

“

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ALANINDA ULUSLARARASI ARAŞTIRMA VE DEĞERLENDİRMELER

Aralık 2024

EDİTÖR

DOÇ. DR. BERİVAN YILMAZER POLAT

”

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi

Birinci Basım / First Edition • © Aralık 2024

ISBN • 978-625-5955-31-9

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz. The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruvenyayinevi.com

e-mail: seruvenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ALANINDA ULUSLARARASI
ARAŞTIRMA VE
DEĞERLENDİRMELER

EDİTÖR

DOÇ. DR. BERİVAN YILMAZER POLAT

Önsöz

Mühendislik bilimi ülkelerin kalkınmasında ve sürdürülebilir bir dünyanın yaratılmasında oldukça önemli yer tutmaktadır. İnşaat mühendisliği bilimi ise sektörel ihtiyacın gösterdiği yöne doğru noktada inşaat mühendisliği alanında bilimsel, çevresel, ekonomik ve sosyal açıdan çözüm odaklı bir yaklaşımı ile sürekli araştırmaya devam eder.

Elinizdeki bu eser, inşaat mühendisliği alanında önemli araştırmaları, teorileri ve uygulamaları içeren detaylandırılmış bir kaynak olarak okuyuculara sunulmaktadır. Yazarlar, bu kitap ile, akademik dünyadaki güncel ve bilimsel gelişmeleri akademisyenlere, öğrencilere ve profesyonellere sunmayı hedeflemektedir. Bunun yanı sıra okuyucuların inşaat mühendisliği alanında farklı bakış açılarının geliştirmesi ve yeni nesil teknolojilerden haberdar olması bu kitabın temel amacıdır.

Kitabın hazırlanmasında emeği geçen tüm araştırmacılara katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Saygılarımla,

Editör

Doç. Dr. Berivan YILMAZER POLAT

İÇİNDEKİLER

Bölüm 1

TAZE BETONUN İŞLENEBİLİRLİĞİ VE REOLOJİSİ

Hüseyin Hakan İNCE..... 1

Bölüm 2

KENDİNİ ONARAN BETON

Aylin AKYILDIZ..... 11

Bölüm 3

YERALTI BARAJLARI İLE KURAKLIKLA MÜCADELE: TEKNİK VE ÇEVRESEL AÇIDAN BİR DEĞERLENDİRME

Çağrı AKGÜN..... 23

Salim Serkan NAS..... 23

Bölüm 4

VAKS ESASLI KATKILARIN BITÜMÜN FİZİKSEL VE REOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Neslihan ŞAHAN..... 39

Bölüm 5

YIĞMA YAPILARDA DUVAR BOŞLUK ORANLARI İLE BİNANIN DEPREM PERFORMANSI ARASINDA Kİ İLİŞKİLERİN MODELLENMESİ

Sariye İrem BAYIR..... 55

Ercan ÖZGAN..... 55

Bölüm 1

TAZE BETONUN İŞLENEBİLİRLİĞİ VE REOLOJİSİ

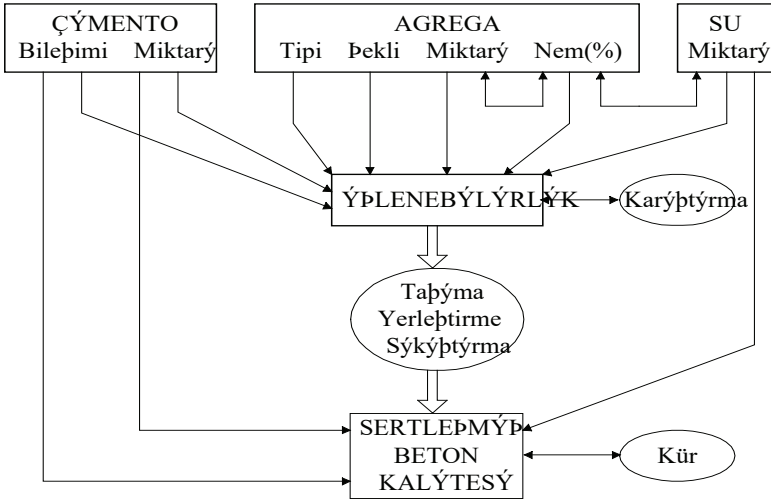
Hüseyin Hakan İNCE¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Burdur/Türkiye, Orcid: 0000-0003-1503-1742, hakanince@mehmetakif.edu.tr

Giriş

Beton, uzun bir kullanım geçmişine sahip, günümüzde en yaygın kullanılan inşaat malzemelerinden biridir. Basınç dayanımı yüksek, uzun ömürlü bir malzeme olan beton, taze halde plastik bir kıvama sahip olduğundan sınırsız şekillendirme olanaklarıyla istenilen herhangi bir şeklin kolaylıkla verilmesine olanak tanımaktadır. Betonun oluşturan bileşenler, dünyanın birçok yerinde kolayca bulunabilen ve doğal yollarla oluşan çok çeşitli malzemelerden elde edilir. Beton, çimento, ince ve iri agregalar ile suyun ve gerektiğinde katkı maddelerinin uygun oranlarda bir araya getirilmesiyle üretilen katı ve sert bir kompozit malzemedir. Beton karışımı, çimento hamuru ve agregadan oluşur. Çimento ve sudan oluşan hamur, ince ve iri agregaların yüzeyini kaplar. Hidratasyon adı verilen kimyasal reaksiyon sayesinde hamur sertleşir ve beton olarak bilinen taş benzeri kütleyi oluşturmak için dayanım kazanır (Kultermann & Spence, 2022).

İyi ve kaliteli bir betondan beklenen nitelikler, beton taze haldeyken işlenebilirlik, sertleşmiş haldeyken ise dayanım ve dayanıklılıktır (durabilite, kalıcılık). Şekil 1’de beton kalitesini etkileyen faktörler gösterilmiştir.



Şekil 1. Beton kalitesini etkileyen faktörler (İnce, 2005)

İşlenebilirliğin, beton bileşenlerinin özelliklerine ve miktarlarına bağlı olduğu ve bu durumun betonun kalitesini doğrudan etkilediği Şekil 1’de görülmektedir. Taze betonun en önemli özelliklerinden biri olan işlenebilirlik, betonun karıştırılması, taşınması, yerleştirilmesi ve sıkıştırılması sırasında istenilen performansı gösterebilme kapasitesini ifade eder.

Taze Betonun İşlenebilirliği ve Kıvamı

Taze betonun minimum enerji ile kolaylıkla karıştırılabilmesi, ayrışmadan taşınabilmesi, kalıbına yerleştirilebilmesi, sıkıştırılabilmesi ve yüzeyinin kolaylıkla perdahlanabilmesi betonun ne kadar işlenebilir olduğunu gösterir. Bu özelliklerin tümüne birden işlenebilirlik denir (Baradan vd., 2022; Erdoğan, 2016). Amerikan Beton Entstitüsü (ACI) işlenebilirliği, taze betonun karıştırılma, yerleştirilme, sıkıştırılma ve homojen bir hale getirilme kolaylığını belirleyen bir özellik olarak tanımlamıştır (ACI CT-18, 2018). Taze betonun en önemli özelliği olan işlenebilirlik yetersiz ise taze beton sertleştiğinde yeterli dayanımı ve dayanıklılığı gösteremez. İşlenebilirlik, betonun yerleştirilme ve sıkıştırılabilme kolaylığını tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Betonun pompalanması veya büyük miktarda donatı bulunan kalıplara yerleştirilmesi gerekiyorsa daha iyi işlenebilirlik gerekebilir. Betonun perdahlı bir yüzeye ihtiyacı varsa, işlenebilirlik önemlidir.

İşlenebilirlik, betonun yapısından kaynaklanan bazı özellikler ile ilişkilidir. Bu özellikler, betonun hem taze hem de sertleşme sürecindeki davranışını anlamak için kritik öneme sahiptir. Bunlar (Erdoğan, 2016):

1. Kayma dayanımı: Taze betonun kütlede akmayı başlatacak kuvvete karşı betonun gösterdiği dirençtir. Bu özellik, betonun ilk hareket ettirilmesi için gereken enerjiyi belirler ve karışımın kıvamı ile doğrudan ilişkilidir.

2. Akıcılık: Akma başladıktan sonraki hareketlilik. Betonun kolayca yerleştirilebilmesi ve kalıba doldurulabilmesi açısından önemlidir. Akıcılık, genellikle betonun reolojik davranışının önemli bir bileşeni olarak ele alınır.

3. Kohezyon: Betonu oluşturan malzemelerin birbiriyle ne ölçüde bağlandığını ve segregasyona karşı gösterdiği direnci ifade eder.

4. Yapışkanlık: Betonun yüzey düzeltme ve yerleştirme işlemlerini etkileyen, bileşenler arasındaki bağın kuvvetini ifade eden bir özelliktir.

Betonun işlenebilir olması için kohezyonunun yüksek (kohezif) olması yani segregasyona uğramaması gerekmektedir. Segregasyon (ayrışma), beton karışımındaki bileşenlerin karıştırma, taşıma ve yerleştirme işlemleri sırasında birbirinden ayrılması olarak tanımlanmaktadır. Segregasyonun temel nedeni beton karışımına giren taneli malzemelerin boyutlarındaki (ve bazen karışım bileşenlerinin özgül ağırlığındaki) farklılıklardır. Segregasyonla bağlantılı bir diğer olumsuz durum da terlemedir (kusma). Terleme aslında bir segregasyon çeşididir. Beton karışımındaki agregaların çökmesi ile doğrudan ilişkilidir. Bu süreçte iri agregalar karışımın alt kısmına çökerken, bu; karışımın üst kısmında suyun yüzeye çıkmasına

neden olur. Terleme sonucunda, beton yüzeyi aşırı derecede ıslak duruma gelir. Bu durum, betonun yüzeyinde suyun buharlaşmasını artırarak yüzey kuruluğuna ve yüzeyde plastik rötre çatlaklarının oluşmasına zemin hazırlayabilir (Neville & Brooks, 2010). Özellikle, karışımdaki su miktarının kontrolü ve uygun agrega boyut dağılımının sağlanması, terleme etkisinin azaltılmasında önemli bir rol oynar. Segregasyon ise, uygun granulometride karışım hazırlanarak ve beton dökümüne, yerleştirilmesine, sıkıştırılmasına dikkat edilerek kontrol edilebilir.

Betonun kohezyonu ile paralellik gösteren bir diğer özellik ise betonun stabilitesidir (kararlılık). Taze betonun stabilitesi, beton karışımının tüm işlemler boyunca homojenliğini koruyabilme yeteneği olarak tanımlanır. Bu özellik, betonun karıştırma, taşıma, yerleştirme ve sıkıştırma aşamalarında segregasyona ve terlemeye direnme kapasitesini ifade eder ve betonun genel işlenebilirliğinin bir parçası olarak değerlendirilir.

Taze betondan beklenen işlenebilirlik düzeyi, betonun kullanılacağı yapının tipi, betonun taşınma ve yerleştirme yöntemleri ile beton kütleinin boyutları gibi faktörlerle doğrudan ilişkilidir. Örneğin, düşük su içeriğine sahip bir taze beton, büyük hacimli bir kütle betonu uygulamasında yeterli işlenebilirliği sağlayabilir. Ancak aynı beton, dar bir kalıp içinde kullanıldığında yeterli işlenebilirliği sergileyemez. Vibratör kullanılarak sıkıştırılan beton, yeterli işlenebilirliği gösterebilirken, bu beton elle sıkıştırma uygulanan bir yapıda aynı işlenebilirlik düzeyini sağlayamaz. Ayrıca, havaalanı pistleri veya beton yol kaplamaları gibi geniş ve açık alanlar için uygun işlenebilirliğe sahip bir beton karışımı, sık donatılı ve dar bir yapı kalıbı içinde kullanıldığında istenen işlenebilirliği gösteremez (Erdoğan, 2016). Bu durum, betonun işlenebilirlik özelliklerinin hem uygulama yöntemine hem de yapının tasarımına uygun şekilde optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, işlenebilirlik gereksinimlerinin belirlenmesi ve beton karışımının bu gereksinimlere uygun şekilde tasarlanması, betonun nihai performansı üzerinde kritik bir rol oynar.

Taze betonun bir diğer önemli özelliği de kıvamdır. Kıvam ACI tarafından taze betonun ya da harcın relatif hareket etme kabiliyeti veya akma yeteneği olarak tanımlanmıştır (ACI Committee 116, 2000).

Taze betonlar, kıvamlarına bağlı olarak genel olarak üç ana grupta sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmada betonun su içeriği önemli derecede rol oynar. Bunlar:

Kuru kıvam: Kuru kıvamdaki beton, düşük su içeriğine sahip bir karışımdır. Bu tür betonlar, genellikle yol kaplamaları, parke taşları ve prefabrik elemanların üretiminde kullanılır. Nemli bir toprak görünümüne sahip olan bu betonların akışkanlıkları oldukça düşüktür ve yerleştirme sırasında özel sıkıştırma yöntemleri gerektirir (Neville, 2011).

Plastik kıvam: Plastik kıvamlı beton, orta derecede su içeriğine sahip, kendi ağırlığı altında kolaylıkla şekil alabilen bir karışımdır. Genellikle konvansiyonel yapı elemanlarında kullanılır (Mehta & Monteiro, 2014).

Akıcı kıvam: Yüksek su içeriği nedeniyle oldukça akışkan olan bu betonlar, yerleştirme sırasında minimum sıkıştırma gerektirir ve genellikle dar, sık donatılı yapı elemanlarında kullanılır. Akıcı beton, uygulama kolaylığı sunarken, su/çimento oranının artması nedeniyle segregasyon ve dayanım kaybı riski taşır. Bu tür karışımlarda genellikle aynı kıvam için akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddeleri kullanılarak su miktarı azaltılır ve bu olumsuz etkiler minimize edilmeye çalışılır.

Betonun işlenebilme özelliği ile kıvamı birbirine karıştırılmamalıdır, bu iki kavram farklı özellikleri ifade etmektedir. Kıvam, taze betonun akıcılığını veya kendi ağırlığı altında hareket etme kabiliyeti ile ilgiliyken; işlenebilirlik, betonun karıştırma, taşıma, yerleştirme ve sıkıştırma işlemleri sırasında sergilediği performansı kapsamaktadır (Neville, 2011). Kıvam, genellikle taze betonun akıcılık seviyesini değerlendirmek için kullanılır. Betonun kıvamı, işlenebilirliğin yalnızca bir bileşenidir ve tek başına işlenebilirliği tam olarak ifade edemez. İşlenebilirlik, beton agregasının granülometrisi, boyutu, biçimi ve miktarı ile çimento miktarı gibi çok sayıda faktöre bağlıdır (Mindess vd., 2003). Bu nedenle, işlenebilirlik özelliği, beton karışımının tasarımı ve uygulanması açısından daha kapsamlı bir değerlendirme gerektirir. Betonun kıvamı ve işlenebilirliği birlikte ele alındığında, uygulama koşullarına uygun bir karışımın oluşturulması mümkün olur.

Kıvamı yüksek bir taze beton, düşük kıvamdaki bir betona göre daha kolay karıştırılabilir, pompalanabilir ve yerleştirilebilir. Yüksek kıvam, betonun daha akıcı hale gelmesini sağlayarak işleme kolaylığı sunabilir. Ancak, kıvamın yüksek olması betonun işlenebilirliğinin mutlaka yeterli olduğu anlamına gelmez. Çünkü aşırı sulu bir beton karışımı, taşıma, yerleştirme ve sıkıştırma sırasında segregasyona eğilimli olabilmektedir. Beton kıvamı, esasen taze betonun kütledeki kayma kuvvetleri tarafından etkilenir ve betonun hareket etme kabiliyeti ile ilişkilidir. Ancak kıvam, taze betonun akıcılığını ve kohezyonunu tam anlamıyla kapsamaz. Betonun kıvamı, işlenebilirlik kavramını tam olarak ifade edemese de betonun işlenebilirliğine dair önemli bilgiler sunmaktadır. Bu nedenle, deneysel olarak kolayca ölçülebilen kıvam, işlenebilirlik ile doğrudan ilişkili olmasa da genellikle işlenebilirliğin değerlendirilmesinde bir gösterge olarak kullanılmaktadır (Erdoğan, 2016).

Taze Betonun Reolojisi

Reoloji, sıvı ve katı malzemelerin gerilme-deformasyon ilişkilerini zamana bağlı olarak inceleyen bir bilim dalıdır. Bu bilim dalı, özellikle

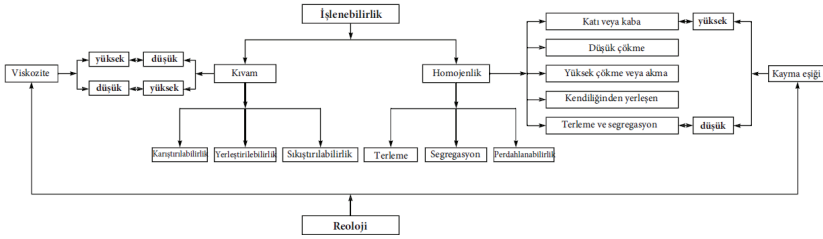
taze beton gibi karmaşık malzemelerin akışkanlık özelliklerini anlamada kritik bir rol oynar. Reoloji, kayma gerilmeleri ile açılmal deformasyon hızlarının ilişkisini tanımlayan matematiksel modellerle çalışır ve bu ilişkide zaman değişkenini de dikkate alır (Banfill, 2003).

İşlenebilirlik gibi taze betonun reolojisi de herhangi bir beton karışımının uygunluğunu belirlemek için gerekli olan stabilite, akıcılık (hareketlilik) ve sıkıştırılabilirlik parametrelerini içerir (Gambhir, 2013; Nagaraj & S, 2021) (Şekil 2).



Şekil 2. Taze betonun reolojisini tanımlayan parametreler

İşlenebilirlik, yeni karıştırılmış beton veya harcın karıştırılma, yerleştirilme, sıkıştırılma ve yüzey işlemlerinin kolaylığını ve homojenliğini sağlayan bir özellik olarak tanımlanmıştır. Bu tanımda bahsi geçen kolaylık, stabilite, akıcılık (hareketlilik) ve sıkıştırılabilirlik performans parametrelerini içeren taze beton reolojisi ile ilgilidir. Bu parametreler reolojide, mekanik gerilmelerin iletiminde rol oynayan kuvvetler, stabilite ve kohezif, viskoz kuvvetler ile sürtünme kuvvetleri tarafından akmaya karşı direnç açısından yeniden tanımlanır (Gambhir, 2013). Taze betonun işlenebilirliğini ve reolojisini etkileyen parametrelerin karşılıkları Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 3. Taze betonun işlenebilirliğini ve reolojisini etkileyen parametrelerin karşılıkları (Gambhir, 2013)

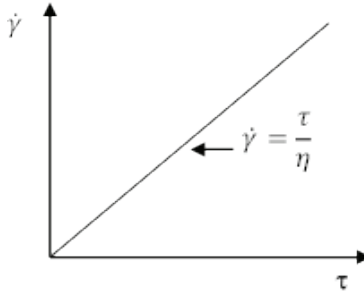
Stabilite, agrega tanelerinin matris tarafından homojen bir dağılımda tutulduğu ve taşıma, yerleştirme ve sıkıştırma sırasında alınan rastgele numunelerin aynı tane boyutu dağılımını gösterdiği bir durum olarak

tanımlanır. Betonun stabilitesi, segregasyon ve terleme karakteristikleri ile ölçülür. Sıkıştırılabilirlik, taze betonun sıkıştırılma kolaylığını belirtir. Sıkıştırma, hapsolan havanın dışarı atılması ve agreg tanelerinin ayrışmaya neden olmadan yoğun bir kütle içinde yeniden yerleştirilmesinden ibarettir. Taze betonun hareketliliği (akıcılığı), mekanik gerilmeler altında akabilme kabiliyetidir. Akış, kohezif, viskoz kuvvetler ve sürtünme kuvvetleri tarafından kısıtlanır. Kohezif kuvvet, matris ve agreg taneleri arasındaki aderansa bağlı olarak gelişir. Bu kuvvet taze betona segregasyona karşı direnç gösteren çekme dayanımı sağlar. Matrisin viskozitesi, agreg tanelerinin matris içinde hareket etmesini ve kendilerini yeniden düzenlemesini kolaylaştırır. Düşük gerilmelerde akma meydana gelmez ve karışım son derece yüksek viskoziteli bir katı gibi davranır. Gerilmeler arttıkça, taneler arasındaki bağ kuvveti akışı önlemek için yetersiz hale gelir ve viskozite giderek azalır ve beton davranışı bir sıvıya dönüşür. İç sürtünme, bir karışım yer değiştirdiğinde ve agreg taneleri ötelenip döndüğünde meydana gelir. Deformasyona karşı direnç agreganın şekline ve dokusuna, karışımın zenginliğine, su/çimento oranına ve kullanılan çimento tipine bağlıdır. Bu nedenle, iç sürtünme açısı bir beton karışımının hareketliliğinde önemli bir rol oynar. (Gambhir, 2013).

Betonların işlenebilirliğini değerlendirmede reolojik malzeme sabitlerinin kullanımı, günümüzde daha doğru bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Reolojide taze beton genellikle viskoz bir sıvı olarak modellenir. Bu modelleme, özellikle akıcı kıvamdaki betonlar için geçerlidir, ancak çok kuru kıvamdaki betonlar için sınırlı anlam taşır. Viskoz sıvılar, uygulanan kayma gerilmeleri altında açısız deformasyonlar gösterir. Reolojideki en basit model, Newtonyen sıvı modelidir. Bu modelde göre, kayma gerilmesi (τ), kayma hızı (açısız şekil değiştirme hızı) ($\dot{\gamma}$) ile doğru orantılıdır ve orantı katsayısı viskozite katsayısı (η) olarak adlandırılır.

