



TMMOB İNŞAAT
MÜHENDİSLERİ ODASI
MESLEK İÇİ EĞİTİM SEMİNERİ

Deprem mühendisliği

Yeşil binalar

Dijital dönüşüm

Sürdürülebilirlik



Geleceğin İnşaat Mühendisliği

Yeşil Dönüşüm, Dijitalleşme ve İleri Sismik Tasarım

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Fatih SAK — Doğu Üniversitesi İnşaat Mühendisliği

Sunucu ve sunumun dayandığı bilimsel çalışmalar

SUNUCU

Dr. Öğr. Üyesi
Ömer Fatih SAK

Doğuş Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
İnşaat Mühendisliği, İstanbul
osak@dogus.edu.tr

Bu seminer, yandaki altı bilimsel çalışmanın bulgularının İMO meslek içi eğitimi için derlenmesiyle hazırlanmıştır.

- 01** Hasar Tanılamasında İstatistiki Değerlendirme Yöntemlerinin Zaman-Frekans Ortamında İrdelenmesi
Sak & Beyen — 5. International Conference on Earthquake Engineering and Seismology (5ICEES), 2019, ODTÜ
- 02** Sismik İzolatör Kullanımında Kat Sayısı ve Maliyet İlişkisinin İncelenmesi
Bulut & Sak — 10. Uluslararası Avrupa Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Kongresi
- 03** Yapılarda Tuğla Duvarların Kaldırılmasının Düşey Düzensizliğe Etkisi
Sak — International Congress of Engineering and Natural Sciences
- 04** Binaların Depreme Dayanımını Arttırmak İçin Hızlı ve Ekonomik Yöntemler
Sak — 6. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı (UDMSK), 2021, GTÜ
- 05** Çelik Proje Tasarımında Birleşim Detaylarının İç Kuvvetlere ve Ekonomikliğe Etkisi
Yüzbaşıoğlu & Sak — International Texas Congress on Advanced Scientific Research
- 06** Sürdürülebilir İnşaat Yönetiminde Dijital Dönüşüm
Sak — 6B BIM, döngüsel ekonomi ve yeni nesil malzemelerin entegrasyonu konulu sunum

Kaynak: Doğuş Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bildiri ve sunum kayıtları (2019–2025).

Seminerin amacı: üç gündem, tek meslekî gündem

SEMINERİN ÜÇ AMACI

1

Deprem direnci

Mevcut yapı stoğunun güçlendirilmesi ve yeni yapılarda sismik izolasyon, hasar tanılama ve doğru birleşim detaylarıyla can güvenliğinin sağlanması.

2

Yeşil dönüşüm

YeS-TR, LEED ve enerji verimliliği mevzuatı çerçevesinde yapı sektörünün karbon ayak izinin azaltılması.

3

Dijital yetkinlik

BIM, dijital ikiz ve yapay zekâ araçlarının mühendislik pratiğine kazandırılması; ölçülebilir sürdürülebilirlik.

İMO'NUN BU GÜNDEMLE ÖRTÜŞEN ÇALIŞMALARI

Geleceğin İnşaat Mühendisi ve İnşaat Mühendisliği Çalıştayı

İMO Genel Merkez · 28 Şubat–1 Mart 2025, Ankara — yapay zekâ, dijital ikiz, BIM, otomasyon ve büyük veri gündemi

Şantiye Odaklı Uygulamalı BIM Atölyesi

İMO Ankara Şubesi · 11 Ocak 2026 — LOD 300–400, çakışma analizi, Revit/Navisworks

Mesleğimizdeki Dijital Dönüşüm ve Emek Mücadelesi Panel-Forum

İMO İstanbul Şubesi · 14 Eylül 2025

Enerji Verimliliği Komisyonu

2012'den beri sürekli çalışan komisyon; Kentsel Dönüşüm Komisyonu ile birlikte Odanın yeşil gündeminin kurumsal taşıyıcısı

Sunum akışı: deprem direncinden döngüsel ekonomiye dokuz bölüm

01

Deprem Gerçeği ve Yapı Stoku

Türkiye'nin deprem riski ve mevcut stokun durumu

02

Hızlı ve Ekonomik Güçlendirme

Perde ekleme ve shotcrete ile mevcut binaların iyileştirilmesi

03

Düşey Düzensizlikler ve Dolgu Duvarlar

Yumuşak kat, zayıf kat ve tuğla duvarların kaldırılması

04

Sismik İzolasyon ve Maliyet

Kat sayısı arttıkça ekonomikleşen izolatör çözümü

05

Hasar Tanılama ve Yapı Sağlığı İzleme

Zaman-frekans yöntemleri ve yapı klonlama

06

Çelik Yapılarda Birleşimler

Birleşim detayının iç kuvvetlere ve ekonomiye etkisi

07

Yeşil Binalar

YeS-TR, LEED, BREEAM ve enerji verimliliği mevzuatı

08

Dijital Dönüşüm

BIM, dijital ikiz, yapay zekâ ve şantiye teknolojileri

09

Sürdürülebilir Malzemeler ve Döngüsel Ekonomi

Yeşil çimento, geri dönüştürülmüş malzeme, yıkıntı atıkları

Kapanış: Sentez, mesleğin ve Odanın rolü, politika önerileri ve kaynakça.

Neden bu üç gündem birlikte ele alınıyor?

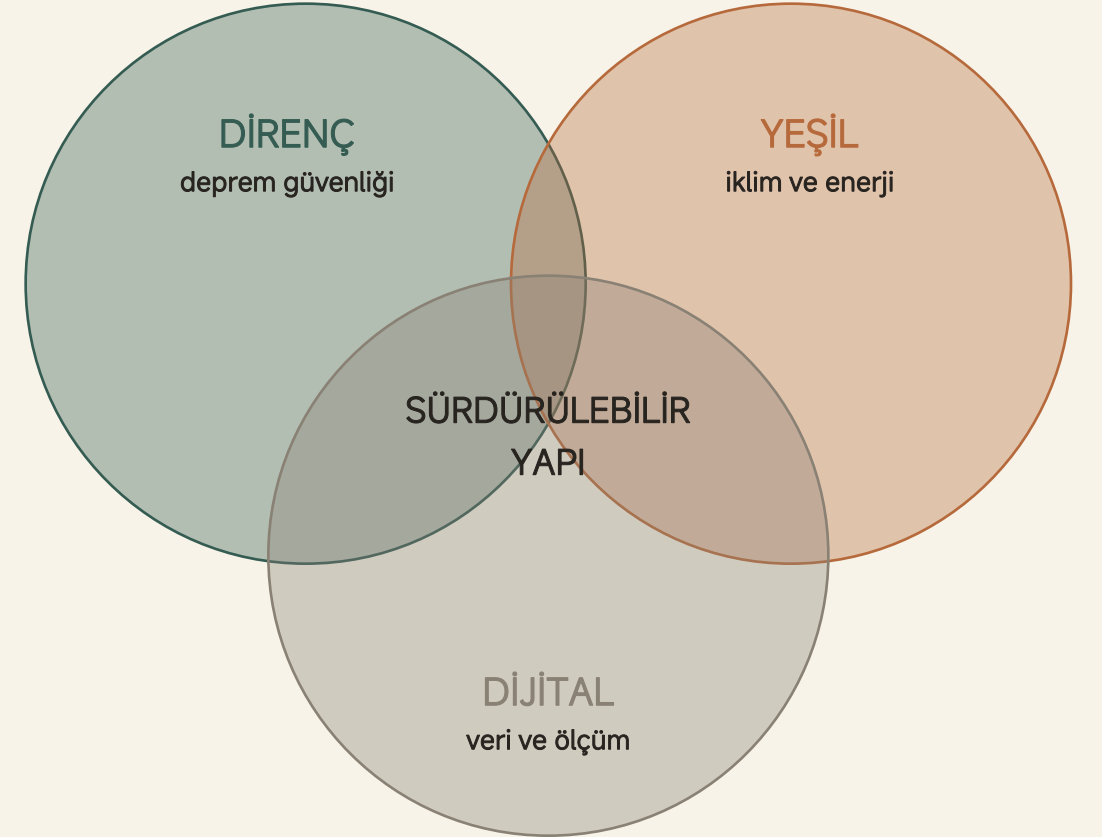
Deprem güvenliği (**direnç**), iklim krizi (**yeşil**) ve veri temelli mühendislik (**dijital**) ayrı gündemler değil; aynı yapı stoğuna aynı anda müdahale etme zorunluluğunun üç yüzüdür.

Güvenli yapı + yeşil yapı = sürdürülebilir yapı

Türkiye'de 6–7 milyon konutun depreme karşı güçlendirilmesi gerekiyor. Aynı binalar aynı zamanda enerji retrofiti bekliyor: tek seferde yapılan birleşik müdahale hem maliyeti düşürür hem de iki hedefi birlikte karşılar.

Dijital araçlar (BIM, sensörler, yapay zekâ) bu birleşik müdahaleyi ölçülebilir ve yönetilebilir kılar.

Kaynak: ÇEDBİK + İBB Build4GreenIST (6–7 milyon konut güçlendirme gereksinimi); UNEP & GlobalABC, Global Status Report 2024/2025.



Türkiye'nin deprem gerçeği: 1999'dan 2023'e büyüyen tablo

17 Ağustos 1999 · Gölçük — Mw 7,4

17.480

can kaybı

66.441 konut ve 10.901 işyeri yıkıldı.

Marmara'nın sanayi ve nüfus yoğun aksı ağır hasar aldı; sonrasında yönetmelik ve denetim sistemi köklü biçimde yenilendi.

6 Şubat 2023 · Kahramanmaraş — Mw 7,7 ve Mw 7,6

53.537

can kaybı (Pazarcık ve Elbistan depremleri)

18.200 bina yıkıldı, 67.346 bina ağır hasar aldı.

Aynı gün dokuz saat arayla iki büyük deprem; 11 il afet bölgesi ilan edildi.

108 bin km²

2023 depremlerinden etkilenen alan

14 milyon

doğrudan etkilenen kişi

11 il

afet bölgesi ilan edildi

Kaynak: İTÜ (1999) Gölçük depremi raporu; AFAD (2023) 6 Şubat depremleri raporu.

6 Şubat 2023: asrın felaketi ve asrın inşa seferberliği

Mw 7,7 (Pazarcık) ve Mw 7,6 (Elbistan) büyüklüğündeki iki deprem 11 ili vurdu. Afetin hemen ardından Cumhuriyet tarihinin en büyük toplu konut ve altyapı inşası başlatıldı.

174

lokasyonda eş zamanlı inşaat

3.481

şantiye, 11 ilde

550

günde tamamlanan konut

Yerinde Dönüşüm desteği

750 bin TL hibe + 750 bin TL kredi

+ 40 bin TL proje desteği

27 Aralık 2025 itibarıyla tamamlanan

455.357

bağımsız bölüm hak sahiplerine teslim edildi

367.995

konut

65.672

köy evi

21.690

işyeri

Yeniden inşa yalnızca konut üretimi değil; **dirençli, enerji verimli ve denetlenebilir** yapı üretiminin en büyük saha sınavıdır. Bu seminerdeki güçlendirme, izolasyon, yeşil bina ve dijital dönüşüm başlıklarının tamamı bu sahada karşılık bulur.

Kaynak: AFAD (2023); T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı "Asrın İnşa Seferberliği" verileri (27 Aralık 2025).

01

Türkiye'nin Deprem Gerçeği ve Yapı Stoku

Deprem öldürmez, bina öldürür: mevcut yapı stokumuz bu gerçeğin neresinde?

Alp-Himalaya kuşağı · Yapı stoku envanteri · 1999'dan 2023'e öğrenilenler · Yönetmelik evrimi · Performansa dayalı tasarım



Türkiye, Alp-Himalaya deprem kuşağının en hareketli segmentinde

Alp-Himalaya Deprem Kuşağı, Azor Adaları'ndan Güneydoğu Asya'ya uzanan ve Akdeniz havzasını boydan boya kat eden bir deprem kuşağıdır; Türkiye bu kuşağın en aktif bölümlerinden birinde yer alır.

Ülke topraklarının büyük bölümü Kuzey Anadolu, Doğu Anadolu ve Batı Anadolu fay hatlarının etkisi altındadır; nüfusun ve sanayinin önemli kısmı bu hatların yakın çevresinde yoğunlaşmıştır.

Mühendislik açısından anlamı: Deprem ülkemizde istisnai bir doğa olayı değil, tasarımın temel girdisidir. Bu nedenle seminerin tüm bölümleri — güçlendirme, düzensizlikler, sismik izolasyon, hasar tanılama — aynı soruya cevap arar: yapı stoğunu depreme nasıl dirençli hale getiririz?

%90

Ülke yüzölçümünün deprem bölgeleri içinde kalan payı

%67

Yüksek dereceli deprem bölgesinde kalan alanların payı

~1000

Son yüzyılda depremlerde yıllık ortalama can kaybı (kişi/yıl)

Kaynak: Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Deprem Şurası Raporu (2004); Sak, Ö.F. (2021), 6. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, GTÜ; Selek (2013).

Yapı stoku: 6-7 milyon konut dönüşüm bekliyor

6-7 milyon

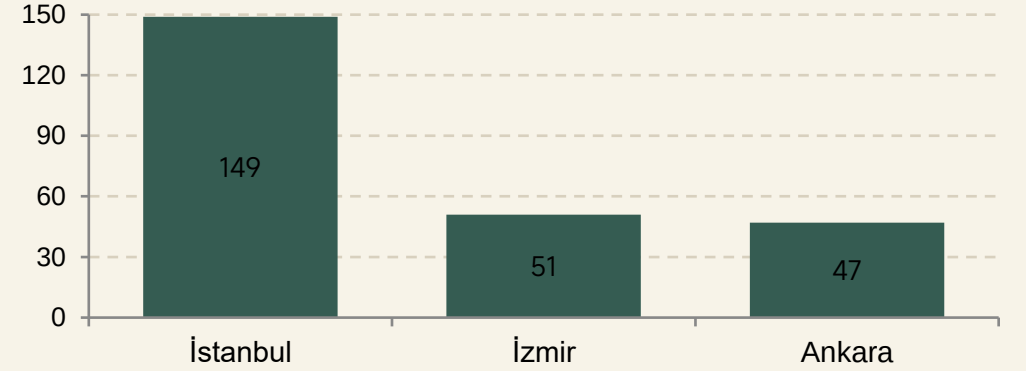
Türkiye'de güçlendirilmesi gereken konut sayısı (Build4GreenIST — ÇEDBİK + İBB, AB NetZeroCities)

~663 milyon ton

Kentsel dönüşüm kaynaklı yıkıntı atığı potansiyeli; %90'a kadarı geri dönüştürülebilir

Stok sorunu yalnızca güvenlik sorunu değil. Aynı zamanda bir atık ve kaynak sorunudur: Binaların Yıkılması Hakkında Yönetmelik (2021) "seçici yıkım"ı esas alır; geri kazanım hedefi güçlendirme kararını da doğrudan etkiler.

Yıkıntı atığı potansiyeli — öne çıkan kentler (milyon ton)

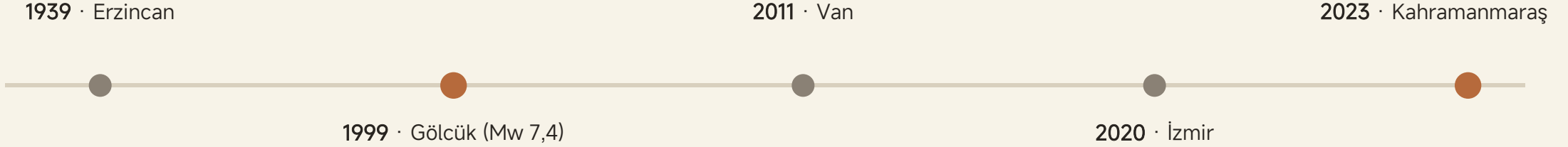


Riskli stokun tipik profili

- Düşük beton ve donatı kalitesi (karotla ~8,7 MPa'ya inen dayanımlar)
- Perde eleman yokluğu — yatay yükler yalnızca kolonlara kalıyor
- Kötü taşıyıcı sistem tasarımı ve imalat hataları

Kaynak: Build4GreenIST (ÇEDBİK + İBB, AB NetZeroCities); kentsel dönüşüm atık verileri ve Binaların Yıkılması Hakkında Yönetmelik (2021); Sak, Ö.F. (2021), 6. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, GTÜ.

1999'dan 2023'e öğrenilenler: aynı hatalar, büyüyen bedel



17 Ağustos 1999 · Gölcük (Mw 7,4)

17.480

can kaybı; 66.441 konut ve 10.901 işyeri yıkıldı (İTÜ, 1999)

6 Şubat 2023 · Pazarcık (Mw 7,7) + Elbistan (Mw 7,6)

53.537

can kaybı (AFAD, 2023); 18.200 bina yıkıldı, 67.346 bina ağır hasar gördü; 14 milyon kişi etkilendi, 11 il afet bölgesi ilan edildi

İki depremden çıkan dersler

- Yumuşak kat ve zayıf kat düzensizlikleri göçmenin başlıca tetikleyicisi
- Düşük malzeme kalitesi ve yapı denetimindeki eksiklikler hasarı büyüttü

Kanıt da var: 2023 depremlerinde deprem yalıtımlı (izolatörlü) yapılarda hasar oluşmadı; bu yapılar deprem sonrası hemen kullanıma devam etti.

Kaynak: İTÜ (1999); AFAD (2023); Bulut, M.Ş. & Sak, Ö.F., 10. Uluslararası Avrupa Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Kongresi; Haçin (2014).

Deprem yönetmeliklerinin evrimi: kuvvetten performansa



TBDY 2018'in getirdikleri

- Performansa dayalı değerlendirme **müstakil bir bölüm** haline geldi.
- **Bölüm 14** — sismik izolasyon: yalıtım birimleri (**KÇE**, **YSE**) ve tasarım katsayıları
- **Bölüm 15** — mevcut binaların değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi: eleman güçlendirmesi (15.9.3.1), sistem güçlendirmesi (15.9.3.2)
- Dayanak: ABD'de olgunlaşan ATC-40 ve FEMA serisi birikimi

KÇE: Kurşun Çekirdekli Elastomer

YSE: Yüksek Sönümlü Elastomer

Uluslararası paralellik (ABD)



ABD'de olgunlaşan performansa dayalı yaklaşım, DBYBHY 2007 üzerinden Türkiye mevzuatına girdi; TBDY 2018 ile müstakil bölüm oldu (Sak, 2021).

Kaynak: Sak, Ö.F. (2021), 6. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, GTÜ; TBDY 2018 (Resmî Gazete 18.03.2018, Sayı 30364).

Performansa dayalı tasarım: kuvvetten davranışa

«Belirli performans hedeflerini elde edebilmek için kullanılan yapısal tasarım kriterlerini içeren yöntem»

— Akbaş (2004), Performansa Dayalı Tasarım tanımı

Geleneksel yaklaşım tek bir deprem düzeyinde can güvenliğini hedefler. Performans yaklaşımı ise farklı deprem düzeyleri için farklı hedefler tanımlar: tasarımın odağı **kuvvetten davranışa** kayar.

Ölçüt	Kuvvete dayalı tasarım	Performansa dayalı tasarım
Tasarım hedefi	Tek deprem düzeyi, can güvenliği	Çoklu deprem düzeyi, seçilen performans hedefi
Kabul ölçütü	İç kuvvet taşıma kapasitesi	Şekildeğiştirme ve hasar bölgeleri
Davranış modeli	Süneklik katsayılarla yaklaşık	Doğrusal olmayan analizle izlenir

Tasarım ilkeleri

(Celep & Kumbasar, 2000)

- Basit, düzenli, sürekli, sünek ve rijit sistem
- Güçlü kolon – zayıf kiriş
- Mafsallaşma önce kirişlerde

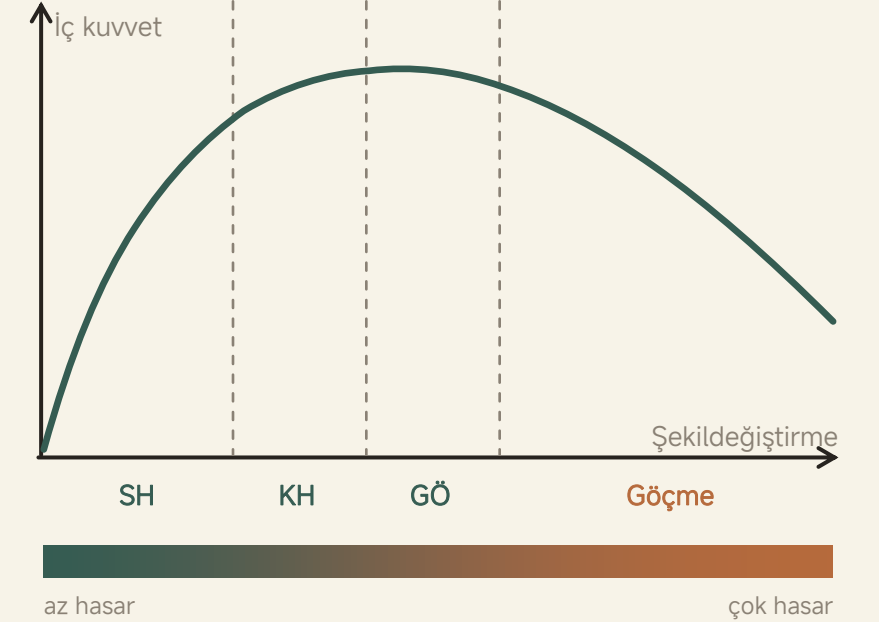
Değerlendirme girdileri: bilgi düzeyi (**sınırlı** / **kapsamlı**) mevcut yapının ne kadar iyi tanındığını; **sünek** / **gevrek** kırılma ayrımı ise eleman davranış modelini belirler (TBDY 2018, Bölüm 15).

Kaynak: Akbaş (2004); Celep & Kumbasar (2000); Sak, Ö.F. (2021), 6. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, GTÜ.

TBDY 2018 performans düzeyleri: sayısal kriterler

Performans düzeyi	Sayısal kriter (TBDY 2018)
Sınırlı Hasar (SH)	Kirişlerin en fazla %20'si Belirgin Hasar Bölgesi'ne geçebilir
Kontrollü Hasar (KH)	Kirişlerin %35'i Belirgin Hasar'da; İleri Hasar'daki düşey elemanların taban kesmesine katkısı <%20
Göçmenin Önlenmesi (GÖ)	Kirişlerin ≤%20'si Göçme Bölgesi'nde; Belirgin Hasar sınırı aşılmış düşey elemanların kesme kuvveti payı ≤%30
Göçme	GÖ sağlanamaz; yapı iskân edilemez

İç kuvvet – şekildeğiştirme eğrisi (şematik)



Okuma: hasar bölgeleri eleman bazında izlenir; binanın performans düzeyi, elemanların dağılımından yandaki sayısal kriterlerle belirlenir. Güçlendirme, yapıyı eğri üzerinde daha güvenli bölgeye taşıma işidir.

Kaynak: TBDY 2018 (RG 18.03.2018, Sayı 30364), Bölüm 15; Sak, Ö.F. (2021), 6. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, GTÜ — Şekil: iç kuvvet–şekildeğiştirme grafiği (şematik yeniden çizim).

Sonuç: stok büyük, yöntemler hazır — sıra uygulamada

Bölüm 1'den çıkan sonuçlar

- 01** Stok büyük: 6–7 milyon konut güçlendirme bekliyor (Build4GreenIST — ÇEDBİK + İBB)
- 02** Çerçeve hazır: TBDY 2018, performansa dayalı değerlendirme ve güçlendirmeyi müstakil bölümlerde tanımlıyor
- 03** Teknoloji kanıtlı: 2023 depremlerinde izolatörlü yapılar hasarsız kaldı ve hemen kullanıma devam etti
- 04** Engel sosyo-ekonomik: süreç uzun, zor ve pahalı algılanıyor (Yılmaz, 2007)

Neden hâlâ güçlendirilmiyor?

«uzun, zor ve pahalı bir süreç»

— Yılmaz (2007): güçlendirmeye yanaşmamanın nedeni

Engel teknik değil, sosyo-ekonomik: tahliye, süre ve maliyet kaygısı kararları erteliyor. Bu yüzden **hızlı ve ekonomik yöntemler** stok dönüşümünün kilidini açacak anahtardır.

Stok büyük, yöntemler hazır — sıra uygulamada.



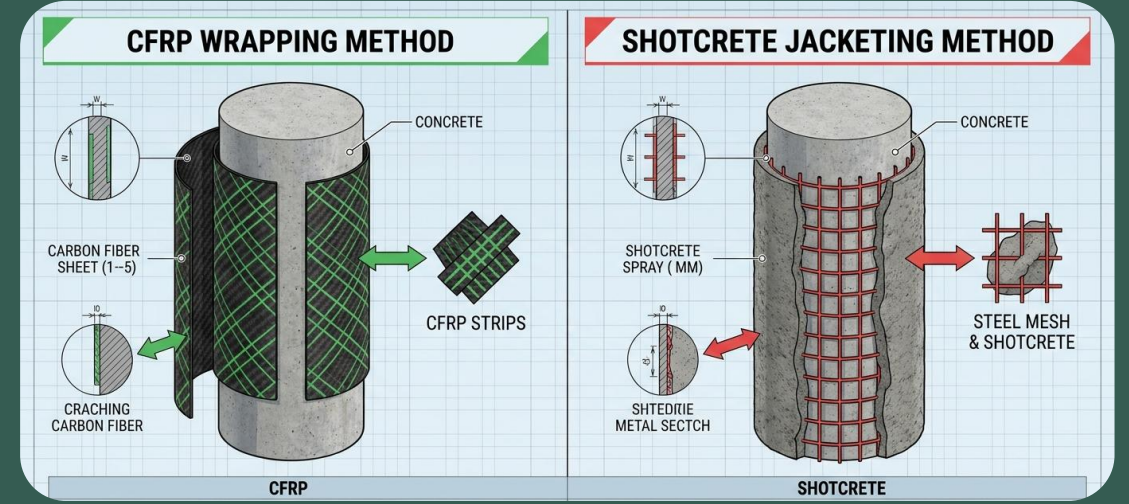
**BÖLÜM 2 · Hızlı ve Ekonomik
Güçlendirme Yöntemleri**

Kaynak: Yılmaz (2007); Sak, Ö.F. (2021), 6. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, GTÜ; Build4GreenIST (ÇEDBİK + İBB); AFAD (2023).

02

Binaların Depreme Dayanımını Artırmak İçin Hızlı ve Ekonomik Yöntemler

Riskli bir binayı tahliye etmeden, haftalar içinde, düşük maliyetle güçlendirmek mümkün mü?



Perde etkisi · FRP sargılama · Kolon mantolama · Deprem perdesi · Shotcrete · Dört yöntemin karşılaştırması

Kaynak: Sak, Ö.F. (2021), 6. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı (UDMSK), GTÜ, Gebze

Riskli binaların üç temel eksiği: malzeme, tasarım ve perde yokluğu

Riskli mevcut betonarme binalar incelendiğinde sorunlar üç başlıkta toplanır; güçlendirme stratejisi bu eksikleri doğrudan hedeflemelidir.

