltresearch.org/handle/123456789/1?hl=tr-TR>  
(08.03.2026 14:30)

## **2. RESEARCH METHOD**

In this study, which aims to evaluate the relationship between the Damascus Station and urban development and architectural character, a qualitative approach has been adopted. During the research process, secondary sources were primarily utilized, and a conceptual inference was made based on existing academic studies. In the methodological process shaped by the literature review axis, fundamental parameters such as railroad heritage and architectural features have been examined on a national/international scale. The findings obtained from these examinations were addressed from a comparative perspective, forming the theoretical foundation of the study.

## **3. TYPES OF STONES USED IN THE BUILDING AND TECHNICAL DETAILS**

The stones used in the construction of the Damascus Hejaz Station are not just a visual choice, but also strategic engineering decisions that ensure the structure stands for centuries. The warm, honey-colored and occasionally pinkish texture seen on the building's overall exterior comes from limestone extracted from local quarries in Damascus. These stones are a dense enough material to fall into the "semi-marble" category. Due to its low porous structure, the material is prevented from absorbing rainwater, which has provided it with resistance against freeze-thaw cycles. Despite its hardness, it allows for fine carving (muqarnas and window surrounds). The elegant geometric patterns on the facade of the station have been preserved thanks to the stone's fine-grained structure. In the lower parts of the building, at the foundation level and at the contrasting points of the decorations, black basalt has been used. The reason for this is that basalt, being a volcanic-origin rock, is one of the stones with the highest compressive strength. It has a strength in the range of

100-300 MPa. In a structure like a station, which experiences heavy loads (train vibrations and crowded human traffic), preventing moisture from rising from the ground (capillary rise) serves as an "isolation barrier." Additionally, it is extremely resistant to acid rain and wear. In architectural design, the use of these two stones (light-colored limestone and dark-colored basalt) together is called the "ABLAQ TECHNIQUE." With this method, the high "thermal mass" of these stones plays a critical role in the climate of Damascus, which is very hot during the day and cool at night. The stones absorb the sun's heat during the day and slowly release it at night. This situation allows the interior of the station to remain cool with a natural air conditioning effect. Additionally, the specific gravity of the stones used is around 2.5-2.8 g/cm<sup>3</sup>, which provides the building with great static stability. The marbles used on the interior facade of the building provide an esthetic appearance while increasing the wear resistance of the floor. Almost all of these stones were brought from the Mezzeh and Hauran regions just outside of Damascus.



**Figure 2. Interior Architecture of Damascus Hijaz Station**  
(<https://whc.unesco.org/> (04.03.2026 – 23:24))

The static structure of the Damascus Hejaz Station is not just about the stacking of stones; it is a combination of Ottoman

traditional architectural knowledge and early 20th-century modern engineering calculations. In the Damascus Hejaz Station, stone craftsmanship is a perfect blend of structural necessity and aesthetics. The stones used in the station were cut by hand with astonishing precision, even before the advent of modern CNC machines. The joint surfaces of the stones (the gaps) have been shaved with such precision that the joint thickness drops to 2-3 mm in some places. This ensures that the load is evenly distributed across the stone surface in masonry structures and prevents localized stress accumulations. Corner stones (quoin stones) were selected in massive blocks and placed in an interlocking manner to maintain the vertical balance of the building. This provides a rigidity that prevents the building from "collapsing" under lateral loads such as an earthquake. The sequential arrangement of black basalt and yellowish limestone, which is the signature of Syrian architecture, is not just visual. The thermal expansion coefficients of the two different stones are different. Engineering ingenuity comes into play here; the special pozzolanic mortar placed between these stones acts as a "cushion" that absorbs the expansion difference between the two stones. The water absorption rate of black basalt is very low. Therefore, in the lower levels of the building that come into contact with moisture, basalt was used, while in the upper levels, lighter and more workable limestone was used, following the principle of "lightweight superstructure." The carvings above the windows and the "muqarnas" called stalactites are actually voids for weight reduction. The decorations made by hollowing out the insides of stone blocks reduce the dead load at that point without disturbing the pressure line of the arch form. The fine grooves in the window sills allow rainwater to "drip" away from the building surface without seeping inside. This is a natural detail that prevents the carbonation and corrosion of the stone (Kürkçüoğlu, 2012). The processing methods applied to the surface of the stone also hold engineering significance. Leaving the stone surface slightly rough

makes it difficult for air pollution and soot to adhere to the surface and maximizes the stone's "breathability" (vapor diffusion). The sharp corners where the stones meet are beveled at a 45-degree angle to prevent them from breaking during transportation and installation. The stonework at the Hejaz Station in Damascus offers a surface esthetic at the micro-scale while being a 'materials engineering' success that extends the static lifespan of the masonry structure at the macro-scale. The cutting angle of each stone has been calculated to directly contribute to the overall rigidity matrix of the building.

#### **4. CARRIER SYSTEM AND LOAD ANALYSIS AT DAMASCUS HIJAZ STATION**

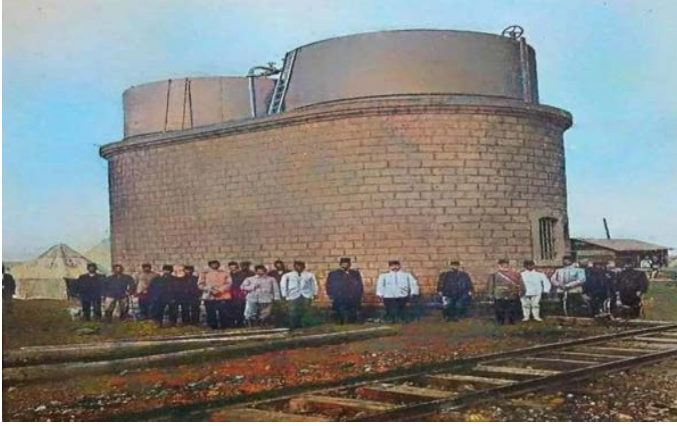
The station was built using the load-bearing masonry technique. However, there are some modern touches that support this traditional method. These are; Vertical Load Transfer: The entire weight of the building is transmitted to the foundation through the external and internal load-bearing walls. The thickness of these walls, sometimes reaching around 80-100 cm on the ground floor, offers an immense load-bearing capacity. Arch Mechanism: The flattened and fully rounded arches above the windows and doors distribute the load to the side buttresses. In this way, wide spans could be supported without the need for a steel beam. Seismic Resistance: Historically, Damascus is a region at risk of earthquakes. The corner towers and wide base area of the building provide a low center of gravity, increasing stability under horizontal loads (earthquake waves). Horasan mortar is one of the oldest and most successful "composite binders" in the history of civil engineering. The choice of this mortar in massive structures like the Damascus Hejaz Station is not a coincidence; it is entirely a decision based on durability and performance. Horasan mortar is not a simple lime mortar. What makes it strong is the

pozzolanic material within it. Slaked lime ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), river sand, and the most critical element, brick fragments/powder (burnt earth), constitute the components of the pozzolanic mortar. Silica ( $\text{SiO}_2$ ) and alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) in the brick dust react with calcium hydroxide in lime to form calcium silicate hydrate (C-S-H) gels. This is a chemical process similar to the setting of modern cement. At the time the station was built, cement was known, but Horasan mortar was preferred for the following advantages: Low Elasticity Modulus (E): Horasan mortar has a much lower elasticity modulus compared to modern cement. This way, it acts as a "damper" between the stone blocks. It dampens the train vibrations and thermal expansions that come to the building without causing cracks. High Breathability Capacity: The porous structure of the mortar allows moisture within the stone to be expelled. If cement had been used, moisture would be trapped inside the stone and would end its structural life thru salting/exfoliation. Self-Healing: When micro-cracks occur, the free lime in the mortar comes into contact with water, re-precipitating as calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) and sealing the crack. In prestigious structures like the Damascus Station, "additives" of the time were used to enhance the strength of the mortar. These include: Organic Additives: It is known that egg whites, whey, or vegetable oils were added to the mortar to increase its strength and workability. These substances increase the adhesion capability of the mortar. Hemp and Flax Fibers: To counteract tensile stresses, plant fibers are sometimes added during the mixing stage of the mortar; this is an early form of reinforced mortar logic (Mavioğlu, 2011). The fundamental factor that has carried the structural life of the Damascus Hejaz Station for over a century is not the strength of the stones, but rather the elastic-plastic behavior of the mortar that binds the stones together. This mortar forms a 'semi-flexible' matrix that preserves structural integrity under the dynamic loads created by trains. Why is "Brick Dust" So Important? Lime normally sets by reacting with air

(carbonation). However, the addition of brick dust to the Horasan mortar gives it hydraulic properties. So, it can harden even inside thick walls where air cannot enter and is resistant to water, which is why it is vital in stations in rainy or humid areas like Damascus.

In the early 1900s, we didn't have membrane-based coatings or polyurethane injections like we do today. They used a system based entirely on materials science and traditional engineering ingenuity to solve the hydrostatic pressure and impermeability created by tons of water. The insulation of the Damascus Hejaz Station and the surrounding water reservoirs was provided by this four-tiered defense line: This was the top segment and the most costly insulation method. The inner chamber of the reservoir was covered with lead plates, especially at metal or stone joints. Lead plates were brought together using an overlapping method, and the joints were fused to combine them. Lead is a material that does not corrode, is flexible (does not crack in structural settlements), and does not alter the chemical structure of water, thus providing impermeability in storage facilities. If the warehouse is completely made of stone/brick masonry, a special Horasan plaster would be used on the inner surface. But this had a different recipe than the mortar we used for building the walls. In addition to lime and finely ground brick dust, hydrophobic (water-repellent) substances such as linseed oil, flaxseed oil, or beeswax were mixed in to enhance the "pozzolanic activity." The plaster was applied not in one go, but in 3-4 layers, and each layer was sanded and polished after it dried. This shiny surface created a "polish" effect that prevented water from entering the pores (Tourret, 1989). There was a protective shield around the exterior of the warehouse that prevented external moisture from entering or seeping into the foundation, rather than preventing water from leaking out. A layer of compressed clay (clay slurry) was placed between the warehouse wall and the outer cladding. When clay comes into

contact with water, it swells and forms an impermeable layer; this is the principle of the oldest "waterproof membrane." Some water towers had riveted steel tanks on top. While the steel plates were riveted together, a paste made of flax fiber and linseed oil was applied to the seams. When the rivet was hammered in, this paste would compress and make it impossible for water to leak.



**Figure 3. A water reservoir built on the Hejaz Railroad**  
(<https://dergipark.org.tr/tr/search?q=Hicaz+Demiryolu&section=articles> (08.03.2026 23:26))

In historical water reservoirs, insulation has arisen from the balance between the material's hydrophobic character and its behavior under hydrostatic pressure. Especially lead coating and multilayer hydraulic plaster applications are the historical precursors of today's modern insulation technologies' 'rigid-elastic' hybrid structure. Restoration in historically and technically complex structures like the Damascus Hejaz Station is akin to a surgical operation. Here are the main technical challenges encountered: The biggest challenge in the restoration is to replicate the original stone and mortar texture from 1917. The closure of some original stone quarries makes it difficult to find stones with the same mineral composition and thermal expansion coefficient. Incorrect stone selection leads to cracks between the original stone and the new stone over time. In some

faulty repairs made in the mid-20th century, modern cement was used. However, cement prevents historical stones from "breathing" and causes the moisture that accumulates inside the stone to lead to internal decay (salting). In modern restorations, these cements need to be cleaned using mechanical methods and replaced with hydraulic lime-based mortars. The station is inherently a dynamic area. The increasing traffic and underground tremors due to the city's growth put pressure on the structure. Micro voids that form inside the walls over time are filled with specially mixed mortars injected at low pressure without compromising the structural integrity. In some modern projects, foundation reinforcement (such as jet-grouting) is recommended to protect the building from earthquakes. However, the original basalt foundation of the Damascus Station is so solid that interventions have generally been limited to superficial cleaning and joint renewal. The interior details of the building, considered its "soul," are much more delicate than the stones. Although the climate of Damascus is dry, wooden ceilings (especially cedar and walnut) undergo biological degradation over time. In the restoration, these woods are preserved using special chemical impregnation methods. The lead strips holding the stained glass windows bend over time. Each piece of glass is carefully removed one by one and rejoined with new lead without disturbing the original pattern (the leaded glass technique), which is an art that requires patience. The Damascus Hejaz Station is not just an engineering marvel made of stone and iron; it is a masterpiece where the Ottomans combined esthetic concerns with static solidity. Every restoration effort made today is a signature that ensures this 'petrified history' page can be read by future generations.