Şekil 4'deki Newtonyen sıvı modeli matematiksel olarak şöyle ifade edilir:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

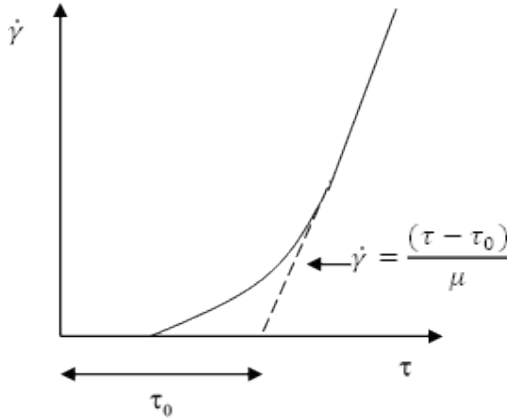


Şekil 4. Newtonyen sıvı modeli

Beton gibi yoğun katı taneler içeren süspansiyonların akış davranışı, Newtonyen sıvı modeline uymaz. Bunun temel nedeni, bu tür süspansiyonların akışa başlaması için aşılması gereken bir eşik kayma gerilmesine (kayma eşiği) (τ_0) sahip olmasıdır. Bu kayma direnci, süspansiyon içindeki katı parçacıklar arasındaki mekanik ve kimyasal kuvvetlerden kaynaklanır. Bu tip malzemelerin akış davranışı Bingham modeline uyar (Tattersall, 1991). Bingham modelinde taze betonun reolojik davranışları eşik kayma gerilmesi (τ_0) ve plastik viskozite (μ) denen iki temel parametre ile açıklanır. Bu model, betonun belirli bir gerilme değerini aştıktan sonra akmaya başladığını, bu noktadan sonra doğrusal bir gerilme-kayma hızı ilişkisi sergilediğini varsaymaktadır (Şekil 5) ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (2)$$

Burada kayma hızı ($\dot{\gamma}$) malzemenin akış sırasında birim zamanda yaptığı şekil değiştirme oranını ifade eder. Bu, iki farklı tabakanın kayma hareketi sırasında birbirine göre yaptığı açılma hızının bir ölçüsüdür. Eşik kayma gerilmesi (τ_0) ise, betonun akmaya başlaması için gereken minimum gerilme miktarını ifade eder. Plastik viskozite (μ) betonun akmaya başladıktan sonraki direncini ifade eder ve akıcılığın tersidir. Plastik viskozite değeri düşük olan bir beton daha akıcı bir karakter sergiler ve bu durum betonun yerleştirilme kolaylığını artırır (Banfill, 1991).



Şekil 5. Taze betonlar için kabul edilen Bingham modeli

Bingham modeli, betonun reolojik davranışını açıklamak için sıklıkla kullanılır çünkü taze beton hem viskoz hem de plastik özellikler sergileyen bir malzemedir. Özellikle betonun tiksotropik özellikleri, yani karıştırıldıktan sonra akışkanlığının artması ve durgun haldeyken tekrar katılaşma eğiliminde olması, bu modeli daha uygun hale getirir. Ancak, yüksek performanslı beton ve kendiliğinden yerleşen beton gibi gelişmiş beton türlerinde,

reolojik davranışın daha sofistike modellerle açıklanması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu durumda, modifiye edilmiş Bingham modeli, Herschel-Bulkley modeli veya diğer gelişmiş reolojik modeller kullanılarak daha ayrıntılı analizler yapılır. Herschel-Bulkley modeli, Bingham modelinin bir genellemesi olarak, akma gerilmesinin yanı sıra, akışkanın kayma incelenmesi veya kalınlaşması davranışını da dikkate almaktadır. (Ferraris vd., 2001; Nagaraj & S, 2021). Bu modeller, beton karışımındaki katkı maddelerinin etkisini ve betonun tiksotropik özelliklerini daha iyi yansıtabilir.

Sonuç

İşlenebilirlik, taze betondan beklenen en önemli özelliktir. Bu olgu, betonun karıştırma, taşıma, yerleştirme ve sıkıştırma süreçlerinde beklenen performansı sergileme kapasitesini ifade etmektedir. İşlenebilirlik, kıvam, kohezyon, akıcılık, yerleştirilebilirlik, sıkıştırılabilirlik gibi bir dizi alt parametrenin karmaşık bir etkileşimi sonucunda ortaya çıkar. İşlenebilirliğin kıvam ile karıştırılmaması gerekir. Kıvam taze betonun akıcılık seviyesini değerlendirmek için kullanılan önemli bir parametre olsa da, işlenebilirliğin yalnızca bir bileşenidir ve tek başına işlenebilirliği tam olarak tanımlayamaz. Betonun işlenebilirliğini tüm yönleriyle değerlendirebilecek tek bir test yöntemi bulunmamakta ve bu durum, işlenebilirlik kavramının karmaşıklığını ortaya koymaktadır.

Taze betonun işlenebilirliğini tanımlayabilmek için reoloji biliminin ve taze betonun reolojik sabitleri olan eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozitenin kullanılması daha doğru bir yaklaşımdır. Reolojik sabitler, Bingham modeli başta olmak üzere çeşitli matematiksel modellerle açıklanabilmektedir. Betonun reolojik özelliklerini tanımlamak, özellikle taze betonun karıştırma, taşıma ve yerleştirme süreçlerindeki performansını anlamada önemli bilgiler sunmaktadır.

Betonun işlenebilirliği ve reolojisi, yalnızca mekanik özelliklerini değil, aynı zamanda kalıcılığını ve çevresel performansını da doğrudan etkiler. Tasarım aşamasında doğru malzeme seçimi ve katkı maddelerinin optimize edilmesi işlenebilirlik açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu sebeple beton karışımı, inşaat sırasında ihtiyaç duyulan işlenebilirliğe ve sertleşmiş betondan beklenen performans özelliklerine sahip olacak şekilde hazırlanmalıdır.

Konuyla ilgili gelecekte taze betonun reolojik özelliklerini daha iyi anlamak ve ölçmek için yeni test yöntemleri geliştirilmesi için araştırmalar yapılması önerilebilir. Ayrıca, dijital simülasyon teknikleri ve yapay zeka destekli modellemeler, işlenebilirlik ve reoloji parametrelerinin daha doğru bir şekilde tahmin edilmesini sağlayabilir. Bu çalışmalar, betonun hem üretim süreçlerinde hem de nihai performansında daha sürdürülebilir ve ekonomik çözümler sunacaktır.

KAYNAKLAR

- ACI Committee 116. (2000). *Cement and Concrete Terminology* (ACI 116R-00; s. 73). American Concrete Institute.
- ACI CT-18. (2018). *ACI Concrete Terminology* (s. 80). American Concrete Institute.
- Banfill, P. F. G. (Ed.). (1991). *Rheology of Fresh Cement and Concrete*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482288889>
- Banfill, P. F. G. (2003). *The Rheology of Fresh Cement and Concrete—A Review*. 50-63.
- Baradan, B., Yazıcı, H., & Aydın, S. (2022). *Beton* (3. Baskı). Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.
- Erdoğan, T. Y. (2016). *Beton* (6. Baskı). ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.
- Ferraris, C. F., Larrard, F. D., & Martys, N. (2001). Fresh Concrete Rheology—Recent Developments. *Materials Science of Concrete VI*, 6, 215-241.
- Gambhir, M. L. (2013). *Concrete Technology: Theory and Practice* (Fifth Edition). McGraw Hill Education (India) Private Limited.
- İnce, H. H. (2005). *Mineral, Kimyasal Katkılı ve Polipropilen Fiber Takviyeli Taze Betonun Basınç Altındaki Davranışının Belirlenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Süleyman Demirel Üniversitesi.
- Kultermann, E., & Spence, W. P. (2022). *Construction Materials, Methods, and Techniques: Building for a Sustainable Future* (Fifth Edition). Cengage.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (Fourth Edition). Mc Graw Hill Education.
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete* (Second Edition). Pearson Education, Inc.
- Nagaraj, A., & S, G. (2021). Rheology of Fresh Concrete—A Review. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 9(3), 118-131. <https://doi.org/10.22075/jrce.2021.20557.1425>
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (Fifth Edition). Pearson Education Limited.
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2010). *Concrete Technology* (Second Edition). Pearson Education Limited.
- Tattersall, G. H. (1991). *Workability and Quality Control of Concrete*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482267006>

Bölüm 2

KENDİNİ ONARAN BETON

Aylin AKYILDIZ¹

¹ Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, aakyildiz@nku.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2739-0689

Giriş

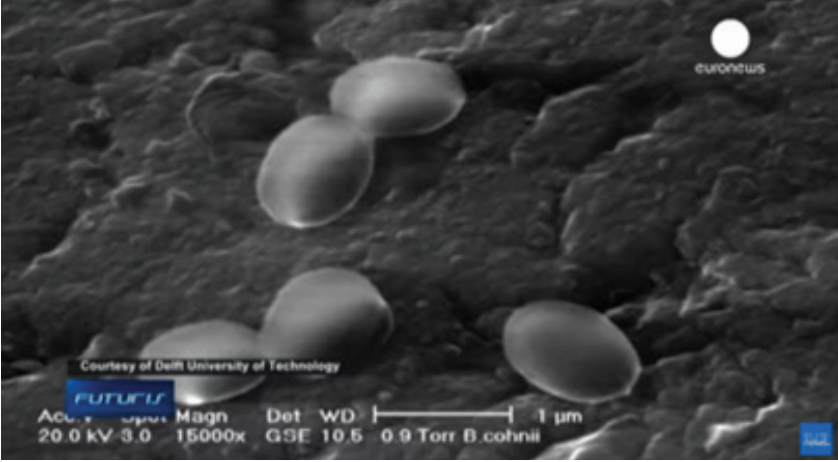
Yirmi birinci yüzyılda malzemelerin iyileştirilmesi, inşaat mühendisliğinin çeşitli alanlarında büyük ölçüde gelişmeler oluşturmaktadır. Malzemelerin kalitesini iyileştirerek betonun birçok sorunu çözülmeye çalışılmaktadır. Malzemelerin geliştirilmesiyle kendini temizleyen ve kendi kendini onaran beton gibi daha verimli ve daha kararlı ürünlerin geliştirilmesine yardımcı olmaktadır. Dünyada en yaygın olarak kullanılan malzemelerden biri betondur. Betonun yapısal hasarlara bağımsız bir şekilde onarabilmesini sağlamak için kendi kendini onaran beton uygulamada umut vericidir.

Beton yapısı gereği çatlama eğiliminde olan bir malzemedir. Beton yapılarında oluşan çatlakların onarımı önemli bir konudur. Günümüzde bu işlem pahalı ve zaman alıcı bir işlemdir. Bu yüzden araştırmacılar bakteri ve nano malzemeler kullanarak betonarme yapıların kendi kendini onarımı üzerinde araştırmalar yapmaktadırlar [1]. Kendi kendini onarma kapasitelerini artırmak ve bu malzemelerin hangi şartlarda nasıl oluştuğunu araştırmaktadırlar. Şekil 1’de kendi kendini onaran beton numunesi görülmektedir.



Şekil 1. Kendi kendini onaran beton [2]

İlk olarak Delft Teknoloji Üniversitesinden Dr. Henk Jonkers, “bir insan bacağını kırduğında, vücut bu bacağı tekrar iyileştirebiliyor ve bu Osteoblast hücrelerinin yeni kemiğin yapısını oluşturarak mineralleri üretmesi ve parçaları tekrar bir bütün haline getirmesiyle oluyor” düşüncesiyle yola çıkarak çalışmalarına başlıyor [3]. Daha sonra Belçika, İngiltere ve Türkiye’de de bu konu hakkında çalışmalar yapıyor. Şekil 2’de canlılarda kendiliğinden iyileşme evreler görülmektedir.



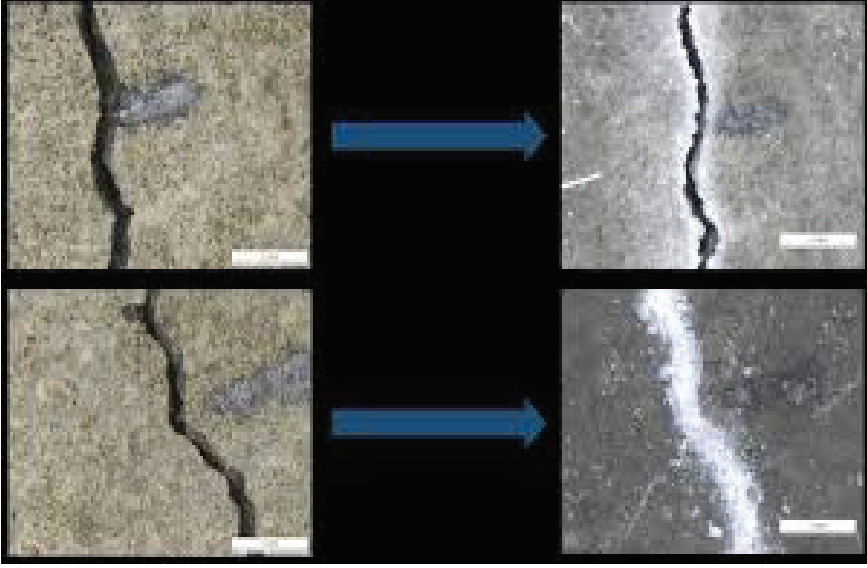
Şekil 2. Beton içerisindeki bakteriler [4].

İnsan vücudundan ilham alan Hollanda'daki Delft Teknoloji Üniversitesi'nde çalışan Jonkers, öncelikle betonun içerisine bir bakteri mixi katıyor ve 'İyileştirici ajan' ya da orijinal haliyle "healing agent" denilen bakteri, kireçtaşı tarzında bir madde üretiyor ve bu betonun bir nevi kendini yenilemesi anlamına geliyor. Jonkers, kendini iyileştiren betonu, doğası gereği rüzgâr ve su hasarına eğilimli bir cankurtaran istasyonunda yol testine tabi tutuyor. Yapının 2011'den bu yana su geçirmez kaldığını söylüyor [5]. Bu buluş ayrıca bir Avrupa Mucit Ödülüne aday gösterilmiştir.

Betonda oluşan çatlardan plastik oturma ve rötre çatlakları taze betonun perdahlanmasından 2 ile 6 saat içerisinde oluşmaktadır. Uzun vadede oluşan çatlaklar beton içerisindeki suyun buharlaşması nedeniyle oluşan çatlaklardır. Her iki durumdada oluşan bu çatlaklar betonun performansını düşürmektedir. Bu çatlakların engellenmesi için betonun içerisine katılan bakteriler katılmaktadır. Elde edilen betona kendi kendini onaran beton denilmektedir.

Bu tür betonlar tamir ve bakım masraflarını düşürülmesi için geliştirilmiştir. Bacillus türü bakteriler suda aktif besinmaddeleri ile bakteri sporları üretmektedir. Bu özelliği sayesinde kendi kendini onaran beton üretilmektedir.

Araştırmalarda yapılan deney sonuçlarında 0.55 mm çatlakların onarımının başarılı olduğu geliştirmelerin devam ettikleri söylenmiştir. Teoride yağmur sularının kalsit çökeltisi oluşturan bakterili beton çatlaklarından geçerek bakterileri çalıştırıp kalsit ile çatlakları doldurmaktır. Şekil 3'de yapılmış bir deneyde bakterilerin çatlağı görsel olarak nasıl kapattığı görülmektedir [6].



Şekil 3. Bakterilerin kalsit ile çatlağı onarması [7]

Bu özel beton, doğa ile yapı arasında bağlantı kurmanın bir örneğidir. Beton, normal beton gibi karıştırılır ancak ekstra madde olarak iyileştirici maddeler (bakteriler) katılır. Bu iyileştirici madde karıştırma ve yerleştirme sırasında bozulmadan kalır ancak beton çatlarsa su ile temas ettiğinde aktif hale gelir. İyileştirici maddeler betonda 200 yıl kadar uyku halinde kalabilmektedirler [8].

Betonun yüzeyinde oluşan çatlakları doldurmak için kireçtaşı (CaCO_3) kristalleri üretir. Beton yapıda çatlaklar oluşmaya başladığında çatlardan betona su girer. Su ve oksijen ile temas eden beton içerisindeki inaktif bakteriler aktif hale gelir. Aktif hale gelen inaktif bakteriler kalsiyum bazlı besin maddelerinde (kalsiyum laktat) çoğalırlar ve filizlenirler, laktatla beslenirken kalsiyumu karbonat iyonlarıyla birleştirerek çatlakları kapatan kireçtaşı veya kalsit oluştururlar.

Oksijenin tüketilmesi sadece kalsiyum laktatın kireçtaşına bakteri dönüşümüne yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda korozyon için bir ortam oluşturan betondaki oksijen içeriğinin azaltılmasına da katkıda bulunur. Bakteriyellerin aktifleşmesi ve çalışması nedeniyle oksijen tüketilir ve böylece çelik donatının dayanıklılığı artmaktadır [8].

Kendini Onaran Betonda Kullanılan Bakteriler

Süspansiyon halinde bakteri beton ile karışmaya eklenir. Beton doğası gereği son derece alkali (bazik) olduğundan, eklenen bakterilerin bazı özel

koşullara (normlara) uyması gerekir. Karışıma eklenecek bakteriler betonun zorlu çevre koşullarına dayanabilmelidir.

Bakteriler doğal olarak doğada çeşitli şekilde bulunabilirler. Sadece yüzeylerde değil aynı zamanda yüzeyin altında da bulunabilirler. Betonda kullanılabilecek çeşitli bakteriler için çalışmalar yapılmıştır. Yapılmış olan çalışmalarda anaerobik bakterileri wanella türü yakın akrabaları beton karışıma eklenirse basınç dayanımlarında %25-30 artış olduğu belirlenmiştir.

Literatürde yapılmış olan çalışmalarda çıkan sonuçlara göre betonda kullanılabilecek aerobik bakteri türleri aşağıdaki gibidir.

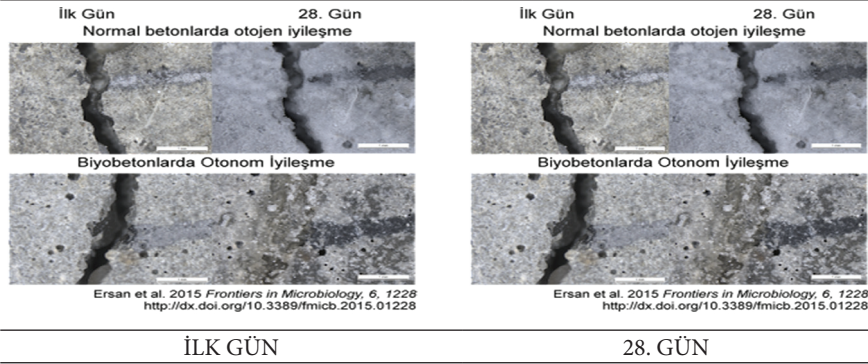
- Bacillus pasteurii
- Bacillus sphaericus
- Escherichia coli
- Bacillus subtilis
- Bacillus cohnii
- Bacillus pseudofirmus
- Bacillus halodurans
- Bacillus massiliensis

Literatürde yapılmış olan 7 günlük dayanım deneyi sonucunda S. soli ile L. dusiformis daha iyi basınç dayanımını göstermişken B. massiliensis ve A. crystalloites hiç bir dayanım gelişmesi gözlenmemiştir. A. crystallopietes bakterisi ise maksimum dayanımını 28 günde kazanmıştır [8].

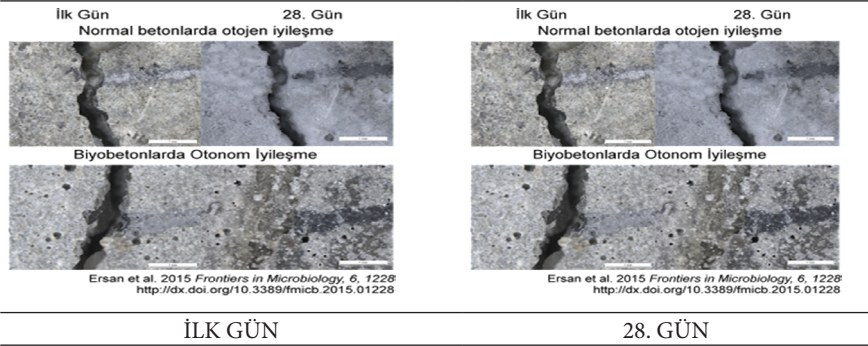
Kendini Onaran Beton Mekanizması

Hidratasyon için yetersiz kalan su vb. birçok nedenden dolayı beton yüzeyinde çatlaklar oluşur. Kendiliğinden iyileşen bakteriyel betonlarda ise, betonun genetik olarak çatlak iyileştirme kapasitesi, son zamanlarda yapılan çalışmalardandır. En temelde, tipik olarak 0,05 ila 0,1 µm genişliğinde mikro çatlakların, özellikle tekrarlayan kuru / ıslak döngülerde tamamen kapandığı gözlenmiştir. Kendini iyileştirebilen betonları diğer betonlardan ayıran yegâne özellik ise içerisinde bulundurduğu iyileşmeyi tetikleyen, düzenleyen veya arttıran maddelerdir. Bu maddeler sayesinde “otonom iyileşme” olarak adlandırılan tamamen tutarlı ve öngörülebilir bir iyileşme gerçekleşir. Bu otojen iyileşme, esas olarak, beton matrisinde bulunan ve kısmen reaksiyona giren çimento parçacıklarının ikincil hidratasyonundan kaynaklanmaktadır [9] (Şekil 4).