- 1 Düşük beton ve donatı kalitesi**
Karotla ölçülen düşük basınç dayanımı, donatıda korozyon ve yetersiz etriye sıklaştırması.
- 2 Kötü taşıyıcı sistem tasarımı**
Düzensiz planda ve düşeyde taşıyıcı sistem, zayıf kolon–güçlü giriş hiyerarşisi, kısa kolon etkileri.
- 3 Perde eleman yokluğu**
Yatay yüklerin neredeyse tamamını kolonların taşıması; rijitlik ve kapasite açığı.

İnsanların güçlendirmeye yanaşmama nedeni sürecin uzun, zor ve pahalı algılanmasıdır (Yılmaz, 2007). Bu bölümdeki yöntemler tam da bu üç engeli aşmayı hedefler.

Kaynak: Sak, Ö.F. (2021), 6. UDMSK, GTÜ; Klingner & Bertero (1978); Sucuoğlu vd. (2006); Yılmaz (2007).

5× rijitlik · 6× kapasite

Dolgulu çerçevenin salt çerçeveye göre rijitliği 5 kat, yatay yük kapasitesi 6 kat (Klingner & Bertero, 1978)

~%50 daha ekonomik

İstanbul'da dıştan güçlendirme, içten güçlendirmeye göre yaklaşık %50 daha ekonomik (Sucuoğlu vd., 2006)

+%306 · 12,5×

Dış perde duvar güçlendirmesiyle yatay yük kapasitesinde %306 artış, rijitlikte 12,5 kat artış (Yılmaz, 2007)

Perde etkisi kübiktir: 6 kat kesit alanı, 216 kat atalet momenti

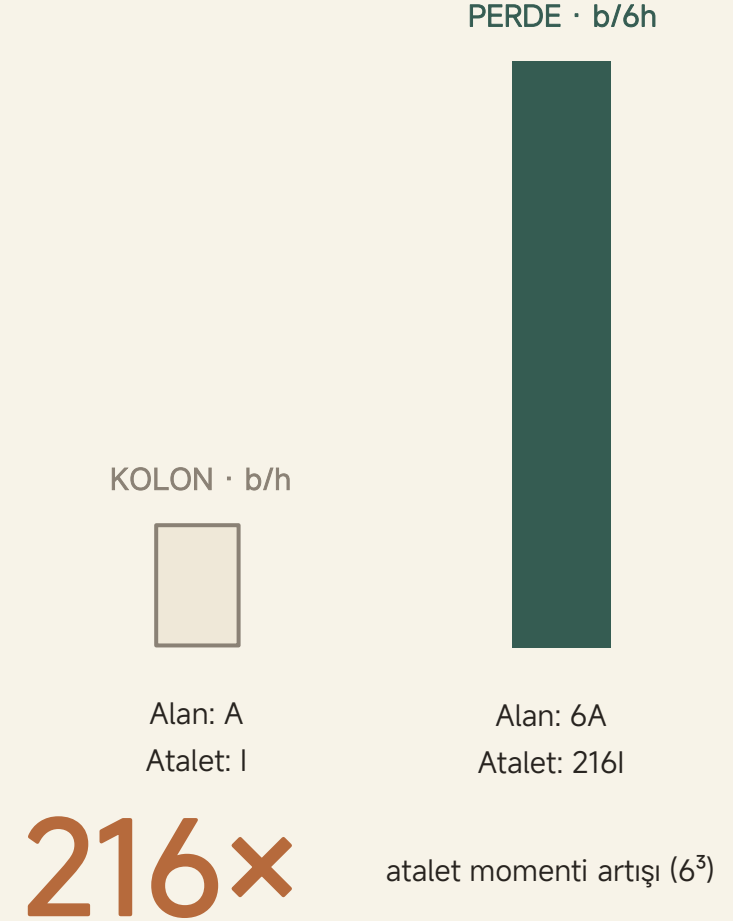
Deprem doğrultusunda **b/h** eninde bir kolon yerine, TBDY 2018 tanımına uygun **b/6h** eninde bir perde yapılırsa:

Kesit alanı yalnızca **6 kat** artar; ancak deprem doğrultusundaki atalet momenti $I = \frac{b h^3}{12}$ gereği boyutun küpüyle, yani **6³ = 216 kat** artar.

$$\frac{I_{perde}}{I_{kolon}} = \left(\frac{6h}{h}\right)^3 = 216$$

Mühendislik sonucu: Yüksek mukavemetli beton ve nervürlü çelikle sisteme perde eklenmesi, toptan göçme riskini ortadan kaldırabilecek en güçlü kaldıraçtır. Perde katkısı eleman boyutunun küpüyle orantılı olduğundan, küçük bir beton hacmi bile yapının davranışını kökten değiştirir.

Bu ilke, ileride göreceğimiz deprem perdesi ve shotcrete yöntemlerinin neden bu denli etkili olduğunun da cevabıdır.



Kaynak: Sak, Ö.F. (2021), "Binaların Depreme Dayanımını Arttırmak İçin Hızlı ve Ekonomik Yöntemler", 6. UDMSK, GTÜ; TBDY 2018 perde tanımı.

TBDY Bölüm 15: güçlendirme araç kutusu iki düzeyde çalışır

Eleman güçlendirmesi — TBDY 15.9.3.1

Tek tek taşıyıcı elemanların kapasitesini ve sünekliğini artırmayı hedefler:

Kolon sarılması (15.10.1) — betonarme manto, çelik kılıf veya lifli polimer (FRP) sargı ile kesit büyütme ve sargılama.

Kiriş sarılması (15.10.3) — kiriş kesitinin betonarme, çelik veya FRP ile güçlendirilmesi.

Bölme duvar güçlendirme (15.10.4) — mevcut dolgu duvarların taşıyıcı davranışa katkısının artırılması.

Sınırı: yerel iyileştirme sağlar; sistemin genel rijitlik açığını tek başına kapatmayabilir.

Sistem güçlendirmesi — TBDY 15.9.3.2

Yapının yatay yük taşıma sistemini bütün olarak değiştirmeyi hedefler:

Yerinde dökme betonarme perde (15.10.5) — mevcut çerçeveye yeni perde eklenmesi; rijitlik ve atalet artışının en güçlü yolu.

Yeni çerçeve eklenmesi (15.10.6) — içeride veya dışarıda (eksoskeleton) yeni taşıyıcı çerçeveler.

Kütle azaltma (15.10.7) — kat azaltma, hafif çatı, su depolarını zemine indirme; $F = m \cdot a$ gereği deprem kuvveti kütleyle azalır.

İvme tarafından azaltım: Deprem kuvvetini kütle yerine ivme yönünden azaltan yol **sismik izolatörlerdir** (TBDY Bölüm 14) — köprülerdeki uygulamasını Bölüm 4'te ele alacağız.

Kaynak: TBDY 2018, Bölüm 15 (Mevcut Binaların Değerlendirilmesi ve Güçlendirilmesi); Sak, Ö.F. (2021), 6. UDMSK, GTÜ.

Vaka: 6 katlı betonarme bina, karotla beton dayanımı 8,7 MPa

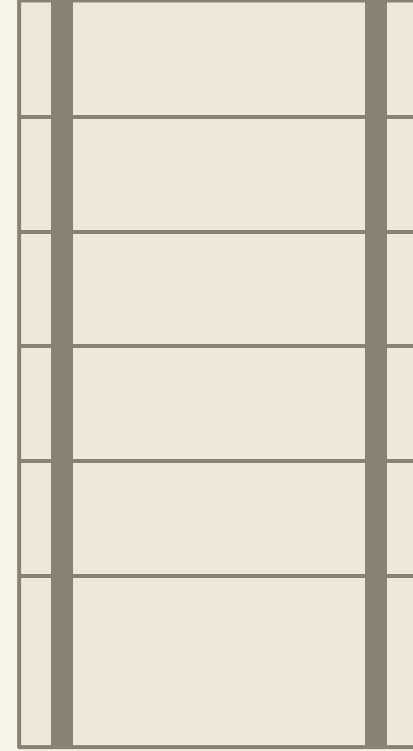
Bildirideki analitik çalışma, tipik bir riskli konut bloğunu temsil eden 6 katlı betonarme çerçeve üzerinde yürütülmüştür.

Taşıyıcı sistem özellikleri

- Açıklıklar: 9,20 m × 12,80 m
- Kolonlar: 25/50, 30/50, 25/70 cm
- Kirişler: 20/60 ve 25/70 cm
- Döşeme: 10–12 cm
- Bodrum kat dahil 6 katlı betonarme çerçeve sistem

Yerinde tespitler

- Karot deneyiyle beton basınç dayanımı: ~8,7 MPa (C8 düzeyi — günümüz minimumlarının çok altında)
- Donatılarda **korozyon** gözlemlendi
- Donatı oranları **sıyırma ve röntgen** yöntemiyle tespit edildi



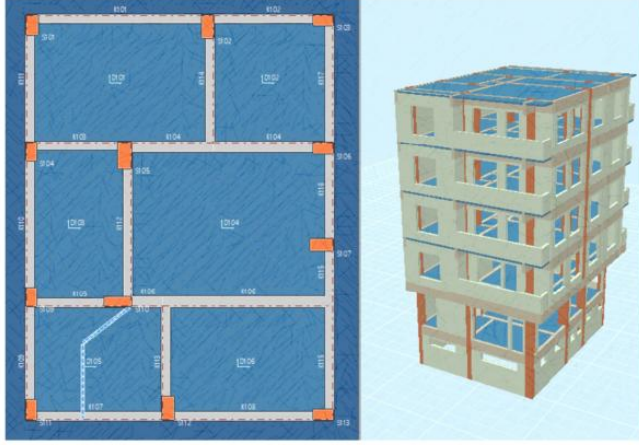
Şematik kesit — 6 katlı betonarme çerçeve (bodrum dahil)

GÖÇME

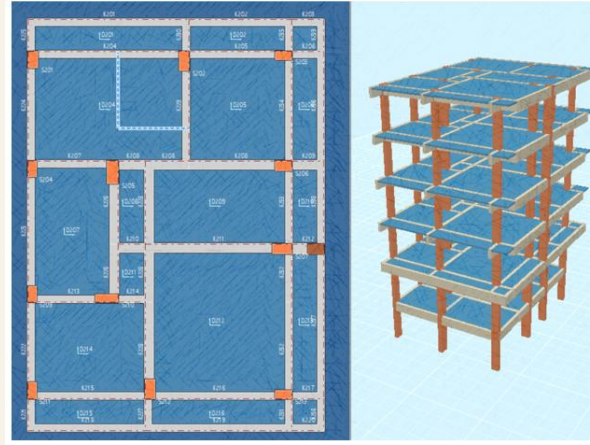
Mevcut durum
performans analizi
sonucu: yapı GÖÇME
durumunda — iskân
edilemez düzeyde riskli.

Sonraki dört sayfada
aynı binada dört farklı
güçlendirme yöntemi
deneniyor.

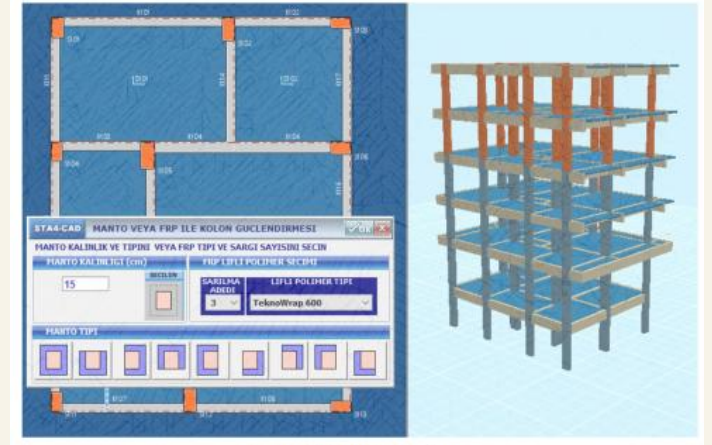
Vaka: 6 katlı betonarme bina, karotla beton dayanımı 8,7 MPa



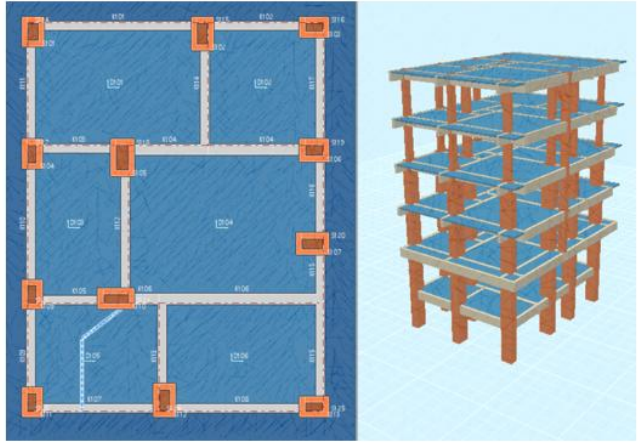
Şekil 1. Bodrum Kat Planı ve 3B Tuğlalı Görünüm



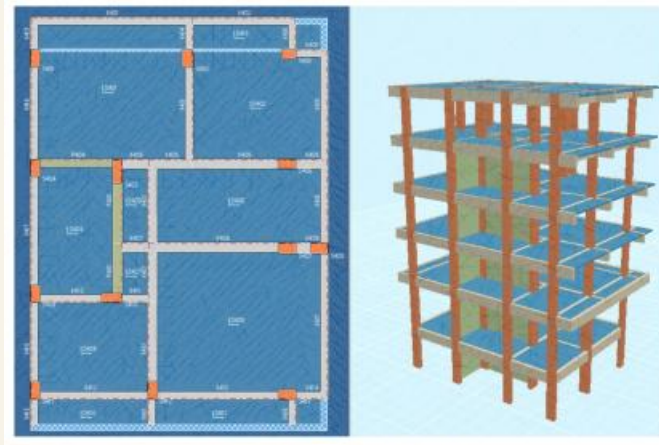
Şekil 2. Zemin Kat Planı ve 3B Karkas Görünüm



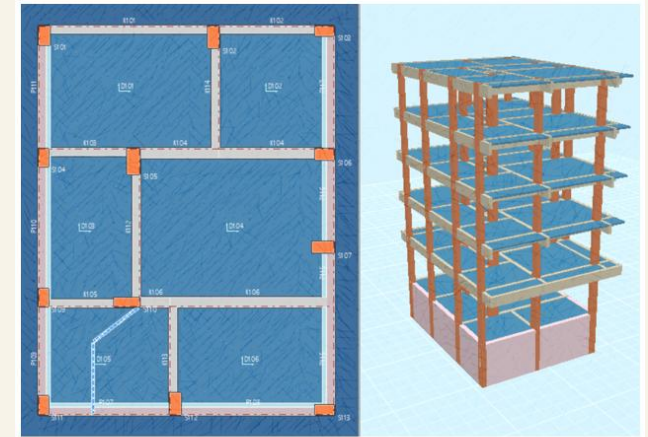
Şekil 3. FRP Güçlendirme



Şekil 5. Kolon Mantolamayla Güçlendirme



Şekil 8. Deprem Perdesiyle Güçlendirme



Şekil 11. Shotcrete ile Güçlendirme

Kaynak: Sak, Ö.F. (2021), "Binaların Depreme Dayanımını Arttırmak İçin Hızlı ve Ekonomik Yöntemler", 6. UDMSK, GTÜ — analitik çalışma binası.

Yöntem 1 — FRP sargılama: bu binada işe yaramadı

Uygulama kapsamı

Bodrum + zemin + 1. + 2. katlardaki tüm kolonlara üç kat FRP (lifli polimer) sargı uygulandı. Yöntem, TBDY 15.10.1 kapsamındaki kolon sarılması uygulamasıdır ve sahada hızlı ilerler.

Performans analizi sonucu

Yapı GÖÇME durumunda KALDI

Neden işe yaramadı?

- FRP sargı kolona rijitlik değil süneklik kazandırır; sistemin asıl eksiği olan rijitlik ve atalet açığını kapatmaz.
- Sargının etkin çalışması için C15–C17 düzeyi beton gerekir; bu binada beton dayanımı 8,7 MPa'dır.
- Perde eleman yokluğu FRP ile giderilemez.

₺150.000

Uygulama maliyeti (2021 fiyatları, yalnızca betonarme kısım)

Tahliye gerekli

Uygulama sırasında binanın boşaltılması zorunlu

2–3 ay

Uygulama süresi

Sonuç: para ve zaman harcandı, bina hâlâ göçme riskinde.

Kaynak: Sak, Ö.F. (2021), 6. UDMSK, GTÜ — Yöntem 1 (FRP sargılama) performans analizi ve metraji.

Yöntem 2 — Kolon mantolama: hedefe ulaşan ama en yıkıcı yöntem

Uygulama kapsamı

FRP ile aynı kolonlara (bodrum + zemin + 1. + 2. kat) 15 cm betonarme manto uygulandı. Kesit büyütme esaslı klasik güçlendirme yöntemidir; TBDY 15.10.1 kapsamındadır.

Performans analizi sonucu

Kontrollü Hasar

Hedefe ulaştı — ama bedeli ağır:

- Dört yöntem arasında en pahalı çözüm.
- Tam tahliye zorunlu; bina aylarca kullanım dışı.
- Manto donatısının kirişlere ankrajı için duvarlar kısmen kırılır; uygulama sonrası sıva, boya ve tesisat yenilemesi gerekir.
- Kullanıcı açısından en yıkıcı ve en çok itiraz gören yöntem.

Kaynak: Sak, Ö.F. (2021), 6. UDMSK, GTÜ — Yöntem 2 (kolon mantolama) performans analizi ve metrajı.

₺220.000

Uygulama maliyeti — karşılaştırılan dört yöntemin en yükseği (2021 fiyatları)

Tam tahliye

Binanın tümüyle boşaltılması zorunlu

2–3 ay

Uygulama süresi (kırım ve yenileme işleri dahil)

Sonuç: işe yarıyor; fakat hızlı ve ekonomik değil.

Yöntem 3 — Merdiven kovalasına deprem perdesi

Uygulama kapsamı

İlk beş katta, merdiven kovalasına yerinde dökme betonarme deprem perdesi eklendi (TBDY 15.10.5). Merdiven kovalası seçilmesinin nedeni: daire içlerine girmeden, ortak alandan çalışılabilmesi ve perdenin binanın çekirdeğinde konumlanması.

Performans analizi sonucu

Kontrollü Hasar

Perde etkisi devrede: Kolonlara dokunmadan sisteme eklenen tek bir perde, rijitlik ve ataleti kübik oranda artırarak yapıyı göçme durumundan Kontrollü Hasar düzeyine taşıdı.

Maliyeti mantolamanın yaklaşık **dörtte biri**; üstelik yalnızca **kısmi tahliye** yeterli — dairelerin büyük bölümü uygulama boyunca kullanılabilir.

Kaynak: Sak, Ö.F. (2021), 6. UDMSK, GTÜ — Yöntem 3 (deprem perdesi) performans analizi ve metraji.

₺58.000

Uygulama maliyeti — mantolamanın yaklaşık 1/4'ü (2021 fiyatları)

Kısmi tahliye

Çalışma merdiven kovalasında yürür; binanın tamamı boşaltılmaz

1–2 ay

Uygulama süresi

Sonuç: mantolamayla aynı performans, dörtte bir maliyet, yarı süre.

Yöntem 4 — Shotcrete: en ucuz, en hızlı, en yüksek performans

Kapsam şaşırtıcı derecede küçük: **yalnızca bodrum kat duvarlarına püskürtme beton (shotcrete)** uygulandı — üst katlardaki hiçbir kolon veya kirişe dokunulmadı. Bodrum kat, donatılı püskürtme betonla perde benzeri bir rijitliğe kavuşturuldu.

KESİNTİSİZ KULLANIM

Performans analizi sonucu — dört yöntem arasında ulaşılan **en yüksek performans düzeyi**; yapı deprem sonrasında bile kullanımına ara vermeden devam edebilir.

Maliyet dökümü (2021 fiyatları)

- 8 m³ püskürtme beton + 750 kg donatı ≈ **₺10.000** (malzeme)
- İşçilik ≈ **₺10.000**
- Toplam: **₺20.000** — mantolamanın 1/11'i, FRP'nin 1/7,5'i
- Yalnızca betonarme kısım; metraj bildirideki tablodan alınmıştır

Kaynak: Sak, Ö.F. (2021), 6. UDMSK, GTÜ — Yöntem 4 (shotcrete) performans analizi ve metraj tablosu.

₺20.000

Toplam maliyet — dört yöntemin açık ara en düşüğü

Tahliye YOK

Bina uygulama boyunca iskân edilmeye devam eder

1–2 hafta

Uygulama süresi — diğer yöntemlerin aylarına karşı haftalar

Göçme durumundaki bina, iki haftada ve tahliyesiz, en yüksek performans düzeyine çıktı.

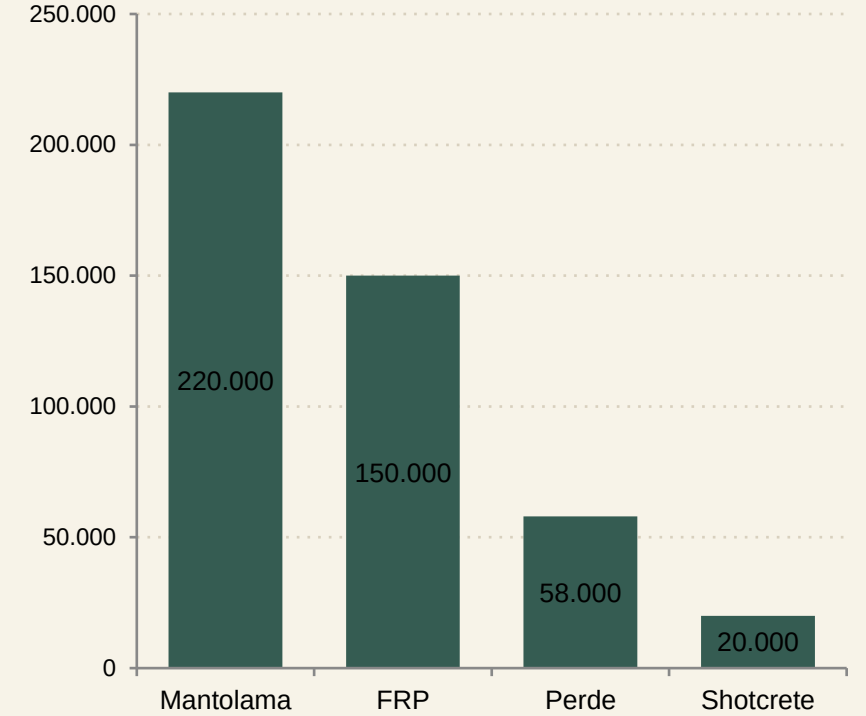
Dört yöntemin karşılaştırması: shotcrete her ekseninde önde

Yöntem	Performans	Tahliye	Süre	Maliyet
Mevcut durum	Göçme	—	—	—
FRP sargılama	Göçme	Gerekli	2–3 ay	₺150.000
Kolon mantolama	Kontrollü Hasar	Gerekli	2–3 ay	₺220.000
Deprem perdesi	Kontrollü Hasar	Kısmi	1–2 ay	₺58.000
Shotcrete	Kesintisiz Kullanım	Gerekmez	1–2 hafta	₺20.000

Not: Maliyetler 2021 fiyatlarıdır ve yalnızca betonarme kısmı kapsar. Performans düzeyleri TBDY 2018 tanımlarına göre.

Kaynak: Sak, Ö.F. (2021), 6. UDMSK, GTÜ — dört yöntemin performans analizi sonuçları ve metraj tabloları.

Uygulama maliyeti (₺, 2021)



Shotcrete, en yüksek performansı en düşük maliyetle sağlıyor:
₺20.000.

Shotcrete neden bu kadar etkili? İki mekanizma birlikte çalışıyor

1

Perde benzeri rijitlik ve atalet artışı

Donatılı püskürtme beton, bodrum duvarlarını perde gibi çalışan elemanlara dönüştürür. Perde etkisi kübik olduğundan ($6^3 = 216$ kat atalet), kolonlara nazaran rijitlik ve atalet çok yüksek mertebede artar; yatay yüklerin büyük bölümü bu duvarlara yönelir.

2

Bodrum katin "tutulu" hale gelmesi

Rijitleşen bodrum kat, üst yapının adeta yeni bir temel seviyesi gibi davranmasını sağlar; deprem hesabında etkin kat adedi düşer. Daha az kat, daha küçük ötelenme talebi ve daha düşük taban kesmesi demektir.

Rutubet uyarısı: Rutubet beton mukavemetini düşüren en büyük etkenlerdendir; güçlendirme su yalıtımıyla birlikte ele alınmalı ve uygulamaya bodrumdan başlanmalıdır.

Kaynak: Sak, Ö.F. (2021), 6. UDMSK, GTÜ — shotcrete başarısının mekanik açıklaması ve rutubet uyarısı.

Şematik: tutulu bodrum etkisi



Rijit bodrum, üst yapı için sabit taban gibi çalışır; deprem hesabındaki etkin kat adedi azalır.

Eksoskeleton: binaya içeriden değil, dışarıdan müdahale

Shotcrete dahil içeriden müdahale istenmediği durumlarda güçlendirme **binanın dışından** uygulanabilir: dış cepheye eklenen çelik veya betonarme iskelet (eksoskeleton), yatay yükleri mevcut sistemin önünde karşılar.

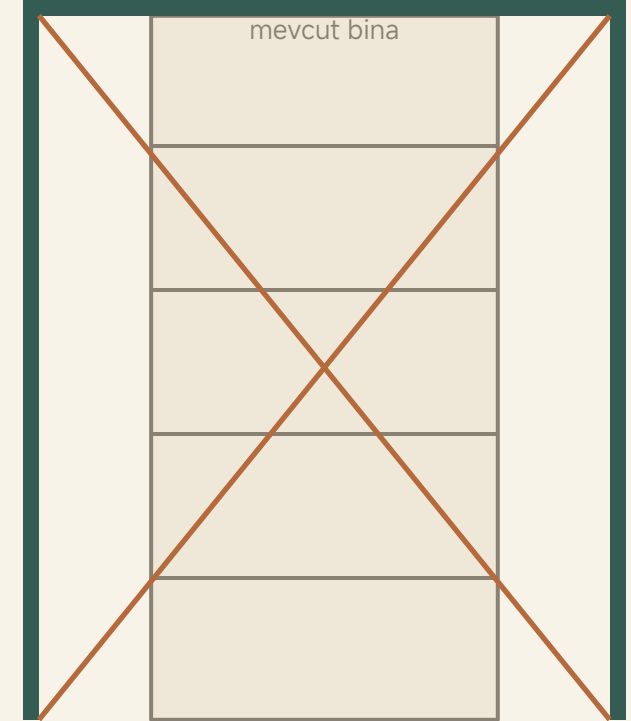
Kullanıcı açısından avantajları

- Alan kaybı yok — daire içlerine girilmez, kullanım alanı küçülmez
- Tahliyesiz uygulama — bina iskân edilmeye devam eder
- İç mekânda kırım, sıva ve yenileme işi doğmaz
- Dıştan güçlendirme İstanbul koşullarında içten güçlendirmeye göre ~%50 daha ekonomiktir (Sucuoğlu vd., 2006)

Literatür desteği: Ard germeli çelik çaprazlarla dıştan güçlendirme, yapının dayanımını ve rijitliğini **3 kata kadar** artırır (Gilmore vd., 1996).