## **5. TRANSPORTATION ENGINEERING AND LOGISTICS STRATEGY AT DAMASCUS HIJAZ STATION**

The standard railroad track gage in the world is generally 1435 mm (Standard Gauge). However, the Hejaz Railroad was built with a special gage of 1050 mm from Damascus to Medina. So, why narrow gage? Because a narrow gage means smaller tunnels, narrower bridges, and less earthwork. For the Ottoman Empire's limited budget and challenging desert geography, this was an economic necessity. Narrow gage railroads are more flexible in rugged terrains and sharp curves. This was an advantage for the terrain encountered when descending south from Damascus. This choice required the standard wagons from Europe to transfer in Damascus. So, the Damascus Station became not just a stop, but also a logistics transfer hub. The biggest engineering challenge for the steam locomotives departing from the Damascus Station was "water." Steam locomotives require vast amounts of water. Finding water in the desert stages after Damascus was nearly impossible. That's why extra water wagons (tender) were added next to the locomotives. In the workshops at the Damascus Station, German Henschel and Jung brand locomotives were usually serviced. These machines were modified "desert lions" to withstand desert dust and extreme heat (Demiryolu Mühendisliği Dergisi (TCDD Arşivi) 2023/SAYI 18). The arrangement of the tracks inside the station was the product of operational intelligence. The Damascus Hejaz Station was not a "terminus" but a transfer and maneuvering station. To allow locomotives to change direction, there were massive turntables at the north and south entrances of the station. The stones (ballast) laid under the tracks were chosen from the hard basalts around Damascus. This spread the dynamic load created by the locomotive onto the ground while providing drainage to prevent the rails from rusting. The Damascus Hejaz

Station was the brain of the 1050 mm narrow-gauge system. Although this gage width choice initially seemed like a cost-saving move, it transformed into an engineering standard that enabled thousands of kilometers of desert travel, thanks to the technical workshops and logistical capacity of Damascus. The Damascus Hejaz Station is not just an architectural form; it is a linear balance established by the compressive strength of basalt and the elasticity of Horasan mortar, with a narrow gage geometry of 1050 mm. This stability, which has persisted from 1917 to the present, is evidence of the precision in the local selection of materials and the correct engineering foresight in the load transfer mechanisms.



**Figure 4. Sham Hijaz Station Roof Truss and Wide Span Tensioners ([https://www.diyanehaber.com.tr/foto-galeri/devrik-baas-rejimi-osmanli-yadigari-hicaz-demir-yolundaki-kadem-istasyonunu-harabeye-cevirdi\(04.03.2026 – 21:33\)](https://www.diyanehaber.com.tr/foto-galeri/devrik-baas-rejimi-osmanli-yadigari-hicaz-demir-yolundaki-kadem-istasyonunu-harabeye-cevirdi(04.03.2026 – 21:33)))**

Distribution of the characteristic loads the station is subjected to: Dead Loads (G): Due to the density of the stone, the load per square meter is quite high. This situation increases the inertia forces of the structure during an earthquake, but it provides

stability against the overturning moment. Live Loads (Q): There is a capacity exceeding the standards set at 5 kN/m<sup>2</sup> for station waiting halls. Dynamic Effects: The vibrations transmitted from the rails to the foundation during the stop-and-go maneuvers of trains are dampened by the basalt base layer and elastic mortar. Seismic Performance Parameters (Engineering Commentary) Considering the seismic activity of Damascus, although the structure has a low ductility ratio, its high rigidity results in a low period (T). This prevents the building from entering resonance. The structure has a natural resistance to torsional effects due to the proximity of the center of mass and the center of rigidity. The corner towers act as 'static braces' in the structure, restricting lateral displacements. 1. Regional Geological Structure and Soil Profile Damascus is geologically located at the intersection of the alluvial fan formed by the Barada River and the basalt plateaus to the east. Soil Class: The area where the station is located has a heterogeneous structure consisting of dense sandy-gravelly alluvial layers and occasional limestone bedrock. Groundwater Table (GWT): Due to the proximity of the river, the groundwater level is variable. This situation necessitated insulation against capillary rise in the foundations. 2. Foundation System: Solid Raft Effect With the technology of the period, a deep piled foundation was preferred instead of a pile foundation. Under the load-bearing walls, there are stone pedestals that are 50-80% wider than the wall width, gradually widening. After the foundation pit was excavated, large-sized basalt stones were compacted as a blocking to increase the ground safety stress. This is similar to the modern "rock fill" concept. Thanks to the thickness of the walls and the width of the foundation, the unit stress transferred to the ground has been kept well below the bearing capacity of the alluvial soil (1.5 - 2.5 kg/cm<sup>2</sup>). 3. Dynamic Loads and Drainage Engineering In railroad structures, it is the dynamic effects created by locomotives that strain the ground rather than static loads. Between the railroad line and the building foundation, a

graded granular layer (sub-grade) designed to dampen vibrations has been implemented. This absorbs the seismic and mechanical shocks transmitted to the building. To prevent changes in water levels from reducing the ground's load-bearing capacity, stone masonry drainage channels have been constructed around the building. This helps to keep the effective stress in the ground constant. In the foundation design of the structure, the alluvial character of the soil in Damascus and the cyclic loads created by the locomotives have been successfully balanced. The use of basalt block is not only a foundation reinforcement but also a 'ground improvement' strategy that extends the lifespan of the structure. A service life of over 100 years is the most concrete evidence that differential settlements remain below the threshold values.

## **6. RESULTS AND EVALUATION**

The Damascus Railroad Station has been identified not only as a transportation hub in history but also as a fundamental catalyst driving urban development. Since its construction, the station has determined the direction of the city's physical growth and has led to the shaping of commercial, social, and residential fabric around it. The Damascus Station is a monumental symbol reflecting the technological capabilities and esthetic understanding of the era in which it was built. From an architectural perspective, this structure has played a key role in preserving urban identity and ensuring historical continuity. In the reviewed literature surveys, it is confirmed that the stations are unique heritage elements that combine local architecture with universal engineering solutions. The evaluations conducted within the scope of the study have shown that railroad infrastructure should be considered not just as a technical system but as a living "industrial heritage." Even if the station has

completed its functional lifespan, its inclusion in urban life thru repurposing projects is of critical importance for the sustainability of urban memory. In conclusion; the Damascus Station is one of the most important building blocks that connects the historical layers of the city and strengthens its urban character. Integrating this structure's architectural qualities with modern urban amenities while preserving them will both ensure the protection of cultural heritage and lay the groundwork for the creation of more quality urban spaces.

## REFERENCES

- Demiryolu Mühendisliği Dergisi (TCDD Arşivi) 2023/SAYI 18  
<https://archives.saltresearch.org/handle/123456789/1?hl=tr-TR>  
(08.03.2026 14:30)
- <https://dergipark.org.tr/tr/search?q=Hicaz+Demiryolu&section=articles> (08.03.2026 23:26)
- <https://whc.unesco.org/> (04.03.2026 – 23:24)
- <https://www.diyanehaber.com.tr/foto-galeri/devrik-baas-rejimi-osmanli-yadigari-hicaz-demir-yolundaki-kadem-istasyonunu-harabeye-cevirdi>(04.03.2026 – 21:33)
- Kürkçüoğlu, C. (2012). Osmanlı Dönemi Demiryolu Yapıları ve İstasyonları
- Mavioğlu Ü.A., “Farklı Puzolanik Katkıllar ile Hazırlanan Horasan Harçlarının Değişen Parametrelerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.)
- Özyüksel, M. (2000). Hicaz Demiryolu. Tarih Vakfı Yurt Yayınları
- Tourret, R. (1989). Hedjaz Railway. Tourret Publishing

# **BETONARME YAPI ELEMANLARINDA EĞİLME, KESME VE BURULMA ETKİLERİNİN TS 500 VE TS EN 1992-1-1 ÇERÇEVESİNDE DEĞERLENDİRİLMESİ<sup>1</sup>**

**Necim KAYA<sup>2</sup>**

## **1. GİRİŞ**

Betonarme yapı elemanlarının tasarımında güvenlik, kullanılabilirlik ve süneklik koşullarının birlikte sağlanması, yalnızca kesit kapasitesinin hesaplanmasına değil, aynı zamanda iç kuvvetlerin eleman içinde nasıl aktarıldığının doğru yorumlanmasına bağlıdır. Beton ve donatıdan oluşan kompozit yapı, basınç ve çekme etkilerinin farklı malzemeler tarafından karşılanması nedeniyle doğrusal elastik olmayan bir davranış gösterir. Bu nedenle betonarme elemanlarda eğilme, kesme ve burulma etkilerinin yalnızca yönetmelik formülleriyle değil, yapı mekaniğinin denge, şekil değiştirme uyumu ve malzeme davranışı ilkeleriyle birlikte değerlendirilmesi gerekir (Celep, 2009; Ersoy & Özcebe, 2004).

Betonarme davranışının belirlenmesinde deneysel çalışmalar önemli olmakla birlikte, her kesit tipi, yükleme düzeni, malzeme sınıfı ve donatı kombinasyonu için deney yapmak uygulamada mümkün değildir. Bu nedenle tasarım standartları,

---

<sup>1</sup> Bu kitap bölümü, yazarın “Basit eğilme, kayma ve burulma etkisi altındaki betonarme yapı elemanlarının TS 500 ve TS EN 1992-1-1 standartlarına göre örneklerle incelenmesi” başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

<sup>2</sup> Batman Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojileri Bölümü, Batman, Türkiye. ORCID: 0000-0003-1478-761X.

deneysel birikim ile analitik modelleri bir araya getirerek mühendislik uygulamalarına yönelik hesap esasları oluşturur.

Yazarın yüksek lisans tezinde de eğilme, kayma ve burulma etkisi altındaki betonarme elemanların TS 500 ve TS EN 1992-1-1 esaslarına göre analitik örneklerle incelendiği görülmektedir (Kaya, 2010). Bu kitap bölümü, söz konusu tez çalışmasındaki temel bilgileri doğrudan tekrarlamak yerine, bunları yapı mekaniği merkezli ve karşılaştırmalı bir çerçevede içinde yeniden düzenlemeyi amaçlamaktadır.

TS 500, Türkiye’de betonarme yapıların hesap ve yapım kurallarını düzenleyen temel standartlardan biridir. Standart, yapı elemanlarının kullanım amacına ve güvenlik koşullarına uygun biçimde tasarlanması, boyutlandırılması ve donatılması için pratik bir tasarım çerçevesi sunar (Türk Standardları Enstitüsü [TSE], 2000). TS EN 1992-1-1 ise Eurocode 2 kapsamında beton, betonarme ve öngerilmeli beton yapıların tasarımına ilişkin genel kuralları içermekte; güvenlik, kullanılabilirlik ve dayanıklılık koşullarını sınır durum tasarımı yaklaşımı içinde ele almaktadır (TSE, 2009). Bu iki yaklaşım aynı temel mühendislik hedeflerine yönelmekle birlikte, bazı hesap adımları, katsayılar, idealizasyonlar ve donatı düzenleme ilkeleri bakımından farklılık gösterebilmektedir.

Bu bölümün amacı, betonarme elemanların eğilme, kesme ve burulma etkileri altındaki davranışını TS 500 ve TS EN 1992-1-1 çerçevesinde karşılaştırmalı olarak tartışmaktır. Bölümde öncelikle betonarme davranışının yapı mekaniği temeli açıklanmakta, daha sonra eğilme, kesme ve burulma etkileri ayrı başlıklar altında ele alınmaktadır. Son kısımda ise tezde ulaşılan bulgulara dayanılarak standartlar arasındaki temel farklılıklar tasarım pratiği açısından yorumlanmaktadır. Bu kapsam, kitap bölümü niteliğine uygun olarak özet veya bildiri metninden daha

geniş; ancak doğrudan tez metnini kopyalamayan, yeniden yazılmış ve atıflandırılmış bir akademik çerçeveye sunmaktadır.

## **2. BETONARME DAVRANIŞININ YAPI MEKANIĞI TEMELİ**

Betonarme, betonun basınç dayanımından ve çeliğin çekme dayanımından yararlanan kompozit bir taşıyıcı malzeme sistemidir. Bu kompozit davranışın ortaya çıkabilmesi için beton ile donatı arasında aderansın sağlanması, donatının uygun beton örtüsüyle korunması ve kesitin yükleme boyunca birlikte şekil değiştirmesi gerekir. Düzlem kesitlerin şekil değiştirdikten sonra da düzlem kaldığı kabulü, eğilme hesabının temel varsayımlarından biridir. Bu varsayım, kesit yüksekliği boyunca doğrusal birim şekil değiştirme dağılımı doğurur ve basınç bölgesi ile çekme donatısı arasındaki iç kuvvet dengesinin kurulmasını sağlar (Ersoy & Özcebe, 2004; Kaya, 2010).

