

Editör

Doç. Dr. Alper POLAT

gece
kitaplığı

**İnşaat
Mühendisliği
Alanında
Uluslararası
Araştırmalar ve
Değerlendirmeler**

**Ekim
2025**

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • Eda Altunel

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Gece Kitaplığı

Birinci Basım / First Edition • © Ekim 2025

ISBN • 978-625-388-793-3

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Gece Kitaplığı'na aittir.

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

Gece Kitaplığı / Gece Kitaplığı

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

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 0312 384 80 40

web: www.gecekitapligi.com

e-mail: gecekitapligi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 42488

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ALANINDA
ULUSLARARASI
ARAŞTIRMALAR VE
DEĞERLENDİRMELER

EDİTÖR

DOÇ. DR. ALPER POLAT

İÇİNDEKİLER

Bölüm 1

KÜRLEME SÜRECİNİN BETONUN PERFORMANSINA ETKİSİ

Selçuk MEMİŞ, Hasbi YAPRAK, Selma İZBELİ TURHAL—1

Bölüm 2

TÜRKİYE'DE OTOMOBİL TERCİHLERİNDE YAKIT TÜRLERİNİN EVRİMİ

Eren DAĞLI—35

Bölüm 3

BOLU İLİNDE BULUNAN 10 ADET BETONARME YAPININ SUCUOĞLU SOKAKTAN TARAMA YÖNTEMİ İLE DEPREM PERFORMANSININ BELİRLENMESİ

Melike GÜNGÖR YÜCEKAYA, Memduh KARALAR,

Necati MERT—53

Bölüm 4

KARBON NÖTR YAPILAR

Aylin AKYILDIZ—69

Bölüm 1

KÜRLEME SÜRECİNİN BETONUN PERFORMANSINA ETKİSİ

Selçuk MEMİŞ¹, Hasbi YAPRAK²,

Selma İZBELİ TURHAL³

1 Doç. Dr.; Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü. smemis@kastamonu.edu.tr, Orcid: 0000-0002-2588-9227

2 Prof. Dr.; Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü. hyaprak@kastamonu.edu.tr, Orcid: 0000-0003-1700-430X

3 Doktorant; Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, selmaizbeli3@gmail.com, Orcid: 0009-0006-0319-5239

1. GİRİŞ

Beton, yapı malzemeleri arasında en yaygın kullanılan ve performansı birçok değişkene bağlı olan karmaşık bir kompozit malzemedir. Bu performansı doğrudan etkileyen en kritik süreçlerden biri kürlenme işlemidir. Kürlenme, çimento hidratasyonunun sürekliliğini sağlamak ve bu sürecin kontrollü bir şekilde ilerlemesini temin etmek amacıyla nem ve sıcaklık koşullarının düzenlenmesi esasına dayanır. Başka bir deyişle, kürlenme; taze betonun yeterli nem içeriğini koruyarak hidratasyonun devamlılığını sağlayan ve böylece çatlama, çekme gerilmeleri ve diğer erken yaş bozulmalarını önlemeyi hedefleyen sistematik bir süreçtir.

Uygunoğlu (2020)'ya göre, kürlenme işlemi taze beton matrisinde önceden depolanmış suyun veya su tutma kapasitesine sahip katkıların kontrollü biçimde serbest bırakılmasıyla gerçekleştirilir. Bu yaklaşım, özellikle düşük su/bağlayıcı oranına sahip karışımlarda otojen büzülme ve rötre kaynaklı çatlakların sınırlandırılmasına katkı sağlar. Kürlenme işleminin yetersiz uygulanması ya da yapılmaması, hidratasyonun erken evrelerinde rötre ve yetersiz hidratasyon oluşumuna neden olur. Ayrıca, dış ortamdan beton bünyesine giren su, klorür (Cl^-), sülfat (SO_4^{2-}) ve karbondioksit (CO_2) gibi zararlı iyonların taşıyıcısı haline gelerek betonda çatlak oluşumu, dökülme vb. hasar oluşumlarına neden olur. Bu bağlamda, bazı araştırmacılar, karışıma kürlenme amacıyla fazladan su ilavesinin betonun hizmet ömrü üzerinde olumsuz etkilere yol açabileceğini bildirmiştir (Kara vd., 2020; Şimşek vd., 2022). Betonun uzun dönem performansı, karışım suyunun miktarı ve yönetimiyle doğrudan ilişkilidir. Rötre ve bağlı çatlak oluşumu ve geçirimsizlik gibi sorunlar çoğunlukla eşzamanlı olarak geliştiğinden, bu parametrelerin bütüncül biçimde ele alınması gereklidir (Öztürk & Öner, 2023).

Hidrofobik (suyu itici) ve hidrofilik (suyu seven) malzemelerin etkileri bu noktada önem taşır. Hidrofobik malzemeler, betonun suya karşı direncini artırmakla birlikte, gözenek yapısını değiştirerek hidratasyon sürecini olumsuz etkileyebilir. Bu durum betonun basınç dayanımını düşürürken geçirgenliği artırabilir. Buna karşın hidrofilik malzemeler, suyu emerek betonun içsel kürlenmesine yardımcı olur, ancak aşırı su emilimi dayanıklılığı azaltabilir (Büyüker vd., 2024; Akkaya & Çağatay, 2016). Dolayısıyla ideal sistem, hem hidrofilik hem de hidrofobik özellikleri dengeleyerek betonun suya karşı davranışını kontrol altına alabilen bir malzeme gerektirir.

Betonun hizmet ömrünü uzatmak ve kuruma büzülmesinden kaynaklanan çatlak oluşumunu engellemek, dış etkilere karşı geçirimsizliği artırmak açısından büyük önem taşır. Zira bu çatlaklar, zararlı iyonların

betona nüfuz etmesi ve donatı korozyonunun hızlanması için kritik giriş noktalarıdır (Uygunoğlu, 2020; Kılınçarslan & Coşkunsu, 2022; Koçak & Savaş, 2018). Dnyanoba ve Madhukar (2020), betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin hidrasyon sürecinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlara bağlı olduğunu vurgulamıştır. Bu doğrultuda etkili bir kürleme için üç temel unsur gereklidir:

1. Su: Hidrasyonun devamını sağlamak için yeterli nemin korunması,
2. Sıcaklık: Kimyasal reaksiyonların sürdürülebilmesi için ortam sıcaklığının en az 10 °C veya üzerinde tutulması,
3. Zaman: Dayanıklılığın gelişebilmesi için uygun nem ve sıcaklık koşullarının 3–7 gün süreyle korunması.

Dıştan kürlemenin zor olduğu kalın kesitli, karmaşık geometrili veya yoğun donatılı yapılarda, içsel kürleme uygulamaları, hidrasyonun sürekliliğini sağlayarak iç nem gradyanını dengeler. Kürlemenin temel amacı, çimentoda birincil bağlayıcı faz olan kalsiyum silikat hidrat (C–S–H) jeli oluşumunu teşvik etmektir. Bu süreç, hem beton içindeki hem de yüzeydeki bağıl nemin korunmasına yardımcı olurken, sıcaklık ve nem farklılıklarından doğan iç gerilmeleri azaltır.

Günümüzde gelişen sanayi ve teknolojik imkanlar sayesinde, klasik suyla kürleme yöntemlerinin yanı sıra buhar, membran, polimer film, içsel kürleme ve mikrokapsülasyon gibi modern kürleme teknikleri geliştirilmiştir. Bu yenilikçi yöntemler, betonun erken yaş dayanım gelişimini hızlandırmak, geçirimsizliğini artırmak ve uzun vadeli dayanıklılığını iyileştirmek amacıyla uygulanmaktadır.

2. BETONDA KÜRLEME SÜRECİ VE ÖNEMİ

Beton, 21. yüzyılda inşaat sektörünün temel yapı taşı olarak kabul edilen ve başta konut yapıları olmak üzere su yapıları, tuzlu topraklı bölgelerdeki altyapı sistemleri ve çok sayıda mühendislik projesinde hayati öneme sahip bir yapı malzemesidir. Bu çok yönlü malzemenin performansını etkileyen pek çok faktör bulunmakla birlikte, en kritik unsurlardan biri kürleme sürecidir. Kürleme; hem çimento hidrasyonunun tamamlanması hem de buharlaşan suyun telafisi açısından betonun nihai dayanım ve dayanıklılık özelliklerini belirleyen temel bir işlemdir.

Kütükoğlu'na (2022) göre, betonun hidrasyonunun erken aşamalarında yeterli kürleme uygulanmaması, kuruma büzülmesi veya eksik hidrasyon oluşumuna neden olarak betonun nihai kalitesinin düşme-

sine yol açar. Bu durum, malzemenin istenen mekanik dayanım değerlerine ulaşmasını engelleyerek uzun vadeli performansı olumsuz etkiler.

Genel olarak kürlenme yöntemleri iki ana başlık altında incelenebilir: yüzey kürlenme ve içsel kürlenme. Bununla birlikte Katkı Üreticileri Birliği, beton kürlenme yöntemlerini daha ayrıntılı biçimde sınıflandırarak dört temel kategoriye ayırmıştır (Nevzat & Erol, 2023):

1. Su ile kürlenme,
2. Kimyasal katkı ile kürlenme,
3. Yüzeyde su emici malzemeler kullanılarak yapılan kürlenme,
4. Buharlaşmayı engelleyen malzemeler ile kürlenme.

Her ne kadar farklı sınıflandırmalar yapılmış olsa da, yüzey kürlenme, esasen beton yüzeyine sürekli su uygulanarak iç nemin korunması esasına dayanır. Bu yöntemde amaç, betonun yüzeyinde su kaybını önlemek ve hidrasyon sürecini desteklemektir. Buna karşın içsel kürlenme, betonun bünyesine dâhil edilen su tutucu malzemeler veya iç su kaynakları aracılığıyla, çimentolu bileşenlerin hidrasyonunu içeriden destekleyen bir yöntemdir. Bu yaklaşım özellikle düşük su/bağlayıcı oranına sahip karışımlarda, uzun süreli nem dengesinin korunmasına ve rötire çatlaklarının önlenmesine katkı sağlar.

2.1. Yüzey Kürlenme

Betonun yüzeyine, hidrasyon süreci boyunca sürekli olarak su uygulanması, yüzey kürlenme tekniği olarak tanımlanır ve bu yöntemin temel amacı betonun iç nem dengesini korumaktır. Günümüzde bu teknik başlıca farklı biçimlerde uygulanmaktadır: kaplama yöntemi, sprinkler/sprey yöntemi, su altında kürlenme yöntemi vb. Bununla birlikte, yüzey nemini korumaya yönelik çeşitli alternatif uygulamalar da geliştirilmiştir.

2.1.1. Doğal Kürlenme

Betonun yüzeyine herhangi bir kaplama malzemesi uygulanmadan, çevresel koşullar altında kendi hâline bırakılarak kürlenmesi, doğal kürlenme yöntemi olarak tanımlanır (Şekil 1). Bu yöntem, buharlaşmanın sınırlı ve ortam sıcaklığının betona zarar verecek seviyede yüksek olmadığı durumlarda uygulanabilir. Bu koşullar altında beton, dış müdahale olmaksızın doğal nem dengesini koruyarak hidrasyon sürecini sürdürebilir (Dündar & Çınar, 2020).



Şekil 1. Doğal kürleme

Doğal kürleme, genellikle yüksek dayanım gerektirmeyen veya önemsiz yapı elemanlarında tercih edilmekte olup, bu tür uygulamalarda ortaya çıkabilecek olumsuz etkiler çoğu zaman ihmal edilebilir düzeydedir. Ancak buharlaşma hızının artmasıyla birlikte betonun yüzey nemi hızla azalır ve bu durum çatlak oluşumu riskini önemli ölçüde artırır (Foroughi vd., 2020). Ayrıca, yüzey sıcaklığındaki ani değişimler, hidratasyon için gerekli nemin azalmasına neden olarak çatlama sürecini hızlandırmaktadır (Karalar & Konak, 2019).

İnşaat sektöründe kendiliğinden kürleme, özellikle küçük ölçekli veya düşük önem derecesine sahip beton elemanlarda en sık karşılaşılan uygulama biçimidir. Ancak planlı bir kürleme stratejisi içermemesi nedeniyle, bu yöntem çoğunlukla kuruma büzülmesi, içsel çekme gerilmeleri ve yüzey çatlakları gibi olumsuz etkilerin başlıca nedeni olarak değerlendirilmektedir. Bu yöntemde, beton tarafından emilen suyun yalnızca yaklaşık %5'inden daha azı hidratasyon süreci için erişilebilir durumda kalır. Kuru iklim koşullarında buharlaşmanın artmasıyla birlikte beton matrisinin ve yüzeyinin kuruması, bağıl nemin %80'in altına düşmesine yol açarak hidratasyonun yavaşlamasına ve dayanım gelişiminin sınırlandırılmasına neden olur.

2.1.2. Yağmurlama/Püskürtme Yöntemi

Beton yüzeyinde meydana gelen buharlaşmayı azaltarak kuruma etkisini önlemenin bir diğer etkili yolu, suyun yüzeye eşit ve sabit bir oranda püskürtülmesi veya serpiştirilmesi esasına dayanan sprinkler (sprey) kürleme yöntemidir (Şekil 2). Bu yöntemde amaç, beton yüzeyinin bağıl nemini artırmak ve hidratasyonun sürekliliğini sağlayacak uygun nem koşullarını korumaktır.



Şekil 2. Yağmurlama/püskürtme kürleme tekniği

Sprinkler veya sprej sistemiyle gerçekleştirilen kürleme işlemi, suyun sürekli olarak yüzeye iletilmesini sağladığından buharlaşma hızını yavaşlatır ve betonun kurumasını engeller. Bu uygulamada kalibre edilmiş yağmurlama başlıkları (sprinkler sistemleri) kullanılarak, suyun homojen biçimde dağılması sağlanır; böylece kürleme süreci nispeten daha kolay ve kontrol edilebilir hale gelir.

Tokgöz vd., (2022) göre, sprinkler veya sprej kürleme yöntemi özellikle düşük rüzgâr hızlarının ve yaklaşık 20 °C civarındaki ortam sıcaklıklarının hâkim olduğu iklim koşullarında son derece etkilidir. Bu koşullar altında, yüzeyden su kaybı minimum seviyede gerçekleşir ve hidrasyonun devamlılığı güvence altına alınır. Ancak yüksek sıcaklık, düşük bağıl nem veya kuvvetli rüzgâr koşullarında dahi bu yöntem, yüzeye sürekli su sağlayarak beton içerisindeki suyun buharlaşmasını yavaşlatmakta ve beton yüzeyinin kurumasını önlemektedir. Böylece hem erken yaşta oluşabilecek rötre çatlakları azaltılmakta hem de dayanım gelişimi desteklenmektedir.

2.1.3. Göllendirme ile Kürleme

Kürleme yöntemleri arasında en etkili tekniklerden biri olan su havuzu (göllendirme) yöntemi, özellikle döşeme, havaalanı pistleri ve beton yol platformu gibi geniş yüzeyli beton elemanlarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yöntemde amaç, beton yüzeyinin sürekli olarak su ile temasını sağlayarak nem kaybını önlemek ve hidrasyon sürecini en üst düzeyde sürdürmektir. Uygulama süreci, beton dökümünün tamamlanmasının ardından başlamaktadır. Özellikle kirişlerin yatay üst yüzeyleri gibi açıkta kalan bölgelerde, dökümden hemen sonra yüzeyin ıslak çuval bezi veya ıslatılmış kanvas örtüler ile kaplanması gerekmektedir. Bu kaplamalar genellikle bir gün süreyle yüzeyde bırakılır. Ardından, örtüler kaldırılarak beton yüzeyinde ve kenar kısımlarda küçük kil veya kum setleri oluşturulur. Bu setler yardımıyla yüzey, birbirinden ayrılmış çok sayıda dikdörtgen bölgeye (Şekil 3) dönüştürülür.



Şekil 3. Göllendirme kürleme

Her bir bölgeye belirli bir derinlikte su doldurularak göletler oluşturulur, böylece yüzeyin tamamı sürekli su altında kalır. Hava koşullarına bağlı olarak, bu göletlerdeki suyun günde iki veya üç kez takviye edilmesi gerekmektedir. Yöntem, hidrasyonun sürekliliğini en iyi şekilde sağlaması ve yüzey çatlaklarını önlemesi nedeniyle oldukça etkilidir. Ancak, bu yöntemin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Öncelikle yüksek su tüketimi, uygulamanın sürdürülebilirlik açısından verimliliğini azaltmaktadır. Ayrıca, çatlaklar ve düzensiz yüzeyli alanlarda suyun tutulmaması yöntemin etkinliğini sınırlamaktadır. En önemli sorunlardan biri ise, kürleme sonrasında kuruyan kil tabakasının temizlenmesinin oldukça zor olmasıdır (Anonim, 2025a).

2.1.4. Membran Kürleme

Membran kürleme, beton yüzeyinde oluşturulan geçirimsiz bir tabaka (membran) aracılığıyla suyun buharlaşmasının engellenmesi esasına dayanan etkili bir yöntemdir. Bu teknikte membran, beton yüzeyinde ince bir film tabakası oluşturularak serbest suyun dışarı çıkmasını önler ve böylece hidrasyon sürecinin sürekliliğini sağlar.

Kullanılan membranlar sıvı veya katı formda olabilir ve genellikle su bazlı veya yağ bazlı olarak iki ana gruba ayrılır. Bu malzemeler literatürde aynı zamanda sızdırmazlık bileşikler (sealing compounds) olarak da adlandırılmaktadır. Yaygın membran türleri arasında bitümlü su geçirmez levhalar, balmumu emülsiyonları, bitüm emülsiyonları ve plastik filmler bulunmaktadır. Uygulama aşamasında, kürleme için yüzeye bitüm esaslı malzemelerin sürülmesi, genellikle beton dökümünden yaklaşık 24 saat sonra, yani ilk hidrasyon süreci tamamlandıktan sonra, yüzeyin ıslak çuval beziyle korunmasını takiben yapılmalıdır. Kürleme membranları, yatay yüzeylerde serbest suyun uzaklaşmasından sonra veya kalıplanmış yüzeylerde kalıpların sökülmesinden hemen sonra uygulanır. Bu işlem genellikle elle, fırça veya sprey yöntemiyle gerçekleştirilir.

Oda sıcaklığında uçucu özellik gösteren doğal ve sentetik reçineler, balmumları ve organik çözücüler, bu tür malzemelerin tipik örnekleridir. Bu bileşikler, yüzeyde oluşturdukları film sayesinde suyun buharlaşma hızını önemli ölçüde yavaşlatır. Buharlaşma hızının sızma hızını aştığı durumlarda, membran uygulamasından önce beton yüzeyinin hafifçe nemlendirilmesi önerilir. Bu işlem, membranın düzgün bir şekilde yayılmasını ve yüzeyde homojen bir tabaka oluşturmasını kolaylaştırır.



Şekil 4. Göllendirme kürleme

Şekil 4'te gösterildiği üzere, sıvı formdaki membran malzemesi, beton yüzeyine püskürtülerek uygulanır ve kısa sürede katılaşarak su geçirmez bir tabaka oluşturur. Bu uygulama, beton yüzeyinde nemin korunmasını sağlarken aynı zamanda rötre kaynaklı çatlak oluşumunu da azaltır. Su bazlı membranlar, uygulama sonrası suyla kolayca temizlenebilmesi nedeniyle yağ bazlı türlere göre daha yaygın olarak tercih edilmektedir. Buna karşın, yağ bazlı membranların yüzeyden uzaklaştırılması için çoğu zaman asitle aşındırma, kumlama veya mekanik kazıma gibi işlemler gerekebilmektedir. Her iki tür membran da, kaplama veya sürekli sulama gibi geleneksel kürleme yöntemlerine kıyasla daha ekonomik, daha etkin ve daha kontrollü bir nem yönetimi sağlamaktadır. Ayrıca, her türlü beton yüzeye uygulanabilme esnekliği nedeniyle, şantiye koşullarında pratik bir alternatif sunar. Bu yöntem, plastik rötrenin neden olduğu çatlakları azaltmakta, daha sert ve tozmayan yüzeyler elde edilmesini sağlamakta ve betonun nihai dayanım gelişimini maksimuma çıkarmaktadır. Sonuç olarak, membran kürleme; çuval, telis veya klasik sulama gibi kürleme yöntemlerine kıyasla daha verimli, ekonomik ve sürdürülebilir bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Anonim, 2025b).

2.1.5. Yüzey Kaplama Kürü

Betondaki suyun buharlaşmasını engellemek ve iç nemin korunmasını sağlamak amacıyla uygulanan bir diğer yöntem, kaplama malzemeleriyle kürleme tekniğidir (Şekil 5). Bu yöntemde beton yüzeyi, suyun doğrudan buharlaşmasını önleyen geçici bir örtüyle kaplanır. Uygulamada en sık kullanılan malzemeler polietilen levhalar (Polythene Sheet), plastik

levhalar (Plastic Sheet) ve kürleme örtüleri (Curing Blankets) olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılmaktadır (Anonim, 2025b).



Polietilen kaplama

Örtü kaplama

Plastik kaplama

Şekil 5. Yüzey kaplamalı kürleme tekniği

Polietilen levhalar, beton yüzeyini kaplamakla kalmaz, aynı zamanda betonun doğrudan çevresel etkilere maruz kalmasını önleyen bir koruyucu barınak etkisi de oluşturur. Bu malzemeler, genellikle buharlaşmanın düşük olduğu ve betonun yapısal öneminin sınırlı olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu sayede betonun doğal kuruma süreci kontrollü bir şekilde gerçekleşir.

Plastik levhalar, düz yüzeyli betonlarda yaygın olarak kullanılmakta olup, su geçirmez, hafif ve uygulaması kolay malzemelerdir. Beton yüzeyine doğrudan temas ettirilerek kaplama sağlanır ve bu sayede yüzeyden nem kaybı önlenir. Bunun yanında kürleme örtüleri (curing blankets), yeni dökülen betonun hem sıcaklık değişimlerinden hem de nem kaybından korunmasını sağlamak amacıyla kullanılır. Bu örtüler, plastik veya polietilen levhalarla benzer prensiple çalışır; yüzey üzerinde bir bariyer oluşturarak buharlaşmayı minimize eder ve betonun iç nem dengesinin korunmasına katkı sağlar.

Kaplama yöntemleri, uygulama kolaylığı, ekonomikliği ve çeşitli yüzey tiplerine uyarlanabilirliği sayesinde pratik bir kürleme seçeneği sunmaktadır. Ancak bu yöntemin etkinliği, kullanılan malzemenin su buharı geçirimsizlik performansına ve beton yüzeyine tam temas edebilmesine bağlıdır.

2.1.6. Buhar kürü

Bazı durumlarda betonun dayanım gelişimini hızlandırmak amacıyla buhar veya sıcak su kürleme yöntemleri kullanılmaktadır (Şekil 6). Bu yöntemler, özellikle ön dökümlü beton elemanların (prefabrik elemanlar) üretiminde yaygın biçimde tercih edilmektedir. Çünkü bu yöntem-

ler sayesinde beton, kısa sürede istenen mekanik dayanım düzeyine ulaşabilmektedir (Anonim, 2025c).

Buhar kürleme yönteminde, betonun maruz bırakıldığı buhar sıcaklığı genellikle 75 °C civarında tutulur. Bu sıcaklıkta, ortamın bağıl neminin yaklaşık %90 düzeyinde olması gerekir; aksi hâlde beton çok hızlı kuruyarak rötre çatlaklarına yol açabilir. Buhar kürleme, hidrasyon sürecini hızlandırdığı için erken yaş dayanımını önemli ölçüde artırır. Ancak homojen olmayan kür koşullarında yüzey ile iç kısımlar arasında sıcaklık farkı oluşabileceğinden, sıcaklık kontrolü büyük önem taşır. Sıcak su kürlemesi ise betonun doğrudan sıcak suya daldırılması veya sıcak su püskürtülmesi esasına dayanır. Bu yöntemde sıcaklık 100 °C'ye kadar çıkarılabilir. Bu sıcaklık koşullarında, betonun 4–5 saatlik kürlenme süreci sonunda ulaştığı basınç dayanımı, 28 günlük standart dayanımının yaklaşık %70'ine ulaşabilmektedir. Bu durum, yöntemin hızlı dayanım kazanımı açısından oldukça etkili olduğunu göstermektedir (Şekil 6).

Her iki yöntemde de, kürleme süresince sıcaklığın kademeli olarak artırılıp düşürülmesi gerekir. Ani ısıtma veya soğutma işlemleri, betonun termal gerilmeye maruz kalmasına ve çatlak oluşumuna neden olabilir. Bu nedenle, sıcaklık dağılımının eşit ve sürekli kontrol altında tutulması, betonun homojen yapısını korumak açısından kritik öneme sahiptir. Sonuç olarak, buhar ve sıcak su kürleme yöntemleri; yüksek erken dayanım, hızlı üretim süreci ve yüksek verimlilik sağlamaları nedeniyle prefabrik beton üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak enerji tüketiminin yüksek olması ve sıcaklık kontrolünün zorluğu, bu yöntemlerin geniş ölçekli saha uygulamalarında sınırlayıcı bir faktör olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 6. Buhar kürü

2.1.7. Islak Kaplamalı Kürleme

Islak kürleme, beton yüzeyindeki nem seviyesinin korunmasını sağlamak amacıyla çuval bezi, telis bezi veya benzeri su tutucu malzemelerin yüzeye yerleştirilmesi esasına dayanan bir yöntemdir (Şekil 7). Bu teknik,

yüzeyin kurummasını önleyerek hidrasyon sürecinin kesintisiz devam etmesini sağlar. Uygulamada genellikle çuval bezi, topçu bezi veya benzeri yüksek su tutma kapasitesine sahip kumaşlar kullanılır. Bu kaplamalar, beton yüzeyi yeterli düzeyde sertleştikten sonra, yüzeye düzgün biçimde yerleştirilmelidir. Yerleştirme işlemi sırasında, betonun herhangi bir nedenle kurummasına izin verilmemelidir. Kaplama malzemeleri, sürekli nemli tutulmalı; aksi takdirde yüzeyde buharlaşma meydana gelerek rötire çatlaklarına neden olabilir (Anonim, 2025d).