Kaynak: Sak, Ö.F. (2021), 6. UDMSK, GTÜ; Gilmore vd. (1996); Sucuoğlu vd. (2006).

Şematik: dış iskelet (eksoskeleton)



Çelik dış iskelet (yeşil) ve ard germeli çaprazlar (okra), binayı dışarıdan sarar.

Kütle azaltma: $F = m \cdot a$ 'nın sadeliği

$$F = m \cdot a$$

Deprem kuvveti, yapı kütlesiyle doğru orantılıdır. Taşıyıcı sisteme hiç dokunmadan kütleyi azaltmak, binaya gelen deprem kuvvetini aynı oranda düşürür (TBDY 15.10.7).

Uygulama örnekleri

- **Kat azaltma** — üst katların kaldırılması
- **Hafif çatı** — ağır kiremit/betonarme yerine hafif çatı sistemi
- **Su depolarını zemine indirme** — çatıdaki büyük kütlelerin temel seviyesine taşınması
- **Ağır balkon, parapet ve cephe elemanlarının** hafif alternatiflerle değiştirilmesi

Diğer yol: ivmeyi azaltmak

$F = m \cdot a$ denkleminin ikinci terimi de mühendisin elindedir: **sismik izolatörler** yapıya iletilen ivmeyi azaltarak deprem kuvvetini kütle sabitken bile düşürür (TBDY Bölüm 14).

İzolatörlerin köprülerdeki uygulamasını **Bölüm 4**'te ayrıntılı ele alacağız.

Kütle mi, ivme mi?

- Kütle azaltma mevcut binalarda doğrudan ve düşük teknoloji bir seçenektir; özellikle çatı ve üst kat müdahaleleri hızlı uygulanır.
- Sismik izolasyon daha kapsamlı bir sistem çözümüdür; yeni yapımda ve büyük güçlendirme projelerinde güçlü bir alternatiftir.
- İki yaklaşım birlikte de kullanılabilir: azalan kütle, izolatör tasarımı da kolaylaştırır.

Kaynak: Sak, Ö.F. (2021), 6. UDMSK, GTÜ; TBDY 2018 Madde 15.10.7 (kütle azaltma) ve Bölüm 14 (sismik izolasyon).

Güçlendirme ve su yalıtımı birlikte düşünülmeli

Rutubet, beton mukavemetinin sessiz düşmanıdır: betonun dayanımını düşüren en büyük etkenlerden biri uzun süreli nem ve su temasıdır. Güçlendirilen kesitler yalıtımsız bırakılırsa, kazanılan kapasite yıllar içinde yeniden aşınır.

Bodrumdan başlayın, gerektiği kadar kata çıkın.

Vaka çalışmasındaki shotcrete uygulaması bunun kanıtıdır: yalnızca bodrum katın güçlendirilmesi yapıyı göçme durumundan Kesintisiz Kullanım düzeyine taşıdı. Uygulamaya bodrumdan başlanmalı, analizin gerektirdiği kadar kata çıkılmalıdır — daha fazlası çoğu zaman gereksiz maliyettir.

FRP'nin yeri ayrı:

FRP sargı, yalnızca **beton mukavemeti yeterli** (C15–C17 ve üzeri) yapılarda süneklik artırımı için uygundur. Düşük mukavemetli, rutubet almış betonda sargı görevini yapamaz; önce betonun kendisi iyileştirilmelidir.

Aşınma zinciri

- 1 · **Yalıtımsız bodrum** — toprak suyu ve rutubet betona işler
- 2 · **Mukavemet kaybı** — beton dayanımı düşer, donatıda korozyon başlar
- 3 · **Performans düşüşü** — yapı riskli sınıfa girer (vakada 8,7 MPa)
- 4 · **Kalıcı çözüm** — güçlendirme + su yalıtımı birlikte; aksi halde zincir yeniden başlar

Güçlendirme projesi, yalıtım projesiyle aynı dosyada ele alınmalıdır.

Kaynak: Sak, Ö.F. (2021), 6. UDMSK, GTÜ — sonuç ve öneriler bölümü (rutubet, bodrumdan başlama, FRP koşulu).

Bölüm 2 sonuçları: beş net mesaj

- 1** Perde etkisi kübiktir. Kolon yerine perde: kesit alanı 6 kat, atalet momenti 216 kat (6^3) artar — güçlendirmenin en güçlü kaldırıcı perdedir.
- 2** Shotcrete en etkili, en ekonomik ve en pratik yöntemdir. Vaka binasında yalnızca bodrum kat uygulamasıyla Kesintisiz Kullanım düzeyine ₺20.000'de, tahliyesiz, 1–2 haftada ulaşıldı.
- 3** FRP, düşük mukavemetli betonda yetersizdir. Rijitlik değil süneklik sağlar; C15–C17 altı betonda beklenen performans vermez — vakada yapı göçme durumunda kaldı.
- 4** Tahliye gerektirmeyen yöntemler uygulanabilirliği artırır. Shotcrete (tahliyesiz) ve eksoskeleton (dışarıdan, alan kaybı yok) mülk sahiplerinin en büyük çekincesini ortadan kaldırır.
- 5** Güçlendirme ve su yalıtımı birlikte ele alınmalıdır. Rutubet beton mukavemetinin sessiz düşmanıdır; uygulamaya bodrumdan başlanmalı, gerektiği kadar kata çıkılmalıdır.

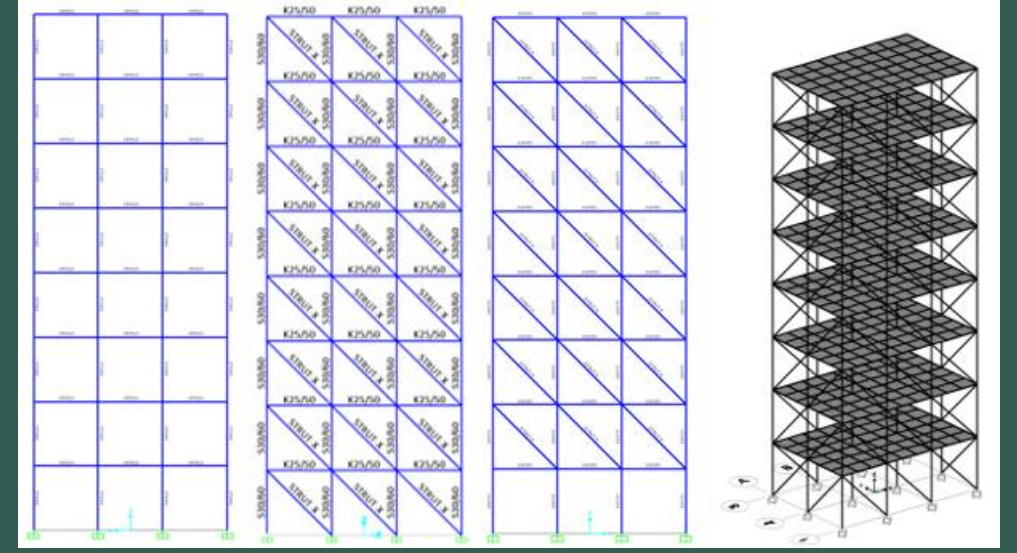
Tek cümleyle: Riskli bir binayı tahliye etmeden, haftalar içinde ve düşük maliyetle güçlendirmek mümkündür — doğru yöntem seçimi ve bodrumdan başlayan, yalıtımla bütünleşik bir stratejiyle.

Bölümün ana kaynağı: Sak, Ö.F. (2021), "Binaların Depreme Dayanımını Arttırmak İçin Hızlı ve Ekonomik Yöntemler", 6. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı (UDMSK), 13–15 Ekim 2021, Gebze Teknik Üniversitesi, Gebze/Kocaeli.

03

Yapılarda Tuğla Duvarların Kaldırılmasının Düşey Düzensizliğe Etkisi

Zemin kattaki bir duvarı kaldırmak binanın kaderini değiştirebilir mi?



Yumuşak kat · Zayıf kat · Eşdeğer basınç çubuğu · SAP2000 modelleri · Gerçek yapılar · Tasarım önerisi

Kaynak: Sak, Ö.F., International Congress of Engineering and Natural Sciences

Yıkımların arkasındaki düzensizlikler: yumuşak kat ve zayıf kat

Depremde hasar alan yapılarda düşük malzeme dayanımı, yetersiz proje tasarımı ve kritik imalat hataları öne çıkar; ancak yıkılan binaların önemli bölümünde **yumuşak kat** ve **zayıf kat** düzensizlikleri belirleyici rol oynar. TBDY 2018, Bölüm 3.6.1 ve Tablo 3.6'da bu iki düzensizliği ayrı ayrı tanımlar.

YUMUŞAK KAT — rijitlik düzensizliği (B2)

Bir katın yanal rijitliği komşu katlara göre belirgin biçimde düşükse kat **yumuşak** sayılır.

Tipik nedeni: zemin katta mağaza/otopark için **kat yüksekliğinin artırılması** — kolon rijitliği yüksekliğin küpüyle azalır.

Ölçüt: ortalama görelî kat ötelemesi oranının komşu katla karşılaştırılması.

ZAYIF KAT — dayanım düzensizliği (B1)

Bir katın etkili kesme alanı (dayanımı) üst katinkine göre yetersizse kat **zayıf** sayılır.

Tipik nedeni: zemin katta **tuğla dolgu duvarların kaldırılması** — kesme alanı aniden küçülür.

Ölçüt: etkili kesme alanının bir üst kata oranının 0,80'in altına düşmesi.

Ortak nokta: İki düzensizlik de deprem talebini tek bir kata yığar; hasar o katta yoğunlaşır ve kat göçmesi mekanizması oluşur. Zemin kat baskısı (yüksek kat + az duvar) çoğu zaman ikisini birden tetikler.

TBDY B1 — Zayıf kat: duvar alanının %15'i hesapta

TBDY 2018 Tablo 3.6, B1 düzensizliğinde bir katın **etkili kesme alanını** kolon, perde ve dolgu duvar katkısının toplamı olarak tanımlar; tuğla duvar alanı ancak **%15 mertebesinde** hesaba dahil edilir.

Kriter: Katın etkili kesme alanının bir üst katinkine oranı **0,80'den küçükse** o kat zayıf kattır.

Madde 4.9.1.3(b): Esnek derzli, esnek bağlantılı veya çerçeveden bağımsız örülen dolgu duvarlar kesme alanı hesabına **katılmaz**.

Tartışma — alan mı, atalet mi? Tezcan vd. (2007), zayıf kat değerlendirmesinde kesme *alanları* yerine elemanların *atalet momentlerinin* esas alınmasının daha gerçekçi sonuç vereceğini öne sürer; perde ağırlıklı sistemlerde alan esaslı kriter yanıltıcı olabilir.

$$A_{etkili} = A_{kolon} + A_{perde} + 0,15 \cdot A_{duvar}$$

$$\eta_{ci} = \frac{(A_{etkili})_i}{(A_{etkili})_{i+1}} < 0,80 \Rightarrow \text{zayıf kat}$$

Üst kat (duvarlı)

A_etikili = 1,00 (referans)

Zemin kat (duvarlar kaldırılmış)

0,67 < 0,80 → B1 düzensizliği

0,80 eşiği

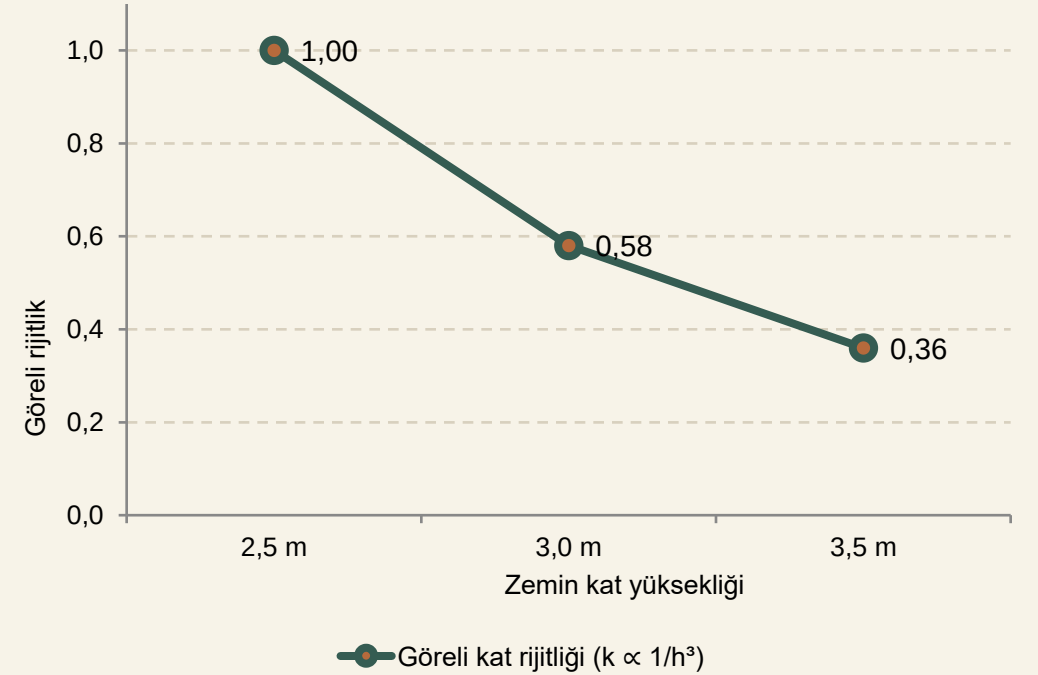
TBDY B2 — Yumuşak kat: rijitlik yüksekliğin küpüyle düşer

TBDY 2018 Tablo 3.6, B2 düzensizliğinde **ortalama görelî kat ötelemesi oranı** komşu katınkine, kat yükseklikleri oranıyla düzeltilerek bakılır; oran sınırı aşılsa kat yumuşak kattır.

Kolonun yanal rijitliği $k \propto \frac{EI}{h^3}$ bağıntısıyla **yüksekliğin küpüyle** azalır. Zemin kat yüksekliğindeki görünüşte masum bir artış, kat rijitliğini dramatik biçimde düşürür.

Zemin kat 2,5 → 3,5 m yapıldığında aynı kolon kesitinde kat rijitliği yaklaşık **%64 azalır**: $(2,5/3,5)^3 \approx 0,36$

Senaryonun anlamı: Üst katlar 3 m iken zemin katın 3,5 m yapılması, tek başına B2 ölçütünü zorlar; bir de dolgu duvarlar kaldırılırsa rijitlik farkı daha da büyür ve görelî kat ötelemeleri zemin katta yoğunlaşır.



Eğri, aynı kolon kesiti için $k \propto 1/h^3$ bağıntısından türetilmiş görelî değerlerdir (2,5 m = 1,00 referans).

Zemin kat baskısı: mağaza, otopark, ferah alan

Pratikte karşılaşılan tipik senaryo: zemin katta **mağaza, işyeri veya otopark** talebi, mimariyi iki yönden zorlar — kat yüksekliği artırılır ve tuğla dolgu duvarlar kaldırılır.

Bu iki müdahale tek başlarına masum görünür; birlikte ise düşey düzensizlik için **en riskli kombinasyonu** oluşturur.



Kat yüksekliği artışı

Kolon rijitliği h^3 ile düşer →
yumuşak kat (B2)

+



Duvarların kaldırılması

Etkili kesme alanı küçülür → zayıf
kat (B1)

=

Düşey düzensizlik için en riskli
kombinasyon: yumuşak + zayıf zemin kat

İrtem vd. (2005): Zemin kat yüksekliğinin artırılmasıyla yapının rijitliği ve deprem performansı **önemli ölçüde düşer**; yüksek zemin katlı çerçevelerde hasar zemin katta yoğunlaşır.

Tasarımcıya not: Ticari talep meşrudur; çözüm yasak değil, düzensizliği telafi eden boyutlandırmadır (bkz. s. 44).

Dolgu duvar 'sadece yük' değildir

Deneysel çalışmalar, çerçeveye örülen tuğla dolgu duvarın yanal davranışı kökten değiştirdiğini gösteriyor. Geleneksel "duvarlar sadece yük" varsayımı, bu katkıyı tümüyle yok sayar.

3,5 kat

Tuğla dolgu duvarın çerçevenin yanal yük kapasitesine katkısı — Baran (2012, deneysel)

4,5 kat

Sıvalı tuğla dolgu duvarla kapasite artışı — Baran (2012)

5–6 kat

Rijitlikte 5 kat, kapasitede 6 kat artış — Klingner & Bertero (1978)

Sayın & Kaplan: Duvar etkisini içeren model karmaşıktır; bu nedenle duvar katkısı pratikte "güvenli tarafta kalma" gerekçesiyle göz ardı edilir.

Ama bu her zaman güvenli mi? Duvar katkısı katlar arasında *düzensiz* dağılmışsa — örneğin zemin katta duvar yoksa — ihmal, yumuşak/zayıf katı gizler ve güvensiz tarafta kalınır.

Ana fikir: Duvar ne tamamen yok sayılabilir ne de her katta varmış gibi düşünülebilir; dağılımı modele yansıtılmalıdır.

Eşdeğer basınç çubuğu: FEMA 356'nın kabul ettiği yöntem

Dolgu duvar, yanal yük altında çerçeve köşeleri arasında sıkışan bir **çapraz basınç çubuğu** gibi çalışır. FEMA 356'nın kabul ettiği bu yöntemde duvar, çerçeveye eklenen eşdeğer bir çapraz elemanla modellenir (Tülin, 2014).

Stafford Smith (1966, ASCE) — göreceli rijitlik parametresi

$$\lambda h = H^3 \sqrt{\frac{E_z t \sin^2 \theta}{4 E_b I_s H}}$$

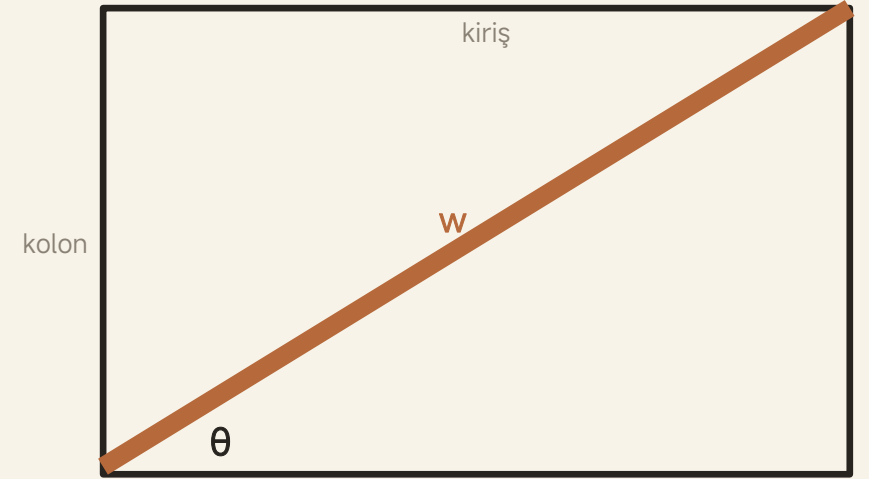
Mainstone (1971, ICE) — eşdeğer çubuk genişliği

$$w = 0,175 d_z (\lambda h H')^{-0,4}$$

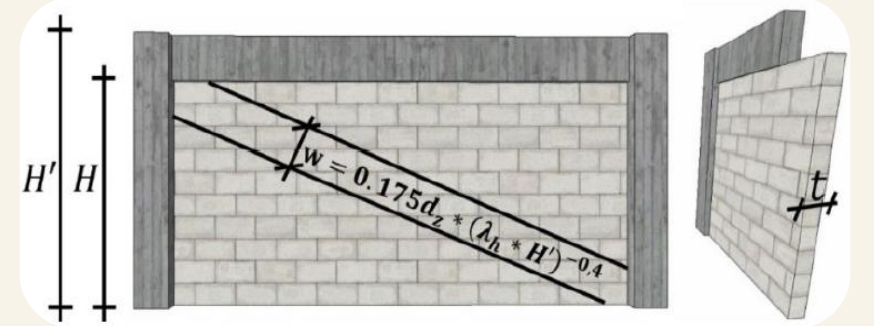
H: kat yüksekliği · H': duvar yüksekliği · t: duvar kalınlığı · θ : çaprazın yatayla açısı · E_z : duvar elastisite modülü · E_b : çerçeve elastisite modülü · I_s : kolon atalet momenti · d_z : çapraz uzunluğu

Kaynak: FEMA 356 (2000); Stafford Smith (1966, ASCE); Mainstone (1971, ICE); Tülin (2014, KTÜ); aktaran Sak, Ö.F.

Şema: çerçeve + eşdeğer çapraz basınç çubuğu



Çubuk yalnızca **basınç** çalışır; yük yönü değiştiğinde görev diğer çapraza geçer. Genişlik w, duvar-çerçeve göreceli rijitliğine bağlıdır.



Analitik çalışma: 8 katlı yapı, 3 modelleme yaklaşımı

SAP2000'de 8 katlı betonarme yapı: zemin kat yüksekliği 2,5 / 3,0 / 3,5 m senaryoları, diğer katlar 3 m; kolonlar 40×70, kirişler 25×50. Aynı yapı, dolgu duvarları üç farklı biçimde ele alan modelle çözüldü.

MODEL 1

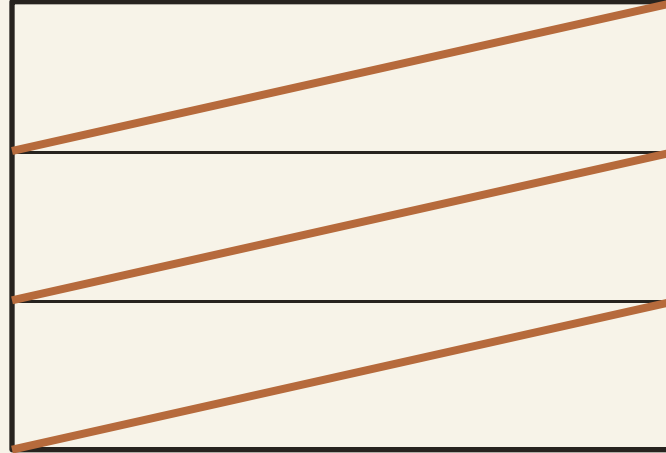
Duvarlar sadece yük



Rijitlik ve dayanım katkısı yok; yalnızca ağırlık modele girer.

MODEL 2

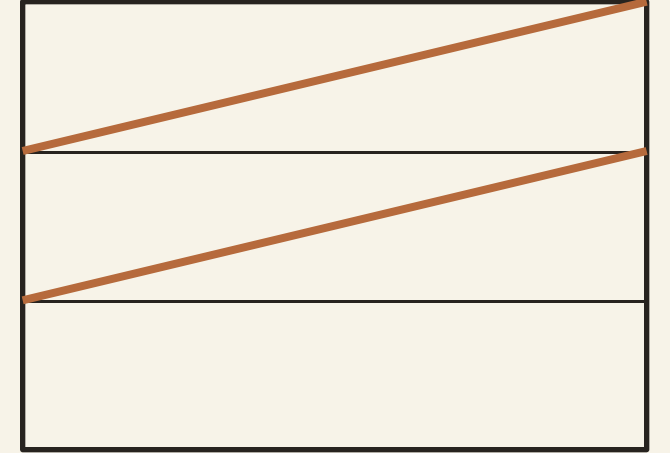
Eşdeğer basınç çubuğu



Duvarlar her katta çapraz çubukla modellenir (FEMA 356).

MODEL 3

Zemin katta duvarlar kaldırılmış



Zemin kat çıplak çerçeve; üst katlarda çubuklar korunur.

Her model üç analizle çözüldü: eşdeğer deprem yükü · modal spektral analiz · zaman tanım alanında analiz

Taban kesme kuvvetleri: duvar modellemesi kuvvetleri artırıyor

Taban kesme kuvvetleri — eşdeğer deprem yükü yöntemi (kN)

Zemin kat	Model 1	Model 2	Model 3
2,5 m	1491,77	1790,68	1774,49
3,0 m	1456,95	1769,52	1744,45
3,5 m	1419,02	1745,12	1709,73

Spektral analizde taban kesmeleri ~959–1057 kN, zaman tanım analizinde ~860–1020 kN aralığındadır.

~%20

Duvarlar eşdeğer çubukla modellendiğinde (M2) deprem kuvveti, "sadece yük" modeline (M1) göre artar — **kolonlar gerçekte daha zorlanır.**

Zemin kat yüksekliği (ve ağırlık) artmasına rağmen kuvvetler *azalır* — neden periyot uzamasıdır; bu düşüş güvenlik değil, spektrumun şeklidir.

Dinamik analizde düzensizliğin "cezalandırılması" hesap kuvvetlerini **%30–40 azaltır.**

Sonuç: Duvarı modele katmayan tasarımcı, kolonlara gerçekte olandan daha düşük kuvvet atfeder; eşdeğer çubuk modeli daha gerçekçi ve güvenli tarafta bir talep tahmini verir.

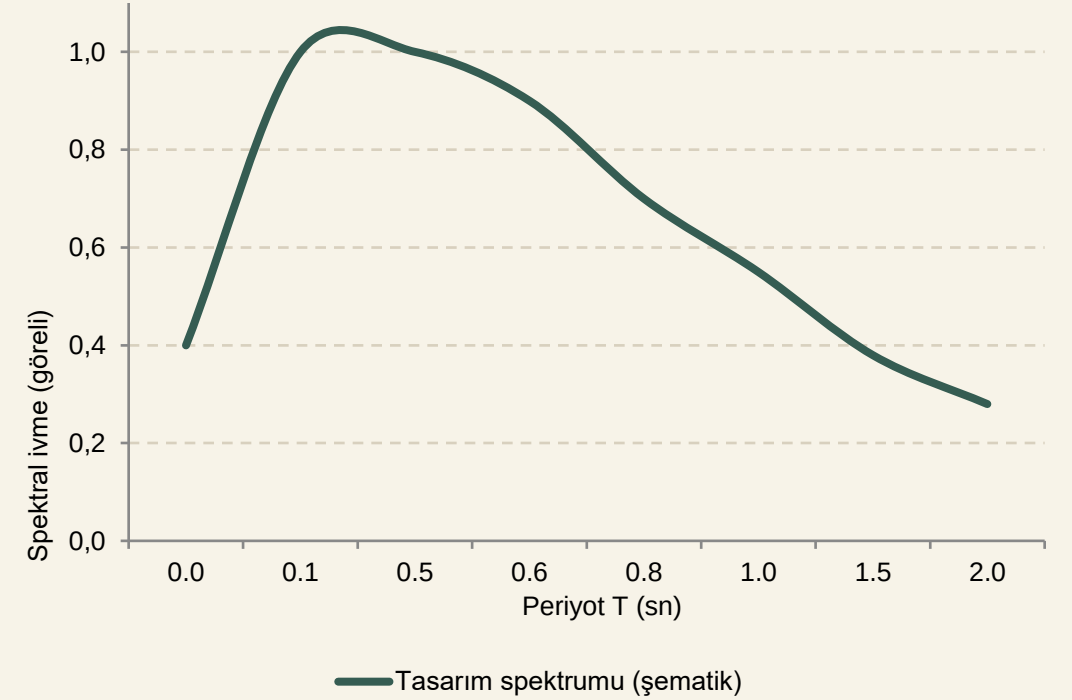
Periyot uzadıkça kuvvet düşer — ama bu güvenli değil

1. mod periyotları (sn) — zemin kat yüksekliğine göre

Model	2,5 m	3,0 m	3,5 m
M1 (yük)	0,562	0,580	0,603
M2 (çubuk)	0,433	0,447	0,464
M3 (duvarsız zk)	0,442	0,463	0,489

Duvarlar modellenince (M2) periyot, "sadece yük" modeline (M1) göre **~%23 kısalır** → tasarım spektrumunda daha yüksek spektral ivme → daha büyük deprem yükü.

