

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ KONULARI

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Esin ACAR

yaz
yayınları

İnşaat Mühendisliği Konuları

Editör

Dr.Öğr.Üyesi Esin ACAR

yaz
yayınları

2025

İnşaat Mühendisliği Konuları

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Esin ACAR

© 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 978-625-5547-74-3

Mart 2025 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

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

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

info@yazyayinlari.com

İÇİNDEKİLER

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinde Sayısal Ayrıklaştırma Yöntemleri	1
<i>Esin ACAR</i>	
Lif Takviyeli Beton Çeşitleri, Özellikleri ve Uygulama Alanları.....	18
<i>Necim KAYA</i>	
Geopolimer ve Alkali Aktive Edilmiş Bağlayıcılar: Türkiye Odaklı Bibliyometrik Bir Değerlendirme	31
<i>Enes EKİNCİ</i>	
Use of Polymers in Geotechnics	51
<i>Özgür YILDIZ, Murat Ergenekon SELÇUK</i>	

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

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİNDE SAYISAL AYRIKLAŞTIRMA YÖNTEMLERİ¹

Esin ACAR¹

1. GİRİŞ

Akışkanlar mekaniği alt dallarından olan hesaplamalı akışkanlar dinamiği birçok alanda kullanılan bir yöntemdir. Bu kapsamda farklı temel alanlarda ortaya çıkan problemlerin çözümlenmesinde de yaygın kullanıma sahiptir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) problemlerinin çözümünde çeşitli sayısal ayırıklaştırma yöntemleri kullanılmaktadır. Özellikle sayısal modelleme programları farklı ayırıklaştırma yöntemleri kullanarak nümerik analiz yapabilmektedirler. Bu programlar sayesinde karmaşık diferansiyel denklemlerin çözümü de kolaylıkla yapılabilir. HAD programları multidisipliner alanlarda kullanılabilirliği için farklı sayısal ayırıklaştırma yöntemleri ile çözümler yapılmaktadır. Bu yöntemler;

- a) Sonlu Hacimler Yöntemi (SHY)
- b) Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)
- c) Sonlu Farklar Yöntemi (SFY)

olarak farklılık göstermektedir. Çalışmada bu yöntemlerin modelleme özellikleri ve hesap yöntemleri belirtilmiştir.

2. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ

Akışkan davranışlarını belirleyen hesaplamalı akışkanlar dinamiği akışkanlar mekaniğinin alt dalıdır. HAD akışkan

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Artvin Çoruh Üniversitesi, Borçka Acarlar MYO, İnşaat Bölümü, esin.acar@artvin.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3926-2804.

simülasyonu olup, akışkana ait hız, tipi ve geometrisi parametrelerine bağlı kalmaktadır (Saygılı ve Çakmak, 2022). HAD, akışkan problemlerinin çözümü için gerekli olan sayısal metotları, kısmi diferansiyel denklemleri ve geometriyi inceleyerek akışkan probleminin analiz edilmesini sağlamaktadır. Birçok mühendislik alanında kullanılabilmesi sebebiyle multidisipliner bir bilim dalını oluşturmaktadır (Tokgoz ve Süfer, 2023). Nümerik analiz metotlarının gelişerek, hesaplama kapasitesinde artış birçok mühendislik probleminin çözümünde sayısal benzetim tekniğiyle hızlı çözüme imkan sağlamaktadır. En çokta analitik çözümün çok zor olduğu karmaşık akışkanlar dinamiği problem çözümünde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği önemli bir disiplin olarak gelişme göstermektedir (Karakurt, vd., 2018; Qi, et al., 2012; Georgiadis, et al., 2010) Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği akışkanlardan kaynaklanan sorunların nümerik algoritmalar kullanılarak çözümlenmesini sağlamaktadır (Özkan, 2023; Keskin, 2019). HAD yöntemi özellikle sıvı-gaz gibi akış içeren proseslerde kullanılmakta olan bir simülasyon aracı olarak tanımlanabilir (Özkan, 2023; Cemek, vd., 2017).

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği akışkanlar mekaniğinin bir alt dalı olduğu için akışkanda kaynaklı problemlerin sayısal algoritmalar ile çözüm metodu olarak bilinmektedir (Keskin, 2019). Bu sebeple HAD, genellikle akış barındıran (sıvı ve gaz) süreçlerde genellikle tercih edilen bir simülasyon aracı olmaktadır (Cemek, vd., 2017; Aslanbay Güler ve İmamoğlu, 2020).

Ayrıca Hesaplamalı akışkanlar dinamiği; kütle transferi, akış ve ısı problemlerinin de çözülebildiği nümerik analiz metodudur. Diferansiyel denklemler ile akışkan hareketleri tanımlandığı için bu metot, özellikle deneysel çalışmalar ile bulunamayan kayma gerilmesi ile hız, basınç dağılımlarını ve akım çizgileri, akış hacimleri hakkında ayrıntılı veri elde etmek

için kullanılmaktadır (Sözen & Çiftçi, 2016; Niu and Zhang, 2022).

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), ticari bir yazılım olarak akışkan fiziğini simüle ederek, akışkan olaylarını tahmin edebilmektedir. Bu tahminleri ortaya koyabilmek için de birtakım korunum denklemlerini kullanmaktadır. Bu denklemler; süreklilik, momentum ve enerji denklemleridir (Özsarı, vd., 2023; Hu, 2012).

İmal, 2023'e göre süreklilik, momentum ve toplam enerji denklemleri (Denklem 1-7) şu şekildedir;

- Süreklilik Denklemi $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$ (1)

- Momentum Denklemleri

$$x \text{ bileşeni} : \rho \frac{Du}{Dt} = \rho g_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \quad (2)$$

$$y \text{ bileşeni} : \rho \frac{Dv}{Dt} = \rho g_y + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} \quad (3)$$

$$z \text{ bileşeni} : \rho \frac{Dw}{Dt} = \rho g_z + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \quad (4)$$

- Toplam Enerji Denklemi

$$Q_{net,giren} = Q_{giren} - Q_{çıkan} \quad (5)$$

$$W_{net,giren} = W_{giren} - W_{çıkan} \quad (6)$$

$$Q_{net,giren} + W_{net,giren} = \frac{dEsistem}{dt} \text{ veya } Q_{net,giren} + W_{net,giren} = \frac{d}{dt} \int sis pedV \quad (7)$$

Hesaplama akışkanlar dinamiği yazılımları sayısal ayrıklaştırma yöntemlerinden sonlu elemanlar veya sonlu hacimleri kullanılır. Bu metotlar ile kısmi diferansiyel denklemler cebirsel denklemler ile çözülebilmektedir. Kısmi diferansiyel denklemlerdeki hacim integralleri sapma terimi içerdiği için sapma teoremi kullanılarak yüzey integrallerine dönüşmektedir (Özsarı, vd., 2023; Moukalled, et al., 2012).

3. SAYISAL AYRIKLAŞTIRMA YÖNTEMLERİ

Hesaplama Akışkanlar Dinamiği programları, sonlu hacimler, sonlu elemanlar ve sonlu farklar yöntemini kullanarak problemleri çözmektedir. Fakat sonlu farklar yöntemi özellikle karmaşık geometrilere sahip mühendislik problemlerini çözmekte yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple, sonlu hacimler ve sonlu elemanlar yöntemleri HAD yazılımlarında daha çok kullanılmaktadır (Süfer, vd., 2016; Xia and Sun, 2002).

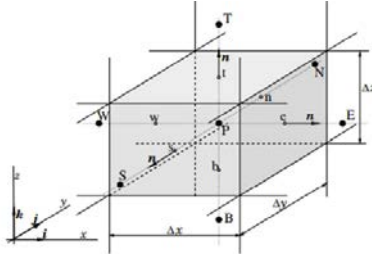
HAD yazılımlarında öncelikle bir ağ yapısı elde edilir, daha sonra ayrıklaştırma matematik denklemleri ile birleştirilir. Kısmi diferansiyel denklemlerin ayrıklaştırma süreçlerinde, Sonlu Farklar (Finite Difference), Sonlu Elemanlar (Finite Elements) ve Sonlu Hacimler (Finite Volume) metotları kullanılır (Turan, 2022). Fakat bu metotların çözümlenmesinde birtakım sıkıntılar yaşanabilmekte olup, özellikle Sonlu Elemanlar Yöntemi için çözüm ağı oluşturulmasıdır. Bu yöntem ile çözümlenen problemlerden yüksek deformasyonlu ve eleman sayılı olanlarda zorluk yaşanmaktadır. Bu sebeple Sonlu Elemanlar Yönteminin ağ tekniğiyle zorluk yaşanan

problemlerin çözümünde eksik kalmaktadır. Özellikle ağ oluşturma problemleri bu yöntem ile çözülememektedir (Pekedis & Yıldız, 2009).

3.1. Sonlu Hacimler Yöntemi

Sonlu Hacim Yöntemi (SHY), İntegral koruma yasasına dayanan sayısal bir yöntemdir. Bu yöntemler, hacim boyunca ortalaması alınan korunumlu değişkenlerin değerlerini hesaplayan kısmi diferansiyel denklemleri çözmek için kullanılır. İntegral koruma kanunu, hesaplama ağı tarafından tanımlanan küçük kontrol hacimleri için uygulanır. SHY'nin SFY'lere göre bir avantajı, yapılandırılmış bir ağ gerektirmemesidir (yapılandırılmış bir ağ da kullanılabilir). Ayrıca, SHY, sınır koşullarının invazif olmayan bir şekilde uygulanabilmesinin bir sonucu olarak diğer yöntemlere tercih edilir. Bu doğrudur çünkü korunan değişkenlerin değerleri düğümlerde veya yüzeylerde değil, hacim elemanı içinde bulunur. SHY'ler özellikle kaba, üniform olmayan ızgaralarda ve ağın arayüzleri veya şokları izlemek için hareket ettiği hesaplamalarda güçlüdür (Vasava, 2007).

Sonlu elemanlar yönteminin gelişmiş hali olan Sonlu hacimler yöntemi düzenli/düzensiz geometrilerdeki problemlerin çözümünde oldukça başarılıdır. Bu yöntem ile problem geometrisi sonlu hacimlere bölünmekte ve kısmi diferansiyel denklemler ile küçük hacimlere integre ederek çözülmektedir (Jafari, 2022; Uçar, 2005).



Şekil 1. SHY kontrol hacmi 3 boyutlu gösterimi

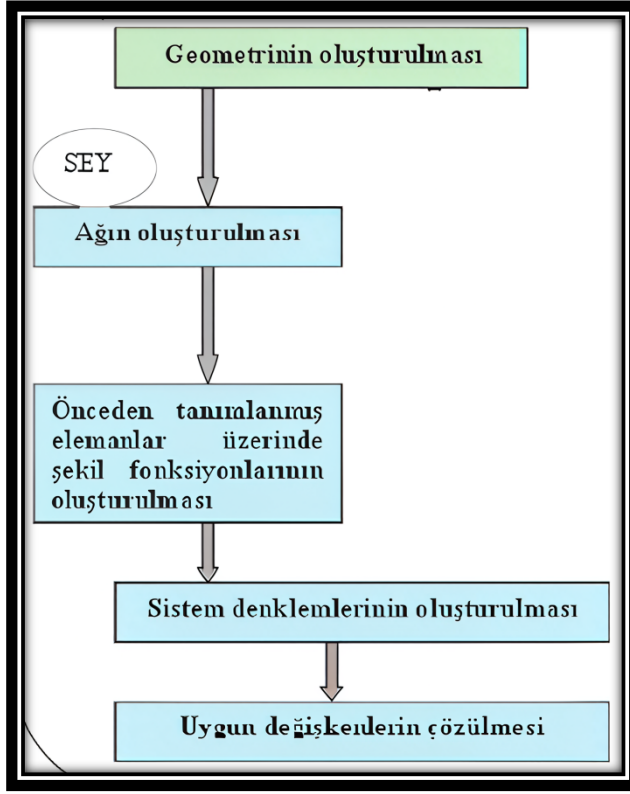
Sonlu hacim yöntemleri doğrudan Navier-Stokes veya Euler denklemlerinin integral formülasyonunu kullanır. Sonlu hacim yöntemleri, fiziksel uzayı birçok kontrol hacmine bölerek, yöneten denklemleri ayırklaştırır (Şan, 2019).

3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi veya sonlu elemanlar metodu (FEM), mühendislik ve sayısal modellemede kullanılan nümerik analiz metodudur. FEM, genellikle yapı statiği, ısı aktarımı, akışkanlar mekaniği, kütle aktarımı ve elektrik potansiyeli problemlerinde kullanılır. Bu yöntem, iki veya üç boyutlu kısmi diferansiyel denklemler ve sınır değer problemleri çözümünde kullanılır (Zienkiewicz, et al., 2013).

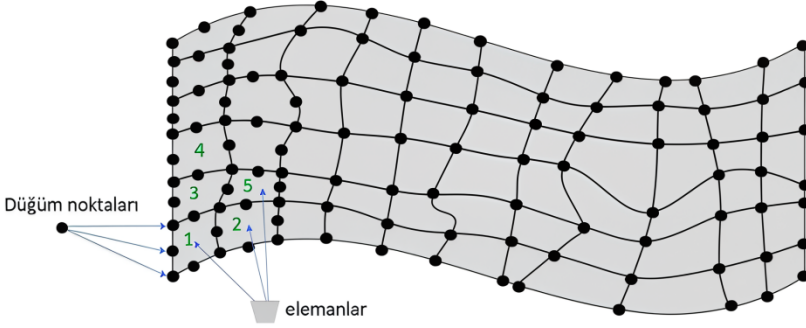
Sonlu Elemanlar Yönteminin (FEM) özü, çözümü elde edilmesi imkansız olmasa da zor olabilecek karmaşık bir problemi almak ve her biri üzerinde çözümün basit bir yaklaşımının inşa edilebileceği parçalara ayırmak ve ardından yerel yaklaşık çözümleri bir araya getirerek küresel bir yaklaşık çözüm elde etmektir. FEM, analitik yöntemlerle çözülemeyen veya geometrik olarak karmaşık alanlara sahip diferansiyel denklemlerin yaklaşık çözümlerini bulmak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Vasava, 2007).