Şekil 7. Islak kaplamalı kürleme

Islak kürleme yöntemi, diğer birçok kürleme tekniğinin aksine yalnızca yatay yüzeylerle sınırlı değildir. Bu yöntem, kolonlar, perde duvarlar, kazık başlıkları, radye temeller gibi dikey ve karmaşık geometrili beton elemanlarda da etkin bir biçimde uygulanabilmektedir (Şekil 7). Ayrıca yüzeyin nem dengesini korumak amacıyla su tutucu gevşek malzemeler de (örneğin ıslatılmış kum, talaş veya saman) kullanılabilir. Bu malzemeler, özellikle geniş yüzey alanına sahip olmayan veya kalın kesitli beton elemanlarda tercih edilmektedir. Uygulamada genellikle betonun üzerine önce bir membran tabakası serilir, ardından bu tabakanın üzerine ıslatılmış kum yerleştirilerek suyun doğrudan yüzeye temas etmeden korunması sağlanır.

Bu yöntem, düşük maliyeti, uygulama kolaylığı ve geniş yüzeylerde etkin nem kontrolü sağlaması nedeniyle saha koşullarında sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak, uygulama süresince yüzey neminin sürekli korunması gerektiğinden, yoğun iş gücü gerektiren bir yöntem olarak da değerlendirilmektedir.

2.1.8. Diğer

Yukarıda açıklanan başlıca kürleme yöntemlerinin yanı sıra, betonda dayanım gelişimini desteklemek ve hidrasyon koşullarını optimize etmek amacıyla kullanılan bazı alternatif kürleme teknikleri de bulunmaktadır. Bunlar arasında sıcak karışım yöntemi, ısı emerek kürleme (bor-

ulu su soğutma), elektrikli kürleme ve klorür bazlı kürleme yöntemleri sayılabilir (Mahajan, 2025).

Sıcak Karışım Yöntemi: Sıcak karışım yöntemi, betonun erken yaş dayanımını artırmak amacıyla karışım sıcaklığının kontrollü bir şekilde yükseltilmesine dayanmaktadır. Bu yöntem, genellikle özel kalıpların kullanılmasını gerektirdiği ve yüksek enerji tüketimi nedeniyle yaygın olarak tercih edilmemektedir. Ancak özel mühendislik uygulamalarında ve erken kalıp sökme gereksiniminin bulunduğu durumlarda kullanılabilir. Bu yöntemin temel ilkesi, betonun sıcaklığının artırılması ile dayanımda %10–20 oranında artış sağlanabilmesidir. Böylece, beton diğer kürleme yöntemlerinde olduğu kadar uzun süreli kür gereksinimi duymadan hızlı dayanım kazanabilir.

Sıcak karışım uygulaması üç farklı biçimde gerçekleştirilebilir:

1. Agreganın ısıtılması: Agregalar, karışımdan önce belirli sıcaklığa kadar ısıtılarak betonun genel sıcaklığı yükseltilir.
2. Suyun ısıtılması: Karışım suyunun sıcaklığının artırılmasıyla hidratasyon hızı yükseltilir.
3. Buhar enjeksiyonu: Beton karışımına doğrudan buhar enjekte edilerek sıcaklık artışı sağlanır ve erken dayanım gelişimi hızlandırılır.

Bu yöntem, soğuk hava koşullarında veya erken kalıp alma gereksinimi bulunan üretim süreçlerinde avantaj sağlar; ancak enerji maliyetleri nedeniyle yaygın saha uygulamaları sınırlıdır.

Elektrikli Kürleme: Elektrikli kürleme (Şekil 8), betonun içerisinden veya yüzeyine yerleştirilmiş iki elektrot arasından alternatif akım (AC) geçirilmesi esasına dayanır. Doğru akım (DC) kullanımı, elektroliz riskine yol açabileceği için tercih edilmez (Mahajan, 2025). Bu yöntem, özellikle çok soğuk iklim koşullarında donma riskini önlemek ve betonun hidratasyon ısını artırmak amacıyla uygulanır. Uygulama sırasında betonun nemini tamamen kaybetmemesi için dikkatli olunmalıdır; aksi takdirde rötre çatlakları meydana gelebilir.

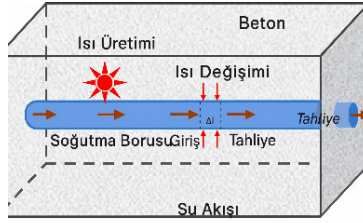
Elektrikli kürleme yöntemiyle, taze dökülmüş betonun içinden düşük voltajlı fakat yüksek yoğunluklu bir alternatif akım geçirilerek, beton içinde joule ısısı oluşturulur. Bu sayede betonun sıcaklığı yükselir ve hidratasyon reaksiyonları hızlanır. Bazı uygulamalarda, özellikle döşeme yüzeylerinin ısıtılmasında, geniş alanlara yerleştirilen elektrikli ısıtma battaniyeleri de kullanılmaktadır. Ancak yöntemin yüksek enerji tüke-

timi ve özel donanım gerektirmesi, ekonomik nedenlerle bu tekniğin ılıman iklimlerde uygulanmasını sınırlamaktadır.



Şekil 8. Elektrik kürleme

Diğer Isıl Kürleme Yaklaşımları: Isı emerek kürleme (borulu su soğutma) yöntemi, özellikle büyük hacimli beton dökümlerinde (örneğin baraj temelleri, masif temeller) hidratasyon ısısını kontrol etmek için kullanılır. Bu yöntemde betonun içine yerleştirilen borulardan soğuk su dolaştırılarak sıcaklık dengesi korunur ve termal çatlak riski azaltılır.



Şekil 9. Isı emerek kürleme-borulu su soğutma

Buna ek olarak, klorür bazlı kürleme yöntemleri, kimyasal reaksiyonlar yoluyla hidratasyonu hızlandırmak amacıyla denenmiş olmakla birlikte, donatı korozyonu riski nedeniyle modern beton uygulamalarında sınırlı olarak kullanılmaktadır (Ananonim 2025b). Ancak bu yöntemde klorürler, özellikle yüzey kaplama malzemesi veya katkı maddesi olarak kullanılarak betonun nem kaybının önlenmesine yardımcı olur. Kalsiyum klorür (CaCl_2) gibi tuzlar, higroskopik özellikleri nedeniyle çevredeki nemi kolaylıkla absorbe eder ve bu nemi beton yüzeyinde tutar (Mahajan, 2025).

Kalsiyum klorürün yüzeyde oluşturduğu nem tabakası, buharlaşma yoluyla su kaybını azaltarak betonun daha uzun süre nemli kalmasını sağlar. Böylece hidratasyon süreci daha etkin bir şekilde devam eder ve betonun dayanım gelişimi desteklenir. Bu yöntem, özellikle kalıp yüzeyinin çıkarılmadığı durumlarda (örneğin kiriş ve kolonlarda) betonun

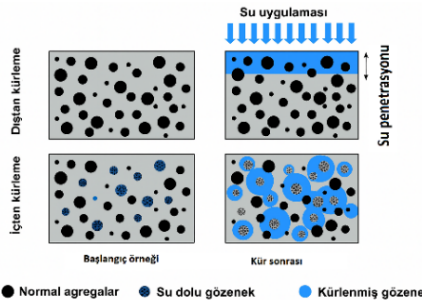
nemli bir ortamda kürlenmesine katkıda bulunur. Klorür bazlı kürleme işlemi, bazı durumlarda kalıpların yüzeyde bırakılmasıyla birlikte uygulanır. Bu durumda kalıp derz aralıklarının mum veya diğer sızdırmazlık bileşikleriyle kapatılması, betonun iç neminin buharlaşmasını önleyerek nem dengesinin korunmasına yardımcı olur. Böylece, beton yüzeyiyle çevresi arasında nem transferi sınırlanır ve hidrasyonun kesintisiz sürmesi sağlanır.

Bazı uygulamalarda ise kalıp yüzeyi ısıtılarak veya beton içinde sıcak su sirkülasyonu oluşturularak klorür bazlı kürleme süreci desteklenir. Bu yöntem, özellikle düşük sıcaklık koşullarında hidrasyonun devamlılığını güvence altına almak için kullanılabilir. Ancak, klorür iyonlarının donatı korozyonuna neden olabileceği göz önünde bulundurularak, bu tekniğin sadece donatısız beton elemanlarda veya kontrollü laboratuvar koşullarında uygulanması önerilmektedir.

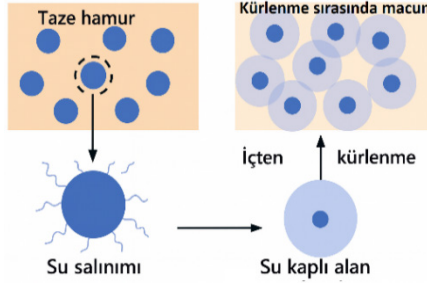
2.2. İçsel Kürlenme

İçsel kürleme, diğer adıyla kendiliğinden kürlenme teknolojisi, son yıllarda beton bilimi alanında hızla önem kazanan yenilikçi bir yaklaşımdır. Bu yöntemin temel amacı, betonun su tutma kapasitesini artırmak ve suyun buharlaşmasını azaltarak hidrasyon sürecinin sürekliliğini sağlamaktır (Anonim, 2023).

İçsel kürleme yönteminde, beton karışımına rezervuar görevi gören su tutucu malzemeler eklenir. Bu malzemeler, hidrasyon ve buharlaşma süreçleri boyunca suyu kademeli olarak serbest bırakarak betonun iç nem dengesini korur. Böylece beton, dışarıdan sürekli su temini olmaksızın kendi içinde kürlenme yeteneği kazanır. Bu malzemelere örnek olarak genişletilmiş kil, perlit, vermikülit vb. hafif agregalar ile yüksek emici polimerler verilebilir. Bu sistemin prensibi, Şekil 10 ve Şekil 11’de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 10. Geleneksel kürleme ve içsel kürleme (Bentz & Weiss, 2011)



Şekil 11. İçsel kürleme (Li vd., 2023)

Modern inşaat mühendisliği projelerinde, estetik ve yapısal gereksinimlerin artmasıyla birlikte yüksek dayanımlı betonlar yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Ancak bu betonların düşük gözenekliliği ve yüksek yoğunluğu, geleneksel kürleme yöntemlerinin etkisini sınırlamakta ve yüzeyden içeriye nem geçişini zorlaştırmaktadır. Bu durum, özellikle hidrasyonun erken evrelerinde çatlak oluşumuna ve dayanıklılığın azalmasına neden olabilmektedir. Bu bağlamda içsel kürleme, geleneksel yüzey kürleme yöntemlerinin yetersiz kaldığı yüksek performanslı betonlarda alternatif bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Uygulamada, beton karışımına belirli oranda su emici iç kürleme maddeleri eklenir ve bu malzemeler, hidrasyon süreci boyunca suyu kademeli olarak geri salarak otojen büzülme (autogenous shrinkage) ve çatlak oluşumunu azaltır. Sonuç olarak içsel kürleme, suyun etkin yönetimi yoluyla hem dayanım hem de dayanıklılık özelliklerinin iyileştirilmesine katkıda bulunan çevre dostu ve verimli bir yöntemdir. Özellikle yüksek dayanımlı ve düşük su/bağlayıcı oranına sahip betonlarda, uzun vadeli performans açısından umut verici bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Polat & Özel, 2023).

İçsel kürleme yönteminde, beton içerisinde içten dışa doğru bir nem aktarım ortamı oluşur. Karışıma eklenen kürleme maddeleri (örneğin, su rezervuarı görevi gören hafif agregalar veya süper emici polimerler), hidrasyon sürecinin erken evrelerinde bünyesindeki suyu doğrudan reaksiyona sokmaz. Bu rezervuar suyu, yalnızca hidrasyon ürünlerinin olduğu bölgelerde nem gradyanı oluştuğunda devreye girer (Karim, 2021; Shi vd., 2023).

Hidrasyonun sürekliliğini sağlamak amacıyla rezervuardaki su, kılcal emme, buhar difüzyonu ve kılcal yoğunlaşma gibi fiziksel mekanizmalar aracılığıyla kürleme maddesinden hidratlanmamış çimento taneciklerine doğru taşınır. Böylece beton matrisinde iç nemin azalması önlenir ve hidrasyonun ilerlemesi desteklenir. Bu mekanizma, özellikle düşük su/çi-

mento oranına sahip yüksek dayanımlı betonlarda, kimyasal büzülme ve otojen kuruma (self-desiccation) gibi istenmeyen etkilerin önemli ölçüde azaltılmasını sağlar.

İçsel kürleme, geleneksel yüzey kürlemesinin yerine geçen bir yöntem değildir; bunun yerine, yüzey kürlemesini tamamlayıcı bir süreç olarak değerlendirilmelidir. Bu yöntem, yüzey kürleme ile birlikte uygulandığında, hem daha homojen nem dağılımı hem de daha yüksek dayanım gelişimi elde edilmesini sağlar (Karim, 2021; Shi vd., 2023).

Dış kürleme, beton yüzeyinde nem kaybını önlemek amacıyla sıkça uygulanan bir yöntemdir (İffat vd., 2017). Ancak dışarıdan uygulanan su, genellikle yalnızca betonun üst tabakalarına nüfuz edebilir; bu nedenle düşük gözenekliliğe ve düşük geçirgenliğe sahip yüksek performanslı betonlarda (HPC) etkisi sınırlı kalır (Li vd., 2023). Bu durum, betonun iç kesimlerinde bağıl nemin düşmesine ve hidrasyonun yavaşlamasına neden olur. Buna karşın, içsel kürleme yöntemi, betonun iç bağıl nemini korumaya odaklanan bir tekniktir. Bu yöntemde su depolama malzemeleri, genellikle hafif agregalar biçiminde karışıma dâhil edilir. Çimento hidrasyonu ilerledikçe beton matrisi ile bu malzemeler arasında nem farkı (nem gradyanı) oluşur ve bu fark, kılcal basınç yardımıyla iç kürleme malzemesindeki suyun serbest bırakılmasına neden olur (Bashandy vd., 2017).

Her ne kadar gözenekli agregalar düşük mekanik dayanım ile ilişkilendirilebilse de, bu agregalar önceden nemlendirilmiş şekilde kullanıldığında betona önemli faydalar sağlar. Emdikleri suyu zamanla geri salarak hidrasyonu tamamlar, böylece betonun basınç dayanımı, boyutsal kararlılığı ve kuruma büzülmesine karşı direnci artar (Wu vd., 2017). Bu süreçte, yüksek nemli agregalar ile düşük nemli çimento hamuru arasındaki nem gradyanı, suyun hareketini yönlendiren temel itici kuvveti oluşturur (Li vd., 2023). Sonuç olarak, içsel kürleme; hem dayanım kazanımı, hem de çatlak kontrolü açısından yüksek performanslı betonlarda oldukça etkili bir yöntemdir. Bu sistem, özellikle düşük w/c oranına sahip, yoğun mikro yapıli betonlarda geleneksel kürleme yöntemlerinin tamamlayıcısı olarak büyük potansiyel taşımaktadır.

2.2.1. İçsel Kürlemede Kullanılan Malzemeler

İçsel kürlemede kullanılan başlıca malzemeler ve yaklaşımlar incelendiğinde önceden doymuş hale getirilen hafif agregalar ile süper emici polimerler (SAP) ön plana çıkmaktadır. Araştırmacılar çeşitli teknikler ve katkı maddeleri kullanarak kullanılan malzemeleri beş grupta sıralamışlardır. Bunlar;

- Hafif agregalar
- Gözenekli süper ince tozlar
- Kimyasal kürleme maddesi (Süper emici polimerler(SAP))
- Polietilen glikol
- Doğal lifler

İçsel kürleme uygulamalarında, su rezervuarı görevi görebilecek çeşitli malzemelerden yararlanılmaktadır. Bu malzemeler arasında en yaygın olarak kullanılanlar önceden suya doyunlaştırılmış hafif agregalar ve süper emici polimerler (SAP)'dir (Gamnitzer vd., 2019).

İçsel kürleme amacıyla kullanılan hafif agregalar arasında geliştirilmiş kil (LECA), perlit, pomza ve benzeri gözenekli malzemeler yer almaktadır. Bu agregalar, yüksek su tutma kapasitesi ve yavaş, kontrollü su salımı özellikleri sayesinde betonun iç nem dengesinin korunmasına önemli katkı sağlar. Hidratasyon süreci ilerledikçe, agregalarda depolanan su kademeli olarak serbest bırakılarak hidratasyonun sürekliliği desteklenir. Bununla birlikte, bu tür agregaların kullanımı bazı teknik hususları da beraberinde getirir. Öncelikle, agregaların yer değiştirmesi betonun birim hacim kütlesi ve mekanik dayanımı üzerinde etkili olabilir. Ayrıca, bu agregaların kullanılmadan önce mutlaka ön ıslatma işleminden geçirilmesi gerekir; aksi takdirde istenen içsel kürleme etkisi sağlanamaz (Joshaghani vd., 2019; Hamzah vd., 2022).

Süper emici polimerler (SAP), karışım içerisinde suyu emerek jelleşen ve daha sonra hidratasyon ilerledikçe kontrollü biçimde suyu serbest bırakan malzemelerdir. Bu polimerler, genellikle çok düşük dozajlarda (bağlayıcı kütlesinin %0,1–0,6'sı oranında) kullanılır ve bu sayede hem ekonomik hem de etkili bir içsel kürleme çözümü sunar (Liu vd., 2021; Manzur vd., 2015). SAP'ların bir diğer avantajı, hedeflenmiş partikül boyutu ve kontrollü su salımı süresi sayesinde, betonun hidratasyon kinetiği üzerinde istenen düzeyde kontrol sağlayabilmeleridir. Ancak, SAP kullanımı betonun boşluk yapısı, çökme (slump) ve işlenebilirlik özelliklerini etkileyebilir; bu nedenle karışım suyu miktarı ve kimyasal katkı dozajı yeniden dengelenmelidir.

Son yıllarda, hafif agregalar ve süper emici polimerlerin (SAP) birlikte kullanıldığı hibrit içsel kürleme sistemleri geliştirilmiştir. Bu kombinasyonlar, özellikle yüksek performanslı beton, ultra yüksek performanslı beton (UHPC) ve alkali-aktif/geopolimer sistemlerde başarılı sonuçlar vermektedir (Kioumarsı vd., 2020). Hafif agregalar, yüksek hacimli su depolama kapasitesi sağlarken; SAP, mikro düzeyde su salım

kontrolü sağlayarak, hidrasyon sürecinin hem makro hem de mikro ölçekli nem yönetimi açısından optimize edilmesine olanak tanır. Ancak, bu iki sistemin birlikte kullanımında bağlayıcı kimyasının ve reaktif ortamın alkalinitesinin, her iki malzeme türüyle uyumluluk testlerinin yapılması büyük önem taşımaktadır.

2.2.1.1. Hafif agregalar

İçsel kürlemede kullanılan hafif agregalar, yüksek su emme kapasitesi sayesinde beton içerisinde su rezervuarı görevi görerek hidrasyonun sürekliliğini sağlar. Bu agregalar, iri agregalar için 1100 kg/m^3 'ten, ince agregalar için ise 1200 kg/m^3 'ten daha düşük yığın yoğunluğuna sahip gözenekli malzemelerdir (Yaseen vd., 2025). Kaynak türüne bağlı olarak bu agregalar, genleştirilmiş cüruf boncukları, kendiliğinden yanan kömür gangi veya cüruf içeren endüstriyel atık türevleri biçiminde elde edilir. Ayrıca sürdürülebilirlik bağlamında pirinç kabuğu külü, biyokömür parçacıkları (odun talaşı türevleri), geri dönüştürülmüş agregalar ve senosferler (içi boş uçucu kül küreleri) de içsel kürleme uygulamalarında alternatif rezervuar malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Yüksek gözenek oranına sahip agregalar, betonun erken yaş basınç dayanımını azaltabilir; ancak bu agregalar aynı zamanda daha etkin içsel kürleme sağlar ve su emilim oranını artırır. Buna karşılık, düşük gözenek sayısı veya yetersiz su tutma kapasitesine sahip agregalar, içsel kürleme performansı açısından olumsuz sonuç verir. Bu nedenle, içsel kürlemede kullanılacak agregaların optimum gözenek yapısına ve uygun su emme kapasitesine sahip olması büyük önem taşır (Xu vd., 2021). Sıradan hafif agregaların su emme oranı genellikle %15–20 civarındayken, yüksek dayanımlı LWA türleri ilk bir saatte %10'dan az su emme kapasitesi gösterir (Sultan, 2021). Dolayısıyla, etkin bir iç kürleme sağlamak için LWA'nın kontrollü gözenekliliğe, düşük açık gözenek oranına ve düşük ısıl iletkenlik katsayısına sahip olması idealdir.

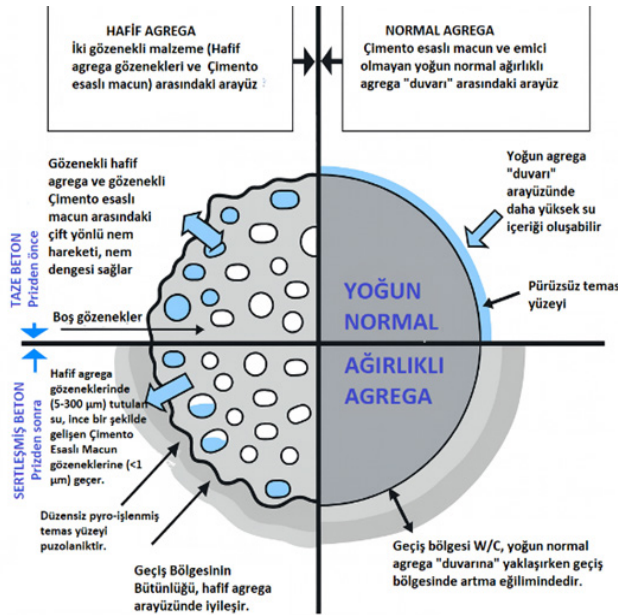
İçsel kürleme sürecinde, hafif agregalar suyu kademeli olarak harca salarak hidrasyon ortamının doymun kalmasını sağlar ve harç ile agrega arasındaki geçiş bölgesinde yerel su/çimento oranını artırır. Bu, hidrasyon ürünlerinin (özellikle C–S–H jellerinin) agrega yüzeyine daha yakın bölgelerde yoğun biçimde oluşmasına neden olur. Geleneksel betonda, harç ile agrega arasındaki geçiş bölgesinde genişliği genellikle $50\text{--}100 \text{ }\mu\text{m}$ aralığındayken, hafif betonlarda bu değer $5\text{--}10 \text{ }\mu\text{m}$ düzeyine kadar düşmektedir (Shafiq vd., 2021).

Hafif agregaların yüksek gözenekliliği ve kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) içeriği sayesinde, harç ile agrega arasındaki geçiş bölgesinde normal betona kıyasla daha güçlü bir bağ yapısı oluşur. Harç henüz plas-

tik halindeyken, çimento hamuru agreganın yüzeyine kısmen nüfuz eder ve bu bölgede erken yaşta C-S-H jelleri oluşur. Hidratasyon ilerledikçe agreganın boşlukları genişler ve yüzeyde etrenjit kristalleri genişir (Kumar vd., 2024; Mechtcherine, 2023).

Hafif agregaların pürüzlü yüzey morfolojisi, çimento ve silis dumanı partikülleri fiziksel aderansı artırır. Ayrıca, agrega yüzeyindeki yüksek nem içeriği, yüzeye yakın bölgelerde hidratasyon ürünlerinin yoğunluğunu artırarak dayanım kazanımını hızlandırır.

Çimento esaslı malzeme sistemlerinde içsel su rezervuarlarının dağılımı, iç kürlenmenin verimliliğini belirleyen en önemli faktörlerden biridir (Akçay & Taşdemir, 2008; Ma vd., 2019). İç rezervuarlar, çimento hamurundaki kılcal gözeneklere kıyasla daha büyük ve daha iyi bağlantılı gözeneklere sahip olmalıdır. Bu sayede, hidratasyon sürecinde oluşan kılcal basınç ve nem gradyanı, suyun agregadan hamura doğru hareket etmesini kolaylaştırır (Karim, 2021; Shi vd., 2023).



Şekil 12 Hafif agrega ve normal agreganın içsel kürlenmesi

Kimyasal büzülme ve kendi kendine kuruma sonucu bağlı nem azaldığında, agregadan çimento hamuruna doğru bir emme kuvveti oluşur ve bu, suyun sürekli olarak çimento matrisine taşınmasını sağlar (İffat vd., 2017; Xu vd., 2021). Bu süreç, çimento tamamen hidratlanana veya hafif agrega içerisindeki bağlı nem ile çimento hamurundaki nem

dengelenene kadar devam eder. Sonuç olarak, hafif agrega-harç geçiş bölgesi geçiş bölgesi su hareketinin ve yeni hidratasyon ürünlerinin en yoğun olduğu alan haline gelir (Şekil 12). Bu bölgede gözenekler yeni oluşan hidratasyon ürünleriyle dolarken, aynı zamanda mikro düzeyde kendi kendine kurumaya yol açabilecek yerel nem farklılıkları da oluşur. Buna rağmen, hafif agregaların varlığı genel olarak harç ile agrega arasındaki geçiş bölgesinde yapısını güçlendirir ve betonun mikroyapısal bütünlüğünü artırır.