NORMAL BETONLARDA OTOJEN İYİLEŞME



BAKTERİ KATKILI BETONLARDA OTOJEN İYİLEŞME



Şekil 4. Normal Beton ve Bakteri katkılı beton Arasındaki Fark [10]

Kılcal kuvvetlerden dolayı su, değişen ıslak ve kuru döngüler altında tekrar tekrar mikro çatlaklara doğru çekilir, bu da kalsiyum silikat hidratlar (C-S-H) ve kalsiyum hidroksit (CaOH) oluşumuna bağlı olarak sulu çimento parçacıklarının genişlemesine neden olur. Bu reaksiyon ürünleri, çatlak genişliğinin küçük olması şartıyla çatlakları tamamen kapatabilirler. Daha büyük boyutlu çatlaklar, sınırlı miktarda reaksiyona girmemiş çimento parçacıkları nedeniyle kısmen doldurulabilir, böylece çatlak yüzeyinde sadece ince bir hidratasyon ürünü tabakası oluşur.

Çatlak sızdırmazlık kapasitesine gelince, çimento parçacıklarının ikincil hidratasyonuna homolog olan bir işlem karbonatlaşma işlemidir. Su kasıtlı olarak çatlağa zorlanır ve öncül aktive edilir. Aktive edilmiş bu öncüller ile bakterilerin reaksiyona girmesiyle kireçtaşı olarak adlandırılan kalsiyum karbonat birikimi oluşur.

Kimyasal reaksiyonlar sonunda bakteriler kalsiti çökeltirerek beton-daki gözenekleri ve çatlakları tıkayabilirler. Bu mikrobiyolojik olarak indüklenen kalsiyum karbonat çökeltmesi, bir dizi karmaşık biyokimyasal

reaksiyondan oluşur. Yapılan bir çalışmada metabolizmanın bir parçası olarak, *Bacillus subtilis*, CO_2 ve amonyak üretmek için üreyi katalize eden üreaz enzimini üretilmiştir. Bu enzim, $\text{Ca}^{(+2)}$ ve $\text{CO}_3^{(-2)}$ iyonlarının CaCO_3 olarak çökelediği ortamda pH artışına neden olur. Bunlar, bakteriler kalsiyum laktatlı besinleri kullanarak, daha da genişleyen ve büyüyen kalsiyum karbonat kristalleri oluşturur. Tüm boşluklar dolana kadar kristaller genişlemeye devam ederler [9] (Şekil 5).



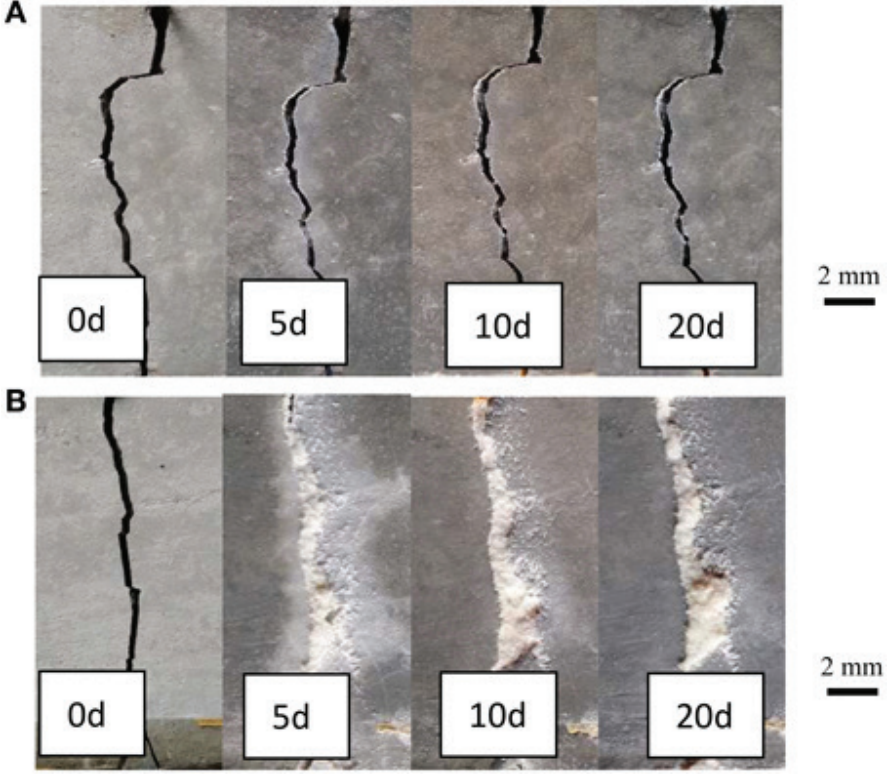
Şekil 5. Beton Onarımı [11]

İyileşme mekanizmasını arttırmak için karışıma mikrofiber eklenir. Betonda mikro lifler karıştırılarak çoklu çatlaklar meydana gelir. Böylece, geniş bir çatlak değil, otojen iyileşme nedeniyle daha kolay kapanabilen birkaç küçük çatlak oluşur.

Süper emici polimerler veya hidrojeller, büyük miktarda sıvı alabilir (kendi ağırlığının 500 katı kadar) ve çözülmeden yapılarında tutabilirler. Çatlaklar oluştuğunda, süper emici polimerler nemli ortama maruz kalır ve şişer. Bu şişme reaksiyonu çatlakları potansiyel olarak zararlı maddelerin girmesini engeller. Şişmeden sonra, süper emici polimerler partikülleri iç küreleme, daha fazla hidrasyon ve CaCO_3 ün çökeltmesi için çevreleyen matrisi sıvıyı emer. Bu şekilde çatlaklar tamamen kapanabilir.

Kalsiyum karbonat çöktürücü mikroorganizmalar kullanılarak çatlaklar iyileştirilebilir. Bu organizmalar, mikrokapsüllerde veya Süper emici polimerler diatomlu toprak üzerinde immobilizasyondan (hareketsiz hale gelmesi) sonra beton matrisine gömülür ve bir çatlak oluştuğunda CaCO_3 (kalsiyumkarbonat) ün çökmesiyle başlar. Bu işlem sayesinde, bakteri hücresi bir kalsiyum karbonat tabakası ile kaplanır ve bu da çatlak dolgusuna neden olur (Şekil 6) [12]. mSystems bülteninde yayımlanan araştırmaya göre bakteri, yapısal kusurlara yol açabilen nem kaynaklı al-

kali-silika tepkimelerinde erken uyarı sağlayabilmektedir. Hatta bu bakteriler sayesinde köprü ve yollardaki hasarları bile tamir edilebilmektedir [13].



Şekil 6. Referans numunesi ve bakteri katkılı beton [14].

Kendini Onaran Betonun Avantajları

- o Çatlakları hızla onarır. Betonda oluşacak sızıntı, sonunda betonun çelik takviyelerini paslandırabilir ve bu da sonunda çökmeye neden olabilir. Kendini iyileştiren teknolojiyle, çatlaklar derhal kapatılabilir ve gelecekteki kaçaklar önlenir.

- o Bakteriler, en modern binaların ömrünün çok ötesinde, 200 yıl boyunca uykuda kalabilir. Bu da beton ömrünü güvenceye almamızı sürdürülebilirliğini artırmamızı sağlayabilir.

- o Beton onarımı için harcanan maliyetlerin azalmasını sağlayabilir ancak bu kendini onaran betonun maliyetinin düşürülmesine bağlıdır.

- o Bu süreç, onarım sıklığını azaltmanın yanı sıra genel bakım maliyetlerini de düşürür.

- o Betonun ayrıca kendini onarabilme özelliği, yol güvenliğini artırmanın yanı sıra bakım maliyetlerini ve çevredeki ekosistemlere verilen zararı da azaltacaktır.

- o Beton numuneleri bakteri, besin maddeleri ve kumla dolar. Hücresiz olanlara kıyasla basınç dayanımı ve sertlik değerlerinde önemli artış.

- o Betonun geçirgenliğinde azalma meydana gelir.

- o Betonun dayanıklılığını artırır.

- o Estetik görünüm bundan dolayı zarar görmez.

- o Kirlilik yaratmaz, çevre dostudur ve doğaldır.

- o Daha düşük onarım ve bakım maliyeti meydana gelir.

- o Sprey formunda mevcut binalara uygulanabilir.

- o Beton üretiminden kaynaklanan karbondioksit emisyonu sınırlanır.

Kendini Onaran Betonun Dezavantajları

Kendi kendini iyileştiren betonun önümüzdeki on yılda beton yapıyı dönüştürmesi gerekiyorsa, aşılması gereken iki önemli engel var.

İlk sorun, kendini iyileştirme ajanını tutan kil peletlerinin beton hacminin % 20 sini oluşturmasıdır. Bu % 20 normalde çakıl gibi daha sert agregaya içerecektir. Kil, normal agregadan çok daha zayıftır ve bu betonu % 25 oranında zayıflatır ve basınç dayanımını önemli ölçüde azaltır. Birçok yapıda bu bir problem olmaz, ancak yüksek binalarda olduğu gibi daha yüksek basınç dayanımının gerekli olduğu özel uygulamalarda, uygulanabilir olmayacaktır.

İkinci dezavantaj, kendi kendini iyileştiren betonun maliyeti, şu anda metreküp başına yaklaşık 80 Euro olan geleneksel betonun yaklaşık iki katıdır. Jonkers şöyle diyor: “Metreküp başına yaklaşık 160 € değerinde, kendi kendini iyileştiren beton, yalnızca tünel kaplamaları ve deniz yapıları gibi yüksek kaliteli olması nedeniyle beton maliyetinin çok daha yüksek olduğu bazı inşaat mühendisliği yapıları için uygun bir ürün olacaktır. (Güvenliğin büyük bir faktör olduğu veya tamir ve bakım için sınırlı erişimin olduğu yapılarda.)”

Bakterilerin büyümesi herhangi bir atmosferde ve ortamda iyi değildir. Kalsifiye edici mikroorganizmaların büyümesi için kullanılan farklı tipteki besinler ve metabolik ürünler, hayatta kalma, büyüme, biyofilm ve kristal oluşumunu etkiler. Yapı malzemesinde besin ve metabolik ürünlerin tutulması konusunda çok sayıda çalışma yapılmalıdır.

Optimum performansı elde etmek için betonda kullanılacak bakteri dozlarını tahmin etmek zordur.

SONUÇ

Standart betonun hala kullanıldığı yerlerde, standart betonun yerine bakterili kendiliğinden iyileşebilen betonun kullanımı için bir potansiyel vardır. Kendi kendini iyileştirme özelliklerine sahip olmanın avantajı, her bir betonun doğası nedeniyle yapısında meydana gelebilecek çatlakların, insan eli değmeden kontrol edilip azaltılarak tamir edilebilmesidir. Kendi kendini iyileştiren beton formu, beton yapı üzerinde veya içinde oluşan hasarları sürekli olarak iyileştirmek için tasarlanmıştır. Herhangi bir boyut, şekil veya projenin beton yapısının ömrünü uzatmak ve elemanlardan çelik takviyelere ekstra koruma sağlamak için çalışılmıştır. Bu süreçte para tasarrufu sağlanabilir, yapıların dayanıklılığı çok daha uzun süre devam ettirilebilir ve beton endüstrisi çok daha sürdürülebilir bir ürün ortaya çıkartmış olarak CO₂ salınımı etkili bir şekilde azaltılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] İbrahim Özay Semerci, (2014). Kendini onaran beton, Tübitak Bilim ve Teknik Dergisi, 42-43.
- [2] <https://malzemebilimi.net/kendi-kendini-tamir-eden-beton.html>
- [3] <https://www.tudelft.nl/citg/over-faculteit/afdelingen/materials-mechanics-management-design-3md/sections-labs/materials-environment/staff/prof-dr-hm-henk-jonkers>
- [4] <https://www.youtube.com/watch?v=HWOM5wvv7v0>
- [5] <https://www.thbbakademi.org/kendi-kendini-iyilestiren-beton-ingilterede-satisa-cikiyor/>
- [6] Atashafrazeh Majid (2018). Viridibacillus Arenosii ve Bacillus Pasteurii Bakterilerinin Kendi Kendini Onaran Beton Dayanımına Etkisi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi
- [7] Erşan Y.Çağatay (2021). Kendi Kendini İyileştirme Biyogranül İçeren Mikrobiyal Kendi Kendini İyileştiren Betonun Aralıklı Islak/Kuru Döngülerde Performansı, Politeknik Dergisi 24(2), 323-332
- [8] Bashir Jasira vd (2016). Bio Concrete- The Self-Healing Concrete, Indian Journal of Science and Technology 9(47)
- [9] Berivan Polat (2019). Geopolimer Harcın Mikro Organizmalar Yardımıyla Kendiliğinden İyileşmesinin Araştırılması, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
- [10] Yusuf Ç. Erşan, Elke Gruyaert, Ghislain Louis, Christine Lors, Nele De Belie, Nico Boon (2015). Self-protected nitrate reducing culture for intrinsic repair of concrete cracks, Frontiers in Microbiology, Microbiotechnology, 6, 1228. | <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01228>
- [11] <https://superileri.com/kendini-iyilestiren-beton-diye-birsey-duydunuz-mu-hollandali-bilim-adamlari-canli-bakterileri-kullanarak-bunu-gelistirdi/>
- [12] Nazlıhan Yıldırım, Yeşim Gürtuğ, Cenk Sesal, (2016). Mikrobiyal Kalsiyum Karbonat Oluşum Mekanizmaları ve Uygulama Alanları, Marmara Fen Bilimleri Dergisi 2016, 2: 70-80
- [13] <https://popsci.com.tr/betonun-icerisinde-yasayan-bakteri-turu/>
- [14] <https://williamtualaufale.com/self-healing-concrete/>

Bölüm 3

YERALTI BARAJLARI İLE KURAKLIKLA MÜCADELE: TEKNİK VE ÇEVRESEL AÇIDAN BİR DEĞERLENDİRME

Çağrı AKGÜN¹

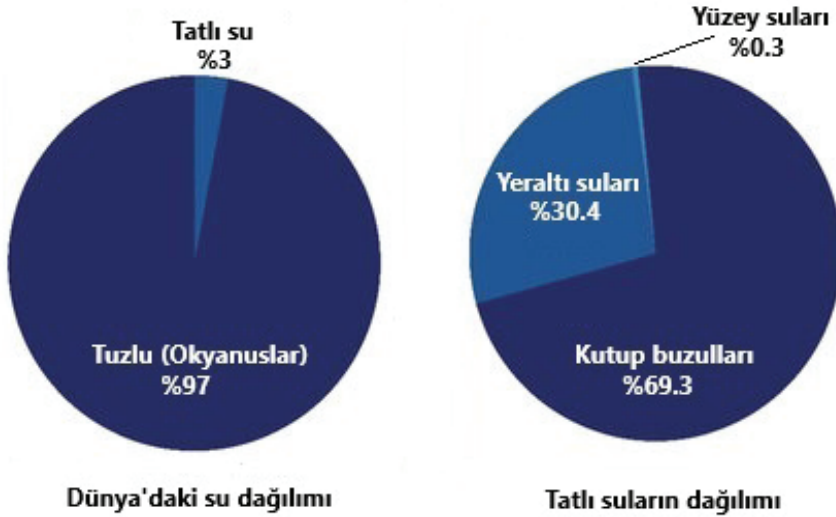
Salim Serkan NAS²

1 Öğr. Gör. Dr. Çağrı AKGÜN, Iğdır Üniversitesi, Iğdır Meslek Yüksekokulu, Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, Orcid: 0000-0002-7155-6191

2 Prof. Dr. Salim Serkan NAS, Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-9054-4674

Giriş

Su, canlıların yaşamını devam ettirebilmesi için gereken alternatifsiz bir kaynaktır. İnsanoğlunun sadece biyolojik ihtiyaçları için değil, tarımdan sanayiye hatta enerji üretimine kadar sudan faydalanılması, toplumsal refahın gelişimi bakımından da suyun önemini ortaya koymaktadır. İklim değişikliği, hızlı nüfus artışları ve suyun yanlış kullanımı gibi etkenler, tükenebilir bir kaynak olan suyun azalmasına ve küresel ölçekte su kıtlığı riskini ortaya çıkarmaktadır. Dünya'daki su rezervinin %97'sini kullanıma elverişli olmayan deniz suları oluşturmaktadır. Geriye kalan yaklaşık % 3'lük tatlı su rezervlerinin ise %99'undan fazlası yeraltında ve erişilmesi zor olan kutup buzullarında bulunmaktadır (Rijsberman, 2006; Ahuja, 2009; El-Ghonemy, 2012; Musiea & Gonfa, 2023). Dünya'daki su dağılımına ilişkin görsel aşağıda Şekil 1.'de sunulmuştur.



Şekil 1. Dünya'daki su dağılımı (Islam vd., 2023).

Şekil 1 incelendiğinde erişilebilir tatlı su kaynaklarının azlığı dikkat çekmektedir. Dünya'daki erişilebilir suların en büyük kısmını (% 30) yeraltı suları oluşturmaktadır. Genel olarak yeraltı suları kavramı; doğal olarak oluşan ve yüzeyin altında kalan çeşitli derinliklerdeki kaya, toprak ve tortular arasındaki boşluklarda bulunan sular olarak tanımlanmaktadır. Yeraltındaki su miktarının, yüzeydeki akarsularda bulunan su rezervinin 7500 katı olduğu tahmin edilmektedir. Ayrıca akarsulardaki toplam akışın yaklaşık üçte biri de yeraltı sularından beslenmektedir (Bayazit, 2013; Diaz vd., 2023).

Belirli bir bölgedeki yeraltı suyu miktarı; iklim koşulları, hidrolojik döngü, yeraltı jeolojisi, topoğrafya, bitki örtüsü, antropojenik süreçler ve

su havzası koşulları gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Söz konusu faktörler, yeraltı sularının oluşum, depolanma ve yenilenmesi süreçlerinin temel dinamiklerini belirlemektedir. Örneğin, yeraltı sularının ana beslenme kaynağı olan yağış miktarı ve dağılımı, kurak bölgelerde yeraltı suyu miktarı ve yenilenme süresini önemli ölçüde sınırlandırmaktadır. Benzer şekilde topoğrafik eğim suyun yeraltına sızma hızını belirlemede, bitki örtüsü varlığı ise toprağın su tutma kapasitesini artırmaktadır. Ayrıca bir bölgedeki kayaçların geçirgenlik durumu ve akifer yapısı da suyun yeraltına sızma ve depolanma kapasitesini doğrudan etkilemektedir (Devic vd., 2014; Li vd., 2014; Gültekin, 2015; Davamani vd., 2024).

Günümüzde yeraltı sularından tarımsal, evsel ve endüstriyel kullanımlarda yoğun bir şekilde faydalanılmaktadır. Küresel çapta yeraltı suyu çekimlerinin %70'ini tarımsal sulama, %20'sini evsel kullanımlar ve %10'unu da endüstriyel kullanımlar oluşturmaktadır (Margat & Gun, 2013; Carrard vd., 2019).

Artan dünya nüfusuyla birlikte su kullanımlarının artması, yanlış su politikaları ve iklim değişikliği gibi faktörler su kaynaklarının tükenmesi noktasında gelecek için ciddi endişeler oluşturmaktadır. 2021 yılında yayınlanan Birleşmiş Milletler Su Geliştirme Raporu'nda 1980 yılından beri küresel tatlı su tüketiminin her yıl yaklaşık %1 arttığı belirtilmektedir. Benzer şekilde Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü'nün (OECD) 2012 yılında hazırladığı bir başka rapora göre, 2050 yılına kadar küresel su talebinin %55 artacağı öngörülmektedir. Artan su talebi, iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki olumsuz etkileriyle birleşince gelecekteki su kıtlığı riskini açıkça ortaya koymaktadır. Literatürde, iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkilerini ele alan; değişen yağış rejimleri, artan kuraklıklar ve su döngüsündeki bozulmaların ortaya konduğu çok sayıda araştırma bulunmaktadır (Abbaspour vd., 2009; Sivakumar, 2010; OECD, 2012; Gosling & Nigel, 2013; Kundzewicz vd., 2018; United Nations, 2021; Mostafa vd., 2021; IPCC, 2022; Şiltu & Akça, 2023).

Suya olan talebin artması, yeraltı sularının kullanımını önemli bir alternatif haline getirmiştir. Özellikle yüzey sularının kuraklık ve yağış dengesizlikleri gibi nedenlerle azaldığı dönemlerde, tarımsal üretimin yoğun olduğu bölgelerde yeraltı suyu kullanımları artmaktadır. Ancak gerek iklim değişikliğinin etkileri gerekse yeraltı sularının aşırı kullanımları sonucunda yeraltı su seviyelerinde düşüşler ve ciddi olumsuz etkiler gözlemlenmiştir. Nitekim Jasechko vd. (2024), dünya genelinde 1693 akiferdeki 170000 izleme kuyusundan topladıkları kırk yıllık su seviyesi verilerini kullanarak kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Çalışmanın endişe uyandıran sonuçlarında; incelenen akiferlerin %36'sında 0.1 metreyi, %12'sinde ise 0.5 metreyi aşan seviye düşüşleri tespit edilmiştir. İklim değişikliği ve yeraltı sularının aşırı kullanımları; yeraltı sularında tuzlanma, su kalite-

sinin bozulması, yenilenme süresinin artması, kıyı bölgelerde deniz suyu girişi ve ekosistemin bozulması gibi biyolojik ve sosyoekonomik birtakım olumsuzluklara sebep olabilmektedir. Ayrıca yeraltı sularının aşırı kullanımını sonucu su seviyesinin düşmesi, zemindeki boşlukları azaltarak arazi çökmelerine veya obruklara neden olabilmektedir (Vries & Simmers, 2002; Konikow & Kendy, 2005; Pandian & Sankar, 2007; Yamanaka vd., 2011; Pophare vd., 2014; Khorrami & Malekmohammadi, 2021; Orhan, 2021; Pandey vd., 2022).