Karmaşık geometriye sahip yapı sonlu elemanlar yönteminde elemanlara ayrılmaktadır. Bu elemanlar ağ sistemi ile birbirlerine bağlanmaktadır. Bu yöntem ile lineer ve lineer olmayan problemler çözülebilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi problem çözüm akış şeması Şekil 2’de verilmiştir (Pekedis, & Yıldız, 2010).



Şekil 2. Sonlu Elemanlar Yöntemi çözüm akış şeması

Sonlu Elemanlar yönteminde amaç bir büyüklük alanı oluşturmaktır. Örneğin, akışkan probleminde akım fonksiyon alanı, gerilme analizi için deplasman alanı ya da ısı analizinde sıcaklık alanı oluşturulmaktadır. Bu yöntemde büyüklüğün değeri o oluşturulan elemanın düğüm noktalarına ait değerlere interpolasyon yöntemi uygulanarak hesaplama yapılmaktadır. Bu durumda bilinmeyen ve hesaplanması gereken değerler düğüm noktalarında değerler olmaktadır (Jafari, 2022). Sonlu Elemanlar Yöntemi şematik gösterimi Şekil 3'te yer almaktadır.

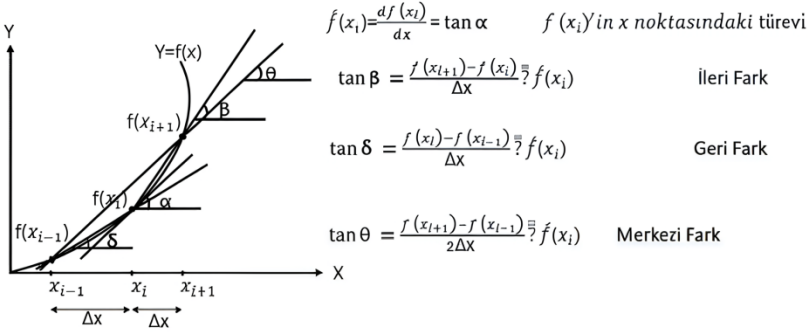


Şekil 3. Sonlu elemanlar yöntemi şematik gösterimi

3.3. Sonlu Farklar Yöntemi

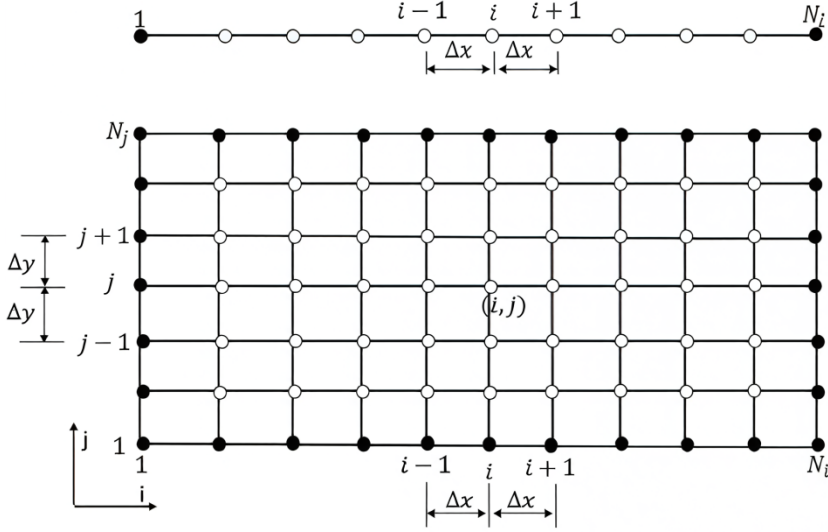
Sonlu farklar yöntemi, kapalı formadaki diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Bu denklemlerin çözümleri sayısal olarak elde edilememektedir (Ergün ve Kumbasar. 2003). Sonlu farklar yöntemi için ayrıklaştırma işlemi Taylor serisi açılımı ve kontrol hacim yaklaşımı olarak yapılmaktadır (Karakoca. 2017).

Bu işlemlerle lineer diferansiyel denklem sistemi ile kapalı veya lineer olmayan sistem ifade edilmektedir. Lineer denklem sistemi çözümü kapalı diferansiyel denklemin ayrık noktalardaki yaklaşık değerlerini vermektedir. Kapalı fonksiyonun sonlu farklar yöntemiyle çözümü, ileri sonlu farklar, merkezi sonlu farklar ve geri sonlu farklar olarak üç şekilde olmaktadır (Şekil 4). Literatüre göre tüm sonlu farklardan merkezi sonlu farklar fonksiyonun gerçek değerine en yakın sonucu vermektedir (Jafari, 2022).



Şekil 4. Sonlu farkların şematik gösterimi

Sonlu farklar yönteminde Şekil 5'te yer alan şematik gösterime göre dolu işaretli düğümler sınır noktalarını, boş işaretli düğümler ise hesap noktalarını göstermektedir. Bu şekil ile sonlu farklar yöntemine ait 1 ve 2 boyutlu ayrıklaştırılmış noktaları gösterilmiştir (Jafari, 2022).



Şekil 5. Sonlu farklar yönteminin 1 ve 2 boyutlu şematik gösterimi

Genel olarak Sonlu farklar yöntemi, uygulama olarak en kolay olup, düzenli bir ağ yapısı oluşmamaktadır (Turan, 2022; Peskin 1972). Yöntemde ağ yapısındaki kısıt azaltılsa da,

problemin tanımlanmasını zorlaştırır. Bu sebeple sonlu farklar yöntemi ile karışık problemlerde düzenli ağ oluşturabilmek için “Conformal Mapping” (Turan, 2022; URL-1) gibi yöntemlerden yararlanılabilir (Turan, 2022; URL-2).

4. SONUÇ

Sayısal ayrıklaştırma yöntemlerinden Sonlu elemanlar ve hacimler yöntemleri, oluşturulan ağ yapısındaki küçük parçalar üzerinde işlem yaparken, sonlu farklar yöntemi, aynı geometrilerin sadece köşelerinde işlem yapmaktadır. Problemler çözülürken, Sonlu Farklar yönteminde sadece köşelerdeki değerler oluşturulduğu için buralarda hata payı ölçülürken, Sonlu Elemanlar yönteminde tüm elemanın ortalama hata payının düşürülmesi amaçlanmaktadır (URL-3).

Sonlu farklar yönteminde kütle korunumunu sağlamakta zorluklar yaşanmaktadır. Ayrıca denklemlerdeki türevlerin sonlu fark yaklaşımında süreksizlik noktalarının sonsuz yakınlığında tanımsız ve yeterli olmaması durumu da ortaya çıkmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ise kütle korunumunu hesap alanın bütününde sağlarken noktasal olarak sağlayamamakta ve süreksizlik noktalarında salınımlar gerçekleşmektedir. Bu nedenle sonlu farklar ile sonlu elemanlar yöntemlerinin bu eksikliklerinden dolayı sonlu hacimler yöntemi daha yaygın kullanılmaktadır. Sonlu hacimler yönteminin daha çok kullanılmasının nedeni; süreksizlik noktalarının kontrol hacimleri olarak ele alınmasına olanak sağlamasıdır. Böylece kontrol hacmin ara-yüzlerindeki akıların hesaplanmasının ardından hücre içinde değişkenlerin değerleri, ara-yüzlerde hesaplanan akıların ortalaması şeklinde ifade edilerek süreksiz noktalar da dikkate alınmış olur (Jafari, 2022).

Sonlu hacimler yöntemi aslında sonlu farklar yönteminin geliştirilmiş özel bir formülasyonudur (Kaya & Gharehbaghi,

2013; Versteeg, & Malalasekera, 1995). Sonlu hacim yönteminin en önemli avantajı, uzaysal ayrıklaştırmanın doğrudan fiziksel uzayda gerçekleştirilmesidir. Bu nedenle, sonlu fark yöntemleri gibi fiziksel ve hesaplama alanı arasında herhangi bir dönüşüme ihtiyaç duyulmaz. Sonlu hacim yöntemlerinin sonlu fark yöntemlerine göre bir diğer avantajı da yapılandırılmış ve yapılandırılmamış ızgaralarda kolayca uygulanabilmesidir. Bu nedenle, karmaşık geometriler etrafındaki akışların simülasyonu sonlu hacim yöntemi kullanılarak yapılabilir (Şan, 2019).

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde kullanılan sayısal ayrıklaştırma yöntemleri özellikle kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünde büyük kolaylıklar sağlamıştır. Farklı yöntemler olsa da sayısal analizlerin yapılabilme olanakları sayesinde deney setlerine ihtiyaç duymadan akışkanın dinamik analizleri kolaylıkla yapılabilmektedir. Özellikle sonlu farklar yöntemi birçok nümerik analizler yapabilen sonlu hacimler yönteminin bir altyapısı niteliğindedir. Karmaşık geometrilerin sayısal ayrıklaştırılması için sonlu hacimler yöntemi kullanılmakta ve güvenli sonuçlar elde edilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi de tüm elemanın içindeki ortalama hata payının düşürülmesini hedefler ve bu şekilde bir çözüm yöntemi oluşturur. Sonlu hacim yöntemi de, fiziksel uzayı birden fazla kontrol hacmine böler ve diferansiyel denklemleri ayrıklaştırır. Böylece kontrol hacmine göre diğer hacimlerin hesaplanması sağlanır.

Akışkan problemleri oldukça karmaşık yapılar olduğu için sayısal analizlere ihtiyaç duyulmaktadır. Farklı ayrıklaştırma yöntemleri olsa da karmaşık geometrik şekillerin diferansiyel denklemlerinin hesaplanmasında bu yöntemler ile büyük kolaylık sağlamaktadır. Sayısal programların gelişmesi ile çözülmesi zor dinamik akışkan problemleri güvenilir bir şekilde çözülebilmektedir. Sayısal modelleme programlarının

gelişimi akışkanlar mekaniği alanındaki birçok disiplinlerde karmaşık problemlerin çözümünü kolaylaştırmıştır.

KAYNAKÇA

- Aslanbay Güler B., & İmamoğlu, E. (2020). Bilgisayar destekli simülasyon ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 13(1), 42-52.
- Cemek, B., Atış, A., & Küçüktopçu, E. (2017). Evaluation of temperature distribution in different greenhouse models using computational fluid dynamics (CFD). *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 32, 54-63. DOI: 10.7161/omuanajas.289354
- Ergün, A., Kumbasar, N. (2003). İnce plaklar için geliştirilmiş sonlu farklar yöntemi, *itüdergisi/d*, cilt: 2, sayı: 1, 35-44.
- Georgiadis A.S., Fytanidis D.K., Anagnostopoulos N.S. (2010). Simulating Self-Compacting Concrete Fluidity Tests Using Computational Fluid Dynamics Techniques: Approaches and Challenges. 4th International Conference from Scientific Computing to Computational Engineering, Athens, Greece, 1-8.
- Hu, H.H. Computational fluid Dynamics, Fluid Mechanics. Academic Press, 421-472, 2012.
- İmal, M. (2023). Hiperbolik Soğutma Kulelerinin Soğutma Performansının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 46, 1-8. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1134400>
- Jafari, A.M. (2022). Sığ Su Denklemlerinin Çözümü İçin Kullanılan Sayısal Şemaların İyileştirilmesi ve Performanslarının Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Karakoca, A. (2017). İplik Bobini Kurutma İşleminde Sıcaklık Alanının Sonlu Farklar Yöntemi İle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen

Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı,
Tekirdağ.

- Karakurt, C., Çelik, A. O., Kiriççi, V., Özyaşar, E., vd. (2018). Kendiliğinden Yerleşen Beton Davranışının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği İle Benzetimi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi, 20(59), 449-460. DOI: 10.21205/deufmd.2018205935
- Kaya, B., & Gharehbaghi, A. (2013). Kararsız Akım Koşullarında Katı Madde Taşınımının Sonlu Hacimler Yöntemi ile Modellenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 27(4), 827-836.
- Keskin, G. (2019). Doğal Havalandırılmalı Plastik Serada Bazı İklim Parametrelerinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) İle Belirlenmesi: Hatay İli Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
- Moukalled, F., Mangani, L., Darwish, M. (2016). The finite volume method, The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics, 103-135.
- Niu, J. L. and Zhang, L. Z. (2022). Effects of wall thickness on the heat and moisture transfers in desiccant wheels for air dehumidification and enthalpy recovery, International Communications in Heat and Mass Transfer, 29(2), 255-268.
- Özkan, E. (2023). Kelebek Vana Tasarımlarında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizleri Kullanılarak Akış Katsayısı Özelliklerinin Artırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 27(3), 426-433. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.1274811>

- Özsarı, F., Özcan, B., & Şeker, U. (2023). Bilgisayarların Sıvı Soğutma Sistemlerinde Kanatçıklar Arası Mesafenin (KAM) Ortalama Mikro Kanatçık Sıcaklığına (OMKS) Etkisinin Sonlu Hacimler Analizi ile Optimizasyonu. *Manufacturing Technologies and Applications*, 4(1), 1-10. <https://doi.org/10.52795/mateca.1206042>
- Pekedis, M. ., & Yıldız, H. . (2009). Eksenel Yüklü Ankastre Çubuğun Davranışının Eleman Bağımsız Galerkin Yöntemiyle Çözülmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(3), 353-361.
- Pekedis, M., & Yıldız, H. (2010). Ağsız Yöntemler ve Sınıflandırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(1), 1-9.
- Peskin, C. S. (1972). Flow patterns around heart valves: A numerical method. *Journal of Computational Physics.*, 10 (2), 252–271.
- Qi, B.H., Fu, Z.J., Yan, S. and Liu, F.X. (2012). Numerical Simulation on Concrete Pouring Process of Self-Compacting Concrete-Filled Steel Tube. 15 WCEE, Lisboa, 1-8.
- Saygılı, Y. S., & Çakmak, B. (2022). Tarımsal Üretimde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi Kullanım Modelleri. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), 583-595. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.1003649>
- Sözen, A., & Çiftçi, E. (2016). Isı Tekerleği Performansının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Belirlenmesi. *Politeknik Dergisi*, 19(4), 547-554.
- Süfer, Ö., Kumcuoğlu, S., & Tavman, Ş. (2016). Gıda Mühendisliğinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Uygulamaları. *Akademik Gıda*, 14(4), 465-471.