2.2.1.2. Gözenekli süper ince tozlar

Gözenekli süper ince tozlar, geniş özgül yüzey alanına ve mezo gözenekli (4–50 nm) bir iç yapıya sahip parçacıklardır. Bu malzemeler, nanometre ölçeğindeki gözenekleri sayesinde hidratasyon için nemli bir mikro ortam oluşturarak, beton içerisindeki sulu fazın adsorpsiyonuna ve kademeli olarak geri salınmasına olanak tanır (Balapour vd., 2020). Bu tozların parçacık boyutu 5–10 µm aralığında olup, bu yönüyle hem süper emici polimerlerden (SAP) hem de hafif agregalardan çok daha küçüktür. Dolayısıyla, gözenekli süper ince tozların su depolama kapasiteleri sınırlıdır; bu da su emme oranının düşük, fakat mekanik dayanım üzerindeki etkisinin yüksek olduğu anlamına gelir (Hamzah vd., 2022).

Bu malzemelerin kullanımıyla, betonun çekme ve basınç dayanımı genellikle artış gösterir. Bunun nedeni, parçacıkların yüksek özgül yüzey alanı sayesinde daha iyi bağlayıcı-agrega etkileşimi oluşturması ve hidratasyon ürünlerinin yoğunluğunu artırmasıdır. En yaygın kullanılan gözenekli süper ince toz türleri arasında taban külü ve pirinç kabuğu külü bulunmaktadır (Balapour vd., 2020).

Gözenekli süper ince tozlar, 5–10 µm'lük partikül boyutlarıyla mikro düzeyde su rezervuarı işlevi görürler. Bu tozlar, nemin emilmesini ve hidratasyon sürecinde kademeli olarak serbest bırakılmasını sağlayarak otojen büzülme (autogenous shrinkage) azaltır ve yüksek dayanımlı betonların içsel bağıl nemini stabilize eder. Bu malzemelerdeki mezo gözenekler, %75–98 bağıl nem (RH) aralığındaki değişimlere karşı duyarlıdır. Kelvin denklemine göre, bu nem aralığında tutulan suyun serbest kalması, betonun kendi kendine kurumasını yavaşlatır. Çimento matrisindeki bağıl nem %98'in altına düştüğünde, bu gözeneklerdeki su kademeli olarak serbest bırakılarak hidratasyonun devam etmesi sağlanır.

Korunan macun hacmi (preserved paste volume) yaklaşımına göre, içsel kürlenme suyu rezervuarından salınan suyun, çimento hamuruna kontrollü biçimde geçebilmesi için, rezervuar parçacıklarının optimum gözenek yapısına ve küçük partikül boyutuna sahip olması gerekir. Bu

durum, emilen suyun etkili biçimde aktarılmasını ve kendi kendine kurumayı önlemeyi mümkün kılar.

Gözenekli süper ince tozlar arasında en çok incelenen iki tip malzeme pirinç kabuğu külü ve taban külüdür.

- Taban külü, yüksek inceliği ve pürüzlü yüzey morfolojisi sayesinde ince agrega yerine kullanılabilir.
- Pirinç kabuğu külü (RHA) ise yüksek silika içeriği (%85–95 SiO₂) ve geniş gözenek hacmi nedeniyle silika dumanının (silica fume) ikamesi olarak kullanılabilmektedir.

Pirinç kabuğu külü, yalnızca silis dumanına benzer pozolanik aktivite göstermekle kalmaz; aynı zamanda çimento ikamesi olarak kullanıldığında daha yüksek mekanik dayanım ve daha düşük otojen büzülme gibi avantajlar da sunar. Bu nedenle, pirinç kabuğu külü içeren sistemler özellikle yüksek performanslı ve düşük geçirgenlikli beton tasarımlarında tercih edilmektedir.

Taban külü, pirinç kabuğu külü göre genellikle daha yüksek özgül ağırlığa sahip olmakla birlikte, daha iri partikül boyutuna ve daha yüksek su emme kapasitesine sahiptir. Buna karşın, pirinç kabuğu külünün daha ince partikül boyutu ve daha düşük emme oranı, betonun yoğunluk ve dayanım artışı üzerinde daha olumlu etki sağlar.

Gözenekli süper ince tozlar, SAP ve hafif agregaya kıyasla çok daha küçük boyutta oldukları için, daha homojen bir dağılım ve mikro düzeyde nem transferi sağlarlar. Bu özellik, yüksek performanslı beton ve ultra yüksek performanslı beton sistemlerinde, özellikle kendi kendine kuruma etkilerinin azaltılmasında kritik rol oynar. Her ne kadar bu tozlar büyük miktarda su depolayamasalar da, mezogözenekli yapıları sayesinde su salım hızı üzerinde hassas kontrol sağlarlar. Böylece, hidrasyonun ilerleyen evrelerinde gerekli suyun temini ve matris içi nem dengesinin korunması mümkün olur. Genel olarak, bu tozların betona dâhil edilmesi, çekme ve basınç dayanımını artırırken, otojen büzülmeyi azaltır ve mikroyapısal stabiliteyi geliştirir.

2.2.1.3. Kimyasal kürlenme maddesi (Süper emici polimerler -SAP)

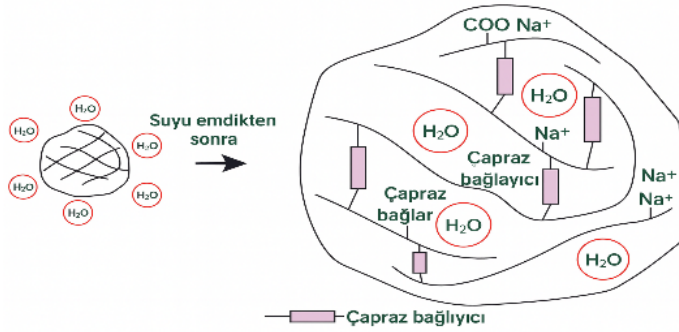
Süper emici polimerler (SAP), polimerik yapı özellikleri ve suyla etkileşim mekanizmaları bakımından hafif agregalardan farklı davranış sergiler (Kang vd., 2018). SAP'ların su emme ve salım kapasitesi, temelde polimer ağ yapısının elastikiyetine ve gözeneklerdeki iyon konsantrasyon farkından kaynaklanan ozmotik basınca bağlıdır (Kang vd., 2017).

Polimerin elastik özelliklerini belirleyen başlıca iki faktör:

1. İyonik birimlerin sayısı,

2. Çapraz bağ yoğunluğudur.

Yüksek çapraz bağ yoğunluğu, daha az su absorbe eden, daha sert ve daha kırılğan bir yapı oluştururken, düşük çapraz bağ yoğunluğu, daha esnek ve yüksek şişme kapasitesine sahip bir polimer ağ yapısına olanak tanır. Ayrıca karboksilik asit ($-\text{COOH}$) ve karboksilat ($-\text{COO}^-$) gibi hidrofilik fonksiyonel grupların dahil edilmesi, polimerin su çekme ve tutma yeteneğini artırır (Li vd., 2017). Şekil 13 incelendiğinde, SAP parçacığı ile su molekülleri arasındaki etkileşimi şematik olarak göstermektedir. Bu etkileşim, polimer zincirlerinin hidrofilik grupları ile çapraz bağlayıcı bölgelerinin birlikte çalışması sonucu gerçekleşir.



Şekil 13. Su molekülleri ve SAP mekanizması

SAP'ların şişme kapasitesi (veya su emme oranı), polimer ağındaki karboksilik asit gruplarının nötralizasyon derecesi arttıkça artış gösterir. Eğer sulu çözelti düşük iyon konsantrasyonuna sahipse, SAP'daki iyonik gruplar arasındaki ozmotik basınç farkı suyun polimere doğru geçişine neden olur. Ancak bu süreç, polimer ağının çapraz bağ yapısı tarafından fiziksel olarak sınırlandırılır (He vd., 2019). Ozmotik basınç, jel fazı ile çevre çözeltisi arasındaki iyon konsantrasyon gradyanından kaynaklanır (Mechtcherine vd., 2021; Wong, 2018). SAP'lar suyu emdiklerinde hidrojel formuna geçer ve bu durumda beton içerisinde mikro ölçekli su rezervuarı işlevi görürler. Betonun bağıl nemi azaldıkça, emilen su kılcal gözenekler boyunca geri taşınır ve hidrasyonun devamı için salınır (Lee vd., 2010; Wong, 2018).

SAP'lerin emilim (absorpsiyon) ve desorpsiyon (salım) kinetikleri, polimerin moleküler yapısına bağlı olarak hafif agregalardan farklılık gösterir (Mehdipour & Khayat, 2018). SAP'nin su alma kapasitesi;

- Polimerin elastikiyetine,
- Polimer-su arasındaki afiniteye,
- Gözenek çözeltisindeki iyon konsantrasyonuna bağlı ozmotik basınca dayanır (Patil vd., 2023).

Polimerdeki iyonik birim sayısının artışı su çekim potansiyeli ni artırırken, yüksek çapraz bağ yoğunluğu bu emilimi sınırlandırır. Dolayısıyla optimum denge, belirli bir bağ yoğunluğunda ve iyonik grup oranında sağlanmalıdır.

Karboksilik grupların varlığı sayesinde SAP, suyu hem fiziksel olarak adsorbe eder hem de kimyasal olarak bağlar (Mechtcherine vd., 2012). Şekil 13'te gösterilen şematik model, bu mekanizmayı açıklar: su molekülleri, SAP mikro yapısına hem hidrofilik gruplar hem de çapraz bağlayıcılar aracılığıyla nüfuz eder. SAP'lerin şişme davranışı, içinde bulundukları çözeltinin iyonik gücü tarafından güçlü biçimde etkilenir. Schröfl vd., (2012) tarafından yapılan çalışmalar, SAP'lerin damıtılmış suda çok daha yüksek emilim oranına sahip olduğunu göstermiştir. Bunun nedeni, düşük iyon konsantrasyonunda ozmotik basıncın artması ve suyun SAP'a daha kolay nüfuz etmesidir. SAP partikül boyutu da emilim kapasitesi üzerinde önemli bir etkidir. Küçük boyutlu SAP partikülleri, polimer ağlarının birbirine dolaşması sonucu kısmen şişmiş jel aglomeratları oluşturabilir. Bu durum, su salım hızını ve rezervuar etkinliğini etkiler.

Yang vd., (2019), 50–200 µm ve 2–2.5 mm olmak üzere iki farklı partikül boyutuna sahip akrilik asit–akrilik amid kopolimerlerinin emilim kinetiğini incelemiş ve büyük partikül boyutlu SAP'lerin gözenek çözeltisinde maksimum 23 g/g, küçük partikül boyutlu SAP'lerin ise 20 g/g su emme kapasitesine sahip olduğunu rapor etmiştir. Benzer şekilde, Gu vd., (2024) çalışmalarında, SAP parçacık boyutunun su tutma süresi üzerinde belirleyici olduğunu ve daha büyük partiküllerin daha uzun süreli nem salımı sağladığını bildirmiştir.

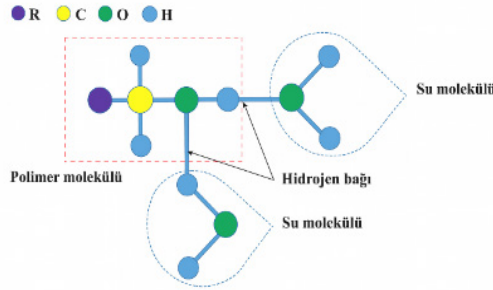
Beton içerisine eklendiğinde SAP'lar, taze karışımda suyu absorbe ederek şişer ve hidrasyon süreci ilerledikçe bu suyu kademeli olarak geri salar. Bu süreç, otojen büzülme azaltır, mikro çatlak oluşumunu engeller ve hidrasyonun sürekliliğini sağlar. Ancak SAP kullanımı,

karışımın boşluk oranı ve işlenebilirliği üzerinde etkili olabileceği için, su/bağlayıcı oranı ve katkı dozajı dikkatle optimize edilmelidir.

SAP'lerin etkinliği; partikül boyutu, iyonik yapı, çapraz bağ yoğunluğu ve karışım ortamının iyonik gücüne bağlı olarak değişir. Uygun şekilde seçilmiş SAP tipi, yüksek performanslı ve ultra yüksek performanslı betonlarda stabil iç nem kontrolü sağlayarak dayanıklılık ve uzun ömür açısından önemli avantajlar sunar.

2.2.1.4. Polietilen glikol (PEG)

Polietilen glikol (PEG), kimyasal yapısı gereği hidrofilik zincirler içeren bir polietiler bileşiğidir ve beton karışımlarında kendiliğinden kürleme katkısı (self-curing agent) olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. PEG, betona eklendiğinde su molekülleriyle hidrojen bağları oluşturarak suyun yüzey gerilimini düşürür. Bu etki, suyun beton yüzeyinden buharlaşmasını önemli ölçüde azaltır ve betonun hidrasyon sürecinde daha fazla suyun tutulmasını sağlar (Younis vd., 2022). Şekil 14, su molekülleri ile PEG arasındaki etkileşimi şematik olarak göstermektedir. Bu etkileşim sonucunda suyun yüzey enerjisi azalır, buharlaşma hızı düşer ve hidrasyon reaksiyonları için daha fazla serbest su kalır. Böylece betonun mikro yapısı daha yoğun hale gelir (Chand vd., 2016; El-Dieb, 2007).



Şekil 14. Su molekülleri ve PEG mekanizması

PEG'in temel işlevi, su tutma kapasitesini artırmak ve hidrasyonun sürekliliğini desteklemektir. İç kürleme sırasında PEG zincirleri, betonun sıvı fazında su moleküllerini kısmen bağlayarak buharlaşma kayıplarını sınırlar. Bu sayede karışım içerisindeki su/bağlayıcı oranı efektif olarak korunur, bu da hem yoğun bir matris oluşumuna hem de daha düşük boşluk oranına yol açar.

Kendiliğinden kürleme süreci tamamlandıktan sonra, PEG etkisiyle oluşan hidratasyon ürünleri boşlukları doldurarak, geleneksel kürleme yöntemlerine kıyasla daha az poroziteye sahip bir yapı oluşturur (Mousa vd., 2015a; Mousa vd., 2015b). Bu durum, özellikle yüksek performanslı betonlarda (HPC) mikro çatlakların azalmasına ve geçirgenliğin düşmesine katkı sağlar.

PEG'in molekül ağırlığı, betonun performans özellikleri üzerinde belirleyici bir parametredir:

- Düşük molekül ağırlıklı PEG, normal betonlarda kullanıldığında işlenebilirliği artırır ve hidratasyonun erken evrelerinde etkili olur.
- Yüksek molekül ağırlıklı PEG ise yüksek dayanımlı betonlarda daha uzun süreli su salımı sağlayarak geç hidratasyonun tamamlanmasına yardımcı olur (Kamal vd., 2017).

Bu farklılık, PEG zincir uzunluğunun su molekülleriyle kurduğu hidrojen bağlarının stabilitesi ve buharlaşma oranına etkisi ile ilişkilidir. Uzun zincirli PEG türleri, suyu daha güçlü biçimde bağlar ve daha yavaş salım yapar. Bazı araştırmalar, PEG ve süper emici polimerlerin (SAP) birlikte kullanıldığı hibrit iç kürleme sistemlerini incelemiştir. Chand vd., (2016) ve Mehdipour & Khayat (2018), bu birleşik sistemlerin betonun otojen büzülmesini azalttığını ancak makro boşlukların artışı nedeniyle çimento hamurunun basınç dayanımında hafif bir düşüşe neden olabileceğini bildirmiştir. Bu durum, SAP'ların şişme-boşalma döngüsünde oluşturduğu mikro boşluklar ile PEG'in su tutma etkisi arasındaki etkileşimden kaynaklanmaktadır. Ancak uygun dozaj kombinasyonlarında PEG + SAP kullanımı, dayanım kaybını minimize ederken uzun vadeli dayanıklılığı ve hidratasyon dengesini geliştirmektedir.

PEG katkısının kullanımı, hem konvansiyonel hem de yüksek dayanımlı betonlarda, içsel kürleme açısından etkili ve ekonomik bir yöntemdir. PEG, kimyasal olarak su kaybını azaltarak hidratasyonun ilerlemesini destekler; fiziksel olarak ise mikro gözenek oluşumunu sınırlandırarak matris yoğunluğunu artırır. Molekül ağırlığı ve dozaj oranı doğru seçildiğinde, PEG katkılı betonlar daha yüksek basınç dayanımı, azaltılmış geçirgenlik ve arttırılmış mikro yapı bütünlüğü sergiler.

2.2.1.5. Doğal Lifler

İçsel kürleme yaklaşımında, doğal liflerin beton karışımlarında kullanımı, hem sürdürülebilirlik hem de mikroyapısal nem yönetimi açısından dikkat çeken yenilikçi bir yöntemdir. Doğal lifler (özellikle ahşap es-

aslı lifler) su emme ve su tutma kapasiteleri yüksek olan, aynı zamanda emilen suyu yavaş salma özelliğine sahip malzemelerdir. Bu özellikleri sayesinde, betonun kürlenmesi sırasında çevredeki suyun buharlaşmasını önleyerek hidratasyonun sürekliliğine katkı sağlarlar (Jongvisuttisun vd., 2018; Kawashima & Shah, 2011; Zanjani & Bobko, 2014; Mohr vd., 2005; Elsaid vd., 2011).

Doğal liflerin betonda kullanımı, yalnızca nem kontrolü açısından değil, aynı zamanda mekanik ve çevresel avantajlar da sağlar. Liflerin yenilenebilir ve biyolojik olarak parçalanabilir olması, onları çevre dostu bir içsel kürleme ajanı hâline getirir. Ayrıca liflerin gözenekli yapısı, betonun basınç dayanımı, çekme dayanımı ve çatlama direncini iyileştirir

Ahşap esaslı lifler, higroskopik özellikleri sayesinde çevreden su emme ve emilen suyu kademeli olarak bırakma yeteneğine sahiptir. Bu süreç, liflerdeki suyun kılcal etki ve ozmotik basınç farkı yoluyla hareket etmesiyle gerçekleşir. Böylece, betonun iç nem dengesi korunur ve kendi kendine kurumadan (self-desiccation) kaynaklı mikro çatlak oluşumu engellenir.

Şekil 15'te gösterildiği üzere, ahşap lifi iki tür gözenekten oluşur:

- Büyük gözenekler (lümen): serbest suyun depolandığı ve hızlı taşınımın gerçekleştiği boşluklardır.
- Küçük gözenekler (mikro gözenekler): nemin yavaşça hareket ettiği, difüzyon kontrollü alanlardır.

Her iki gözenek tipi de, lif içindeki suyun hidratlı çimento fazına taşınmasında önemli rol oynar. Bu su taşınımı, hidratasyonun ilerlemesini destekleyerek betonun yoğun mikro yapı oluşturmaya katkı sağlar (Patil vd., 2023). Çimento esaslı sistemlerdeki yüksek pH (alkali ortam, odun hamuru veya doğal liflerin mikroyapısal davranışını etkiler. Gözenek çözeltisinin alkaliliği, lif hücre duvarlarının genleşmesine veya büzülmesine neden olur; bu da gözenekli alanın etkin boyutunu değiştirir ve sonuç olarak su taşınım hızını etkiler (Ning vd., 2019). Bu kimyasal etkileşim, beton içindeki su dağılımının zamana bağlı olarak dengelenmesini sağlar. Böylece, lif-matris arayüz bölgesinde nemin kademeli geçişi gerçekleşir ve çimento hidratasyonu için gerekli su temin edilir.



Şekil 15. Doğal lifler

İçsel kürlenme amacıyla kullanılan yaygın doğal lif türleri arasında okaliptüs hamuru, kenaf (*hibiskus cannabinus*) lifleri ve selüloz lifleri yer almaktadır. Bu liflerin ortak özelliği, yüksek su emme kapasitesi ve kılcal su taşınımını kolaylaştıran iç yapılarıdır. Bu lifler, betona eklendiklerinde harici su kürlenme ihtiyacını azaltarak, zaman ve kaynak tasarrufu sağlar. Ayrıca, betonun hidrasyon ısısının dengelenmesine yardımcı olur ve **çatlak oluşumunu** minimize eder. Bu yönüyle doğal lif katkısı, özellikle yüksek performanslı betonlar ve sürdürülebilir yapı malzemeleri tasarımlarında önem kazanmaktadır.

Doğal liflerin içsel kürlenmede kullanımı, hem teknik hem de **çevresel** açıdan önemli bir yeniliktir. Bu lifler, betonun hidrasyon verimini artırırken, aynı zamanda karbon ayak izini azaltan çevre dostu alternatifler sunar. Gözenekli yapıları sayesinde, iç nem taşınımını kontrol eder, otojen büzülme azaltır ve uzun vadeli dayanıklılığı geliştirir. Sonuç olarak, doğal lif katkılı içsel kürlenme, sürdürülebilir ve yüksek performanslı beton üretiminde ekolojik, ekonomik ve mühendislik açısından avantajlı bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

2.2.2. İçsel Kürlenmenin Beton Üzerindeki Etkileri

İçsel kürlenme, betonun hidrasyon sürecinde nem dengesini koruyarak dış suya olan bağımlılığı azaltan çevre dostu bir yöntemdir. Bu yaklaşım, su ve enerji tasarrufu sağlayarak beton üretiminin karbon ayak izini düşürür (Bentz & Weiss, 2011; Sarbapalli vd., 2017).

Geleneksel kürlenme yöntemleri, özellikle sıcak ve kuru iklimlerde yüksek su tüketimi gerektirirken, kendiliğinden kürlen beton su tutucu katkılarla buharlaşmayı azaltarak önemli miktarda su tasarrufu sağlar (Sorbali vd., 2016). Aynı zamanda, ıslak veya kimyasal kürlenmeye kıyasla daha az enerji kullanıldığından karbon emisyonları azalır. Hidrasyon süresince uygun nemin korunması, çatlak oluşumunu önleyerek mikro

yapının yoğunluğunu ve dayanıklılığı artırır (Mousa vd., 2015a). Bu sayede betonun servis ömrü uzar, bakım ve onarım ihtiyacı azalır (Akh-noukh, 2018). Daha az kusar ve daha uzun ömürlü yapıların inşa edilmesi, inşaat kaynaklı CO₂ emisyonlarını ve malzeme israfını da azaltır (Hos-sain vd., 2011). Kürlenen beton, katkı maddeleri sayesinde yüksek işlen-ebilirlilik sunar ve uygulamada iş gücü ile enerji gereksinimini düşürür (Lura, 2013). Ayrıca, geri dönüştürülmüş malzemeler ve endüstriyel yan ürünlerin kullanımına olanak tanıyarak döngüsel ekonomiye destekler (Matias vd., 2013).

Sonuç olarak, kendiliğinden kürleme; dayanıklılığı artıran, su ve enerji tüketimini azaltan, bakım ihtiyacını düşüren ve yeşil bina uygulamalarıyla uyumlu sürdürülebilir bir beton teknolojisidir. Özellikle yüksek dayanımlı ve sıcak iklim koşullarındaki uygulamalarda, çevresel ve ekonomik açıdan güçlü bir alternatif sunmaktadır.

3. SONUÇ

Betonun nihai dayanımı, dayanıklılığı ve hizmet ömrü, büyük ölçüde uygulanan kürleme yönteminin etkinliğine bağlıdır. Kürleme, çimento hidratasyonunun sürekliliğini sağlarken, su kaybını önleyerek betonun mikro yapısının olgunlaşmasına katkıda bulunur. Klasik yüzey kürleme yöntemleri (su, buhar, sıcak su, membran, elektrikli, klorür vb.) belirli koşullarda etkili olsa da, yüksek su ve enerji tüketimi, uygulama zorlukları ve çevresel etkiler nedeniyle sürdürülebilirlik açısından sınırlıdır. Bu durum, kendiliğinden (içsel) kürleme teknolojilerini ön plana çıkarmıştır. İçsel kürleme, betonun kendi bünyesinde su rezervuarı oluşturarak dışsal kürlemeye olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Bu amaçla kullanılan hafif agregalar, süper emici polimerler (SAP), süper ince tozlar, PEG ve doğal lifler, betonda suyun kontrollü salımını sağlayarak hidratasyonun sürekliliğini korur. Bu sayede, otojen büzülme, kuruma çatlakları ve geçirgenlik azalırken, basınç dayanımı ve mikro yapısal bütünlük artar.

Kendiliğinden kürlenen betonlar; daha az su ve enerji tüketimi, daha düşük karbon emisyonu, azaltılmış bakım ihtiyacı ve uzun servis ömrü sayesinde çevre dostu bir çözüm sunar. Bu yönüyle, hem yüksek performanslı betonlar hem de geopolimer sistemler için sürdürülebilir bir alternatif oluşturmaktadır. Sonuç olarak, içsel kürleme teknikleri; mekanik dayanımı, dayanıklılığı ve sürdürülebilirliği birlikte optimize eden çağdaş bir yaklaşım olarak beton teknolojisinde önemli bir ilerlemeyi temsil etmektedir.