Yeraltı sularının kontrolsüz kullanımı sonucu meydana gelen Dünya'nın farklı bölgelerindeki arazi çökmeleri ve obruklara ilişkin görseller aşağıda Şekil 2.'de sunulmuştur.



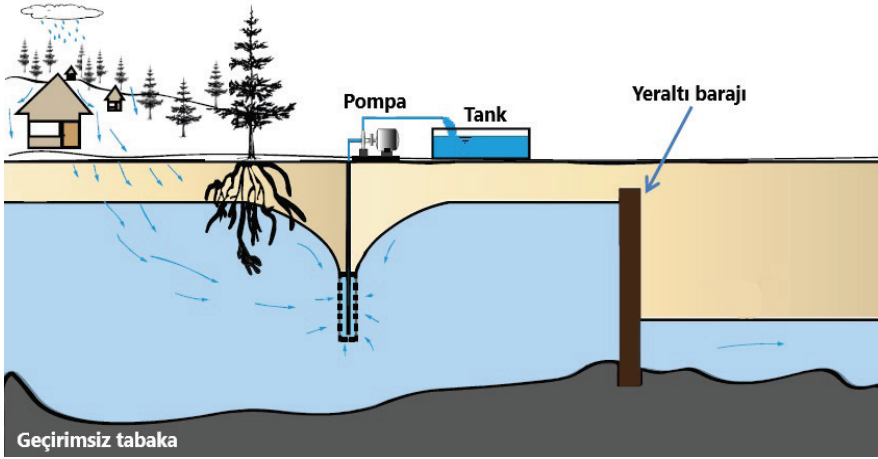
Şekil 2. Arazi çökmeleri ve obruk oluşumu görselleri (A, Anadolu Ajansı, 2023a; B, Financial Tribune, 2021; C, USGS, 2018; D, Environmental Geology, 2009).

Dünya üzerindeki tatlı su kaynaklarının önemli bir bölümünü oluşturan yeraltı sularında, iklim değişikliği ve insan faaliyetleri nedeniyle ciddi bir azalma eğilimi gözlemlenmektedir. Gerek ekosistem gerek insan yaşamı üzerinde olumsuz etkilere neden olabilecek bu durum özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde; su kuyularının kuruması, tarımsal üretimin azalması, yer altı sularında tuzlanma ve arazi çökmeleri gibi birtakım etkilerini de göstermeye başlamıştır. Söz konusu durum, su politikası yöneticilerini; yağmur sularının yeraltına aktarılması, yeraltı sularını besleyecek suni sistemler ve yeraltı barajlarının yapılması gibi birtakım sürdürülebilir stratejilere yönlendirmiştir. Bu çalışma kapsamında yeraltı barajları tanıtılarak, dünyadan ve ülkemizden örneklerle yeraltı barajları-

nın yeraltı sularının etkin yönetimi noktasındaki rolünün değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.

Yeraltı Barajları

Yeraltı barajları, yeraltındaki geçirimsiz bir tabaka üzerine inşa edilen baraj gövdesi sayesinde yeraltı suyu akışının kontrol edilerek depolanmasını sağlayan sistem olarak tanımlanmaktadır. Yeraltı barajlarının inşaa süreci, bölgenin topoğrafyası ve hidrojeolojik özelliklerine bağlı olarak planlanmaktadır. Genel itibariyle vadilerin daraldığı bölgelerde, yeterli beslenme koşulları ve uygun hidrolik iletkenliğe sahip akiferler üzerine inşa edilmektedir. Dar vadilerin seçilmesi, inşaa maliyetini düşürmekte ve olası sızıntıların kontrolünü kolaylaştırmakta; yüksek hidrolik iletkenlik ise suyun kolayca akarak baraj arkasında daha kısa sürede depolanmasını sağlamaktadır. Yeraltı rezervuarında biriken su, bölgenin topoğrafyasına göre cazibe veya pompaj sistemiyle alınmaktadır (Nilsson, 1998; Nishigaki vd., 2004; Apaydın vd., 2009). Şekil 3.'de bir yeraltı barajının şematik gösterimi sunulmuştur.



Şekil 3. Yeraltı barajlarının şematik gösterimi (Jamali, 2016).

Antik çağlardan beri yeraltı sularını kullanan insanoğlunun yeraltı barajları geçmişinin Roma dönemlerinden başladığı tahmin edilmektedir. Romalılar döneminde Sardunya adasında, Tunus bölgesinde ise Kuzey Afrika'nın eski medeniyetleri tarafından yeraltı barajlarının yapıldığı bilinmektedir. ABD'nin bir eyaleti olan Arizona'da da 18. yüzyıldan kaldığı düşünülen yeraltı barajı kalıntıları bulunmaktadır (Hanson ve Nilsson, 1986; Trevor, 1992; Zarkesh vd., 2012; Valipour vd., 2020).

Yeraltı barajlarının modern yapısı 20. yüzyıldan sonra ortaya çıkmakla birlikte 1970'li yıllardan sonra popüler hale gelmeye başlamıştır. ABD,

Çin, Japonya, Avusturya, Fransa ve Almanya başta olmak üzere birçok ülkede son zamanlarda farklı amaçlarla yeraltı barajları inşa edilmiştir. Avusturya'da su kaynaklarını geliştirmek, Yugoslavya'da tatlı su akiferlerini deniz suyuna karşı korumak ve Yunanistan'da akiferleri geliştirmek gibi; gerek yeraltı sularını korumak gerekse yeraltı su seviyesini artırarak faydalanma noktasında yeraltı barajları inşa edilmiştir (Norman, 1971; Zarkesh vd., 2012).

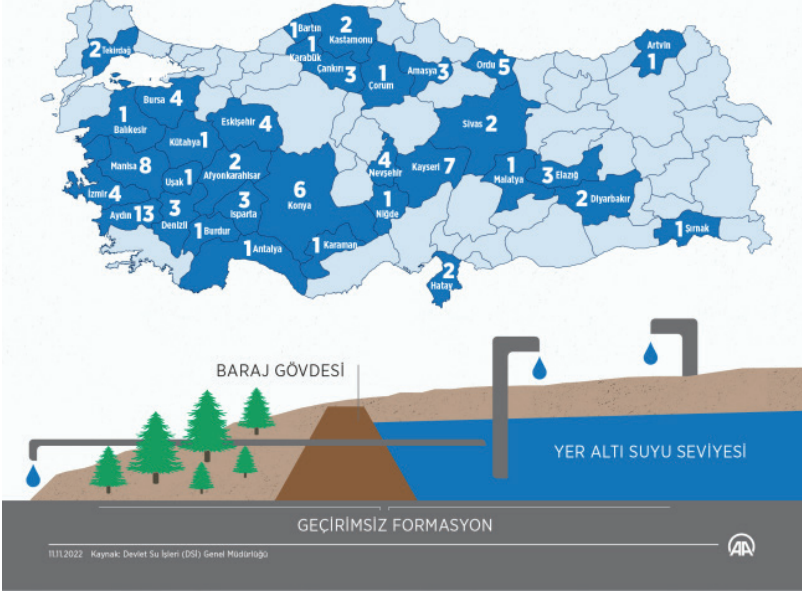
Türkiye'nin yeraltı barajları tarihi incelendiğinde 1960 ile 2003 yılları arasında tarımsal sulama ve evsel kullanım amaçlı birtakım küçük yeraltı barajlarının inşa edildiği görülmektedir. Çorum ili Çavuşçay havzasında, Ankara'nın Nallıhan ilçesinde ve Çankırı'nın Alanpınar köyünde inşa edilen yeraltı barajları bu kapsamda verilebilecek örnekler arasındadır (Çelik ve Yıldırım, 2006; Apaydın, 2022a). 2000'li yıllardan sonra Türkiye'nin Kırıkkale, Ankara, Çorum, Eskişehir, Elazığ ve Şanlıurfa illerinde daha büyük ve modern yeraltı barajları inşa edilmiştir. Sonraki dönemlerde de yeraltı suyu potansiyelini geliştirmek isteyen Türkiye, son 20 yılda 127 adet yeraltı barajı ve yeraltı suyu besleme projesini hayata geçirmiştir (Apaydın vd., 2005; Apaydın, 2014; Anadolu Ajansı, 2023b). Özellikle 2019 yılında Tarım ve Orman Bakanı Bekir Pakdemirli'nin "Cumhuriyetin 100. Yılı Şerefine 100 Yeraltı Barajı" söylemiyle açıkladığı Yeraltı Barajları Eylem Planı, bu hususta atılan en ciddi adımlardan biridir. DSİ Genel Müdürlüğü tarafından yürütülen bu proje ile 50 milyon m³ suyun yerinde depolanması planlanmaktadır. Söz konusu proje kapsamında planlanan yeraltı barajlarının 95'i 2022 yılı Kasım ayı itibariyle tamamlanmıştır. Tamamlanan projelerin illere göre dağılımı Şekil 4.'de gösterilmiştir. Ayrıca T.C. Cumhurbaşkanlığı 11. Kalkınma Planı da yeraltı su rezervuarlarının oluşturulması ve yeraltı baraj projelerinin uygulanmasına yönelik hedefleri içermektedir (T.C. Cumhurbaşkanlığı, 2019; Anadolu Ajansı, 2019; Apaydın, 2022a).

Yer altı barajları suyun korunması için alternatif oluyor

Bugüne kadar yapımı tamamlanan 95 yer altı barajıyla 31 bin dekar tarım arazisi sulandı, 20,1 milyon metreküp içme suyu temin edildi

FAALİYETTEKİ YER ALTI BARAJLARININ İLLERE GÖRE DAĞILIMI

İnşa aşamasında **40**, ihale aşamasında **11**, planlama aşamasında ise **100 yer altı barajı bulunuyor**

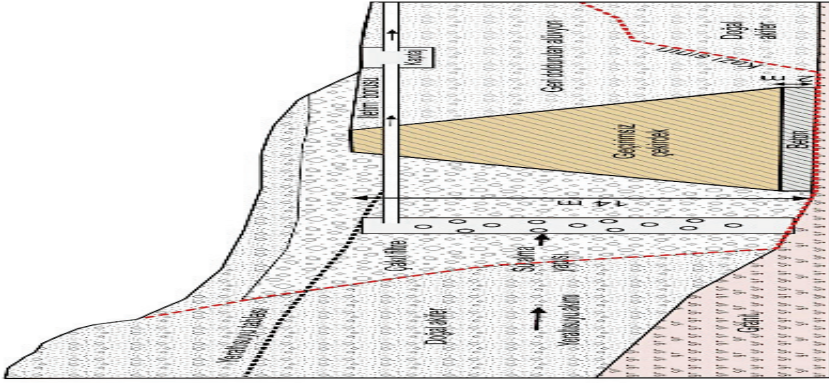


Şekil 4. Tamamlanan yeraltı barajı projelerinin illere göre dağılımı (TRT Haber, 2022)

Yeraltı barajı projelerinin planlama ile tasarım aşamasındaki uygun yer ve gövde tipinin seçimi; projenin teknik, ekonomik ve çevresel açıdan başarılı olmasını belirleyen en önemli unsurlardandır. Uygun yer seçiminde havza hidrolojisi ve hidrojeolojisi etkin olmaktadır. Bu kapsamda rezervuar olacak akifer, gerekli yeraltı suyunu toplayacak geçirgenlik ve gözenekliliğe sahip olmalı; alttaki geçirimsiz tabaka yeterli genişlikte olmalı; planlanan su hacmini karşılayabilecek yeraltı suyu beslemesine sahip olmalı; su kalitesi, kullanılabilirlik açısından uygun aralık değerlerinde olmalı ve uygun maliyet ile teknik yapılabilirlik açısından akifer sisteminin daraldığı bir boğaz bulunmalıdır (Apaydın vd., 2009; Ishida vd, 2011; Çavdar, 2024).

Yeraltı barajlarının gövde tipinin seçimi ise amaç, işlev ve bölgedeki uygun malzeme olanaklarına bağlı olarak yapılmaktadır. Proje bütçesi ve ekonomik uygulanabilirlik, baraj gövde aksındaki akifer ölçüleri, gövde-

yi ve gövde geçirimsizliğini sağlayacak uygun malzemenin varlığı, akifer yapısının inşaata elverişliliği ve rezervuardan su alma yöntemi gövde tipini belirleyen önemli faktörlerdir. Söz konusu faktörler dikkate alınarak toprak dolgu, kil çekirdekli kaya dolgu, kil çekirdekli kum-çakıl dolgu, enjeksiyon, jet kolon ve plastik beton gibi birçok türde gövde tipleri inşa edilmektedir (Apaydın, 2014; Apaydın, 2022b; Çavdar, 2024). Şekil 5'te Kırıkkale'nin Yahşihan ilçesinde bulunan, temelden yüksekliği 14 metre ve kil çekirdekli toprak dolgu tipindeki Yahşihan yeraltı barajının uygulama kesiti sunulmuştur.



Şekil 5. Yahşihan yeraltı barajının uygulama kesiti (Apaydın, 2014)

Dünya genelinde son yıllarda birçok ülkede yeraltı barajları inşa edilmiştir. Japonya, Brezilya, Çin ve Hindistan yapım teknolojisi ve tecrübesi açısından bu kapsamda dünyanın önde gelen ülkelerindedir. Japonya'daki Miyakojima Adasında inşa edilen Fukusato ve Sunagawa yeraltı barajları, toplam 20 milyon m³ rezervuar hacmiyle dünyanın en büyük yeraltı barajı sistemlerinden biridir. 1983 yılında Kore'de inşa edilen 4 milyon m³ rezervuar kapasiteli Eean yeraltı barajı, Çin'deki 2.7 milyon m³ rezervuar hacimli Halagou yeraltı barajı ve Brezilya'daki 2 milyon m³ rezervuar hacmine sahip Ceara yeraltı barajları da bu kapsamda verilebilecek örnekler arasındadır. Yine Japonya'da bulunan Komesu yeraltı barajı, 69.4 metre gövde yüksekliğiyle dünyanın en yüksek yeraltı barajlarından birisidir. Brezilya ve Kenya'da büyük ve küçük ölçekli 500'den fazla yeraltı barajı bulunmaktadır (Ishida vd., 2003; Ishida vd., 2011; Apaydın, 2014).

Şekil 6'da 1998 yılında Burkina Faso'da inşa edilen 1.8 milyon m³ rezervuar hacmine sahip, toprak dolgu tipindeki bir yeraltı barajının inşaatına ilişkin görseller sunulmuştur.



Şekil 6. Burkina Faso'da bir yeraltı barajı inşaatı (Japonya Çevre Bakanlığı, 2004).

Yeraltı ve Yerüstü Barajların Avantaj ve Dezavantaj Açısından Değerlendirilmesi

Yeraltı barajları ve geleneksel yerüstü barajları; yapım koşulları, çevresel etkileri, teknik ve ekonomik boyutları bakımından birtakım farklılıklar içermektedir. Bu iki baraj türü, belirli koşullarda birbirlerine karşı çeşitli avantajlar ve dezavantajlar barındırabilmektedir. Depolama sisteminin kullanım amacına, ihtiyaç duyulan su miktarına, coğrafi şartlara ve çevresel hassasiyetlere bağlı olarak birisi diğerine kıyasla daha iyi bir seçenek olabilmektedir.

Yeraltı barajlarının daha küçük ölçekte olması inşaat maliyeti ve süresini düşürmektedir. Suyun yer altında depolanmasından dolayı arazide fazla toprak kaybının olmaması, gerek kamulaştırma maliyeti gerekse çevresel ve biyolojik tahribat açısından yeraltı barajlarını daha avantajlı kılmaktadır. Ayrıca suyun yer altında depolanması; buharlaşma kayıplarının minimum düzeyde olması, suyun yer altında kirlenme riski azaldığından su kalitesi yönünden avantaj sağlaması ve yeraltında sedimentasyon riski bulunmadığından barajın ekonomik ömründe buna bağlı bir kısaltma yaratmaması gibi önemli faydalar yaratmaktadır. Yeraltı barajlarında gövde yerin altında olduğundan, yıkılmaya bağlı ani bir taşkın durumu beklenmemektedir. Ayrıca yeraltı barajları, yeraltı sularının bilinçsiz kullanımını önlemesi, akiferi koruması ve deniz suyunun akifere karışması-

nı engellemesi gibi birtakım ek faydalar da sağlamaktadır (Nilsson, 1998; Foster vd., 2002; Zarkesh vd., 2012; Jamali vd., 2013; Apaydın, 2014; Kolay ve Öztürk, 2021).

Yeraltı barajları, sağladığı avantajların yanı sıra yerüstü barajlarına kıyasla bazı dezavantajlara da sahiptir. Öncelikle, yeraltı barajlarının depolama kapasitesi yerüstü barajlarına göre oldukça düşüktür. Örneğin, dünyanın en büyük yeraltı barajlarının rezervuar hacmi 20 milyon m³ seviyesindeyken, dünya genelinde rezervuar kapasitesi 50 milyar m³'ü aşan 20'den fazla yerüstü barajı bulunmaktadır (ICOLD, 2024). Yeraltı barajlarının inşası, detaylı hidrojeolojik analizler gerektirdiği gibi, bu alandaki teknik deneyim ve bilgi birikimi yerüstü barajlarına kıyasla daha zayıf kalmaktadır. Suyun yer altında depolanması gövdedeki kayıp kaçak kontrolünde de birtakım zorluklar oluşturabilmektedir. Ayrıca yer altındaki suyun çevredeki akiferlerde sıvılaşma riskini artırarak zeminin taşıma gücünü düşürebilmektedir. Bunun yanı sıra, yeraltı barajlarında hidroelektrik enerji üretimi de mümkün değildir. Yeraltı barajlarında suyun çoğunlukla mansap tarafına cazibeyle aktarılamaması da ek pompaj maliyetlerine yol açmaktadır (Zarkesh vd., 2012; Apaydın, 2014; Jifru vd., 2021; Kolay ve Öztürk, 2021).

SONUÇ

Günümüzün en önemli sorunlarından olan küresel ısınma ve iklim değişikliği sonucunda; su kaynaklarının azalması ve temiz suya erişimin zorlaşması, su yönetimi konusunda yenilikçi çözümleri zorunlu hale getirmiştir. Bu bağlamda, yeraltı barajları, tatlı suların korunması ve sürdürülebilir yönetimi için özellikle kurak bölgelerde etkili bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Suyun yer altında depolanması, buharlaşma kayıplarını en aza indirirken, suyun kalitesini koruyarak tarım, içme suyu temini ve ekosistemlerin devamlılığı açısından kritik faydalar sağlamaktadır. Aynı zamanda düşük maliyeti ve inşaat süresinin azlığı, küçük yerleşimlerin evsel ve tarımsal su ihtiyacının karşılanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Yeraltı barajları, geleneksel yerüstü barajlarına göre; sınırlı depolama kapasitesi olması, hidroelektrik enerji üretimi imkânının olmaması ve teknik deneyim eksikliği gibi birtakım dezavantajlar da barındırmaktadır. Bu hususta projenin; amacı, işlevi ve ekonomisi ile bölgenin hidrolojisi, hidrojeolojisi, topoğrafyası ve toplumsal ihtiyaçları karar verme mekanizmasının temel unsurlarını oluşturmaktadır.

Uygun koşullar altında yerüstü barajlarına önemli bir alternatif olabilen yeraltı barajları, son yıllarda dünyanın birçok ülkesinde olduğu gibi Türkiye'de de yaygınlaşmaktadır. Türkiye'de son 20 yılda Orta Anadolu'da kuraklıkla mücadele, kıyı bölgelerde ise tuzlu su girişini engellemek için 100'den fazla yeraltı barajı inşa edilmiştir. Söz konusu projeler, bölge-

de içme ve sulama suyu imkânı sağlarken aynı zamanda yeraltı su seviyelerinin korunmasına destek olmakta ve bilinçsiz su kullanımını nedeniyle yaşanan sorunların hafifletilmesine olanak tanımaktadır.