Betonarme elemanların davranışı yük artışı boyunca tek aşamalı değildir. Düşük yük düzeylerinde beton hem basınçta hem çekmede gerilme taşır ve kesitin rijitliği yaklaşık olarak brüt beton kesit özellikleriyle temsil edilebilir. Eğilme momenti arttıkça çekme bölgesindeki betonun çekme dayanımı aşılır ve çatlama meydana gelir. Çatlama sonrası çekme gerilmelerinin büyük bölümü donatı tarafından taşınır; nötr eksen konumu değişir, etkin atalet momenti azalır ve eleman rijitliği düşer. Bu aşama, betonarmenin doğrusal elastik çözümden ayrıldığı ilk önemli eşiği oluşturur (Celep, 2009; Kaya, 2010).

Kesit davranışı yalnızca dayanım kapasitesiyle değil, aynı zamanda rijitlik ve süneklik özellikleriyle de değerlendirilmelidir. Moment-eğrilik ilişkisi bu bakımdan temel bir araçtır. Eğilme momentinin küçük değerlerinde rijitlik yüksekken, çatlama ve donatı akması sonrası eğrilik artar ve kesit daha düşük ek moment artışlarıyla daha büyük dönmeler yapabilir. Bu davranış, özellikle

deprem etkileri altında enerji tüketimi ve plastik mafsal oluşumu bakımından önem taşır. Tezde de kesit sünekliğinin eleman sünekliği, eleman sünekliğinin ise sistem sünekliği için ön koşul oluşturduğu vurgulanmaktadır (Kaya, 2010).

Betonarme elemanlarda iç kuvvet aktarımının doğru yorumlanması, özellikle kesme ve burulma etkilerinde daha kritik hâle gelir. Eğilme davranışı kesit normal gerilmeleriyle daha doğrudan açıklanabilirken, kesme ve burulma davranışında asal çekme gerilmeleri, eğik çatlaklar, basınç çubukları, etriye çekme bağları, agrega kenetlenmesi ve boyuna donatıların dübel etkisi birlikte rol oynar (Vecchio & Collins, 1986). Bu nedenle kesme ve burulma hesapları, eğilme hesabına göre daha fazla model varsayımına ve güvenlik düzenlemesine ihtiyaç duyar.

### **2.1. Eğilme, Kesme ve Burulmanın Birlikte Değerlendirilmesi**

Gerçek yapı elemanları çoğu zaman yalnızca tek bir iç kuvvet etkisi altında çalışmaz. Kirişlerde eğilme momenti ve kesme kuvveti birlikte oluşur; eksantrik yükleme, kenar kirişleri, açıklık süreksizlikleri, rijitlik uyumsuzlukları ve döşeme-kiriş etkileşimleri ise burulma momenti doğurabilir. Bu nedenle tasarımda eğilme, kesme ve burulmanın tamamen bağımsız mekanizmalar gibi görülmesi bazı durumlarda yetersiz kalabilir. Özellikle kesme ve burulma etkileri, eleman yüzeylerinde kayma gerilmeleri oluşturarak aynı bölgede çatlama ve donatı talebi meydana getirebilir (Hsu, 1990; Kaya, 2010).

Burulma ile eğilme arasındaki etkileşim, donatılar bağımsız hesaplandığında bazı tasarım yaklaşımlarında ihmal edilebilir düzeyde kabul edilebilmektedir. Buna karşılık burulma ile kesme arasındaki etkileşim daha belirgindir; çünkü her iki etki de kayma gerilmelerine neden olur ve elemanın kritik yüzeylerinde aynı doğrultuda etkili olabilir. Kaya (2010), tez çalışmasında bu nedenle burulmanın kesme ve eğilme ile birlikte

etkidiği durumların daha gerçekçi bir yaklaşım sunduğunu belirtmektedir. Tasarım açısından bu sonuç, enine donatı hesabının yalnızca kesmeye değil, burulma kaynaklı etriye talebine de cevap verecek biçimde düzenlenmesi gerektiğini göstermektedir.

### **3. EĞİLME ETKİSİNDE BETONARME KESİT DAVRANIŞI**

Eğilme etkisi altındaki betonarme kesitte taşıma mekanizması, basınç bölgesindeki beton kuvveti ile çekme donatısındaki çekme kuvvetinin denge hâlinde çalışmasına dayanır. Çatlama öncesinde beton kesitin tamamı davranışa katkı verirken, çatlama sonrasında çekme bölgesindeki betonun katkısı tasarımda çoğunlukla ihmal edilir. Bu nedenle çekme kuvvetini karşılayacak donatı miktarı, kesitin güvenli ve sünek davranışı açısından belirleyici hâle gelir (Ersoy & Özcebe, 2004; Kaya, 2010).

Moment-eğrilik ilişkisi, eğilme davranışının aşamalarını açıklamada temel bir kavramsal araçtır. İlk aşamada beton ve donatı yaklaşık elastik davranır. Çekme bölgesindeki beton çatladıktan sonra kesit rijitliği azalır ve moment-eğrilik eğrisi ilk doğrusal davranıştan ayrılır. Donatı akma gerilmesine ulaştığında kesitte plastik şekil değiştirmeler başlar. Nihai aşamada ise beton basınç bölgesinin ezilmesi veya donatının aşırı uzaması kesitin taşıma gücünü sınırlar (Celep, 2008; Kaya, 2010).

Eğilme tasarımında amaç yalnızca yeterli moment kapasitesi sağlamak değildir. Kesitin göçme biçimi de tasarımın temel parçasıdır. Denge altı donatılı kesitlerde çekme donatısı beton basınç bölgesinin ezilmesinden önce akmaya ulaşır. Bu durumda eleman, göçme öncesinde çatlak gelişimi ve sehim artışı göstererek daha sünek bir davranış sergiler. Denge üstü donatılı kesitlerde ise donatı akmaya ulaşmadan beton basınç bölgesinin

ezilmesi söz konusu olabilir; bu durum gevrek ve ani bir göçme karakteri oluşturur. Bu nedenle donatı oranı sınırları, yönetmeliklerde yalnızca ekonomik tasarım amacıyla değil, sünek davranışın sağlanması amacıyla da düzenlenir (Celep, 2009; Ersoy & Özcebe, 2004).

TS 500 ve TS EN 1992-1-1, eğilme hesabında farklı katsayılar ve kısmi güvenlik düzenlemeleri içerse de temel denge yaklaşımı bakımından benzer bir mekanik temele dayanır. Tezde yapılan değerlendirmelerde eğilme hesabı bakımından iki standart arasında en fazla yaklaşık yüzde iki düzeyinde fark olduğu belirtilmektedir (Kaya, 2010). Bu sonuç, eğilme tasarımının betonarme hesap yöntemleri içinde daha olgun ve daha iyi tanımlanmış bir alan olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte küçük sayısal farkların uygulamada donatı çapı, donatı adedi ve yerleştirme koşulları üzerinde etkili olabileceği unutulmamalıdır.

### **3.1. Eğilme Rijitliği ve Sünekliğin Tasarım Açısından Önemi**

Eğilme rijitliği, moment ile eğrilik arasındaki ilişki üzerinden tanımlanabilir. Çatlamamış kesitte brüt kesit rijitliği etkiliyken, çatlama sonrası rijitlik çekme donatısı, çatlak dağılımı, beton basınç bölgesi ve aderans koşullarına bağlı olarak azalır. Bu durum servis yükleri altında sehim hesabı, çatlak kontrolü ve titreşim davranışı bakımından önemlidir. Betonarme elemanın yalnızca nihai dayanımının yeterli olması, servis kullanılabilirliği açısından her zaman yeterli değildir (Celep, 2009; TSE, 2009).

Süneklik ise elemanın taşıma gücünde ani ve habersiz bir kayıp olmadan şekil değiştirme yapabilme yeteneğidir. Donatı akması sonrası oluşan dönme kapasitesi, plastik mafsallık bölgelerinin gelişimi ve enerji tüketimi açısından belirleyicidir. Tezde, basınç donatısının bulunmasının basınç bölgesi

yüksekliğini küçülterek daha büyük eğriliklerin oluşmasına katkı sağlayabileceği ve bu yolla kesit davranışını daha sünek hâle getirebileceği ifade edilmektedir (Kaya, 2010). Bu değerlendirme, eğilme tasarımının yalnızca alt çekme donatısı hesabından ibaret görülmemesi gerektiğini ortaya koyar.

#### **4. KESME DAVRANIŞI VE EĞİK ÇATLAMA MEKANİZMASI**

Kesme davranışı, betonarme tasarımının en karmaşık konularından biridir. Eğilme hesabında kesit iç kuvvet dengesi daha belirgin iken, kesme dayanımı birden fazla mekanizmanın eş zamanlı katkısıyla oluşur. Çatlamamış beton basınç bölgesi, agrega kenetlenmesi, boyuna donatıların dübel etkisi, etriyelerin çekme bağı davranışı ve eğik basınç alanı kesme kuvvetinin taşınmasına katkıda bulunur (Vecchio & Collins, 1986; Zsutty, 1971). Bu bileşenlerin etkinliği çatlak açıklığına, kesme açıklığına, donatı oranına, beton dayanımına ve yükleme düzenine bağlı olarak değişir.

Kesme etkisi altında betonarme kirişte asal çekme gerilmeleri belirli bir düzeye ulaştığında eğik çatlaklar oluşur. Eğilme çatlakları genellikle çekme bölgesinde düşeye yakın biçimde başlar; kesme kuvvetinin yüksek olduğu bölgelerde bu çatlaklar eğik yönde ilerleyerek eğilme-kesme çatlağına dönüşür. Eğik çatlak geliştikten sonra kesme kuvvetinin taşınmasında etriye donatısı büyük önem kazanır. Etriye, çatlak boyunca çekme bağı gibi çalışarak basınç çubuğu ile birlikte kafes giriş benzeri bir taşıma mekanizması oluşturur (Marti, 1985; Vecchio & Collins, 1986).

Kesme göçmesi çoğu durumda eğilme göçmesine göre daha gevrek karakterlidir. Bunun nedeni, kesme çatlaklarının hızlı ilerleyebilmesi ve çatlak yüzeyindeki mekanik kenetlenme veya beton basınç bölgesinin ani biçimde yetersiz kalabilmesidir.

Bu nedenle yönetmeliklerde kesme tasarımı, yalnızca nominal dayanım hesabını değil, minimum etriye koşullarını, etriye aralığı sınırlarını ve gevrek kırılmanın önlenmesini de içerir. Kaya (2010), TS 500 kapsamında kesme kuvveti ve burulma etkilerinin değerlendirilmesinde özellikle gevrek kırılmanın önlenmesine yönelik düzenlemelerin önemli olduğunu vurgulamaktadır.

TS EN 1992-1-1'de kesme davranışı, kayma donatısı bulunmayan ve kayma donatısı gereken elemanlar ayrımıyla ele alınır. Kayma donatısı bulunan elemanlarda kafes modeline dayanan bir idealizasyon kullanılır; beton basınç çubuğu, boyuna donatı ve etriye donatısı birlikte iç kuvvet aktarımını sağlar. Bu yaklaşım, kesme hesabının yalnızca kesit alanı ve beton dayanımıyla sınırlı olmadığını; donatı yerleşimi, basınç alanı ve çatlak geometrisiyle birlikte düşünülmesi gerektiğini ortaya koyar (TSE, 2009).

#### **4.1. Kesme Hesabında Standart Yaklaşımların Yorumlanması**

TS 500, mühendislik uygulaması bakımından sade ve doğrudan kullanılabilir bir kesme tasarımı yaklaşımı sunar. Kesme kuvvetinin belirli sınırları aşması durumunda kesme donatısı düzenlenmesi gerekir. Bu düzenleme, eğik çatlakların gelişmesini sınırlamak ve gevrek göçmeyi önlemek amacı taşır. TS EN 1992-1-1 ise kesme donatılı elemanlarda değişken açılı kafes yaklaşımı gibi daha mekanik temelli idealizasyonlara yer verir. Her iki standartta da amaç güvenli taşıma gücünü sağlamak olmakla birlikte, hesap adımlarındaki katsayılar ve model kabulleri farklı sonuçlar verebilir.

Tez çalışmasında kesme kuvvetine göre yapılan hesaplarda iki standart arasındaki farkın burulma hesaplarında olduğu gibi eğilme hesabına göre daha belirgin olabildiği ve yaklaşık yüzde on düzeyine kadar çıkabildiği belirtilmektedir (Kaya, 2010). Bu fark, kesme davranışının çok parametrelili ve

model bağımlı yapısıyla uyumludur. Tasarımcı açısından önemli olan, sayısal farkı yalnızca katsayı değişimi olarak görmemek; bu farkın arkasındaki mekanik varsayımları ve donatı düzenleme sonuçlarını da değerlendirmektir.