Zemin kat yükseldikçe periyot uzar ve hesap kuvveti düşer; ancak bu, rijitlik kaybının işaretidir — **güvenlik artışı değil**.



M1 periyotları (0,56–0,60 sn) spektrumun azalma koluna denk gelir; M2'nin kısa periyotları (0,43–0,46 sn) plato bölgesinde kalır → daha yüksek talep.

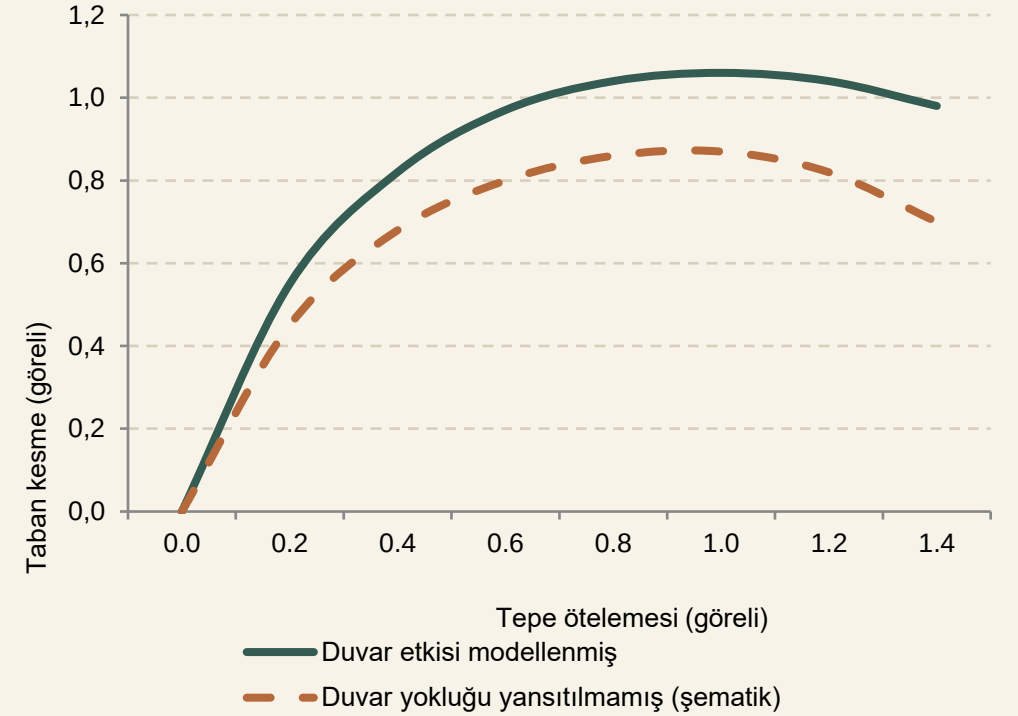
Pushover: duvar yokluğunu görmezden gelmek göçme noktasına götürür

İtki (pushover) analizleri, modelleme tercihinin performans değerlendirmesini nasıl değiştirdiğini açıkça gösterir:

Eşdeğer çubuk modelinde yapı daha yüksek kuvvet taşır ve **daha az kolon donatısı** yeterli olur → detaylı duvar modellemesi **optimum tasarım** sağlar.

Kritik hata: Zemin katta duvarların kaldırılmış olduğu gerçeği modele yansıtılmazsa, analiz var olmayan bir rijitliği hesaba katar; gerçek yapı ise öngörülen performans noktasına ulaşamaz ve **göçme noktasına** kadar ilerleyebilir.

Pratik ders: Performans değerlendirmesi, duvarların gerçek dağılımını — varlığını ve yokluğunu — içermelidir.



Şematik kapasite eğrileri: duvar katkısı modele girmediğinde kapasite ve süneklik düşük, göçme davranışı erken öngörülür.

İki gerçek bina, iki farklı sonuç

STA4Cad ile incelenen iki mevcut betonarme karkas, duvar etkisinin **binadan binaya değiştiğini** gösteriyor: belirleyici olan duvar yoğunluğu ve boşluk oranı.

Harun Bey Apt. — 6 kat · etki sınırlı

1,27 → 1,21 sn

1. mod periyodu (duvarsız → duvarlı)

Duvar etkili/etkisiz analizlerde **hasar farkı çıkmadı.**

Neden? Zemin katta duvar yoğunluğu zaten düşük ve mevcut duvarlarda geniş pencere boşlukları var — duvar katkısı sınırlı kalıyor.

Okan Bey Apt. — 7 kat · performans yükseldi

%68,5 → %63,7

Zemin katta göçme bölgesindeki kolon oranı (duvarsız → duvarlı)

Duvar etkisiyle ileri hasar bölgesindeki kolonlar arttı, **göçme bölgesindekiler azaldı** → performans yükseldi.

Periyot: x yönü 1,349 → 1,339 sn; **y yönü 1,13 → 1,01 sn.**

Sonuç: Duvar etkisi duvar yoğunluğuyla orantılıdır; "duvar vardır/yoktur" ikilemi yerine gerçek envanter modele girmelidir.

Yumuşak kat çözümleri: hangi yöntem ne kadar etkili?

Karşılaştırılan yöntemler

Furtado vd. (2017) üç yöntemi karşılaştırdı:

- Kolon mantolama
- Çelik sargılama (çaprazlı çelik elemanlar)
- Betonarme perde ilavesi

Sonuç: **enerji sönümleyicili (damperli) çelik sargılama** en etkili yöntem — hem rijitlik hem sönüm kazandırıyor.

Perde ilavesi rijitliği hızla artırır ancak burulma düzensizliği riskine dikkat edilmelidir (asimetrik yerleşim, Bayülke 2003).

Ortak ilke: Yumuşak kat çözümü, kaybolan rijitlik ve dayanımı zemin kata geri kazandırmaktır; yöntem seçimi yapının mevcut durumu ve kullanım sürekliliği koşullarına göre yapılır.

Kaynak: Furtado vd. (2017); Öztürk & Öğütçü (2018); Bayülke (2003, TMH 426); aktaran Sak, Ö.F.

+%250

Çelik diyagonallerle yumuşak katta yanal yük kapasitesi artışı —
Öztürk & Öğütçü (2018, deneysel)

+%120

Aynı deneyde enerji sönüm kapasitesi artışı

%25

V diyagonallerin X diyagonallere göre yük taşıma üstünlüğü

Tasarım önerisi: %15 kuralı

%15

Zemin kat kolon ve perde kesitlerinin ulaşması önerilen büyüklük: **mimari duvar alanının %15'i mertebesi**

Öneri: Zemin kat kolon ve perdeleri üst katlara göre büyük boyutlandırılmalı; kesit alanları, hesapta duvarlara tanınan pay kadar — mimari duvar alanının **%15'i mertebesinde** — artırılmalıdır.

Böylece duvarlar sonradan kaldırılrsa bile **zayıf kat oluşmaz** ve yapı güvenlik payını korur; B1 kriterindeki 0,80 oranı duvar katkısına bel bağlamadan sağlanır.

İlgili hüküm — TBDY 2018, Madde 6.1.3

Yapısal olmayan bir elemanın ağırlığı kat ağırlığının **%10'unu aşarsa**, o eleman taşıyıcı sistemin parçası sayılır ve modele dahil edilir. Dolgu duvarların "yok sayılması" bu hükümle de sınırlıdır.

Yönetmeliğe öneri: Zayıf kat ve yumuşak kat belirleme yaklaşımları, duvar katkısını daha gerçekçi yansıtacak biçimde gözden geçirilmelidir.

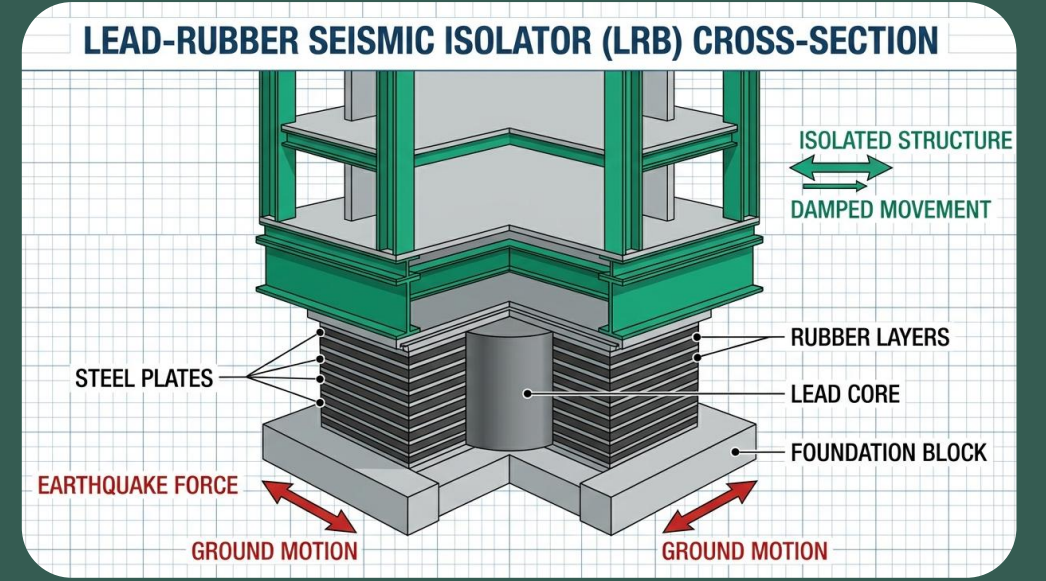
04

Sismik İzolatör Kullanımında Kat Sayısı ve Maliyet İlişkisi

Sismik izolasyon lüks mü, yoksa doğru tasarlanırsa ekonomik bir zorunluluk mu?

İzolatör tipleri · Kobe deneyimi · 5/10/15 kat analizi · maliyet eğrisi · GSI · optimum tasarım

Kaynak: Bulut & Sak, 10. Uluslararası Avrupa Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Kongresi



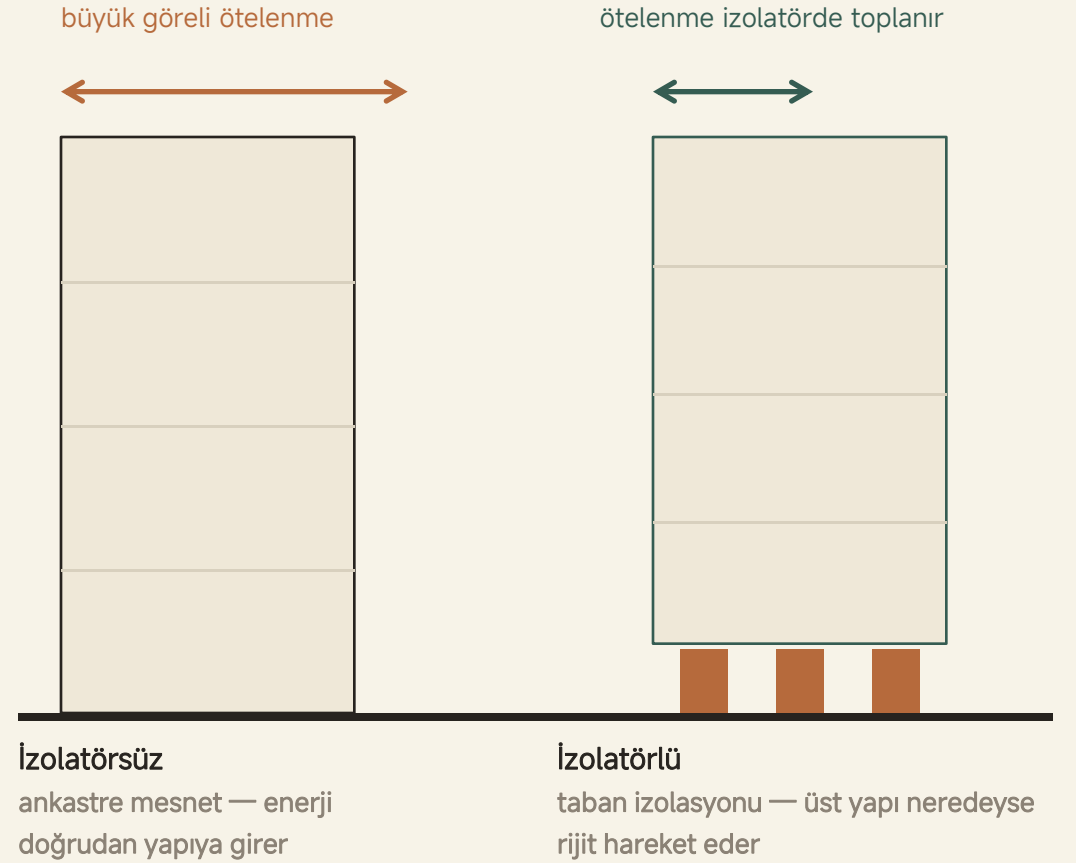
Sismik izolasyonun temeli: deprem enerjisini binadan uzak tutmak

Taban izolasyonu, yapı ile temel arasına yerleştirilen esnek ve sönümlü ara birimlerle deprem hareketinin binaya aktarımını kesmeyi amaçlar. Amaç yapıyı depreme karşı kaba kuvvetle direndirmek değil, enerjinin yapıya girmesini engellemektir.

Sistem iki temel prensibe dayanır: **periyot uzatma** (yapının doğal periyodu spektrumun yüksek ivme bölgesinden uzaklaştırılır) ve **sönüm artırma** (izolatör histeretik davranışla enerjiyi tüketir). Doğal periyot: $T = 2\pi\sqrt{m/k}$ — rijitlik k azaldıkça periyot uzar.

Taşıyıcı sisteme etkisi: İzolatörlü yapıda taban kesme kuvveti ve devrilme momenti belirgin biçimde azalır; kolon ve kirişler daha küçük iç kuvvetlere çalışır. Bu azalma, donatı metrajında tasarruf olarak geri döner — Bölüm 4'teki maliyet analizinin kilit noktası budur.

Şematik davranış karşılaştırması



Kaynak: Bulut & Sak, 10. Uluslararası Avrupa Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Kongresi; TBDY 2018 (RG 18.03.2018, Sayı 30364).

İzolatör tipleri: elastomerden sürtünme sarkacına, zemine kadar

KÇE — Kurşun Çekirdekli Elastomer

Kauçuk katmanları arasına kurşun çekirdek yerleştirilir; kurşun akma yoluyla enerji tüketir, kauçuk geri döndürme yetisi sağlar. Bu çalışmada kullanılan tip budur.

YSE — Yüksek Sönümlü Elastomer

Özel kauçuk bileşimi sayesinde kurşun çekirdeğe gerek kalmadan yüksek sönüm sağlar; daha yumuşak karakterli izolasyon birimidir.

Sürtünme Sarkaç İzolatörü

Kavisli yüzeyde kayan sarkaç prensibiyle çalışır; periyot yüzey geometrisiyle belirlenir, sürtünme enerjiyi sönümler. Büyük deplasman kapasitesi sunar.

GSİ — Geoteknik Sismik İzolasyon

İzolatör yerine temel altına serilen bitümlü sönümleyici geomateryal tabakası; düşük maliyetli alternatif (ayrıntı: s. 56).

TBDY 2018 ile tanımlanan tasarım parametreleri

Parametre	Anlamı
F_Q	Karakteristik dayanım — izolatörün histeretik davranışının başlangıç noktası
k_2	İkincil (elastik ötesi) rijitlik — akma sonrası eğim
λ çarpanları	Yaşlanma/çevresel etkiler, deney-yükleme hızı-ısınma ve üretim değişkenlikleri için düzeltme katsayıları

Neden önemli? TBDY 2018, KÇE ve YSE yalıtım birimlerinin özelliklerinin bu çarpanlarla düzeltilmesini şart koşar; tasarım değerleri deney ve üretim belirsizliklerini kapsayacak biçimde güvenli tarafta belirlenir.

Kaynak: Bulut & Sak, 10. Uluslararası Avrupa Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Kongresi; TBDY 2018 (RG 18.03.2018, Sayı 30364).

Kobe 1995: iki binanın hasarsız kalması bir sektörü değiştirdi

17 Ocak 1995'teki Hyogo-ken Nanbu (Kobe) depremi, sismik izolasyon teknolojisi için dönüm noktası oldu. Kentteki yıkımın ortasında, taban izolasyonlu **iki yapının hasarsız atlatması** sisteme olan güveni kökten artırdı.

Bu deneyimin ardından Japonya, 2000 yılından beri sismik izolasyon uygulamalarında dünya lideri konumundadır (Kök 2014; İlerisoy vd. 2019).

Kritik yapılarda hayati rol: Hastane, havaalanı, otogar, köprü ve viyadük gibi deprem sonrası kesintisiz hizmet vermesi gereken yapılarda izolatör kullanımı bir tercih değil, işlevsellik şartıdır. Kobe sonrası Japonya'da izolasyon bu yapı tipolojilerinden başlayarak konuta doğru yayılmıştır.

17 Ocak 1995

Hyogo-ken Nanbu (Kobe) depremi — izolasyon tarihinin miladı

2 bina · 0 hasar

Depremi hasarsız atlatan izolasyonlu yapı sayısı — sisteme güveni artıran kanıt

2000'den beri

Japonya, sismik izolasyon uygulamasında dünya lideri

Ders: izolasyon güvenilirliği sahada, gerçek depremde kanıtlanmıştır.

Kaynak: Bulut & Sak, 10. Uluslararası Avrupa Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Kongresi; Kök (2014); İlerisoy vd. (2019, VI. International Earthquake Symposium Kocaeli, Gazi Üniv.).

Türkiye'de izolasyon: 2023 depremlerinin sınavından geçti

0 hasar

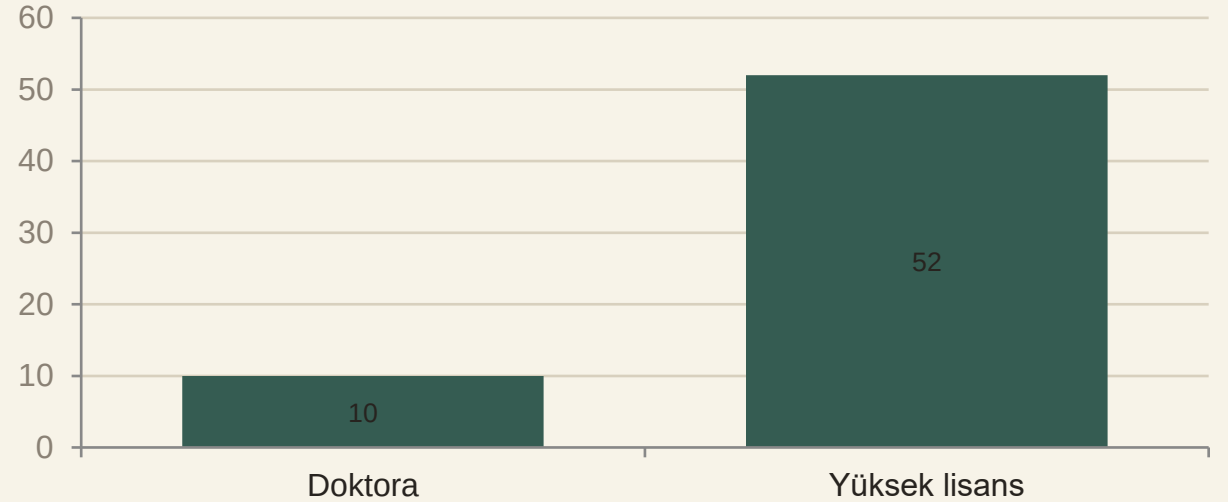
6 Şubat 2023 Pazarcık (M_w 7,7) ve Elbistan (M_w 7,6) depremlerinde deprem yalıtımlı yapılarda hasar oluşmadı; yapılar deprem sonrası kesintisiz kullanılmaya devam etti (AFAD 2023).

62 tez

YÖK Ulusal Tez Merkezi'nde 2000–2024 arasında "sismik izolasyon" konulu tez sayısı: 10 doktora, 52 yüksek lisans — akademik ilgi giderek artıyor.

Sonraki adım: kamu yapıları, okul, AVM, otel ve konutlarda izolasyonun yaygınlaşması gerekiyor.

Sismik izolasyon tezleri, 2000–2024 (YÖK Ulusal Tez Merkezi)



Akademik birikim sahaya yansıyor: 2023 depremleri, yalıtımlı hastane ve kamu yapılarının **deprem anında dahi işlevini sürdürdüğünü** gösterdi. 53.537 can kaybı ve 18.200 yıkılan binanın yaşandığı bir bölgede bu sonuç, izolasyonun maliyet tartışmasını bambaşka bir zemine taşıyor.

Kaynak: Bulut & Sak, 10. Uluslararası Avrupa Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Kongresi; AFAD (2023); YÖK Ulusal Tez Merkezi.

Çalışma tasarımı: aynı bina, 3 yükseklik, 2 mesnet koşulu

Amaç, konutta izolatör kullanımında **kat adedi–maliyet ilişkisini** ortaya koymak. Aynı tip mimari; 5, 10 ve 15 katlı üç yükseklik; her biri kurşun çekirdekli izolatörlü ve ankastre mesnetli (izolatörsüz) olarak modellendi.

Toplam **6 model**, Sta4Cad v14.1 ile TBDY 2018'e göre analiz edildi.

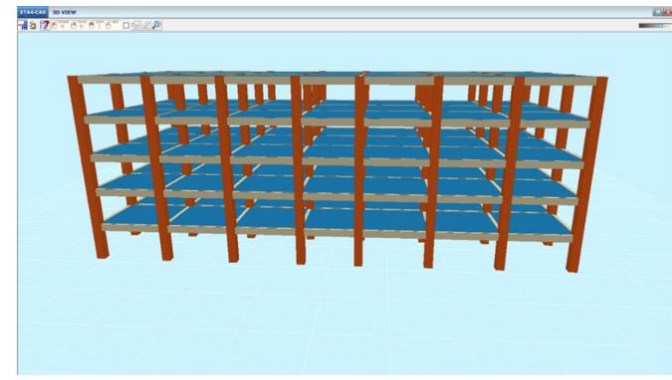
Adil karşılaştırmanın güvencesi: Tüm modellerde kesitler yeterli çıktı; kesit boyutları senaryolar arasında değiştirilmedi. Böylece metraj ve maliyet farkı yalnızca mesnet koşulunun (izolatörün) etkisini yansıtıyor.

6 senaryoluk model matrisi

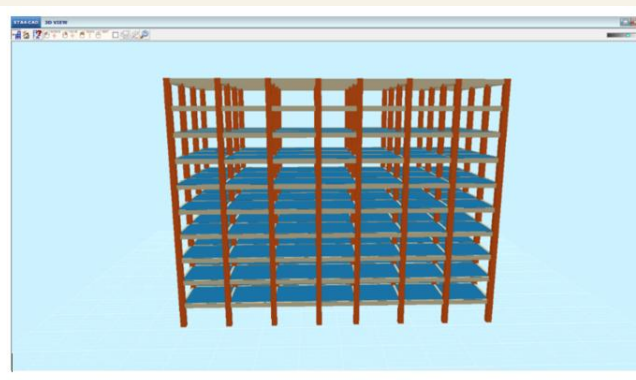
Mesnet koşulu	5 kat	10 kat	15 kat
İzolatörlü (kurşun çekirdekli)	Model 1	Model 3	Model 5
İzolatörsüz (ankastre mesnet)	Model 2	Model 4	Model 6

Her hücrede aynı plan, aynı kesitler, aynı yükler; değişen tek şey kat sayısı ve taban mesnet koşulu. Karşılaştırma bu nedenle "aynı binanın iki kaderi" denemesine dönüşüyor: biri deprem enerjisini tabanda karşılıyor, diğeri tümüyle taşıyıcı sisteme yüklüyor.

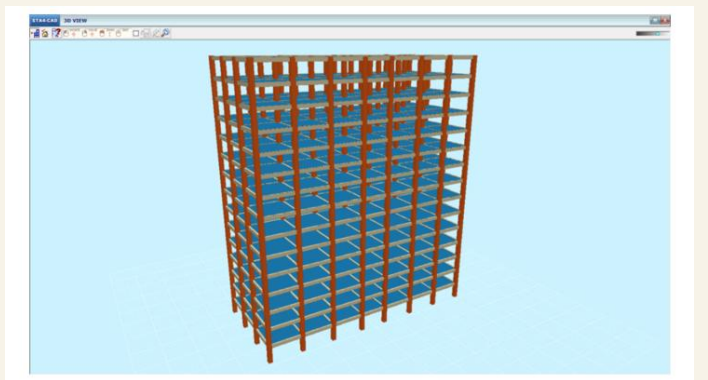
Çalışma tasarımı: aynı bina, 3 yükseklik, 2 mesnet koşulu



Şekil 24.Sta4cad Programında Modellenen 5 Kath İzolatörsüz Yapının 3d Görünüşü



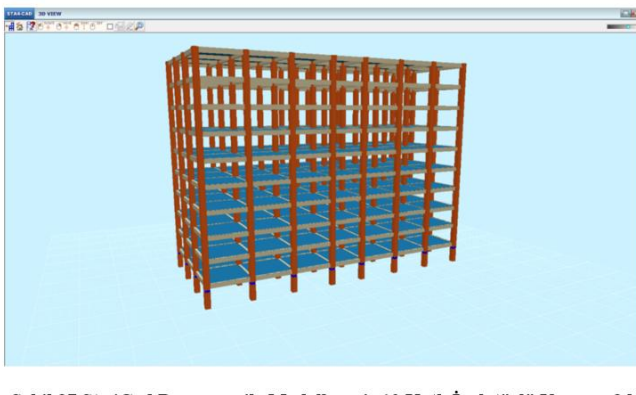
Şekil 32.Sta4Cad Programı ile 10 Kath İzolatörsüz Yapının 3d Modellenmiş Görünüşü



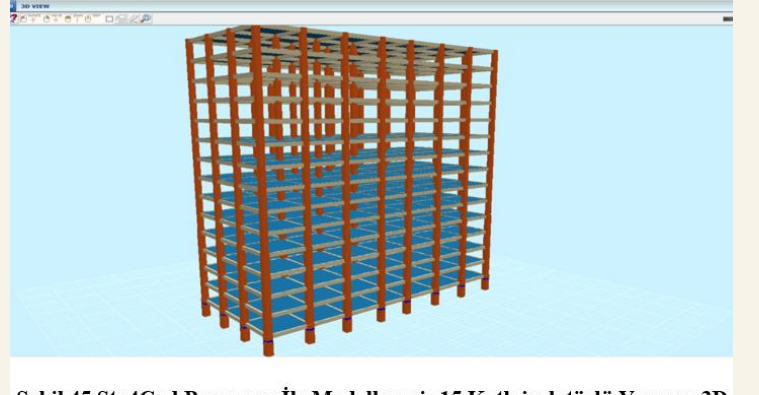
Şekil 40.Sta4Cad Programı İle Modellenmiş 15 Kath İzolatörsüz Yapının 3d Modellenmiş Görünüşü



Şekil 29.5 Kath İzolatörlü Yapının Modellenmiş 3d Görünüşü



Şekil 37.Sta4Cad Programı ile Modellenmiş 10 Kath İzolatörlü Yapının 3d Görünüşü



Şekil 45.Sta4Cad Programı İle Modellenmiş 15 Kath izolatörlü Yapının 3D Modellenmiş Görünüşü

Kaynak: Bulut & Sak, 10. Uluslararası Avrupa Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Kongresi; Sta4Cad v14.1 (2024); TBDY 2018.

Yapı ve maliyet verileri: konut tipolojisi, güncel birim fiyatlar

Taşıyıcı sistem ve malzeme

Kullanım	Konut (tip mimari)
Aks düzeni — X	6 açıklık / 7 aks + 5 açıklık / 1 aks
Aks düzeni — Y	6 açıklık / 4 aks
Kat yüksekliği	3,20 m
Kolon	70×70 ve 60×60 cm
Kiriş / döşeme	30×60 cm / 20 cm
Malzeme	C30 beton, B420C donatı
Zati ağırlık	25 kN/m ³

Yükler

Kaplama (konut)	Kaplama (çatı)	Dış/iç duvar	Hareketli yük
2,50 kN/m ²	5,0 kN/m ²	9,22 kN/m	2,0 kN/m ²

Birim fiyatlar ve fiyat düzeltmeleri

Kalem	Birim fiyat
C30/37 hazır beton	₺2.200/m ³
Kalıp	₺728/m ²
Demir 8–12 mm	₺20.250/ton
Demir 14–50 mm	₺20.083/ton

Fiyatlara +%10 nakliye, +%20 KDV ve 5 aylık dönem için aylık +%1 artış uygulanmıştır. İzolatör bedeli: 36 adet × 6.000 USD × 32,40 TL/USD.

Demir ortalama ~₺20.000/ton kabulüyle metraj farkları doğrudan maliyete çevrilmiştir.

Kaynak: Bulut & Sak, 10. Uluslararası Avrupa Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Kongresi; TS-500; TBDY 2018.

Metraj sonuçları: izolatörlü yapıda demir azalıyor

Altı senaryonun metraj karşılaştırması

Öge	5K İzolatörlü	5K İzolatörsüz	10K İzolatörlü	10K İzolatörsüz	15K İzolatörlü	15K İzolatörsüz
Kalıp (m ²)	6.237,4	6.237,4	12.501,2	12.497,9	18.969,0	19.054,1
Beton (m ³)	1.155,9	1.155,9	2.316,4	2.320,6	3.563,6	3.720,6
Demir (ton)	139,8	148,5	268,4	293,8	411,3	467,1

−%5,86

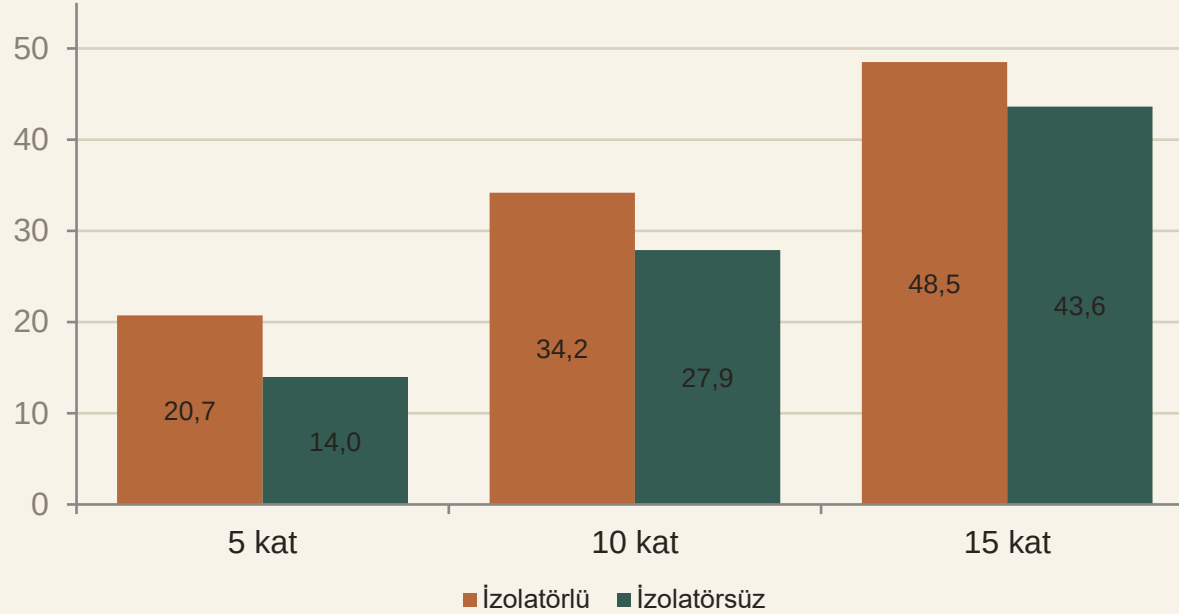
5 katlı binada izolatörlü modelin demir metrajındaki azalma (148,5 t yerine 139,8 t). Kat arttıkça fark büyüyor: 15 katta 55,8 ton daha az demir.

Neden azalıyor? İzolatör, taban kesme kuvvetini ve devrilme momentini düşürdüğü için kolon ve kirişler daha küçük iç kuvvetlere göre donatılıyor. Kalıp ve beton metrajı neredeyse sabit kalırken tasarruf demirde toplanıyor — ve bu tasarruf, izolatör maliyetini kısmen amorti ediyor.

Kaynak: Bulut & Sak, 10. Uluslararası Avrupa Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Kongresi (Sta4Cad v14.1 metraj çıktıları).

Maliyet karşılaştırması: izolatör hariç izolatörlü yapı daha ucuz

Toplam maliyet, izolatör dahil (milyon ₺)



İzolatör maliyeti her senaryoda sabit: $36 \text{ adet} \times 6.000 \text{ USD} \times 32,40 \text{ TL/USD} = \text{₺}6.998.400 + \text{KDV}$. Farkın tamamı bu sabit kalemdedir.

Kaynak: Bulut & Sak, 10. Uluslararası Avrupa Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Kongresi.

Maliyet tablosu (₺)

Kalem	5 kat	10 kat	15 kat
Yapı (izolatör hariç), izolatörlü	13.732.013	27.189.329	41.515.242
Yapı (izolatör hariç), izolatörsüz	13.973.650	27.904.488	43.636.657
Tasarruf (izolatör hariç)	−%1,73	−%2,56	−%4,86
Toplam, izolatörlü	20.730.413	34.187.729	48.513.642
Toplam, izolatörsüz	13.973.650	27.904.488	43.636.657

Demir tasarrufu sayesinde izolatörlü yapının **kaba inşaat maliyeti her katta daha düşük**; farkı yaratan tek kalem izolatör bedeli.

Kat arttıkça izolatörün maliyet yükü eriyor: %48 → %22 → %11

+%48,35

5 kat: izolatör dahil maliyet farkı — az katlıda ekonomik değil

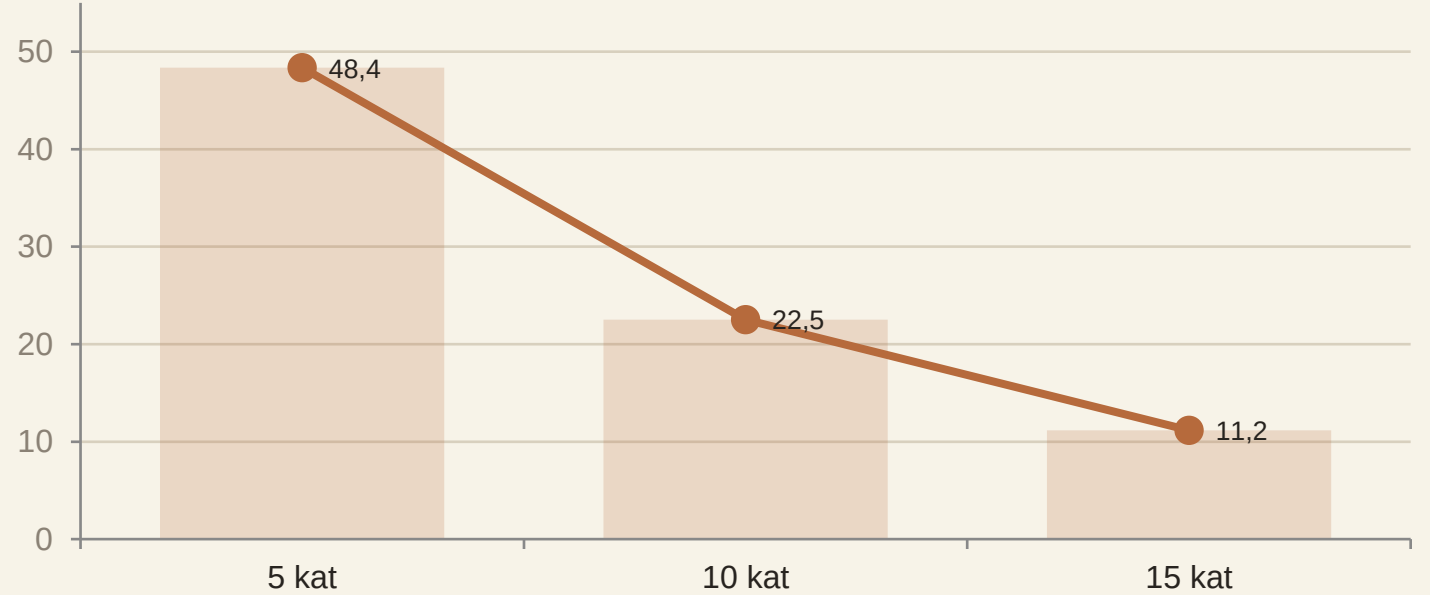
+%22,52

10 kat: fark yarıya iniyor

+%11,18

15 kat: çok katlıda kabul edilebilir düzey

İzolatör dahil maliyet farkı, kat sayısına göre (%)



Yorum: İzolatör bedeli sabit, yapı maliyeti katla büyüyor; bu yüzden görece yük kat arttıkça dramatik biçimde eriyor. Az katlı yapıda izolatör ekonomik değil; çok katlıda maliyet cezası %11'lere iniyor.

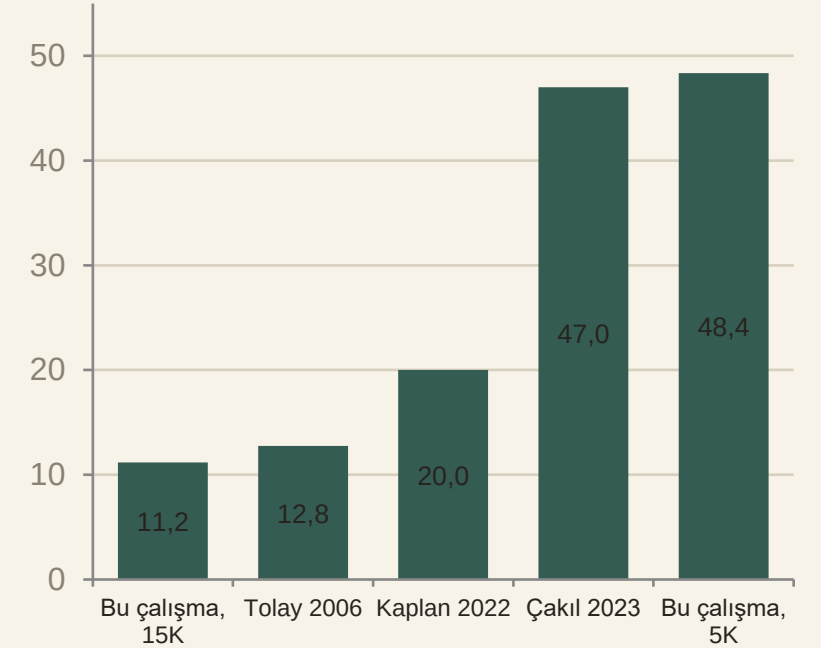
Literatürle uyum: maliyet etkisi %12–%47 bandında

Çalışma	Bulgu
Tolay (2006)	İzolasyonun maliyet etkisi toplam yapı maliyetinin %12,76'sı
Kaplan (2022)	TOKİ perdeli yapı vs taban izolasyonlu (ETABS, TBDY 2018 zaman tanım alanı): ankastre mesnetli yapı %20 daha az maliyetli
Çakıl (2023)	Dubleks bina, 11 yapay deprem: izolasyonluda ötelenme ve kesme azaldı; ankastre %47 daha ucuz; çok katlıda izolasyon önerildi
Türk (2019)	Hastane; 6/12/18 kat × 3 mesnet = 9 SAP2000 modeli: izolasyonluda moment yükü daha az
Baki (2015)	3 katlı BA bina: izolasyonluda kat kesme kuvvetleri daha az

Bulgular **kat sayısına ve taşıyıcı sistem tipine** güçlü biçimde bağımlı — tek bir "izolasyon maliyeti" yüzdesi yok.

Kaynak: Bulut & Sak derlemesi; Tolay (2006); Kaplan (2022); Çakıl (2023); Türk (2019); Baki (2015) — YÖK Ulusal Tez Merkezi.

Maliyet etkisi karşılaştırması (%)



Bu çalışmanın %11,18–%48,35 aralığı, literatürdeki %12,76–%47 bandıyla örtüşüyor.

Düşük maliyetli alternatif: Geoteknik Sismik İzolasyon (GSİ)

İzolatör cihazları yerine temel altına serilen **bitümlü sönümleyici geomateryaller** ile izolasyon sağlanması fikri, Kuvat'ın (2019) doktora çalışmasında sistematik olarak incelendi. Amaç, izolasyonu cihaz maliyeti olmadan, zemin tabakasının kendisiyle üretmek.

Çalışmada maksimum sönüm, **%10 oranında 160/220 penetrasyonlu bitüm** içeren karışımla elde edildi.

Neden önemli? Kurşun çekirdekli izolatörün sabit bedeli az katlı konutta ekonomiyi bozuyordu (Bkz. s. 54). GSİ, cihazsız ve düşük maliyetli bir tabaka çözümü sunduğu için özellikle **konut tipolojisinde yaygınlaşma potansiyeli** taşıyor — izolasyonun "lüks" olmaktan çıkmasının bir yolu da bu.

%65

Çatı ivmelerinde GSİ ile sağlanan azalma — varan üst sınır

%10 · 160/220

Maksimum sönümü veren bitüm oranı ve penetrasyon sınıfı

Kuvat (2019, doktora tezi): bitümlü sönümleyici geomateryallerle geoteknik sismik izolasyon; konutlarda yaygınlaşma potansiyeli yüksek, düşük maliyetli bir alternatif.

Kaynak: Kuvat (2019, doktora tezi); Bulut & Sak, 10. Uluslararası Avrupa Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Kongresi derlemesi.

Tasarım önerisi: izolatörü optimum kapasitede kullan

Bu çalışmanın ana önerisi: izolatörün taşıyabileceği optimum (maksimum) bina yüksekliği belirlenerek proje oluşturulmalı. İzolatör bedeli sabit olduğundan, kapasite tam kullanıldığında ek maliyet minimuma iner — 15 katlı senaryodaki +%11,18'lik fark bu prensibin sayısal kanıtı.

Uygulama koşulları (Ürkmezyel 2023)

Fayda-maliyet analizi izolasyonun yüksek fayda sağladığını gösteriyor; ancak iki şart var: uzman ekiplerce uygulama ve düzenli bakım. Çalışma, yaygınlaşma için devlet teşviki öneriyor.

Vizyon

Depreme dirençli yapı stoğu için izolasyonun kamu yapılarından konuta yaygınlaşması — doğru yükseklik, doğru tip, doğru uygulama.

Kaynak: Bulut & Sak, 10. Uluslararası Avrupa Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Kongresi; Ürkmezyel (2023); Kuvat (2019).

Bölüm özeti — sayılarla

−%5,86

5 katta demir metrajı tasarrufu

+%11,18

15 katta izolatör dahil maliyet farkı

%65

GSİ ile çatı ivmesinde azalma (Kuvat 2019)

Sonuç: izolasyon lüks değil; doğru yükseklikte tasarlanırsa ekonomik bir zorunluluk.

05

Hasar Tanılamasında İstatistiki Değerlendirme Yöntemlerinin Zaman-Frekans Ortamında İrdelenmesi

Bir binanın hasarını, deprem öncesi ölçümü olmadan, sinyallerden okuyabilir miyiz?

Fourier'in sınırları · Dalgacık dönüşümü · Hilbert-Huang dönüşümü · Yapı klonlama · İstatistiksel otomasyon · Erken uyarı

Kaynak: Sak, Ö.F. & Beyen, K. (2019), 5. International Conference on Earthquake Engineering and Seismology (5ICEES), ODTÜ, Ankara

Sensör devrimi: üç ivmeölçerden tek yapıda yüzlerce sensöre

Yapı Sağlığı İzleme (YSİ) sistemleri, yapıya yerleştirilen sensör ağlarından gelen kayıtları işleyerek hasarı bir **anomali tespiti** problemi olarak ele alır: yapının "sağlıklı" davranışından sapma, hasarın işaretidir.

Sensör ve veri toplama maliyetlerindeki düşüş, bu yaklaşımı araştırma laboratuvarından gerçek yapılara taşıdı; izleme artık köprülerden konutlara kadar yaygınlaşıyor.

Deneyisel modal analizin yolculuğu: Titreşim ölçümüne dayalı tanı yöntemleri önce uçak ve uzay yapılarında olgunlaştı; Beyen (2015) bu birikimin inşaat yapılarına geçişini ve aynı 6 katlı yapıda frekans, zaman ve zaman-frekans alanında hasar tanılamayı ortaya koydu.

Bu bölümdeki çalışma, YSİ mantığını bir adım öteye taşır: deprem öncesi ölçümü olmayan yapılar için referans, **yapı klonlama** ile analitik olarak üretilir.

3

30 yıl önce bir yapıyı izlemek için yeterli görülen tipik ivmeölçer sayısı

100'lerce

Bugün tek bir yapıya yerleştirilebilen sensör sayısı — maliyet düşüşüyle mümkün

Neden şimdi? Ucuz ivmeölçerler, kablosuz ağlar ve bulut tabanlı veri işleme, sürekli izlemeyi ekonomik kıldı; yapı artık "konuşan" bir varlık.

Kaynak: Sak, Ö.F. & Beyen, K. (2019), 5ICEES, ODTÜ; Beyen, K. (2015), 3. TDMSK ve 5. Uluslararası Deprem Sempozyumu, Kocaeli.

Deprem sinyali durağan değildir; Fourier dönüşümü tek başına yetmez

Deprem kayıtları **durağan (stasyoneryer)** değildir ve yapının hasarlı tepkisi **doğrusal değildir**: frekans içeriği sarsıntı boyunca sürekli değişir.

Fourier dönüşümü yalnızca durağan sinyaller için anlamlıdır; deprem hareketinin zaman-frekans enerji dağılımını yakalayamaz (Zhang vd. 2003, ASCE J. Eng. Mech.).

Frekansı zamana göre değişen sinyalleri Fourier ayrıştırıramaz — "hangi frekans, hangi anda?" sorusu cevapsız kalır.

Çözüm: zaman-frekans yöntemleri. Dalgacık (Wavelet) dönüşümü ve Hilbert-Huang dönüşümü, sinyali zaman ve frekans ekseninde birlikte çözümleyerek hasarın bıraktığı geçici izleri görünür kılar.

Durağan sinyal — sabit frekans, sabit genlik



Fourier spektrumu bu sinyali doğru tanımlar

Durağan olmayan deprem sinyali — frekans ve genlik zamana bağlı



Fourier bu sinyalde zaman bilgisini kaybeder

Kaynak: Sak, Ö.F. & Beyen, K. (2019), 5ICEES, ODTÜ; Zhang, Ma, Safak & Hartzell (2003), ASCE Journal of Engineering Mechanics. Şemalar temsildir.

Dalgacık dönüşümü: değişken çözünürlüklü bir mercek

Dalgacık (wavelet): sınırlı süreli; ortalaması, başlangıç ve bitiş değeri sıfır olan dalga formlarıdır. Sinyal, bu dalgacıkların ölçeklenmiş ve ötelenmiş kopyalarıyla çözümlenir.

Çözünürlük değişkendir: **düşük frekansta iyi frekans, yüksek frekansta iyi zaman** çözünürlüğü — tam da deprem sinyalinin gereksindiği mercek.

Dalgacık türleri: Grossman-Morlet (sürekli dönüşümde), Daubechies (ortogonal), biortogonal dalgacıklar.

Kalooop & Hu (2016): hasar tespitinde ayrık dalgacık yöntemi (DB10) daha uygun bulunmuştur.

Zaman-frekans döşemesi (şematik)



Kaynak: Sak, Ö.F. & Beyen, K. (2019), 5ICEES, ODTÜ; Kalooop & Hu (2016).

Sürekli dalgacık dönüşümü (CWT)

$$CWT(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt$$

DWT — ayrık dalgacık dönüşümü

Detay seviyelerindeki ani değişimler (sıçramalar), hasarın **gerçekleştiği** anı işaretler.

CWT — sürekli dalgacık dönüşümü

Zaman-frekans haritası (skalogram) üzerinde doğal frekansların **kayması** izlenir.

İki yaklaşım birbirini tamamlar: DWT hasar anını, CWT frekans kaymasını yakalar.

Hilbert-Huang dönüşümü: taban fonksiyonsuz, veriye uyarlanan analiz

1998

Norden E. Huang tarafından önerilen adaptif ampirik yöntem

HHD, Fourier ve dalgacığın aksine **önceden tanımlı taban fonksiyonu gerektirmez**; ayrıştırma bizzat veriden türetilir. Bu yüzden durağan olmayan ve doğrusal olmayan sinyallere doğal olarak uyarlanır.

İki bileşenli işlem zinciri

EMD — Ampirik Mod Ayrıştırma: sinyal IMF'lere ayrıştırılır



Hilbert spektral analizi — her IMF'ye uygulanır

Anlık büyüklükler (x: IMF, y: Hilbert dönüşümü)

$$\text{Anlık genlik: } a(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)}$$

$$\text{Anlık faz: } \theta(t) = \arctan\left(\frac{y(t)}{x(t)}\right)$$

$$\text{Anlık frekans: } \omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}$$

Lin vd. (2005): HHD, benchmark binada hasarın konumunu ve mertebesini tutarlı biçimde belirledi.

Jha vd. (2005, Stanford Üniversitesi): IMF formlarındaki süreksizlikler hasarın varlığını ve konumunu izliyor.

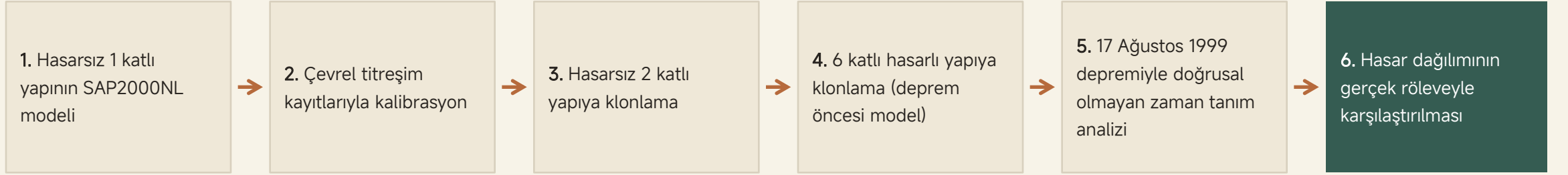
Peng vd. (2005): geliştirilmiş HHD, CWT'den daha iyi çözünürlük sağlıyor.

Öngörü: HHD tabanlı akıllı sinyal işleme sistemleri, geleceğin otomatik hasar tanı altyapısı olacak.

Kaynak: Sak, Ö.F. & Beyen, K. (2019), 5ICEES, ODTÜ; Lin vd. (2005), Smart Mater. Struct. 14; Jha vd. (2005), IWSHM, Stanford; Peng vd. (2005), MSSP 19.

Yapı klonlama: deprem öncesi referans analitik olarak kurulabilir

Deprem öncesi ölçümü olmayan 6 katlı hasarlı yapının referans modeli, aynı site içindeki **hasarsız 1 ve 2 katlı benzer yapıların** karakteristiklerinden "yapı klonlama" ile üretildi; modal parametreler referans alındı.



Klonlama zinciri: küçük hasarsız yapılardan büyük hasarlı yapının deprem öncesi davranışına

Neden klonlama? Hasar tespitinin klasik yolu, yapının hasarsız halini bilmeyi gerektirir; oysa çoğu binada deprem öncesi ölçüm yoktur. Klonlama, planda benzer hasarsız yapıların statik ve dinamik parametrelerini büyüterek bu boşluğu analitik olarak doldurur.

Referans ne? Kalibre edilmiş modelin modal parametreleri (doğal periyotlar, frekanslar, modal şekiller) "hasarsız parmak izi" olarak saklanır; deprem sonrası kayıtlar bu parmak iziyle karşılaştırılarak hasar okunur.

Kaynak: Sak, Ö.F. & Beyen, K. (2019), "Hasar Tanılamasında İstatistiki Değerlendirme Yöntemlerinin Zaman-Frekans Ortamında İrdelenmesi", 5ICEES, 8–11 Ekim 2019, ODTÜ, Ankara.

Vaka: Gölcük'te 6 katlı betonarme bina — 1999'da orta düzey hasar



Şematik kesit — hasar bölgeleri renkli

Yapı özellikleri

- 6 katlı betonarme karkas; site içinde planda benzer hasarsız 1 ve 2 katlı yapılar mevcut
- Kolon 60/30 cm · Kiriş 25/50 cm · Kat yüksekliği 3 m
- Beton C20 · Donatı St420
- 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde **orta düzey hasar**

Neden ideal bir vaka?

Aynı site içinde hasarsız 1 ve 2 katlı "kardeş" yapıların bulunması, klonlama yöntemi için doğal bir laboratuvar sağladı: küçük yapıların ölçülen dinamik karakteristikleri, hasarlı 6 katlı binanın deprem öncesi modelinin referansı oldu.

Hasar rölevesi bilindiğinden, analitik hasar dağılımı gerçekte birebir sınanabildi.

Kaynak: Sak, Ö.F. & Beyen, K. (2019), 5ICEES, ODTÜ.

Kalibre edilen model, gerçek hasar rölevesiyle uyumlu

Klonlanan modelde elastisite modülü (E), atalet momenti (I) ve birim hacim ağırlık güncellenerek ölçülen çevrel titreşim davranışıyla benzeşim artırıldı.

Kalibrasyon ölçütü: modal şekiller arası korelasyon ve hata matrisinin minimizasyonu.

Kalibre edilmiş modal parametreler

Mod	Periyot T (s)	Frekans f (Hz)
Mod 1	1,219	0,820
Mod 2 (Y)	1,157	0,864
Mod 3 (X)	1,088	0,919

Bu parametreler, yapının "hasarsız parmak izi" olarak referans alındı.

Doğrulama: analitik hasar = gerçek röleve

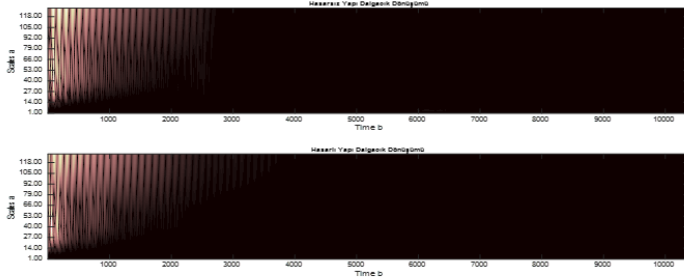
Modele 17 Ağustos 1999 Kocaeli deprem kayıtları zaman tanım alanında (doğrusal olmayan) uygulandı; elde edilen hasar dağılımı — zemin kat mafsallaşması, alt kat çatlakları, üst katlarda hasarsızlık — **gerçek hasar rölevesiyle uyumlu** çıktı.

Kritik sonuç: Model röleveyi doğruladığına göre, modelin ürettiği deprem öncesi/sonrası mikrotremor kayıtları, hasar tespiti algoritmaları için **güvenilir veri** olarak kullanılabilir.

Kaynak: Sak, Ö.F. & Beyen, K. (2019), 5ICEES, ODTÜ; analizler SAP2000NL (2018) ile.

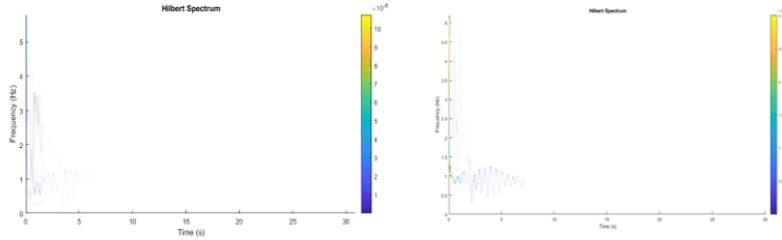
Hasarın izi zaman-frekans ortamında okunabiliyor

Hasarlı ve hasarsız model kayıtları Fourier, dalgacık ve HHD ile karşılaştırıldı; farklar en net biçimde zaman-frekans ortamında belirdi.



Şekil 9. Hasarlı (altta) ve hasarsız (üstte) yapıların dalgacık dönüşümleri

Şekil 9.'da görülebileceği üzere hasarlı ve hasarsız yapıda grafiksel olarak şiddet farklarına rastlanmaktadır.



Şekil 10. Hasarlı (solda) ve hasarsız (sağda) yapıların Hilbert Huang dönüşümleri

Şekil 10.'da hasarlı ve hasarsız yapıda frekans mertebeleri zamana bağlı olarak değişmektedir. Bu grafiklerden yapı hasar oluşumu hakkında karar verici bir mekanizma oluşturmak için istatistiksel yöntemler kullanılacaktır.

Üç hasar imzası

- 1 Zamanla değişen frekans içeriği — HHD'de frekans muhteviyatının deprem boyunca evrilmesi
- 2 Bölgesel enerji yoğunlaşmaları — zaman-frekans haritasında hasara özgü odaklar
- 3 Dalgacık katsayı farkları — hasarlı/hasarsız dönüşümler arasında grafiksel şiddet farkları

Fourier karşılaştırması yalnızca ortalama spektral farkı gösterir; dalgacık ve HHD ise **hasarın ne zaman ve hangi frekansta iz bıraktığını** ayırıştırır.

İstatistiksel otomasyon: iki bağımsız tespit kanalı

Yöntem 1 — Dalgacık + korelasyon

Dalgacık katsayılarına periyot karşılıklarında istatistiksel korelasyon



Korelasyonun eşik (sınır) değerle karşılaştırılması



Kat bazında uyarı veren karar programı (ara yüz)

Girdi: yapı kayıtlarının dalgacık katsayıları; çıktı: hangi katta anomali olduğunu gösteren otomatik uyarı.

Yöntem 2 — HHD + Fourier + çapraz korelasyon

HHD ile sinyalin IMF'lere ayrıştırılması (EMD)



IMF'lerin Fourier dönüşümüyle frekans alanına taşınması



Çapraz korelasyon otomasyonu ile kat bazında hasar tespiti

İki kanal birbirinden bağımsız veri yolları kullandığından, sonuçlar çapraz doğrulanabilir.

Literatürden destek: Ghazi & Büyüköztürk (2015) enerji tabanlı hasar endeksleri + HHD ile ham sinyali tek girdi olarak kullandı; Wang vd. (2016) MWPER göstergesinin küçük hasarlarda daha duyarlı olduğunu gösterdi.

Kaynak: Sak, Ö.F. & Beyen, K. (2019), 5ICEES, ODTÜ; Ghazi & Büyüköztürk (2015); Wang vd. (2016).

Kat bazında otomatik uyarı: akıllı bina altyapısının çekirdeği

Karar programı ara yüzü (kavramsal)



Korelasyon değeri belirlenen sınırın altına düşen kat için program otomatik uyarı üretir.

Karar programı ara yüzü: Dalgacık katsayılarının periyot karşılıklarındaki korelasyonu izlenir; değer belirli bir sınırın altına indiğinde ilgili kat için uyarı verilir — yorum, mühendisin grafik okumasına değil, otomatik eşik mantığına dayanır.

Akıllı binalarda kat bazında tespit: Xu vd. (2005) modal parametrelerle deprem sonrası durum tespitini gösterdi; bu çalışma aynı mantığı sensör ağı + otomatik karar programıyla bina ölçeğine indiriyor.

Gizli hasarda tamamlayıcı kullanım: Gözle görülmeyen hasarda dalgacık ve HHD birbirini tamamlayıcı biçimde birlikte kullanılmalı — biri hasar anını, diğeri anlık frekans kaymasını yakalar.

Kaynak: Sak, Ö.F. & Beyen, K. (2019), 5ICEES, ODTÜ; Xu vd. (2005).

Yönetmeliğe öneri: anlık izlemeye dayalı hasar ve performans ölçeği

Çalışmanın somut önerisi: güncellenen TBDY'ye veya Yüksek Binalar Deprem Yönetmeliği'ne, yapı parametrelerinin anlık izlenmesine dayalı **hasar ölçeği / performans ölçeği** tanımlamaları eklenebilir.

Böylece yapısal performans, şekil değiştirmenin yanı sıra **frekans değişimleriyle** de belirlenebilir hale gelir.

Erken uyarı vizyonu

Her yapı türü için kritik performans seviyeleri analitik modelden tespit edilip sahadan anlık izlenirse, deprem sırasında ve sonrasında **erken uyarı sistemleri** geliştirilebilir.

Frekans kayması eşiğe ulaştığında sistem, tahliye ve kullanım kararları için nesnel bir veri tabanı sunar.

Önerilen karar zinciri

1. Yapı parametrelerinin sensör ağıyla anlık izlenmesi



2. Frekans değişimlerinin hasar/performans ölçeğiyle yorumlanması



3. Yapı türüne özgü kritik performans seviyeleriyle karşılaştırma



4. Erken uyarı: otomatik hasar ve kullanılabilirlik bildirimi

Türkiye'de SHM: köprüden tünele canlı izleme

Yapı Sağlığı İzleme (SHM/YSİ), Türkiye'nin en kritik altyapılarında artık çalışan bir sistem — araştırma konusu olmaktan çıkıp işletme aracına dönüştü.

Yavuz Sultan Selim Köprüsü: rüzgar, sıcaklık ve titreşim sürekli izleniyor; asma köprünün davranışı gerçek zamanlı kayıt altında.

Avrasya Tüneli: deprem, su baskını ve zemin hareketi izleme sistemleriyle deniz altı geçişi kesintisiz gözetimde.

İstanbul Havalimanı terminali: mega ölçekli yapıda izleme altyapısı işletme ve güvenlik kararlarına veri sağlıyor.

Uluslararası emsaller: Golden Gate Köprüsü izleme sistemi; ABD'de FHWA ve NIST raporlarıyla kurumsallaşan SHM kılavuzları.

Kaynak: Seminer malzemesi M7 — güncel konular, SHM bölümü; Sak & Beyen (2019), SICEES, ODTÜ.

saatler →
dakikalar

SHM, deprem sonrası "bu yapı güvenli mi?" kararını saatler süren keşiften dakikalara indiriyor.

Öneri: Kritik kamu yapılarında — hastaneler, köprüler, tüneller, enerji tesisleri — SHM altyapısının standartlaştırılması ve izleme verilerinin karar süreçlerine bağlanması.

Bölüm 5'teki hasar tanılama yöntemleri, bu canlı veri akışının analiz motorudur.

06

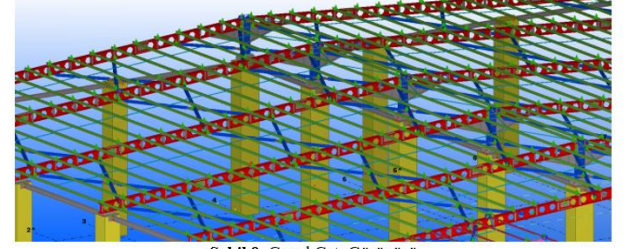
Çelik Proje Tasarımında Birleşim Detaylarının İç Kuvvetlere ve Ekonomikliğe Etkisi

Bir cıvata detayı, tüm binanın iç kuvvetlerini değiştirebilir mi?

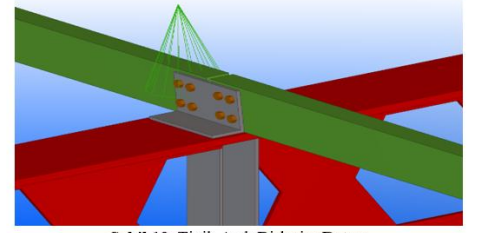
Elastik ankastre · Aşık detayı · TBDY plastik dönme · SEY doğrulama · Ekonomi

Kaynak: Yüzbaşıoğlu & Sak, International Texas Congress on Advanced Scientific Research

YÜZBAŞIOĞLU & SAK



Şekil 9. Genel Çatı Görünüşü



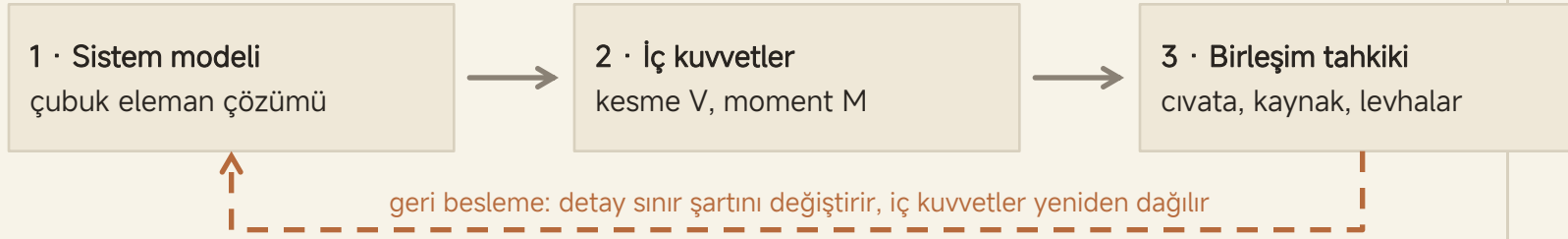
Şekil 10. Tipik Aşık Birleşim Detayı

Birleşim detayı bir sınır şartıdır — ve sınır şartı iç kuvveti belirler

Geleneksel tasarım akışı **tek yönlüdür**: sistem çubuk elemanlarla çözülür, iç kuvvetler bulunur, birleşimler bu iç kuvvetlere göre tahkik edilir. Oysa birleşim detayı bir sınır şartıdır; detay değişince sınır şartı, sınır şartı değişince iç kuvvetler de **geriye dönük** değişir.

Türev zinciri: $q(x) \rightarrow V(x) \rightarrow M(x) \rightarrow \kappa(x) = M/EI$

$EI v^{(4)}(x) = q(x)$ denkleminin integrasyon sabitleri C_1 – C_4 yalnızca sınır şartlarından gelir; yükten değil.



Birleşim detayı = sınır şartı = iç kuvvet

Araştırma boşluğu: Sonlu elemanlar (SEY) çalışmaları — Sucharda vd. (2015), Šabatka vd. (2015), Yılmaz (2015) — çoğunlukla nokta detayı üzerinedir.

Birleşimin sistemin iç kuvvetlerine geri besleme etkisi az incelenmiştir; ana problem sınır şartlarının yanlış seçilmesidir.

Kaynak: Yüzbaşıoğlu & Sak, International Texas Congress on Advanced Scientific Research; Sucharda vd. (2015); Šabatka vd. (2015); Yılmaz (2015, YTÜ).

Elastik ankastre: basit ve ankastre arasındaki gerçek dünya

Klasik ikili — basit mesnet ya da ankastre — gerçek detayları temsil etmez. Korniyer + cıvata gibi gerçek birleşimler kısmen moment alır; buna **kısmi rijitlik (elastik ankastre)** denir.

AISC ve Eurocode birleşim rijitliğini sınıflandırır; TBDY 2018 de şekil değiştirme esaslı yaklaşımıyla aynı yönü işaret eder.

Sınır şartı	Basit mesnet	Ankastre
Moment	$M = 0$	aktarılır
Dönme	serbest	0
Sehim	0	0

Sorun: Güvenli tarafta kalmak adına yapılan basit mesnet varsayımı, gerçekte moment alan detaylarda **ekonomik olmayan kesitlere** yol açar.

Kaynak: Yüzbaşıoğlu & Sak, International Texas Congress on Advanced Scientific Research; TBDY (2018, AFAD); AISC; Eurocode.

Klasik ikiliden rijitlik spektrumuna



AISC — birleşim rijitliği sınıflandırması: basit, kısmi rijit, rijit.

Eurocode — yarı rijit birleşim modeli: dönme rijitliği analize doğrudan girer.

TBDY 2018 — şekil değiştirme ve dönme sınırlarıyla birleşim davranışını performans hedefine bağlar.

Aşık detayı: sanayi yapılarında metrajın %15–20'si burada

%15–20

Sanayi yapılarında aşıkların genel metraj içindeki payı

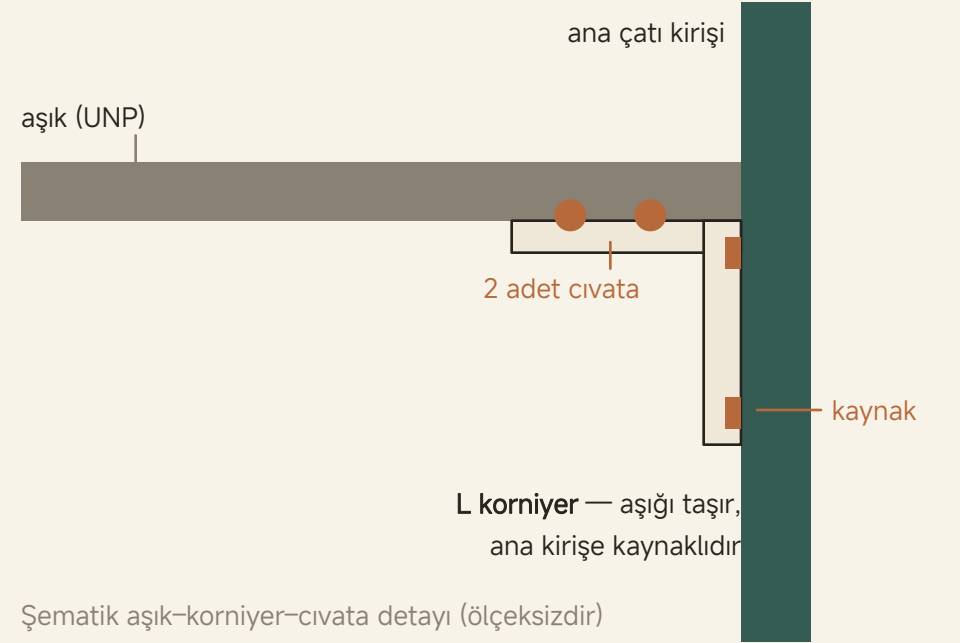
Pek çok proje mühendisi aşık mesnetlerini **basit mesnet** kabul eder. Oysa korniyer + cıvata detayı elastik mesnet niteliğindedir ve kısmen moment alır.

Sonuç: güvenli tarafta kalınır ama **ekonomik olmayan kesitler** seçilir — metrajın beşte biri bu varsayım ile boyutlanır.

Detay tanımı:

- Aşık, L korniyere cıvatalarla sabitlenir; korniyer ana kirişe kaynaklıdır.
- Bu detayda mesnet dönmesi tamamen serbest **olamaz**.
- Süreklilik levhası mütemadilik sağlar ama çatı kaplamasıyla çakıştığı için tercih edilmez.

Kaynak: Yüzbaşıoğlu & Sak, International Texas Congress on Advanced Scientific Research.



Şematik aşık-korniyer-cıvata detayı (ölçeksizdir)

Neden mütemadi değil? Süreklilik levhası moment aktarımını tam yapar; ancak çatı kaplamasının geçişini engellediği için pratikte tercih edilmez.

TBDY 2018: birleşim ve plastik dönme hesabında YDKT şart

TBDY 2018, çelik elemanlar için **şekil değiştirme ve dönme sınırları** getirmiştir; sınırlar eleman türüne göre üç tabloda verilir.

TBDY 2018 tablosu	Kapsam
Tablo 5C.1	çelik kirişler
Tablo 5C.2	çelik kolonlar
Tablo 5C.3	kolon-kiriş birleşim bölgesi

Kritik nüans — iki tasarım yaklaşımı:

- Genel kesit hesabında **GKT**'ye izin verilir.
- Birleşim ve plastik dönme hesabında **YDKT şarttır**.

Yani kesit yeterli olsa bile birleşim detayı YDKT ile ayrıca tahkik edilmelidir.

Plastik dönme kapasitesi

$$\theta = \frac{W_p \cdot F_{ye} \cdot L_b}{6 \cdot E \cdot I_b}$$

W_p : plastik mukavemet momenti · F_{ye} : beklenen akma dayanımı

Deprem hesabına bağlantısı:

- Birleşimleri **elastik kalan** rijit yapıda tek modlu hesap (Tablo 5B.1) yeterlidir.
- Birleşimleri **plastikleşen** yapıda çok modlu analiz ve ikinci mertebe etkileri zorunludur.

Birleşimin davranışı, binanın hangi analiz yöntemiyle çözüleceğini belirler.

Doğrulama: çubuk sistem ile sonlu elemanlar aynı davranışı veriyor

Doğrulama düzeneği: 6 m açıklık, açıklık ortasında 200 kg tekil yük, UNP 80 profili ($I_x = 106 \text{ cm}^4$, $W_x = 26,5 \text{ cm}^3$, $W_p = 32,81 \text{ cm}^3$); analizler SAP2000 ile.

Model	Moment (tm)	Sehim (cm)	Gerilme (kg/cm ²)
Basit mesnet (çubuk)	0,30	4,05	1132
Ankastre (çubuk)	0,15	1,02	—
SEY (dönebilen uç)	—	3,09	950 (S11)

Basit mesnette $M = PL/4 = 0,30 \text{ tm}$; ankastrede açıklık momenti $PL/8 = 0,15 \text{ tm}$. Gerilme: $\sigma = M/W$.

SEY modeli, çubuk çözümün iki ucu arasında kalır: gerçek detay ne tam basit ne tam ankastredir. Çubuk-SEY uyumu **~%15-25 sapma** ile doğrulanmıştır.

Kaynak: Yüzbaşıoğlu & Sak, International Texas Congress on Advanced Scientific Research (SAP2000 analizleri).

1132 kg/cm²

Basit mesnet çubuk çözümde en büyük gerilme ($\sigma = M/W$)

950 kg/cm²

SEY modelinde (dönebilen uç) S11 gerilmesi

%15-25

Çubuk sistem ile SEY sonuçları arasındaki sapma —
doğrulama bandı

Cıvatalı korniyer detayı: gerilme %50, sehim %54, dönme %70 azaldı

Denenen detay: L100.100.10 korniyer + 2 adet Ø12 cıvata (UNP 80 aşık, 6 m açıklık, 200 kg tekil yük)

%50

gerilme azalması (950 → 471 kg/cm²)

%54

sehim azalması (3,09 → 1,43 cm)

%70

mesnet dönmesi azalması (0,015 → 0,0045 rad)

Büyüklik	Dönebilen uç	Cıvatalı korniyer	TBDY sınırı
Sehim	3,09 cm	1,43 cm	—
Gerilme	950 kg/cm ²	471 çekme / 676 basınç	—
Mesnet dönmesi	0,015 rad	0,0045 rad	0,0546 rad

Cıvatalı detayda dönme, TBDY plastik dönme sınırının (0,0546 rad; $F_{ye} = 3600 \text{ kg/cm}^2$, $E = 2.038.902 \text{ kg/cm}^2$) çok altında kalır; davranış ankastreye yaklaşır. Birleşim bölgesinde $S13 = 112 \text{ kg/cm}^2$, von Mises = 1382 kg/cm^2 .

Kritik detay — delik toleransı:

Cıvata delikleri cıvata çapından en fazla 1–2 mm büyük olmalıdır.

Aksi halde boşluk dönme kısıtını yok eder; sistem **basit mesnet davranışına geri döner** ve tüm kazanım kaybolur.

Profil iç plaka kalınlığı da yırtılmaya izin vermeyecek mertebede seçilmelidir.

Kaynak: Yüzbaşıoğlu & Sak, International Texas Congress on Advanced Scientific Research (SAP2000 SEY sonuçları).

Ekonominin ayar düğmeleri detayda: cıvata çapı, adedi ve konumu

Detayın ekonomi üzerindeki beş ayar düğmesi

- 1 · Cıvata çapı — dönme kısıtının ve moment aktarımının ana belirleyicisi.
- 2 · Cıvata adedi — kısıtın sürekliliğini ve güvenlik payını ayarlar.
- 3 · Cıvata konumu — üst başlığa yakın yerleşim moment kolunu büyütür.
- 4 · Profil et kalınlığı — iç plaka yırtılmasına karşı güvence.
- 5 · Ek plaka — yerel rijitliği gereken noktada artırır.

$M = qL^2/8$ ile kesit seçmek çoğu zaman **aşırı konservatiftir**: gerçek detay kısmen moment aldığı için açıklık momenti bu değerin altında kalır.

SEY ile detay tahkiki, tasarım ofislerinin **rutini** olmalıdır; daha ekonomik ve gerçeğe daha yakın çözümler üretir.

Gelecek: birleşim, sistemin sınır şartıdır

Betonarmede donatı çapı ve adedi davranışı nasıl belirliyorsa, çelikte de **kaynak-cıvata adet ve çapı** tüm sistemin sınır şartlarını belirler.

Yazarların sonraki çalışması: modal analizlerde birleşim rijitliklerinin modellenmesi — dinamik karakteristiklerin detay bazlı belirlenmesi.

**Doğru detay = doğru sınır şartı = doğru iç kuvvet
= ekonomik kesit.**

07

Yeşil Binalar: Sertifikadan Mevzuata Dönüşüm

Yeşil bina bir tercih olmaktan çıkıp yasal zorunluluk haline mi geliyor?



Küresel çerçeve · LEED v5 · BREEAM / DGNB · YeS-TR · ÇEDBİK ve Türkiye pazarı · AB Yeşil Mutabakatı ve SKDM

İklim krizinde sektörün payı: enerjinin %32'si, CO₂'nin %34'ü

%32

Küresel nihai enerji tüketiminde bina ve inşaat sektörünün payı

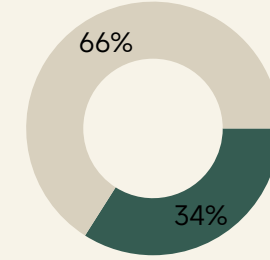
%34

Küresel CO₂ emisyonlarında sektörün payı; yalnızca çimento + çelik tek başına %18

İlk kez ayrışma: 2023'te inşaat faaliyetindeki büyüme, emisyon artışından ilk kez ayrıştı (WorldGBC, 2025) — sektör için tarihî bir dönüm noktası.

Hedef: Paris Anlaşması'nın 1,5°C senaryosu, bina stokunda 2050'ye kadar net sıfırı gerektiriyor; aksi halde bugünkü varlıklar "atıl varlık" (stranded asset) riski taşıyor.

Küresel CO₂ emisyonlarında bina-inşaat payı



■ Bina ve inşaat sektörü ■ Diğer sektörler

Küresel uyum açığı

- Yeni küresel inşaatın **%50'sinden fazlası** enerji performans kodu kapsamında değil
- 2030'a kadar yenileme (retrofit) hızı **3 katına** çıkmalı
- Verimlilik yatırımları 270 → **522 milyar \$**'a yükselmeli
- Gayrimenkul hedefi koyan banka sayısı: 23 (2022) → **43** (2024)

Kaynak: [UNEP & GlobalABC](#), Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025 (Mart 2025); [World Green Building Council](#) (2025).

LEED v5 (Nisan 2025): karbon artık sistemin merkezinde

USGBC, LEED'in beşinci ana sürümünü 28 Nisan 2025'te yayımladı.