KAYNAKLAR

- ACI Committee, ACI (308-213) (2015) Report on internally cured concrete using prewetted absorptive lightweight aggregate. *Am Concr Inst* 28:0–15
- Akçay, B., & Tasdemir, M. A. (2008). Internal curing of mortars by lightweight aggregates and its effects on hydration. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35(11), 1276-1284.
- Akhnoukh AK (2018) Internal curing of concrete using lightweight aggregates. *Part Sci Technol* 36:362–367. [https:// doi. org/10. 1080/ 02726 351. 2016. 12563 60](https://doi.org/10.1080/02726351.2016.1256360)
- Akkaya, A. and Çağatay, İ. (2016). Geçirimli betonların basınç dayanımı üzerine deneysel bir çalışma. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(2), 209-216. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.310279>
- Ali JS, Bagchi S, Gupta S (2013) International conference on organised by. *Int Conf Innov Civ Eng* 4:229–232
- Anonim 2025a. Cure Concrete by Ponding Method <https://gharpedia.com/blog/cure-concrete-ponding-method/> (Erişim tarihi: 04.10.2025)
- Anonim 2025b. Methods for Curing of Concrete. <https://www.structuralguide.com/curing-of-concrete/> (Erişim tarihi: 04.10.2025)
- Anonim (2023). Kendiliğinden yerleşen betonların üretimi ve son yıllardaki gelişimi. *Proceeding Book of 2nd International Conference on Recent Academic Studies ICRAS 2023*. <https://doi.org/10.59287/as-proceedings.101>
- Balapour, M., Zhao, W., Garboczi, E. J., Oo, N. Y., Spatarı, S., Hsuan, Y. G., ... & Farnam, Y. (2020). Potential use of lightweight aggregate (LWA) produced from bottom coal ash for internal curing of concrete systems. *Cement and Concrete Composites*, 105, 103428.
- Bashandy, A. A., Soliman, N. M., & Elrahman, M. H. A. (2017). Recycled aggregate self-curing high-strength concrete. *Civil Engineering Journal*, 3(6), 427-441. <https://doi.org/10.28991/cej-2017-00000102>
- Bentz D, Weiss J (2011) Internal Curing: A 2010 State-of-the- Art Review, NIST Interagency/Internal Report (NISTIR), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, pp 1–82 [online]. [https:// doi. org/ 10. 6028/ NIST. IR. 7765](https://doi.org/10.6028/NIST.IR.7765). Accessed 26 Oct 2023
- Büyüker, Z., Taşkaya, E., Bombar, G., & Tayfur, G. (2024). Mansap pürüzlülüğünün toprak dolgu barajın üstten aşma ile yıkılması durumunda taşkın dalgası ve sediment yayılımına etkisinin deneysel olarak incelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 36(1), 341-356. <https://doi.org/10.35234/fumbd.1363080>
- Chand, M. S. R., Giri, P. S. N. R., Kumar, P., Kumar, G. R., & Raveena, C. (2016). Effect of self-curing chemicals in self-compacting mortars. *Construction and Building Materials*, 107(open in a new window), 356–364. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.018>

- Dnyanoba, D. P., & Madhukar, R. H. (2020). Concrete Curing Method. *Iconic Research and Engineering Journals*. Volume 3 Issue 7 | ISSN: 2456-8880. PP 142 – 144
- Dündar, B. and Çınar, E. (2020). Farklı mineral katkılı hafif harçların mekanik ve fiziksel özelliklerine yüksek sıcaklığın etkisi. *Türk Doğa Ve Fen Dergisi*, 9(2), 42-49. <https://doi.org/10.46810/tdfd.729752>
- El-Dieb, A. S. (2007). Self-curing concrete: Water retention, hydration and moisture transport. *Construction and Building Materials*, 21(open in a new window)(6(open in a new window)), 1282–1287. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.02.007>
- Elsaid A, Dawood M, Seracino R, Bobko C (2011) Mechanical properties of kenaf fiber reinforced concrete. *Constr Build Mater* 25:1991–2001. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.052>
- Foroughi, S., Jamal, R., & Yüksel, B. (2020). Sargı donatısı ve eksenel yük seviyesinin betonarme kolonların eğrilik süneklik ile etkin kesit rijitliğe etkisi. *El-Cezeri Fen Ve Mühendislik Dergisi*. <https://doi.org/10.31202/ecjse.750775>
- Gamnitzer, P., Drexel, M., Brugger, A., & Hofstetter, G. (2019). Benefits of porosity-dependent moisture retention modelling for predicting autogenous shrinkage of concrete. *Pamm*, 19(1). <https://doi.org/10.1002/pamm.201900166>
- Gu, Y., Mohseni, E., Farzadnia, N., & Khayat, K. H. (2024). An overview of the effect of SAP and LWS as internal curing agents on microstructure and durability of cement-based materials. *Journal of Building Engineering*, 95, 109972.
- Hamzah, N., Mohd Saman, H., Baghban, M. H., Mohd Sam, A. R., Faridmehr, I., Muhd Sidek, M. N., ... & Huseien, G. F. (2022). A review on the use of self-curing agents and its mechanism in high-performance cementitious materials. *Buildings*, 12(2), 152.
- He, Z., Shen, A., Guo, Y., Lyu, Z., Li, D., Qin, X., ... & Wang, Z. (2019). Cement-based materials modified with superabsorbent polymers: A review. *Construction and Building Materials*, 225, 569-590.
- Hossain KMA, Ahmed S, Lachemi M (2011) Lightweight concrete incorporating pumice based blended cement and aggregate: mechanical and durability characteristics. *Constr Build Mater* 25:1186–1195. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.036>
- Iffat, S., Manzur, T., Rahman, S., Noor, M. A., & Yazdani, N. (2017). Optimum proportion of masonry chip aggregate for internally cured concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(3), 513-524. <https://doi.org/10.1007/s40069-017-0196-5>
- Jongvisuttisun P, Leisen J, Kurtis KE (2018) Key mechanisms controlling internal curing performance of natural fibers. *Cem Concr Res* 107:206–220. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.007>

- Kamal, M. M., Safan, M. A., Bashandy, A. A., & Khalil, A. M. (2017). Experimental investigation on the behavior of normal strength and high strength self-curing self-compacting concrete. *Journal of Building Engineering*, 16(open in a new window), 79–93. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.12.012>
- Kang, S. H., Hong, S. G., & Moon, J. (2017). Absorption kinetics of superabsorbent polymers (SAP) in various cement-based solutions. *Cement and Concrete Research*, 97, 73–83.
- Kang, S. H., Hong, S. G., & Moon, J. (2018). Importance of monovalent ions on water retention capacity of superabsorbent polymer in cement-based solutions. *Cement and Concrete Composites*, 88, 64–72.
- Kara, C., Kütük-Sert, T., & Kütük, S. (2020). Ögütülmüş kolemanit içeren betonlarda sodyum klorür etkisi. *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 8(1), 499–510. <https://doi.org/10.29130/dubited.553523>
- Karalar, M. and KONAK, S. (2019). Granüle yüksek fırın cürufu ve taban külü ince agregaları ile üretilmiş betonun gerilme şekil değiştirme davranışının incelenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(3), 1119–1141. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.626225>
- Karim, F. R. (2021). Influence of internal curing on the properties of non-fibrous high strength concrete—a critical review. *Journal of Cement Based Composites*, 1(3), 1–6. <https://doi.org/10.36937/cebacom.2020.003.001>
- Kawashima S, Shah S (2011) Early-age autogenous and drying shrinkage behavior of cellulose fiber-reinforced cementitious materials. *Cem Concr Compos* 33:201–208. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.10.018>
- Kılınçarslan, Ş. and Coşkun, A. (2022). Farklı katkıları kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen ağır betonların fiziksel özelliklerinin araştırılması. *Teknik Bilimler Dergisi*, 12(2), 6–13. <https://doi.org/10.35354/tbed.1062621>
- Kumar, K., Greeshma, P., Rambabu, K., & Kumar, J. (2024). Performance evaluation of concrete with replacement of pumice and m-sand: a comprehensive analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 2779(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2779/1/012012>
- Kütükçüoğlu, E. (2022). “Hidrolik Bağlayıcılar ve Beton Kürleme Uygulamaları”. *Uluslararası Yapı Mühendisliği Dergisi*, 18(1), 45–60. doi:10.17798/uyumud.123456.
- Li, J., Yu, Z., Wu, J., Ding, Q., Xu, W., & Huang, S. (2023). The application of heat-shrinkable fibers and internal curing aggregates in the field of crack resistance of high-strength marine structural mass concrete: a review and prospects. *Polymers*, 15(19), 3884. <https://doi.org/10.3390/polym15193884>
- Liu, J., Ma, X., Shi, C., & Drissi, S. (2021). Internal curing of blended cement pastes with ultra-low water-to-cement ratio: absorption/desorption kinetics of superabsorbent polymer. *Journal of the American Ceramic Society*, 104(7), 3603–3618. <https://doi.org/10.1111/jace.17730>
- Lura, P. 2003. Autogenous deformation and internal curing of concrete. Ph.D. thesis, Technical University of Delft, Delft, the Netherlands.

- Ma, X., Liu, J., & Shi, C. (2019). A review on the use of LWA as an internal curing agent of high performance cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 218, 385-393.
- Mahajan, B., 2025. *Curing of Concrete: Top 5 Methods of Concrete Curing*. <https://civiconcepts.com/blog/curing-of-concrete-meaning-mehtods> (Erişim Tarihi: 05.10.2025)
- Manzur, T., Iffat, S., & Noor, M. A. (2015). Efficiency of sodium polyacrylate to improve durability of concrete under adverse curing condition. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2015/685785>
- Matias D, De Brito J, Rosa A, Pedro D (2013) Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates— influence of the use of superplasticizers. *Constr Build Mater* 44:101–109. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.011>
- Mechtcherine, V. (2023). Guidelines for using superabsorbent polymers (sap) in concrete construction. *RILEM Technical Letters*, 8, 59-65. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2023.182>
- Mechtcherine, V.; Wyrzykowski, M.; Schröfl, C.; Snoeck, D.; Lura, P.; De Belie, N.; and Igarashi, S.I. (2021). Application of super absorbent polymers (SAP) in concrete construction—update of RILEM state-of-the-art report. *Mater. Struct.* 54, 1–20.
- Mehdipour, I., & Khayat, K. H. (2018). Enhancing the performance of calcium sulfoaluminate blended cements with shrinkage reducing admixture or lightweight sand. *Cement and Concrete Composites*, 87, 29-43.
- Mohr B, Premenko L, Nanko H, Kurtis K (2005) Examination of wood-derived powders and fibers for internal curing of cementbased materials. *Reference* 229–244
- Mousa MI, Mahdy MG, Abdel-Reheem AH, Yehia AZ (2015) Self-curing concrete types; water retention and durability. *Alex Eng J* 54:565–575. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.03.027>
- Nevzat, A., & Erol, S. (2023). Modern küreleme tekniklerinin değerlendirilmesi: Geleneksel yöntemlerle karşılaştırmalı bir analiz. *Katkı Üreticileri Birliği (KÜB) Yayınları*, 5(1), 22–34. . <https://edergi.santiye.com.tr/402/#p=99> (Erişim tarihi: 04.10.2025)
- Ning W, Hubbe M, Rojas O, Sunkyu P (2019) Permeation of polyelectrolytes and other solutes into the pore spaces of waterswollen cellulose: a review. *BioResources*. <https://doi.org/10.15376/biores.4.3.1222-1262>
- Öztürk, O. & Öner, A. (2023). Kükürt polimer beton kullanılarak hazırlanan parke taşların özelliklerinin incelenmesi. *Journal of Innovative Engineering and Natural Science*. <https://doi.org/10.61112/jiens.1349836>
- Patil, M. N., Dubey, S. D., & Patil, H. S. (2023). *Self-curing concrete: a state-of-the-art review*. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(12), 313.

- Polat, H. and Özel, C. (2023). Farklı priz hızlandırıcı katkıların püskürtme beton performansına karşılaştırmalı analizi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma Ve Gelistirme Dergisi*. <https://doi.org/10.29137/umagd.1297157>
- Sarbapalli D, Dhabalia Y, Sarkar K, Bhattacharjee B (2017) Application of SAP and PEG as curing agents for ordinary cement-based systems: impact on the early age properties of paste and mortar with water-to-cement ratio of 0.4 and above. *Eur J Environ Civ Eng* 21:1237–1252. <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1160843>
- Schröfl, C., Mechtcherine, V., & Gorges, M. (2012). Relation between the molecular structure and the efficiency of superabsorbent polymers (SAP) as concrete admixture to mitigate autogenous shrinkage. *Cement and concrete research*, 42(6), 865-873.
- Shafiq, M., Khan, F. A., Badrashi, Y. I., Khan, F., Fahim, M., Abbas, A., ... & Adil, W. (2021). Evaluation of mechanical properties of lightweight concrete with pumice aggregate. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 15(2), 30-38. <https://doi.org/10.12913/22998624/135198>
- Shi, J., Wu, Z., Zhuang, J., Chen, R., Zhu, T., Yuan, C., ... & Li, H. (2023). The effect of superabsorbent polymer on fair-faced concrete performance based on white cement. *Advances in Civil Engineering*, 2023, 1-12. <https://doi.org/10.1155/2023/6615183>
- Sultan, M. A. (2021). Review of the flexural strength of lightweight concrete beam using pumice stone as of substitution partial coarse aggregate. *International Journal of GEOMATE*, 21(85). <https://doi.org/10.21660/2021.85.j2184>
- Şimşek, O., Toklu, K., & Demirel, C. (2022). Taze betona vakum uygulamasının beton derinliğine etkisinin araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 25(2), 647-654. <https://doi.org/10.2339/politeknik.834853>
- Tokgöz, G., Karaahmetli, S., & Tokgöz, S. (2022). Kentsel peyzajlarda geçirimli beton kullanımı ve özelliklerinin değerlendirilmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 10(2), 1067-1078. <https://doi.org/10.29130/dubited.1078837>
- Uygunoğlu, T. (2020). Nesnelerin interneti (iot) tabanlı kendini kürleyen akıllı beton üretimi. *El-Cezeri Fen Ve Mühendislik Dergisi*. <https://doi.org/10.31202/ecjse.831009>
- Wong, H.S. Concrete with Superabsorbent Polymer. In *Eco-efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures*; Pacheco- Torgal, F., Melchers, R.E., Shi, X., de Belie, N., Van Tittelboom, K., Sáez, A., Eds.; Woodhead Publishing: Sawston, Cambridge, UK, 2018; pp. 467–499.
- Wu, Z., Shi, C., & He, W. (2017). Comparative study on flexural properties of ultra-high performance concrete with supplementary cementitious materials under different curing regimes. *Construction and Building Materials*, 136, 307-313. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.052>
- Xu, F., Lin, X., & Zhou, A. (2021). Performance of internal curing materials in high-performance concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 311, 125250.

- Yang, J., Wang, F., Liu, Z., Liu, Y., & Hu, S. (2019). Early-state water migration characteristics of superabsorbent polymers in cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 118, 25-37.
- Yaseen, M. H., Fuad, S., Dawood, E. T., & Johari, M. A. M. (2025). Evaluating the impact of pumice on the production and durability of lightweight roller compacted concrete.. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6138360/v1>
- Younis, M. O., Amin, M., & Tahwia, A. M. (2022). Durability and mechanical characteristics of sustainable self-curing concrete utilizing crushed ceramic and brick wastes. *Case Studies in Construction Materials*, 17(open in a new window), e01251. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01251>
- Zanjani V, Bobko C (2014) Nano-mechanical properties of internally cured kenaf fiber reinforced concrete using nanoindentation. *Cem Concr Compos.* [https:// doi. org/ 10. 1016/j. cemconcomp. 2014. 04. 002](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.04.002)

//

Bölüm 2

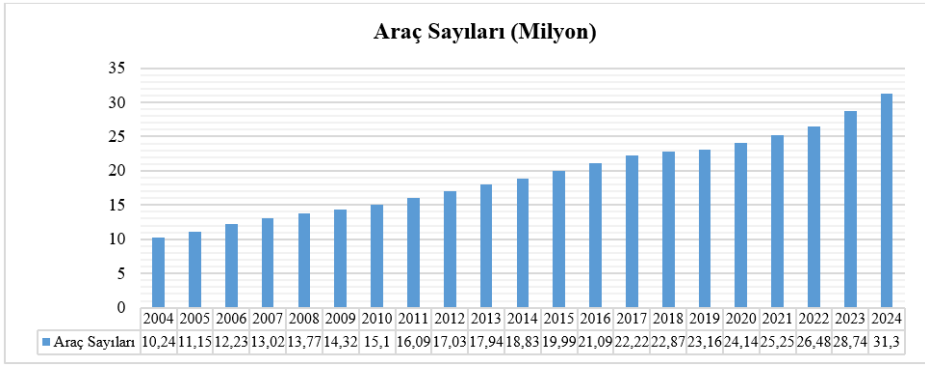
TÜRKİYE'DE OTOMOBİL TERCİHLERİNDE YAKIT TÜRLERİNİN EVRİMİ

Eren DAĞLI¹

¹ Öğr. Gör. Dr., Selçuk Üniversitesi, Doğanhisar Meslek Yüksekokulu, Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, eren.dagli@selcuk.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3892-0270

1. GİRİŞ

Geçmişte lüks bir varlık olarak görülebilen otomobiller teknolojiye ki gelişmeler, sektördeki rekabetçi satış pazarının sağladığı finansman avantajları, kentsel gelişmişlik düzeyinin artışı ile birlikte ortaya çıkan gereklilikler ve kişilerin konfor düzeyi beklentisindeki artış ile birlikte günümüzde bir temel ihtiyaç haline gelmiştir. 2019 yılı başlarında ortaya çıkan ve 2020 yılı itibari ile ülkemizde de yoğun şekilde etkisini gösteren COVID-19 pandemisi de bireyleri bulaş endişesi ve sosyal izolasyon sebepleri ile bireysel araç kullanımına yönlendirmiştir (Dağlı, 2021). Trafikteki araç sayısındaki artış ile birlikte altyapı gereksinimleri artmaktadır. Ayrıca bu durum ile birlikte etkin trafik denetim ve düzenlenme ihtiyacı ortaya çıkmaktadır (Dağlı, 2025). 2024 yılı sonu itibari ile trafiğe kayıtlı araç sayılarına ait bilgiler (TÜİK, 2025) Şekil 1’de sunulmaktadır.



Şekil 1. Trafikte kayıtlı araç sayısı (TÜİK, 2025)

Şekilden de görüldüğü üzere Türkiye’de 2004–2024 yılları arasında trafiğe kayıtlı araç sayılarında dikkat çekici bir artış gözlemlenmektedir. 2004 yılında yaklaşık 10,2 milyon olan araç sayısı, 2024 yılı itibarıyla 31,3 milyona ulaşmıştır. Bu durum, yirmi yıllık süreçte toplam araç parkının üç katına çıktığını göstermektedir. Özellikle 2010 sonrası dönemde artışın daha istikrarlı bir seyir izlediği görülmektedir. 2010’da 15,1 milyon olan araç sayısı, 2015’te 20 milyona ulaşarak beş yıl içerisinde yaklaşık %32 oranında artış göstermiştir. 2020 yılı itibarıyla araç sayısı 24,1 milyona yükselmiş, 2021’den sonraki dönemde ise artış hızının daha da ivmelendiği dikkat çekmiştir. Nitekim yalnızca üç yıllık süreçte (2021–2024) araç sayıları 25,2 milyondan 31,3 milyona çıkmış ve bu dönemdeki büyüme yaklaşık %24 olmuştur. Bu eğilim, Türkiye’de motorlu taşıt sahipliğinin hızla yaygınlaştığını ve ulaştırma sektörünün ülke ekonomisinde giderek daha önemli bir yer edindiğini göstermektedir. Öte yandan, araç sayısındaki bu hızlı artış; trafik yoğunluğu, çevresel

etkiler (emisyon artışı), yakıt tüketimi, kentsel ulaşım planlaması ve yol güvenliği gibi konularda ciddi politika geliştirme ihtiyacını da beraberinde getirmektedir.

Araç satın alma durumunda belirleyici olan birçok parametre bulunmaktadır. Türkiye’de otomobil tercihlerinde aracın fiyatı, yakıt türü ve maliyeti, motor hacmi ve teknik performansı, şanzıman tipi, kasa şekli, güvenlik donanımları ile markanın kullanıcılar açısından tanınırlığı gibi birçok kriter belirleyici parametreler olmaktadır (Akal vd., 2019). Ayrıca Dağlı (2025) yapmış olduğu bir çalışmada araç sahibi olan bireyler için araç satın alma durumunda en belirleyici etkenin (Tablo 1) satın alma fiyatı olduğunu ayrıca vites türü, araç markası, güvenlik donanımları, kasa tipi, yakıt türü, yakıt maliyeti ve aracın ikinci elde satış pazarının olması durumlarının etki ettiğini (Tablo 2) tespit etmiştir.

Tablo 1. Araç sahipleri için mevcut araç tercih etmedeki en belirleyici kriter

Mevcut araç tercih etmedeki en belirleyici kriter	Yüzde
Satın alma fiyatı	28,42
Vites türü	16,84
Markası	10,53
Güvenlik donanımları	8,42
Aracın pazarı olması	8,42
Yakıt maliyeti	8,07
Kasa tipi	7,37
Yakıt türü	5,96
Tasarımı / Estetiği	4,91
Toplumdaki o marka ve modele bakış açısı	1,05

Tablo 2. Araç sahipleri için mevcut araç tercih etmedeki kriterler

Mevcut araç tercih etmedeki kriterler	Yüzde
Satın alma fiyatı	18,23
Vites türü	14,75
Markası	10,45
Kasa tipi	10,34
Yakıt türü	9,87
Yakıt maliyeti	9,64
Aracın pazarı olması	9,29
Güvenlik donanımları	8,48
Tasarımı / Estetiği	6,39
Toplumdaki o marka ve modele bakış açısı	2,56

Benzer şekilde araç sahibi olmayan bireylerin araç satın alma durumlarında tercihlerini etkileyecek başlıca kriter satın alma fiyatıdır (Tablo 3). Araç sahibi olmayan bireylerde yakıt maliyeti, vites türü, aracın güvenlik donanımları, aracın ikinci elde satış pazarının olması kriterlerinin araç satın alma durumundaki öne çıkan kriterler olduğu (Tablo 4) belirlenmiştir (Dağlı 2025).

Tablo 3. Araç sahibi olmayanlar için araç satın alma durumunda en dikkat edeceği kriterler

Araç satın alma durumunda en dikkat edilecek kriterler	Yüzde
Satın alma fiyatı	47,06
Güvenlik donanımları	14,03
Aracın pazarı olması	11,76
Yakıt maliyeti	10,41
Vites türü	5,43
Markası	4,07
Tasarımı / Estetiği	3,17
Kasa tipi	2,26
Yakıt türü	1,81

Tablo 4. Araç sahibi olmayanlar için araç satın alma durumunda dikkat edeceği kriterler

Araç satın alma durumunda dikkat edilecek kriterler	Yüzde
Satın alma fiyatı	21,52
Yakıt maliyeti	13,45
Vites türü	12,41
Güvenlik donanımları	11,06
Aracın pazarı olması	9,72
Markası	8,82
Yakıt türü	8,07
Tasarımı / Estetiği	7,92
Kasa tipi	5,53
Toplumdaki o marka ve modele bakış açısı	1,49

Tespitler doğrultusunda satın alma fiyatının hem araç sahibi bireyler hem de araç sahibi olmayan bireyler için oldukça önemli bir kriter olduğu söylenebilir. Buna paralel olarak yakıt maliyeti ve aracın ikinci elde

satış pazarının olması durumları da doğrudan parasal kriter olarak öne çıkmaktadır.

Tablo 5. 2011 yılı itibari ile akaryakıt fiyatları (Aytemiz, 2025)

Tarih	Benzin (TL)	Mazot (TL)
8.01.2011	3,87	3,30
7.01.2012	4,33	3,78
5.01.2013	4,66	4,15
1.01.2014	4,94	4,56
1.01.2015	4,26	3,82
6.01.2016	4,30	3,52
3.01.2017	5,21	4,62
6.01.2018	5,61	5,16
8.01.2019	5,91	5,69
4.01.2020	7,12	6,58
5.01.2021	7,27	6,63
1.01.2022	12,98	12,80
1.01.2023	19,67	22,22
1.01.2024	35,19	37,74
1.01.2025	44,43	45,30

Otomotiv sektörü son yıllarda klasikleşmiş kalıpların ötesine geçmiştir. Elektrikli ve hibrit başta olmak üzere farklı yakıt tipli araçlar ile otonom ve çeşitli sürüş destek sistemleri içeren otomobiller gitgide yaygınlaşmaktadır. Sektördeki bu arz değişimi elbette talebi etkilemekte, talepteki değişim de arzı yönlendirmektedir.

Elektrikli ve hibrit araçlar sektörel bazda olduğu kadar akademik çalışmalar için de ilgi çekici bir alandır. Elektrikli araçların tercih edilişliği ve beklentiler çeşitli çalışmalarda incelenmektedir. Sosyo demografik özellikler bakımından incelendiğinde orta yaşlı ve erkek bireylerin elektrikli araç satın almaya daha yatkın olduğu ayrıca hanede birden fazla araç olma durumunda bunun elektrikli araç satın almayı teşvik edici etki yarattığı tespit edilmiştir (Peters & Dütschke, 2014). Elektrikli araçların enerji verimliliği ve çevreci özelliklerinin yanı sıra sosyal statü bağlamına da dikkat çekilmektedir (Noppers vd., 2014). Elektrikli araçlar oldukça yeni bir alternatif olduğu için kullanıcılarda bilinmezlikler ve tedirginlikler yaratması normaldir. Bu noktadan yola çıkarak elektrikli araç kullanım sonrası kullanıcı görüşlerindeki değişimi irdeleyen çalışmada

elektrikli araç kullanmanın kullanıcı tercihlerini olumlu yönde etkilediği sonucuna ulaşılmıştır (Jensen vd., 2013). Ayrıca şarj imkanı da sunan fişli hibrit araçların bataryalı elektrikli araçlara göre daha tercih edilebilir olduğu belirtilmektedir (Carley vd., 2013). Elektrikli araç tercih edilirliğinde sosyo demografik durumların yanı sıra devlet politikalarının da belirleyici olacağı düşünülmektedir (Zhang vd., 2011).

Çalışma kapsamında bireylerin araç satın alma durumlarında belirleyici olan parametrelerden biri olan yakıt türü ve dolayısı ile yakıt maliyeti durumundan yola çıkarak Türkiye’deki araç satışlarında elektrikli ve hibrit araçların dağılımı ve yıldan yıla değişimi ele alınmıştır. Bu amaçla Türkiye İstatistik Kurumu tarafından yayımlanan Motorlu Kara Taşıtları Bültenlerinden yararlanılmıştır.