## **5. BURULMA DAVRANIŞI VE KESME- BURULMA ETKİLEŞİMİ**

Burulma, betonarme elemanlarda çoğu zaman eğilme ve kesme ile birlikte ortaya çıkan bir iç kuvvet etkisidir. Kenar kirişleri, balkon ve çıkma elemanları, eksantrik yüklenen kirişler, plan düzensizlikleri ve süreksizlik bölgeleri burulma etkisinin oluşabileceği tipik durumlardır. Burulma momenti, kesit çevresinde kayma gerilmeleri oluşturur ve bu gerilmeler elemanın belirli yüzeylerinde kesme kuvvetinden doğan kayma gerilmeleriyle aynı yönde birleşebilir. Bu nedenle kesme-burulma etkileşimi, betonarme elemanlarda güvenli tasarım bakımından özel önem taşır (Hsu, 1990; Kaya, 2010).

Burulma etkisindeki betonarme elemanda çatlama sonrası taşıma mekanizması, kapalı etriyeler ve kesit çevresine dağıtılmış boyuna donatılarla sağlanır. Kapalı etriyeler burulma kaynaklı eğik çatlaklar boyunca çekme bağı gibi davranırken, boyuna donatılar burulma çevriminde oluşan çekme kuvvetlerinin karşılanmasına katkı verir. Bu nedenle burulma donatısı yalnızca belirli bir yüzeye yerleştirilen yerel bir donatı olarak görülmemelidir; kesit çevresini saran ve yük yolunun sürekliliğini sağlayan bir sistem olarak değerlendirilmelidir (Mitchell & Collins, 1976; MacGregor & Ghoneim, 1995).

TS EN 1992-1-1’de burulma direncinin kapalı kesme kuvveti dağılımına dayalı ince cidarlı kapalı kesit modeliyle hesaplanabileceği belirtilir. Dolu kesitler eşdeğer ince cidarlı kesitler olarak modellenebilir; T kesitler gibi karmaşık kesitler ise alt kesitlere ayrılarak her birinin burulma katkısı

değerlendirilebilir (TSE, 2009). Bu yaklaşım, burulma davranışının kesit çevresindeki kayma akışı ile ilişkili olduğunu açık biçimde ortaya koyar. Tezde de TS EN 1992-1-1'in burulma değerlendirmesinde yapının bütün olarak dikkate alınması gerektiği, statik denge burulma direncine bağlıysa taşıma gücü ve kullanılabilirlik sınır durumlarının birlikte göz önüne alınması gerektiği aktarılmaktadır (Kaya, 2010).

Burulma etkisinin yalnızca uyumluluk kusurlarından kaynaklandığı ve statik dengenin burulma direncine bağlı olmadığı hiperstatik sistemlerde, taşıma gücü sınır durumunda burulmanın bazı koşullarda ihmal edilebilmesi mümkündür. Buna karşılık denge burulması bulunan elemanlarda burulma etkisinin ihmal edilmesi güvenli değildir. Bu ayırım, mühendislik uygulamasında önemli bir tasarım kararını ifade eder. Bir elemandaki burulmanın sistemin dengesini sağlamak için zorunlu olup olmadığı doğru belirlenmeli; gereksiz donatı artışından kaçınılırken güvenlikten ödün verilmemelidir (TSE, 2009).

### **5.1. Kesme-Burulma Etkileşiminin Tasarım Sonuçları**

Kesme ve burulma aynı elemanda birlikte bulunduğunda, enine donatı talebi yalnızca kesme kuvvetinden doğan etriye alanıyla sınırlı kalmaz. Burulma momenti de etriye ve boyuna donatı gerektirir. Bu nedenle hesap sonucunda kesme için gerekli etriye alanı ile burulma için gerekli etriye alanı birleştirilmeli; toplam etriye alanı seçilen çap ve aralığa göre kontrol edilmelidir. Tezde önerilen tasarım sıralamasında önce kesitin burulma açısından yeterliliği kontrol edilmekte, ardından eğilme donatısı, kesme etriyesi ve burulma donatıları birlikte düzenlenmektedir (Kaya, 2010).

Burulma tasarımında kesit geometrisi de önemli bir etkidir. Kompakt ve kareye yakın kesitler burulma açısından daha etkin davranabilir. Genişliği ve yüksekliği çok farklı olan ince kesitlerde burulma rijitliği ve burulma dayanımı daha sınırlı

olabilir. Bu nedenle burulmanın kritik olduğu elemanlarda, donatı hesabına geçmeden önce kesit boyutlarının uygunluğu değerlendirilmelidir. Kesit yetersizse yalnızca donatı artırımıyla güvenli ve ekonomik bir çözüm üretmek mümkün olmayabilir.

Boyuna burulma donatılarının kesit çevresine uygun aralıklarla dağıtılması, yük aktarımının sürekliliği açısından önemlidir. Donatıların yalnızca çekme bölgesine yoğunlaştırılması, eğilme açısından uygun görünse bile burulma çevrimi için yeterli olmayabilir. Kapalı etriyelerin kullanılması, etriye aralığı sınırlarına uyulması ve köşe bölgelerinde boyuna donatı sürekliliğinin sağlanması güvenli burulma davranışının temel koşullarıdır (Mitchell & Collins, 1980; TSE, 2009).

## **6. TS 500 VE TS EN 1992-1-1 AÇISINDAN KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRME**

TS 500 ve TS EN 1992-1-1, betonarme elemanların güvenli biçimde tasarlanmasını amaçlayan iki standart yaklaşımı temsil eder. İki standardın temelinde sınır durum düşüncesi, malzeme dayanımlarının güvenlik katsayılarıyla azaltılması ve yük etkilerinin güvenli tarafta değerlendirilmesi bulunur. Bununla birlikte, formülasyonlar, model kabulleri ve bazı donatı düzenleme esasları bakımından farklılıklar ortaya çıkabilir. Bu farklılıklar, özellikle kesme ve burulma gibi çatlama sonrası yük aktarım mekanizmalarının daha karmaşık olduğu durumlarda belirginleşir (Kaya, 2010; TSE, 2000; TSE, 2009).

Eğilme hesabında standartlar arasındaki farkın sınırlı kalması beklenen bir sonuçtur. Çünkü eğilme davranışı, basınç bloğu ve çekme donatısı dengesine dayalı nispeten iyi tanımlanmış bir kesit problemidir. Buna karşılık kesme ve burulma hesaplarında davranışın çatlak gelişimine, yük yoluna, kesit çevresi boyunca gerilme dağılımına ve donatı düzenine bağlı olması, standartlar arasındaki sonuç farkını artırabilir.

Tezde eğilme hesabında farkın yaklaşık yüzde iki, kesme ve burulma hesaplarında ise yaklaşık yüzde on düzeyine kadar çıkabildiği belirtilmektedir (Kaya, 2010).

Bu farkların uygulamadaki etkisi, yalnızca hesap sonucunda elde edilen donatı alanının değişmesi değildir. Standart yaklaşımı, tasarımcının kritik kesiti nerede alacağı, burulmayı ihmal edip edemeyeceği, etriye aralığını nasıl sınırlandıracağı, boyuna donatıyı kesit çevresine nasıl dağıtacağı ve kesit yetersizliğinde boyut artırımını gerekip gerekmediği gibi kararları da etkiler. Bu nedenle karşılaştırmalı standart değerlendirmesi, mühendislik pratiği açısından yalnızca sayısal sonuç tablosu değil, tasarım mantığı analizi olarak görülmelidir.

### **6.1. Karşılaştırmalı Tasarım İlkelerinin Özetlenmesi**

**Tablo 1. Betonarme elemanlarda iç kuvvet etkilerinin yapı mekaniği açısından yorumlanması**

<b>İç kuvvet etkisi</b>	<b>Yapı mekaniği ve tasarım yorumu</b>
Eğilme	Beton basınç bölgesi ile çekme donatısı arasındaki iç kuvvet dengesi belirleyicidir. Moment-eğrilik ilişkisi, donatı akması, beton basınç ezilmesi ve donatı oranı sünek davranışın temel göstergeleridir.
Kesme	Kesme dayanımı çatlamamış beton basınç bölgesi, agrega kenetlenmesi, dübel etkisi, etriye katkısı ve basınç çubuğu mekanizmasıyla oluşur. Eğik çatlak gelişimi ve gevrek kırılma riski tasarımda önceliklidir.
Burulma	Kesit çevresinde kapalı kayma akışı, kapalı etriye ve çevresel boyuna donatı sistemi etkilidir. Kesit geometrisi, kapalı etriye sürekliliği ve boyuna donatı dağılımı güvenli burulma davranışı için önemlidir.

*Not. Tablo, betonarme davranışın yapı mekaniği çerçevesinde yorumlanması amacıyla Kaya (2010), TSE (2000) ve TSE (2009) esas alınarak hazırlanmıştır.*

Tablo 1’de görüldüğü üzere eğilme, kesme ve burulma etkileri aynı malzeme sistemi içinde farklı iç kuvvet aktarım mekanizmalarıyla taşınmaktadır. Eğilmede kesit dengesi ön plana çıkarken, kesmede çatlak sonrası çok bileşenli bir taşıma sistemi, burulmada ise kapalı çevresel yük akışı belirleyicidir. Bu nedenle standartlar arası karşılaştırma yapılırken her iç kuvvet etkisini aynı doğruluk düzeyinde ele almak doğru değildir. Eğilme

hesabındaki yakınlık, kesme ve burulma hesabındaki farkların önemsiz olduğu anlamına gelmez.

Tasarım sıralaması açısından güvenli bir yaklaşım, önce elemanın yükleme koşullarının ve kritik iç kuvvet bileşimlerinin belirlenmesiyle başlamalıdır. Daha sonra kesit boyutlarının eğilme, kesme ve burulma açısından yeterli olup olmadığı kontrol edilmelidir. Burulma momenti kritik sınırın altında kalıyorsa bazı standart koşulları içinde ihmal edilebilir; ancak denge burulması bulunan elemanlarda bu yol güvenli olmayabilir. Kesit yeterliliği sağlandıktan sonra eğilme donatısı, kesme etriyesi, burulma etriyesi ve boyuna burulma donatısı birlikte düzenlenmelidir. En son aşamada ise minimum donatı, maksimum aralık, aderans ve beton örtüsü koşulları kontrol edilmelidir (Kaya, 2010; TSE, 2000; TSE, 2009).

**Tablo 2. TS 500 ve TS EN 1992-1-1 yaklaşımlarının tasarım pratiği açısından karşılaştırılması**

Değerlendirme başlığı	Karşılaştırmalı yorum
Eğilme hesabı	TS 500 pratik kesit hesabı ve donatı oranı sınırlarıyla sünek davranışı hedefler. TS EN 1992-1-1 ise sınır durum tasarımı içinde malzeme modelleri ve kısmi katsayılarla benzer kesit denge mantığını kullanır.
Kesme hesabı	TS 500 uygulama kolaylığı sağlayan doğrudan kontroller ve etriye düzenlemeleri sunar. TS EN 1992-1-1 kafes modeline dayalı daha ayrıntılı mekanik yorumlara imkân verir.
Burulma hesabı	TS 500 kesit yeterliliği, kritik burulma ve donatı birleşimi açısından pratik denetimler içerir. TS EN 1992-1-1 eşdeğer ince cidarlı kapalı kesit ve kapalı kayma akışı mantığını açık biçimde kullanır.
Donatı düzeni	Her iki yaklaşımda da etriye aralığı, minimum donatı ve gevrek kırılmanın önlenmesi önemlidir. Burulmada kapalı etriye ve çevresel boyuna donatı yerleşimi hesap sonucunun ayrılmaz parçasıdır.

*Not. Karşılaştırma, tezde verilen analitik değerlendirmeler ile ilgili standartların tasarım mantığı dikkate alınarak özetlenmiştir (Kaya, 2010; TSE, 2000; TSE, 2009).*

## **7. UYGULAMAYA YÖNELİK DEĞERLENDİRME**

Betonarme tasarımda standart formüllerin doğru uygulanması kadar, bu formüllerin hangi mekanik durumu temsil ettiğinin anlaşılması da önemlidir. Eğilme, kesme ve burulma etkilerinin birlikte bulunduğu bir elemanda tasarımcı, hesap adımlarını mekanik bir yük yolu mantığı içinde takip etmelidir. Örneğin eğilme donatısı yalnızca moment kapasitesini artıran bir unsur değil, aynı zamanda kesme davranışında dübel etkisine ve burulma davranışında çevresel çekme kuvvetlerine katkı sağlayabilen bir bileşendir. Benzer biçimde etriyeler yalnızca kesme çatlaklarını kesen donatılar değil, burulma etkisinde kapalı çevrim oluşturan temel taşıyıcı elemanlardır.