Türkiye, mevcut yağış koşulları ve yıllık 18 milyar m³ yeraltı suyu potansiyeliyle dünyadaki birçok ülkeden daha fazla yeraltı suyu rezervi barındırmaktadır (DSİ, 2020). Söz konusu potansiyelin korunumu ve kullanımını noktasında; yeraltı barajları için uygun yerlerin belirlenmesi, yeraltı barajlarının dezavantajlarını minimize etmek ve verimliliğini artırmak için detaylı hidrolojik ve hidrojeolojik analizlere dayalı projelendirme ve inşaatların yapılması, güncel teknoloji ve mühendislik yaklaşımlarının da bu süreçlere entegre edilmesi önerilmektedir. Ayrıca araştırmacıların; tamamlanan yeraltı barajı projelerini, verimlilik, çevresel etki, yeraltı suyu seviyelerinin değişimi ve toplumsal fayda yönünden değerlendirmesi de önerilenler arasındadır. Söz konusu çalışmaların projelerin fayda ve sürdürülebilirliği noktasında önemli fikir ve katkılar ortaya koyacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abbaspour, K. C., M. Faramarzi, S. S. Ghasemi, H. Yang (2009). Assessing The Impact of Climate Change on Water Resources in Iran. *Water Resour. Res.*, 45.
- Ahuja, S. (2009). Handbook of Water Quality and Purity. Elsevier Inc.
- Anadolu Ajansı, (2019). <https://www.aa.com.tr/tr/turkiye/hedef-100-yer-alti-baraji/1538264>. Erişim tarihi: 15.12.2024.
- Anadolu Ajansı, (2023a). <https://www.aa.com.tr/tr/gundem/konyada-40-metre-capinda-70-metre-derinliginde-obruk-olustu/2985108>. Erişim tarihi: 14.12.2024
- Anadolu Ajansı, (2023b). <https://www.aa.com.tr/tr/gundem/turkiyede-son-20-yilda-127-yer-alti-baraji-insa-edildi/3069924>. Erişim tarihi: 15.12.2024.
- Apaydın, A. (2014). Yer Seçiminden İşletmeye Yeraltı Barajları, DSİ Genel Müdürlüğü Destek Hiz. Daire Başkanlığı Basım ve Foto-Film İşletme Müdürlüğü, (basılı kitap) ISBN:978-605-64763-0-3.
- Apaydın, A. (2022a). Türkiye’de Yeraltı Barajlarının Uygulanabilirliği ve “Yeraltı Barajları Eylem Planı”nın Değerlendirilmesi. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(1), 130-146.
- Apaydın, A. (2022b). Yeraltı Barajlarında Gövde Tipleri: Yurt Dışından ve Türkiye’den Örneklerle Bir Değerlendirme. International Black Sea Modern Scientific Research Congress, September 29, 2022 - October 02, 2022, Rize.
- Apaydın, A., Demirci Aktaş, S., Ekinci, O. (2005). Su Kaynaklarının Değerlendirilmesinde Farklı Bir Yaklaşım: Yeraltı Barajları, II. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 153-165, 21-24 Eylül 2005 Gümüşhür-İzmir.
- Apaydın, A., Demirci Aktaş, S., Kaya, S. (2009). Yeraltında Su Depolama: Yeraltı Barajları, *Mavi Gezegen*, Popüler Yerbilim Dergisi, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını, 14, 44-53.
- Aranguren-Díaz, Y., Galán-Freyte, N., Guerra, A., Pacheco-Londoño, L., Romero-Coronado, A., Manares-Romero, A. , Vidal-Figueroa, N., Machado-Sierra, E. (2023). Aquifers and Groundwater: Challenges and Opportunities in Water Resource Management in Colombia, *Water*, 16(685).
- Bayazıt, M. (2013). Hidroloji. Birsen Yayınevi, İstanbul.

- Carrard, N., Foster, T., Willetts, J. (2019). Groundwater as a Source of Drinking Water in Southeast Asia and the Pacific: A Multi-Country Review of Current Reliance and Resource Concerns. *Water*, 11, 1605.
- Çavdar, B.S. (2024). A Tool of Sustainable Control of Groundwater Resources: Underground Dams. *Archives of Advanced Engineering Science*, 1-7.
- Çelik., M. & Yıldırım, T., 2006. Hydrochemical Evaluation of Groundwater Quality in The Çavuşçayı Basin, Sungurlu-Çorum, Turkey, *Environmental Geology*, 50, 323-330.
- Davamani, V., John, J.E., Poornachandhra, C., Gopalakrishnan, B., Arulmani, S., Parameswari, E., Santhosh, A., Srinivasulu, A., Lal, A., Naidu, R. (2024). A Critical Review of Climate Change Impacts on Groundwater Resources: A Focus on the Current Status, Future Possibilities, and Role of Simulation Models. *Atmosphere*, 15, 122.
- Devic, G., Djordjevic, D., Sakan, S. (2014). Natural and Anthropogenic Factors Affecting The Groundwater Quality in Serbia. *Science of the Total Environment*, 468(469), 933-942.
- DSİ, (2020). <https://www.dsi.gov.tr/sayfa/detay/1499>. Erişim tarihi: 16.12.2024.
- El-Ghonemy, A. (2012). Future Sustainable Water Desalination Technologies for the Saudi Arabia: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(9), 6566-6597.
- Environmental Geology, (2009). https://azgeology.azgs.arizona.edu/archived_issues/azgs.gov/arizona_geology/april09/article_cracksinaz.html.
- Financial Tribune, (2021). <https://financialtribune.com/articles/energy/110490/illegal-wells-excessive-groundwater-use-causing-land-subsidence-in-tehran>. Erişim tarihi: 14.12.2024
- Foster, S., Azevedo, G., Baltar, A. (2002). Subsurface dams to Augment Groundwater Storage in Basement Terrain For Human Subsistence- Brazilian Experience. World bank, GWMATE Case Profile Collection, 5(5).
- Gosling, S.N. & Arnell, N.W. (2013). A Global Assessment of The Impact of Climate Change on Water Scarcity. *Climatic Change*, 134, 371-385.
- Gültekin, O. (2015). Yeraltı Suyu Miktarındaki Değişimin Yeraltı Suyu Kalitesine Etkileri ve Çözüm Önerileri. Uzmanlık Tezi, Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Ankara.
- Hanson, G. & Nilsson A. (1986). Groundwater Dams For Rural-Water Supplies in Developing Countries. *Ground Water*, 24(4), 497-506.
- ICOLD, (2024). https://www.icold-cigb.org/article/GB/world_register/general_synthesis/classification-by-reservoir-capacity. Erişim tarihi: 18.12.2024.

- IPCC, (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- Ishida, S., Kotoku, M., Abe, E., Fazal, M.A, Tsuchihara, T., Imaizumi, M. (2003). Construction of Subsurface Dams and these Impact on the Environment. *Materials and Geoenvironment*, 50(1), 49-152.
- Ishida, S., Tsuchihara, T., Yoshimoto, S., Imaizumi, M. (2011). Sustainable Use of Groundwater with Underground Dams. *Japan Agricultural Research Quarterly JARQ*, 45(1), 51-61.
- Islam, M., Rockshat, M., Jahan, I., Islam, J., Zabed, H., Khandaker, M., Rahman, I., Chowdhury, F. (2023). Review—CNT-Based Water Purification and Treatment Strategies. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*. 12(4).
- Jamali, I.A. (2016). Subsurface Dams in Water Resource Management – Methods For Assessment and Location. PhD Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Jamali, I.A., Olofsson, B., Mörtberg, U. (2013). Locating Suitable Sites for the Construction of Subsurface Dams Using GIS. *Environ Earth Sci*, 70, 2511–2525.
- Japonya Çevre Bakanlığı, (2004). Model Project to Combat Desertification In Nare Village, Burkina Faso Technical Report of the Subsurface Dam. Ministry of the Environment Overseas Environmental Cooperation Center.
- Jasechko, S., Seybold, H., Perrone, D., Fan, Y., Shamsudduha, M., Taylor, R.G., Fallatah, O., Kirchner, J.W. (2024). Rapid Groundwater Decline and Some Cases of Recovery in Aquifers Globally. *Nature*, 625, 715–721.
- Khorrami, M. & Malekmohammadi, B. (2021). Effects of Excessive Water Extraction on Groundwater Ecosystem Services: Vulnerability Assessments Using Biophysical Approaches. *Science of the Total Environment*, 799, 149304.
- Kolay, E. & Öztürk, B. (2021). Underground Dams in Water Supply: A Case Study. *Electronic Letters on Science & Engineering*, 17(2), 76-88.
- Konikow, L. F. & Kendy, E. (2005). Groundwater Depletion: A Global Problem. *Hydrogeology Journal*, 13, 317-320.

- Kundzewicz, Z.W., Krysanovad, V., Benestad, R.E., Hov, B., Piniewski, M., Otto, I.M. (2018). Uncertainty in Climate Change Impacts on Water Resources. *Environmental Science and Policy*, 79, 1-8.
- Li, X., Li, G., Zhang, Y. (2014). Identifying Major Factors Affecting Groundwater Change in the North China Plain with Grey Relational Analysis. *Water*, 6, 1581-1600.
- Margat, J., Gun, J. (2013). *Groundwater Around the World: A Geographic Synopsis*; CRC Press Taylor & Francis Group: Boca Raton, FL, USA, 2013; 376p.
- Mostafa, S. M., Wahed, O., El-Nashar, W. Y., El-Marsafawy, S. M., Zelenáková, M., Abd-Elhamid, H. F. (2021). Potential Climate Change Impacts on Water Resources in Egypt. *Water*, 13(12), 1715.
- Musiea W. ve Gonfa G. (2023). Fresh Water Resource, Scarcity, Water Salinity Challenges and Possible Remedies: A Review. *Heliyon*. 8(9).
- Nilsson, A. (1988). *Groundwater Dams for Small-Scale Water Supply*, IT Publication, 69 pp.
- Nishigaki, M., Kankam-Yeboah, K., Komatsu, M. (2004). Underground Dam Technology in Some Parts of the World, *Journal of Groundwater Hydrology*, 46(2), 113-130.
- Norman S., (1971). *A History of Dams*, London: Peter Davies, 25-49.
- OECD, (2012). https://www.oecd.org/en/publications/oecd-environmental-outlook-to-2050_9789264122246-en.html.
- Orhan, O. (2021). Monitoring of Land Subsidence Due To Excessive Groundwater Extraction Using Small Baseline Subset Technique in Konya, Turkey. *Environ Monit Assess*, 193(174).
- Pandey, V.V., Singh, K. M., Ahmad, N., Srivastava S. K. (2022). Challenges and Issues of Groundwater Management in India. *Current Science*, 123(7), 856-864.
- Pandian, K. & Sankar, K. (2007). Hydrogeochemistry and Groundwater Quality in The Vaippar River Basin, Tamil- nadu. *J. Geol. Soc. India*, 69, 970-982.
- Pophare, A.M., Lamsoge, B.R., Katpatal, Y.B., Nawale, V.P. (2014). Impact of Over-Exploitation on Groundwater Quality: A Case Study From WR-2 Watershed, India. *J. Earth Syst. Sci.* 123(7), 1541-1566.
- Rijsberman, R.F. (2006). Water Scarcity: Fact or Fiction?. *Agricultural Water Management*, 1(3), 5-22.

- Sivakumar, B. (2011). Global Climate Change and Its Impacts on Water Resources Planning and Management: Assessment And Challenges. *Stoch Environ. Res Risk Assess*, 25, 583–600.
- Şiltu, E., ve Akça, E. (2023). İklim Değişikliği, Türkiye Yeraltı ve Yüzeysel Su Kaynakları. İklim Değişimi Çerçevesinde Su Kaynaklarının Mevcut Durumu ve Geleceği, Aydın, M.E. ve Şahin, A.D. Türkiye Bilimler Akademisi, Ankara.
- T.C. Cumhurbaşkanlığı, (2019). T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Geliştirme Başkanlığı On Birinci Kalkınma Planı. https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2022/07/On_Birinci_Kalkinma_Plani-2019-2023.pdf. Erişim tarihi: 16.12.2014.
- Trevor, H. A. (1992). Roman Aqueducts & Water Supply. London: Duckworth. 2194-7.
- TRT Haber, (2022). <https://www.trthaber.com/haber/turkiye/dsi-95-yer-alti-barajinin-yapimini-tamamladi-722838.html>. Erişim tarihi: 16.12.2024.
- United Nations, (2021). The United Nations World Water Development Report, France.
- USGS, (2018). <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/land-subsidence>. Erişim tarihi: 14.12.2024
- Valipour, M., Ahmed, A. T., Antoniou, G. P., Sala, R., Parise, M., Salgot, M., Sanaan Bensi, N., Angelakis, A. N. (2020). Sustainability of Underground Hydro-Technologies: From Ancient to Modern Times and toward the Future. *Sustainability*, 12(21), 8983.
- Vries, J.J. & Simmers, I. (2002). Groundwater Recharge: An Overview of Processes and Challenges. *Hydrogeology Journal*, 10, 5–17.
- Yamanaka, T., Shimada, J., Tsujimura, M., Lorphensri, O., Mikita, M., Hagihara, A., Onodera, S. (2011). Tracing A Confined Groundwater Flow System Under The Pressure of Excessive Groundwater Use in The Lower Central Plain, Thailand. *Hydrol. Process*, 25, 2654–2664.
- Yifru, B.A., Kim, M.G., Lee, J.W., Kim, I.H., Chang, S.W., Chung, I.M. (2021). Water Storage in Dry Riverbeds of Arid and Semi-Arid Regions: Overview, Challenges, and Prospects of Sand Dam Technology. *Sustainability*, 13(11), 5905.
- Zarkesh, M.K., Ata, D., Jamshidi, A. (2012). Performance of Underground Dams as a Solution for Sustainable Management of Drought. *Journal of Biourbanism*, 1, 35-45.

Bölüm 4

**VAKS ESASLI KATKILARIN BITÜMÜN FİZİKSEL
VE REOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

Neslihan ŞAHAN¹

¹ Ar. Gör., Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırşehir, neslihan.sahan@ahievran.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3904-6527

Giriş

Bitüm asfalt kaplamaların en temel bileşenlerinden biri olup uzun yıllardır esnek üstyapılarda kullanılmaktadır. Asfalt kaplamalar kullanılmaya başlandığı ilk yıllarda trafik ve çevre koşullarına karşı yeterli performans göstermiştir. Ancak zamanla dünya nüfusunun ve yaşam standartlarının yükselmesi taşıt sayılarında ve trafik yüklerinde bir artışa sebep olmuştur. Bu da iklim gibi çevresel koşulların da etkisiyle asfalt kaplamalarda bozulmalara neden olmuştur. Araştırmacılar, bitümlü kaplamaların bozulmalara karşı direncini arttırmak için bitüm veya bitümlü karışımları modifiye etme ihtiyacı duymuştur. Bu kapsamda, bitüm başlıca polimerler (Padhan & Gupta, 2018; Ziari vd., 2016), atık malzemeler (Kumandas vd., 2022; Zhang & Hu, 2016) ve sentez katkıları (Bozdemir vd., 2023; H. L. Zhang vd., 2021) gibi çeşitli katkı maddeleri ile modifiye edilmektedir.

Son yıllarda bitüm modifikasyonunda katkı malzemesi olarak çeşitli vaksların kullanımının arttığı dikkat çekmektedir. Esasen vakslar bitümü de içeren petrol ürünlerinin bünyesinde doğal olarak bulunduğundan araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Bu nedenle bitümdeki vaksın miktarı (Lu vd., 2008), kristalizasyon özellikleri (Redelius vd., 2002), kimyasal bileşimi (Edwards & Isacson, 2005) ve bitüm özellikleri üzerindeki etkisi (McKay & Branthaver, 1995; Oner & Sengoz, 2017) ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Bitümdeki vakslar ve bitümde vaks kullanımı ile ilgili literatürde iki temel görüş vardır. Bunlardan ilki olan geleneksel görüşe göre bitümden bünyesindeki vakslar uzaklaştırılmalıdır (Merusi & Giuliani, 2011). Bu görüşe göre, bitümdeki vaks düşük sıcaklıklarda kristalize olarak bitümün düşük sıcaklık performansını ve yorulma direncini düşürebilir ve ayrıca yüksek sıcaklıklarda vaks eriyerek bitümün tekerlek izi direncini olumsuz etkileyebilir (Merusi & Giuliani, 2011). İkinci görüş göre ise, bitüme içerdiği vakstan bağımsız olarak çeşitli ticari vakslar akış iyileştirici olarak eklenmelidir. Vaks katkıları bitümün hem işlenebilirliğini hem de çeşitli reolojik özelliklerini geliştirebilir (Ameri vd., 2020; Feitosa vd., 2016). Vaksların bitüm üzerindeki etkisindeki temel nokta vaksın türü ve kimyasal yapısıdır.

Bitüm endüstrisi bakımından vakslar, petrol vaksları ve vaks modifiyerleri (ticari vakslar) olmak üzere iki ana kategoride sınıflandırılabilir. Petrol vaksları bitümü de kapsayan petrol ürünlerinin içeriğinde doğal olarak bulunan ve erime noktası 25 °C'den yüksek olan parafinik kristalleşen malzemelerdir (Merusi vd., 2010). Vaks modifiyerleri ise, genellikle bitümde işlenebilirliği arttırmak için kullanılan ticarileşmiş vakslardır.

Son zamanlarda bitüm modifikasyonlarında farklı özelliklere sahip çeşitli vaksların kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu vaks katkıları, petrol

vakslarından farklı olup bitüm üzerindeki etkisi geleneksel görüşten ayrıdır. Çeşitli vaks katkılarının kullanıldığı çalışmalarda, vaks katkılarının bitümün işlenebilirliğinin yanı sıra tekerlek izi direnci gibi reolojik özelliklerini de iyileştirdiği belirlenmiştir (Das vd., 2012; Shang vd., 2011). Bu nedenle vaksların bitümün fiziksel ve reolojik özelliklerini üzerindeki etkisini araştırma ihtiyacı doğmuştur. Bu kapsamda, bu çalışmaya vaksların bitüm üzerindeki etkisini ortaya koymak için girilmiştir.

Bu çalışmada, literatürde vaksların bitüm modifikasyonunda kullanıldığı çalışmalar derlenip incelenmiştir. Ardından vaksların bitümün fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

VAKS KATKI MADDELERİ

· FT-Parafin vaks (FT)

FT-parafin vaksları, adını aldığı Fischer Tropsch (FT) sentezi ile bir damıtma işlemi sonucunda karbon monoksitin daha yüksek hidrokarbonlara dönüştürülmesi ile üretilir (Edwards & Isacson, 2005). Kömürün işlenmesi sırasında karbon monoksit ve hidrojen içeren bir gaz ortaya çıkar (Jamshidi vd., 2013). Bu gazın demir veya kobalt katalizörlüğünde reaksiyona girmesinin ardından benzin, alkoller ve vakslar oluşur (Jamshidi vd., 2013). Sonrasında oluşan sıvı ürünler ayrılır ve FT vaksları toplanır. Bitüm endüstrisi bakımından Sasol vaksın ürettiği Sasobit isimli FT-parafin vaksı yaygın olarak kullanılmaktadır.

· Montan vaks (M)

Montan vaksları, temel olarak fosil yağ esterleri içeren ve linyit kömüründen elde edilen vakslardır (Rubio vd., 2012). Bitüm endüstrisinde Asphaltan A ve Asphaltan B olarak ifade edilen montan vaksları kullanılmaktadır. Asphaltan A mastik asfaltlarda, Asphaltan B ise bitüm modifikasyonlarında tercih edilmektedir (Ramonta, 2023; Rodríguez-Alloza vd., 2013).

· Polietilen vaks (PE)

PE vaksları, moleküler ağırlığı 1000-4000 arasında değişen polietilenlerdir (Jixing, 2003). Polietilenin moleküler ağırlığının geniş kapsamı nedeni ile bu vaksların yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) gibi türleri bulunmaktadır (Y. Zhang vd., 2021).

· Deurex (D)

Şeker kamışı vaksı olarak da bilinen Deurex adını üretici firmasından almıştır. Deurex, ekstraksiyon yöntemi ile şeker kamışından elde edilir ve yapısında şeker kamışı vaksının yanı sıra uzun zincirli alifatik hidrokarbon zincirlerini içerir (Yang vd., 2018).

· Leadcap (L)

Adını “low-energy and low-carbon-dioxide asphalt pavement” teriminin kısaltmasından alan Leadcap, polietilen vaks esaslı bir katkı olup bünyesinde kristaller ve yapay malzemeler içermektedir (Yang vd., 2012). Üç esas amaca yönelik özel olarak üretilen bu vaks katkısı ile ilk olarak bitümün viskozitesinin düşürülmesi, ikinci olarak düşük sıcaklık performansının geliştirilmesi ve son olarak bitümlü karışımların soyulma direncinin geliştirilmesi amaçlanmıştır (Yang vd., 2012).

FİZİKSEL ÖZELLİKLER ÜZERİNDEKİ ETKİ

Bitümün fiziksel özellikleri, penetrasyon, yumuşama noktası ve düktilite gibi özellikleri kapsar. Bitümün viskozitesi ve buna bağlı olarak işlenebilirliği de fiziksel özelliklere dahil edilebilir. Penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri bitümün sertliği-yumuşaklığı hakkında bilgi verirken düktilite değeri bitümün uzayabilme kapasitesini temsil eder. Diğer taraftan bitümün viskozitesi ise onun agregalar ile karıştırılma ve kaplamanın inşaatı sırasında sıkıştırılmasındaki kolaylığın bir ölçüsü olarak alınır. Çoğunlukla, fiziksel özellikler, bitümün performansı hakkında kesin bir bilgiden ziyade, bir fikir verir. Örneğin, penetrasyon değeri düşük ve yumuşama noktası yüksek bitümlerin yüksek sıcaklık performansının iyi olması beklenir. Düktilite değeri yüksek bitümlerin ise, ısı çatlaklarına karşı direncinin yüksek olması beklenir. Viskozite değeri azaldıkça ise bitümün işlenebilirliği artarak bitümlü karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları azalmaktadır. Bu da kaplama inşaatı için gereken enerjiyi azaltarak daha az karbon emisyonuna sebep olur. Bitümlerin viskozitesi sıklıkla dönel viskozimetre (RV) deneyi ile ölçülür. Superpave şartnamesi (ASTM D6373, 2021) bitümlerin 135 °C’de ölçülen viskozite değerlerinin 3000 Pa değerini aşmaması gerektiğini belirtir. Şartname kriterini sağlayan bitümlerin kaplama imalatı için yeterli işlenebilirliğe sahip olacağı kabul edilir.

Vaks katkı maddelerinin bitümün fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için, incelenen makalelerde fiziksel özelliklerin yer aldığı çalışmalar Tablo1’de listelenmiştir. Bitümün viskozitesi için 135 °C’de RV deneyinin yürütüldüğü çalışmalar dikkate alınmıştır. Bu tabloda, çalışmalarda kullanılan saf bitüm sınıfı, vaks türü ve miktarı dikkate alınarak vaks katkılarının etkisi belirtilmiştir. İncelenen çalışmada, kullanılan vaksın bitümün penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite ve viskozite değerinde değerinde sebep olduğu artış veya azalış sırası ile yukarı ve aşağı yönlü okla belirtilmiştir. Bu fiziksel özelliklerden herhangi biri incelenmediyse, bunu belirtmek için “-“ işareti kullanılmıştır.