2. BULGULAR

Türkiye İstatistik Kurumu tarafından yayımlanan Motorlu Kara Taşıtları Bülteni’nde yer alan bilgiler doğrultusunda 2004 ve 2025 yılları arasında trafikte kayıtlı olan otomobillerin yakıt türlerine göre dağılımlarına ait veriler Tablo 6’da sunulmaktadır. İlgili tabloda 2025 yılı verileri Ağustos ayı sonu itibari ile (ilk 8 aylık) yer almaktadır. Ayrıca yakıt türü bilinmeyenler, ruhsat işlemlerinde yakıt türü boş bırakılan veya sehven hatalı veri girişi yapılan otomobiller toplam otomobil sayısına dâhil edilmiştir. Veriler incelendiğinde 2000’li yılların başından itibaren Türkiye’de tescilli otomobillerin sayısında gözle görülür bir artış yaşandığı aşikârdır. Bu artışın, yalnızca ekonomik büyüme ve kentleşme düzeyindeki yükselişle değil, aynı zamanda otomotiv sektöründeki teknolojik dönüşüm ve kamu politikalarındaki değişimlerle de yakından ilişkili olduğu düşünülmektedir. 2004–2025 dönemini kapsayan bu veriler, Türkiye’deki tescilli otomobillerin yakıt türüne göre tercih edilirliliği ve mevcut otomobillerdeki dönüşümünü ortaya koymaktadır.

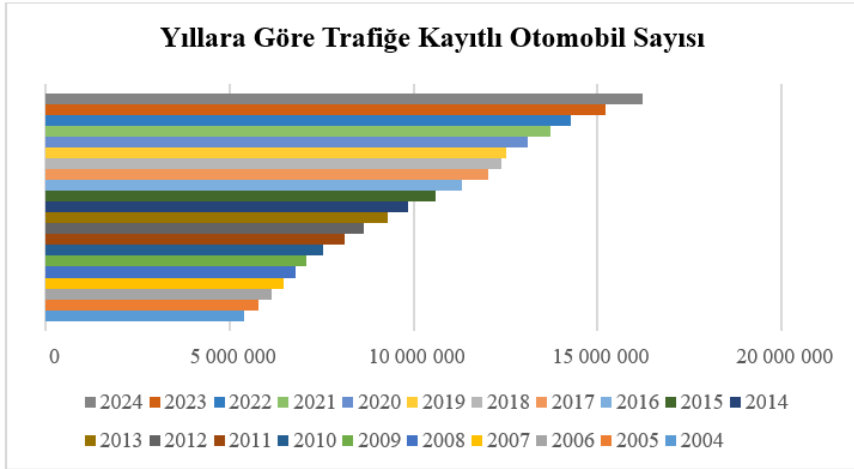
Tablo 6. 2004 ve 2025 yılları arasındaki tescilli otomobillerin yakıt türlerine göre dağılımı

Yıl	Toplam	Benzin	Dizel	LPG	Hibrit	Elektrik
2004	5.400.440	4.062.486	252.629	793.081	-	-
2005	5.772.745	3.883.101	394.617	1.259.327	-	-
2006	6.140.992	3.838.598	583.794	1.522.790	-	-
2007	6.472.156	3.714.973	763.946	1.826.126	-	-
2008	6.796.624	3.531.763	947.727	2.214.661	-	-
2009	7.093.964	3.373.875	1.111.822	2.525.449	-	-
2010	7.544.862	3.191.964	1.381.631	2.900.034	-	-

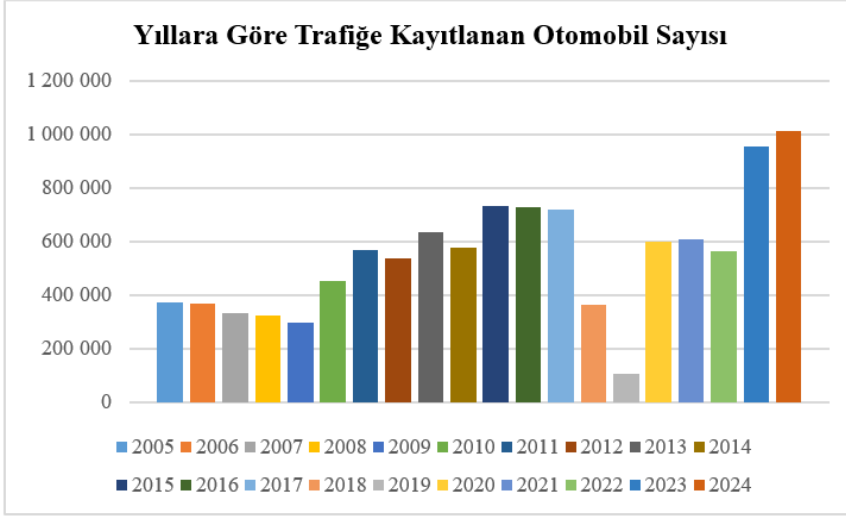
2011	8.113.111	3.036.129	1.756.034	3.259.288	23	24
2012	8.648.875	2.929.216	2.101.206	3.569.143	53	175
2013	9.283.923	2.888.610	2.497.209	3.852.336	83	353
2014	9.857.915	2.855.078	2.882.885	4.076.730	113	412
2015	10.589.337	2.927.720	3.345.951	4.272.044	324	565
2016	11.317.998	3.031.744	3.803.772	4.439.631	517	643
2017	12.035.978	3.120.407	4.256.305	4.616.842	925	760
2018	12.398.190	3.089.626	4.568.665	4.695.717	4.415	952
2019	12.503.049	3.020.017	4.769.714	4.661.707	13.877	1.176
2020	13.099.041	3.201.894	5.014.356	4.810.018	33.690	2.797
2021	13.706.065	3.495.172	5.158.803	4.923.275	86.682	6.267
2022	14.269.352	3.817.104	5.261.876	5.005.563	134.662	14.552
2023	15.221.134	4.362.975	5.425.652	5.094.751	222.328	80.043
2024	16.232.458	4.908.203	5.541.441	5.172.471	391.296	183.776
2025*	16.944.312	5.196.784	5.612.892	5.210.152	580.771	308.217

*Yılın ilk 8 ayına ait verileri içermektedir.

Şekil 2’de 2004 ve 2025 yılları arasında trafikte kayıtlı olan otomobil sayıları ve Şekil 3’te 2004 ve 2025 yılları arasında trafikte kayıtlı olan otomobil sayılarında meydana gelen yıllık değişim miktarı verilmiştir.



Şekil 2. Yıllara göre trafiğe kayıtlı araç sayısı (TÜİK, 2025)



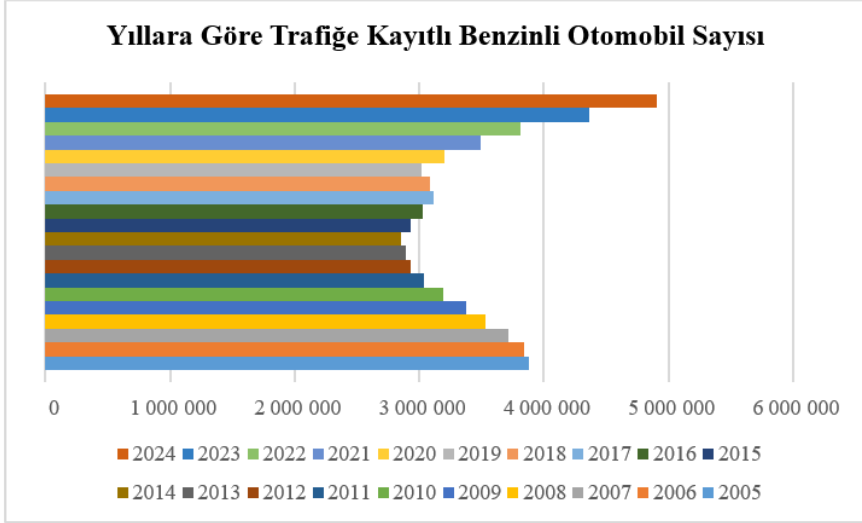
Şekil 3. Yıllara göre trafiğe kayıtlanan araç sayısı (TÜİK, 2025)

Tablo ve grafikler incelendiğinde 2004 yılında trafikteki toplam araç sayısı yaklaşık 5,4 milyon iken, 2024 yılına gelindiğinde bu sayı 16,2 milyona ulaştığı görülmektedir. Yani 20 yıllık dönemde %200'ün üzerinde bir artış söz konusudur. Ortalama yıllık artış 550–600 bin civarındadır, ancak 2016 sonrası dönemde artış hızı 700 binin üzerine, 2024'te ise 1 milyon araç sınırını aşmıştır. Bu artış, Türkiye'de motorlu taşıt sahipliğinin hızla yükseldiğini ve bireysel araç kullanım talebinin önemli ölçüde arttığını göstermektedir.

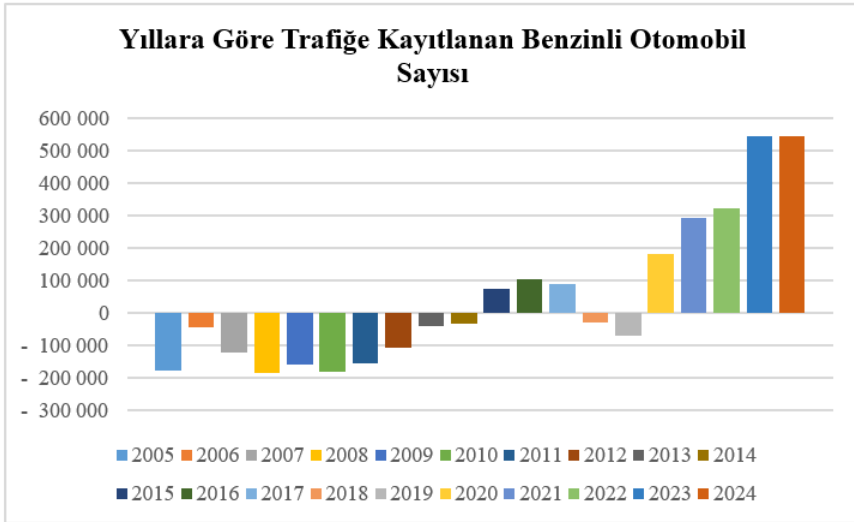
Özellikle 2010 sonrası dönemde yıllık artış oranlarının istikrarlı biçimde yükseldiği, 2016–2023 arası dönemde yıllık artışların 700–950 bin bandında seyrettiği, 2024 yılında ise bu artışın 1 milyonu aşarak rekor düzeye ulaştığı görülmektedir. Bu artışta ekonomik büyüme, kentleşme ve bireysel araç sahiplilik talebinin artmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Bu büyüme, Türkiye'nin kişi başına düşen milli gelirindeki artış ile ilişkilidir. Ancak 2018 sonrasında yaşanan hızlı döviz kuru artışına rağmen artan ikinci el araç fiyatları nedeniyle kullanıcılar 0 araçlara yönelmektedir. Ayrıca, 2010-2011 ve 2017-2019 yıllarında yürürlüğe giren hurda araç teşvikleri, ekonomik ömrünü tamamlamış araçların sistemden çıkarılması ve yeni araçların tescil edilmesi açısından yönlendirici bir etki yaratmıştır.

Şekil 4'te ise 2004 ve 2025 yılları arasında trafikte kayıtlı olan benzinli otomobil sayıları ve Şekil 5'te 2004 ve 2025 yılları arasında trafikte kayıtlı

olan benzinli otomobil sayılarında meydana gelen yıllık değişim miktarı verilmiştir.



Şekil 4. Yıllara göre trafiğe kayıtlı benzinli otomobil sayısı (TÜİK, 2025)

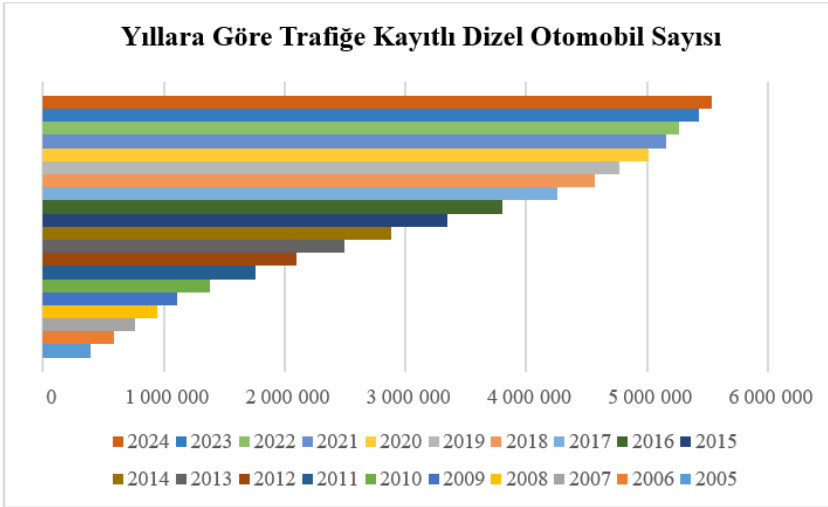


Şekil 5. Yıllara göre trafiğe kayıtlı benzinli otomobil sayısındaki değişim (TÜİK, 2025)

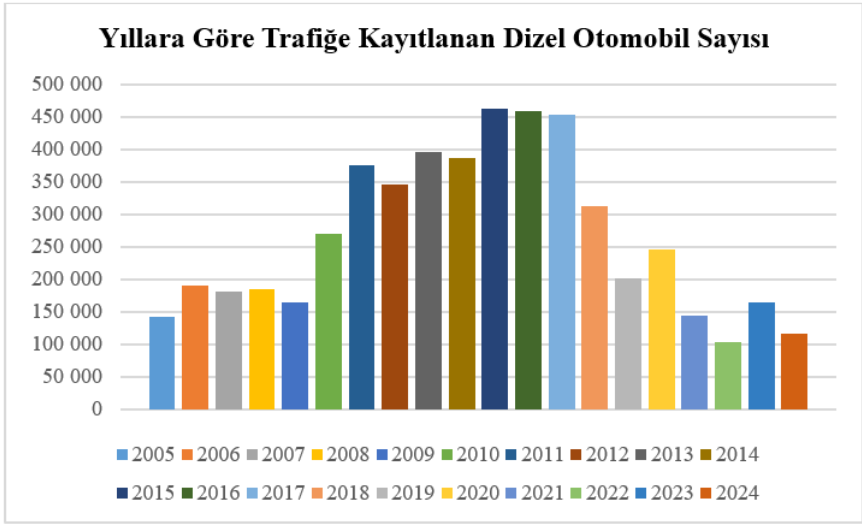
Verilen grafikler incelendiğinde 2004 yılında 4 milyonun üzerinde olan benzinli araç sayısı, 2014'e kadar azalma eğilimindedir. Bu değişimi LGPlı araç sayılarındaki belirtilen dönemdeki artış ile birlikte yorum-

lamak (Şekil 8 ve 9) daha doğru olacaktır. Artan akaryakıt fiyatları kullanıcıları benzine göre daha uygun olan LPG alternatifine yönlendirmiş olabilir. Ayrıca 2010 ve 2011 yıllarındaki hurda araç teşvikleri de ekonomik ömrünü tamamlamış araçların kaydının iptali neticesinde benzinli araçlardaki azalmaya sebebiyet vermiş olabilir. Benzinli araç sayısı 2013'te 2,88 milyonla en düşük seviyesine gerilemiş, ardından yeniden yükselerek 2024 itibarıyla 4,9 milyona ulaşmıştır. Bu artışta yeni nesil düşük hacimli ve yakıt verimli benzinli motorların piyasaya çıkmasıyla benzinli araçların yakıt verimliliğinin artması etkili olmuş olabilir. Ayrıca 2020 yılı sonrasında, emisyon standartlarının sıkılaşması ve dizel üretimin azalmasının benzinli araçların tekrar artışa geçmesine sebebiyet verdiği düşünülmektedir.

Şekil 6'da 2004 ve 2025 yılları arasında trafikte kayıtlı olan dizel yakıt tipli otomobil sayıları ve Şekil 7'de 2004 ve 2025 yılları arasında trafikte kayıtlı olan dizel yakıt tipli otomobil sayılarında meydana gelen yıllık değişim miktarı verilmiştir.



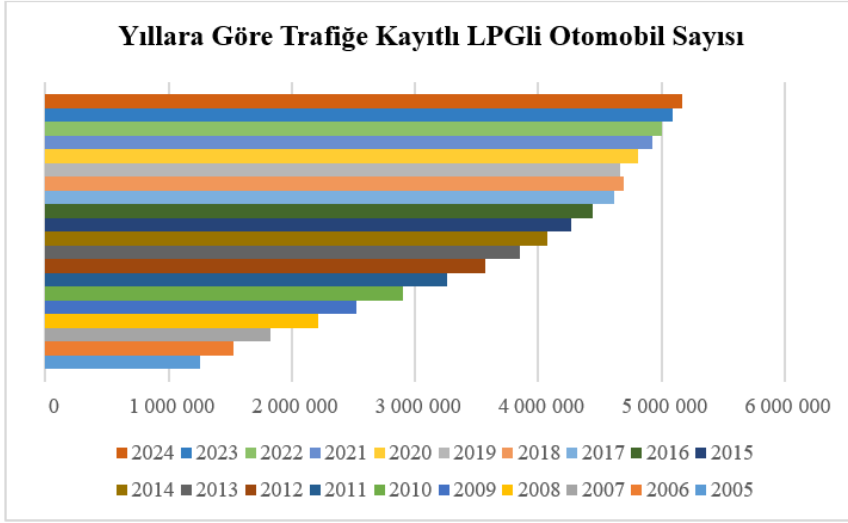
Şekil 6. Yıllara göre trafiğe kayıtlı dizel otomobil sayısı (TÜİK, 2025)



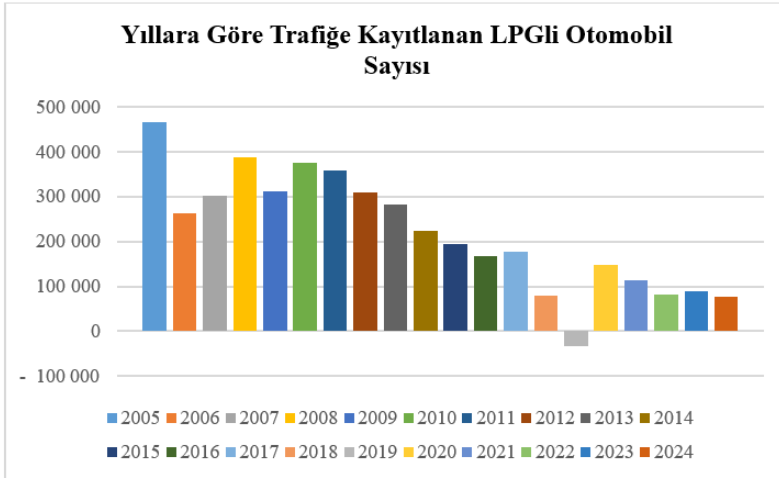
Şekil 7. Yıllara göre trafiğe kayıtlı dizel otomobil sayısındaki değişim (TÜİK, 2025)

Dizel yakıt tipli otomobiller ile ilgili verilen grafikler incelendiğinde 2004'te yalnızca 252 bin olan dizel araç sayısının her yıl artış eğiliminde olduğu ve 2024 yılına gelindiğinde 5,5 milyonun üzerine çıkarak 20 yılda yaklaşık 22 kat arttığı görülmektedir. Benzinli araçlarda olduğu gibi yakıt dönüşüm imkanı da olmadığı için dizel yakıt tipli araçlar incelenen tüm periyotta artış göstermektedir. Özellikle 2010 ve 2020 yılları arasında dizel araçlara olan ilgi bariz şekilde yüksektir. Ancak 2020 yılı itibariyle hem küresel çip krizi hem de emisyon düzenlemelerine bağlı olarak dizel araç arzının azalması dizel yakıt tipli araç stokunun artış hızını yavaşlatmıştır. Buna rağmen 2024 yılı sonu itibari ile tüm yakıt tipleri içerisinde en popüler olan ve yaklaşık %33'lük payla ciddi bir yere sahiptir.

Şekil 8'de 2004 ve 2025 yılları arasında trafikte kayıtlı olan LPGli otomobil sayıları ve Şekil 9'da 2004 ve 2025 yılları arasında trafikte kayıtlı olan LPGli otomobil sayılarında meydana gelen yıllık değişim miktarı verilmiştir.



Şekil 8. Yıllara göre trafiğe kayıtlı LPGli otomobil sayısı (TÜİK, 2025)

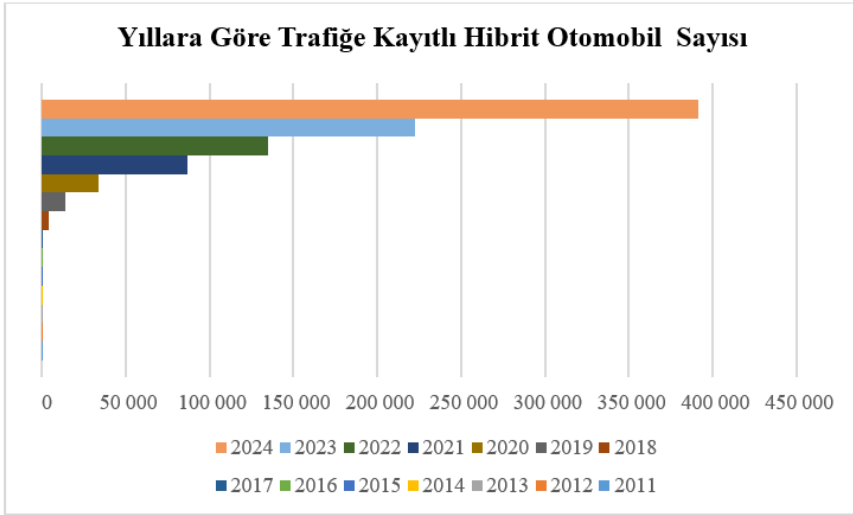


Şekil 9. Yıllara göre trafiğe kayıtlı LPGli otomobil sayısındaki değişim (TÜİK, 2025)

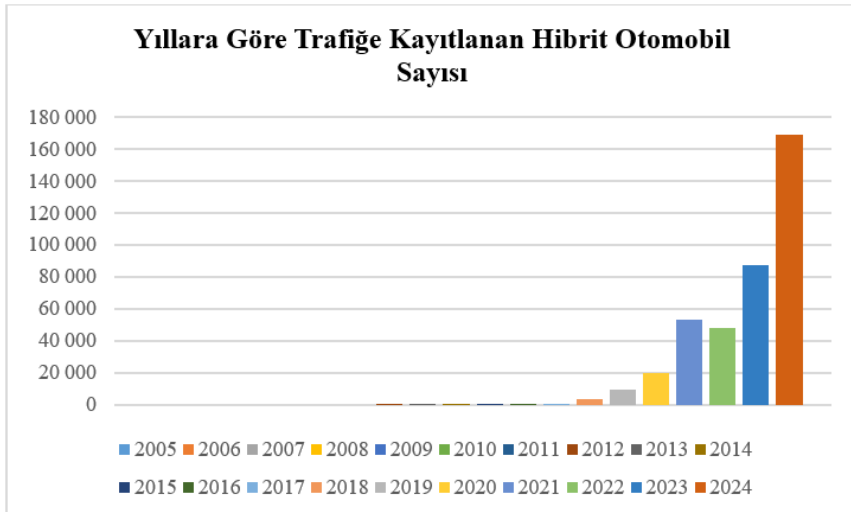
2004 yılında 793 bin olan LPG'li araç sayısı, 2019 yılı haricinde tüm yıllarda artış göstererek 2024 itibarıyla 5,5 milyon civarına ulaşmıştır. Bu artışta benzin fiyatlarının artışı sebebiyle daha ekonomik yakıt tüketimi amaçlı LPG dönüşümlerinin popüler olmasının etkili olduğu düşünülmektedir. LPGli araç stokunda 2005–2010 döneminde çok güçlü artışlar (300–450 bin/yıl) yaşanmış, 2015 sonrasında ise artış ivmesi azalmıştır. Ayrıca son yıllarda otomobil firmalarının fabrika çıkışlı orijinal LPGli

araç satışları da gerçekleştirilmektedir. LPG 2024 yılı sonu itibari ile dizel yakıt tipli araçların ardından en çok tercih edilen yakıt türü konumundadır.

2004 ve 2025 yılları arasında trafikte kayıtlı olan hibrit otomobil sayıları Şekil 10'da ve 2004 ve 2025 yılları arasında trafikte kayıtlı olan otomobil sayılarında meydana gelen yıllık değişim miktarı Şekil 11'de verilmiştir.



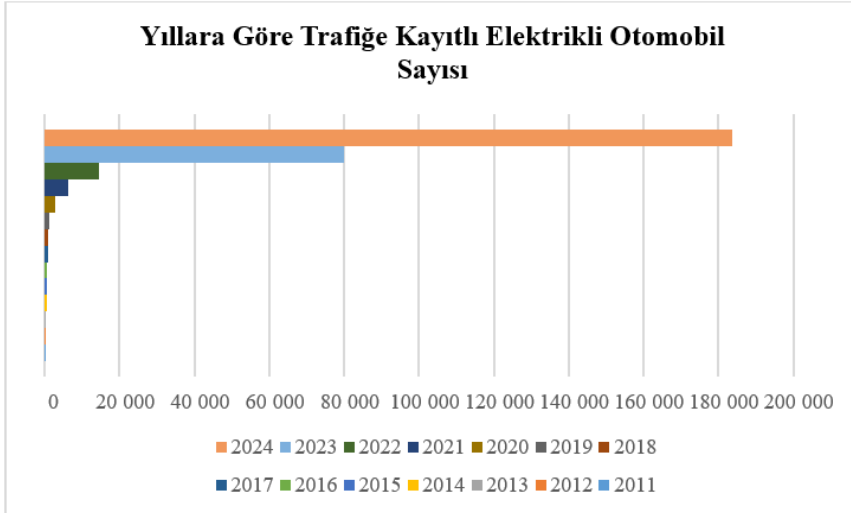
Şekil 10. Yıllara göre trafiğe kayıtlı hibrit otomobil sayısı (TÜİK, 2025)



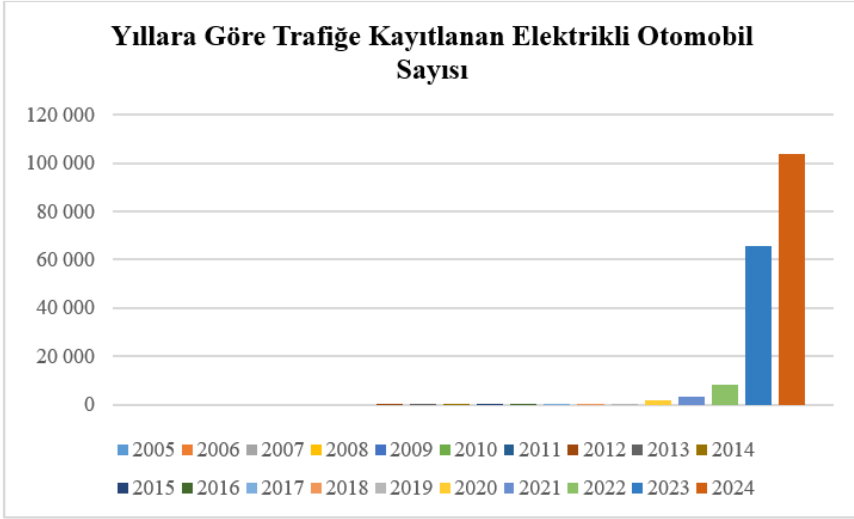
Şekil 11. Yıllara göre trafiğe kayıtlı hibrit otomobil sayısındaki değişim (TÜİK, 2025)

2000li yıllarda benzinli, dizel ve LPGli olan araç opsiyonları çok az sayıda olsa da 2011 yılından itibaren hibrit ve elektrikli araçların tescilleri yapılmasıyla çeşitlilik kazanmıştır. Hibrit otomobiller fosil yakıt kullanmanın yanı sıra elektrik alternatifi ile de çalışabilmektedir. Bu sadece elektrikli araçlar için en büyük kısıtlayıcı durum olan acil durumlarda şarj gerekliliği fosil yakıtlarla aşılabilmekte hem de uygun hallerde elektrik kullanılarak fosil yakıtlara göre daha ekonomik bir çözüm olmaktadır. Türkiye’de 2011 yılından itibaren trafikte hibrit otomobiller seyretmeye başlasa da 2020li yıllara kadar oldukça kısıtlı kalmıştır. 2017 yılı hibrit araçların gerçek çıkış noktası olarak düşünülebilir. Ayrıca Toyota, Hyundai ve Honda gibi üreticilerin Türkiye montaj hatlarında hibrit üretimine başlamasıyla hibrit araç satışları ivme kazanmış ve hibrit araçları cazip hale getiren ÖTV düzenlemeleri sayesinde hibrit araçlar teşvik edilmiştir. Hibrit araçlar, Türkiye’nin karbon emisyonu azaltım stratejisi ile uyumlu olarak özellikle şehir içi kullanımda yakıt tüketimini azaltmakta ve bu şekilde zararlı emisyon gazları salımı azalmaktadır.

Şekil 12’de 2004 ve 2025 yılları arasında trafikte kayıtlı olan elektrikli otomobil sayıları ve Şekil 13’te 2004 ve 2025 yılları arasında trafikte kayıtlı olan elektrikli otomobil sayılarında meydana gelen yıllık değişim miktarı verilmiştir.



Şekil 12. Yıllara göre trafiğe kayıtlı elektrikli otomobil sayısı (TÜİK, 2025)



Şekil 13. Yıllara göre trafiğe kayıtlı elektrikli otomobil sayısındaki değişim (TÜİK, 2025)

Elektrikli araçlar da hibrit araçlar gibi 2011 yılı itibarı ile Türkiye karayollarında seyretmeye başlamıştır. 2011 yılında 24 adet tescilli elektrikli araç varken özellikle 2020 yılı itibarı ile elektrikli araç varlığı büyük bir ivme kazanmıştır. Bu artış, Türkiye’de elektrikli araç şarj altyapısının yaygınlaşması, yerli otomobil olan TOGG’un piyasaya çıkışı (2023) ve elektrikli araç ithalatının kolaylaşması ile doğrudan bağlantılıdır. Elektrikli araçlar 2011’de 24 adet iken, 2024’te 183 binin üzerine çıkmıştır. Fosil yakıtlı araçların yakıt maliyetlerindeki dramatik artışın yanı sıra bu araçların periyodik bakım maliyetlerinin yüksek olması ve egzoz emisyon muayene zorunlulukları gibi etkenler bireyleri elektrikli araçlara yönlendirmektedir. Ayrıca elektrikli araçlarla birlikte Ayrıca karbon nötr politikaları ve kamu bilinci de dönüşümü hızlandırmıştır. Ancak bu elektrikli dönüşüme karşın elektrikli otomobillerin toplam araç stoku içerisindeki payı 2024 yılı sonu itibarıyla %1,13 seviyesindedir. Mevcut artış ivmesi göz önüne alındığında ise ilerleyen yıllarda bu oranın kayda değer biçimde artması beklenmektedir.

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

2004–2024 dönemine ilişkin veriler, Türkiye’deki kara taşıtlarının yalnızca sayısal olarak değil, yakıt türü kompozisyonu bakımından da önemli bir dönüşüm geçirdiğini ortaya koymaktadır. Yirmi yıllık süreçte toplam araç sayısı yaklaşık üç kat artarak 5,4 milyondan 16,2 milyona yükselmiştir. Ancak bu artış, araçların yakıt tercihlerinde farklılaşmaya

da yol açmıştır. 2000’li yılların başında benzinli araçlar toplam tescilli otomobil stokunun büyük kısmını oluştururken, yüksek yakıt maliyetleri ve düşük gelir seviyeleri nedeniyle kullanıcıların LPG’ye yönelmesi sonucu benzinli araçların payı azalmıştır. 2010’lu yıllarda ise dizel motorlu araçlar yakıt verimliliği sayesinde pazarın öne çıkan tipi haline gelmiştir. Ancak emisyon standartları ve dizel araçlara yönelik çevresel eleştiriler sonrası bu eğilim tersine dönmüştür. 2020 sonrasında hibrit ve elektrikli araçların yükselişiyle birlikte fosil yakıtlı araçların yaygınlığı ağırlığı azalmaya başlasa da 2024 yılı sonu itibarıyla halen mevcut araç stokunun %96,45’i fosil yakıtlı otomobillerden oluşmaktadır. Buna rağmen 2025 yılı ağustos ayı itibarı ile Türkiye’deki hibrit otomobil sayısı 580 bine, elektrikli araç sayısı ise 183 bine ulaşmıştır. Gelecek yıllarda ise bu dönüşümün sürdürülebilir ulaşım politikaları ve teşviklerle hız kazanacağı düşünülmektedir.

Tescilli otomobillerin yakıt türlerine göre dağılımı zamansal olarak incelendiğinde 2004 ile 2015 yılları arası fosil yakıtlı büyüme dönemi olarak düşünülebilirken 2020’li yıllarla birlikte hibrit ve elektrikli olmak üzere alternatif yakıt tipli araç dönüşümü dönemi olarak nitelendirilebilir. Bu durum Türkiye’nin karbon emisyonu azaltımı hedefleri ve sürdürülebilir ulaşım politikalarıyla uyumludur. Ancak dönüşümün hızlanması için altyapı yatırımları hızlanmalı özellikle elektrikli araçlar için ön yargı sebebi olan şarj altyapısının erişilebilirliği sağlanmalıdır. Ayrıca vergi teşvik politikalarının sürdürülmesi ve özellikle eski araçlar için hurda teşvik kampanyalarının desteklenmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak, 2004–2024 dönemi Türkiye’de tescilli araç stoku, fosil yakıtlardan yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişin başlangıcını yansıtmaktadır. Önümüzdeki yıllar bu dönüşümün hızlanacağı ve taşıt stokunun değişeceği yönünde izlenim vermektedir. Bu nedenle, enerji güvenliği, çevresel sürdürülebilirlik ve teknolojik yenilik arasında denge kuran bütüncül politikaların benimsenmesi gerekmektedir. Böyle bir yaklaşım, hem ekonomik hem de ekolojik açıdan Türkiye’nin ulaşım sektöründe rekabet gücünü artıracaktır.

KAYNAKLAR

- Akal, M., Alpdoğan, H., & Akat, A. (2019). İstanbul ili otomobil talebi yapısı ve tüketici tercihlerinde değişimler. *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 15(2), 177-197.
- Aytemiz (2025). *Akaryakıt Fiyatları*, 7 Ekim 2025 tarihinde <https://www.aytemiz.com.tr/akaryakit-fiyatlari/arsiv-fiyat-listesi> adresinden alındı.
- Carley, S., Krause, R. M., Lane, B. W., & Graham, J. D. (2013). Intent to purchase a plug-in electric vehicle: A survey of early impressions in large US cites. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 18, 39-45.
- Dağlı, E. (2025). *Uçan arabalar için işletim parametrelerinin ve gelecek adaptasyon stratejilerinin belirlenmesi* [Doktora tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü].
- Dağlı, E., & Taşpınar, Y. S. (2025, Nisan 25–26). Türkiye trafik kaza istatistikleri ve Konya ili bazlı kaza durum incelemesi. Al Farabi 14. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar ve İnovasyon Kongresi, Beyşehir, Konya.
- Dağlı, E., Aydın, M. M., & Çoruh, E. (2021). Şehir İçi Ana Arterlerde COVID-19 Kısıtlamalarından Dolayı Trafik Akımlarında Meydana Gelen Değişimlerin İncelenmesi: Antalya Örneği. *İdealkent*, 12(34), 1199-1225.
- Jensen, A. F., Cherchi, E., & Mabit, S. L. (2013). On the stability of preferences and attitudes before and after experiencing an electric vehicle. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 25, 24-32.
- Noppers, E. H., Keizer, K., Bolderdijk, J. W., & Steg, L. (2014). The adoption of sustainable innovations: Driven by symbolic and environmental motives. *Global Environmental Change*, 25, 52-62.
- Peters, A., & Dütschke, E. (2014). How do consumers perceive electric vehicles? A comparison of German consumer groups. *Journal of Environmental Policy & Planning*, 16(3), 359-377.
- Türkiye İstatistik Kurumu (2025). *Motorlu Kara Taşıtları Bülteni Ocak 2025*, 7 Ekim 2025 tarihinde <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Ocak-2025-54048> adresinden alındı.
- Zhang, Y., Yu, Y., & Zou, B. (2011). Analyzing public awareness and acceptance of alternative fuel vehicles in China: The case of EV. *Energy Policy*, 39(11), 7015-7024.

Bölüm 3

BOLU İLİNDE BULUNAN 10 ADET BETONARME YAPININ SUCUOĞLU SOKAKTAN TARAMA YÖNTEMİ İLE DEPREM PERFORMANSININ BELİRLENMESİ

***Melike GÜNGÖR YÜCEKAYA¹, Memduh KARALAR²,
Necati MERT³***

1 Sorumlu Yazar: Y. İnş. Müh., Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı, Bolu, Türkiye, e-mail: melike.gungor2880@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5391-790X

2 Doç. Dr., Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye, e-mail: memduhkaralar@beun.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-4595-8971

3 Dr. Öğr. Üyesi, Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye, e-mail: mert@sakarya.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-9720-5082

1. Giriş

Depremelerin yıkıcı etkileri, ülkemizde geçmişten günümüze kadar önemli oranda can ve mal kayıplarına neden olmaktadır (Nemrutlu, Balun ve Sarı, 2021). Özellikle son yıllarda nüfus yoğunluğunun olduğu bölgelerde ardı ardına meydana gelen depremlerle insanların can güvenliği bakımından daha fazla sorun ortaya çıkmaktadır (Bal 2005).

Ülkemizin genel olarak her bölgesinden geçen aktif faylar ve bunlara bağlı olarak oluşan depremler, deprem mühendisliğinin ve yapıların depreme karşı dayanıklı olarak tasarlanmasının önemini açıkça ortaya koymaktadır (Coşkun, Gürsoy ve Garip). Ancak beton teknolojisinin ülkemizde uygulamaya başlaması ile beraber son yüz yıl içinde inşa edilmiş olan yapıların herhangi bir deprem yönetmeliğine bağlı olarak projelendirilip projelendirilmediği önemli bir husustur. Buna ilaveten deprem yönetmeliklerinin zaman içinde değiştirilerek geliştirilmesine bağlı olarak yapıların güncel deprem yönetmeliği şartlarına haiz olmaması ve yapım aşamasında kontrol hizmetini almamış olması gibi nedenlerden dolayı mevcut yapı stokumuzun yeterli deprem dayanımını sağlayıp sağlamadığı hakkında ciddi belirsizlikler bulunmaktadır. Bu belirsizliklerin giderilmesi adına güncel deprem yönetmeliğimiz olan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018) kapsamında yapıların incelenerek detaylı olarak analizlerinin yapılması gerekmektedir. Detaylı analizlerin yapılmasına yönelik mevcut yapılardan malzeme dayanımlarını belirlemek için numunelerin alınması, laboratuvar deneylerine tabii tutulması, elde edilen malzeme dayanımları ile detaylı yapısal analizlerin yapılması, bu işlemlerin takibi ve yürütülmesinde konusunda uzman teknik personel ihtiyacı gibi nedenlerden dolayı bu süreçler oldukça uzun süre ve ciddi maliyet gerektirmektedir. Bu sebeple mevcut yapı stokunun içinde deprem dayanımı bakımından yetersiz yapıların belirlenmesine yönelik hızlı görsel tarama yöntemleri ve teknikleri geliştirilmiştir (Bhalkikar ve Kumar).

Bu tekniklerin başlıca avantajı, hızlı ve temel düzeyde uygulanabilir olmalarıdır ve bu sayede değerlendirmeyi yapan denetmen, nispeten kısa bir sürede çok sayıda binayı değerlendirebilir. Özellikle yüksek sismisiteye sahip bölgelerde, Hızlı Görsel Tarama

(RVS) tekniklerinin kullanımı oldukça yaygındır.(Achs ve Adam, 2012).

Hızlı görsel tarama yöntemleri olarak FEMA 154 Hızlı Görsel Tarama Yöntemi, Kanada Sismik Tarama Yöntemi (NRCC), Sucuoğlu Sokaktan Tarama Yöntemi (Sucuoğlu 2007), P 25 Yöntemi (Bal, Tezcan ve Gülay, 2007), olmak üzere yapıları deprem performanslarının belirlenmesinde kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır.

Bu yöntemlerin içinde ülkemizde geliştirilen Sucuoğlu Sokaktan Tarama Yöntemi, 1999 Düzce Depremi sonrasında hasar gören 454 bina incelenerek geliştirilmiştir. Bu yöntem ile değerlendirilen mevcut yapıların, değerlendirme sonucu riskli olarak çıkması halinde yapıların daha kapsamlı bir inceleme için detaylı yapısal incelemeye alınması gerektiği yönünde karar verilir (Sucuoğlu 2007).

Sucuoğlu Sokaktan Tarama Yöntemi, bir ile altı katlı betonarme yapılara uygulanabilen bir hızlı görsel tarama yöntemidir. Bu yöntem ile birlikte yapıların görsel olarak sokaktan tespit edilebilen özellikleri kullanılarak risk sıralaması yapılabilmektedir. Bu incelemeler konusunda uzman kişiler tarafından çok kısa sürede yapılarak binalara ait parametreler belirlenebilmektedir (Sucuoğlu 2007).

Bu çalışmada Sucuoğlu Sokaktan Tarama Yöntemi kullanılarak Bolu İlinde yer alan 10 adet betonarme yapıda deprem performans skorları belirlenmiştir. İncelenen betonarme yapılar 6306 sayılı “Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun” un Uygulama Yönetmeliği Ek-2, “Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar” kapsamında riskli yapı tespitleri yapılarak riskli yapı olarak bulunmuş olan yapılardır.

2. Materyal ve Metot

Büyük depremlerin şiddetli ve yıkıcı etkilere sahip olması nedeni ile geçtiğimiz yıllar içinde mevcut yapılarımızda ciddi yıkımlar ve can kayıpları meydana gelmiştir. Geride kalan yapıların ise çoğu ağır ve orta derecede hasar almıştır. Bu sebeple yapıların deprem öncesinde dayanımlarının belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Yapıların deprem performansını belirlemek için geliştirilen hızlı görsel tarama yöntemlerinden biri olan Sucuoğlu Sokaktan Tarama Yöntemi binaların dışarıdan göz ile görülebilen yapısal özellikleri üzerinden puanlama yapılarak bir sonuç elde edilmesine dayanmaktadır. Değerlendirmede dikkate alınan

yapısal özellikler zemin parametrelerinden olan PGV (En büyük yer hızı (cm/sn)), toplam kat sayısı, düşey düzensizlik özelliklerinden olan ağır çıkmalar ve yumuşak kat, yapının bitişik binalar ile konumu ile döşeme kat seviyesi ile görünen kalitesi olarak sıralanmaktadır. Sucuoğlu Sokaktan Tarama Yönteminde kullanılan yapısal parametreler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. *Sucuoğlu Sokaktan Tarama Yönteminde kullanılan yapısal parametreler (Sucuoğlu, 2007).*

Sıra No	Yapıya Ait Parametreler
1	Toplam Kat Sayısı
2	Zemin Parametresi PGV
3	Yumuşak Kat
4	Görünen Kalite
5	Bitişik Binalar ile Konumu ve Kat Seviyesi
6	Ağır Çıkmalar

Sucuoğlu Sokaktan Tarama Yönteminde Tablo 1’de verilen yapısal parametreler kullanılarak denklem 1’de verilen formül ile performans skoru hesaplanmaktadır.

$$PS = BS + \Sigma((VS) * (VSM)) \quad (1)$$

Denklem 1’de yer alan formülde, PS performans puanı, BS başlangıç performans puanı, olumsuzluk parametre değeri VSM ve olumsuzluk parametre puanı VS anlamına gelmektedir. Olumsuzluk parametre değeri VSM kötü, orta, iyi durumları için sırası ile -1, 0, +1 değerlerini alır. Performans puanı hesabında öncelikli olarak bina kat sayısı ile deprem tehlike bölgesi birlikte dikkate alınarak binaların başlangıç performans puanı belirlenir. Yapının olumsuzluk parametreleri olarak değerlendirmeye dâhil edilen puanlar olumsuzluk parametre puanları ile çarpılarak başlangıç performans puanına ilave edilir. Performans skoru sonucu Sucuoğlu Sokaktan Tarama Yönteminde kullanılan sınır değeri olan (SD=60) 60 değeri ile karşılaştırılır. Elde edilen değer 60’dan küçük ise yapı riskli olarak, 60’dan büyük ise risksiz olarak değerlendirilir.

Denklem 1’de yer alan formülün uygulanabilmesi adına Sucuoğlu Yönteminde bütünleşik skor tablosu geliştirilmiştir. Geliştirilen bütünleşik skor tablosu aşağıda Tablo 2’de verilmektedir.

Tablo 2. *Sucuoğlu Sokaktan Tarama Yöntemi Bütünleşik Skor Tablosu (Sucuoğlu, 2007).*

Toplam Kat Sayısı	Başlangıç Performans Skoru			Olumsuzluk Katsayıları						
				Bağımsız Bina Özellikleri			Bitişik Binalar ile Konumu ve Kat Seviyesi			
	PGV 60-80	PGV 40-60	PGV 20-40	Yumuşak Kat	Görünen Kalite	Ağır Çıkmalar	Aynı Orta	Aynı Kenar	Farklı Orta	Farklı Kenar
1-2	90	125	150	20	9	10	0	10	5	15
3	80	107	138	23	9	23	0	10	5	15
4	73	91	115	22	15	30	0	10	5	15
5-6	64	76	92	24	23	33	0	10	5	15

Sucuoğlu Sokaktan Tarama Yönteminde (Sucuoğlu, 2007), Düzce depremi (1999) sırasında hasar gören 454 yapı incelendiğinde yöntemde dikkate alınan yapısal parametrelerden kat sayısının yapıların kat yüksekliği arttıkça hasar seviyesinin arttığı tespit edilmiştir. Aynı şekilde yapılarda yumuşak kat ve ağır çıkmaların bulunması halinde ve yapıların görünen kalitesinin kötü olması halinde hasar seviyesinin yine arttığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple yöntemin uygulanmasında yapılarda bulunan bu yapısal özellikler dikkate alınarak deprem dayanımları belirlenmektedir. Elde edilen sonuç değeri yöntemde kullanılan sınır değer olan 60 değerinden büyük çıkarsa yapılar riskli kabul edilerek detaylı yapısal analiz yapılması gerektiğine karar verilir.

Sucuoğlu Sokaktan Tarama Yönteminde performans skoru hesaplanırken dikkate alınması gereken yapılar ait olumsuzluk parametreleri olarak belirlenen ve görsel olarak algılanabilen yapının taşıyıcı sisteminde tespit edilen yumuşak kat, ağır çıkmalar ve yapı nizam durumu gibi deprem performansını düşürmeye yönelik olumsuz etkilere sahip özelliklerin değerlendirmeye alınarak hesaplamalara dâhil edilmesi gerekir.

2.1 Yumuşak Kat

Yapılarda özellikle zemin katın diğer katlara nispeten daha düşük dayanım ve rijitliğe sahip olması durumunda ortaya çıkan bir olumsuzluk parametresidir. Genelde, yapıya ait katların kullanım amacının farklı olmasına bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Yapılarda zemin katta bulunan ticarethane olarak kullanılan bölümlerin bulunması ya da kat yüksekliğinin diğer katlardan fazla olması halinde yapıda deprem dayanımı bakımından zayıflığa neden olup yıkıma yol açabilmektedir. Yumuşak kat oluşumuna örnek bir yapı Şekil 1.'de verilmektedir.



Şekil 1. Yumuşak kat oluşumunu gösteren bina örneği (Url-1).

2.2 Ağır Çıkmalar

Zemin kat oturma alanından daha fazla bir oturma alanı elde etmek amacı ile zemin üstünde bulunan kat döşemelerinin dışarıya çıkması neticesinde ağır çıkmalar meydana gelmektedir. Ağır çıkmanın bulunması yapı kütlelerinin düzensiz bir şekilde üst katlarda artmasına neden olmaktadır. Ağır çıkmalar nedeni ile zemin kat daha fazla yük alarak deprem esnasında yapısal hasarın artmasına yol açar. Ülkemizde yapı stoğumuz içinde ağır çıkma bulunan yapılar oldukça fazladır. Ağır çıkma oluşumuna örnek bir yapı Şekil 2.'de verilmektedir.



Şekil 2. Ağır çıkma oluşumunu gösteren bina örneği.

2.3 Yapı Nizamı

Bitişik nizamda inşa edilmiş olan yapılar arasında yeterli miktarda boşluk olmaması halinde yapılar deprem esnasında birbirleri ile çarpışarak daha fazla yıkıcı etki oluşumuna neden olurlar. Yapıların döşeme seviyelerinde farlılık varsa bu etki daha da artmaktadır. Bitişik nizamda bulunan yapıların başında ve sonunda bulunan yapılarda deprem kuvvetinin oluşturduğu hasar daha fazla olarak meydana gelmektedir. Arada kalan yapıların her iki tarafında yapı olması nedeni ile yük dengesi sağlanarak daha az hasar oluşmaktadır. İmar durumlarına esas birçok yapı bitişik nizam şeklinde inşa edilmişlerdir. Bitişik nizam oluşumuna örnek yapılar Şekil 3’de verilmektedir.



Şekil 3. Bitişik nizam oluşumunu gösteren bina örnekleri.

Bu çalışmada Bolu İlinde bulunan 10 adet betonarme yapı 6306 Sayılı “Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun”un Uygulama Yönetmeliği EK-2, “Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar” kapsamında riskli yapı tespiti yapılarak, analizler neticesinde riskli olarak bulunmuşlardır. Riskli yapı tespiti yapılan 10 adet betonarme yapının bulunduğu yerler Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü, Parsel Sorgu Uygulaması üzerinden bulunup işaretlenerek Şekil 4.’de verilmiştir.



Şekil 4. Bolu ilinde riskli yapı tespiti yapılan 10 adet betonarme binanın konumları (TKGM Parsel Sorgu Uygulaması 2023, Url-2).

Yapıların mevcut durumlarını belirlemede malzemeye dayanımları olarak beton yapı malzemesi için laboratuvar deneyleri yapılmış ve demir donatı tespiti içinse yerinde sıyırma işlemleri uygulanmıştır. Yapıların zemin sınıflarının belirlenmesinde bulundukları parsel bazında zemin ve temel etüdü veri raporu sonuçlarından elde edilmiştir.

6306 Sayılı “Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun” kapsamında riskli yapı tespiti yapılan 10 adet betonarme yapıdan 3 ve 9 numaralı yapıya ait fotoğraflar Şekil 5. (a) ve (b)’de örnek teşkil etmesi bakımından verilmektedir. Yapıların laboratuvar deneyler sonucunda elde edilen beton dayanımları oldukça düşük olarak bulunmuştur. Yapılara ait fotoğraflardan görüldüğü üzere yapıların görsel kalitesi oldukça düşüktür. Demir donatı olarak S220 demir kullanılarak nervürlü demir kullanılmadığı tespit edilmiştir. Yapım yılları dikkate alındığında 3 numaralı yapı incelemenin yapıldığı 2023 yılında 44, 9 numaralı yapı ise 33 yıllık bir yapı olmak üzere yapı kullanım ömrünün büyük bir kısmını doldurmuştur. Yapıların inşa edildiği dönemde yürürlükte olan deprem yönetmeliklerine uygun olarak yapılıp yapılmadığı bilinmemektedir. Ayrıca yapılar güncel deprem yönetmeliği olan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018) şartlarını da karşılamamaktadır.



(a)



(b)

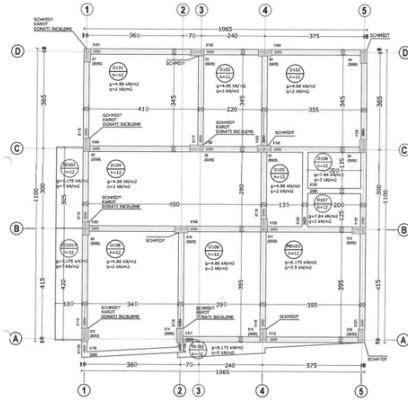
Şekil 5. (a) 3 No 'lu riskli yapıya ait fotoğraf; (b) 9 No 'lu riskli yapıya ait fotoğraf.

Bu çalışmada 10 adet betonarme yapı 6306 Sayılı “Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun”un Uygulama Yönetmeliği EK-2, “Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar” kapsamında yapılan analizler neticesinde riskli yapı olarak tespit edilmişlerdir

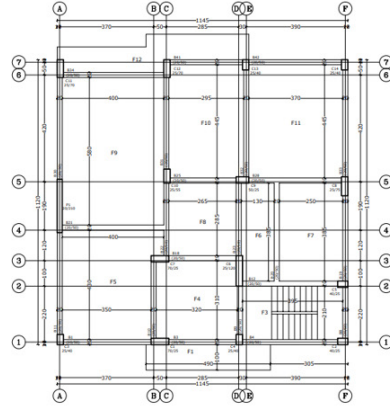
Yapıların deprem performanslarının değerlendirmesinde kullanılan hızlı görsel tarama yöntemi Sucuoğlu Sokaktan Tarama Yönteminde değerlendirmede yapıların sokaktan gözle görülen özellikleri dikkate alınarak değerlendirme yapılmaktadır.

Çalışmada incelenen 3 numaralı riskli yapıya ait zemin kat kalıp planı Şekil 6.(a)’da, 9 numaralı riskli yapıya ait zemin kat planı ise Şekil 6.(b)’de örnek teşkil etmeleri bakımında verilmektedir.

Yapılara ait gözle tespit edilebilen özelliklerinden Sucuoğlu Sokaktan Tarama Yönteminde kullanılan yapı kat sayısı parametresi ile zemin parametrelerinden PGV (En büyük yer hızı (cm/sn)), değerine bakılarak her bir yapı için başlangıç performans skoru Sucuoğlu Sokaktan Tarama Yöntemi Bütünleşik Skor Tablosundan elde edilir. Çalışma incelenen her bir yapıyı kat sayısını ve (En büyük yer hızı (cm/sn)) değerlerini gösteren grafikler Şekil 7. ve Şekil 8.’de verilmiştir.



ZEMİN KAT KALIP PLANI

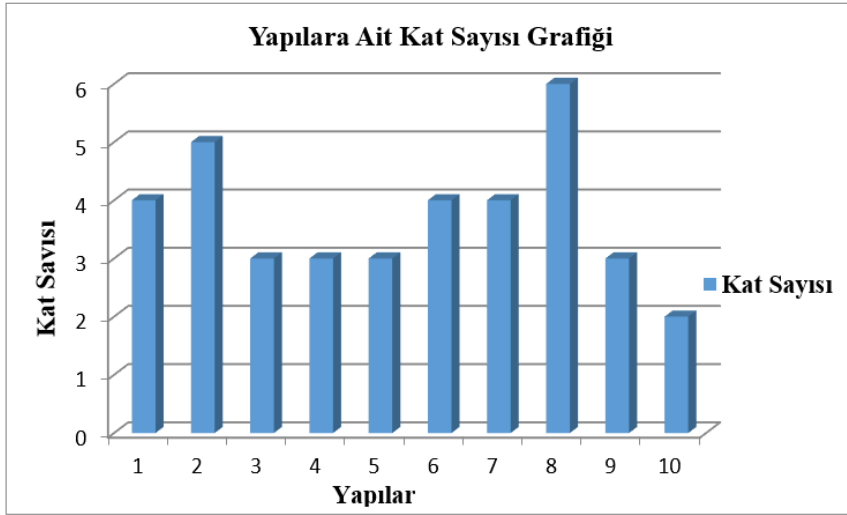


ZEMİN KAT KALIP PLANI

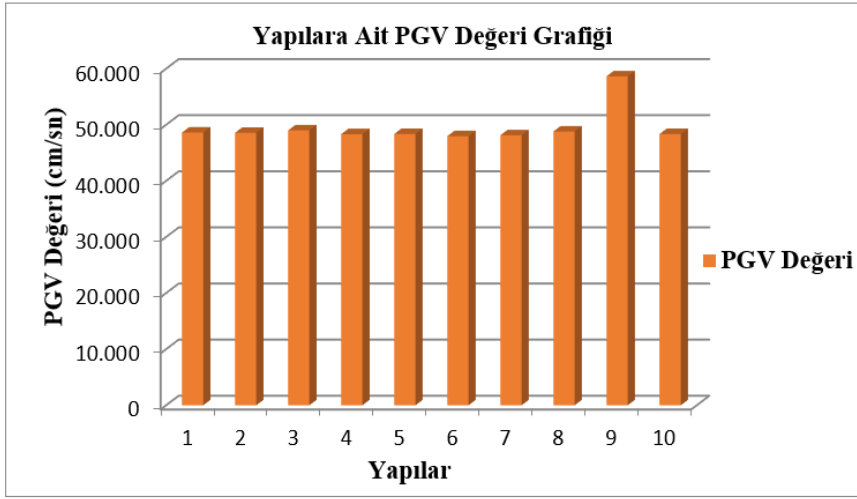
(a)

(b)

Şekil 6. (a) 3 No'lu riskli yapıya ait zemin kat kalıp planı; (b) 9 No'lu riskli yapıya ait zemin kat kalıp planı.



Şekil 7. Yapılara ait kat sayısı grafiği.



Şekil 8. Yapılara ait PGV değeri grafiği.

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışma kapsamında incelenen yapıların zemin etüdü raporlarından elde edilen en büyük yer hızı olan PGV değeri ve kat sayıları ile bütünleşik skor tablosundan yapılara ait başlangıç skorları bulundu. Yapıların dışarıdan gözlemlenebilen olumsuzluk parametreleri bulunarak hesaplamalara dâhil edildi. Hesaplamalar neticesinde performans skoru bulundu. Sınır değer olan 60 değeri ile karşılaştırılarak yapıların risk durumu tespit edildi. 6306 sayılı Kanun kapsamında Riskli yapı tespiti sonucu riskli olduğu belirlenen 10 adet betonarme yapının Sucuoğlu Sokaktan Tarama Yöntemi sonucu belirlenen performans değerleri Tablo 3’de verilmektedir.

Tablo 3. 10 Adet riskli yapı tespiti yapılan betonarme yapının Sucuoğlu Sokaktan Tarama Yöntemi değerlendirme sonuçları.

Yapı Sıra No	Yapım Yılı	Zemin Sınıfı	Sistem Türü	Yapısal Kat Sayısı	Toplam Kat	PGV	Başlangıç Performans Skoru	Yumuşak Kat	Görünen Kalite	Ağır Çıkmalar	Yapı Nizamı	Performans Skoru	Performans Skoru-Sınır Değer Karşılaştırması	Yapı Risk Durumu
1	1984	ZC	BC	4	48,615	91	0	15	0	0	0	76	PS=76>SD=60	Risksiz
2	1984	ZD	BC	5	48,580	76	0	23	0	0	0	53	PS=53<SD=60	Riskli
3	1979	ZD	BC	3	49,008	107	0	9	23	0	0	75	PS=75>SD=60	Risksiz
4	1988	ZD	BC	3	48,331	107	0	9	0	0	0	98	PS=98>SD=60	Risksiz
5	1988	ZD	BC	3	48,371	107	0	9	23	0	0	75	PS=75>SD=60	Risksiz
6	1971	ZD	BC	4	47,97	91	0	15	30	10	0	36	PS=36<SD=60	Riskli
7	1982	ZD	BC	4	48,14	91	0	15	0	0	0	76	PS=76>SD=60	Risksiz
8	1980	ZD	BP	6	48,814	76	0	23	33	15	0	5	PS=5<SD=60	Riskli
9	1990	ZD	BC	3	58,64	107	0	9	0	0	0	98	PS=98>SD=60	Risksiz
10	1971	ZD	BC	2	48,356	125	0	9	0	0	0	116	PS=116>SD=60	Risksiz

Bu sonuçlar incelendiğinde 10 adet betonarme yapıdan, 3 adedi Sucuoğlu Sokaktan Tarama Yöntemine göre riskli olarak bulunmuştur. 6306 Sayılı Kanun kapsamında tamamı riskli yapı olarak bulunan betonarme yapıların hızlı görsel tarama yöntemi değerlendirme sonucu 3 adedinin sınır değeri olan 60 değerinin altında olduğu üzere riskli olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar ile yöntemin %30 doğruluk oranı ile yapıların deprem performanslarını belirlemiş olduğu tespit edilmiştir. Hızlı değerlendirme yöntemi uygulanan yapıların genel olarak görünen kaliteleri kötü olarak tespit edilmiştir. Yapıların hiç birinde yumuşak kat bulunmamaktadır. Ancak ağır çıkmalara rastlanılmıştır. Yapıların 6306 Sayılı Kanun kapsamında yapılan analizler sonuçları ile Sucuoğlu Sokaktan Tarama Yöntemi ile bulunan sonuçları karşılaştırılmalı olarak Tablo 4.'de verilmektedir.

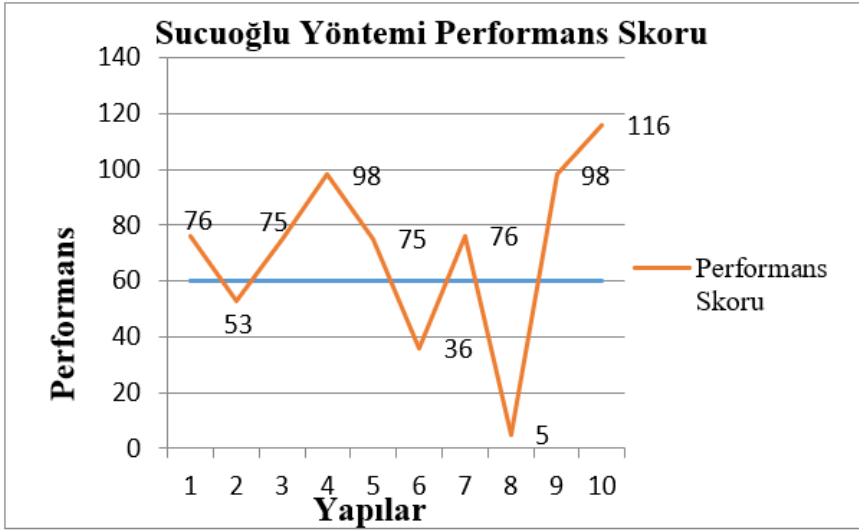
Tablo 4. 10 Adet riskli yapı tespiti yapılan betonarme yapının analiz sonucu ile hızlı değerlendirme yöntemi sonucunun karşılaştırma tablosu.

Yapı Sıra No	Yapım Yılı	Taşıyıcı Sistem Türü	Beton Basınç Dayanımı	Donatı Sınıfı	Zemin Sınıfı	Kat Adedi	6306 Sayılı Kanun Kapsamında Analiz Sonucu	Sucuoğlu Yöntemi Sonucu
1	1984	B. Çerçeve Sistem	13,27 Mpa	S220	ZD	4	RİSKLİ	RİSKSİZ PS:76>SD:60
2	1984	B. Çerçeve Sistem	12,71 Mpa	S220	ZD	5	RİSKLİ	RİSKLİ PS:53<SD:60
3	1979	B. Çerçeve Sistem	13,20 Mpa	S220	ZD	3	RİSKLİ	RİSKSİZ PS:75>SD:60
4	1988	B. Çerçeve Sistem	21,70 Mpa	S220	ZD	3	RİSKLİ	RİSKSİZ PS:98>SD:60
5	1988	B. Çerçeve Sistem	18,80 Mpa	S220	ZD	3	RİSKLİ	RİSKSİZ PS:75>SD:60
6	1971	B. Çerçeve Sistem	26,00 Mpa	S220	ZD	4	RİSKLİ	RİSKLİ PS:36<SD:60
7	1982	B. Çerçeve Sistem	08,61 Mpa	S220	ZD	4	RİSKLİ	RİSKSİZ PS:76>SD:60
8	1980	B. Perde Sistem	25,00 Mpa	S220	ZD	6	GÜÇLENDİRME YAPILMIŞ	RİSKLİ PS:5<SD:60
9	1990	B. Çerçeve Sistem	13,30 Mpa	S220	ZD	3	RİSKLİ	RİSKSİZ PS:98>SD:60
10	1971	B. Çerçeve Sistem	19,50 Mpa	S220	ZD	2	RİSKLİ	RİSKSİZ PS:116>SD:60
								Doğruluk Oranı: %30

4. Sonuç

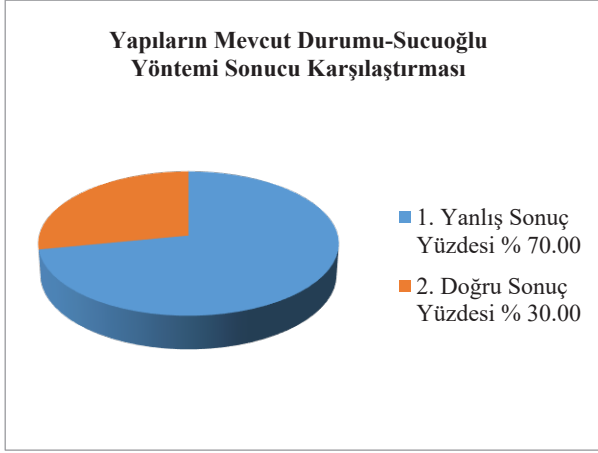
Bolu İlinde yer alan 10 adet betonarme yapı üzerinde 6306 Sayılı “Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun”un Uygulama Yönetmeliği EK-2, “Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar” kapsamında riskli yapı tespiti yapılarak, söz konusu yapılar riskli olarak

bulunmuştur. Buna ilaveten yapıların sokaktan gözle tespit edilebilen yapısal özellikleri dikkate alınarak uygulanabilen hızlı görsel tarama yöntemi olarak geliştirilmiş olan Sucuoğlu Sokaktan Tarama Yöntemi uygulanarak yapıların deprem performansları belirlenmeye çalışılmıştır. Bu yöntem ile yapıların performans skorları bulunmuştur. Sucuoğlu Sokaktan Tarama Yönteminde performans skoru, sınır değer olan 60 değerinden yüksek olan yapıların deprem performansı bakımından yüksek riskli yapı sınıfında yer aldığı, diğer yapıların ise deprem performansı bakımından düşük riskli yapı sınıfında yer aldığı kabul edilmektedir. Uygulanan hızlı değerlendirme yöntemi ile 10 adet betonarme yapının 3 ünün yüksek riskli yapı sınıfına girdiği tespit edilmiştir. Yapılara ait performans skorlarını gösteren grafik Şekil 9.'da verilmektedir.



Şekil 9. Yapılara Ait Sucuoğlu Yöntemi Performans Skoru Grafiği.

Ancak yapılar üzerinde yapılmış olan detaylı analizler ile yapıların tamamının riskli yapı sınıfında olduğu belirlenmiş olduğu üzere Sucuoğlu Sokaktan Tarama Yöntemi %30 oranında bir doğruluk oranı ile yapıların gerçek durumlarını tespit edebilmiştir. Yapıların mevcut durumu ile Sucuoğlu Yöntemi sonuçlarının karşılaştırması Şekil 10.'da verilen grafik ile gösterilmiştir.



Şekil 10. Yapıların analiz sonucu tespit edilen gerçek durumu ile Sucuoğlu Sokaktan Tarama Yöntemi sonuçlarının karşılaştırılması.

Yapıların detaylı analiz ile deprem performanslarının belirlenmesinin uzun, zahmetli ve maliyetli bir iş olması bakımından hızlı görsel tarama yöntemleri kullanılmaktadır. Bu sayede detaylı analiz gerektiren yapıların arasında öncelik sıralamasının yapılması hedeflenmektedir. Sucuoğlu Sokaktan Tarama Yöntemi ile yapıların deprem performanslarının belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde yapıların analiz sonucu ile riskli bulunmuş olmasına karşın yöntem %30 doğruluk oranı ile yüksek riskli yapıları belirlemiştir. Bu çalışmada hızlı değerlendirme yöntemi uygulanan yapıların sayısı 10 adet betonarme yapı olmak üzere belirlenmiştir. Ancak çalışmanın ilerleyen aşamalarında, sayısal olarak daha çok yapıda uygulanabilir.

Hızlı değerlendirme yöntemleri kullanılarak bir bölgede bulunan yapı stoğunun deprem performanslarının belirlenmesi etkin ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilir. Değerlendirme sonucu riskli olarak bulunan yapıların öncelikli olarak detaylı analizlerinin yapılması ile can ve mal kayıpları en aza indirgenebilecektir. İleride yapılacak çalışmalarda farklı hızlı değerlendirme yöntemleri kullanılarak riskli yapıların belirlenmesinde daha yüksek oranda doğruluk ile tespit yapılması mümkün olabilir. Yapılacak olan çalışmalar ve araştırmalar neticesinde daha hızlı ve etkin, ülkemizde kullanıma uygun yeni yöntem ve metotlar geliştirilebilecektir.

Kaynaklar

- Achs, G. & Adam, C. (2012). Rapid Seismic Evaluation of Historic Brick- Masonry Buildings in Vienna (Austria) Based on Visual Screening. Bulletin of Earthquake Engineering, 10:1833-1856, doi: 10.1007/s10518-012-9376-5
- Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği TBDY, Ankara.
- Agency, F.E.M. (2017). Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook; Government Printing Office: Washington, DC, USA.
- Agency, F.E.M. (2015). Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: Supporting Documentation; Government Printing Office: Washington, DC, USA.
- Bal, İ. E. (2005). Deprem Etkisindeki Betonarme Binaların Göçme Riskinin Hızlı Değerlendirme Yöntemleri ile Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bal, İ. E., Tezcan, S. S. ve Gülay, F. G., (16-20 Ekim 2007). Betonarme Binaların Göçme Riskinin Belirlenmesi İçin P25 Hızlı Değerlendirme Yöntemi, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul.
- Bhalkikar, A.; Kumar, R.P. (2021). A comparative study of different rapid visual survey methods used for seismic assessment of existing buildings. Structures 2021, 29, 1847–1860. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.026>
- Coşkun, M.E., Gürsoy, Ş. & Garip, Z.Ş., (2023). Betonarme bir okul binasında güçlendirme ilkelerinin 2007 ve 2019 Türk deprem yönetmeliklerine göre karşılaştırılması. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi. 127-144,15.01.2023, <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1170731>
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, (2012). 6306 Sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, (2019). 6306 Sayılı Kanunun Uygulama Yönetmeliği ⁽¹⁾.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, (2019). Ek-2 Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar.
- Nemrutlu, Ö.F., Balun B. & Sarı, A. (2021). Mevcut Yapıların Depreme Hazırlık Değerlendirmesi: Bingöl İli Örneği. Türk Deprem Araştırma Dergisi 3 (1), 92-109, doi: 10.46464/tdad.932452
- NRCC, (1993). Manual for Screening of Buildings for Seismic Investigation; NRC Publications Archive: Ottawa, ON, Canada.
- Sucuoğlu H. (2007) Kentsel Yapı Stoklarında Deprem Risklerinin Sokaktan Tarama Yöntemi İle Belirlenmesi, 6. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, 267-284.
- Sucuoğlu H., Yazgan U., and Yakut A. (2007). A screening procedure for seismic risk Assessment in Urban Building Stocks, Earthquake Spectra, 23: 441-458.



Url-1 < <https://www.ensonhaber.com/yasam/yumusak-kat-duzensizligi-nedir-depremde-yikilan-binalarin-bircogunda-tespit-edildi-iste-ne>>, erişim tarihi 17.06.2025

Url-2 < <https://parselsorgu.tkgm.gov.tr/>>, erişim tarihi 12.06.2023

//

Bölüm 4

KARBON NÖTR YAPILAR

Aylin AKYILDIZ¹

¹ Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, aakyildiz@nku.edu.tr

ORCID: 0000-0003-2739-0689

1. GİRİŞ

Günümüzde kentleşmenin artmasıyla birlikte, doğaya verdiğimiz zarar her geçen gün artmaktadır. Özellikle yapılaşmanın çok olduğu büyük şehirlerde, enerji tüketimi artmakta ve buda karbon salımına sebep olmaktadır. Artan nüfusla birlikte ulaşım ve enerjiye olan talep artmakta, bu durum iklim değişikliğinin etkilerini daha da arttırmaktadır. Yapı sektörü, hem kullanılan malzemeler hem de yapım ve üretim süreçlerinde harcanan enerji nedeniyle toplam karbon emisyonunun büyük bir kısmından sorumlu tutulmaktadır [1]. Bu nedenle karbon nötr yapılar, çevresel etkileri azaltmak amacıyla geliştirilmiştir.

Karbon nötr yapılar, sürdürülebilirlik anlayışının önemli bir parçası haline gelmiştir. Bu tür yapılar, yaşam süreleri boyunca atmosfere saldıkları karbonu ya hiç üretmez ya da çeşitli yöntemlerle dengeleyerek nötr hale getirirler. Bu yapılardaki asıl amaç, fosil yakıt kullanımını azaltmak ve enerji ihtiyacını yenilenebilir kaynaklardan karşılayarak çevre üzerindeki olumsuz etkileri azaltmaktadır. Bunu sağlamak için doğru malzeme seçimi, enerji tasarrufu sağlayan tasarımlar ve çevre dostu teknolojilerin kullanımı oldukça önemlidir [2].

Son yıllarda, dünya genelinde birçok ülke karbon nötr yapılar konusunda önemli adımlar atmışlardır. Bu konuda çeşitli standartlar, yönetmelikler ve sertifika sistemleri geliştirmişlerdir. Kentlerin giderek artan enerji ihtiyacına sürdürülebilir çözümler sunmak için birçok şehir, 2030 veya 2050 yılına kadar karbon nötr olmayı hedeflemektedir [3].

Türkiye’de karbon nötr yapılarla ilgili çalışmalar henüz başlangıç aşamasında olsa da, özellikle büyükşehir belediyeleri ve özel sektör öncülüğünde bazı projeler hayata geçirilmeye başlanmıştır. İstanbul, Ankara ve İzmir gibi büyük şehirlerde, yeşil bina sertifikalarına sahip kamu binaları ve konut projeleri yaygınlaşmaktadır. Ayrıca Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı’nın hazırladığı “İklim Değişikliğiyle Mücadele Eylem Planı” çerçevesinde, 2053 yılına kadar net sıfır karbon hedefi belirlenmiştir [3, 4]. Bu hedef doğrultusunda yapı sektöründe karbon ayak izini azaltmak, yenilenebilir enerji kullanımını artırmak ve sürdürülebilir şehirleşmeyi desteklemek amacıyla çeşitli stratejiler geliştirilmektedir [5].

İklim değişikliği, günümüzün en ciddi küresel çevre sorunlarından biri olarak öne çıkmakta ve bu sorunla mücadelede yapı sektörü önemli bir rol oynamaktadır. Binaların inşası, kullanımı ve bakımı sırasında ortaya çıkan yüksek enerji tüketimi ile karbon salımı, küresel karbon ayak izinin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu nedenle, yaşam döngüsü boyunca net sıfır karbon salımı gerçekleştiren karbon nötr

yapılar, sürdürülebilirlik odaklı mimarlık yaklaşımları içinde önemli bir yere sahiptir. Karbon nötr yapılar yalnızca çevresel etkileri azaltmakla kalmaz; aynı zamanda enerji verimliliği sağlar ve uzun vadede ekonomik avantajlar sunar [6].

Yapı sektöründe karbon salımının temel nedenleri arasında yapı malzemelerinin üretimi, inşaat süreci ve yapıların kullanım aşamaları yer almaktadır. Özellikle beton ve çelik gibi geleneksel malzemelerin üretimi, hem yüksek miktarda enerji tüketmekte hem de ciddi oranda karbon emisyonuna neden olmaktadır. Ayrıca inşaat sürecinde kullanılan makineler, taşıma araçları ve benzeri ekipmanlar da fosil yakıt tükettiği için emisyonu artırır. Binaların kullanım aşamasında ise özellikle ısıtma, soğutma ve aydınlatma gibi faaliyetler enerji tüketimini büyük ölçüde artırmakta ve bu da doğrudan karbon salımına yansımaktadır [7].

Bu yüzden, karbon nötr yapıların tasarlanmasında enerji verimliliği en ön planda tutulmalıdır. Bu yapılarda uygulanan pasif tasarım teknikleri, enerji ihtiyacını mümkün olduğunca azaltmaya yöneliktir. İyi bir ısı yalıtımı, ısı köprülerinin en aza indirilmesi, doğru pencere seçimi ve güneş ışığından etkin yararlanma enerji tüketimini düşürebilmektedir. Ayrıca, doğal havalandırma ve gün ışığından yararlanma gibi yöntemlerle enerji tüketimi ciddi anlamda düşürülebilir. Bunun yanında doğal havalandırma ve gün ışığının kullanımı da enerji ihtiyacını azaltırken iç mekân konforunu artırmaktadır [8].