Burulma açısından kritik elemanlarda kesit seçimi, donatı hesabından önce düşünülmelidir. Kompakt kesitlerin burulma davranışı bakımından daha olumlu sonuç verebilmesi, mimari ve statik tasarım aşamalarında dikkate alınmalıdır. Kesit yetersizliğini yalnızca donatı artırımı ile karşılamaya çalışmak, sık donatı yerleşimi, beton döküm güçlüğü, aderans sorunları ve ekonomik olmayan çözümler doğurabilir. Bu nedenle burulma duyarlılığı yüksek elemanlarda hesap-donatı ilişkisi kadar, kesit geometrisi-donatı yerleşimi ilişkisi de değerlendirilmelidir.

Kesme ve burulma etkilerinin birlikte çalıştığı bölgelerde etriye aralıklarının sınırlandırılması ve kapalı etriye düzeninin sürekliliği hayati önemdedir. Etriye kollarının çatlakları etkili biçimde kesmesi, boyuna donatının köşe bölgelerinde süreklilik sağlaması ve beton örtüsünün yeterli olması, hesapla elde edilen kapasitenin gerçek elemanda oluşabilmesi için gereklidir. Yönetmeliklerde verilen minimum donatı ve aralık koşulları bu nedenle yalnızca biçimsel şartlar olarak görülmemelidir.

Kitap bölümü kapsamında yapılan bu değerlendirme, tezdeki analitik karşılaştırmaları daha genel bir yapı mekaniği çerçevesine yerleştirmektedir. Böylece çalışma, önceki özet

bildiri düzeyindeki sınırlı kapsamdan ayrılarak eğilme, kesme ve burulma etkilerinin birlikte yorumlandığı daha bütüncül bir değerlendirme niteliği kazanmaktadır.

## **8. SONUÇ**

Bu kitap bölümünde betonarme yapı elemanlarında eğilme, kesme ve burulma etkileri TS 500 ve TS EN 1992-1-1 çerçevesinde yapı mekaniği açısından değerlendirilmiştir. Çalışma, yazarın yüksek lisans tezinden üretilmiş olmakla birlikte, tez metninin doğrudan tekrarı yerine yeniden kurgulanmış bir akademik bölüm niteliğindedir. Değerlendirme, betonarme davranışın güvenli biçimde yorumlanabilmesi için denge, şekil değiştirme uyumu, çatlama sonrası rijitlik, süneklik ve iç kuvvet aktarım mekanizmalarının birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Eğilme davranışı, betonarme tasarımın daha iyi tanımlanmış alanlarından biridir. Çekme donatısının akması, beton basınç bölgesinin davranışı, donatı oranı ve moment-eğrilik ilişkisi eğilme güvenliğinin temel belirleyicileridir. TS 500 ve TS EN 1992-1-1 arasında eğilme hesabı bakımından sınırlı farklar oluşması, bu etkinin kesit dengesi temelinde daha kararlı biçimde modellenbilmesiyle açıklanabilir.

Kesme davranışı, eğilmeye göre daha karmaşık ve daha belirsizdir. Eğik çatlak oluşumu, agrega kenetlenmesi, dübel etkisi, basınç alanı ve etriye katkısı gibi çok sayıda mekanizma kesme dayanımını etkiler. Bu nedenle kesme hesabında standartlar arasındaki farklılıkların daha belirgin olması beklenebilir. Gevrek kırılmanın önlenmesi için minimum etriye, etriye aralığı ve kritik kesit kontrollerinin mekanik anlamı doğru kavranmalıdır.

Burulma etkisi, özellikle kesme kuvvetiyle birlikte değerlendirildiğinde betonarme eleman tasarımının kritik bir boyutunu oluşturur. Burulma ve kesme aynı yüzeylerde kayma gerilmeleri meydana getirebildiğinden, kesme-burulma etkileşimi yalnızca ikincil detaylandırma konusu olarak görülmemelidir. Kapalı etriyeler, kesit çevresine dağıtılmış boyuna donatılar ve uygun kesit geometrisi güvenli burulma davranışının vazgeçilmez bileşenleridir.

Sonuç olarak, TS 500 ve TS EN 1992-1-1 karşılaştırması tasarımcıya yalnızca farklı hesap sonuçları sunmaz; aynı zamanda betonarme eleman davranışını farklı idealizasyonlar üzerinden yorumlama imkânı verir. Eğilmeye standartlar arası fark sınırlı kalırken, kesme ve burulma hesaplarında farkların artabilmesi, bu etkilerin çatlama sonrası yük aktarım mekanizmalarına daha duyarlı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle betonarme tasarımda standart hükümleri, yapı mekaniği ilkeleriyle birlikte okunmalı ve donatı düzenlemesi hesap sonucunun ayrılmaz bir parçası olarak değerlendirilmelidir.

## **KAYNAKÇA**

- Celep, Z. (2008). Betonarme taşıyıcı sistemlerde doğrusal olmayan davranış ve çözümleme. İstanbul: Beta Dağıtım.
- Celep, Z. (2009). Betonarme yapılar (5. bs.). İstanbul: Beta Dağıtım.
- Doğangün, A. (2008). Betonarme yapıların hesap ve tasarımı. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Ersoy, U. (1990). Taşıma gücü yöntemi varsayımları ile ilgili bir irdeleme. İMO Teknik Dergi, 4, 61-77.
- Ersoy, U. (1998). Betonarme kiriş ve kolonların moment kapasitesinin saptanması. İMO Teknik Dergi, 128, 1781-1797.
- Ersoy, U., & Özcebe, G. (2004). Betonarme. İstanbul: Evrim Yayınevi.
- Hsu, T. C. (1990). Shear flow zone in torsion of reinforced concrete. Journal of Structural Engineering, 116, 3206-3226.
- Kaya, N. (2010). Basit eğilme, kayma ve burulma etkisi altındaki betonarme yapı elemanlarının TS 500 ve TS EN 1992-1-1 standartlarına göre örneklerle incelenmesi (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- MacGregor, J. G., & Ghoneim, M. G. (1995). Design for torsion. ACI Structural Journal, 92, 211-218.
- Marti, P. (1985). Basic tools of beam design. ACI Journal Proceedings, 82, 45-46.
- Mitchell, D., & Collins, M. P. (1976). Detailing for torsion. ACI Journal, 73, 506.

- Mitchell, D., & Collins, M. P. (1980). Design proposals for shear and torsion. *PCI Journal*, 25, 70.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2000). TS 500: Betonarme yapıların hesap ve yapım kuralları. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2009). TS EN 1992-1-1: Beton yapılar. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- Vecchio, F. J., & Collins, M. P. (1986). The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear. *ACI Journal Proceedings*, 83, 219-231.
- Zsutty, T. C. (1971). Shear strength prediction for separate categories of simple beam tests. *ACI Journal*, 68, 138-143.

# **TABLALI BETONARME KİRİŞLERDE GÖVDE-TABLA ARA YÜZ KESMESİNİN YAPI MEKANİĞİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ<sup>1</sup>**

**Necim KAYA<sup>2</sup>**

## **1. GİRİŞ**

Betonarme taşıyıcı sistemlerde kirişler çoğu zaman yalnızca dikdörtgen kesitli elemanlar olarak ele alınsa da uygulamada döşeme ile birlikte çalışan kirişler tablalı kesit davranışı gösterir. Döşeme plağının kiriş gövdesiyle birlikte çalışması, eğilme kapasitesi ve rijitlik bakımından önemli avantaj sağlar. Buna karşılık gövde ile tabla arasındaki birleşim bölgesinde boyuna kayma gerilmeleri meydana gelir. Bu gerilmeler doğru değerlendirilmediğinde, kesitin hesapta varsayılan birleşik davranışı gerçekte tam olarak oluşmayabilir. Bu nedenle tablalı betonarme kirişlerde gövde-tabla ara yüz kesmesi, yalnızca yerel bir donatı detayı değil, birleşik kesit davranışının sürekliliğini sağlayan temel bir yapı mekaniği problemidir.

Yazarın yüksek lisans tezinde basit eğilme, kayma ve burulma etkisi altındaki betonarme yapı elemanları TS 500 ve TS

<sup>1</sup> Bu kitap bölümü, yazarın “Basit eğilme, kayma ve burulma etkisi altındaki betonarme yapı elemanlarının TS 500 ve TS EN 1992-1-1 standartlarına göre örneklerle incelenmesi” başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir. Tez kapsamında çalışması yapılan bu bölüm, tablalı betonarme kirişlerde gövde-tabla ara yüz kesmesi, farklı zamanlarda dökülen beton ara yüzlerinde kayma aktarımı ve ara yüz donatısının yapı mekaniği açısından değerlendirilmesine odaklanmaktadır.

<sup>2</sup> Dr. Batman Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojileri Bölümü, Batman, Türkiye. ORCID: 0000-0003-1478-761X.

EN 1992-1-1 standartlarına göre örneklerle incelenmiştir (Kaya, 2010). Tez kapsamında eğilme ve kayma davranışına ek olarak tablalı T kirişlerde gövde ve tabla kısımları arasında oluşan kesme kuvveti, farklı zamanlarda dökülen beton ara yüzlerinde kayma gerilmesi, yüzey pürüzlülüğü ve ara yüz donatısının etkisi ayrı başlıklar altında ele alınmıştır. Bu kitap bölümü, söz konusu tez içeriğini doğrudan tekrarlamak yerine, ara yüz kesmesi problemini yapı mekaniği ve yük aktarımı odağında yeniden düzenlemektedir.

Daha önce çalışması yapılan metinlerde eğilme-kesme davranışı, kesme-burulma etkileşimi ve TS 500 ile TS EN 1992-1-1 hükümlerinin genel karşılaştırması üzerinde durulmuştur. Bu bölümde ise kapsam daraltılarak tablalı kirişlerde gövde-tabla bağlantısının mekanik işleyişi incelenmektedir. Böylece aynı tezden üretilen çalışmalar arasında konu tekrarı azaltılmakta; eğilme, kesme ve burulma genel çerçevesinden farklı olarak ara yüz kesme aktarımı, yüzey sınıfı, aderans, pürüzlülük, kayma sürtünmesi ve ara yüzden geçen donatıların rolü ön plana çıkarılmaktadır.

Güncel literatür, beton-beton ara yüzlerinde kesme aktarımının yüzey durumu, sıkıştırma etkisi, beton dayanımı, ara yüzden geçen donatı ve çatlak geometrisi gibi çok sayıda parametreye bağlı olduğunu göstermektedir. Davaadorj, Calvi ve Stanton (2020), farklı kaynaklardan derlenen 509 ara yüz kesme deneyi üzerinden ara yüz pürüzlülüğü, sıkıştırma gerilmesi ve beton dayanımının kesme aktarımında belirleyici parametreler olduğunu ortaya koymuştur. Cao ve çalışma arkadaşları (2024), beton kompozit döşemelerde yüzey pürüzlülüğü, kayma donatısı oranı ve donatı açısının ara yüz dayanımı üzerindeki etkilerini incelemiş; ara yüz ayrılmasının gevrek bir göçme karakteri gösterebildiğini vurgulamıştır. Jeong ve arkadaşları (2025) ise çelik lifli beton kullanılan monolitik ve ayrı dökümlü numunelerde kayma sürtünmesi mekanizmasını değerlendirerek,

ara yüz davranışının beton çekme dayanımı, dübel etkisi ve kenetlenme bileşenleriyle birlikte yorumlanması gerektiğini göstermiştir.

Bu bölümün amacı, tablalı betonarme kirişlerde gövde-tabla ara yüzünde oluşan kesme aktarımını TS 500 ve TS EN 1992-1-1 çerçevesinde yapı mekaniği açısından değerlendirmek; ayrıca EN 1992-1-1:2023 ve fib Model Code 2020 gibi güncel yaklaşımların beton-beton ara yüzü davranışına sağladığı kavramsal katkıları tartışmaktır. Bölümde ayrıntılı sayısal hesap yapılmamış, bunun yerine tasarımda dikkate alınması gereken mekanik ilkeler ve donatı düzenleme esasları teknik bir çerçevede açıklanmıştır.