Tablo 1 incelendiğinde, tabloda belirtilen bütün vaks türlerinin bitümün penetrasyon değerinde azalmaya neden olduğu görülmektedir. Bu-

nunla paralel olarak, FT-parafin, montan, PE ve Deurex vaksları bitümün yumuşama noktası değerini artırmıştır. Leadcap için ise Web of Science veri tabanında bitümün yumuşama noktasının incelenmesini içeren bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu bilgilerden, genel olarak vaks katkılarının bitümü sertleştirerek kıvamlılığını artırdığı söylenebilir. Düktilite bakımından, Leadcap ile ilgili literatürdeki sınırlı sayıdaki çalışmada bitümün düktilitesinin incelenmediği görülmüştür. Ancak, FT parafin, montan, PE ve Deurex vakslarının genellikle bitümün düktilitesini azalttığı ve bu nedenle vaks katkılarının bitümün uzayabilme kabiliyetini olumsuz etkileyebileceği söylenebilir. Bitümlerin viskozitesindeki değişim incelendiğinde ise FT-parafin, montan, Deurex ve Leadcap vakslarının bitümün viskozitesini etkili bir şekilde azaltarak işlenebilirliği geliştirdiği söylenebilir. Ancak, PE vaksları için durum farklı olup belirgin bir trend görülmemiştir. Bunun temel nedenin farklı yoğunlukta birçok PE esaslı vaksın bulunması olduğu söylenebilir. Bitüm yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), ile modifiye edildiğinde viskozitesi artabilirken düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ile modifiye edildiğinde viskozitesi azalmaktadır (Y. Zhang vd., 2021). Buradan, PE vakslarının bitümün işlenebilirliği üzerindeki etkisinin kullanılan vaksın özelliklerine göre değiştiği söylenebilir.

Tablo 1. Vaksların bitümün fiziksel özellikleri üzerindeki etkisi

No	Saf Bitüm	Vaks Türü	Vaks (%)	Vaks etkisi				Referans
				Pen.	Y.N.	Dük.	Viskozite	
1	Pen 60/70	FT	1.5, 3.5	↓	↑	-	↓	(Kheradmand vd., 2015)
2	LH-70, LH-90, KLMY-90	FT	2, 3, 4	↓	↑	-	↓	(Yi-qiu vd., 2012)
3	Pen 60/80	FT	1, 2, 3, 4, 5	↓	↑	↓↑	↓	(Liu, 2013)
4	PG 64	FT	4	-	-	-	↓	(Jamshidi vd., 2016)
5	Pen 10/20- Pen 160/220	FT	2, 4, 6	↓	↑	-	-	(Silva vd., 2010)
6	Pen 70/100	FT	1, 2, 3	↓	↑	↓	↓	(Bhat & Mir, 2021)
7	Pen 60/70	FT	1, 2, 3	-	-	-	↓	(Ghuzlan & Assi, 2017)
8	PG 58-22	FT	1, 2, 2.5, 3, 4	↓	↑	↓	↓	(Fazaeli vd., 2012)
9	Pen 60/70	FT	1, 3	-	-	-	↓	(Ziari & Babagoli, 2015)

10	Pen 60/70	FT	1, 3	↓	↑	-	↓	(Babagoli, 2020)
11	Pen 50/70	M	6	↓	↑	-	-	(Polacco vd., 2012)
12	Pen 50/70	M	3, 6	↓	↑	-	-	(Merusi & Giuliani, 2011)
13	Reclaimed SBSMB	PE	1, 2, 3, 4, 5	↓	↑	↓	↓	(Cao vd., 2020)
14	Pen 50/70	PE	2, 4, 6, 8	↓	↑	-	-	(Parvez vd., 2015)
15	PG 52-34	PE	4	↓	↑	-	↓	(Ho vd., 2006)
16	PG 64-22	PE	6	-	-	-	↓↑	(Y. Zhang vd., 2021)
17	PG 58-22	PE	3	-	-	-	↓	(Wang vd., 2017)
18	Pen 60/80, Pen 30/60	D	3	↓	↑	↓	↓	(Yang vd., 2019)
19	APAO MB	D	2, 4, 6	↓	↑	↓	↓	(Zhao vd., 2017)
20	Pen 60/80	D	1, 2, 3	↓	↑	↓	↓	(Gao vd., 2018)
21	Pen 60/80	D	1, 3, 5, 7	↓	↑	↓	↓	(Yang vd., 2018)
22	SBSMB (Pen 40)	D	2, 3, 4	↓	↑	↓	↓	(Yang & Liu, 2018)
23	PG 64-22	L	1.5	-	-	-	↓	(Kim vd., 2014)
24	PG 64-22	L	1.5	-	-	-	↓	(Kim vd., 2018)
25	PG 64-16, PG 76-22	L	3	↓	-	-	↓	(Baek vd., 2018)

REOLOJİK ÖZELLİKLER ÜZERİNDEKİ ETKİ

Bitümlerin reolojik özellikleri başlıca yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi, tekrarlı yükler altında yorulma ve düşük sıcaklıklarda ısı çatlaklarına karşı direnci kapsamaktadır.

Bitümlerin yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi deformasyonlarına karşı göstereceği direnci belirlemek için kullanılan en yaygın deney DSR deneyidir. Yüksek sıcaklıklarda yürütülen DSR deneyleri sonucunda dinamik kayma modülü (G^*), faz açısı (δ) ve bu değerlerden $G^*/\sin\delta$ parametresi olarak da bilinen tekerlek izi parametresi belirlenir. Tekerlek izi parametresindeki artış, tekerlek izi direncinin arttığını göstermektedir. Tablo 2’de vaks modifiyeli bitümlerin tekerlek izi direnci ve diğer reolojik özelliklerinin incelendiği çalışmalar verilmiştir. Bu çalışmalarda elde edilen bulguları sayısal olarak vermek mümkün olmadığından her bir çalışmada incelenen parametreler tablo üzerinde işaretlenmiştir. Tabloda verilen referanslarda elde edilen bulgular incelendiğinde, FT-parafin, montan, Deurex ve Leadcap vakslarının bütün çalışmalarda bitümün tekerlek izi direncini geliştirdiği söylenebilir. PE vaksları ise çoğu çalışmada (Cao vd.,

2020; Parvez vd., 2015; Y. Zhang vd., 2021) bitümün tekerlek izi direncini geliştirirken bir çalışmada (Ho vd., 2006) kullanılan PE vakslarından bazıları olumlu bazıları olumsuz etki göstermiştir. Bir çalışmada da (Wang vd., 2017) PE vaksı bitümün tekerlek izi direncini düşürmüştür. Buradan, PE vakslarının yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi direnci üzerindeki etkisinin kullanın PE vaksının yoğunluğuna/türüne göre değiştiği söylenebilir. Bitümlerin tekerlek izi performansını incelemek için kullanılan bir diğer yöntem çoklu gerilme sünme ve geri dönme (MSCR) deneyidir. DSR deneyine kıyasla daha güncel olan bu deney ile modifiyeli bitümlerin gerilme altında gösterdikleri tepki, biri geri kazanılamayan sünme uyumu (Jnr) ve diğeri yüzde geri kazanım (%R) olmak üzere iki parametre üzerinden değerlendirilir. Jnr değerindeki artış tekerlek izine karşı dirençte bir düşüş anlamına gelmektedir. Tablo 2’de verilen MSCR deneyinin yapıldığı çalışmalar incelendiğinde, vaks katkılarının genel olarak bitümün Jnr değerinde azalma ve %R değerinde artışa sebep olarak bitümün tekerlek izi direnci üzerinde olumlu etki gösterdiği belirtilebilir.

Bitümlerin bir diğer reolojik özelliği orta servis sıcaklıklarında tekrarlı yükler etkisinde yorulmaya karşı gösterdikleri dirençtir. Bu direncin ölçüsü olarak sıklıkla DSR deneyinden elde edilen $G^* \sin \delta$ parametresi esas alınmaktadır. Yorulma parametresi olarak da ifade edilen bu parametrenin küçük olması arzu edilir. Parametre büyüdükçe yorulma çatlaklarına karşı direnç azalmaktadır. Tablo 2’de belirtilen çalışmalar incelendiğinde, FT-parafin ve Deurex vakslarının bütün çalışmalarda yorulma parametresini artırdığı ve bu nedenle bitümün yorulma direncini olumsuz etkileyebileceği belirlenmiştir. PE vaksları için belirgin bir trend olmayıp kullanılan PE vaksına bağlı olarak bitümün yorulma direnci olumlu veya olumsuz etkilenebilir (Ho vd., 2006). Diğer taraftan, Leadcap çoğu çalışmada (Kim vd., 2014; Kim vd., 2018; Mazumder vd., 2020) bitümün yorulma parametresini düşürerek yorulma direncini iyileştirmiştir. Yalnızca bir çalışmada (Baek vd., 2018), Leadcap saf bitümün yorulma parametresinde artışa sebep olmuş ancak aynı çalışmada polimer modifiye bitümün yorulma direncini geliştirmiştir. Bu sonuçlardan, Leadcap’ın genel olarak bitümün yorulma direncini olumlu etkilediği söylenebilir.

Tablo 2. Vaks modifiyeli bitümlerde incelenen reolojik özellikler

No	Saf Bitüm	Vaks Türü	Vaks %	Reolojik etki							Referans	
				G*	δ	G*/sin δ	G*sin δ	S	m	MSCR		
1	Pen 60/70	FT	1.5, 3.5	✓	✓	✓						(Kheradmand vd., 2015)
2	LH-70, LH-90, KLMY-90	FT	2, 3, 4	✓	✓	✓						(Yi-qiu vd., 2012)
3	Pen 60/80	FT	1, 2, 3, 4, 5			✓	✓		✓	✓		(Liu, 2013)
4	PG 64	FT	4			✓	✓					(Jamshidi vd., 2016)
5	PG 64-16, PG 70-22	FT	0.5, 1, 1.5, 2,	✓	✓							(Wei vd., 2010)
6	Pen 70/100	FT	1, 2, 3			✓	✓				✓	(Bhat & Mir, 2021)
7	Pen 60/70	FT	1, 2, 3	✓	✓	✓	✓		✓	✓		(Ghuzlan & Assi, 2017)
8	PG 58-22	FT	1, 2, 2.5, 3, 4	✓	✓	✓	✓		✓	✓		(Fazaeli vd., 2012)
9	Pen 60/70	FT	1, 3			✓	✓		✓	✓	✓	(Ziari & Babagoli, 2015)
10	Pen 60/70	FT	1, 3	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	(Babagoli, 2020)
11	Pen 50/70	M	6	✓	✓							(Polacco vd., 2012)
12	Pen 50/70	M	6	✓	✓				✓	✓		(Merusi vd., 2017)
13	Reclaimed SBSMB	PE	1, 2, 3, 4, 5	✓	✓	✓						(Cao vd., 2020)
14	Pen 50/70	PE	2, 4, 6, 8			✓						(Parvez vd., 2015)
15	PG 52-34	PE	4			✓	✓		✓	✓		(Ho vd., 2006)
16	PG 64-22	PE	6						✓	✓		(Y. Zhang vd., 2021)
17	PG 58-22	PE	3			✓	✓		✓	✓		(Wang vd., 2017)
18	Pen 60/80, Pen 30/60	D	3	✓	✓		✓					(Yang vd., 2019)

19	APAO MB	D	2, 4, 6	✓	✓	✓		✓	✓	(Zhao vd., 2017)
20	Pen 60/80	D	1, 2, 3	✓	✓	✓				(Gao vd., 2018)
21	Pen 60/80	D	1, 3, 5, 7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	(Yang vd., 2018)
22	SBSMB (Pen 40)	D	2, 3, 4		✓	✓		✓	✓	(Yang & Liu, 2018)
23	PG 64-22	L	1.5		✓	✓		✓		(Kim vd., 2017)
24	PG 64-22	L	1.5			✓		✓		(Kim vd., 2014)
25	PG 64-22	L	1.5		✓	✓		✓	✓	(Kim vd., 2018)
26	PG 64-22	L	1.5		✓	✓		✓	✓	(Mazumder vd., 2020)
27	PG 64-16, PG 76-22	L	3		✓	✓		✓	✓	(Baek vd., 2018)

Bitümlerin bir diğer reolojik özelliği, düşük sıcaklıklarda çatlamaya karşı gösterilen dirençtir. Bitümün düşük sıcaklık çatlaklarına karşı göstereceği dirençci belirlemek için sıklıkla BBR deneyinden faydalanılır. PAV yöntemi ile yaşlandırılan bitüm numunesine uygulanan bu deney sonucunda, sünme rijitliği (S) ve m-değeri olmak üzere iki parametre elde edilir. Bitümün S değerindeki azalma ve m değerindeki artış, düşük sıcaklık performansının iyileştiğini gösterir. Tablo 2'de verilen bitümlerin S ve m değerlerini içeren çalışmalar incelendiğinde, FT-parafin vakslarının belirgin bir trend göstererek bütün çalışmalarda S değerini artırıp m değerini azalttığı görülmüştür. Buradan, FT-parafin vakslarının bitümü sertleştirerek düşük sıcaklık performansını olumsuz etkileyebileceği söylenebilir. Benzer şekilde, Deurex bitümün S değerini artırıp m değerini azaltmıştır. Yalnızca bir çalışmada (Zhao vd., 2017), düşük oranda (%2) Deurex içeren bitümün düşük sıcaklık performansında iyileşme görülürken daha yüksek oranlarda Deurex içeren bitümlerde tersi etki görülmüştür. Buradan, Deurex katkısının yüksek oranlarda kullanılmasının bitümün düşük sıcaklık performansını olumsuz etkileyebileceği söylenebilir. Montan vaksları için literatürdeki çalışma sayısının kısıtlı olmasından dolayı kesin bir eğilimden bahsetmek mümkün olmamaktadır. Bir çalışmada (Merusi vd., 2017) montan vakslarının bitümün düşük sıcaklık performansı üzerindeki etkisi incelenmiş ve bu vaksin S ve m değeri üzerinde belirgin bir etki göstermediği belirtilmiştir. PE vaksları ise bitümün diğer reolojik özelliklerinde olduğu gibi türüne bağlı olarak bitümün düşük sıcaklık performansı üzerinde olumlu (Ho vd., 2006; Wang vd., 2017)

veya olumsuz (Ho vd., 2006; Y. Zhang vd., 2021) etki göstermiştir. Son olarak, Leadcap ise genel olarak bitümün S değerinde azalma ve m değerinde artışa yol açarak düşük sıcaklık performansını olumlu etkilemiştir. Yalnızca bir çalışmada (Baek vd., 2018), Leadcap S değerinde artma ve m değerinde azalmaya sebep olsa da bu etki bitümün düşük sıcaklık performans sınıfını değiştirecek düzeyde olmamıştır.

SONUÇLAR

Bu bölüm kapsamında literatürdeki çalışmalar incelenerek vaks katkılarının bitümün fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. İncelenen çalışmalardan elde edilen bulgular kıyaslanarak bir değerlendirme yapılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde listelenmiştir.

- Vaks katkıları genel olarak bitümün penetrasyon değerinde azalma ve yumuşama noktasında artışa sebep olarak bitümün kıvamlılığını artırmıştır. Vakslar çoğu çalışmada bitümün duktilitesini azaltarak uzayabilme kabiliyetini olumsuz etkilemiştir. İşlenebilirlik bakımından ise PE dışındaki vaks türleri bitümün viskozitesini azaltarak işlenebilirliği iyileştirmiştir. PE vakslarının işlenebilirlik üzerindeki etkisi kullanılan vaksın yoğunluğuna/türüne göre değişmektedir.

- FT-parafın, montan, Deurex ve Leadcap bitümün tekerlek izi direncini geliştirmiştir. PE vaksları için tekerlek izi direnci üzerindeki etki belirgin bir eğilim göstermeyip çalışmalarda kullanılan PE vaksın türüne göre olumlu veya olumsuz etki göstermektedir.

- FT-parafın ve Deurex vaksları bitümün yorulma direncini olumsuz etkilerken Leadcap katkısı genel olarak yorulma direnci üzerinde olumlu etki göstermiştir. PE vaksının etkisi ise türüne göre değişmektedir.

- FT-parafın ve Deurex vaksları bitümü sertleştirerek düşük sıcaklık performansını olumsuz etkilemektedir. Diğer vaks türleri için ise kesin bir eğilim görülmeyip çalışmalarda kullanılan vaks ve bitüme göre düşük sıcaklık üzerindeki etki değişmektedir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlardan, vaks katkılarının genel olarak bitümün işlenebilirliğini ve tekerlek izi direncini geliştirdiği belirlenmiştir. Vaks modifikasyonu ile bitümlü kaplama imalatı için gereken enerji azalarak çevre dostu bir modifikasyon yapılabilir. Ayrıca, vaks modifiyeli bitümler kullanılarak yüksek sıcaklıklara maruz bölgelerde tekerlek izi direnci yüksek kaplamalar inşa edilebilir. Gelecekteki çalışmalarda, araştırmacıların montan vakslarının bitümün fiziksel ve reolojik özellikleri ve Leadcap vaksının bitümün yorulma ve düşük sıcaklık performansı üze-

rindeki etkisini incelemesi literatürdeki boşlukları doldurmaya katkı sağlayacaktır. Ayrıca, PE, Deurex ve Leadcap vakslarının bitümün tekerlek izi direnci üzerindeki etkisinin MSCR deneyi ile incelenmesinin literatüre faydalı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- Ameri, M., Afshin, A., Ebrahimzadeh Shiraz, M., & Yazdipناه, F. (2020). Effect of wax-based warm mix additives on fatigue and rutting performance of crumb rubber modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 262, 120882. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120882>
- ASTM D6373. (2021). Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. In. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Babagoli, R. (2020). Investigation of the High-Temperature Behavior of Asphalt Binders Modified by Warm Additives through Performance Grade and Multiple Stress Creep and Recovery System. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(2), 04019344. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002997](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002997)
- Baek, J., Lee, S. Y., & Lee, H. J. (2018). Comparative Evaluation of WMA Additives Effects on Conventional and Polymer Modified Asphalt Pavements. *Ksce Journal of Civil Engineering*, 22(6), 2099-2108. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-1785-9>
- Bhat, F. S., & Mir, M. S. (2021). Investigating the Performance of Nano-Modified Asphalt Binders Incorporated with Warm Mix Additives. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(11), 04021319. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003943](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003943)
- Bozdemir, M. G., Oruc, S., & Yesilcicek, H. (2023). Physical and Microstructural Properties of New Boron Resin Compound Synthesized Asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(2). [https://doi.org/10.1061/\(Asce\)Mt.1943-5533.0004611](https://doi.org/10.1061/(Asce)Mt.1943-5533.0004611)
- Cao, Z., Chen, M., Han, X., Yu, J., Wang, R., & Xu, X. (2020). Evaluation of viscosity-temperature characteristics and rheological properties of rejuvenated SBS modified bitumen with active warm additive. *Construction and Building Materials*, 236, 117548. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117548>
- Das, P. K., Tasdemir, Y., & Birgisson, B. (2012). Evaluation of fracture and moisture damage performance of wax modified asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 13(1), 142-155. <https://doi.org/10.1080/14680629.2011.644120>
- Edwards, Y., & Isacsson, U. (2005). Wax in Bitumen. *Road Materials and Pavement Design*, 6(3), 281-309. <https://doi.org/10.1080/14680629.2005.9690009>
- Fazaeli, H., Behbahani, H., Amini, A. A., Rahmani, J., & Yadollahi, G. (2012). High and Low Temperature Properties of FT-Paraffin-Modified Bitumen. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012, 406791. <https://doi.org/10.1155/2012/406791>

- Feitosa, J. P. M., de Alencar, A. E. V., Filho, N. W., de Souza, J. R. R., Castelo Branco, V. T. F., Soares, J. B., Soares, S. A., & Ricardo, N. M. P. S. (2016). Evaluation of sun-oxidized carnauba wax as warm mix asphalt additive. *Construction and Building Materials*, 115, 294-298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.219>
- Gao, J., Yan, K., He, W., Yang, S., & You, L. (2018). High temperature performance of asphalt modified with Sasobit and Deurex. *Construction and Building Materials*, 164, 783-791. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.164>
- Ghuzlan, K. A., & Assi, M. O. A. (2017). Sasobit-Modified Asphalt Binder Rheology. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(9), 04017142. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001996](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001996)
- Ho, S., Church, R., Klassen, K., Law, B., MacLeod, D., & Zanzotto, L. (2006). Study of recycled polyethylene materials as asphalt modifiers. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(8), 968-981. <https://doi.org/10.1139/106-044>
- Jamshidi, A., Hamzah, M. O., Kurumisawa, K., Nawa, T., & Samali, B. (2016). Evaluation of sustainable technologies that upgrade the binder performance grade in asphalt pavement construction. *Materials & Design*, 95, 9-20. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.065>
- Jamshidi, A., Hamzah, M. O., & You, Z. (2013). Performance of Warm Mix Asphalt containing Sasobit®: State-of-the-art. *Construction and Building Materials*, 38, 530-553. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.015>
- Jasso, M., Hampl, R., Vacin, O., Bakos, D., Stastna, J., & Zanzotto, L. (2015). Rheology of conventional asphalt modified with SBS, Elvaloy and polyphosphoric acid. *Fuel Processing Technology*, 140, 172-179. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.09.002>
- Jixing, L. I. (2003). Study on the Conversion Technology of Waste Polyethylene Plastic to Polyethylene Wax. *Energy Sources*, 25(1), 77-82. <https://doi.org/10.1080/00908310290142136>
- Kheradmand, B., Muniandy, R., Hua, L. T., & Solouki, A. (2015). A Laboratory Investigation on the Rheological Properties of Aged and Unaged Organic Wax Modified Asphalt Binders. *Petroleum Science and Technology*, 33(7), 757-764. <https://doi.org/10.1080/10916466.2015.1007383>
- Kim, H., Jeong, K.-D., Lee, M. S., & Lee, S.-J. (2014). Performance properties of CRM binders with wax warm additives. *Construction and Building Materials*, 66, 356-360. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.052>
- Kim, H. H., Mazumder, M., & Lee, S.-J. (2017). Micromorphology and Rheology of Warm Binders Depending on Aging. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(11), 04017226. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002082](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002082)