- Şan, D. (2019). Numerical Solutions Of Euler Equations with Finite Volume Methods, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tokgoz, N., & Süfer, Ö. (2023). Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğine Genel Bir Bakış. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6(3), 2392-2408. <https://doi.org/10.47495/okufbed.1191498>
- Turan, E. (2022). Bilgisayar Destekli Mühendislik. Mühendis ve Makine, www.mmmo.org.tr, 62, 20-24.
- Uçar, G. (2005). Helikopter Etrafındaki Akışın Sonlu Hacimler Yöntemiyle Analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- URL-1, Conformal Map, https://en.wikipedia.org/wiki/Conformal_map, son erişim tarihi: 6 Mart 2025.
- URL-2, Finite Difference Method, https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_difference_method, son erişim tarihi: 6 Mart 2025.
- URL-3, Finite Element Method, https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method, son erişim tarihi: 6 Mart 2025.
- Vasava, P.R. (2007). Fluid Flow in T-Junction of Pipes, Master Thesis, Lappeenranta University Of Technology, Department of Information Technology, Lappeenranta.
- Versteeg, H.K., & Malalasekera, W. (1995). An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method (1th ed.), New york: Longman scientific & technical., 257.

- Xia, B., Sun, D-W. (2002). Applications of Computational Fluid Dynamics (CFD) in the food industry: a review. Computers and Electronics in Agriculture 34, 5-24.
- Zienkiewicz, Olek C.; Taylor, Robert L.; Zhu, J. Z. (2013). The finite element method: Its basis and fundamentals. Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-08-095135-5.

LİF TAKVİYELİ BETON ÇEŞİTLERİ, ÖZELLİKLERİ VE UYGULAMA ALANLARI

Necim KAYA¹

1. GİRİŞ

Beton, inşaat endüstrisinin temel yapı malzemelerinden biri olarak, sağlamlık, dayanıklılık ve ekonomik olma gibi üstün özellikler sunar (Neville, 2011). Bununla birlikte, geleneksel betonun çekme dayanımının zayıf olması ve çatlaklara karşı düşük direnci gibi bazı önemli sınırlamaları bulunmaktadır (Mehta & Monteiro, 2014). Bu sorunların üstesinden gelmek amacıyla lif takviyeli beton (Fiber Reinforced Concrete - FRC) geliştirilmiş ve yapı sektöründe önemli bir alternatif haline gelmiştir.

Lif takviyeli beton, çelik, cam, karbon, polimer veya doğal kökenli liflerin belirli oranlarda karışıma dahil edilmesiyle elde edilen bir kompozit malzemedir. Liflerin betona eklenmesi, çekme dayanımını artırarak çatlak ilerlemesini kontrol altına alır ve sünekliği önemli ölçüde iyileştirir (ACI Committee 544, 2002). Ayrıca, liflerin malzeme özelliklerine bağlı olarak yangın dayanımı, darbe direnci ve yorulma dayanımı gibi betonun diğer mekanik özellikleri de gelişmektedir (Bentur & Mindess, 2007).

Bu kitap bölümü, beton üretiminde kullanılan farklı lif türlerini, bu liflerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini, betonun mekanik özelliklerine etkilerini ve kullanım alanlarını detaylı bir şekilde incelemektedir. Ayrıca, farklı lif türlerinin bir arada

¹ Dr., Batman Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojileri Bölümü, Batman, necim.kaya@batman.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1478-761X.

kullanıldığı hibrit lifli beton sistemleri de ele alınarak, optimum performans için en uygun kombinasyonların belirlenmesine yönelik güncel araştırmalara yer verilecektir.

2. BETON ÜRETİMİNDE KULLANILAN LİF TÜRLERİ VE ÖZELLİKLERİ

Lif takviyeli beton, içeriğinde farklı türde lifler barındıran bir kompozit malzemedir. Liflerin beton matrisine eklenmesi, betonun mekanik ve dayanım özelliklerini geliştirerek yapı malzemesinin daha güvenilir hale gelmesini sağlar (Banthia & Trottier, 1995). Kullanılan lif türleri genel olarak **çelik, cam, polimer (sentetik), karbon ve doğal lifler** olmak üzere beş ana gruba ayrılmaktadır. Bu liflerin her biri, betonun farklı özelliklerine katkıda bulunur ve belirli avantajlar ile dezavantajlar taşır.

2.1. Çelik Lifler

Çelik lifler, betonarme yapılarda sıklıkla kullanılan ve mekanik dayanımı artıran en yaygın lif türlerinden biridir. Yüksek çekme dayanımları (400-2500 MPa) sayesinde, çatlak oluşumunu önleyerek sünekliği artırır ve darbe dayanımını iyileştirir (Johnston, 2001). Ayrıca, çelik liflerin aşınma direnci yüksektir ve yorulmaya karşı dayanıklıdır (Naaman, 2003).

Avantajları:

Yüksek çekme dayanımı ve yorulma direnci sağlar.

Aşınma ve darbe dayanımını iyileştirir.

Çatlak ilerlemesini azaltır ve sünekliği artırır.

Dezavantajları:

Korozyona karşı hassastır, bu nedenle kaplamalı veya paslanmaz çelik lifler tercih edilmelidir.

Betonun işlenebilirliğini azaltabilir.

2.2. Cam Lifler

Cam lifler, özellikle hafif ve yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılan lif türlerinden biridir. Alkali direnci artırılmış cam (AR-Glass) lifleri, betonun çekme dayanımını artırırken aynı zamanda hafifliğini korumasına yardımcı olur (Bentz, 2000). Ancak, cam liflerin kırılgan yapısı nedeniyle uzun vadeli dayanıklılık konusunda bazı kısıtlamaları bulunmaktadır.

Avantajları:

Düşük yoğunluğu sayesinde hafif beton üretimine olanak tanır. Alkaliye dayanıklı türleri kullanıldığında uzun süreli stabilize sağlar.

Elektriksel yalıtım özelliği sunar.

Dezavantajları:

Kırılgan yapıya sahiptir, darbelere karşı hassastır. Alkali ortamda zamanla dayanım kaybı olabilir.

2.3. Polimer (Sentetik) Lifler

Polimer lifler genellikle polipropilen, polietilen ve naylon gibi sentetik malzemelerden üretilir. Hafif ve esnek yapıları sayesinde betonun darbe ve yorulma dayanımını artırır, aynı zamanda yangın dayanımına da katkı sağlar (ACI Committee 544, 2002). Polipropilen lifler özellikle yangın dayanımını artırarak betonun yüksek sıcaklıklarda patlamasını engeller (Khoury, 2000).

Avantajları:

Yangın dayanımını iyileştirir.

Hafif ve esnektir, işlenebilirliği artırır.

Çatlak önleme açısından etkilidir.

Dezavantajları:

Mekanik dayanımı çelik ve karbon liflere göre düşüktür. UV ışınlarına karşı hassas olabilir.

2.4. Karbon Lifler

Karbon lifler, üstün mekanik özellikleri ve kimyasal dayanıklılığı ile öne çıkar. Yüksek çekme dayanımı (3000-5000 MPa) ve düşük yoğunluğu sayesinde, yüksek performans gerektiren beton uygulamalarında tercih edilir (Balaguru & Shah, 1992). Ayrıca, karbon lifler paslanmaz ve kimyasal etkilere karşı oldukça dirençlidir.

Avantajları:

Çok yüksek çekme dayanımına sahiptir. Kimyasal ve korozyona karşı dirençlidir. Hafifliği sayesinde yüksek performanslı beton üretimine uygundur.

Dezavantajları:

Maliyeti yüksektir, bu nedenle genellikle özel mühendislik uygulamalarında tercih edilir. Kırılgan yapısı nedeniyle süneklik sınırlıdır.

2.5. Doğal Lifler

Doğal lifler, sürdürülebilir yapı malzemeleri arasında yer almakta olup, bambu, hindistancevizi, sisal ve keten gibi malzemelerden elde edilir. Düşük maliyetli ve çevre dostu olmaları nedeniyle, özellikle sürdürülebilir yapı tasarımında kullanılmaktadır (Savastano et al., 2000). Ancak biyolojik bozunmaya karşı hassas oldukları için uzun vadeli dayanıklılık konusunda bazı zorluklar barındırır.

Avantajları:

Çevre dostudur ve sürdürülebilir yapı malzemesi olarak değerlidir.

Ekonomiktir ve yerel kaynaklardan temin edilebilir.

Hafiftir ve işlenmesi kolaydır.

Dezavantajları:

Uzun vadede mekanik dayanım kaybı yaşanabilir.

Nem ve biyolojik faktörlere karşı hassastır.

3. LİF KULLANIMININ BETONUN MEKANİK VE DAYANIM ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ

Liflerin beton matrisine dahil edilmesi, mekanik özelliklerde önemli iyileşmeler sağlar. Geleneksel beton yüksek basınç dayanımına sahip olmasına rağmen, düşük çekme dayanımı ve süneklik eksikliği nedeniyle kırılgan bir malzemedir (Neville, 2011). Lif katkısı, çatlak kontrolü, çekme dayanımı, darbe direnci, yangın dayanımı ve yorulma dayanımı gibi çeşitli mekanik özellikleri geliştirerek betonun genel performansını artırır (Banthia & Nandakumar, 2003).

3.1. Basınç ve Çekme Dayanımı

Betonun basınç dayanımı, genellikle çimento hamurunun kalitesine ve agregaların özelliklerine bağlıdır. Lif takviyesi, doğrudan basınç dayanımına büyük bir katkı sağlamasa da, çatlak oluşumunu geciktirerek betonun yük taşıma kapasitesini artırır (Mehta & Monteiro, 2014).

Öte yandan, çekme dayanımı açısından lifler oldukça önemli bir rol oynar. Geleneksel betonun çekme dayanımı, basınç dayanımının yaklaşık %10'u kadar olup oldukça düşüktür (Naaman, 2003). Lif katkısı, çatlak oluşumunu kontrol altına alarak çekme dayanımını artırır ve betonun kırılgan davranışını sünek hale getirir (ACI Committee 544, 2002). Özellikle çelik ve karbon liflerin kullanımı, yüksek çekme dayanımı ile betonun mukavemetini önemli ölçüde artırmaktadır (Balaguru & Shah, 1992).

3.2. Çatlak Kontrolü ve Süneklik

Lif takviyesi, betonun en önemli zayıflıklarından biri olan çatlak oluşumuna karşı etkili bir çözüm sunar. Betonun kuruma büzülmesi, termal gerilmeler veya yük etkisiyle çatlaması yaygın bir sorundur (Bentur & Mindess, 2007). Lifler, mikro çatlakların oluşumunu sınırlandırarak ve yayılmasını önleyerek betonun servis ömrünü uzatır (Banthia & Trottier, 1995).

Süneklik, malzemenin ani kırılmadan önce şekil değiştirme kapasitesini ifade eder. Çelik ve polimer liflerin betonda kullanılması, sünekliği artırarak betonun ani kırılma davranış göstermesini önler (Johnston, 2001).

3.3. Darbe ve Yorulma Dayanımı

Lif takviyeli beton, ani yüklere ve darbelere karşı daha dayanıklıdır. Çelik, karbon ve polimer liflerin eklenmesi, betonun darbe enerjisini absorbe etme kapasitesini artırarak kırılmaların önüne geçer (Gao et al., 1997). Özellikle askeri yapılar, havaalanları ve endüstriyel zeminlerde darbe dayanımı yüksek betonlara olan talep artmaktadır (ACI Committee 544, 2002).

Yorulma dayanımı, betonun tekrarlanan yükler altındaki performansını ifade eder. Geleneksel beton, yüksek gerilme döngülerinde çatlama eğilimi gösterirken, lif takviyesi bu çatlak ilerlemesini yavaşlatarak betonun daha uzun ömürlü olmasını sağlar (Naaman, 2003).

3.4. Yangın Dayanımı ve Geçirgenlik

Yüksek sıcaklıklara maruz kalan beton, ani su kaybı ve iç gerilmeler nedeniyle patlama riski taşır (Khoury, 2000). Polipropilen liflerin betona eklenmesi, yangın esnasında liflerin eriyerek beton içinde mikro boşluklar oluşturmasını sağlar. Bu boşluklar, su buharının tahliye edilmesine yardımcı olarak patlama riskini azaltır (Bentz, 2000).

Lifli betonun geçirgenliği, kullanılan lif türüne bağlıdır. Çelik ve karbon liflerin eklenmesi, betonun su geçirgenliğini artırabilirken, polimer ve cam lifler geçirgenliği minimize edebilir (Savastano et al., 2000).

4. LİFLİ BETONLARIN KULLANIM ALANLARI

Lifli beton, geleneksel betona kıyasla geliştirilmiş mekanik özellikleri sayesinde birçok farklı yapı türünde kullanılmaktadır. Özellikle yüksek çekme dayanımı, süneklik, çatlak kontrolü ve darbe direnci gerektiren uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir (ACI Committee 544, 2002). Lifli betonun kullanımı başlıca yapısal elemanlar, altyapı projeleri, prekast beton ürünleri ve özel dayanım gerektiren yapılar gibi alanlarda yoğunlaşmaktadır.

4.1. Yapısal Elemanlar

Lifli beton, kolon, kiriş, döşeme ve perde duvar gibi taşıyıcı yapı elemanlarında kullanılarak çatlak kontrolünü iyileştirir ve sünekliği artırır (Johnston, 2001). Geleneksel donatılı beton yerine veya donatıya takviye olarak kullanıldığında, yapı elemanlarının hizmet ömrü uzamakta ve bakım maliyetleri azalmaktadır (Bentur & Mindess, 2007). Özellikle yüksek katlı binalar ve deprem bölgelerindeki yapılar için lif takviyeli beton, güvenliği artıran önemli bir malzeme olarak kabul edilmektedir.

4.2. Yol, Köprü ve Tünel Uygulamaları

Lif takviyeli beton, altyapı projelerinde önemli avantajlar sunmaktadır.