## **2. TABLALI BETONARME KİRİŞLERİN YAPI MEKANİĞİ AÇISINDAN ÖNEMİ**

Tablalı betonarme kirişler, gövde ve döşeme plağının birlikte çalışmasıyla oluşan birleşik kesitlerdir. Pozitif moment bölgesinde döşeme tablası genellikle basınç bölgesinde yer aldığından, basınç kuvvetinin daha geniş bir alana yayılmasına olanak verir. Bu durum nötr eksen konumunu, iç kuvvet kolunu, kesit rijitliğini ve eğilme kapasitesini etkiler. Ancak bu olumlu etkinin gerçekleşebilmesi için tabla ve gövde arasında yeterli kayma aktarımı sağlanmalıdır. Aksi halde kesit, hesapta varsayılan tek parça T kesit gibi değil, kısmen ayrılmış elemanlar gibi davranabilir.

Yapı mekaniği açısından tablalı kiriş davranışı, kesit içindeki normal gerilmelerle sınırlı değildir. Eğilme momenti açıklık boyunca değiştiği için tablada oluşan boyuna basınç veya çekme kuvveti de kiriş boyunca değişir. Bu değişim, gövde ile tabla arasındaki birleşim çizgisi boyunca yatay kesme gerilmesi oluşturur. Başka bir ifadeyle, tablanın kirişe katkısı yalnızca basınç alanı sağlamasından değil, bu basınç alanının gövdeye

güvenli biçimde bağlanmasından kaynaklanır. Bu nedenle ara yüz kesmesi, tablalı kesitin iç kuvvet bütünlüğünü sağlayan temel mekanizmadır.

Tablalı kirişlerde gövde-tabla ara yüzü çoğu zaman döşeme donatısı, kiriş etriyeleri, enine dağıtma donatıları ve betonun aderans kapasitesi tarafından birlikte taşınır. Ancak tasarımda yalnızca beton aderansına güvenmek her durumda yeterli değildir. Kesme kuvvetinin büyük olduğu bölgelerde, moment değişiminin ani olduğu kesitlerde, noktasal yüklerin bulunduğu açıklıklarda ve farklı zamanlarda dökülen beton bölgelerinde ara yüz kayması daha kritik hâle gelebilir. Bu nedenle ara yüz kontrolü, yalnızca prefabrike veya kompozit elemanlar için değil, monolitik dökülen tablalı betonarme elemanlar için de önemlidir.

Tezde tablalı kesit örnekleri eğilme hesabı bakımından değerlendirilmiş; ayrıca TS EN 1992-1-1 kapsamında tablalı T kirişlerde gövde ve tabla kısımları arasında oluşan kesme kuvveti ayrı bir başlık altında açıklanmıştır (Kaya, 2010). Bu ayrım, tablalı kesit tasarımında yalnızca eğilme kapasitesinin değil, tabla ile gövde arasındaki kuvvet aktarımının da bağımsız olarak kontrol edilmesi gerektiğini göstermektedir.

## **2.1. Kompozit Kesit Davranışı ve Birlikte Çalışma Şartı**

Kompozit kesit davranışının oluşabilmesi için betonun farklı bölgeleri arasında kayma uyumu sağlanmalıdır. Kiriş gövdesi ile tabla arasında görece kayma meydana gelirse, kesitin düzlem kesit kabulüne dayalı eğilme davranışı zayıflar. Bu durumda kesit rijitliği azalabilir, çatlak genişlikleri artabilir ve hesaplanan sehim değerleri gerçek davranışı temsil etmeyebilir. Dolayısıyla gövde-tabla ara yüzünün yeterli kesme dayanımına sahip olması, yalnızca nihai taşıma gücü bakımından değil, servis kullanılabilirliği bakımından da gereklidir.

Birleşik davranışın sağlanmasında aderans, yüzey pürüzlülüğü, agregaların mekanik kenetlenmesi, ara yüzden geçen donatıların dübel etkisi ve normal basınç gerilmeleri birlikte rol oynar. Bu mekanizmaların tamamı, ara yüz boyunca oluşan kayma gerilmesini karşılayan bir iç direnç sistemi oluşturur. Betonarme tasarımda bu direnç sistemi çoğu zaman sadeleştirilmiş katsayılar veya standart bağıntılarıyla temsil edilir. Ancak mühendislik yorumu açısından bu katsayıların arkasında yer alan mekanik süreçlerin bilinmesi önemlidir.

Gövde-tabla birleşimi yeterli değilse tablada oluşan basınç kuvveti gövdeye tam olarak aktarılamaz. Bu durumda tablanın etkin genişliği pratikte azalır ve kesit beklenen T kesit kapasitesine ulaşamayabilir. Özellikle geniş döşeme tablasına sahip kirişlerde bu risk daha belirgindir. Çünkü tabla genişledikçe boyuna kuvvetin gövdeye aktarılması gereken mesafe ve ara yüz boyunca oluşan kayma talebi artar.

### **3. GÖVDE-TABLA ARA YÜZÜNDE KESME AKIŞI VE YÜK AKTARIM MEKANİZMASI**

Gövde-tabla ara yüzünde oluşan kesme gerilmesi, tabladaki boyuna kuvvetin kiriş boyunca değişmesinden kaynaklanır. Eğilme momentinin düşük olduğu kesitlerde tabladaki boyuna kuvvet sınırlıyken, momentin büyüdüğü kesitlerde bu kuvvet artar. Boyuna kuvvetteki bu değişim, tabla ile gövde arasında yatay doğrultuda bir kesme akışı doğurur. Bu nedenle ara yüz kesmesi, dış yüklerin doğrudan oluşturduğu düşey kesmeden farklı görünse de aynı denge ilkesinin sonucudur: eleman içinde değişen normal kuvvetler, başka bir bölgede kayma aktarımı gerektirir.

TS EN 1992-1-1 yaklaşımında tablalı kirişlerin tabla kısmı, basınç çubukları ve çekme donatısı biçimindeki çekme bağlarından oluşan bir sistem olarak idealize edilebilir. Bu

idealizasyon, gövde-tabla birleşimini yalnızca bir temas yüzeyi olarak değil, yük yolunun sürekliliğini sağlayan bir mekanik sistem olarak görür. Tabla içindeki basınç çubukları, enine donatılar ve gövde ile tabla arasındaki kesme aktarımı birlikte çalışarak tablanın kiriş kesitine katkısını güvenli hâle getirir.

Ara yüz kesmesinin büyüklüğü, yalnızca toplam kesme kuvvetine değil, tabladaki boyuna kuvvet değişimine de bağlıdır. Bu nedenle moment diyagramının şekli, noktasal yüklerin yeri, mesnet koşulları ve yükleme düzeni ara yüz talebi üzerinde etkili olur. Momentin sıfır olduğu kesit ile en büyük momentin olduğu kesit arasındaki bölge, tabladaki kuvvet değişiminin belirgin olduğu alandır. Bu bölgede ara yüz kesme kontrolü daha dikkatli yapılmalıdır.

Klasik elastik teoride homojen bir kirişte yatay kayma gerilmeleri parabolik dağılımla açıklanabilir. Ancak betonarme tablalı kirişte çatlama, donatı düzeni, aderans ve betonun çekme dayanımının sınırlı olması nedeniyle gerçek gerilme dağılımı daha karmaşıktır. Bu nedenle standartlar, doğrudan elastik kayma gerilmesi hesabı yerine tasarıma uygun idealize edilmiş ara yüz kesme modelleri kullanır. Bu modellerin amacı, karmaşık çatlama ve kayma mekanizmasını güvenli ve uygulanabilir bir donatı düzenine dönüştürmektir.

### **3.1. Basınç Çubuğu ve Çekme Bağı Yorumu**

Ara yüz kesmesinin yapı mekaniği bakımından en açıklayıcı yorumlarından biri basınç çubuğu-çekme bağı idealizasyonudur. Bu yaklaşımda beton, basınç doğrultusunda çalışan eğik çubuklarla; donatı ise bu basınç alanlarını dengeleyen çekme bağlarıyla temsil edilir. Tablalı kirişte tabla kısmı, gövdeye bağlanan bir basınç alanı gibi çalışır. Bu basınç alanının yön değiştirmesi veya gövdeye aktarılması gerektiğinde, ara yüz boyunca kayma gerilmeleri ve enine donatı talebi ortaya çıkar.

Bu idealizasyon, özellikle süreksizlik bölgelerinde ve yük aktarımının doğrusal olmayan biçimde gerçekleştiği kesitlerde önemlidir. Mesnet yakınları, ani kesit değişimleri, konsol bağlantıları ve noktasal yük bölgeleri gibi alanlarda iç kuvvet akışı klasik kesit teorisiyle tam olarak açıklanamaz. Bu tür bölgelerde strut-and-tie yaklaşımı, ara yüz kesmesini yük yolu ve denge kavramlarıyla daha açık biçimde yorumlamaya olanak verir.

Basınç çubuğu-çekme bağı modeli, donatı düzenlemesinin neden yalnızca hesaplanan alan değerinden ibaret olmadığını da gösterir. Ara yüzden geçen donatının yeterli ankraj boyuna sahip olması, doğru yönde yerleştirilmesi, çatlakları kesecek biçimde düzenlenmesi ve beton örtüsü içinde güvenli aderans sağlaması gerekir. Donatı alanı yeterli olsa bile ankraj veya yerleşim yetersizse, yük aktarımı hesapta varsayıldığı gibi gerçekleşmeyebilir.

**Tablo 1. Gövde-tabla ara yüz kesme aktarımını etkileyen başlıca parametreler**

Parametre	Yapı mekaniği açısından etkisi
Yüzey pürüzlülüğü	Aderans, mekanik kenetlenme ve kayma sürtünmesi kapasitesini artırır; pürüzsüz yüzeylerde ara yüz ayrılması daha erken başlayabilir.
Ara yüzden geçen donatı	Kayma çatlağını keserek dübel etkisi ve kenetlenme sağlar; yeterli ankraj yoksa katkısı sınırlı kalır.
Normal basınç veya çekme	Basınç ara yüz sürtünmesini olumlu etkiler; çekme gerilmesi aderans bileşenini azaltabilir ve çatlak açıklığını büyütebilir.
Beton dayanımı	Betonun çekme ve basınç dayanımı aderans, agrega kenetlenmesi ve basınç çubuğu kapasitesi üzerinde etkilidir.
Moment ve kesme diyagramı	Tabladaki boyuna kuvvet değişimini belirler; moment değişiminin hızlı olduğu bölgelerde ara yüz kesme talebi artabilir.
Döküm zamanı ve uygulama kalitesi	Farklı zamanlarda dökülen betonlarda yüzey hazırlığı, temizlik ve pürüzlendirme birleşik davranış için belirleyici olur.

#### **4. ARA YÜZ KESME DAYANIMINI ETKİLEYEN PARAMETRELER**

Ara yüz kesme dayanımı tek bir mekanizmanın sonucu değildir. Beton-beton ara yüzünde dayanım; kimyasal aderans, yüzey pürüzlülüğünden doğan mekanik kenetlenme, normal gerilme etkisiyle oluşan sürtünme, ara yüzden geçen donatıların dübel etkisi ve betonun çekme-bası dayanımı gibi bileşenlerin birlikte çalışmasıyla oluşur. Bu nedenle ara yüz kesmesi, eğilme kapasitesi gibi doğrudan bir kuvvet çiftine indirgenemeyen, çok parametrelili bir dayanım problemi.

Davaadorj vd. (2020), geniş deney verisi üzerinden yaptıkları değerlendirmede ara yüz koşulunun, sıkıştırma gerilmesinin ve beton dayanımının ara yüz kesme dayanımı üzerinde belirgin etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Bu sonuç, standartlarda yer alan pürüzlülük katsayılarının yalnızca uygulama kolaylığı sağlayan sayısal düzenlemeler olmadığını; aksine gerçek mekanik davranışın sadeleştirilmiş temsilcileri olduğunu göstermektedir. Benzer biçimde Cao vd. (2024), düşük kayma donatısı oranlarının da dikkate alındığı kompozit döşeme deneylerinde yüzey pürüzlülüğünün ve donatı düzeninin nihai ve artık kesme dayanımı üzerindeki etkisini vurgulamıştır.

Yüzey pürüzlülüğü, ara yüz davranışında en kritik parametrelerden biridir. Pürüzlü yüzeylerde agregaların birbirine kenetlenmesi, kayma yer değiştirmesi karşısında mekanik direnç üretir. Buna karşılık çok pürüzsüz yüzeylerde dayanım büyük ölçüde aderans ve varsa donatı katkısına bağlı kalır. Aderansın kırılması hâlinde ani kayma ve ayrılma davranışı ortaya çıkabilir. Bu nedenle özellikle farklı zamanlarda dökülen betonlarda yüzeyin temizlenmesi, zayıf şerbet tabakasının kaldırılması ve yeterli pürüzlülüğün sağlanması mühendislik açısından zorunludur.