Karbon nötr yapılarda yenilenebilir enerji sistemlerinin kullanımı artık bir zorunluluk haline gelmiştir. Özellikle çatı ve cephe yüzeylerine yerleştirilen güneş panelleri, yapıların enerji ihtiyacının büyük bir bölümünü karşılamaktadır. Bununla birlikte, rüzgâr türbinleri ve jeotermal ısı pompaları gibi diğer yenilenebilir enerji sistemleri de binalarda alternatif çözümler sunar. Bu sistemlerin kullanımı, fosil yakıt tüketimini azaltarak karbon salımının düşürülmesine katkıda bulunur ve enerji maliyetlerini azaltır [8].

Malzeme seçimi de karbon nötr tasarım sürecinin kritik bir parçasıdır. Geleneksel malzemelerin yerine daha düşük karbon salımı yapan alternatiflerin tercih edilmesi çevresel etkileri azaltmak açısından önemlidir. Düşük karbonlu betonlar, geri dönüştürülmüş malzemeler, bu konuda öne çıkan malzemelerdir. Malzeme seçiminin çevresel etkilerini kapsamlı bir biçimde değerlendirmek amacıyla kullanılan yaşam döngüsü analizi (LCA) yöntemi, malzemenin üretiminden kullanım ömrünün sonuna kadar olan süreçteki çevreye olan etkisi ölçülür.

Avrupa ve Kuzey Amerika gibi bölgelerde karbon nötr yapılar konusunda birçok başarılı örnekler mevcuttur. Özellikle pasif evler ve

LEED sertifikalı binalar, bu konuda öncü uygulamalar arasında yer almaktadır. Türkiye’de ise bu tür yapılar henüz yeni yeni yaygınlaşmaya başlamış olsa da, konuya olan ilginin ve farkındalığın artmasıyla birlikte daha fazla proje hayata geçirilmektedir [9]. Türkiye’deki gelişmeler, teknolojik altyapı ve finansal kaynak eksikliği gibi zorluklarla karşılaşsa da, artan farkındalık geleceğe dair olumlu bir işaret olarak değerlendirilmektedir [10, 11].

Karbon nötr yapılar geliştirilirken bazı zorluklar karşılaşılmaktadır; bu zorluklar ekonomik, teknik ve sosyal alanlarda ortaya çıkmaktadır. Yüksek ilk yatırım maliyetleri, teknik bilgi eksikliği, yetersiz yasal düzenlemeler ve toplumdaki sınırlı farkındalık, bu yapıların yaygınlaşmasını zorlaştıran başlıca etkenlerdir. Ancak, devlet destekleri, teknolojiye erişim imkanları sayesinde bu engellerin aşılması beklenmektedir. Önümüzdeki dönemde karbon nötr yapıların standart haline gelmesiyle birlikte, inşaat sektöründe köklü değişimlerin yaşanması beklenmektedir.

a.1. Yapı Sektöründe Karbon Emisyon Kaynakları

Yapı sektörü, dünya genelinde toplam karbon emisyonlarının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu emisyonlar, yapıların ömrü boyunca farklı aşamalarda ortaya çıkar. İlk olarak, inşaat malzemelerinin üretimi sürecinde ciddi miktarda enerji kullanımı söz konusudur. Özellikle beton ve çelik gibi yaygın kullanılan malzemelerin üretimi sırasında yüksek karbon salımı gerçekleşir. Bu durum, hem enerji ihtiyacının büyük ölçüde fosil yakıtlarla karşılanmasından hem de üretim teknolojilerinin çevresel etkilerinden kaynaklanmaktadır [12].

İkinci olarak, inşaat aşamasında kullanılan makineler, nakliye araçları ve diğer ekipmanlar genellikle dizel veya benzeri fosil yakıtlarla çalışır. Binaların tamamlanmasının ardından ısıtma, soğutma, elektrikli cihazların kullanımı nedeniyle sürekli bir enerji tüketimi söz konusudur. Eğer bu enerji yenilenebilir kaynaklardan sağlanmıyorsa, yapının karbon ayak izi yıllar boyunca artarak devam eder. Bununla birlikte, bakım, onarım ve zaman içinde yapılan yenileme işlemleri de enerji ve malzeme kullanımı açısından çevresel yük oluşturmaktadır [12].

Dolayısıyla, bir yapının yaşam döngüsünün her aşamasında ortaya çıkan bu emisyonların toplamı, sektörün iklim değişikliği üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Karbon nötr hedeflere ulaşabilmek için yapı sektöründe malzeme üretiminden başlayarak, inşaat süreci, kullanım ve bakım dönemleri de dâhil olmak üzere her aşamada karbon salımını azaltmaya yönelik çözümlerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

a.2. Karbon Nötr Yapı Tasarımına Yönelik Yaklaşımlar

Karbon nötr yapı tasarımı, çevresel etkileri en aza indirerek iklim değişikliğiyle mücadele etmeyi amaçlayan bütüncül bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım, enerji tüketimini azaltmanın ötesine geçerek, yapıların tüm yaşam döngüsündeki karbon salımını kontrol altına almayı hedeflemektedir. Yapıların planlama aşamasından işletme sürecine kadar her adımında sürdürülebilirlik ilkesine bağlı kalınması, bu hedefin temelini oluşturur [6].

Karbon nötr yapılar için atılacak ilk adım, yapıların enerji ihtiyacını en aza indirmektir. Bu amaçla, doğal çevre koşullarından faydalanan pasif tasarım stratejileri ön plana çıkmaktadır. Yalıtım kalitesinin artırılması, ısı köprülerinin azaltılması, doğal havalandırmanın sağlanması ve gün ışığından en iyi şekilde yararlanılması, enerji ihtiyacını önemli oranda düşürebilmektedir. Bu tür çözümler sayesinde ısıtma, soğutma ve aydınlatma gibi sistemlere olan bağımlılık azaltılırken, kullanıcı konforu da doğal yöntemlerle sağlanabilmektedir [10].

Enerji tüketiminin azaltılmasıyla birlikte, yapının kalan enerji ihtiyacının yenilenebilir kaynaklarla karşılanması gerekmektedir. Güneş panelleri, güneş kolektörleri, rüzgâr türbinleri ve jeotermal enerji sistemleri gibi çözümler, fosil yakıt tüketiminin önüne geçilmesini sağlayarak karbon salımını önemli ölçüde düşürmektedir [11].

Karbon nötr yapıda yalnızca enerji kullanımı değil, kullanılan yapı malzemeleri de önemlidir. Geleneksel yapı malzemeleri, özellikle üretim aşamasında yüksek oranda enerji tüketmekte ve karbon salımına neden olmaktadır. Bu nedenle, düşük karbon salımı olan, yerel kaynaklı ve geri dönüştürülebilir malzemelerin tercih edilmesi önemlidir. Örneğin ahşap, sürdürülebilir ormancılıkla temin edildiğinde, karbon depolama özelliği sayesinde çevreye olan etkisini minimum düzeye indirebilmektedir. Benzer şekilde, geri dönüştürülmüş metaller ve düşük emisyonlu betonlar da çözümler arasında yer almaktadır [13].

Karbon nötr yapı tasarımı, günümüz mimarlık ve mühendislik disiplinlerinin en kritik konularından biri haline gelmiştir. Enerji verimliliği, doğru malzeme seçimi, yenilenebilir enerji entegrasyonu ve karbon telafi stratejileri birlikte uygulandığında, yapı çevrenin iklim değişikliği üzerindeki etkisi büyük ölçüde azaltılabilmektedir. Bu bütüncül yaklaşım, yalnızca çevresel sürdürülebilirliği değil, aynı zamanda ekonomik ve sosyal açıdan da uzun vadeli kazanımlar sunmaktadır.

2. KARBON NÖTR YAPI UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Dünya genelinde birçok başarılı karbon nötr yapı projesi vardır. Almanya'daki Passivhaus standartlarına uygun evler, enerji ihtiyacını minimuma indirerek karbon salımını büyük ölçüde azaltmaktadır. ABD'de Seattle'da bulunan Bullitt Center, tamamen yenilenebilir enerjiyle çalışan ve karbon nötr ofis binası olarak örnek olmaktadır. Ayrıca Avustralya'daki Zero Carbon Building, ticari binalarda karbon nötr standartların uygulanabilirliğini göstermektedir. Türkiye'de ise İTÜ Taşkışla Karbon Nötr Bina Projesi gibi girişimler, yerel koşullara uygun sürdürülebilir mimari uygulamaları artırmaktadır.

2.1. Passivhaus Standartlarında Evler (Almanya)

Almanya, karbon nötr ve enerji verimli minimuma indirerek karbon salımını azaltan yapılar konusunda öncü ülkelerden biridir. PassivHaus, 90'lı yılların başında Passivhaus Enstitüsü'nden Dr Wolfgang Feist tarafından Almanya'da geliştirilmiştir. İlk PassivHaus örneği olan Darmstadt Kranichstein'in 1991 senesinde inşa edilmiştir (Şekil 1).

Passivhaus standardı, binaların enerji ihtiyacını azaltmayı hedeflemektedir. Bu evlerde yalıtım, yüksek performanslı pencereler, ısı geri kazanımlı havalandırma sistemleri vardır. Bu sayede ısıtma ve soğutma için enerji tüketimi %90 oranında azaltılmaktadır. Almanya'daki birçok yeni konut projesi Passivhaus standartlarına uygun olarak inşa edilmekte ve karbon nötr hedeflerine yaklaşılmaktadır [14].

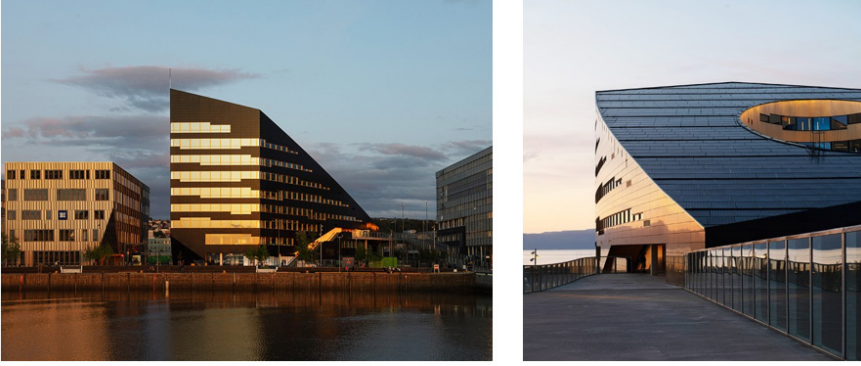


Şekil 1. Passivhaus örneği [14]

2.2. Powerhouse Brattørkaia Ofis Binası (Trondheim, Norveç)

Bir başka örnek, Norveç'teki Powerhouse Brattørkaia binası gösterilebilir (Şekil 2). Bu yapı, yalnızca karbon nötr değil, aynı zamanda "enerji pozitif" olarak tasarlanmıştır. Yani yıl boyunca ürettiği enerji, tükettiğinden fazladır. Yapı kendisine, civardaki binalara ve şehrin ulaşımına yeşil enerji sağlayan 3.000 metrekairelik güneş panelleri ile çevrelenmiştir.

Güneş panelleriyle elektrik üretimi sağlanmakta; yüksek performanslı yalıtım, doğal aydınlatma ve havalandırma sistemleriyle enerji ihtiyacı en aza indirilmektedir. Norveç'in kuzeyinde yer almasına rağmen güneş enerjisinden maksimum düzeyde yararlanılabilmesi için çatı eğimi ve panel yerleşimi optimize edilmiştir [15]. Binanın üst cephesi ve beşgen şeklindeki çatısı toplam 3.000 metrekarelik güneş paneli ile kaplanmıştır.

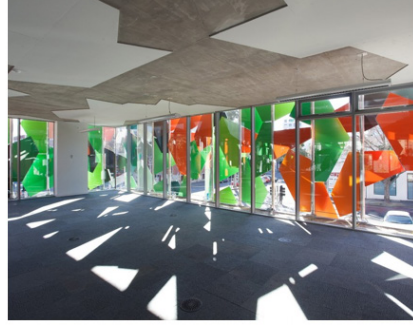


Şekil 2. Powerhouse Brattørkaia Ofis Binası [15]

2.3. Pixel Binası, Zero Carbon Building (Melbourne, Avustralya)

Dünyanın ilk tamamen karbon nötr ticari ofis binası olarak tasarlanan Pixel Binası, renkli ve modüler dış cephesi, hem estetik hem de fonksiyonel: gün ışığı enerji ihtiyacını büyük ölçüde kendi üretimiyle karşılayacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 3). Çatısına konulan fotovoltaik paneller ve küçük ölçekli rüzgâr türbinleri sayesinde, geleneksel enerji kaynaklarına olan bağımlılık en aza indirilmiştir.

Yapının tasarımında pasif enerji sistemlerinden etkili ısı yalıtımı, doğal aydınlatma ve cephelerde kullanılan hareketli gölgeleme elemanları aracılığıyla iç mekân konforu artırılırken enerji tüketimi azaltılmıştır. Ayrıca yeşil çatı uygulaması, hem ısı kontrolüne katkı sağlamakta hem de yağmur suyu yönetimine destek olmaktadır. Malzeme seçiminde ise karbon salımını düşürmeye yönelik tercihler yapılmış; geleneksel beton yerine, daha düşük karbon emisyonu sağlayan "Pixelcrete" adlı özel bir beton karışımı kullanılmıştır. Böylece yapı, yalnızca kullanım sürecinde değil, yapım aşamasında da çevresel etkilerini en aza indirmeyi hedeflemektedir [16].



Şekil 3. Pixel Binası [17]

Pixel görünürlüğünü arttıran en büyük özelliği renkli dış cephesidir. Sıfır atık, basitleştirilmiş fakat karmaşık bir montaj, geri dönüşümlü renk panelleri, gün ışığı, gölge, görüş ve parlaklık kontrolü maksimum seviyeye çıkarmaktadır. Cephe, Pixel'in çevresini sararak canlı ve benzersiz bir kimlik yaratmıştır. 105 LEED puanı alan Pixel, Avustralya'daki ilk karbon nötr ofis binasıdır.

2.4. The Edge (Amsterdam, Hollanda)

The Edge (Amsterdam, Hollanda), sürdürülebilir, dünyadaki en çevreci ve teknolojik ofis binalarından biridir (Şekil 4). Güneş panelleriyle kendi enerjisinin büyük kısmını üreten bina, yağmur suyu toplama sistemleri, yeraltı ısı depolama teknolojisi ve yüksek yalıtım özellikleriyle enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarmaktadır. Aynı zamanda binaya yerleştirilmiş binlerce sensör sayesinde ışık, sıcaklık sürekli takip edilerek enerji tüketimi optimize edilmektedir. Çalışanlara sabit masa yerine esnek alanlar sunarak hem alan verimliliği sağlanmış hem de iç mekân konforu artırılmıştır. %98,36 BREEAM puanıyla "Outstanding" seviyesinde sertifikalandırılan yapı, karbon nötr mimarinin teknolojik ve çevresel potansiyelini en iyi temsil eden örneklerden biridir [18].



Şekil 4. The Edge Binası [18]

2.5. Taikoo Green Ribbon (Hong Kong)

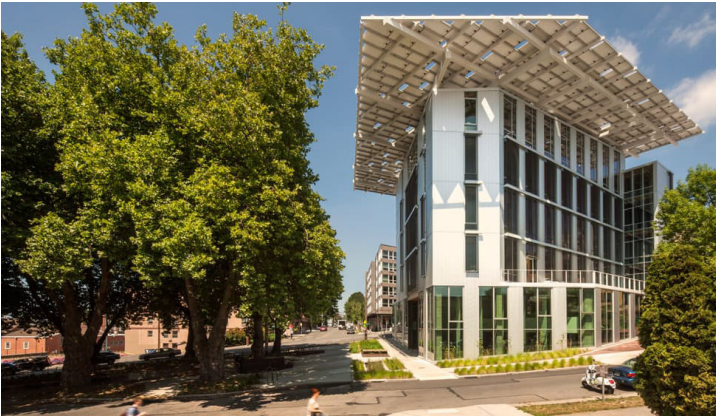
Arup tarafından Hong Kong’da tasarlanan Taikoo Green Ribbon, karbon nötr tasarım yaklaşımını yüksek katlı yapı ölçeğinde ele alan çarpıcı ve vizyoner bir projedir. Yaklaşık 230 metre yüksekliğindeki bu ofis kulesi, hem yapım aşamasında hem de kullanım sürecinde karbon salımını minimuma indirmeyi amaçlamaktadır. Binanın tasarımında pasif ve aktif sürdürülebilirlik stratejileri bir arada kullanılmıştır; doğal havalandırma sistemleriyle enerji ihtiyacı azaltılırken, cepheye entegre edilen kıvrımlı fotovoltaik paneller sayesinde yenilenebilir enerji üretilmektedir. Yapıya adını veren “yeşil şerit”, hem mimari bir simge hem de bina boyunca devam eden bir kamusal yeşil alan ve sirkülasyon rotası olarak işlev görmektedir (Şekil 5). Sitenin koşullarına en iyi şekilde yanıt verecek biçimde şekillenen tasarım, kule boyunca yükselen bir yol oluşturan yeşil ortak alanlar ağıyla tanımlanıyor. Bu ağ, alt katlarda su soğutmalı bahçeler ve plazalar, kinetik enerji yastıkları olan peyzajlı bir gökyüzü yolu, yenilebilir bitkilerle doğal olarak havalandırılan bir bahçe ve ayrıca 500 kişilik bir çatı tiyatrosundan oluşmaktadır. Asılı bahçeler, yağmur suyu yönetimi ve yüksek oranda doğal aydınlatma ile yapı, kullanıcı konforunu artırırken çevresel etkileri minimize eder. Ayrıca, malzeme seçiminde gömülü karbon miktarı dikkate alınmış, sürdürülebilir kaynaklardan elde edilen yapı bileşenleri tercih edilmiştir. Taikoo Green Ribbon, sadece teknik özellikleriyle değil, aynı zamanda kentsel bağlamda doğa, kullanıcı ve teknoloji arasında kurduğu dengeyle de karbon nötr yapı tasarımına ilham veren önemli bir örnek olarak öne çıkmaktadır [19].



Şekil 5. The Edge Binası [19]

2.6. Bullitt Center (Seattle, ABD)

Dünyanın en sürdürülebilir ticari binası olarak bilinen Bullitt Center, enerji tüketimini tamamen yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılamakta ve karbon nötr bir yapıdır (Şekil 6). 2013 yılında açılmış olan yapı, çevresel sürdürülebilirlik, enerji verimliliği ve malzeme kullanımında çok yüksek standartlara sahip olarak öne çıkmaktadır. Binada güneş panelleri, yağmur suyu toplama sistemi ve doğal havalandırma gibi sistemler kullanılmıştır. Ayrıca bina, yaşam döngüsü boyunca karbon salımını en aza indirecek malzeme seçimleriyle dikkat çekmektedir. Bu yapı, karbon nötr ofis binalarının nasıl yapılabileceğine dair bir örnektir [20]. Bina, yıllık bazda ürettiğinden daha fazla enerjiyi karşılayabilecek şekilde tasarlanmış; örneğin çatısında bulunan 575 adet güneş paneli ile önemli miktarda elektrik üretimi sağlanmaktadır.



Şekil 6. Bullitt Center [20]

2.7. Alarko Holding Merkez Yerleşkesi (Ortaköy, İstanbul)

Alarko Holding, Ortaköy'deki merkez yerleşkesini (Şekil 7) karbon nötr hale getirmeyi hedeflemektedir. Bu kapsamda, enerji verimliliği artırılacak, yenilenebilir enerji kaynakları kullanılacak ve karbon ayak izi dengeleme çalışmaları yapılacaktır. Şirket, her yıl yenilenebilir enerjiye dayalı Gold Karbon ve Yeşil Enerji – IREC sertifikası yoluyla karbon emisyonlarını dengelemeyi planlamaktadır [21].



Şekil 7. Alarko Holding Merkez Yerleşkesi [21]

Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Güneş Enerjisi Uygulama ve Araştırma Merkezi (GÜNAM), Avrupa Birliği Ufuk Avrupa programı kapsamında geliştirdiği UP2030 projesiyle İstanbul'un da aralarında bulunduğu 11 pilot şehri karbon nötr hale getirmeyi hedeflemektedir. Proje, yapay zeka teknolojileriyle güneş enerjisi üretimini optimize ederek şehirlerin karbon ayak izini azaltmayı amaçlamaktadır.

SONUÇLAR

Yapı sektörünün çevresel etkileri, küresel iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir noktaya ulaşmış durumdadır. Karbon nötr yapılar, hem enerji tüketimini azaltarak hem de karbon emisyonlarını dengeleyerek sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Pasif tasarım ilkeleri, yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonu, düşük karbon salımlı malzeme kullanımı ve yaşam döngüsü analizleri gibi çok yönlü stratejiler, bu yapıların çevre üzerindeki etkisini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Bu nedenle karbon nötr yapılar, hem çevreci, hemde geleceğin dirençli, sağlıklı ve yaşanabilir kentlerini inşa etmenin vazgeçilmez, önemli bir parçasıdır. Gerek yerel yönetimlerin bu

süreci destekleyici adımlar atması, karbon nötr mimari anlayışının yaygınlaşmasında belirleyici rol oynayacaktır. Bu anlayışın benimsenmesi ve yaygınlaştırılması, gelecek kuşaklara daha sürdürülebilir bir dünya bırakmanın temel taşlarından biridir.

KAYNAKLAR

- [1] Akbaş A. ve Çalışkan Ö. (2024). İnşaat Sektörü ve Karbon Ayak İzi, 4th International Conference on Frontiers in Academic Research, 264-271.
- [2] Onat N. C. (018). Türkiye inşaat sektörünün global karbon ayak izi analizi Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22 (2), 529~545.
- [3] Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Ulusal Döngüsel Ekonomi Stratejisi ve Eylem Planı (UDESEP), (2025) <https://csb.gov.tr/bakan-kurum-2053-net-sifir-emisyon-hedefimiz-ve-dongusel-ekonomiye-geciste-onemli-bir-adim-bakanlik-faaliyetleri-42868>
- [4] UNEP (United Nations Environment Programme). (2024). *Global progress on net zero targets and sustainable construction*. Nairobi: UNEP Publications. <https://www.unep.org/net-zero-sustainable-construction-report>
- [5] IFC (International Finance Corporation). (2023). *Climate-smart building materials and technologies*. Washington, DC: World Bank Group. <https://www.ifc.org/climate-smart-building-materials>
- [6] Akbaş, A. (2025). Karbon nötr şehirlerin tasarımı: Kent ve mimarlık sosyolojisi bağlamında sıfır enerji binaların uygulanabilirliği. İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi. <https://dergipark.org.tr/pub/iticusbe/issue/94895/1576826>
- [7] Liang, R., Zheng, X., Wang, P.-H., Liang, J., & Hu, L. (2023). Research Progress of Carbon-Neutral Design for Buildings. *Energies*, 16(16), 5929. <https://doi.org/10.3390/en16165929>
- [8] Yıldız C. (2024). Binalarda Enerji Verimliliğinde Son Gelişmeler: Türkiye Örneği, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji, 12(1): 176-213
- [9] Akşar, S. (2025). Türkiye’de Yeşil Bina Sertifikasyonu: LEED Verileri Üzerinden Bir Değerlendirme. *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 8(1), 45-60. <https://doi.org/10.51764/smutgd.1668796>
- [10] Salihoğlu, G. (2021). Karbon nötr olmak. Uludağ Üniversitesi Yayını. <https://www.bursagorus.com.tr/karbon-notr-olmak-makale,40.html>
- [11] Yıkıcı, A. (2024). İklim değişikliği ile mücadelede karbon nötr kent: Karbon nötr kentler birliği örneği. *Nobel Bilimsel Eserler*. <https://avesis.ktu.edu.tr/yayin/0f454f4e-2588-497e-a9b1-4389dbf3518e/iklim-degisikligi-ile-mucadelede-karbon-notr-kent-karbon-notr-kentler-birligi-ornegi>
- [12] Çetinkaya E. (2012). Binalarda Enerji Verimliliğinin Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [13] Özyonar F., Gökkuş Ö. (2025). İşbirliğiyle Çevre Korumada Disiplinler Arası Yaklaşımlar Bilim, Teknoloji ve Toplum Perspektifi, Prof. Dr. Ülker Aslı Güler, Editör, Nobel Yayınevi, 1-13.
- [14] Gürcan T. S., PassivHaus Tasarımcısı. (2011) PassivHaus Nedir? Ne Değildir?, <https://www.ekoyapidergisi.org/passivhaus-nedir-ne-degildir>

- [15] Snøhetta, (2020). Brattørkaia Enerji Santrali En kuzeydeki enerji pozitif bina, <https://www.snohetta.com/projects/powerhouse-brattorkaia>
- [16] Ekoyapı (2017). Benzersiz Bir Cephe Kimliğine Sahip Pixel Binası, <https://www.ekoyapidergisi.org/benzersiz-bir-cephe-kimligine-sahip-pixel-binasi>
- [17] Mimdap. org. (2011). Pixel, <https://mimdap.org/proje/pixel-studio505/>
- [18] Ekoyapı (2017). Dünyanın En Yeşil Binası: The Edge, <https://www.ekoyapidergisi.org/dunyanin-en-yesil-binasi-the-edge>
- [19] Ekoyapı (2022). Arup Hong Kong’da Karbon Nötr Kule Tasarladı, <https://www.ekoyapidergisi.org/arup-hong-kong-da-karbon-notr-kule-tasarladi-1>
- [20] Kolat T. (2011). Dünya Üzerindeki En Çevreci Ticari Yapı: Bullitt Center, <https://www.arkitera.com/haber/dunya-uzerindeki-en-cevreci-ticari-yapi-bullitt-center/>
- [21] Yapiinsaatdergisi, (2024). Alarko Holding’in Ortaköy’deki Merkez Yerleşkesi Karbon Nötr Oluyor, <https://www.yapiinsaatdergisi.com/alarko-holdingin-ortakoydeki-merkez-yerleskesi->