Sistem üç etki alanı üzerine kurulu:

- Dekarbonizasyon — karbon azaltımı sistemin ağırlık merkezi
- Yaşam kalitesi — kullanıcı sağlığı ve refahı
- Ekolojik koruma ve onarım

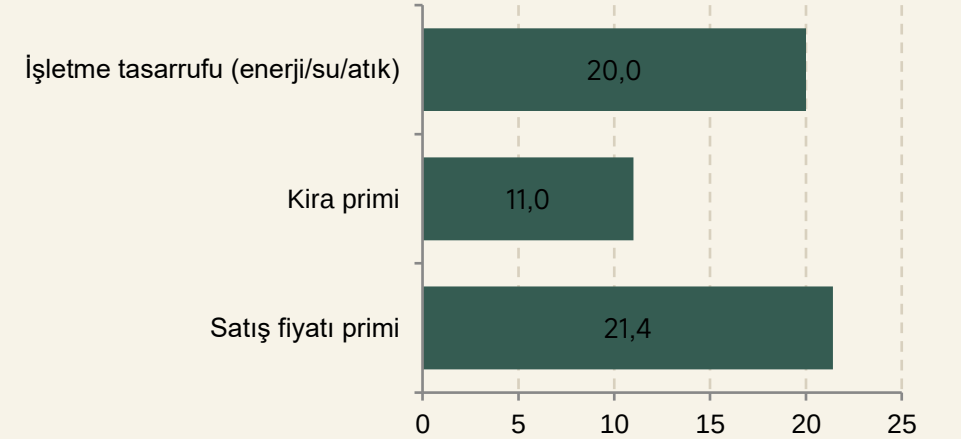
Yeni zorunlu ön koşullar: Her proje için operasyonel karbon projeksiyonu ve 25 yıllık dekarbonizasyon planı şart.

Platin eşiği sertleşti: En üst kademe artık yalnızca **tam elektrikli binalara** açık — fosil yakıtlı sistemlerle Platin alınamıyor.

~%50 / 110 puan

110 puanlık sistemde dekarbonizasyon kredilerinin payı

LEED binalarının ekonomik değeri (%)



Mühendislik açısından anlamı: LEED v5 ile karbon performansı, tasarımın ilk gününden itibaren sayısal bir taahhüde dönüşüyor; sertifika artık yalnızca pazarlama aracı değil, yatırımın finansal getirisini doğrudan etkileyen bir değerlendirme girdisi.

Kaynak: [USGBC — LEED v5](#) (28 Nisan 2025); USGBC yeşil bina ekonomik değer verileri.

BREEAM ve DGNB: Avrupa'nın iki sertifika ekolü

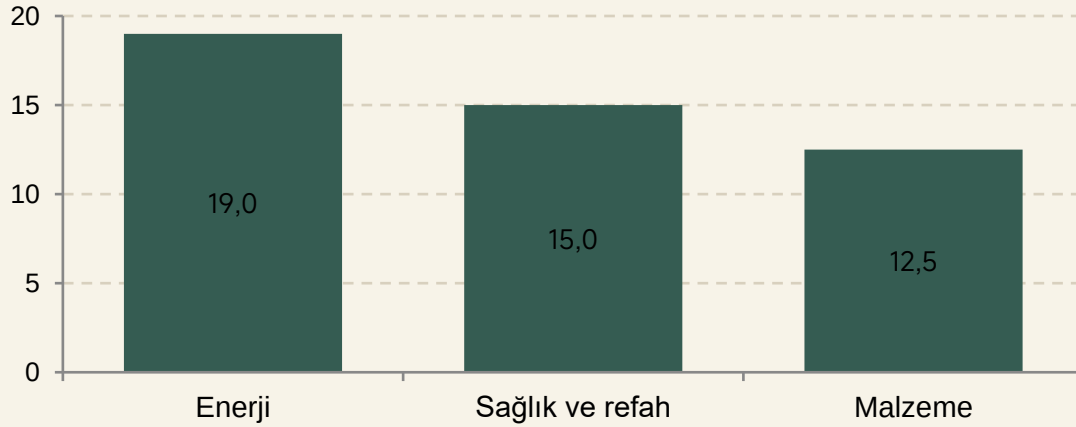
BREEAM — BRE, 1990 · tarihin ilk sistemi

535.000+ bina

85'ten fazla ülkede sertifikalı yapı

Kademeler: Pass ($\geq\%30$) eşiğinden **Outstanding** ($\geq\%85$) düzeyine uzanan derecelendirme ölçeği

Kategori ağırlıkları (%)



DGNB — Almanya · yaşam döngüsü ekolü

6 boyut, dengeli ağırlık:

- Çevresel kalite — %22,5
- Ekonomik kalite — %22,5
- Sosyokültürel ve işlevsel kalite — %22,5
- Teknik kalite — %22,5
- Süreç kalitesi — %10

Zorunlu analizler: Yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) ve toplam sahip olma maliyeti (TCO) hesabı olmadan sertifika verilmiyor.

Bağımsız denetim: Her projede bağımsız DGNB Auditor görev alır; öz değerlendirme kabul edilmez.

Pazar konumu: Almanya'da sertifika pazarının lideri (%54,7–64,4 pay).

Kaynak: [BRE — BREEAM](#); [DGNB — German Sustainable Building Council](#).

YeS-TR: yerli sertifika 2026'dan itibaren kamu binalarında zorunlu

"Binalar ile Yerleşmeler İçin Yeşil Sertifika Yönetmeliği" 12 Haziran 2022 tarihli Resmî Gazete'de (Sayı 31864) yayımlandı. Değerlendirme kuruluştur Türkiye Çevre Ajansı; sistem İTÜ iş birliğiyle geliştirildi.

6 modül: Bütünleşik Tasarım · İç Ortam Kalitesi · Malzeme/Yaşam Döngüsü · Enerji · Su/Atık · İnovasyon — ayrıca 7 zorunlu kriter.

Teşvik: Ulusal yeşil sertifikalı proje teslim eden müteahhitlerin iş deneyim belgelerine **%5 ek puan** (26 Aralık 2024).

İnsan kaynağı: 268 Yeşil Sertifika Uzmanı ve 29 değerlendirme uzmanı yetkilendirildi.

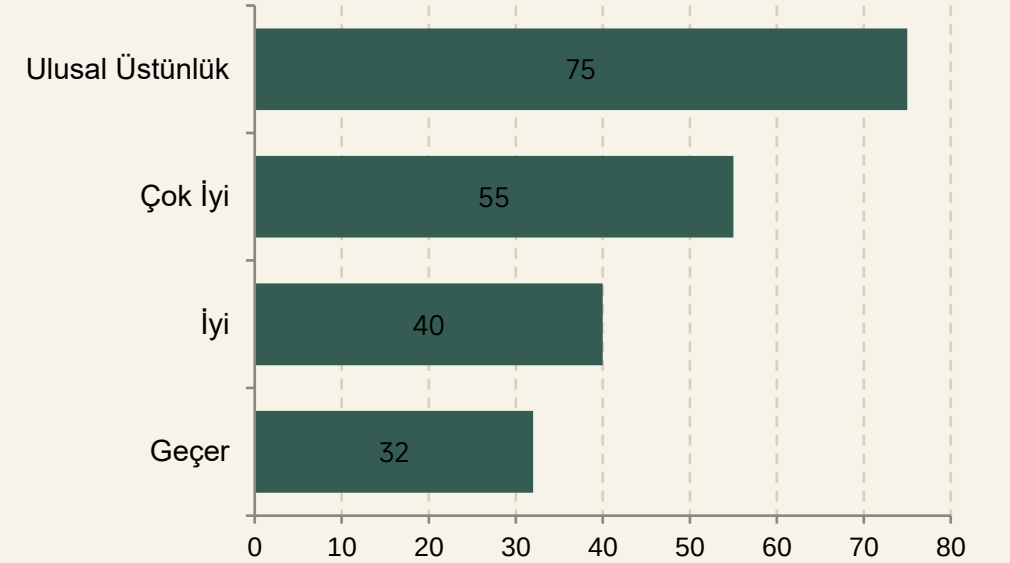
nSEB Yönetmeliği (2025) — asgari enerji tabanı

1 Ocak 2025'ten itibaren **2.000 m² üzeri yeni binalar** Enerji Kimlik Belgesinde en az **"B" sınıfı** olmak ve enerjisinin en az **%10'unu binada üretmek** (yerinde yenilenebilir) zorunda.

1 Ocak 2026

Bu tarihten itibaren **10.000 m² üzeri kamu** sağlık, eğitim, yurt ve hizmet binalarında YeS-TR **zorunlu** (Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği değişikliği, 11 Mart 2025)

YeS-TR derece eşikleri (kredi)



Kaynak: [Resmî Gazete](#), Sayı 31864 (12 Haziran 2022); Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği değişikliği (11 Mart 2025); T.C. ÇŞİDB / Türkiye Çevre Ajansı; nSEB Yönetmeliği (2025).

ÇEDBİK ve Türkiye pazarı: 500'ü aşkın sertifikalı bina

ÇEDBİK (Çevre Dostu Yeşil Binalar Derneği, 2007), World Green Building Council'in Türkiye temsilcisidir ve ülkedeki yeşil bina ekosisteminin çatı kuruluşudur.

500+

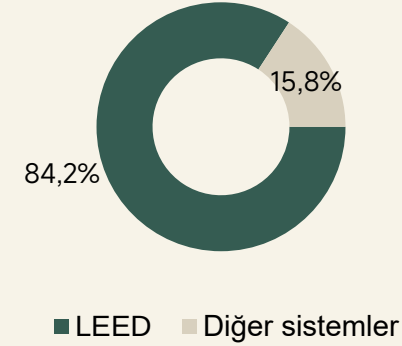
Türkiye'de sertifikalı yeşil bina sayısı (2024)

8. sıra

USGBC'nin "ABD dışı ilk 10 LEED ülkesi" listesinde Türkiye'nin yeri

7. ÇEDBİK Zirvesi (22 Kasım 2024): "Sıfırın İnşası: İnsanca Yaşam" temasıyla 450'den fazla katılımcı.

Sertifikalı binaların sistem dağılımı (2024)



Build4GreenIST — karbon nötr kentsel dönüşüm

ÇEDBİK + İstanbul Büyükşehir Belediyesi ortaklığında, AB NetZeroCities programı kapsamında yürütülen girişim; kentsel dönüşümü karbon nötr hedefiyle birleştiriyor.

Girişimin temel verisi: Türkiye'de 6–7 milyon konutun güçlendirilmesi gerekiyor.

Kaynak: [ÇEDBİK](#) (2024); [USGBC](#) "ABD dışı ilk 10 LEED ülkesi" listesi; Build4GreenIST (ÇEDBİK + İBB, AB NetZeroCities).

Türkiye'den örnekler: Platin kulelerden kamu hedeflerine

Yapı	Sertifika	Öne çıkan özellik
Allianz Tower (İstanbul)	LEED Platin	Türkiye'nin LEED Platin sertifikalı ilk kulesi
Garanti BBVA Zincirlikuyu GM	LEED Platin	Genel müdürlük kampüsü
Garanti BBVA Kızılay	LEED Platin	Platin düzeyinde sertifikalı banka yapısı
Sabiha Gökçen Terminali	LEED Gold	66/110 puan (2019) — havalimanı terminali
Bursagaz Genel Müdürlüğü	LEED Platin	Enerji dağıtım şirketi merkez binası

Ortak nokta: Öncü örnekler finans, enerji ve ulaştırma sektörlerinden geliyor; yüksek kademe sertifikalar artık yalnızca prestij değil, kurumsal sürdürülebilirlik raporlamasının somut kanıtı.

%30

Kamu binalarında 2030'a kadar enerji tasarrufu hedefi (2023/15 sayılı Genelge)

II. UEVEP (2024–2030)

Enerji Verimliliği 2030 Stratejisi'nin eylem planı: 61 eylem, 20,2 milyar \$ yatırım.

B7 eylemi: 2026 sonrası 10.000 m² üzeri yeni kamu binaları yeşil sertifikalı olacak.

B3 eylemi: Kamu binalarında Bütünleşik Bina Tasarımı + Bina Enerji Modelleme + BIM.

Kaynak: [USGBC](#) proje kayıtları; T.C. ETKB, Enerji Verimliliği 2030 Stratejisi ve II. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (8 Ocak 2024); 2023/15 sayılı Cumhurbaşkanlığı Genelgesi.

AB Yeşil Mutabakatı ve SKDM: karbon artık bir maliyet kalemi

Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM/CBAM), AB'ye ihraç edilen **6 sektörün** gömülü karbonunu fiyatlandırıyor: demir-çelik, alüminyum, çimento, gübre, hidrojen ve elektrik.

Takvim: 1 Ocak 2026'da kesin rejim başlıyor; ilk beyan 30 Eylül 2027.

6,8 Mt · %12

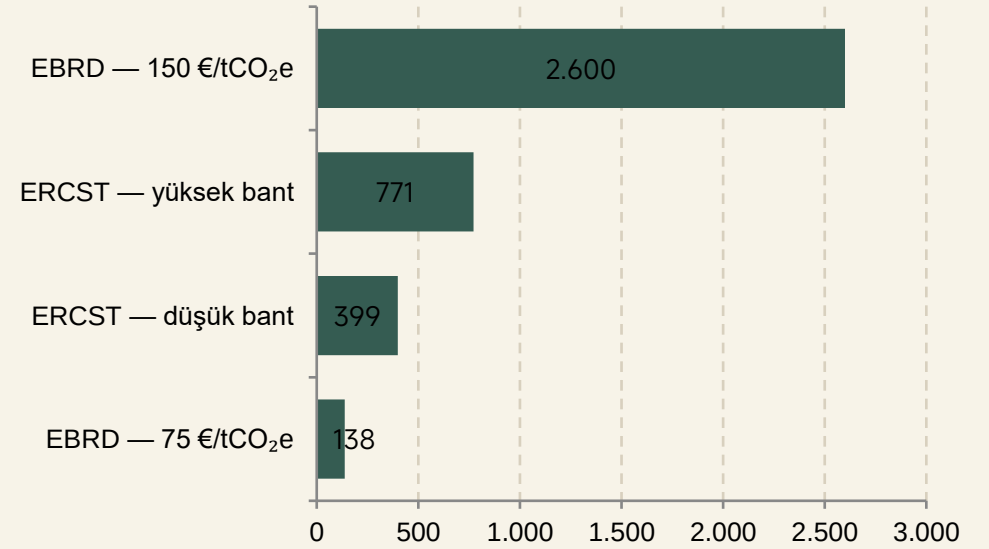
Türkiye, AB'nin **1 numaralı demir-çelik ithalat kaynağı** (2024); toplam ihracatın **%41'i** AB'ye gidiyor

Ortak dil: EPD. ISO 14025 + EN 15804 uyumlu Çevresel Ürün Beyanı, tüm sertifika sistemlerinin ve SKDM muhasebesinin ortak veri altyapısı — üretici için artık pazarlık konusu değil, pazara giriş bileti.

Sırada CSRD var: AB kurumsal sürdürülebilirlik raporlamasının ikinci dalgası 2026'da yürürlükte; tedarik zincirindeki Türk firmalarını da dolaylı kapsıyor.

Kaynak: Avrupa Komisyonu SKDM (CBAM) mevzuatı; [ERCST](#) maliyet modellemesi; [EBRD](#) karbon fiyatı senaryoları; ISO 14025 / EN 15804.

Türkiye için yıllık SKDM maliyet tahminleri (milyon €)



Tahminler karbon fiyatına duyarlı: 150 €/tCO₂e senaryosunda yıllık yük **2,6 milyar €'ya** ulaşıyor — yeşil bina ve düşük karbonlu malzeme artık ihracat rekabetçiliğinin konusu.

08

Sürdürülebilir İnşaat Yönetiminde Dijital Dönüşüm

Ölçemediğiniz şeyi yönetebilir misiniz?

İkiz dönüşüm · 6B BIM · Dijital ikiz · Yapay zeka · IoT/SHM · 3D baskı · Dron

Kaynak: Sak, Ö.F., "Sürdürülebilir İnşaat Yönetiminde Dijital Dönüşüm" sunumu.



İkiz dönüşüm: yeşil ve dijital artık tek gündem

İkiz Dönüşüm (Twin Transition) kavramı, yeşil dönüşüm ile dijital dönüşümün artık ayrı gündemler olarak düşünülemeyeceğini söyler: biri hedefi, diğeri ölçme ve yönetme aracını verir.

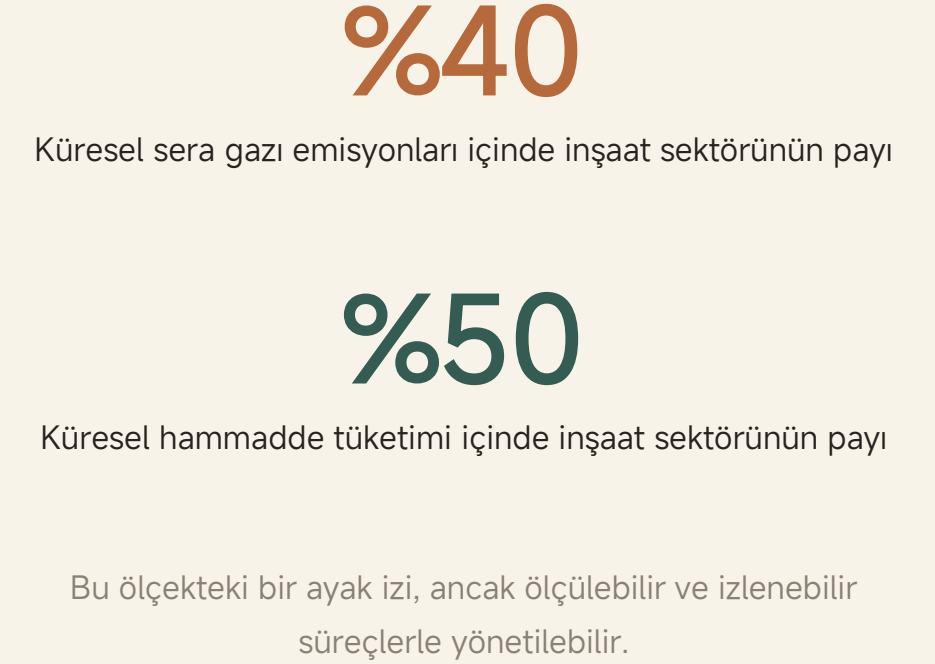
İnşaat sektörü bu kesişimin tam ortasındadır; küresel kaynak baskısının en yoğun hissedildiği sektörlerden biridir.

"Dijital araçlar olmadan sürdürülebilirlik hedeflerini ölçemez ve yönetemezsiniz."

Kamu politikası da aynı yönde: II. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (2024–2030), kamu binalarında Bütünleşik Bina Tasarımı ile birlikte **BIM ve Bina Enerji Modelleme** kullanımını öngörüyor (B3 eylemi). 2026 sonrası 10.000 m² üzeri yeni kamu binalarında yeşil sertifika şartıyla birlikte dijital modelleme fiilen zorunlu hale geliyor.

YEŞİL DÖNÜŞÜM

DİJİTAL DÖNÜŞÜM



İKİZ DÖNÜŞÜM
ölç, modelle, yönet — tek gündem

Kaynak: Sak, Ö.F., "Sürdürülebilir İnşaat Yönetiminde Dijital Dönüşüm" sunumu; T.C. ETKB, II. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı 2024–2030 (8 Ocak 2024).

BIM'den 6B BIM'e: enerji analizi tasarım aşamasına çekiliyor

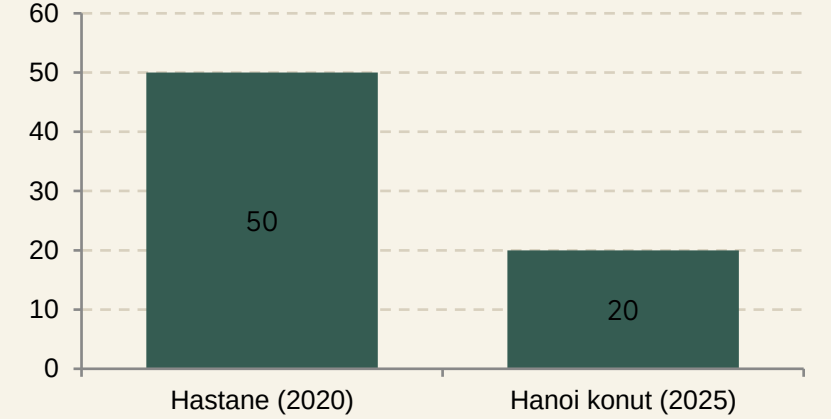
BIM'in **6. boyutu** çevresel analizlerdir: enerji, karbon ve yaşam döngüsü hesapları inşaat sonrasına değil, **tasarım aşamasına** taşınır. Doğru kullanıldığında karbon ayak izini tasarım aşamasında **%50'ye kadar** azaltmak mümkündür.

Kanıt iki vakada:

- Montiel-Santiago vd. (2020) — hastane projesinde cephe yönelimi ve pencere optimizasyonu ile yıllık enerji tüketiminde **%50 tasarruf**.
- Nguyen & Mai (2025) — Hanoi'de 2 katlı konutta yalıtım optimizasyonu ile soğutma yükünde **%20 azalma**.

Türkiye'de kamu öncülük ediyor: T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı 2022'de **BIM Teknik Şartnamesi**'ni yayımladı; İstanbul Havalimanı ve İBB raylı sistem projeleri BIM kullanımının zorunlu olduğu referans uygulamalar oldu.

Tasarım aşaması optimizasyonu: vaka sonuçları (%)



%75

Sektör profesyonellerinin BIM eğitimlerini yetersiz bulma oranı — bu boşluk İMO'nun uygulamalı BIM atölyeleriyle kapatılmayı bekliyor.

Araçlar: Revit · Insight 360 · Green Building Studio

Dijital ikiz ve yapay zeka: binanın yaşayan kopyası

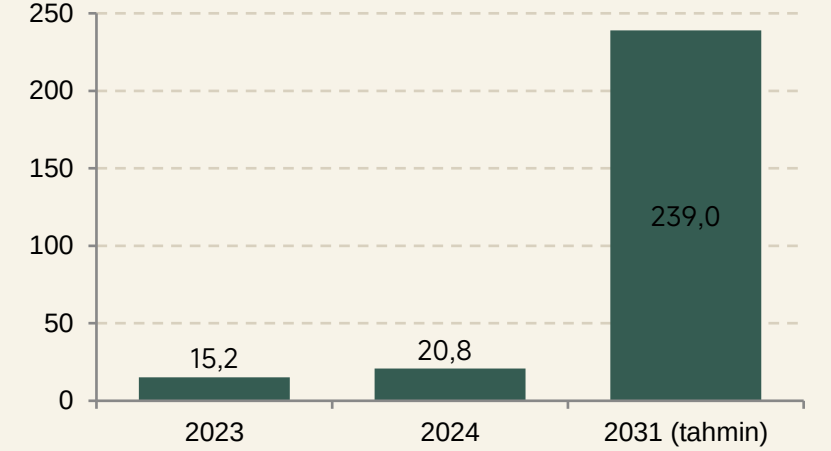
BIM statik bir 3B modeldir; **dijital ikiz** ise binanın yalnız geometrisini değil **davranışını da kopyalar**. Binlerce IoT sensöründen gelen canlı veriyle beslenen bu "yaşayan kopya", kestirimci bakımı mümkün kılar: sistem, *"klima 2 gün sonra bozulacak"* uyarısını arıza olmadan verir. Havaalanları, AVM'ler ve akıllı şehirler ilk uygulama alanları.

Yapay zekanın şantiye ve tasarımdaki dört işi:

- **Maliyet tahmini** — yapay sinir ağlarıyla erken evre keşif
- **Tasarım optimizasyonu** — genetik algoritmalarla alternatif tarama
- **Şantiye güvenliği** — görüntü işlemeyle riskli davranış tespiti
- **Beton kalitesi** — THBB'nin EBİS'i (Elektronik Beton İzleme Sistemi) ile dökümden numuneye dijital izlenebilirlik

Bağlantı: Dijital ikizi besleyen IoT sensör ağları, Bölüm 5'te ele aldığımız Yapı Sağlığı İzleme (SHM) altyapısıyla aynıdır — ikiz, SHM verisini işletme ve bakım kararına dönüştürür.

Küresel dijital ikiz pazarı (milyar \$)



Yıllık bileşik büyüme: %41,7 (Kings Research)

5 kat

İnşaatta iş kazası ölümlerinin diğer sektörlere oranı — görüntü işleme tabanlı güvenlik sistemlerinin hedeflediği ilk problem.

3D baskı ve dronlar: şantiyenin yeni araçları

Bursa Uludağ Üniversitesi + Jet Robotik iş birliğiyle geliştirilen yerli 3D beton yazıcı, duvar imalatını günler mertebesine indiriyor; birincil hedef deprem sonrası hızlı barınma üretimi.

2–3 gün

150 m² yapının duvarlarının basım süresi

~1 hafta

300 m² bir evin toplam üretim süresi

70–80 \$/ton

3D baskıyla duvar maliyeti — geleneksel yöntemde 150–200 \$/ton yerine

Küresel eşik: Çin'de 24 saatte 10 ev (%70 düşük maliyet) ve 5 katlı bina basıldı; Hollanda'da 3D baskı köprü hizmette.

Dronlar: şantiyenin havadan gözü

- Fotogrametri ile arazi ve şantiye modeli
- Metraj ve stok hacmi hesabı
- İlerleme takibi ve BIM/CBS entegrasyonu
- Termal kamerayla yalıtım analizi

Mevzuat çerçevesi: SHGM İHA kaydı (500 g üzeri), ticari kullanımda SHT-İHA-2 lisansı ve uçuş izinleri; kişisel veri toplanan çekimlerde KVKK uyumu zorunlu.

43 firma · 2. sıra

Türkiye'nin "En Büyük 250 Uluslararası Müteahhit" listesindeki firma sayısı ve dünya sıralaması (2024) — dijital şantiye araçları bu ölçeğin verimlilik kaldırıcı.

09

Sürdürülebilir Malzemeler ve Döngüsel Ekonomi

Betonu karbonsuzlaştırmadan iklim hedeflerine ulaşılabilir mi?



Çimento gerçeği · LC3 · Geopolimer · Şehir madenciliği · Malzeme pasaportu · İklim Kanunu

LC3 bugünün, geopolimer yarının çözümü

%7–8

Çimento tek başına küresel CO₂ emisyonundaki payı

%60

Emisyonun kalsinasyondan (proses) kaynaklanan payı; ~%40'ı yakıt

LC3 — Kalsine Killi Kireçtaşı Çimento

Formül: %50 klinker + %30 kalsine kil + %15 kireçtaşı. Gömülü karbondan **%40 azalma**; mevcut çimento santralleriyle uyumlu, ek yatırım gerektirmez. Deniz suyuna (klorür) karşı sıradan çimentodan daha dayanıklı.

Geopolimer Beton (GPC) — Çimentosuz Bağlayıcı

Uçucu kül / yüksek fırın cürufu + kimyasal aktivatörler; emisyonda **%80'e varan azalma**. Zorluklar: özel kürlenme koşulları ve pahalı aktivatör kimyasalları.

Bağlayıcı karşılaştırması (OPC = %100 baz)

Bağlayıcı	Karbon	Maliyet	Uygulama
OPC	%100 (baz)	Düşük	Çok kolay
LC3	–%40	Rekabetçi	Kolay
Geopolimer	–%80	Yüksek	Zor

Türkiye'de politika çerçevesi

Klinker kısıtı (ÇŞİDB tebliği, 16 Mart 2024): Kamu ihalelerinde klinker oranı 2025–2029 arası ≤%80, 2030 sonrası ≤%75.

EBRD destekli ulusal yol haritası: Çimento sektöründe 2053'e kadar ~%93 azaltım mümkün; gereken ~30 milyar \$ yatırımın %90'ı CCUS'a (karbon yakalama-kullanım-depolama) ayrılmalı.

Ar-Ge gündemi: Volkanik tüf ve endüstriyel atıkların LC3 potansiyeli akademinin araştırma alanı.

Kaynak: Sak, Ö.F., "Sürdürülebilir İnşaat Yönetiminde Dijital Dönüşüm" sunumu; RMI (2024), The Business Case for LC3; ÇŞİDB Tebliği (16.03.2024); EBRD Türkiye Çimento Yol Haritası.

Döngüsel ekonomi: binalar geleceğin madenleri

"Al-Yap-At" doğrusal ekonomisi kaynakları tüketiyor; döngüsel modelde amaç yıkım atığını sıfıra indirmek. **Şehir madenciliği** mevcut binaları geleceğin hammadde deposu olarak görür; **sökülebilir tasarım** (LEGO mantığı) elemanların yapının ömrü sonunda sökülüp yeniden kullanılmasını hedefler.



DİJİTAL MALZEME PASAPORTU (DMP)

ID: ST-2024-001 · Eleman: Yapısal çelik kiriş

Üretim: 2024, İskenderun

Gömülü karbon: 150 kg CO₂e · Geri

dönüşüm: %100

İçerik: Söküm talimatı — yıkım anında malzemenin ikinci el piyasasında satılabilmesini sağlar.

~663 milyon ton

Türkiye'de kentsel dönüşüm kaynaklı yıkıntı atığı potansiyeli
(İstanbul 149, İzmir 51, Ankara 47 Mt)

%90

Yıkıntı atığının geri dönüştürülebilir payı

Mevzuat ve uygulama

Binaların Yıkılması Hakkında Yönetmelik (2021): "Seçici yıkım" esas; AB hedefi %70 geri kazanım, Türkiye'de ~10 geri kazanım tesisi.

JICA-UNDP (4,8 Mr \$ hibe, Ağustos 2024): Hatay ve Kahramanmaraş'ta mobil kırıcılar + 2 sabit geri kazanım tesisi.

THBB: CSC (Beton Sürdürülebilirlik Konseyi) belgelendirmesi; 2024 sonu itibarıyla 20+ tesis belgeli.

Kaynak: Sak, Ö.F., "Sürdürülebilir İnşaat Yönetiminde Dijital Dönüşüm" sunumu (DMP örneği); Binaların Yıkılması Hakkında Yönetmelik (2021); UNDP & JICA (2024); THBB / CSC (2024).

İklim Kanunu ve ETS: karbon Türkiye'de de fiyatlanıyor

7552 sayılı İklim Kanunu (Resmî Gazete, 9 Temmuz 2025) Türkiye'nin ilk kapsamlı iklim yasasıdır: 2053 net sıfır hedefi yasal zemine kavuştu, ulusal Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) kuruldu; pilot dönem 2026'da başlıyor. Türkiye ayrıca COP31'e ev sahipliği yapıyor.

Artık mühendislik hesaplarına bir **"karbon maliyeti"** satırı ekleniyor: malzeme seçimi ve tasarım kararları doğrudan fiyatlanan bir girdiye dönüşüyor.

Fırsat penceresi: Kentsel dönüşüm ile enerji retrofitinin birleştirilmesi, hem deprem direncini hem karbon azaltımını aynı yatırımda topluyor. ÇEDBİK-İBB Build4GreenIST projesine göre Türkiye'de **6-7 milyon konutun** güçlendirilmesi gerekiyor — bu stok aynı zamanda en büyük retrofit potansiyelidir.

%41

Ulusal Katkı Beyanı (NDC): 2030'a kadar azaltım hedefi

~%70 / ~%70

2050'de kentlerde yaşayacak dünya nüfusu payı /
kentlerin küresel emisyonlardaki payı (SDG 11-13 kesişimi)

%81,9

2035'te Türkiye'de kentlerde yaşaması öngörülen nüfus payı

2025

7552 sayılı İklim Kanunu yürürlükte
(9 Temmuz)

2026

Ulusal ETS pilot dönemi başlıyor

2030

NDC hedefi: %41 azaltım

2053

Net sıfır hedefi

Kaynak: 7552 sayılı İklim Kanunu (RG, 09.07.2025); UN-DESA kentleşme projeksiyonları; ÇEDBİK & İBB Build4GreenIST (2024).

Sentez: dirençli + yeşil + dijital

1

Mevcut stok güçlendirilebilir. Shotcrete ile perde ekleme gibi hızlı ve ekonomik yöntemler, riskli binaların toptan göçme riskini ortadan kaldırabilir.

2

Sismik izolasyon kat sayısı ile ekonomikleşir. İzolatörün maliyet farkı 5 katta %48,35 iken 15 katta %11,18'e iner; doğru yükseklik seçimi ek maliyeti minimuma indirir.

3

Yapılar izlenebilir. Zaman-frekans hasar tanılama ve yapı sağlığı izleme (SHM), deprem sonrası "güvenli mi?" kararını saatlerden dakikalara indirir.

4

Birleşim detayları ekonomiyi belirler. Çelik yapılarda birleşim detayı sınır şartını, sınır şartı iç kuvvetleri değiştirir; "elastik ankastre" yaklaşımı gereksiz malzeme kullanımını önler.

5

Yeşil dönüşüm mevzuata girdi. YeS-TR Yönetmeliği ve LEED v5 ile sertifikasyon kamu binalarında zorunlu hale geliyor; enerji verimliliği artık tercih değil yükümlülük.

6

Ölçmek mümkün. BIM + dijital ikiz + yapay zekâ, karbon ayak izini tasarım aşamasında hesaplamayı ve yapının ömrü boyunca izlenmesini sağlar.

Altı bulgu tek cümlede: güvenli yapı + yeşil yapı + ölçülebilir yapı = sürdürülebilir yapı.

Mesleğin ve Odanın rolü: öneriler

POLİTİKA ÖNERİLERİ

1. Kamu ihalelerinde düşük klinkerli / yeşil çimentoya öncelik verilmesi.
2. YeS-TR sertifikalı binalara vergi ve harç teşvikleri getirilmesi.
3. Ulusal dijital bina pasaportu sisteminin kurulması.
4. TOKİ şartnamelerinde geri dönüştürülmüş malzeme kullanımının zorunlu tutulması.
5. TBDY'ye sayısal bir hasar / performans ölçeği eklenmesi önerisi.
6. Sismik izolasyonun devlet teşvikiyle konutlarda yaygınlaştırılması.
7. Yapı muayenesinin tıpkı araç muayenesinde olduğu gibi belirli periyotlarla zorunlu hale getirilmesi.

İMO'NUN EĞİTİM ROLÜ

Oda, dönüşümün eğitim altyapısını kuruyor: **Şantiye Odaklı BIM Atölyesi** (İMO Ankara, 11 Ocak 2026) ve Geleceğin İnşaat Mühendisi Çalıştayı (28 Şubat-1 Mart 2025) dijital yetkinliği; **YeS-TR uzmanlığı** ve Enerji Verimliliği Komisyonu çalışmaları yeşil yetkinliği besliyor.

Sertifika ve uzmanlık programlarının üniversite-oda iş birliğiyle sürekli hale getirilmesi önerilir.

MÜHENDİSİN DEĞİŞEN ROLÜ

Rutin hesap ve metraj giderek makineye devrediliyor; mühendisin asıl değeri **yorum, etik ve sorumluluk** alanlarında yoğunlaşıyor.

Dijital araçları kullanamayan değil, sonuçlarını sorgulayabilen mühendis dönüşümün kazananı olacak.

Kaynakça ve teşekkür

SUNUMUN DAYANDIĞI ÇALIŞMALAR

1. Sak, Ö.F. & Beyen, K. (2019). Hasar Tanılamasında İstatistiki Değerlendirme Yöntemlerinin Zaman-Frekans Ortamında İrdelenmesi. *5/CEES*, 8–11 Ekim 2019, ODTÜ, Ankara.
2. Bulut, M.Ş. & Sak, Ö.F. Sismik İzolatör Kullanımında Kat Sayısı ve Maliyet İlişkisinin İncelenmesi. *10. Uluslararası Avrupa Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Kongresi*.
3. Sak, Ö.F. Yapılarda Tuğla Duvarların Kaldırılmasının Düşey Düzensizliğe Etkisi. *International Congress of Engineering and Natural Sciences*.
4. Sak, Ö.F. (2021). Binaların Depreme Dayanımını Arttırmak İçin Hızlı ve Ekonomik Yöntemler. *6. UDMSK*, 13–15 Ekim 2021, GTÜ, Gebze.
5. Yüzbaşıoğlu, A.B. & Sak, Ö.F. Çelik Proje Tasarımında Birleşim Detaylarının İç Kuvvetlere ve Ekonomikliğe Etkisi. *International Texas Congress on Advanced Scientific Research*.
6. Sak, Ö.F. Sürdürülebilir İnşaat Yönetiminde Dijital Dönüşüm (sunum): 6B BIM, döngüsel ekonomi ve yeni nesil malzemelerin entegrasyonu.

MEVZUAT, RAPOR VE STANDARTLAR

- TBDY 2018 — Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (RG 18.03.2018, Sayı 30364).
- FEMA 356 — Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings.
- AFAD (2023) — 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri Raporu.
- UNEP & GlobalABC (2025) — Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025.
- USGBC (2025) — LEED v5 (28 Nisan 2025).
- Binalar ile Yerleşmeler İçin Yeşil Sertifika Yönetmeliği — YeS-TR (RG 12.06.2022, Sayı 31864).
- 7552 sayılı İklim Kanunu (RG 9 Temmuz 2025).
- II. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı 2024–2030 (8 Ocak 2024).

Teşekkür: Prof. Dr. Kemal Beyen, Prof. Dr. Erdal Şafak, Doç. Dr. Fuad Okay, Yüzbaşıoğlu Mühendislik ve Ekşi Mimarlık'a katkıları için; TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası'na ev sahipliği için teşekkür ederim.

İletişim

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Fatih SAK
osak@dogus.edu.tr



ZELZELE
YAPI SİSMİK RİSK · ÖN DEĞERLENDİRME



Mühendisin cebindeki hızlı tarama aracı.

12 kritik soru · FEMA P-155 · AI görsel analiz · Kurumsal PDF

İnşaat Mühendisleri Odası tanıtım sunumu · 2026



zelzele.net

Zelzele: Sözlükte “bir şeyi hareket ettirmek, şiddetle sarsmak, vurmak” anlamındaki **zelzele**, “yer içindeki fay kırıkları üzerinde biriken enerjinin âniden boşalması sonucu meydana gelen yer değiştirme hareketinin yol açtığı, karmaşık, elastikî dalga hareketleri” şeklinde tanımlanır. Türkçe’de zelzelenin yerine daha çok **deprem** kelimesi kullanılır.

Bu sunumda ne konuşacağız?

01 Problem

Deprem sonrası hızlı tarama neden zor?

02 Metodoloji

FEMA P-155'i sahaya nasıl indirdik?

03 Ürün Turu

12 soru, skor, AI görsel analiz, PDF

04 Etik & Sınırlar

Mühendisin yerine geçmez, hız kazandırır

05 Dağıtım & Fiyat

Nasıl erişilir, ne kadar özgür

06 Yol Haritası

2026 planı, geri bildirim davetiyesi

Türkiye'de sismik risk taraması hâlâ zor.

~28M

Türkiye'deki toplam bina stoğu

%67

1999 öncesi (yönetmelik zayıf) yapı oranı

~150K

Aktif inşaat mühendisi

6-8 saat

Bir uzmana bina başına ortalama saha süresi

SAHADAKİ ACI NOKTALAR

- ✗ Excel formları hâlâ elle dolduruluyor · rapor hazırlaması saatler alıyor
- ✗ Kritik bayraklar hafızada takip ediliyor · atlanma riski yüksek
- ✗ FEMA P-155'i Türkçe süreç akışına bağlamak eğitim gerektiriyor
- ✗ Müşteriye anlatılabilir görsel çıktı yok · sadece uzman jargonu
- ✗ Fotoğraflar dosyalarda kayboluyor · analize entegre değil
- ✗ Portföyü olan danışmanın toplu takip aracı yok

Zelzele: 2 dakikada mühendislik disiplinli ön eleme.

Sahaya inmeden önce riskli binaları elemek için tasarlandı.



HIZ

Bina başına 2 dakika. 200 binalık portföy · yarım gün.

12 soru + fotoğraf yükle → skor + PDF



DİSİPLİN

FEMA P-155 metodolojisi + Türk yönetmelik ayarları.

Baz skor + modifiye faktörler açıkça listelenir



AI DESTEĞİ

Claude Haiku 4.5 Vision · çatlak / korozyon tespiti.

Kırmızı bayrak skoru + fotoğraf üstü işaretleme

Neden bu 12 değişken?

FEMA P-155 hızlı görsel tarama + Türk yapı tipolojisi + saha deneyimi kesişimi.

01. Bina yaşı

Yönetmelik dönemi (Pre / Post-Benchmark)

02. Kat adedi

P-155 yükseklik modifikatörü

03. Taşıyıcı sistem

C1 · C2 · URM · S1

04. Beton fck

Karot öncesi ilk sinyal

05. Donatı sınıfı

S220 düz · S420 nervürlü

06. Etriye sıklaşt.

Sünek davranış göstergesi

07. Yumuşak kat

Kritik düşey düzensizlik

08. Ağır çıkma

Düşey düzensizlik / burulma

09. Kısa kolon

Plan düzensizliği · çekileme

10. Zemin sınıfı

A/B – E/F · yer büyütmesi

11. Bitişik nizam

Çekileme riski

12. Korozyon

Donatı kesit kaybı erken uyarı

Nasıl 2 skor üretiyoruz?

UYGULAMA RİSK SKORU · 0–100

Açıklanabilir kırmızı bayrak indeksi

- Her değışken için ağırlıklı katkı hesaplanır
- Katkılar toplanıp 0–132 → 0–100 aralığına haritalanır
- 3 seviye: Düşük (< 35) · Orta (35–59) · Yüksek (≥ 60)
- Kullanıcıya değışken başına 'puan' olarak gösterilir
- Kritik / dikkat / düşük etiketlerle severity dot

AVANTAJ

Sahada müşteriye anlatılabilir: 'yaşınız +18, korozyon +12, yumuşak kat +12 → 42 kritik bayrak.'

FEMA P-155 · BAZ + MODİFİYE FAKTÖR

Uluslararası referans skor

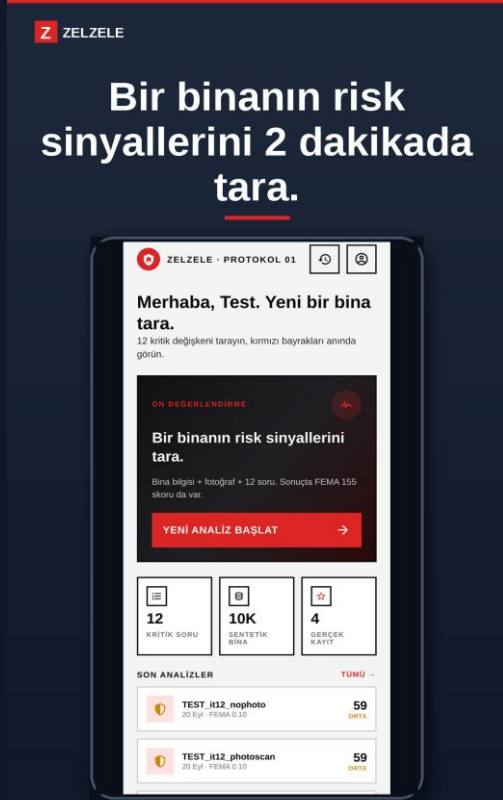
- BSHS = f(structural system)
C1: 2.5 · C2: 2.8 · URM: 1.8 · S1: 2.5
- Modifiye faktörler:
Pre-Code –0.6 · Post-Benchmark +1.4
Yumuşak kat –0.5 · Kısa kolon –0.5
Zemin E/F –0.6 · Korozyon > 25% –0.5
- Nihai skor < 2.0 → detaylı değerlendirme önerilir

AVANTAJ

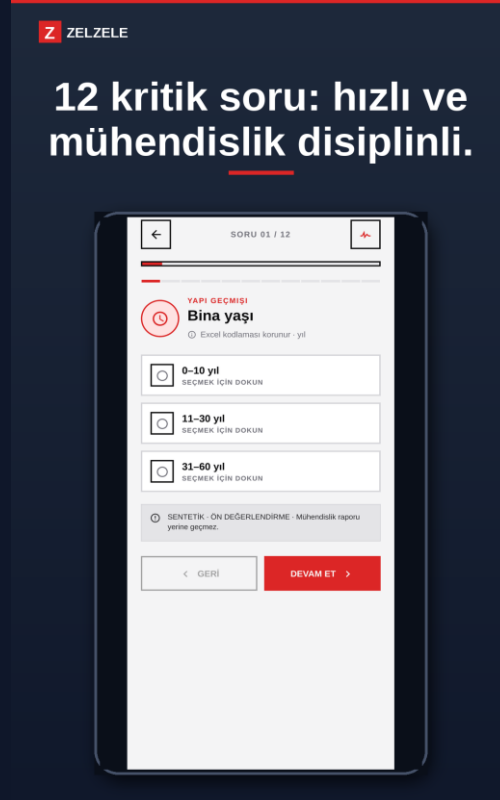
Meslektaşlarla ortak dil: FEMA P-155 uluslararası kabul görmüş.

Uygulama içi akış.

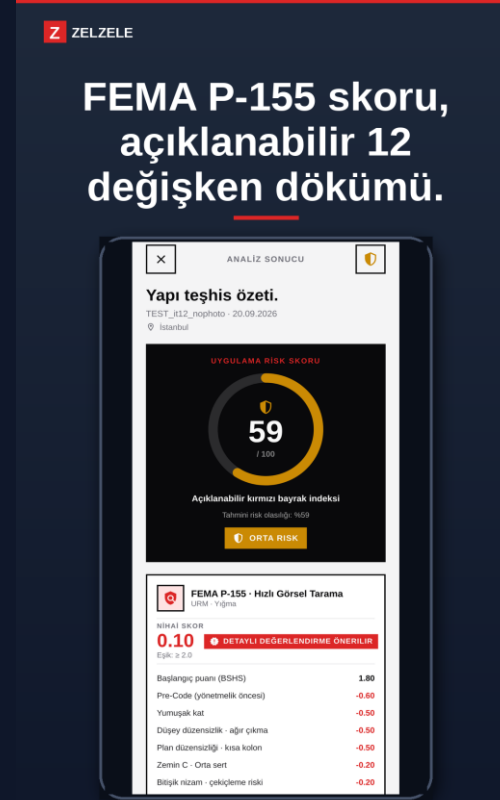
Kayıt sonrası tam analiz akışı — bina bilgisi, 12 soru, sonuç.



zelzele.net · FEMA P-155 · 12 KRİTİK SORU



zelzele.net · FEMA P-155 · 12 KRİTİK SORU



zelzele.net · FEMA P-155 · 12 KRİTİK SORU

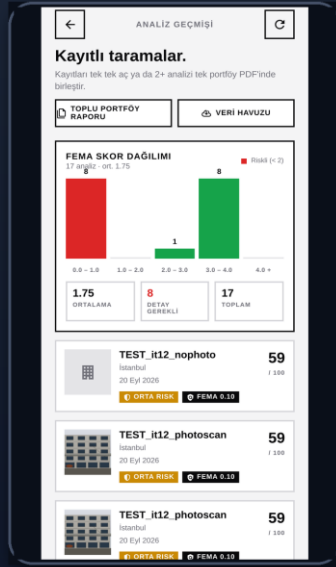


zelzele.net · FEMA P-155 · 12 KRİTİK SORU

Portföy, dağılım ve web erişimi.

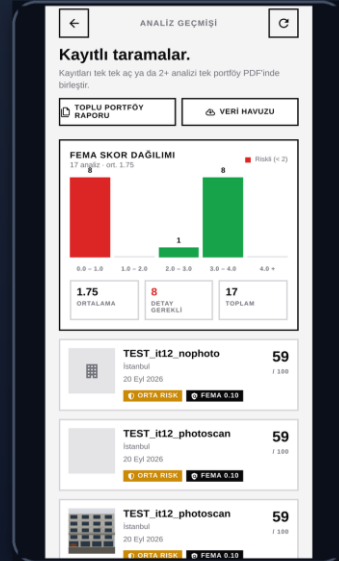
Birden çok bina takibi, karşılaştırma ve kayıtsız web denemesi.

Tüm binalarını tek yerde takip et.



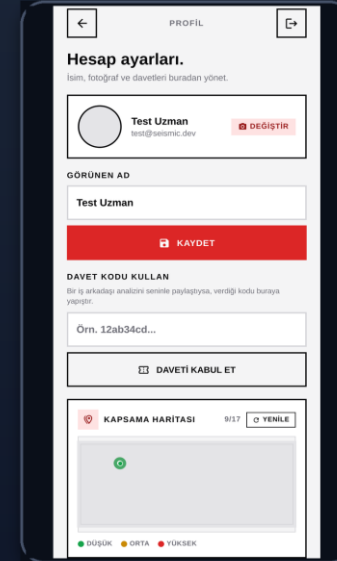
zelzele.net · FEMA P-155 · 12 KRİTİK SORU

Birden çok binayı tek portföy PDF'de birleştir.



zelzele.net · FEMA P-155 · 12 KRİTİK SORU

Kapsama haritanla mesleki erişim alanını gör.



zelzele.net · FEMA P-155 · 12 KRİTİK SORU

Kayıtsız web'de dene: zelzele.net üzerinden.

WEB'DE DENE - KAYITSIZ

SORU 1 / 12 0%

GEÇMİŞ

Bina yaşı

Birim: yıl

0-10 yıl

11-30 yıl

31-60 yıl

GERİ İLERİ

DENEME MODU

Cevapların hesabına kaydedilmez. Tam analiz, AI destek, ekip paylaşımı ve PDF için hesap açman gerekir.

zelzele.net · FEMA P-155 · 12 KRİTİK SORU

Claude Haiku 4.5 Vision · bina fotoğrafını okur.

1

Fotoğraf yükle

Cepheden bir kare / galeri

2

AI okur

Görünür çatlak, sıva dökülmesi, korozyon

3

Puan üretir

Kırmızı bayrak: 0–100

4

Bulguları listeler

Türkçe · severity dot · yer bilgisi

5

Rapora işlenir

Kurumsal PDF'e otomatik damga

BULGU ÖRNEĞİ

Kırmızı bayrak skoru: 68 / 100

YÜKSEK RİSK

TESPİT EDİLEN BULGULAR

Kritik

Zemin katta 2 kolon dibinde diyagonal çatlak, ~30 cm

Dikkat

Kolon-kiriş birleşimlerinde sıva dökülmesi

Dikkat

Cephede yaygın hafif nem lekesi · korozyon işareti

Düşük

Görünür deformasyon veya eğim gözlenmedi

Zelzele mühendisin yerine geçmez.

Bu bir ön eleme aracıdır — yerinde denetim, karot ve mühendislik yargısını değil, onun önündeki gürültüyü azaltır.

✓ NE YAPAR

- Portföyü hızla eler, riskli binaları öne çıkarır
- Sahaya gitmeden önce %70 önceliklendirme sağlar
- 12 kritik bayrağı unutulmadan sorar
- Müşteriye anlatılabilir görsel çıktı üretir
- FEMA P-155 ile uluslararası dil kurar
- Ekiple ortak veri havuzu sağlar

× NE YAPMAZ

- Yerinde denetim / karot / jeoteknik etüt yerine geçmez
- Resmi yapı denetim raporu üretmez
- Detaylı performans analizi yapmaz
- Nihai güvenlik / güçlendirme kararı vermez
- Sonuçlar mühendis onayı olmadan yayınlanmaz
- Sismik yalıtım / güçlendirme tasarımı önermez

Modern altyapı · KVKK dostu.

Mobil (iOS / Android)

React Native (Expo SDK 57) · TypeScript

Yapay zekâ

Anthropic Claude Haiku 4.5 Vision · Gemini Nano Banana

Depolama

Emergent Managed Object Storage · şifreli

Konum / Deprem

USGS + AFAD entegrasyonu · 10 yıl deprem geçmişi

Sunucu

Python FastAPI · MongoDB · asenkron mimari

PDF üretimi

İstemci taraflı jsPDF + kurumsal marka şablonu

Kimlik

JWT · Google OAuth · KVKK/GDPR uyumlu

Erişim

Google Play · App Store · zelzele.net web denemesi

Zelzele size ne kazandırır?



DANIŞMAN MÜHENDİS

Saha ziyaretinde 2 dakikada ön eleme yap.
Müşteriye kurumsal PDF ile takdim et.
Portföyünü haritada görselleştir.



YAPI DENETİM / RÖLÖVE FİRMASI

Yüzlerce binalık portföyü tek portföy PDF'de birleştir.
Detay gerektiren binaları filtrele.
Ekiple ortak veri havuzu kur.



KENTSEL DÖNÜŞÜM DANIŞMANI

Blok bazında hızlı stok analizi.
Bakanlığa sunulmak üzere önceliklendirilmiş liste.
AI görsel analiz ile hasar dokümantasyonu.



EMLAK / YATIRIM UZMANI

Satın alma öncesi kırmızı bayrak taraması.
Aidat karşılığı, tapu öncesi hızlı 2. görüş.
Uygun fiyata standart rapor.



MÜLK SAHİBİ

Web'de kayıtsız ön deneme.
PDF ile mühendisine hazır bir sohbet açar.
Türkçe, sade, korku değil bilgi verir.



AKADEMİSYEN / ODA EĞİTMEN

Öğrenciye FEMA P-155'i canlı senaryolarla anlat.
Sentetik veri seti eğitim için hazır.

Nasıl erişilir?

Erken erişim döneminde — geri bildirim veren mühendislere ücretsiz.



zelzele.net

Web'de ücretsiz dene

Kayıtsız · 12 soru · PDF çıktı · sunucusuz çalışır



Google Play

com.emergent.seismicriskassess.oddqmg

Android · Türkçe · KVKK uyumlu · v1.0.2



App Store

Yakında

iOS TestFlight aşamasında · IMO üyeleri için erken erişim

Teşekkürler.

İMO üyelerine erken erişim ve doğrudan geri bildirim kanalı açıyoruz.

İLETİŞİM

🌐 zelzele.net

✉ destek@zelzele.net

📱 Google Play · [com.emergent.seismicriskassess.oddqmg](https://play.google.com/store/apps/details?id=com.emergent.seismicriskassess.oddqmg)

İMO üyeleri için özel geri bildirim + tez / eğitim iş birliği ilgi bekliyoruz.



Sorular · Öneriler · İş birlikleri