Ara yüzden geçen donatılar, kesme aktarımında iki temel işlev görür. Birincisi, çatlak yüzeylerinin birbirinden ayrılmasını sınırlandırarak sürtünme ve agrega kenetlenmesini korur. İkincisi, kayma yer değiştirmesi geliştiğinde dübel etkisiyle ilave kesme direnci sağlar. Ancak bu katkının gerçekleşebilmesi için donatıların ara yüzün iki tarafında yeterli ankraja sahip olması gerekir. Tezde de ara yüzden geçen donatının her iki tarafta yeterli ankraj boyuna sahip olması gerektiği vurgulanmaktadır (Kaya, 2010).

#### **4.1. Aderans, Pürüzlülük ve Kayma Sürtünmesi**

Aderans, beton-beton ara yüzünde kayma başlamadan önce etkili olan ilk direnç bileşenlerinden biridir. Ancak aderans tek başına güvenilir bir nihai dayanım mekanizması olarak düşünülmemelidir. Çünkü çatlama, rötne, yüzey kirlenmesi, soğuk derz oluşumu veya yetersiz yüzey hazırlığı aderansı önemli ölçüde azaltabilir. Bu nedenle tasarımda pürüzlülük ve ara yüzden geçen donatı katkısı, aderansı destekleyen ve göçme sonrası dayanımı sürdüren mekanizmalar olarak değerlendirilmelidir.

Kayma sürtünmesi yaklaşımı, ara yüz boyunca normal basınç veya donatı kaynaklı kenetlenme etkisi oluştuğunda, kayma dayanımının önemli ölçüde artabileceğini kabul eder. Donatı çatlak açılmasını sınırladığında, çatlak yüzeyleri birbirine daha yakın kalır ve pürüzlü yüzeylerin birbirine kenetlenmesi sürer. Bu durum, ara yüz davranışının yalnızca başlangıç dayanımıyla değil, çatlama sonrası artık dayanım ve süneklikle de ilgili olduğunu gösterir.

Jeong vd. (2025), çelik lifli beton kullanılan ara yüz deneylerinde liflerin beton katkısını artırabildiğini ve dübel etkisi üzerinde olumlu rol oynayabildiğini belirtmiştir. Bu bulgu, ara yüz kesmesi tasarımının klasik betonarme sistemlerle sınırlı olmadığını; lifli beton, prefabrikte elemanlar, yerinde dökme tabakalar ve güçlendirme uygulamaları gibi farklı malzeme ve

yapım yöntemlerinde de önem taşıdığını göstermektedir. Daneshvar vd. (2025) tarafından tam ölçekli T kirişler üzerinde yapılan FRCM güçlendirme çalışmasında da yüzey hazırlığının bağ davranışı bakımından belirleyici olduğu vurgulanmıştır.

## **5. TS 500 VE TS EN 1992-1-1 YAKLAŞIMLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

TS 500 ve TS EN 1992-1-1, betonarme tasarımda güvenli taşıma gücü ve kullanılabilirlik koşullarını sağlamayı amaçlayan standartlardır. Ancak ara yüz kesmesi gibi özel mekanik problemlerde yaklaşımların ayrıntı düzeyi farklılaşabilir. TS 500 daha çok ulusal uygulama pratiğine uygun, sade ve doğrudan kontrol edilebilir hükümler sunar. TS EN 1992-1-1 ise sınır durum tasarımı çerçevesinde kesme aktarımı, ara yüz pürüzlülüğü, donatı katkısı ve basınç çubuğu yaklaşımını daha açık biçimde mekanik modellere bağlar.

Tezde TS EN 1992-1-1 kapsamında tablalı T kirişlerde tabla kısmı ile gövde kısmı arasında oluşan kesme kuvvetinin, tablada oluşan boyuna kuvvet değişimi üzerinden değerlendirildiği görülmektedir (Kaya, 2010). Bu yaklaşım, gövde-tabla birleşimindeki kesme talebini yalnızca düşey kesme kuvvetine bağlı görmez; eğilme momentindeki değişim nedeniyle tablada oluşan iç kuvvet aktarımını da hesaba katar. Bu bakış, tablalı kesitin gerçek yük yolunu anlamak bakımından önemlidir.

TS EN 1992-1-1’de farklı zamanlarda dökülen beton ara yüzleri için yüzeyler oldukça pürüzsüz, pürüzsüz, pürüzlü ve girintili çıkıntılı gibi sınıflara ayrılabilir. Bu sınıflandırma, ara yüz dayanımında pürüzlülük ve sürtünme katsayılarının davranış üzerindeki etkisini tasarım modeline taşır. Tezde de bu sınıflandırma aktarılmış; ara yüzden geçen donatı alanı, birleşim yeri alanı, ara yüz genişliği, normal gerilme ve donatı açısı gibi

parametrelerin tasarımda dikkate alındığı belirtilmiştir (Kaya, 2010).

Güncel EN 1992-1-1:2023, beton yapıların güvenlik, kullanılabilirlik, dayanıklılık ve sağlamlık esaslarını EN 1990 ile uyumlu biçimde ele alan ikinci nesil Eurocode 2 çerçevesini temsil etmektedir. Bu güncel yaklaşım, tasarım hükümlerinin yalnızca dayanım hesabı olarak değil, yapının tüm ömrü boyunca performansını etkileyen mekanik ve dayanıklılık ilkeleriyle birlikte okunması gerektiğini göstermektedir. fib Model Code 2020 ise beton-beton ara yüzleri için kesme aktarım mekanizmalarını, pürüzlülük özelliklerini, kayma sürtünmesini, dübel etkisini ve bileşenler arası etkileşimi daha geniş bir değerlendirme çerçevesine taşımaktadır.

**Tablo 2. Ara yüz kesmesi açısından standart ve model yaklaşımlarının karşılaştırmalı yorumu**

<b>Yaklaşım</b>	<b>Ara yüz kesmesi bakımından yorum</b>
TS 500	Uygulama kolaylığı ve güvenli donatı düzeni açısından pratik bir çerçeve sunar; ara yüz davranışının mekanik ayrıntıları sınırlı kalabilir.
TS EN 1992-1-1	Tablalı kirişlerde gövde-tabla kesmesini, boyuna kuvvet değişimi ve enine donatı gereksinimi üzerinden daha açık biçimde ele alır.
EN 1992-1-1:2023	Güvenlik, kullanılabilirlik, dayanıklılık ve sağlamlık ilkelerini daha güncel Eurocode çerçevesi içinde bütünleştirir.
fib Model Code 2020	Beton-beton ara yüzleri için pürüzlülük, kayma sürtünmesi, dübel etkisi ve bileşenlerin etkileşimini daha mekanik bir düzeyde tartışır.
Güncel deneysel çalışmalar	Ara yüz pürüzlülüğü, sıkıştırma etkisi, beton dayanımı, donatı oranı, donatı açısı ve yüzey hazırlığının davranış üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir.

### **5.1. Tablalı Kirişlerde TS EN 1992-1-1 Yaklaşımının Mekanik Yorumu**

TS EN 1992-1-1’de tablalı kirişlerde gövde ve tabla arasında oluşan kesme kuvvetinin değerlendirilmesi, kesitin birleşik çalışma varsayımını güvence altına almayı amaçlar. Bu kontrolde esas düşünce, tablanın kiriş boyunca taşıdığı boyuna

kuvvetin değişmesi ve bu değişimin gövde-tabla birleşiminde kesme aktarımı gerektirmesidir. Dolayısıyla hesap, gerçekte bir denge problemi: tabla kuvvetindeki artış veya azalış, ara yüz boyunca oluşan kesme akışıyla dengelenir.

Bu yaklaşımın önemli bir sonucu, ara yüz kontrolünün yalnızca en büyük düşey kesme kuvvetinin bulunduğu kesitte yapılmaması gerektiğidir. Boyuna kuvvet değişiminin büyük olduğu bölgeler de kritik olabilir. Örneğin momentin hızlı değiştiği bölgeler, noktasal yüklerin etkili olduğu açıklıklar veya kesit etkili genişliğinin değiştiği alanlar ara yüz kesmesi açısından ayrıca değerlendirilmelidir. Bu nedenle tasarımcı, yalnızca kesit dayanımını değil, moment ve kesme diyagramlarının eleman boyunca değişimini de birlikte okumalıdır.

Tezde tablalı kirişlerde dikkate alınan uzunluk, tablada oluşan normal kuvvet değişimi ve enine donatı alanı gibi kavramların açıklanması, TS EN 1992-1-1 yaklaşımının doğrudan bir yük aktarım modeli üzerine kurulduğunu göstermektedir (Kaya, 2010). Bu durum, yapı mekaniği açısından son derece anlamlıdır; çünkü gövde-tabla birleşimi, kesitin tek parça davranmasını sağlayan ara bağlantı düzlemidir.

## **6. FARKLI ZAMANLARDA DÖKÜLEN BETON ARA YÜZLERİNDE KAYMA AKTARIMI**

Farklı zamanlarda dökülen beton ara yüzleri, tablalı kiriş davranışında özel bir önem taşır. Monolitik dökülen bir döşeme-kiriş sisteminde beton sürekliliği daha doğal biçimde oluşurken, farklı zamanlarda dökülen betonlarda ara yüz kalitesi uygulama koşullarına doğrudan bağlıdır. Yüzeyde zayıf şerbet tabakası kalması, yeterli pürüzlendirme yapılmaması, kirlenme, nem koşullarının uygun olmaması veya yeni betonun eski betonla

yeterli aderans sağlayamaması durumunda birleşik davranış zayıflayabilir.

TS EN 1992-1-1 yaklaşımında farklı zamanlarda dökülen beton ara yüzlerinde kayma gerilmesi için ara yüz tasarım kayma direnci tanımlanır. Bu direnç, ara yüz pürüzlülüğü, beton çekme dayanımı, normal gerilme, ara yüzden geçen donatı oranı, sürtünme etkisi ve donatı yönlenmesi gibi bileşenlerle ilişkilendirilir. Tezde bu başlık altında yüzey sınıfları ve ara yüz donatısının özellikleri açıklanmıştır (Kaya, 2010). Bu açıklama, ara yüz davranışının yalnızca beton dayanımıyla değil, uygulama kalitesi ve donatı detaylandırmasıyla da doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir.

Farklı dökümlü ara yüzlerde pürüzlendirme işlemi, tasarımda varsayılan mekanik kenetlenmenin oluşabilmesi için gereklidir. Pürüzlendirilmemiş yüzeylerde aderans kırıldıktan sonra kayma yer değiştirmesi hızlı gelişebilir. Pürüzlü veya girintili çıkıntılı yüzeylerde ise kayma düzlemi boyunca daha fazla mekanik direnç oluşur. Bununla birlikte pürüzlülüğün dayanım üzerindeki olumlu etkisi, donatı ve ankraj detaylarının yetersiz olduğu durumlarda sınırlı kalabilir. Bu nedenle yüzey hazırlığı ile ara yüzden geçen donatı düzeni birlikte düşünülmelidir.

Ara yüz donatısı, yalnızca kayma kuvvetini karşılayan pasif bir çelik alanı olarak görülmemelidir. Bu donatı, çatlak açıklığını sınırlandırır, sürtünme mekanizmasını aktif hâle getirir, dübel etkisi oluşturur ve ara yüzün ani ayrılmasını geciktirir. Bu nedenle ara yüzden geçen donatının yönü, aralığı, çapı, ankraj boyu ve beton örtüsü, taşıma gücü kadar göçme biçimi üzerinde de etkilidir.

### **6.1. Ara Yüz Sınıfları ve Uygulama Kalitesi**

Ara yüz sınıflandırması, tasarımcıya yüzey hazırlığının sayısal ve mekanik etkisini değerlendirme olanağı verir. Oldukça

pürüzsüz yüzeylerde beton-beton temasından beklenen mekanik kenetlenme sınırlıdır. Pürüzsüz yüzeylerde aderans ve sürtünme katkısı artsa da, kayma kapasitesi yine uygulama kalitesine duyarlıdır. Pürüzlü yüzeylerde agreganın açığa çıkarılması veya yüzeyin mekanik olarak işlenmesi, kayma düzleminde daha etkin bir kenetlenme oluşturur. Girintili çıkıntılı yüzeylerde ise yük aktarımı yalnızca sürtünmeye değil, yüzey geometrisinin oluşturduğu basınç alanlarına da bağlı hâle gelir.