- **Yol ve Otoyollar:** Lif katkısı, asfalt ve beton yol kaplamalarının çatlak direncini artırarak yol ömrünü uzatır. Ayrıca, ağır taşıt trafiğine karşı dayanıklılığı

artırarak bakım gereksinimlerini azaltır (Naaman, 2003).

- **Köprüler:** Betonarme köprülerde kullanılan lifler, yorulma direncini artırarak yapıların yük kapasitesini artırır (Banthia & Trottier, 1995).
- **Tüneller ve Yeraltı Yapıları:** Tünel segmentlerinde kullanılan lifli beton, çatlak kontrolü sağlayarak su sızıntılarını engeller ve yangın dayanımını artırır (Khoury, 2000).

4.3. Prekast Beton Ürünleri

Prekast beton elemanlarda lif takviyeli beton kullanımı, montaj sürecini kolaylaştırarak üretim verimliliğini artırır.

- **Boru ve Kanal Sistemleri:** Su ve atık su borularında betonun geçirgenliğini azaltarak dayanıklılığı artırır.
- **Cephe Panelleri:** Hafiflik ve yüksek mukavemet özellikleri sayesinde mimari tasarımlarda esneklik sağlar (Bentz, 2000).
- **Bloklar ve Döşeme Panelleri:** Yüksek dayanım ve çatlak direnci ile öne çıkar.

4.4. Savunma ve Özel Dayanım Gerektiren Yapılar

Lifli beton, askeri yapılar, nükleer santraller ve havaalanları gibi özel dayanım gerektiren alanlarda da kullanılmaktadır.

- **Darbe ve Patlama Dayanımı Gerektiren Yapılar:** Çelik ve karbon lifler kullanılarak yüksek enerjili darbelere karşı dirençli betonlar üretilir (Gao et al., 1997).

- **Nükleer Santraller:** Lif katkısı, radyasyon ve termal etkilere karşı betonun stabilitesini artırır (ACI Committee 544, 2002).
- **Havaalanı Pistleri:** Yüksek aşınma direnci ve yorulma dayanımı gerektiren pistlerde lifli beton kullanımı avantaj sağlar.

5. BETON ÜRETİMİNDE LİFLERİN HİBRİTLENMESİ

Hibrit lifli beton (Hybrid Fiber Reinforced Concrete - HFRC), farklı türde liflerin bir arada kullanılmasıyla elde edilen gelişmiş bir beton türüdür. Tek bir lif türünün sağladığı avantajların yanı sıra, farklı liflerin kombine edilmesiyle betonun hem sünekliği hem de dayanımı artırılabilir (Naaman, 2003). Çelik, polimer, karbon ve doğal lifler gibi farklı malzemelerin belirli oranlarda karıştırılması, betonun çeşitli mekanik ve fiziksel özelliklerini optimize etme imkânı sunar (Banthia & Nandakumar, 2003).

5.1. Farklı Lif Türlerinin Kombinasyonu ve Etkileri

Hibrit lifli beton sistemleri, genellikle kısa ve uzun liflerin bir arada kullanılması veya farklı malzemelerden oluşan liflerin kombine edilmesi prensibine dayanır (ACI Committee 544, 2002).

- **Kısa ve Uzun Liflerin Kullanımı:** Kısa lifler, mikro çatlakları kontrol ederken, uzun lifler makro çatlakların yayılmasını engelleyerek daha iyi bir süneklik sağlar (Bentur & Mindess, 2007).
- **Çelik ve Polimer Liflerin Kombinasyonu:** Çelik lifler yüksek çekme dayanımı sağlarken, polimer lifler işlenebilirliği ve yangın dayanımını iyileştirir (Balaguru & Shah, 1992).

- **Karbon ve Cam Liflerin Kombinasyonu:** Karbon lifler yüksek mukavemet sağlarken, cam lifler hafiflik ve dayanıklılık sunar (Mehta & Monteiro, 2014).
- **Doğal ve Sentetik Liflerin Birlikte Kullanımı:** Çevresel sürdürülebilirliği artırmak amacıyla, doğal lifler sentetik liflerle kombine edilerek dayanıklı ve çevre dostu betonlar üretilebilir (Savastano et al., 2000).

5.2. Optimum Lif Karışımlarının Belirlenmesi

Hibrit lif takviyeli beton üretiminde, farklı lif türlerinin optimum oranlarının belirlenmesi için laboratuvar çalışmaları yapılmaktadır (Gao et al., 1997). Literatürde önerilen bazı optimum lif oranları şu şekildedir:

- **Çekme ve basınç dayanımını optimize etmek için:** Çelik ve karbon lifler genellikle %0.5 ila %2 oranında kullanılır (Naaman, 2003).
- **Yangın dayanımı ve çatlak kontrolü için:** Polipropilen lifler düşük oranlarda (%0.1-%0.5) betona eklenir (Khoury, 2000).
- **Ekonomik ve çevresel denge sağlamak için:** Doğal ve sentetik lifler belirli oranlarda hibritlenerek daha sürdürülebilir malzemeler elde edilir (Savastano et al., 2000).

Bu oranlar, deneysel çalışmalar ve mühendislik uygulamaları temel alınarak belirlenmiştir. Ancak, optimum lif kombinasyonu beton karışımına, çimento-su oranına ve kullanım amacına bağlı olarak değişkenlik gösterebilir (Banthia & Nandakumar, 2003).

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Lifli beton, geleneksel betonun mekanik zayıflıklarını gidermek için geliştirilmiş önemli bir yapı malzemesidir. Çelik, cam, polimer, karbon ve doğal liflerin beton içine eklenmesiyle çekme dayanımı, darbe direnci, çatlak kontrolü ve süneklik gibi özellikler önemli ölçüde iyileştirilmiştir (Neville, 2011). Özellikle altyapı projelerinde, prekast beton elemanlarda ve özel dayanım gerektiren yapılar için lif takviyeli betonun kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır (Banthia & Trottier, 1995).

Hibrit lif kullanımı, betonun farklı yükleme koşullarına karşı dayanımını artırmak için önemli bir çözüm sunmaktadır. Farklı lif türlerinin optimum oranlarda kombine edilmesi, betonun hem işlenebilirliğini hem de uzun vadeli dayanıklılığını iyileştirerek mühendislik tasarımlarına yeni olanaklar sağlamaktadır (ACI Committee 544, 2002). Bununla birlikte, lifli betonun üretim maliyeti ve işlenebilirlik zorlukları, yaygın kullanımını sınırlayan faktörler arasında yer almaktadır (Mehta & Monteiro, 2014).

Gelecekte, lifli beton üzerine yapılan araştırmaların, yeni nesil lif malzemelerinin geliştirilmesi, sürdürülebilir üretim tekniklerinin iyileştirilmesi ve maliyet etkin çözümlerin bulunması yönünde ilerlemesi beklenmektedir. Lifli betonun, gelişmiş dayanım özellikleri ve uzun ömürlü yapısal performansı sayesinde, inşaat sektöründeki öneminin artarak devam edeceği öngörülmektedir (Bentur & Mindess, 2007).

KAYNAKÇA

- ACI Committee 544. (2002). State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.1R-96). American Concrete Institute.
- Balaguru, P. N., & Shah, S. P. (1992). Fiber-Reinforced Cement Composites. McGraw-Hill.
- Banthia, N., & Nandakumar, N. (2003). Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 25(1), 3-9.
- Banthia, N., & Trottier, J. F. (1995). Test methods for flexural toughness characterization of fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 17(1), 57-78.
- Bentur, A., & Mindess, S. (2007). Fibre Reinforced Cementitious Composites. CRC Press.
- Bentz, D. P. (2000). Fibers, percolation, and spalling of high-performance concrete. National Institute of Standards and Technology.
- Gao, J., Su, R., & Qian, C. (1997). Impact resistance of hybrid-fiber-reinforced concrete. *Magazine of Concrete Research*, 49(179), 45-53.
- Johnston, C. D. (2001). Fiber-reinforced cements and concretes. *Advances in Cement Research*, 13(4), 175-185.
- Khoury, G. A. (2000). Effect of fire on concrete and concrete structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2(4), 429-447.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. McGraw-Hill Education.

- Naaman, A. E. (2003). Ferrocement and Laminated Cementitious Composites. Techno Press.
- Neville, A. M. (2011). Properties of Concrete. Pearson Education.
- Savastano, H., Warden, P. G., & Coutts, R. S. P. (2000). Microstructure and mechanical properties of waste-fiber cement composites. Cement and Concrete Composites, 22(5), 379-384.

GEOPOLİMER VE ALKALİ AKTİVE EDİLMİŞ BAĞLAYICILAR: TÜRKİYE ODAKLI BİBLİYOMETRİK BİR DEĞERLENDİRME

Enes EKİNCİ¹

1. GİRİŞ

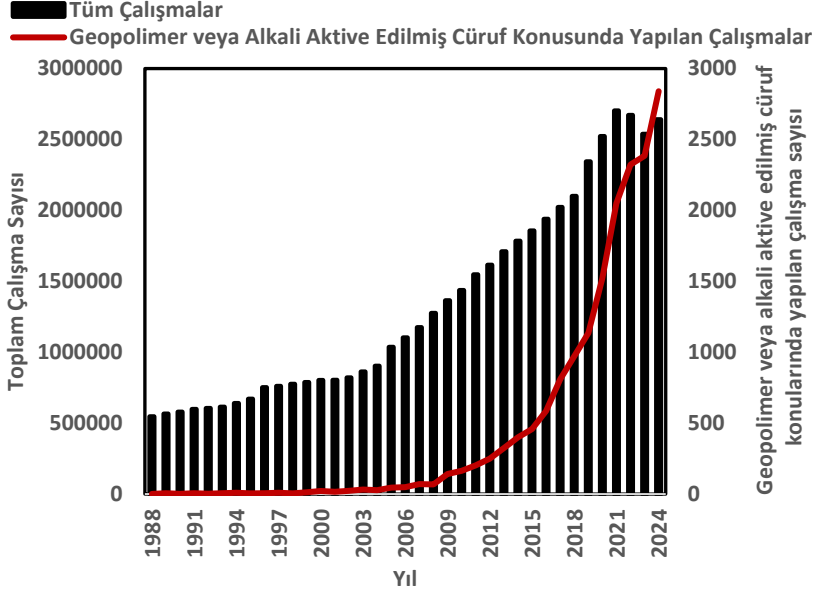
Bu bölümde çimentoya alternatif olma noktasında ümit verici özellikleri bulunan geopolimer veya alkali aktive edilmiş cüruf esaslı bağlayıcılar üzerine yapılan çalışmaların bibliyometrik analizi sunulmuştur. Küresel ısınma ile ilgili endişe verici veriler, bilim dünyasını uzun süredir çimento üretiminden kaynaklanan çevresel problemleri giderme noktasında motive etmektedir. Her ne kadar çimento üretim tesislerinde çevre dostu yakıt kullanılması [1] veya enerji tasarrufu [2] önlemler alınarak çevresel etkiler azaltılmaya çalışılsa da, çimentonun ham maddelerinden olan kalkerin kalsinasyonundan kaynaklanan CO₂ gazı emisyonları açığa çıkmaya devam etmektedir [3]. 1970'lerin sonunda Fransız bilim adamı Joseph Davidovits [4] tarafından literatüre kazandırılan geopolimer bağlayıcılar geleneksel Portland çimentosuna oldukça potansiyel bir alternatif olabilme özelliğini taşımaktadır. Alüminosilikat esaslı ham maddeler ve alkali aktivatörlerin kombinasyonu ile üretilen geopolimer veya alkali aktive edilmiş bağlayıcılar yüksek erken dayanım [5], üstün durabilite özellikleri [6], düşük CO₂ gazı emisyonu [7] ve atık malzemelerin geri dönüşümü gibi konularda önemli avantajlara sahiptir [8]. Bu bölüm, WOS veri tabanından alınan verilerin analizine dayanarak Türkiye ve Dünya'nın çimentosuz bir

¹ Dr. Öğr. Üyesi, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, enes.ekinci@inonu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7669-887X.

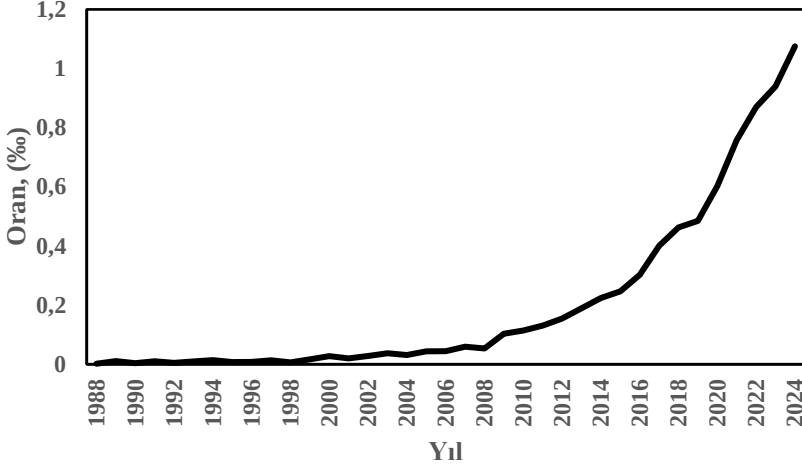
geleceğe ulaşma noktasında şu anda hangi durumda olduğunu kapsamlı bir şekilde ele almaktadır.

2. GEOPOLİMER: TARİHSEL GELİŞİMİ VE GÜNÜMÜZDEKİ KULLANIMI

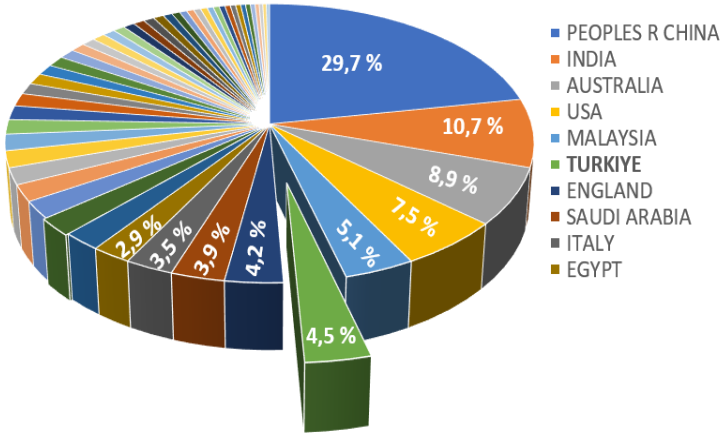
WOS veri tabanından alınan verilere göre, geopolimer veya alkali aktive edilmiş cüruf konuları ile ilgili 2024 yılına kadar binlerce çalışma gerçekleştirilmiştir. Geopolimer veya alkali aktive edilmiş cüruf konuları hakkında yapılan çalışmalara ait nicel veriler Şekil 1 ve Şekil 2’de sunulmuştur. WOS veri tabanında geopolimer veya alkali aktive edilmiş cüruf konuları ile ilgili yapılan ilk çalışmaya 1988 yılında rastlanılmıştır [9]. Bu tarihten sonra, geopolimer bağlayıcılar, göstermiş oldukları üstün performanslar nedeniyle sıklıkla araştırılmaya devam etmiştir. Şöyle ki, 1988 yılında geopolimer bağlayıcılar ile ilgili yapılan çalışmaların toplam bilimsel çalışmalara oranı ‰ 0.001 iken, 2024 yılında bu oran ‰ 1.075 değerine çıkmıştır. Elde edilen bu sonuçlar, bilim dünyasının geopolimer veya alkali aktive edilmiş cüruf konuları üzerine olan ilgisinin yıllar içerisinde yaklaşık 1000 kat arttığını göstermektedir. Yapılan bu çalışmaların ülkelere göre dağılımı incelenmiş, 50 ve üzeri çalışma yapılmış olan ülkelerin dağılımı Şekil 3’te verilmiştir. Şekil 3’ten görüleceği üzere Çin Halk Cumhuriyeti geopolimer bağlayıcılar ile yapılmış çalışmaların yaklaşık ‰ 30’una ev sahipliği yapmıştır. Bu çalışmaları yaklaşık ‰11’lik bir oran ile Hindistan takip etmiştir. Türkiye ise, çimentoya daha yeşil alternatif olarak nitelendirilen geopolimer bağlayıcılar konusunda dünya literatürüne yaklaşık ‰ 4.5’lik bir katkı sağlamış ve bu sayede altıncı sırada yer almıştır.



Şekil 1. WOS veri tabanından elde edilen çalışma sayıları



Şekil 2. Geopolimer veya alkali aktive edilmiş cüruf alanında yapılan çalışma sayılarının toplam çalışma sayısına oranı



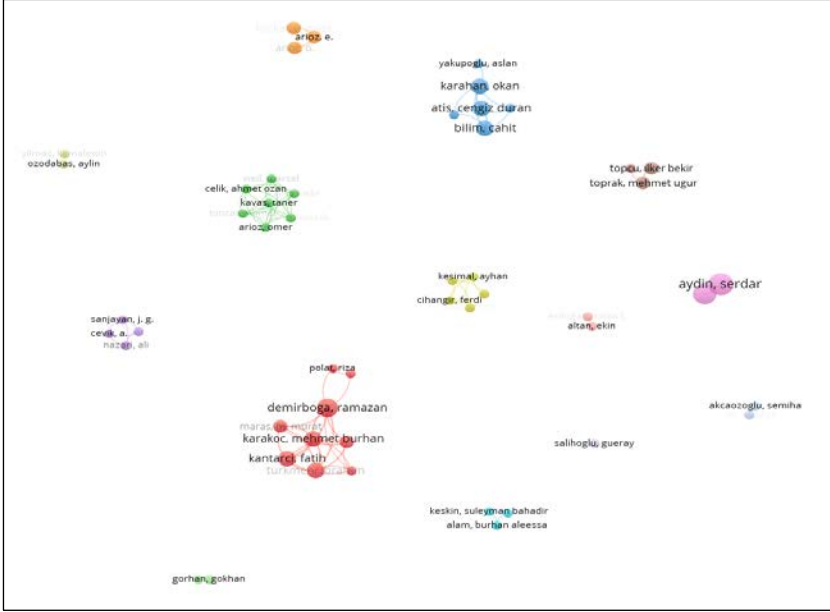
Şekil 3. Geopolimer veya alkali aktive edilmiş cüruf alanında yapılan çalışma sayılarının ülkelere göre dağılımı

3. TÜRKİYE’DE GEOPOLİMER ARAŞTIRMALARI VE GELİŞİMİ

3.1. Araştırmacılar ve İkili İşbirlikleri

Bu bölümde, Türkiye’de geopolimer veya alkali aktive edilmiş cüruf konusunda çalışma yapan araştırmacılar ve bunların iş birliği ağları incelenmiştir. Ülkemizde, geopolimer veya alkali aktive edilmiş cüruf konusunda yapılan ilk çalışma 2009 yılında yapılmıştır. Bu tarihten başlayacak şekilde bu çalışma süreci üç farklı dönemde ele alınmış ve detaylı bibliyometrik analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4’den görüleceği üzere, 2009 ve 2014 yıllarını kapsayan ilk dönemde ülkemizde toplam 51 farklı araştırmacıdan oluşan bağımsız ve küçük araştırma grupları oluşmuştur. Bibliyometrik ağ haritasında farklı renklerde gösterilen yazar grupları birlikte çalışan akademisyenleri temsil etmektedir. Şekil 4’te görüleceği üzere, çok az sayıda araştırma grupları belirgin lider araştırmacılar merkezinde toplanmış ve birçok çalışma gerçekleştirmişlerdir. Birbirlerinden farklı şekilde ve bölgelerde organize olan bu araştırma grupları kendi içlerinde

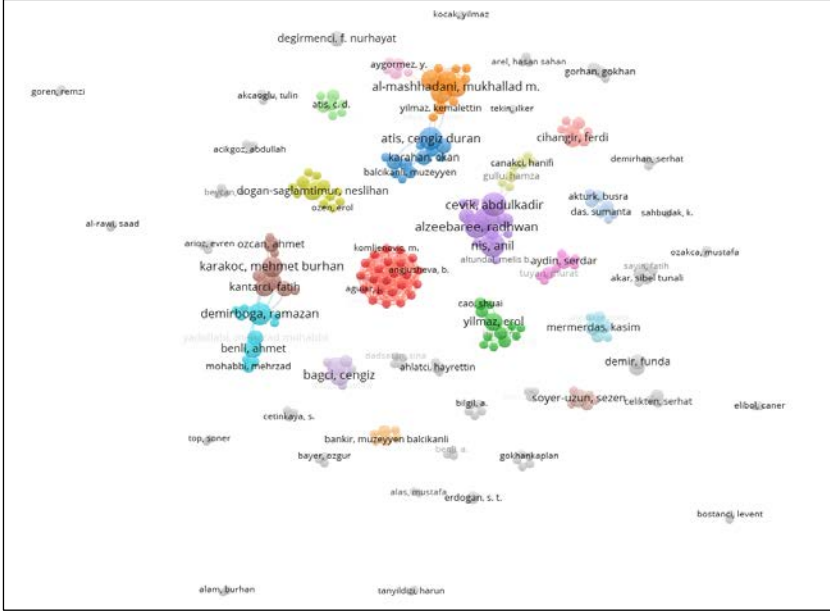
iş birliklerini sağlayabilmiş ancak iki farklı araştırma grubu arasında iş birlikleri ise tam olarak kurulamamıştır. Sonuç olarak, bölgesel iş birliklerinin gözlemlendiği bu ilk dönem, ülkemizde çevre dostu yapı malzemelerinin temelini atıldığı ve izole durumda olan birçok araştırma grubunun oluştuğu dönem olarak tanımlanabilir.



Şekil 4. 2009 ve 2014 yılları arasındaki iş birliği haritası

Geopolimer ve alkali aktive edilmiş cüruf konusunda yapılan araştırmaların ikinci dönemi ise 2015 ve 2019 arasındaki yıllar olarak ele alınmıştır. Şekil 5'ten görüleceği üzere, 2009 ve 2014 yılları arasındaki ilk döneme göre belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. İkinci dönemde, ilk 5 yıllık süreçte oluşan küçük araştırma grupları oldukça etkili hale gelmiş ve araştırmacılar arasındaki ağ yapıları daha yoğunlaşmıştır. Öte yandan, Türkiye'de geopolimer veya alkali aktive edilmiş cüruf konusunda kurumsal ilginin arttığına işaret eden daha yoğun ve büyük kümelenmeler gözlemlenmiştir. Önceki döneme kıyasla, araştırmacılar arasında bulunan iş birlikleri de önemli ölçüde

artmıştır. Ek olarak, ikinci dönemde, çok fazla sayıda araştırmacının sürece dâhil olduğu ve geopolimer konusu üzerinde oldukça artan bir akademik ilginin varlığı gözlenmiştir. İlk döneme benzer olarak, her ne kadar iş birliği konusunda umut verici gelişmeler gözlene de, halen çok sayıda izole çalışan akademisyenlerin olduğu gözlenmiştir.

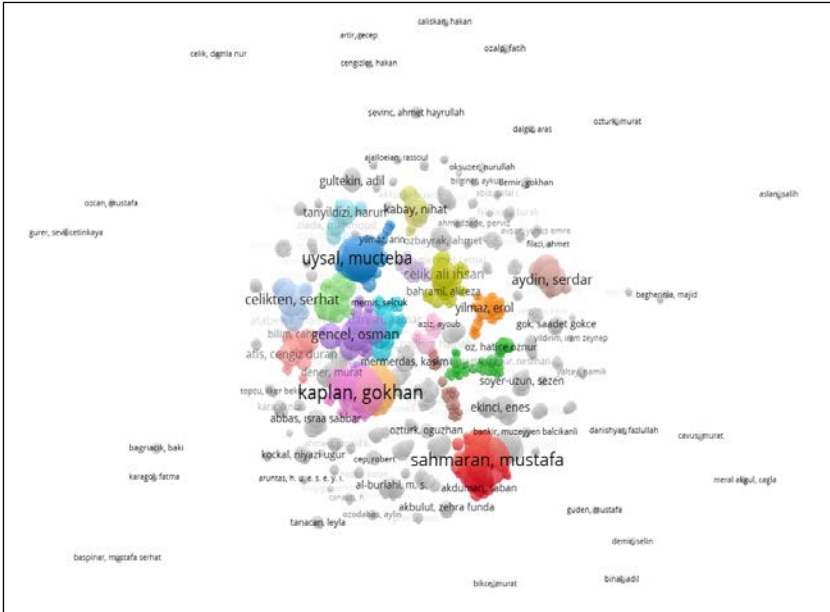


Şekil 5. 2015 ve 2019 yılları arasındaki iş birliği haritası

2020 ve 2024 yılları arasında bulunan üçüncü ve son dönemde, ülkemizde çevre dostu yapı malzemeleri konusunda yapılan araştırmalar oldukça belirgin hale gelmiştir. Şekil 6'dan görüleceği üzere, ilk iki dönemde yer almayan ancak üçüncü dönemde oldukça belirgin hale gelen birçok araştırmacıya rastlanılmıştır. Bu araştırmacılar, sadece bireysel sıçramalar ile değil verimli araştırma grupları da oluşturarak literatüre önemli katkılar sağlamıştır. Bu araştırmacılar ve önceki dönemlerde de etkili olan diğer lider araştırmacılar etrafında toplanan farklı araştırma grupları arasındaki iş birlikleri artmış ve oldukça bütüncül bir çalışma haritasına ulaşılmıştır. Büyük düğüm

noktaları en çok yayın yapan bilim insanlarını gösterirken bu yazarların çevresinde yoğun ve güçlü iş birliği bulunan gruplar gözlenmiştir. Ancak, yine de, ülkemizde etkili araştırma gruplarının içerisinde yer almayan, izole durumda çalışmalarına devam eden birçok araştırmacının olduğunun da altı çizilmelidir. Sonuçlar, ülkemizin geopolimer veya alkali aktive edilmiş cüruf konusunda oldukça iyi bir akademik düzeye geldiğini ve gelecekte de bu önemli yerinin daha da ileri taşınabileceğini ortaya çıkarmıştır.

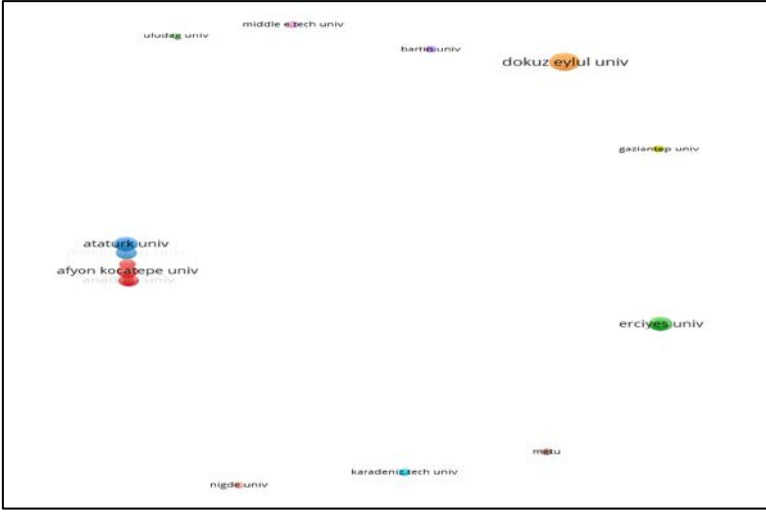
Öte yandan, ülkemizdeki geopolimer veya alkali aktive edilmiş cüruf alanındaki çalışmaların belirgin lider araştırmacılar ve etkili araştırma grupları etrafında toplandığı ancak bu gruplar arasındaki iş birliklerinin halen zayıf olduğu gözlenmiştir. Elde edilen bu bulgular, disiplinler arası araştırmaların daha çok teşvik edilmesi gerektiğini gözler önüne sermiştir. Hâlihazırda, ülkemizin geopolimer bağlayıcılar konusundaki küresel ölçekteki önemli yerinin deneyimli araştırmacıların ortak projeler veya ulusal/uluslararası konsorsiyumların kurulmasında aktif rol oynayarak daha üst sıralara taşınabileceği düşünülmektedir. Böylelikle, zayıf bağlantılara sahip izole araştırma gruplarının da bu araştırmalara entegrasyonu sağlanabilecek ve daha nitelikli çalışmaların yapılması mümkün hale gelecektir. Bu noktada, geopolimer bağlayıcılar özelinde yapılacak konferans ve çalıştayların gerçekleştirilmesi ile farklı kurumlardaki araştırmacıların iş birliği yapabilmesi oldukça etkili olacaktır.



Şekil 6. 2020 ve 2024 yılları arasındaki işbirliği haritası

3.2. Üniversiteler ve İkili İşbirlikleri

Geopolimer veya alkali aktive edilmiş cüruf konusunda yapılan çalışmalar ile ilgili ülkemiz üniversitelerinin performansları ve iş birliği üç farklı dönemde incelenmiştir. WOS veri tabanında Türkiye’de geopolimer veya alkali aktive edilmiş cüruf konusunda yapılmış ilk çalışma 2009 yılında Erciyes Üniversitesi, Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi ve İstanbul Üniversitesi iş birliği ile yapılmıştır. Bu tarihten sonra alınan ilk 5 yıllık çalışma periyodunda ülkemizde toplamda 27 adet çalışma gerçekleştirmiştir. Bu ilk dönemde, Atatürk Üniversitesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi gibi üniversiteler arasında iş birlikleri kurulsa da diğer üniversitelerimiz güçlü iş birliklerine imza atmamıştır.

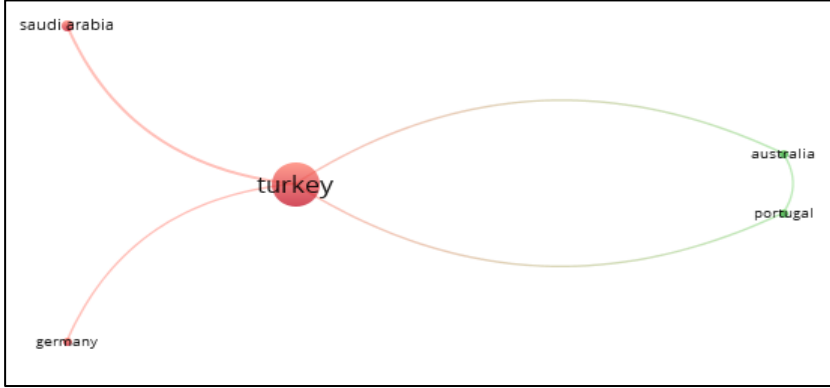


Şekil 8. 2009 ve 2014 yılları arasında üniversiteler arası işbirlikleri

Şekil 9, 2015 ve 2019 yılları arasında yapılan çalışmaların incelendiği ikinci dönem sunmaktadır. Bu dönemde, çok sayıda üniversite tarafından geopolimer ve aktive edilmiş cüruf konularında yapılan toplam 120 adet çalışmaya rastlanılmıştır. Bu nedenle, 2015 yılı ve sonrası çevre dostu bağlayıcıların ülkemizdeki bilim insanları tarafından tam olarak fark edildiği ve araştırıldığı dönemin başlangıcı olarak görülmüştür. Bu dönem, sadece birçok farklı üniversitenin bu konuya ilgisinin artması şeklinde değil, üniversiteler arası iş birliklerinin de oldukça güçlendiği ve güçlü merkezlerin ortaya çıktığı bir dönem olması açısından ülkemizin önemli bir atılım gösterdiği bir süreç olarak tanımlanmıştır.

3.3. Yurtdışı ile İşbirlikleri

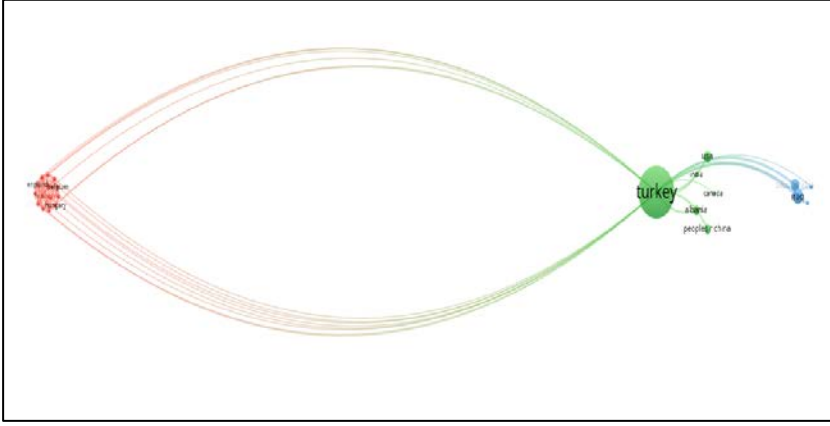
Türkiye'nin geopolimer veya alkali aktive edilmiş cüruf konularında yapılan çalışmalarda uluslararası üniversitelerle iş birliklerinin 2009 ve 2024 yılları arasındaki gelişimini üç farklı dönemde incelenmiştir. Yapılan bu dönemsel incelemelerin iş birliklerinin gelişimi ve anlamlandırılması açısından önemli bir rol oynayabileceği öngörülmektedir. Öncelikle ilk dönemde (2009 ve 2014 arası) Türkiye, oldukça küçük merkez düğümü ile sınırlı yurtdışı iş birliklerine sahip bir ülke konumundadır. Beş yıllık ilk periyot; Avustralya, Portekiz, Suudi Arabistan ve Almanya ile oldukça sınırlı ve tek yönlü iş birliklerini içermektedir. Geleneksel Portland çimentosu yerine daha çevreci alternatif olarak görülen geopolimer bağlayıcıların, ülkemizde ilk fark edildiği bu 5 yıllık periyot, kısıtlı ve bölgesel odaklı bir yapıya sahip iş birliklerine sahip olsa da gelecekteki çalışmalara önemli ölçüde katkı sağlamıştır.



Şekil 11. 2009-2014 yılları arasında yurtdışı ile iş birliği

Geopolimer ve alkali aktive edilmiş cüruf konularında uluslararası literatürde önemli bir yer tutmaya başladığımız dönem ise ikinci dönem (2015 ve 2019 arası) olarak ele alınmıştır. Şekil 12'den görüleceği üzere, en çok iş birliği yapılan ülkeler Irak, Suudi Arabistan, ABD, Çin ve Arnavutluk olarak karşımıza çıkmıştır. İş birliği sayısının önemli ölçüde arttığı bu ikinci beş

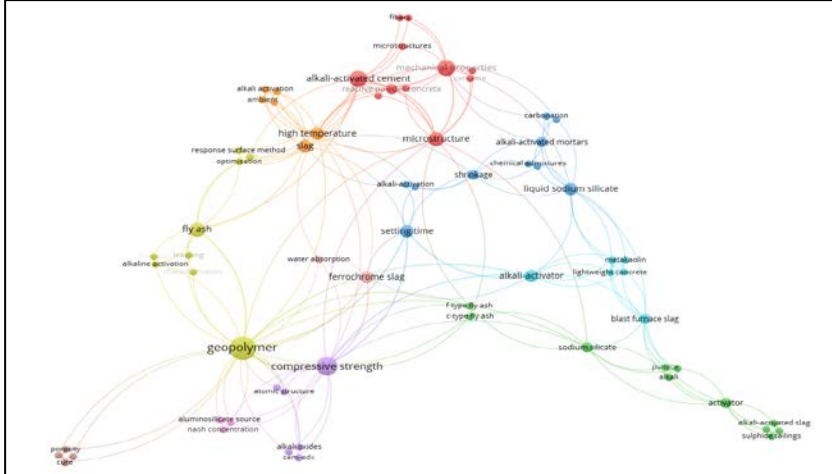
yıllık süreç ülkemizin daha sistematik bir ağ yapısı oluşturması ile sonuçlanmıştır. Dünyanın birçok farklı bölgesinde yer alan ülkeler ile kurulan iş birlikleri ülkemizin geopolimer ve alkali aktive edilmiş cüruf konularında bilimsel alana daha fazla katkı sağlamaya başladığı bir dönem olarak belirlenmiştir.



Şekil 12. 2014 ve 2019 yılları arasında yurtdışı ile iş birliği

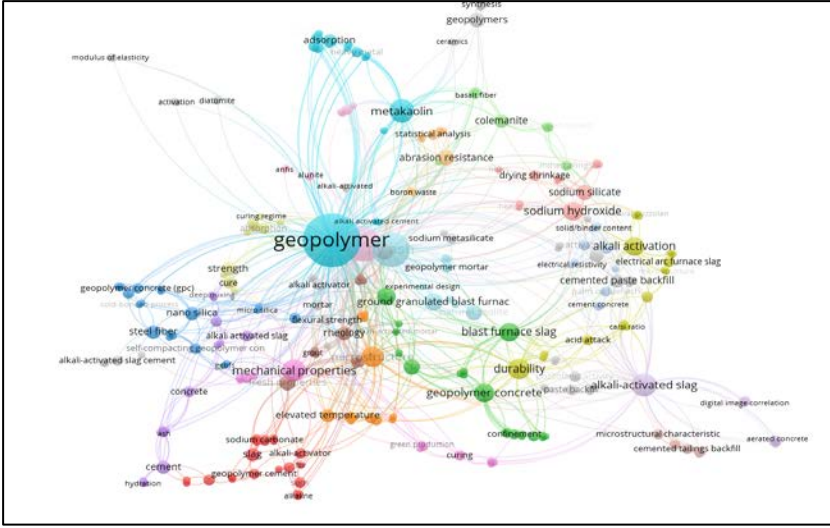
Şekil 13, son dönemde ülkemizin uluslararası literatürde “Türkiye“ ve “Turkey” olarak yer aldığını ve bu iki düğümün farklı ülkeler ile yoğun iş birlikleri içerisinde olduğunu ortaya koymuştur. Şekil 13’den elde edilen veriler; ülkemizin bu son dönemde Irak, Suudi Arabistan, ABD, Kanada, İngiltere, Çin Malezya, Belçika, Avustralya, Katar ve Hindistan gibi ülkeler başta olmak üzere, 56 farklı ülke ile iş birlikleri yaptığını ve sıralanan bu ülkeler ile iş birliklerinin en az 10 çalışma şeklinde gerçekleştiği elde edilmiştir. Özellikle bu son 5 yıllık dönemde ABD, Kanada gibi gelişmiş ülkeler ile iş birliği ağlarında önemli ölçüde artışlar yaşanmıştır. Ülkemiz, özellikle son 5 yıllık dönemde geopolimer ve alkali aktive edilmiş cüruf konularında çok önemli bir araştırma merkezi haline gelmiştir. Farklı kıtadaki ülkeler ile yapılan güçlü iş birlikleri ülkemizin oldukça küresel bir ağ yapısına ulaştığına işaret etmektedir. Gözlenen bu çok merkezli ve karmaşık ağ yapısı, ülkemizin, artık sadece iş birliği

sınırlı sayıda anahtar kelime ile ifade edilebildiğini ve geopolimer malzemelerin mekanik özelliklerinin anlaşılma çalışıldığı şeklinde yorumlanmıştır.



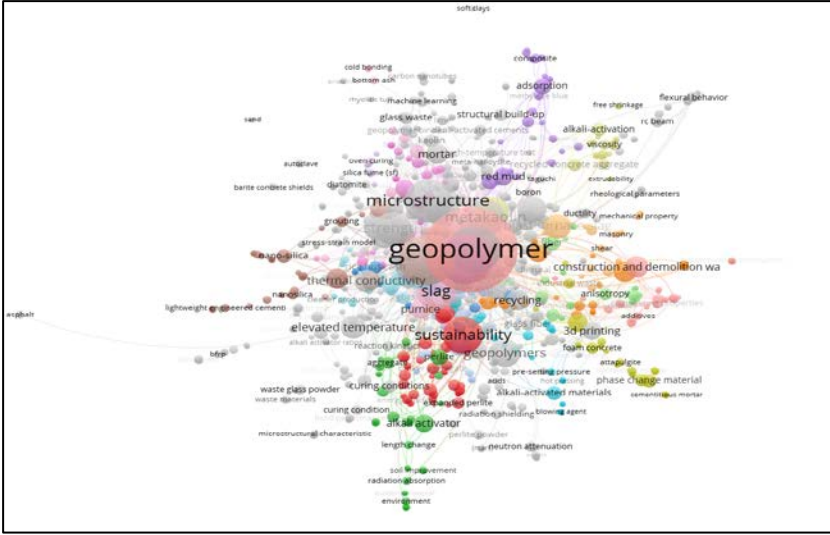
Şekil 14. 2009-2014 arasında yapılan çalışmaların anahtar kelimeleri

2015-2019 arasındaki ikinci dönem, geopolimer ve alkali aktive edilmiş cüruf konularındaki çalışmalarda önemli bir konu çeşitliğinin yaşandığı bir dönem olarak karşımıza çıkmıştır. Ülkemizde, uluslararası ve ulusal ölçekte iş birliklerinin de oldukça arttığı bu dönemde, konu çeşitlilikleri önemli ölçüde artış göstermiş, mikro yapısal ve dayanıklılık özellikleri ise daha çok incelenmiştir. Şekil 15’den görüleceği üzere, geopolimer ve alkali aktive edilmiş cüruf konuları malzeme bilimi ve mühendislik tekniği açısından daha geniş bir perspektifte araştırılmıştır.



Şekil 15. 2015 – 2019 arasında yapılan çalışmaların anahtar kelimeleri

Şekil 16, 2020 ve 2024 yılları arasında geopolimer ve alkali aktive edilmiş cüruf konul başlığı ile ilgili araştırmalarda büyük bir dönüşümün yaşandığını ortaya koymaktadır. Son dönem; geopolimer ve alkali aktive edilmiş cüruf konularının artık sürdürülebilirlik, geri dönüşüm ve çevre dostu gibi anahtar kelimeler ile birlikte kullanıldığını ortaya çıkarmaktadır. İlk iki döneme kıyasla, önemli ölçüde çalışmanın yaşandığı bu dönemde, geopolimer ve alkali aktive edilmiş cüruf konuları; 3 boyutlu yazıcı, faz değiştiren malzemeler, radyoaktif kalkan gibi yenilikçi anahtar kelimeler ile birlikte ele alınmıştır. Bu yenilikçi girişimler ile birlikte, son dönemde ileri seviyede malzeme karakterizasyonu çalışmaları da devam etmiştir. Elde edilen bu bulgular, ülkemizin, uluslararası trendleri yakından takip ettiğini ve önemli yenilikçi çalışmalara imza attığını ortaya koymuştur.



Şekil 16. 2020 ve 2024 arasında yapılan çalışmaların anahtar kelimeleri

4. SONUÇLAR

Geopolimer veya alkali aktive edilmiş cüruf konularında yapılan çalışmaların detaylı analizleri sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Çimentosuz kompozitlerin yıllar içerisinde oldukça önemli ve popüler bir çalışma konusu haline geldiği gözlenmiştir.
- Küresel ölçekte geopolimer veya alkali aktive edilmiş cüruf konusunda yapılan çalışmaların yaklaşık %30'u Çin merkezli iken, Türkiye'nin ise % 4.5'luk bir pay ile altıncı sırada olduğu belirlenmiştir.
- İlk dönemlerde ülkemizde bireysel veya küçük gruplar halinde yürütülen araştırmalar, yıllar geçtikçe güçlü iş birliklerine dönüşmüştür.

- İkinci 5 yıllık süreçte ise sürece çok daha fazla sayıda araştırmacı katılmış, gerek yurtiçi gerekse yurtdışı merkezli üniversiteler ile çok yoğun ağ yapıları oluşmuştur.
- 2019 ve 2024 yılları arasında ise ülkemiz geopolimer veya alkali aktive edilmiş cüruf konularında tam anlamıyla bir atılım yapmış ve bu konuda dünyanın en önemli merkezlerinden biri haline gelmiştir. Yurtiçinde oluşan oldukça verimli iş birliği ağları yurtdışı iş birliklerinde de gözlenmiştir.
- Geopolimer bağlayıcılar üzerinde yapılan araştırmalar yıllar geçtikçe geleneksel üretim ve kullanım alanlarının önüne geçerek daha spesifik uygulamalara odaklanmıştır.

KAYNAKÇA

- [1] Glavind, M. (2009). Sustainability of cement, concrete and cement replacement materials in construction. *In Sustainability of construction materials* (pp. 120-147). Woodhead Publishing.
- [2] Mokhtar, A., & Nasooti, M. (2020). A decision support tool for cement industry to select energy efficiency measures. *Energy Strategy Reviews*, 28, 100458.
- [3] Benhelal, E., Shamsaei, E., & Rashid, M. I. (2021). Challenges against CO₂ abatement strategies in cement industry: A review. *Journal of Environmental Sciences*, 104, 84-101.
- [4] Davidovits, J. (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 37(8), 1633-1656.
- [5] Nath, P., & Sarker, P. K. (2014). Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construction and Building materials*, 66, 163-171.
- [6] Zhang, B. (2024). Durability of sustainable geopolymer concrete: A critical review. *Sustainable Materials and Technologies*, e00882.
- [7] Elyamany, H. E., Abd Elmoaty, M., & Elshaboury, A. M. (2018). Magnesium sulfate resistance of geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 184, 111-127.
- [8] Pawluczuk, E., Kalinowska-Wichrowska, K., Jimenez, J. R., Fernández-Rodríguez, J. M., & Suescum-Morales, D. (2021). Geopolymer concrete with treated recycled

aggregates: Macro and microstructural behavior. *Journal of Building Engineering*, 44, 103317.

- [9] Davidovits, J., & Comrie, D. C. (1988, June). Archaeological long-term durability of hazardous waste disposal: preliminary results with geopolymer technologies. In *Symposium on Innovative Solutions to Waste Management Problems* (pp. 237-240).

USE OF BIOPOLYMERS IN GEOTECHNICAL ENGINEERING

Özgür YILDIZ¹

Murat Ergenekon SELÇUK²

1. INTRODUCTION

Improving soil properties is one of the fundamental topics in geotechnical engineering. In problematic soils, certain physical and mechanical properties are improved through various methods to meet specific engineering conditions. Soil improvement techniques have been developed to enhance the bearing capacity of the soil, reduce settlement, control water permeability, minimize the risk of liquefaction, and decrease the swelling-shrinking potential, using either natural or artificial materials.

Soil improvement methods are generally divided into four main categories: mechanical, biological, chemical, and electrical processes. Mechanical methods include soil densification, compaction, drainage, and vibration techniques. Chemical methods involve stabilization applications, where binding materials such as lime, cement, fly ash, and similar substances are mixed into the soil. Biological methods, which have gained importance in recent years, involve techniques that use biopolymers produced by microorganisms. Electrical methods are particularly applied in soils with low permeability, using electric currents to improve the soil.

¹ Doçent, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ozgur.yildiz@yildiz.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3684-3750.

² Dr. Öğr. Üyesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, meselcuk@yildiz.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1890-7965.

When the history of soil improvement is examined, it is clear that the use of soil in engineering and construction dates back to ancient times. Since ancient times, humans have developed soil materials and used different binders to ensure the longevity and durability of structures. For example, in Mesopotamia, the Sumerians used bituminous binders to increase the strength of mud walls. In ancient Egypt, embankments were built to protect against floods from the Nile River. The Romans built highly durable arches and domes using natural cement made from volcanic ash and lime.

Today, the importance of environmental factors is increasing, and interest in sustainable engineering solutions is growing every day. Traditionally, Portland cement has been the most commonly used material for soil stabilization. However, due to the high carbon emissions associated with cement production, research into alternative stabilization methods has gained momentum. In recent years, it has been shown that biopolymers produced by microorganisms can be used for soil improvement. Known as the biological clogging method, this technique aims to increase the bearing capacity and reduce water permeability by filling the soil pores.

With the Industrial Revolution, cement became the most widely used construction material and has since gained significant importance in modern construction practices. Today, soil improvement technologies are optimized with advanced laboratory tests and engineering analyses, and efforts are ongoing to develop more efficient and sustainable methods. When examining the historical development of soil improvement methods, it can be seen that engineering practices have advanced by incorporating nature-compatible materials.

Portland cement is a material commonly preferred in the construction industry due to its durability, high strength, and

workability. Additionally, its low cost is one of the important factors that make cement attractive. However, despite all its positive characteristics, it has some significant disadvantages when considering its environmental impacts. The most notable of these disadvantages is the high CO₂ emissions. During the calcination of limestone used in cement production and the heat energy required for production, the production of one ton of cement results in the release of approximately one ton of CO₂. According to research, the cement industry accounts for about 8% of total CO₂ emissions worldwide, with 3% of this being directly related to geotechnical applications. Therefore, research into replacing cement-based materials with environmentally friendly alternatives is increasing.

In recent years, the use of chemical additives has gained more attention as a method to improve soil stabilization and soil strength parameters, thus increasing load-bearing capacity. Chemical soil stabilization techniques are widely used in various geotechnical engineering applications such as road construction, slope stabilization, erosion control, foundation and fill treatment, and coastal zone improvement. To reduce the environmental impact of traditional cement-based soil stabilization, recent studies have focused on more environmentally friendly additives. In particular, alternative stabilization methods such as polymers, biopolymers, and industrial waste materials play a crucial role in the development of sustainable construction materials. Biopolymers are one of the promising alternatives for soil stabilization, as they work by filling the soil pores to provide stabilization. Furthermore, some studies have shown that using waste materials and natural pozzolans instead of cement can significantly reduce the carbon footprint. Promoting the use of sustainable materials in geotechnical engineering is of great importance to reduce environmental impacts and provide cost advantages.

2. BIOPOLYMERS

Due to the high strength of cement mixtures used in geotechnical applications, they remain in contact with the soil for extended periods. Over time, this can lead to an increase in soil pH, contamination of groundwater, and consequently environmental issues. Additionally, the prevention of surface vegetation growth and the release of concrete dust are other environmental drawbacks of cement use. To reduce the environmental impact of cement, materials and methods that are more environmentally sensitive have been researched for geotechnical applications.

Among the chemical methods of soil stabilization, materials such as lime, bituminous materials, and cement, along with industrial by-products like blast furnace slag and fly ash, are commonly used. These and similar additives have shown positive results in improving properties such as settlement and bearing capacity in soils used in geotechnical applications. However, since these materials release harmful gases like CO₂, SO₂, and NO_x, they can produce toxic substances in the soil and lead to the contamination of groundwater and surface waters. As a result, researchers have increasingly focused on using materials that are obtained or can be produced through natural processes. Among alternative additives are enzymes, polymers, resins, acids, silicates, ions, and lignin derivatives, which can be in liquid or powder form. These materials either occur naturally or can be produced through natural processes.

Microbial geotechnology is a new branch of geotechnical engineering that deals with the application of microbiological methods in engineering practices. In problematic soils, more environmentally sensitive studies are being conducted using additives, particularly those obtained or produced naturally, as alternatives to other additives. In recent years, researchers have

been heavily involved in studying biopolymers. Biopolymers are polymers produced by living microorganisms and are used in various fields. These additives are considered as alternatives to other chemical materials.

The use of biopolymers in the soil is related to their ability to form a stable gel without damaging the soil. Their ability to fill the voids in the soil and their sensitivity to different pH conditions can lead to improvements in soil strength, permeability, and other properties. Research has shown that most biopolymers, particularly in sandy soils, fill the voids between sand grains in the form of a viscous hydrogel, providing biological clogging, which results in a more durable and impermeable environment. Furthermore, biopolymers' water retention capacity suggests they could also be used in agricultural areas and erosion control efforts. These materials are biodegradable, minimizing long-term environmental impacts. Table 1 provides a list of biopolymers used in geotechnical applications.

2.1. Agar Gum

Agar gum is a natural polysaccharide derived from seaweeds, particularly species of *Gelidium* and *Gracilaria*. This substance, commonly used in both food and industrial applications, possesses gelling, stabilizing, and thickening properties. The melting point of agar gum is 85-90°C, and its gelling point ranges from 32-45°C. Due to its water-soluble structure, agar forms a viscous solution, and when cooled, it solidifies into a firm gel. As a thermo-reversible polymer, it can melt when heated and re-gel upon cooling. It contains two main components, agarose and agarpectin, has a neutral pH, and is considered an environmentally friendly alternative due to its biodegradable nature.

In the food industry, agar gum is used as a vegan alternative to gelatin, functioning as a stabilizer in products such

as desserts, jellies, ice cream, yogurt, and some meat products. In microbiology and biotechnology, it is used as a growth medium for microbial cultures and serves as a gel matrix in DNA electrophoresis. In the pharmaceutical and cosmetic sectors, agar gum is used as a binder in the production of tablets and capsules, and as a thickening agent in skin creams, lotions, and shampoos.

From the perspective of geotechnical and civil engineering, the use of agar gum as a biopolymer additive in soil stabilization stands out. Particularly in sandy soils, this substance has the potential to create water-resistant structures. Its viscous hydrogel structure can fill the voids in the soil, creating an impermeable structure. This feature is utilized in bioclogging processes and in enhancing soil strength. Among biopolymers, agar gum provides the highest strength.

2.2. Guar Gum

Guar gum is a natural polysaccharide derived from the seeds of the *Cyamopsis tetragonoloba* plant. It generally consists of 75-85% galactomannan, 8-14% moisture, proteins, fibers, and ash. With its high molecular weight galactomannan structure, guar gum exhibits strong thickening, stabilizing, and emulsifying properties. It is easily soluble in water and can provide high viscosity even at low concentrations. Guar gum is biodegradable and environmentally friendly. It is not thermo-reversible, meaning it does not change its structure when heated, and can remain stable over a wide pH range.

In the food industry, guar gum is used as a thickener and viscosity enhancer in products such as ice cream, dairy products, sauces, and baked goods, and it also serves as a binder in gluten-free products. In low-calorie foods, it is used to replace fat and enhance texture. In the pharmaceutical and cosmetic industries, it functions as a binder in tablets and capsules, and as a moisture-retaining and thickening agent in shampoos, creams, and lotions.

Guar gum also has industrial applications, such as increasing the viscosity of drilling muds in oil drilling and serving as a strength-enhancing additive in paper production.

In geotechnical and civil engineering, guar gum is considered as a biopolymer additive for soil stabilization. It can form an impermeable layer, preventing water from leaching through the soil, and can be particularly effective as a particle binder in sandy soils. Additionally, it stands out as an environmentally friendly soil improvement method due to its role in erosion control. These properties of guar gum contribute to the increasing research into the use of biopolymers in sustainable geotechnical applications.

2.3. Gellan Gum

Gellan gum is a water-soluble natural polysaccharide produced by the fermentation of the bacterium *Sphingomonas elodea*. One of its most important characteristics is its thermally responsive gel-forming ability. This biopolymer remains in a liquid state at a specific temperature but forms a strong and stable gel when cooled. Due to its thermal gelation behavior, it can revert to a liquid state when reheated, making it a highly versatile material in food, pharmaceutical, and engineering applications. Additionally, gellan gum is used as a thickener, stabilizer, and viscosity regulator. Its structural stability and low biodegradation rate allow it to maintain durability over long periods.

In geotechnical applications, gellan gum is utilized for soil strength enhancement, void filling, and erosion reduction. Since it exhibits gelation properties upon contact with water, it is particularly effective for creating impermeable barriers or reinforcing the soil through injection techniques. In erosion-prone areas, it helps improve soil stability by preventing the surface displacement of fine-grained soils. Moreover, it is used in drilling

operations to enhance the rheological properties of drilling mud, ensuring ground stability during excavation.

In conclusion, the multifunctional nature of gellan gum makes it an eco-friendly and sustainable soil improvement material. As a biological alternative to conventional chemical additives, it plays a significant role in various construction and engineering applications.

2.4. Kitosan

Chitosan is a natural polysaccharide derived from the deacetylation of chitin, which is the second most abundant biopolymer in nature, primarily found in the exoskeletons of crustaceans such as shrimp, crabs, and lobsters. It is widely recognized for its biodegradability, non-toxicity, and biocompatibility, making it an environmentally friendly alternative to synthetic polymers. Chitosan has excellent coagulation, flocculation, and chelation properties, allowing it to bind with various substances, including heavy metals and organic pollutants. Additionally, it serves as a thickening agent, stabilizer, and antimicrobial agent, making it useful in a wide range of industries, including pharmaceuticals, water treatment, agriculture, and geotechnical engineering [1-2].

In geotechnical applications, chitosan is particularly valuable for soil stabilization, erosion control, and water purification. Due to its ability to form strong hydrogen bonds with soil particles, it enhances soil cohesion and reduces permeability, improving its resistance to erosion and weathering effects. Chitosan-based solutions are often used in grouting applications to seal cracks and voids, enhancing the durability of soils and structures. Additionally, its super-coagulation properties enable it to remove suspended particles, heavy metals, and contaminants from water, making it an effective tool for groundwater remediation and wastewater treatment.

Overall, chitosan is a sustainable and versatile biopolymer that offers significant advantages in geotechnical and environmental engineering. Its biodegradability and ability to improve soil structure and water quality make it an attractive alternative to conventional chemical treatments, contributing to more sustainable and eco-friendly construction practices.

2.5. Xanthan Gum

Xanthan gum (XG) is a water-soluble biopolymer produced by the bacterium *Xanthomonas campestris*, widely used in food and pharmaceutical applications. XG biopolymers are known for their high solubility in both hot and cold water and their exceptional stability under various temperature and pH conditions. One of their most notable characteristics is their ability to exhibit high viscosity even at very low concentrations, making them highly efficient thickeners and stabilizers [3-4]

As a thermo-gelling biopolymer, xanthan gum initially forms a hydrocolloid phase when dissolved in water at temperatures above 90°C. Upon cooling below 40°C, it transforms into a hydrogel phase with significantly increased viscosity. This behavior is similar to other thermo-gelling biopolymers such as agar gum and gellan gum, which are known to enhance soil strength and stability.[5]

In geotechnical applications, xanthan gum is used for soil stabilization, erosion control, and water retention. Its ability to increase viscosity and form gels under varying environmental conditions makes it particularly useful in dust control, slope protection, and drilling mud applications. By improving soil cohesion and reducing permeability, it helps mitigate soil erosion and enhance mechanical properties, contributing to more sustainable and durable geotechnical solutions.

3. GEOTECHNICAL ENHANCEMENT EFFECTS

With their unique properties, biopolymers are being studied by researchers for various applications, such as drilling muds, excavation muds in tunnel boring equipment, concrete to minimize washing, and many other fields [4]. Recent studies have primarily focused on enhancing mechanical properties, reducing permeability, and preventing erosion. Most of these studies have yielded positive results.

Under appropriate conditions, when biopolymers are added to soil, an interaction begins between the soil and the biopolymer. This interaction occurs in the following ways [6]:

- Aggregation of soil particles,
- Cross-linking of polymers with divalent cations,
- Formation of a soil-bio-polymer network through hydrogen bonding and cation bridging,
- Changes in the thickness of the double layer,
- Preferential adsorption of biopolymer molecules and cations on the soil surface, especially on clay.

Tablo.1 Biopolymers in geotechnics (revised) [7]

Biopolymer	Composition	Properties	Effects on Soil
Agar Gum	C ₁₄ H ₂₄ O ₉	- Thermoreversible gelation via heating and cooling. - Thickening agent. - Soluble in boiling water at 85°C and forms a gel when cooled to 32-43°C. - Minimal biodegradation but sensitive to additives.	- Improves strength. - Void filling. - Reduces erosion.
Beta-Glucan	C ₁₈ H ₃₂ O ₁₆	- Forms an irreversible elastic gel upon heating. - Used as a gelling agent.	- Enhances strength. - Useful in injection applications. - Used in concrete.

Casein	C81H125N22O39P	- Hydrophobic properties. - Used in food, paint, adhesives, plastics, and medical applications.	- Improves strength. - Enhances water resistance. - Reduces hydraulic conductivity.
Chitosan	C18H35N3O13	- Thickening agent. - Used in fertilizers.	- Coagulation effects. - Removes heavy metals from water (super coagulation).
Dextran	C18H32O16	- Flexible biopolymer. - Reduces permeability in wet environments. - Acts as an emulsifier.	- Used in drilling muds. - Reduces erosion.
Gellan Gum	C24H37O20	- Thermoreversible gelation via heating and cooling. - Thickening agent. - Exhibits thermal gelation behavior.	- Improves strength. - Void filling. - Reduces erosion.
Guar Gum	C10H14N5Na2O12P3	- High viscosity. - Hydrates in cold water. - Acts as a stabilizer and thickener. - Decomposes under extreme pH and temperature.	- Dust control. - Strength improvement. - Injection applications.
Starch	C27H48O20	- Thickening and stabilizing agent. - Acts as a disintegrant, diluent, and adhesive.	- Increases drilling fluid density. - Enhances strength. - Reduces erosion.
Xanthan Gum	C35H49O29	- High viscosity even at low concentrations. - Excellent stability under varying temperatures and pH levels. - Used as a stabilizer and thickener.	- Soil stabilization. - Erosion control. - Improves water retention.
XG	C36H58O29P2	- Increases viscosity. - Exhibits pseudoplastic properties.	- Thinner for drilling mud. - Strength enhancement.

Biopolymers are one of the most widely used biopolymers in geotechnical applications, such as soil stabilization, mineral exploration, erosion control, and permeability control. Biopolymer solutions obtained by dissolving at medium

temperatures tend to be quite viscous [8]. Due to their hydrogen bonding with water molecules, they are often used as viscosity thickeners. XG's most well-known feature is its stable pseudo-plasticity over a wide range of pH and temperature values [9]. In sandy soils, it is used to increase permeability and water retention while preventing erosion [10]. Research has shown that biopolymers have better effectiveness and workability in fine-grained, well-graded soils [11]. Table 2 shows the effects of biopolymer usage on soil properties.

Due to the environmentally friendly and easily obtainable nature of biopolymers, research into the potential uses of these materials in geotechnical applications has gained significant attention in recent years. Studies have shown that by blocking the voids within the soil, permeability decreases, and consequently, erosion is reduced [12].

In a 2020 study, Joga et al. used different biopolymer ratios to eliminate soil dispersion properties. By reducing the sodium content of the soil, improvements were observed in dispersion characteristics, erosion resistance, and strength. The authors noted that 1% biopolymer content was the optimal amount for such soils [12]. Ayeldeen et al. (2017) studied the change in mechanical properties of soils prone to collapse using biopolymers. The researchers indicated that the collapse potential of the soil is related to properties such as void ratio, density, soil compaction, and water content. Biopolymers were used due to their solubility in cold water, pH stability, and ionic salt compatibility. The authors concluded that with only 2% XG, the collapse potential of the soil decreased from 9% to 1%, and with increasing biopolymer concentration, the shear stress of the soil increased [13]. Çabalar et al. (2017) used a sand-biopolymer mixture with particle sizes ranging from 0.075-1mm to examine permeability, void ratio, and uniaxial compressive strength properties. In the mixtures with varying biopolymer

concentrations (0-0.5-1-1.5%), as the concentration increased, permeability and void ratio decreased, while uniaxial compressive strength values increased [14]. Im, J., Tran, and others (2017) suggested that biopolymers could be used to prevent earthquake-related soil damage [15]. Chang et al. (2015) stated that using biopolymers with fine clay particles increased strength and was more effective with finer particles [16]. Bouazza et al. (2009) studied changes in permeability properties in a silty-sandy soil-biopolymer mixture. Initially, the permeability value was 1×10^{-6} m/s, and after mixing, it decreased to 1×10^{-10} m/s. The authors attributed this change to the superior sealing property of the biopolymer [17]. In recent years, many researchers worldwide have been studying various factors related to biopolymer use, such as soil type, particle size, and biopolymer mixture ratios. Table 3 provides examples of changes in soil properties due to biopolymer usage. Huang et al. (2021) compiled the results of biopolymers and engineering applications. They stated that by using different amounts of biopolymers in soil applications, the compression strength of various soil mixtures increased [18]. Table 4 shows the compression strength values of mixture samples obtained with different biopolymer ratios for various soil types. The authors noted that most of the studies tested the samples in dry conditions, which they pointed out do not represent the natural conditions of the soil [18].

4. CONCLUSIONS

Biopolymers have emerged as a promising and environmentally friendly alternative to conventional soil stabilization techniques in geotechnical engineering. This chapter has explored the properties, applications, and effectiveness of various biopolymers, such as xanthan gum, guar gum, gellan gum, agar gum, chitosan, and others, in improving soil strength,

reducing permeability, and mitigating erosion. Unlike traditional chemical stabilizers, which often lead to environmental concerns such as CO₂ emissions and groundwater contamination, biopolymers offer a sustainable solution with minimal ecological impact.

The use of biopolymers in geotechnical applications is particularly beneficial due to their ability to interact with soil particles through hydrogen bonding, cation bridging, and the formation of stable biopolymer-soil matrices. These mechanisms contribute to improved load-bearing capacity, reduced settlement potential, and enhanced resistance to water-induced erosion. Additionally, their biodegradability ensures that they do not accumulate in the environment, making them suitable for long-term soil improvement without adverse ecological consequences.

Recent research findings highlight the effectiveness of biopolymers in various soil conditions. Studies have shown that biopolymers can significantly reduce soil permeability, making them ideal for applications such as slope stabilization, foundation improvement, erosion control, and even earthquake-induced soil liquefaction mitigation. Experimental results also indicate that even small concentrations of biopolymers, such as 1–2%, can have a profound impact on soil cohesion and structural integrity. Furthermore, biopolymers like chitosan have been successfully used in water purification and heavy metal removal, adding another dimension to their practical applications in geotechnical and environmental engineering.

Despite these advantages, challenges remain in the large-scale implementation of biopolymer-based soil stabilization. Factors such as production costs, durability under varying environmental conditions, and long-term stability of biopolymer-treated soils need further investigation. Additionally, the variability in soil-biopolymer interactions necessitates more

standardized testing methods and field studies to optimize their practical use. Future research should focus on improving biopolymer formulations, exploring cost-effective production techniques, and integrating biopolymers with other sustainable materials to enhance their performance in real-world geotechnical applications.

Biopolymers represent a transformative shift in geotechnical engineering, offering a sustainable and efficient alternative to traditional soil stabilization methods. As research and technology continue to advance, the integration of biopolymers into mainstream geotechnical practices has the potential to significantly reduce environmental impact while improving soil performance. Their continued development and application will play a crucial role in the advancement of eco-friendly construction and infrastructure projects worldwide.

REFERENCES

1. Losini, A. E., Grillet, A. C., Bellotto, M., Woloszyn, M., & Dotelli, G. (2021). Natural additives and biopolymers for raw earth construction stabilization—a review. *Construction and Building Materials*, 304, 124507.
2. Shariatmadari, N., Reza, M., Tasuji, A., Ghadir, P., & Javadi, A. A. (2020). Experimental study on the effect of chitosan biopolymer on sandy soil stabilization
3. Chang, I., Im, J., & Cho, G. C. (2016). Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering. *Sustainability*, 8(3), 251.
4. Cabalar, A. F., Awraheem, M. H., & Khalaf, M. M. (2018). Geotechnical properties of a low-plasticity clay with biopolymer. *Journal of materials in civil engineering*, 30(8), 04018170.
5. Chang, I., Im, J., & Cho, G. C. (2016). Geotechnical engineering behaviors of gellan gum biopolymer treated sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(10), 1658-1670.
6. Sujatha, E. R., Atchaya, S., Sivasaran, A., & Keerdthe, R. S. (2021). Enhancing the geotechnical properties of soil using xanthan gum—an eco-friendly alternative to traditional stabilizers. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(2), 1157-1167.
7. Ceylan, Ç. (2024) Zemin Özelliklerinin İyileştirilmesinde Xanthan Gum Kullanımı, Mühendislik Bilimleri Alanında Yeni Trendler, pp. 169-198.

8. García-Ochoa, F., Santos, V. E., Casas, J. A., & Gómez, E. (2000). Xanthan gum: production, recovery, and properties. *Biotechnology advances*, 18(7), 549-579
9. Chang, I., Im, J., Prasidhi, A. K., & Cho, G. C. (2015). Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening. *Construction and Building Materials*, 74, 65-72.
10. Jang, J. (2020). A review of the application of biopolymers on geotechnical engineering and the strengthening mechanisms between typical biopolymers and soils. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020.
11. Chang, I., Prasidhi, A. K., Im, J., & Cho, G. C. (2015). Soil strengthening using thermo-gelation biopolymers. *Construction and Building Materials*, 77, 430-438.
12. Joga, J. R., & Varaprasad, B. J. S. (2020). Effect of xanthan gum biopolymer on dispersive properties of soils. *World Journal of Engineering*.
13. Ayeldeen, M., Negm, A., El-Sawwaf, M., & Kitazume, M. (2017). Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil using two biopolymers. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*, 9(2), 329-339.
14. Cabalar, A. F., Wiszniewski, M., & Skutnik, Z. (2017). Effects of xanthan gum biopolymer on the permeability, odometer, unconfined compressive and triaxial shear behavior of a sand. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 54(5), 356-361.
15. Im, J., Tran, A. T., Chang, I., & Cho, G. C. (2017). Dynamic properties of gel-type biopolymer-treated sands evaluated

- by Resonant Column (RC) tests. *Geomech. Eng*, 12(5), 815-830.
16. Chang, I., Im, J., Prasidhi, A. K., & Cho, G. C. (2015). Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening. *Construction and Building Materials*, 74, 65-72.
 17. Bouazza, A., Gates, W. P., & Ranjith, P. G. (2009). Hydraulic conductivity of biopolymer-treated silty sand. *Géotechnique*, 59(1), 71-72.
 18. Huang, J., Kogbara, R. B., Hariharan, N., Masad, E. A., & Little, D. N. (2021). A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 305, 124685.

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ KONULARI

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