- Kim, H. H., Mazumder, M., & Lee, S.-J. (2018). Recycling of aged asphalt binders with wax warm additives. *Road Materials and Pavement Design*, 19(5), 1203-1215. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1294102>
- Kumandas, A., Çavdar, E., Oruç, S., Pancar, E. B., & Kök, B. V. (2022). Effect of WCO addition on high and low-temperature performance of RET modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 323. <https://doi.org/ARTN 126561>
10.1016/j.conbuildmat.2022.126561
- Liu, S. (2013). Study of physical and rheological properties of wax modified binders using classic and SHRP testing methods. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 20(2), 132-138. <http://nopr.niscpr.res.in/handle/123456789/17109>
- Lu, X., Kalman, B., & Redelius, P. (2008). A new test method for determination of wax content in crude oils, residues and bitumens. *Fuel*, 87(8), 1543-1551. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.08.019>
- Mazumder, M., Ahmed, R., Lee, M.-S., & Lee, S.-J. (2020). Optical Characterization of Asphalt Binders Containing Wax Additives. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 4170691. <https://doi.org/10.1155/2020/4170691>
- McKay, J., & Branthaver, J. (1995). *Isolation of waxes from asphalts and the influence of waxes on asphalt rheological properties.*
- Merusi, F., Caruso, A., Roncella, R., & Giuliani, F. (2010). Moisture Susceptibility and Stripping Resistance of Asphalt Mixtures Modified with Different Synthetic Waxes. *Transportation Research Record*, 2180(1), 110-120. <https://doi.org/10.3141/2180-13>
- Merusi, F., Filippi, S., & Polacco, G. (2017). Effect of synthetic and functionalized waxes on bituminous binders: From the glassy state to the intermediate viscoelastic domain. *Construction and Building Materials*, 136, 541-555. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.062>
- Merusi, F., & Giuliani, F. (2011). Rheological characterization of wax-modified asphalt binders at high service temperatures. *Materials and Structures*, 44(10), 1809-1820. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9739-4>
- Oner, J., & Sengoz, B. (2017). Investigation of rheological effects of waxes on different bitumen sources. *Road Materials and Pavement Design*, 18(6), 1269-1287. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1209123>
- Padhan, R. K., & Gupta, A. A. (2018). Preparation and evaluation of waste PET derived polyurethane polymer modified bitumen through in situ polymerization reaction. *Construction and Building Materials*, 158, 337-345. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.147>

- Parvez, M. A., Wahhab, H. I. A.-A., Hussein, I. A., & Al-Mehthel, M. (2015). Thermorheology of Polyethylene Wax Modified Sulfur Asphalt. *International Polymer Processing*, 30(2), 202-209. <https://doi.org/10.3139/217.2977>
- Polacco, G., Filippi, S., Paci, M., Giuliani, F., & Merusi, F. (2012). Structural and rheological characterization of wax modified bitumens. *Fuel*, 95, 407-416. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.006>
- Ramonta. (2023). *Products, Asphalt and Bitumen Modification*. Retrieved 04-Apr from <https://www.romonta.de/en/produkte/asphalt-und-bitumen>
- Redelius, P., Lu, X., & Isacsson, U. (2002). Non-classical Wax in Bitumen. *Road Materials and Pavement Design*, 3(1), 7-21. <https://doi.org/10.1080/14680629.2002.9689913>
- Rodríguez-Alloza, A. M., Gallego, J., & Pérez, I. (2013). Study of the effect of four warm mix asphalt additives on bitumen modified with 15% crumb rubber. *Construction and Building Materials*, 43, 300-308. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.025>
- Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L., & Moreno, F. (2012). Warm mix asphalt: an overview. *Journal of Cleaner Production*, 24, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.053>
- Shang, L., Wang, S., Zhang, Y., & Zhang, Y. (2011). Pyrolyzed wax from recycled cross-linked polyethylene as warm mix asphalt (WMA) additive for SBS modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 25(2), 886-891. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.097>
- Silva, H. M. R. D., Oliveira, J. R. M., Peralta, J., & Zoorob, S. E. (2010). Optimization of warm mix asphalts using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1621-1631. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.030>
- Wang, W., Chen, J., Sun, Y., Xu, B., Li, J., & Liu, J. (2017). Laboratory performance analysis of high percentage artificial RAP binder with WMA additives. *Construction and Building Materials*, 147, 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.142>
- Wei, J., Huang, X., & Zhang, Y. (2010). Influence of Commercial Wax on Performance of Asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(8), 760-766. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000016](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000016)
- Yang, P., & Liu, J. (2018). Rheological properties of Deurex – modified WMA binder containing SBS. *Petroleum Science and Technology*, 36(12), 813-819. <https://doi.org/10.1080/10916466.2018.1437633>

- Yang, S., Lee, J., Hwang, S., Kwon, S., & Baek, C. (2012). Development of Warm-Mix Asphalt Additive and Evaluation of Performance. *Transportation Research Record*, 2294(1), 89-97. <https://doi.org/10.3141/2294-10>
- Yang, S., Yan, K., He, W., & Wang, H. (2018). Laboratory Evaluation of Deurex-Modified Asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(1), 04017258. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002111](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002111)
- Yang, S., Yan, K., He, W., & Wang, Z. (2019). Effects of Sasobit and Deurex additives on asphalt binders at midrange and high temperatures. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(12), 1400-1407. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1429611>
- Yi-qiu, T., Lei, Z., Wei-qiang, G., & Meng, G. (2012). Investigation of the effects of wax additive on the properties of asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 36, 578-584. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.024>
- Zhang, F., & Hu, C. B. (2016). The research for crumb rubber/waste plastic compound modified asphalt. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 124(2), 729-741. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-5198-4>
- Zhang, H. L., Duan, H. H., Luo, H., & Shi, C. J. (2021). Synthesis, characterization and utilization of zinc oxide/expanded vermiculite composite for bitumen modification. *Fuel*, 306. <https://doi.org/ARTN 12173110.1016/j.fuel.2021.121731>
- Zhang, Y., Song, Q., Lv, Q., & Wang, H. (2021). Influence of different polyethylene wax additives on the performance of modified asphalt binders and mixtures. *Construction and Building Materials*, 302, 124115. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124115>
- Zhao, X., Yan, K., He, W., & Cai, C. (2017). Effects of Sasobit/Deurex on amorphous poly alpha olefin (APAO) modified asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 154, 323-330. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.234>
- Ziari, H., Akbari, T., Farahani, H., & Goli, A. (2016). The effect of Lucobit polymer on bitumen performance. *Petroleum Science and Technology*, 34(6), 512-516. <https://doi.org/10.1080/10916466.2013.769572>
- Ziari, H., & Babagoli, R. (2015). Evaluation of Fatigue and Rutting Behavior of Asphalt Binder Containing Warm Additive. *Petroleum Science and Technology*, 33(17-18), 1627-1632. <https://doi.org/10.1080/10916466.2015.1084320>

Bölüm 5

YIĞMA YAPILARDA DUVAR BOŞLUK ORANLARI İLE BİNANIN DEPREM PERFORMANSI ARASINDA Kİ İLİŞKİLERİN MODELLENMESİ

Sariye İrem BAYIR¹

Ercan ÖZGAN²

1 Mimar, 1Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mimarlık ABD, Düzce Türkiye, sariyeirembayir@gmail.com, ORCID No: 0009-0000-8012-7009

2 Prof. Dr., Düzce Üniversitesi Sanat Tasarım ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Düzce, Türkiye, ercanozgan@duzce.edu.tr, ORCID No: 0000-0003-4531-6394

1. GİRİŞ

Günümüz inşaat sektörü her ne kadar büyük oranda betonarme ağırlıklı olsa da çelik, ahşap, kompozit ve yığma yapılar olarakta yapılmaktadır. Ülkemizde özellikle kırsal alanda yığma yapı kullanımı yaygın olarak devam etmektedir. Ülkemizin deprem kuşağında yer alması nedeni ile bu yığma yapıların deprem performans durumlarının da incelenmesi gerekmektedir. Özellikle 2018 de yürürlüğe giren Türki Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY-2018) yığma binalar ayrı bir başlık olarak incelenmiştir. Yığma binaların tasarım ve hesap kuralları ile birleşim detayları tanımlanmıştır. Yığma yapılar, doğal ya da yapay taş ve blokların harç adı verilen bağlayıcı malzemelerle veya harçsız olarak örülmesiyle oluşturulan taşıyıcı duvarlardan taş, tuğla, gaz beton, kerpiç gibi birimler ile bunları bağlayan harç birimler olarak ikiye ayrılmaktadır. Yapı taşı, doğal ortamda kayaçların bazı işlemlerden geçirildikten sonra yığma yapı elemanında kullanıldığı yapı malzemesidir. Duvar yapımında kullanılan yapı taşları, TS 699' a göre bulunacak en küçük basınç dayanımı dikkate alınarak sınıflandırılmaktadır (Yetkin, 2022). Tuğla ise kil, killi toprak ve balçığın ayrı ayrı veya harman edilip gerektiğinde su, kum öğütülmüş tuğla ve kiremit tozu gibi malzemeler karıştırılıp makineler yardımıyla şekillendirilip ve kurutulduktan sonra fırınlarda pişirilerek elde edilen yığma yapı malzemesidir (Dündar, 2013). Beton briketler hafif agrega, volkanik silikat pomza veya Bims taşı ile çimento ve bazı katkı malzemelerinin harman edilip özel kalıplarda dövme pres veya vibratörle sıkıştırılarak imalatı yapılır (Yıldırım, 2007). Gaz beton, günümüzde pek çok alanda ve betonarme yapılarda dolgu duvar malzemesi olarak kullanılan yapı malzemesidir. Hacimsel olarak %70-80 boşluklu yapıya sahip olup gözenekli, hafif, ısı iletkenliği düşüktür. Silisli agrega, kireç ve/veya çimentonun harmanlanıp ilave malzemeler eklenerek buharla sertleştirilmesinden elde edilmektedir. Kerpiç ise kil, killi toprağın içerisine saman veya lifli otlar gibi malzemelerin su ile karıştırılıp kalıplara konularak güneş ışığı altında kurutulmasıyla elde edilen bir yapı

malzemesidir (Karaton, 2004). Harç ise kum, çimento/kireç ile uygun oranlarda karıştırılmasından elde edilen bir bağlayıcı yapı malzemesidir. Yığma yapı elemanları temeller, duvarlar, kemerler, hatıl ve lentolar, kubbe, tonoz, döşemeler vb olarak ifade edilebilir. Yığma yapılar donatılı ya da donatısız olarak tasarlanabilir. Yığma yapıların çeşitli yükler altında ki davranışları, rijitlikleri, deprem hasarlarının azaltılması, güçlendirilmesi, yeni tasarım yaklaşımları ile ilgili olarak son zamanlarda birçok çalışma yapılmıştır (Sayın, 2009; Ural, 2009; Kayırğa, 2017; Çöğürçü, 2007; Uzun 2017; Öz Saraç 2008; Bayülke 1999; Kalkan 2008; Ediz 2006; Türer vd., 2005). Yığma binalarda duvar boşluk oranlarının binanın deprem performansı üzerinde ki etkilerinin analizi ve modellenmesi ile ilgili detaylı çalışmalar olmadığı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, yığma binalarda duvar boşluk oranlarının binanın deprem performansına etkisi istatistiksel olarak incelenmiş ve duvar boşluk oranlarına bağlı olarak matematiksel modellerle oluşturulmuş ve yapı modellerinin deprem performans parametreleri için tahmin modelleri oluşturulmuştur. (Bayır, 2024).

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Materyal

Yığma binalarda duvar boşluk oranları ile binanın deprem performans parametreleri arasındaki ilişkilerin incelenmesi ve performans parametrelerinin duvar boşluk oranlarına bağlı olarak modellenmesi amacı ile dış ölçüleri 10x10 m kare plan olarak dört ayrı yapı modeli tasarlanmıştır. Yapı modellerinin iç kısımlarında toplam altı ayrı mahal ve bir koridor oluşturulmuştur. Modellerin iç kısımlarında ki tüm mimari özellikler aynı olacak şekilde uygulanmıştır. Yapı modellerinde ki farklılıklar dış duvarlarda bırakılan kapı pencere boşluk oranlarıdır. Yapı modelleri için öncelikle 2018 TBDY’ de tanımlanan proje şartlarına uygun olarak basit mimari plan çizilmiş ve bu plan “Referans Yapı Modeli” olarak alınmıştır. 2018 TBDY şartlarına uygun olarak tasarlanan Referans Yapı modelinin dış duvar boşluk oranı dış duvarda ki ilgili eksende bulunan

duvar yüzey alanının yaklaşık %21,4'ü ne tekabül etmiştir. Diğer yapı modelleri ise %10, %20 ve %30 boşluk oranları oluşturacak şekilde planlanmıştır. Yapı modellerinin planları ve genel özellikleri üçüncü bölümde verilmiştir. Analizi yapılan model yapılarda kullanılan malzeme özellikleri aşağıda gösterilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Yapı modellerinde kullanılan beton ve çelik malzemenin özellikleri

BETON ve ÇELİK MALZEME BİLGİLERİ					(kg/cm ²)			
Yapı Elemanı	Malzeme	Elastisite Modülü		Beton dayanım	Celik akma	gerilmesi	gerilmesi	Birim Ağırlık
		E	G	gerilmesi	(Genel)	(Etriye)		t/m ³
Plak/Nervür	E1	C25	302500	121000	250	4200	4200	2.50
HNP		C30	318000	127200	300	5000	5000	2.50
Temel	E1	C25	302500	121000	250	4200	4200	2.50
Kiriş/Kolon	E1	C25	302500	121000	250	4200	4200	2.50
Yığma Duvar	E2	Tuğla	21000	8400	fem=14.0, to=1.00	Tuğla	-	1.80

HNP : Hazır Nervürlü Plak

TAŞIMA GÜCÜ MALZEME KATSAYILARI	BETON	ÇELİK
YENİ ELEMANLAR	1.50	1.15
PERFORMANS HESABI TUM ELEMANLAR	1.00	1.00
TAŞIMA GÜCÜ YÜK KATSAYILARI	SABİT YÜK	HAREKETLİ YÜK
	1.40	1.60

2.2. Metot

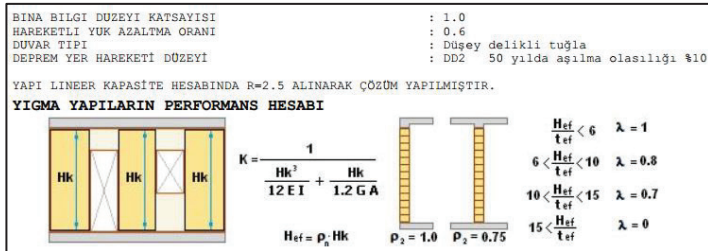
Oluşturulan yapı modellerinin deprem performans analizleri Sta4Cad-V14.1 versiyonu ile yapılmıştır. Analizde yapı modellerimiz süneklik düzeyi sınırlı taşıyıcı sistemler olarak “donatısız yığma binalar” olarak analiz edilmiştir. Performans analizlerinde Deprem Düzeyi 2 (DD-2), taşıyıcı sistem davranış katsayısı R=2,5, Dayanım fazlalığı katsayısı D=1,5 olarak Ta ve Tb spektrum karakteristik periyotları sırası ile 0,062 ve 0,308 olarak alınmıştır. Deprem hesabı MOD süperpozisyonu ile Modal analiz olarak yapılmıştır. Analizde kullanılan diğer parametreler aşağıda gösterilmiştir (Şekil 1 ve Şekil 2).

DEPREM RAPORU	
DEPREM STANDARDI	: TBDY2018 CODE
DEPREM ANALIZI	: MOD SÜPERPOZİSYONU İLE MODAL ANALİZ
DEPREM YER HAREKETİ DÜZEYİ	: DD2 50 yılda aşılma olasılığı %10
ZEMİN SINIFI	: ZC
BİNA KOORDİNATI (ENLEM/BOYLAM)	: 36.98868° / 30.98273°
YEREL SPECTRAL İVME KATSAYISI	Ss/S1 : 0.517 / 0.137
TASARIM SPECTRAL İVME KATSAYISI	Sds/Sd1 : 0.669 / 0.206 DD2, 0.268 / 0.082 DD3
YAPI DAVRANIŞ KATSAYISI	R : 2.50 DONATISIZ YIĞMA YAPI - E22
SİSTEM DAYANIM FAZLALIĞI KATSAYISI	D : 1.5
DEPREM TASARIM SINIFI	DTS : 2
BİNA YÜKSEKLİK SINIFI	BYS : 8 Hn=2.8m
BİNA KULLANIM SINIFI	BKS : 3 I = 1.0
Modal Analiz min. deprem yükü oranı	β : 0.9
Deprem yükü eksantirisitesi	: 0.000
Deprem modal analiz ÇQC sönüm oranı	: %5
DIYAFRAM SAYISI	: 1
Diyafram tanımı : KAT(diyafram no)	

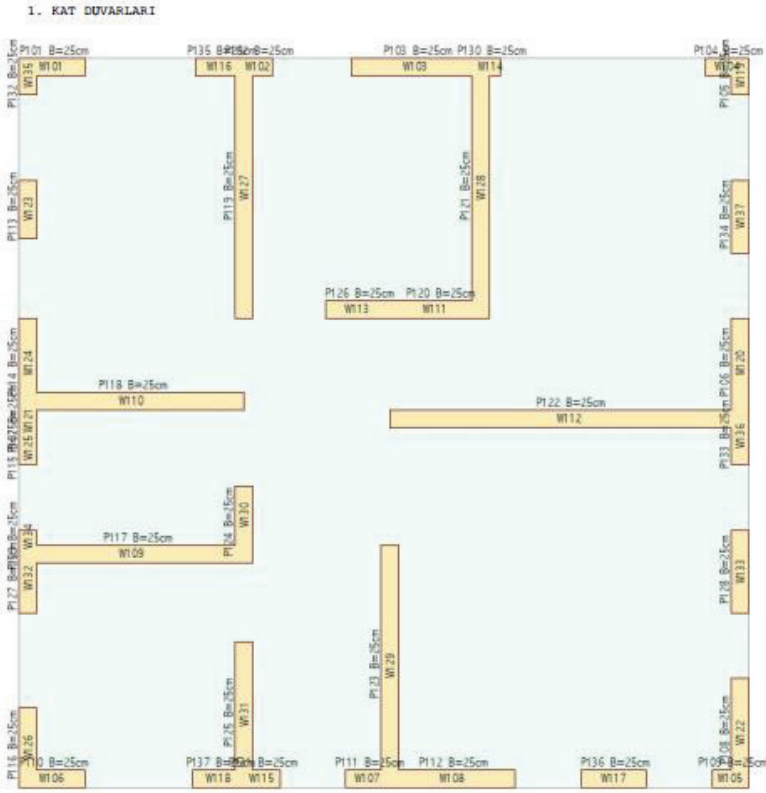
PROJE İSMİ	: yığma
KAT ADEDİ	: 1
Bir kattaki KOLON SAYISI	: 0
X yönü aks sayısı	: 31
Y yönü aks sayısı	: 22
DEPREM YER HAREKETİ DÜZEYİ	: DD2 50 yılda aşılma olasılığı %10
ZEMİN SINIFI	: ZC
BİNA KOORDİNATI (ENLEM/BOYLAM)	: 36.98868° / 30.98273°
YEREL SPECTRAL İVME KATSAYISI	Ss/S1 : 0.517 / 0.137
YAPI DAVRANIŞ KATSAYISI	R : 2.50
SİSTEM DAYANIM FAZLALIĞI KATSAYISI	D : 1.5
SPEKTRUM KAREKTERİSTİK PERİYODU	(Ta/Tb) : 0.062 / 0.308
HAREKETLİ YÜK KATSAYISI	(n) : 0.3
SIFIR RÖLATİF HAREKET YÜKSEKLİĞİ	(m) : 0.00
HAREKETLİ YÜK AZALTIMA KATSAYISI	(Cz) : 1.0
ZEMİN TAŞIMA GÜCÜ TASARIM GERİLMESİ	(t/m ²) : 21.0
ZEMİN YATAK KATSAYISI	(t/m ³) : 1500.0
BETON YOĞUNLUĞU	(t/m ³) : 2.5
GENLEŞME İSİ FARKI	(°C) : 0.0
STATİK ANALİZ YÖNTEMİ	: FEA3D LINEAR ANALİZ / Birim Mesh Genisligi 1m
DEPREM STANDARDI	: TBDY2018 CODE
BETONARME HESAP YÖNTEMİ	: TAŞIMA GÜCÜ YÖNTEMİ TS500-2000
BETONARME KESİTİ DONATI HESAP YÖNTEMİ	: BRÜT KESİTE GÖRE
DEPREM HESABI YÖNTEMİ	: MOD SÜPERPOZİSYONU İLE MODAL ANALİZ
TEMEL ANALİZ OPSİYONU	: TEMELLER DIKKATE ALINMADAN, YAPI ANALİZİ
Zemin gerilmesi hareketli yük azaltma degeri	: 1.00
Kolonun oturduğu giriş tesir çarpanı	: Düşey deprem analizi yapılmıştır.
Kiriş & Kolon rijitlik bölgesi opsiyonu	: Yarı Sonsuz Rijit davranış
Kiriş uçlarında elastik ankastrelik opsiyonu	: Elastik ankastre

Şekil 1. Yapı modellerinin deprem performans analizi parametreleri

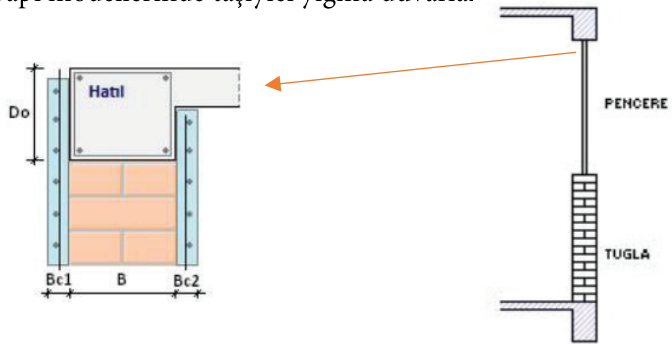
Yapı modellerinin deprem performans analizlerinde düşey delikli tuğla duvar seçilmiş olup tuğla duvarın Rijitlik modeli parametreleri, performans analizinde yığma yapı taşıyıcı duvar planı, hatlı modeli ve duvar kesiti aşağıda gösterilmiştir (Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4).