Uygulama kalitesi, bu sınıfların gerçek davranışa dönüşmesinde belirleyicidir. Projede pürüzlü yüzey varsayılması, sahada aynı kalitenin sağlandığı anlamına gelmez. Yüzeyin düzgün temizlenmemesi, gevşek parçaların kalması, eski beton yüzeyinin yeterince nemlendirilmemesi veya beton yerleştirme sırasında boşluk oluşması, ara yüz dayanımını düşürebilir. Bu nedenle ara yüz kesmesi yalnızca hesap raporunda kontrol edilen bir madde değil, şantiye uygulamasında denetlenmesi gereken bir performans unsurudur.

Ara yüz kalitesinin önemi özellikle güçlendirme, onarım ve prefabrike-yerinde dökme birleşimlerde daha belirgindir. Mevcut beton üzerine yeni beton tabakası döküldüğünde, eski betonun yüzey durumu ve yeni betonla aderansı birleşik davranışın temel şartıdır. Bu nedenle ara yüz kesmesi konusu, yalnızca yeni tasarımda değil, mevcut yapıların iyileştirilmesi ve performans değerlendirmesinde de önem taşımaktadır.

## **7. TASARIM PRATİĞİ AÇISINDAN TARTIŞMA**

Tablalı betonarme kirişlerde ara yüz kesmesi çoğu zaman tasarımın ikinci planda kalan bir konusu gibi görülebilir. Bunun nedeni, monolitik dökülen kiriş-döşeme sistemlerinde gövde ve tabla arasında doğal bir süreklilik olduğu varsayımdır. Ancak bu varsayım, yüksek kesme talebi, geniş tabla, büyük açıklık, noktasal yük, farklı döküm aşaması veya yetersiz donatı

detaylandırması gibi durumlarda geçerliliğini kaybedebilir. Bu nedenle pratik tasarımda tablalı kesit kapasitesi hesaplandıktan sonra, bu kapasitenin gerektirdiği ara yüz yük aktarımının sağlanıp sağlanmadığı ayrıca değerlendirilmelidir.

Tasarım pratiğinde ilk adım, tablalı kesitin gerçekten hangi ölçüde birlikte çalıştığını doğru yorumlamaktır. Döşeme tablasının tamamının etkili genişlik olarak hesaba katılması, yalnızca geometrik bir kabul değildir; aynı zamanda bu genişlikte oluşan iç kuvvetin gövdeye aktarılabilmesi varsayımını içerir. Bu varsayım ara yüz donatısı, yüzey sürekliliği ve uygun beton kalitesiyle desteklenmediğinde, hesaplanan kesit kapasitesi güvenli tarafta olmayabilir.

İkinci adım, ara yüz kesme talebinin eleman boyunca değiştiğini dikkate almaktır. Momentin en büyük olduğu kesit, her zaman ara yüz kesmesi açısından tek kritik kesit olmayabilir. Moment değişiminin hızlı olduğu bölgeler, yük aktarımının yoğunlaştığı alanlar ve noktasal yüklerin bulunduğu kısımlar ara yüz gerilmesi bakımından daha dikkatli incelenmelidir. Bu nedenle tasarımcı, sadece kesit hesabına değil, yük yoluna ve iç kuvvet diyagramlarına da odaklanmalıdır.

Üçüncü adım, donatı detaylandırmasını hesap sonucunun ayrılmaz parçası olarak görmektir. Ara yüzden geçen donatıların yeterli alanı sağlaması tek başına yeterli değildir. Bu donatılar çatlak düzlemini kesecek şekilde yerleştirilmeli, iki tarafta yeterli ankraj sağlamalı, beton örtüsü ve aralık koşullarına uygun olmalı ve şantiye uygulamasında doğru konumda korunmalıdır. Özellikle geniş tablalı kirişlerde, sadece kiriş etriyelerine güvenmek yerine tabla içindeki enine donatı düzeninin de ara yüz kesmesi bakımından yeterliliği kontrol edilmelidir.

Dördüncü adım, servis davranışını göz ardı etmemektir. Ara yüz kesmesi nihai taşıma gücü problemi gibi görünse de, ara yüzte kısmi kayma gelişmesi sehim, çatlak genişliği ve rijitlik

kaybını etkileyebilir. Özellikle tekrarlı yükleme, hareketli yük, titreşim, yorulma veya çevresel etkilerin bulunduğu yapılarda ara yüz davranışı zamanla değişebilir. Bu nedenle dayanıklılık ve bakım koşulları da ara yüz tasarımının tamamlayıcı unsurlarıdır.

### **7.1. Önceki Çalışmalardan Ayırışma ve Etik Kapsam**

Bu kitap bölümü, aynı yüksek lisans tezinden hareketle hazırlanmakla birlikte önceki çalışma taslaklarından konu ve amaç bakımından ayrılmaktadır. Daha önce çalışması yapılan özet bildiri, kesme ve burulma etkisi altındaki betonarme elemanların karşılaştırmalı değerlendirmesine odaklanmıştır. Tam metin bildiri ise eğilme ve kesme davranışının yapı mekaniği açısından teorik analizini ele almıştır. Önceki kitap bölümü ise eğilme, kesme ve burulma etkilerinin TS 500 ve TS EN 1992-1-1 çerçevesinde genel değerlendirmesini sunmuştur.

Bu bölümde ise genel eğilme-kesme-burulma çerçevesi tekrar edilmemiş; kapsam tablalı betonarme kirişlerde gövde-tabla ara yüz kesmesine ve farklı dökümlü beton ara yüzlerinde kayma aktarımına daraltılmıştır. Böylece tezde yer alan daha özel bir konu, yapı mekaniği açısından bağımsız bir kitap bölümü olarak yeniden yapılandırılmıştır. Metin oluşturulurken tezdeki ifadeler doğrudan aktarılmamış, konu yeni literatür ve güncel standart yaklaşımıyla desteklenerek yeniden yazılmıştır.

Bu yaklaşım, aynı tezden birden fazla yayın üretirken etik açıdan gerekli olan ayırışmayı sağlamayı amaçlamaktadır. Ayırışma yalnızca başlık değişikliğiyle değil, araştırma sorusunun, odak mekanizmanın, literatür çerçevesinin ve tartışma başlıklarının farklılaştırılmasıyla sağlanmalıdır. Bu bölümde temel araştırma sorusu, betonarme elemanlarda genel kesme veya burulma davranışı değil; tablalı kirişlerde birleşik kesit davranışının gövde-tabla ara yüz kesmesi üzerinden nasıl güvence altına alınacağıdır.

## 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu kitap bölümünde tablalı betonarme kirişlerde gövde-tabla ara yüz kesmesi, yapı mekaniği ilkeleri çerçevesinde değerlendirilmiştir. İnceleme, tablalı kesit davranışının yalnızca eğilme kapasitesiyle açıklanamayacağını; tablada oluşan boyuna kuvvetin gövdeye güvenli biçimde aktarılmasının da kesitin birleşik çalışması için zorunlu olduğunu göstermektedir. Bu nedenle ara yüz kesmesi, tablalı kiriş tasarımında ikincil bir detay değil, taşıma mekanizmasının temel bileşenidir.

Ara yüz kesme aktarımı; aderans, yüzey pürüzlülüğü, agrega kenetlenmesi, kayma sürtünmesi, ara yüzden geçen donatıların dübel etkisi ve normal gerilme durumunun birlikte çalışmasıyla oluşur. Bu bileşenlerden herhangi birinin yetersiz kalması, gövde-tabla birleşiminde kısmi kayma, çatlak gelişimi veya ani ayrılma riskini artırabilir. Güncel deneysel çalışmalar, yüzey pürüzlülüğü ve sıkıştırma etkisinin ara yüz dayanımında belirleyici olduğunu; beton dayanımı ve donatı düzeninin de davranışı önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.

TS 500, betonarme tasarım için pratik ve güvenli bir ulusal çerçeve sunarken, TS EN 1992-1-1 tablalı kirişlerde gövde-tabla kesmesini tabladaki boyuna kuvvet değişimi ve ara yüz donatısı üzerinden daha açık biçimde yorumlamaya olanak vermektedir. EN 1992-1-1:2023 ve fib Model Code 2020 gibi güncel yaklaşımlar ise beton-beton ara yüzlerinde mekanik bileşenlerin, dayanıklılığın ve performans değerlendirmesinin birlikte ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Tasarım uygulaması açısından dört öneri öne çıkmaktadır. Birincisi, tablalı kesitlerde etkin tabla genişliği kabul edilirken bu genişlikte oluşan kuvvetin gövdeye aktarımı ayrıca düşünülmelidir. İkincisi, farklı zamanlarda dökülen beton ara yüzlerinde yüzey hazırlığı ve pürüzlülük sınıfı proje varsayımlarıyla uyumlu biçimde şantiyede denetlenmelidir.

Üçüncüsü, ara yüzden geçen donatıların alanı kadar ankrajı, yönü, aralığı ve çatlak düzlemini kesme biçimi de tasarımın ayrılmaz parçası olarak değerlendirilmelidir. Dördüncüsü, ara yüz kesmesi yalnızca nihai taşıma gücü bakımından değil, servis rijitliği, çatlak kontrolü ve uzun süreli davranış bakımından da ele alınmalıdır.

Gelecek çalışmalar için aynı kesit geometrileri üzerinde TS 500, TS EN 1992-1-1, EN 1992-1-1:2023 ve fib Model Code 2020 yaklaşımlarının parametrik olarak karşılaştırılması yararlı olacaktır. Ayrıca farklı pürüzlülük sınıfları, düşük ara yüz donatısı oranları, lifli beton kullanımı ve mevcut beton üzerine yeni beton dökümü gibi uygulama durumları deneysel ve sayısal olarak incelenmelidir. Böylece tablalı betonarme kirişlerde ara yüz kesmesi davranışı, yalnızca standart kontrolü düzeyinde değil, daha kapsamlı bir yapı mekaniği problemi olarak değerlendirilebilir.

## **KAYNAKÇA**

- British Standards Institution. (2023). BS EN 1992-1-1:2023: Eurocode 2. Design of concrete structures - General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures. BSI Standards.
- Cao, C., Zhang, B., Wang, Y., & Li, H. (2024). Investigations on interface shear-stress transfer behavior of concrete composite slabs with lattice girders. *KSCE Journal of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s12205-024-2165-2>
- Celep, Z. (2009). *Betonarme yapılar* (5. bs.). İstanbul: Beta Dağıtım.
- Daneshvar, K., Moradi, M. J., Roshan, N., Noel, M., & Hajiloo, H. (2025). Enhancing flexural and shear capacities of RC T-beams with FRCM incorporating a full FRCM-concrete bond. *Construction and Building Materials*, 471, 140687. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140687>
- Davaadorj, O., Calvi, P. M., & Stanton, J. F. (2020). Shear stress transfer across concrete-to-concrete interfaces: Experimental evidence and available strength models. *PCI Journal*, 65(4), 87-111. <https://doi.org/10.15554/pcij65.4-04>
- Ersoy, U., & Özcebe, G. (2004). *Betonarme*. İstanbul: Evrim Yayınevi.
- Fédération internationale du béton. (2024). *fib Model Code for Concrete Structures 2020*. fib International.
- Hsu, T. T. C. (1990). Shear flow zone in torsion of reinforced concrete. *Journal of Structural Engineering*, 116(11), 3206-3226. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1990\)116:11\(3206\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:11(3206))

- Jeong, D., Son, D.-H., Choi, C.-S., & Bae, B.-I. (2025). Experimental study of interface shear transfer of steel fiber reinforced concrete members. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 19, Article 10. <https://doi.org/10.1186/s40069-024-00760-2>
- Jiang, H., Mo, F., Chen, Z., Wu, J., Fang, H., Fang, Z., Zhang, S., & Xu, Z. (2023). Full-scale experimental study of shear and flexural behavior of 16-m retired reinforced concrete T-beams. *Buildings*, 13(8), 2075. <https://doi.org/10.3390/buildings13082075>
- Kaya, N. (2010). Basit eğilme, kayma ve burulma etkisi altındaki betonarme yapı elemanlarının TS 500 ve TS EN 1992-1-1 standartlarına göre örneklerle incelenmesi (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Mattock, A. H., & Hawkins, N. M. (1972). Shear transfer in reinforced concrete - Recent research. *PCI Journal*, 17(2), 55-75.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2000). TS 500: Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları. Türk Standardları Enstitüsü.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2009). TS EN 1992-1-1: Eurocode 2: Beton yapıların tasarımı - Bölüm 1-1: Genel kurallar ve binalara uygulanacak kurallar. Türk Standardları Enstitüsü.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2014). TS 500:2000/T3: Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları - Tadil 3. Türk Standardları Enstitüsü.
- Vecchio, F. J., & Collins, M. P. (1986). The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear. *ACI Journal*, 83(2), 219-231.

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA AKADEMİK  
TARTIŞMALAR**

**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