Şekil 2. Yığma yapı modellerinde duvarın Rijitlik hesap parametreleri

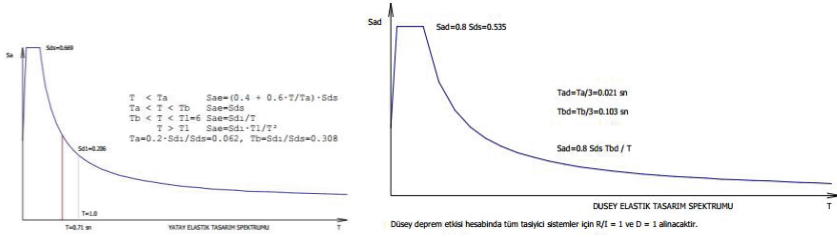


Şekil 3. Yapı modellerinde taşıyıcı yığma duvarları



Şekil 4. Yapı modellerinin şematik duvar ve hatıl kesiti

Yapının dinamik analizinde kullanılan tasarım spektrum bilgileri “Yatay elastik tasarım spektrumu ve Dikey elastik tasarım spektrum grafikleri ayrı ayrı verilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Yatay ve düşey yönler için Tasarım spektrum değerleri

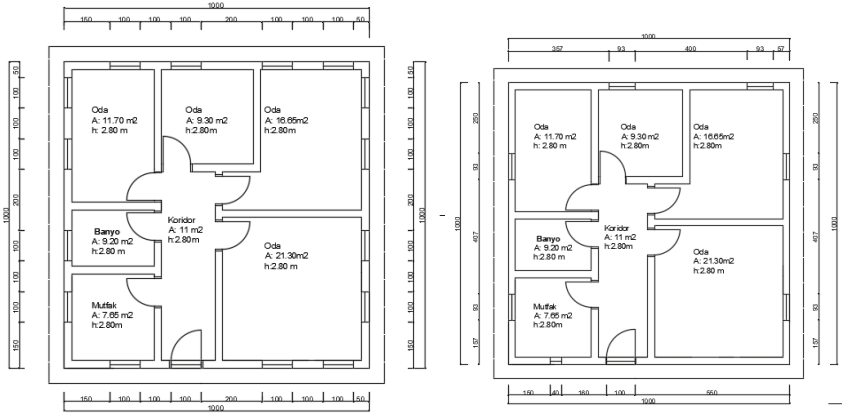
3. YAPI MODELLERİ VE GENEL ÖZELLİKLERİ

Yığılma binalarda duvar boşluk oranlarının binanın deprem davranışına etkisinin incelenmesi amacı ile toplam 4 adet yığılma bina modeli projelendirilmiştir. Bu binalarda pencerelerin denizlik seviyelerine kadar olan yükseklikleri hepsinde sabit 90 cm alınırken pencere yükseklikleri de hepsinde 150 cm alınmıştır. Kat yüksekliği 280 cm ve çatı en üst noktası da 460 cm olarak oluşmuştur. Oluşturulan yapı modellerinde duvar boşlukları 1'nci model olan referans yapı modeli 2018-TBDY deprem yönetmeliği plan şartlarına uygun olarak projelendirilmiştir. Diğer yapı modellerinde ise 2'nci modelde dış duvar boşluk oranı %10, 3'ncü modelde %20 ve 4'ncü modelde ise %30 olarak dış duvar boşlukları oluşturulmuştur. Yapı modellerinin iç kısımlarında oluşturulan mahallerin tamamı aynı ölçülerde, aynı kapı boşluğunda ve birbirinin aynısı olacak şekilde projelendirilmiştir. Dış duvar boşlukları referans projede %21,4 değerleri için ise %10, %20 ve %30 oranında boşluk olarak planlanmış ve analiz edilmiştir. Oluşturulan yapı modellerinin basit planları ve genel özellikleri aşağıda alt başlıklar halinde verilmiştir.

3.1. Referans Yapı ve İkinci Yapı Modeli

Referans yapı modelinde planımız 10x10 m kare plan olarak tasarlanmış olup dış duvar, kapı, pencere ve dış boşlukları 2018 Deprem yönetmeliği şartlarına uygun olarak yapılmıştır. Oluşturulan pencere boşlukları 100 cm

genişliğinde ve 150 cm yüksekliğinde planlanmış olup 1 koridor ve 6 ayrı mahalden oluşturulmuştur. Yapının dış duvarında ki kapı-pencere boşluk oranları, ilgili doğrultuda ki duvar yüzey alanının %'si cinden %21,4'dür. İkinci yapı modelinde de planımız 10x10 m kare plan olarak tasarlanmış olup dış duvar, kapı, pencere ve dış boşlukları dış duvarlarda ilgili aks doğrultusunda ki duvar yüzey alanlarının %10'u oranında yapılmıştır. Yapı modellerinin basit planları aşağıda gösterilmiştir (Şekil 6 ve Şekil 7).

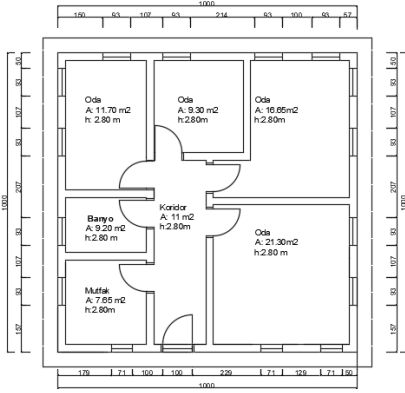


Şekil 6. Referans Yapı Modelinin planı. Şekil 7. İkinci Yapı Modelinin basit planı

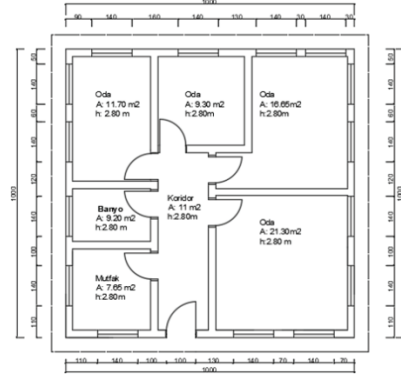
3.2. Üçüncü ve Dördüncü Yapı Modelleri

Üçüncü yapı modelinde de planımız 10x10 m kare plan olarak tasarlanmış olup dış duvar, kapı, pencere ve dış boşlukları dış duvarlarda ilgili aks doğrultusunda ki duvar yüzey alanlarının %20'si oranında yapılmıştır. Oluşturulan kapı-pencere boşlukları planda her bir cephe için ayrı ayrı gösterilmiş olup pencere yükseklikleri sabit değer olarak 150 cm yüksekliğinde planlanmıştır. Dördüncü yapı modelinde de planımız 10x10 m kare plan olarak tasarlanmış olup dış duvar, kapı, pencere ve dış boşlukları dış duvarlarda ilgili aks doğrultusunda ki duvar yüzey

alanlarının %30'u oranında yapılmıştır. Yapı modellerinin basit planları aşağıda gösterilmiştir (Şekil 8 ve Şekil 9).



Şekil 8. Üçüncü Yapı Modelinin basit planı.



Şekil 9. Dördüncü Yapı Modelinin basit planı.

Modelinin basit planı.

4. DEPREM PERFORMANS ANALİZ SONUÇLARI

Yapı modellerinin Deprem performans analizleri Sta-4 CADD paket program ile yapılmıştır. Analizlerde yapıların ağırlıkları, deprem kuvvetleri, görelî kat ötelenmeleri, taban kesme kuvvetleri ve devrilme momentleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar tablo halinde bir bütün olarak gösterilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Yapı Modelleri ve Performans Parametreleri

Performans Parametreleri	Tanımlar	Yapı Modelleri			
		1.Referans yapı Modeli (%21,4)	2'nci Yapı Modeli (%10)	3'ncü Yapı Modeli (%20)	4'ncü Yapı Modeli (%30)
Yapıların Kütleleri (t)	W _g , sabit	114,03	152,75	119,08	108,6
	W _q , hareketli	13,33	12,21	13,53	13,26
	ΣW _k , azaltılmış	118,035	156,412	123,143	112,576
	Modal Analiz	18,69	26,53	20,06	17,23

Deprem Kuvvetleri (t)	Eşdeğer Deprem Yüklü Yöntemi	31,62	41,88	33,00	30,17
	Deprem Yüklü	28,46	37,69	29,703	27,15
Görel kat Ötelenmeleri (mm)	u _{iX} , u _{iY} Deplasmanlar	1,2	4,2	1,2	1,2
Taban Kesme Kuvvetleri (t)	V _{kx}	31,58	41,85	32,95	30,12
Devrilme Momenti (tm)	M=W _i *H _i	330,5	437,95	344,80	315,21

5. PERFORMANS PARAMETRELERİNİN DUVAR BOŞLUK ORANLARINA GÖRE MODELLENMESİ

5.1. İstatistiksel Analizler

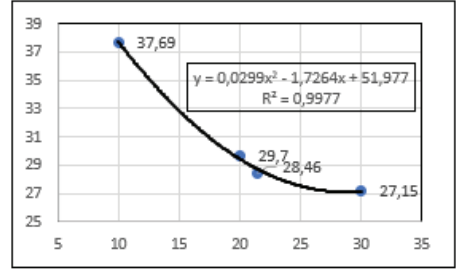
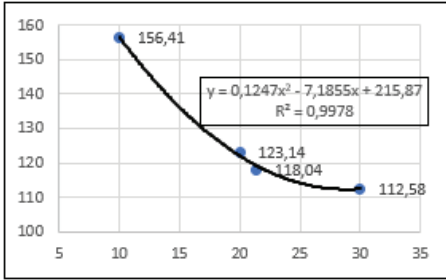
İncelenen yapı modellerinin performans analiz sonuçlarının tanımlayıcı istatistiksel değerleri aşağıda gösterilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Tanımlayıcı istatistiksel değerler

	N	Aralık	Min.	Max.	Ortalama		Std. Sapma	Varyans
					İstatistik	Std. Error		
Toplam W	4	43,83	112,58	156,41	127,5413	9,86147	19,72294	388,995
Deprem kuvveti	4	10,54	27,15	37,69	30,7500	2,37118	4,74237	22,490
Kat ötelenmesi	4	3,00	1,20	4,20	1,9500	,75000	1,50000	2,250
Taban kesme kuvveti	4	11,73	30,12	41,85	34,1250	2,63902	5,27805	27,858
Devrilme momenti	4	122,74	315,21	437,95	357,1150	27,61392	55,22784	3050,115
Valid N	4							

5.2. Duvar Boşluk Oranlarına Göre Performans Parametrelerinin Modelleri

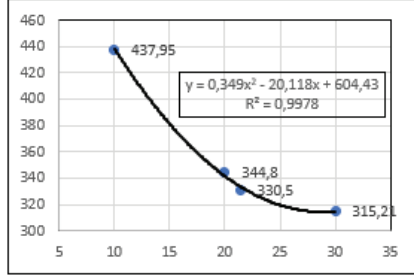
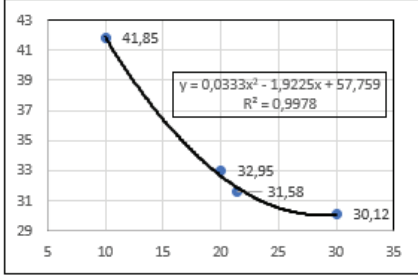
Dört ayrı yapı modelinde ki duvar boşluk oranları bağımsız değişken olarak “x” ekseninde buna karşılık deprem performans parametrelerinden yapı modellerinin; toplam ağırlıkları, etki eden deprem kuvvetleri, oluşan taban kesme kuvvetleri ve devrilme momentleri bağımlı değişken olarak “y” ekseninde gösterilmiştir. Yapılan analizler sonucunda duvar boşluk oranlarına göre yapı modellerinin toplam ağırlıkları ve deprem kuvvetlerinin tahmin modelleri aşağıda gösterilmiştir (Şekil 10 ve 11). Şekil 10 ve Şekil 11’de “x” eksenindeki boşluk oranlarına göre yapıların ağırlıkları ve yapıya etki eden deprem kuvvetleri $R^2=0,99$ düzeyi ile mükemmel oranda tahmin edilebilmektedir. Bu model denklemler ile herhangi bir duvar boşluk oranı için yapının ağırlığı ve yapıya etki edecek deprem yükü nere de ise %100 oranda tahmin edilebilmektedir.



Şekil 10. Boşluk oranına göre ağırlık tahmini Şekil 11. Boşluk oranına göre deprem kuvveti tahmini

Yapılan analizler sonucunda duvar boşluk oranlarına göre yapı modellerinin taban kesme kuvvetleri ve devrilme momentlerinin tahmin modelleri aşağıda gösterilmiştir (Şekil 12 ve Şekil 13). Şekil 12 ve Şekil 13’te “x” eksenindeki boşluk oranlarına göre yapıların taban kesme kuvvetleri ve devrilme momentleri $R^2=0,99$ ile tahmin edilebilmektedir. Herhangi bir

duvar boşluk oranı denklemde yerine yazılarak taban kesme kuvvetleri ve devrilme momentleri nerede ise %100 oranda tahmin edilebilir.



Şekil 12. Boşluğa göre taban kesme kuvveti Şekil 13. Boşluk oranına göre devrilme momenti

Boşluk oranı ile yapılarda oluşan deplasmanlar arasında önemli bir fark olmadığı deplasmanların birbirine çok yakın olduğu bunun nedeninin ise yapının süneklik düzeyi sınırlı taşıyıcı sistem olması ve donatısız olmasından kaynaklanmaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yığma yapılarda duvar boşluklarının yapının deprem performansı parametreleri ile olan ilişkisini incelemek amacı ile yapılan bu çalışmada yapıların boşluk oranlarına bağlı olarak yapı ağırlıklarının, deprem kuvvetlerinin, taban kesme kuvvetlerinin ve devrilme momentlerinin modellenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda çalışma sonucunda aşağıda ki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Oluşturulan yapı modellerinde duvar boşluk oranına bağlı olarak yapı ağırlıklarının, deprem kuvvetlerinin, taban kesme kuvvetlerinin ve devrilme momentlerinin mükemmel düzeyde $R^2=0,99$ ile tahmin edilebileceği görülmüştür.
- Duvar boşluk oranı azaldıkça yapı kütlelerinin azaldığı ve oransal olarak %10 boşluklu yapı modeline göre sırası ile %20 duvar boşluğu olan yapıda %21,27 oranında azaldığı, %21,4 oranında boşluğu olan

yapıda %24,53 oranında azaldığı ve %30 oranında boşluğu olan yapıda ise %28,02 oranında azaldığı görülmüştür.

- %10 duvar boşluğuna sahip plana etki eden deprem yükü Modal analizde 26,53 t bulunurken, %20 ile %21,4 ve %30 boşluk bulunan yapı modellerinde ise sırası ile 20,06 t, 18,69 t ve 17,23 t olarak bulunmuştur. Bu durumda deprem kuvvetleri açısından yapı modellerinin sırası ile %24,38, %29,55 ve %35,05 oranlarında daha az yük taşıma kapasitesinde oldukları, boşluk oranlarının artması ile yapı modellerinin deprem kuvvetlerine karşı dirençlerinin azaldığı görülmüştür.
- Boşluk oranı en az olan %10 boşluk oranlı yapı modelinin 41,85 ton' luk taban kesme kuvvetlerini karşılayabildiği buna karşın %20 boşluk, %21,4 boşluk ve %30 oranında ki boşluk oranlı yapı modellerinde ise taban kesme kuvvetinin sırası ile 32,95 t, 31,58 t ve 30,12 t olduğu görülmüştür. Boşluk oranı arttıkça yapı modellerinin taban kesme kuvvetlerine karşı dirençlerinin azaldığı ve bu azalmanın %20 boşluk, %21,4 boşluk ve %30 boşluk için sırası ile %21,26, %24,54 ve %28,02 oranlarında olduğu görülmüştür.
- En büyük devrilme momentinin 437,95 tm ile %10 boşluk oranına sahip yapıda olduğu buna karşın en düşük devrilme momentinin ise 315,21 tm ile %30 boşluk oranına sahip yapıda olduğu görülmüştür. Bu durumda devrilme momenti açısından oluşan kayıpların ise sırası ile %20 boşluk için %21,26 ve %21,4 boşluk için ise %24,53 oranında olduğu görülmüştür.

Bu sonuçlar dikkate alındığında, yığma yapılarda duvar boşluk oranlarının yapıların deprem etkisi altındaki davranışlarını ciddi oranlarda etkilediği, duvar boşluk oranları arttıkça yapıların depreme karşı dirençlerinin azaldığı ve bu azalmanın çok ciddi seviyelere ulaşabildiği görülmüştür.

Yığma yapıların taşıyıcı özellikleri ve Rijitliği, deprem anındaki davranışlarını doğrudan etkilemektedir. Özellikle bağlayıcı malzemelerin ve kullanılan tuğla veya doğal taşın mekanik özellikleri, yapının gevrek bir

davranış sergilemesine yol açmaktadır. Bu nedenle, yığma yapıların deprem bölgelerindeki kat sayılarının sınırlandırılması oldukça önemli.

Yığma yapılarda hasar oluşumunu tetikleyen bu faktörler, deprem güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle duvar köşe birleşim detaylarının düzgün yapılmaması ve yapı malzemelerinin dayanıklılığının düşük olması, yapının deprem anında maruz kaldığı yükleri etkileyerek hasar riskini artırabilir. Ayrıca, simetrik olmayan tasarımlar, yapının kütle ve Rijitlik merkezlerinin farklı olması gibi nedenler, yapının burulma etkilerine maruz kalmasına ve dolayısıyla daha fazla hasar görmesine neden olabilir. Yığma yapılarda, kapı ve pencere boşlukları gibi köşe olan bölgelerde kapı pencere boyutlarının küçültülmesi yapının Rijitliğini artırarak deprem karşı dayanıklı olmasını sağlar. Tasarımda bu hususlara dikkat edilmesi önemli faydalar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Bayır, İ. S. (2024). "Yığma Binalarda Duvar Boşluk Oranlarının Binanın Deprem Davranışına Etkisinin İncelenmesi" Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Düzce.
- Bayülke, N. (1999). Depremde Hasar Gören Yapıların Onarımı ve Güçlendirilmesi, İnşaat Mühendisleri Odası, İzmir Şubesi, İzmir
- Çöğürçü, M. T. (2007). Yığma Yapıların Yatay Derz Güçlendirme Yöntemiyle Güçlendirilmesi. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Ediz, İ. (2006). Kâgir Yapılarda Kullanılan Taşıyıcı Duvarların Hasır Çelik Donatı ve Kendiliğinden Yerleşen Beton ile Güçlendirilmesinin Deneysel İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kalkan, N. (2008). Düzlem Dışı Tersinir Yüklenen Yığma Yapıların Donatılı Püskürtme Beton ile Güçlendirilmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Kayırga, O. M. (2017). Yığma Yapıların Deprem Davranışının Analitik ve Deneysel Olarak Belirlenmesi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Özsaraç, S. (2008). Yığma Yapılarda Taşıyıcı Tuğla Duvarların GFRP ile Güçlendirilmesinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sayın, E. (2009). Yığma Yapıların Lineer Olmayan Statik ve Dinamik Analizi Yığma Yapıların Lineer Olmayan Statik ve Dinamik Analizi, 1-126.
- TBDY-2018 Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar, 2018
- Türer, A., Şimşek, Ç., Gölalmış, M., Özden, B., Dilsiz, A. ve Özen, Ö. (2005). Kullanılmış Araba Lastiği ile Güçlendirme Antakya Pilot Uygulaması ve Dekoratif Çözümler. YDGA 2005 Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Artırılması Çalıştayı, ODTÜ, Ankara. 1- 8.

Ural, A. (2009). Yığma Yapıların Doğrusal ve Doğrusal Olamayan Davranışlarının İncelenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.

Uzun, M. (2017). Yığma Yapıların Deprem Performansının Değerlendirilmesi ve Bir Güçlendirme Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya