



TMMOB
İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI
İSTANBUL ŞUBESİ

YAPILARIN İLERLEMELİ GÖÇME (PROGRESSIVE COLLAPSE) DAVRANIŞI

Dr. Aydın DEMİR

İnşaat Y. Mühendisi
Sakarya Üni. İnşaat Müh. Bölümü

30 Nisan 2026

İçerik

- İlerlemeli Göçme (Progressive Collapse) nedir?
- İlerlemeli Göçme Türleri
- Tasarım Yaklaşımları
- Bilimsel Çalışmalar
- Türkiye'deki Yapıların İlerlemeli Göçme Performansları

İlerlemeli Göçme (Progressive Collapse) nedir?

- Başlangıçtaki **lokal** bir hasarın elemandan elemana yayılması ve nihayetinde **tüm yapının** veya **orantısız derecede büyük bir bölümünün** göçmesiyle sonuçlanmasıdır [ASCE/SEI 7-22].
- Başlangıçtaki lokal hasar: kazalar, patlama, yangın, kasıtlı saldırılar, yanlış kullanım vb. gibi öngörülemeyen olaylar.



[Kaynak: fox9.com/news/suspected-drunk-driver-crashes-into-red-wing-landmark-causing-a-multi-story-collapse]

[Kaynak: britannica.com/event/Oklahoma-City-bombing]

İlerlemeli Göçme

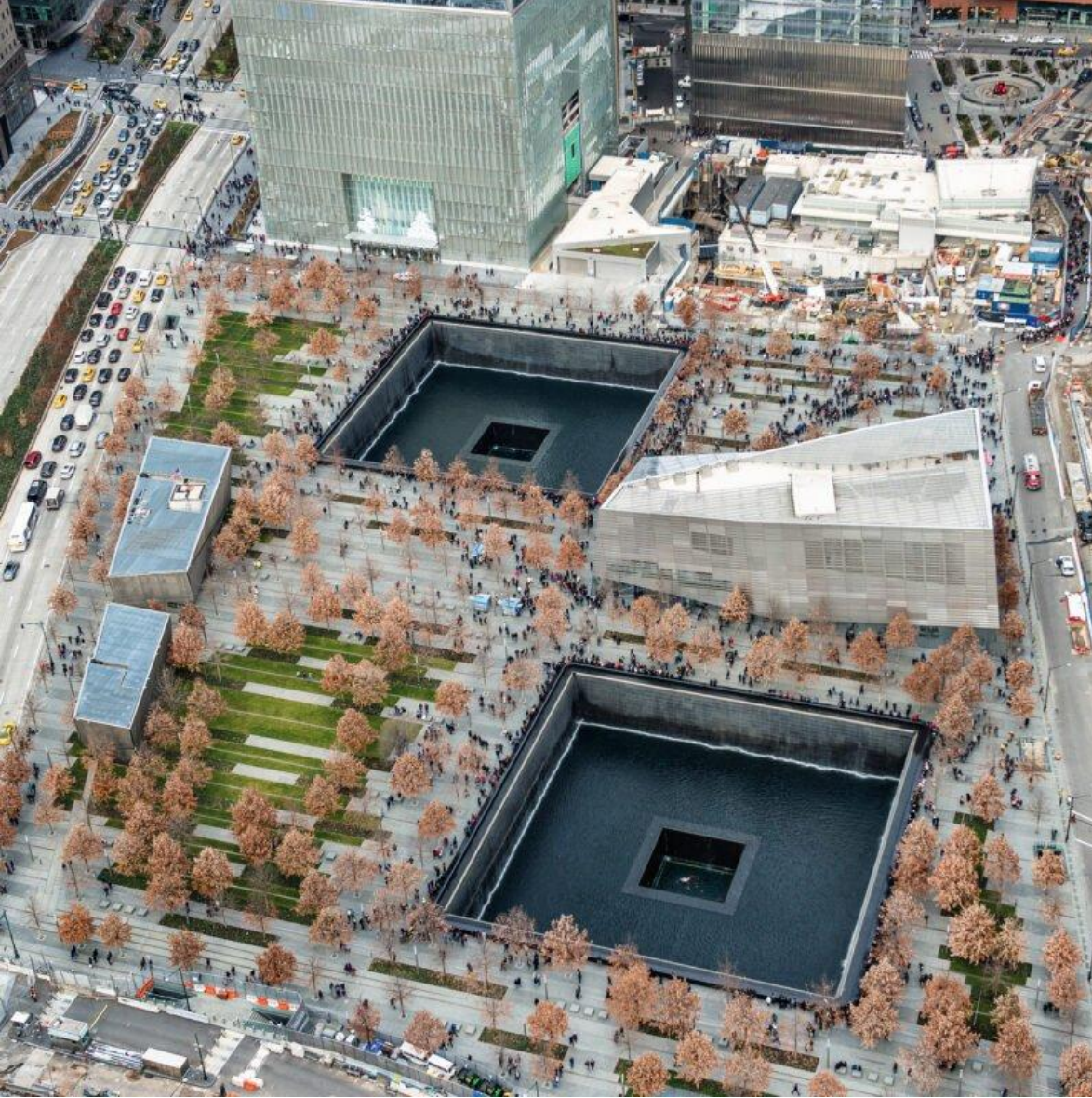


Ronan Point Apartment binası – İngiltere - 1698
[Kaynak: The Daily Telegraph, 1968]



Dünya Ticaret Merkezi - New York City - 11 Eylül 2001
[Kaynak: britannica.com/event/September-11-attacks]

İlerlemeli Göçme



Kaynak: travelawaits.com/2558893/moving-experiences-at-the-9-11-memorial-and-museum/



İllerlemeli Göçme



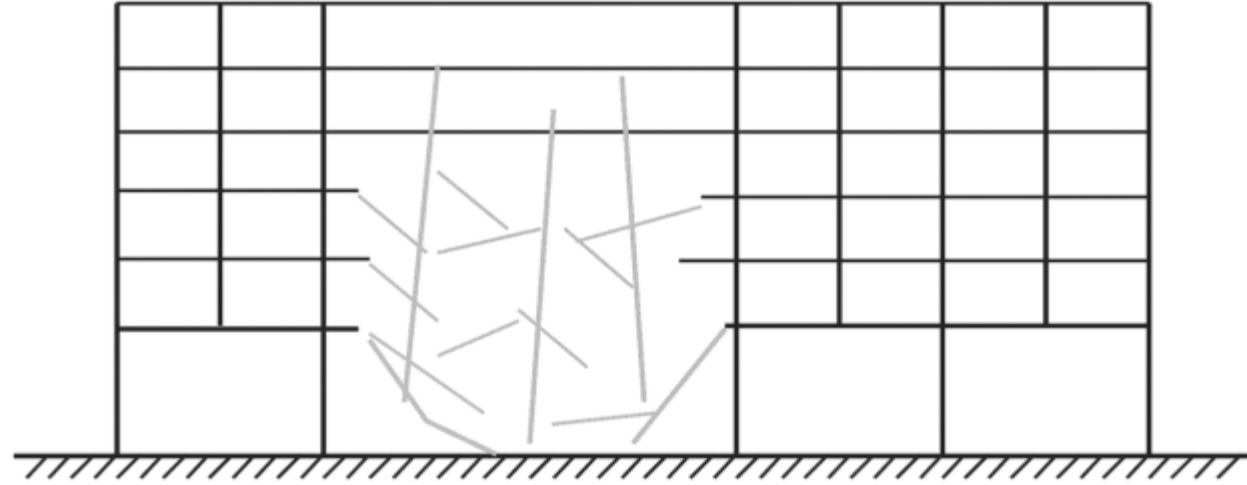
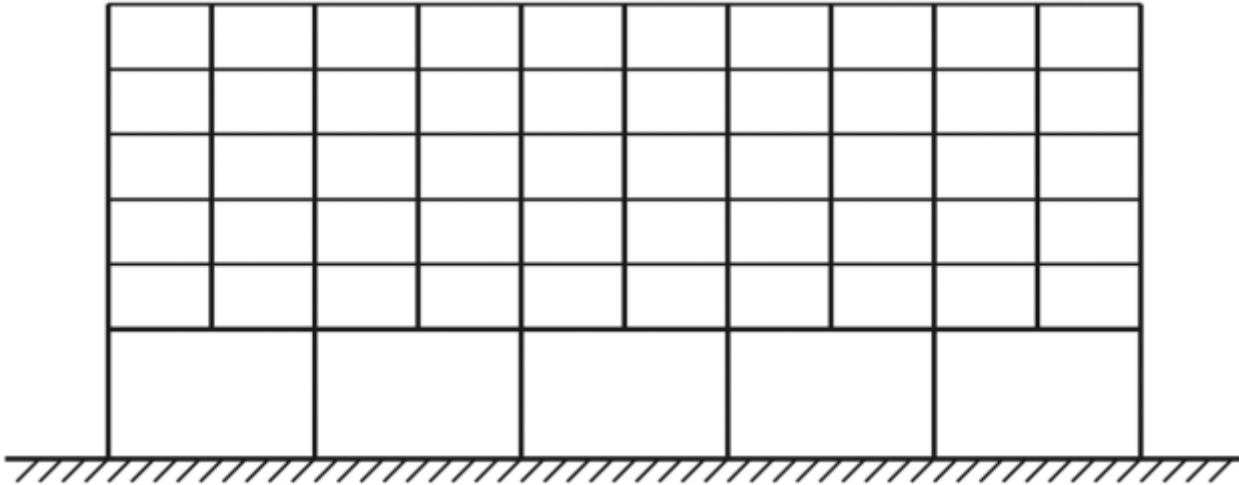
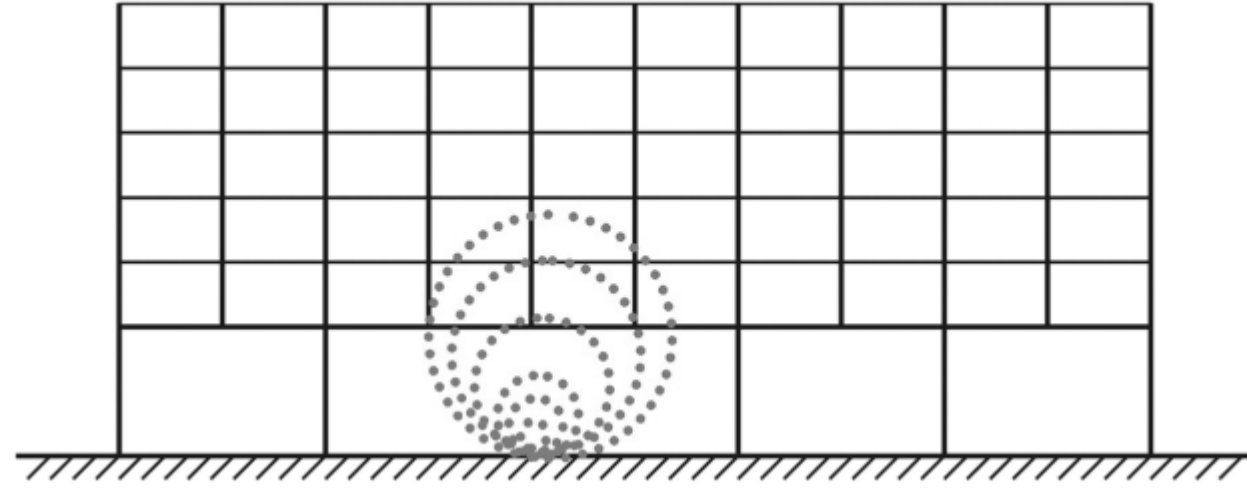
Kaynak: ceviiz.com/yasakonya-2004/



Kaynak: [aljazeera.c](http://aljazeera.com)



Kaynak: [youtube.com/watch?v=xcU8KIL8MI0](https://www.youtube.com/watch?v=xcU8KIL8MI0)



İlerlemeli Göçme Türleri:

- Pankek Tipi Göçme (Pancake-type collapse)
- Fermuar Tipi Göçme (Zipper-type collapse)
- Domino Tipi Göçme (Domino-type collapse)
- Kesit Tipi Göçme (Section-type collapse)
- Kararsızlık Tipi Göçme (Instability-type collapse)
- Karma Tip Göçme (Mixed-type collapse)

Pankek Tipi Göçme (Pancake-type collapse)

- Düşey yük taşıma kapasitesinin yerel olarak kaybedilmesiyle başlayan ve yapısal parçaların koparak **dikey** olarak düşmesiyle karakterize edilen göçme türüdür.
- Düşen parçaların yerçekimi **potansiyel enerjisi kinetik enerjiye dönüşerek** alttaki sağlam yapıya çarpar ve göçme dikey yönde, birbiri üstüne yığılan katlar şeklinde ilerler.

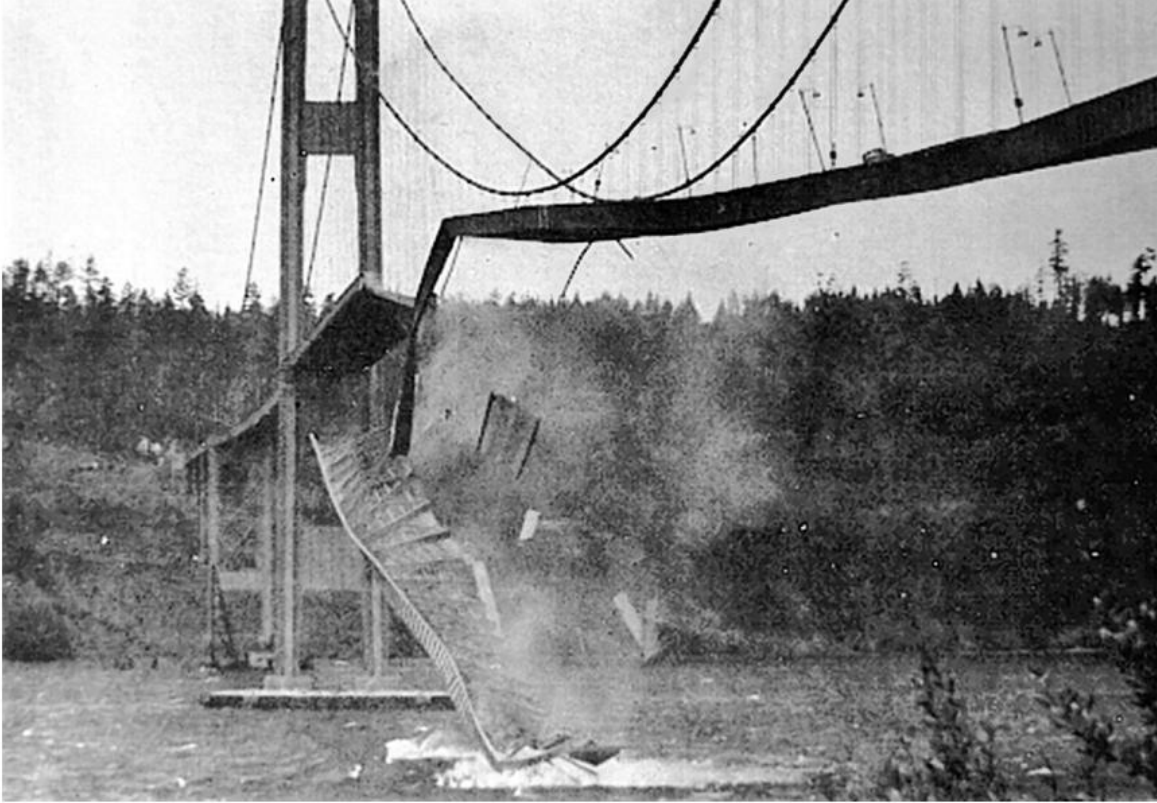


Dünya Ticaret Merkezi - New York City - 11 Eylül 2001
[britannica.com/event/September-11-attacks]



Fermuar Tipi Göçme (Zipper-type collapse)

- Yük taşıyan elemanların veya bölgelerin ilk **lokal hasarı** almasıyla başlar. Dayanımını kaybeden bu elemanların daha önce taşıdığı iç kuvvetler, anlık ve impulsif bir dinamik yüklemeye yapıdaki bitişik diğer elemanlara aktarılır.
- Bu durum bitişik elemanların da aşırı yüklenip göçmesine neden olur ve göçme tıpkı bir fermuarın açılması gibi genellikle yatay yönde ilerler
- Asma köprülerdeki veya eğik askılı köprülerdeki kablo kopmaları bu türün tipik örneklerindedir



Tacoma Narrows Bridge triggered by wind-induced vibrations
(Tacoma, WA, USA, 1940)



Partial collapse of Pipers Row Car Park triggered by punching shear failure
(Wolverhampton, UK, 1997).

Kaynak: Starossek (2017)

Domino Tipi Göçme (Domino-type collapse)

- Kısmen sabitlenmiş düşey elemanların (veya yapı bölümlerinin) hasar alarak devrilmesi ve düşerken kazandığı kinetik enerji ile yanındaki benzer bir elemana yanal olarak çarpmasıyla meydana gelir.
- Tıpkı dizilmiş dominoların yıkılması gibi, çarpmanın yarattığı yatay itme veya çekme kuvvetleri bir sonraki elemanı devirir ve göçme yatay yönde ilerler.



Yangın nedeniyle Trestle köprüsünün göçmesi
(Lampasas County, TX, USA, 2013).

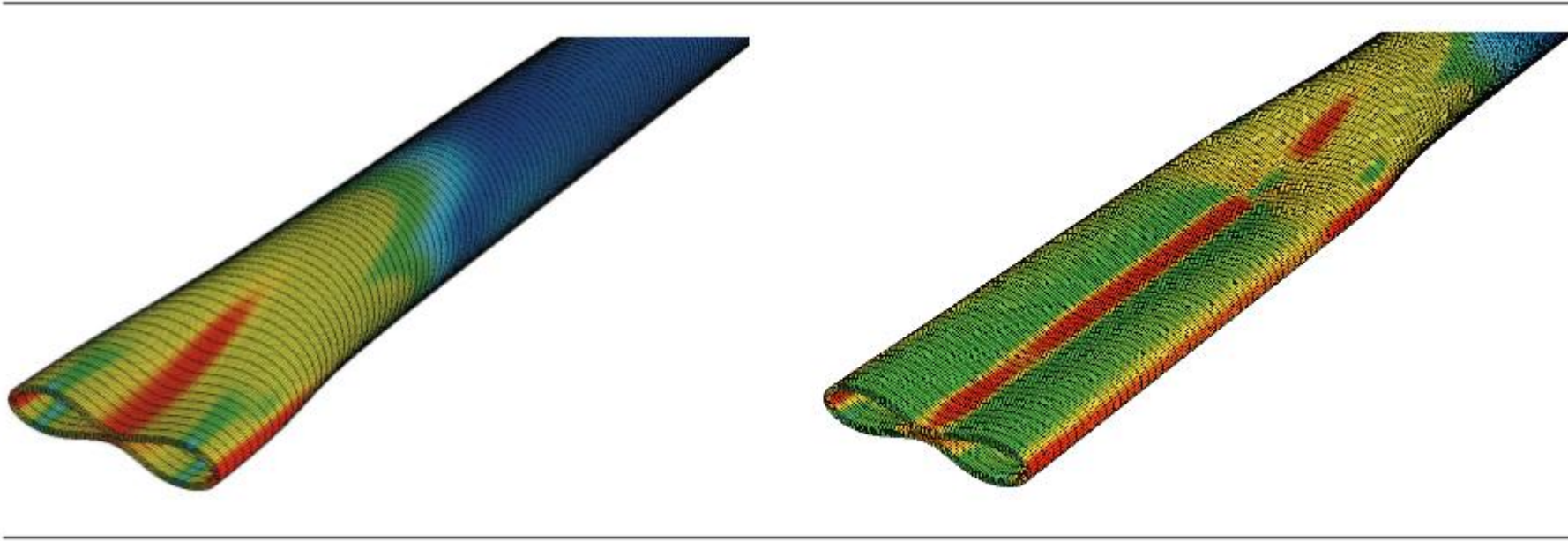


Enerji nakil hattının kar birikmesi nedeniyle göçmesi
(Münsterland, Germany, 2005)

Kaynak: Starossek (2017)

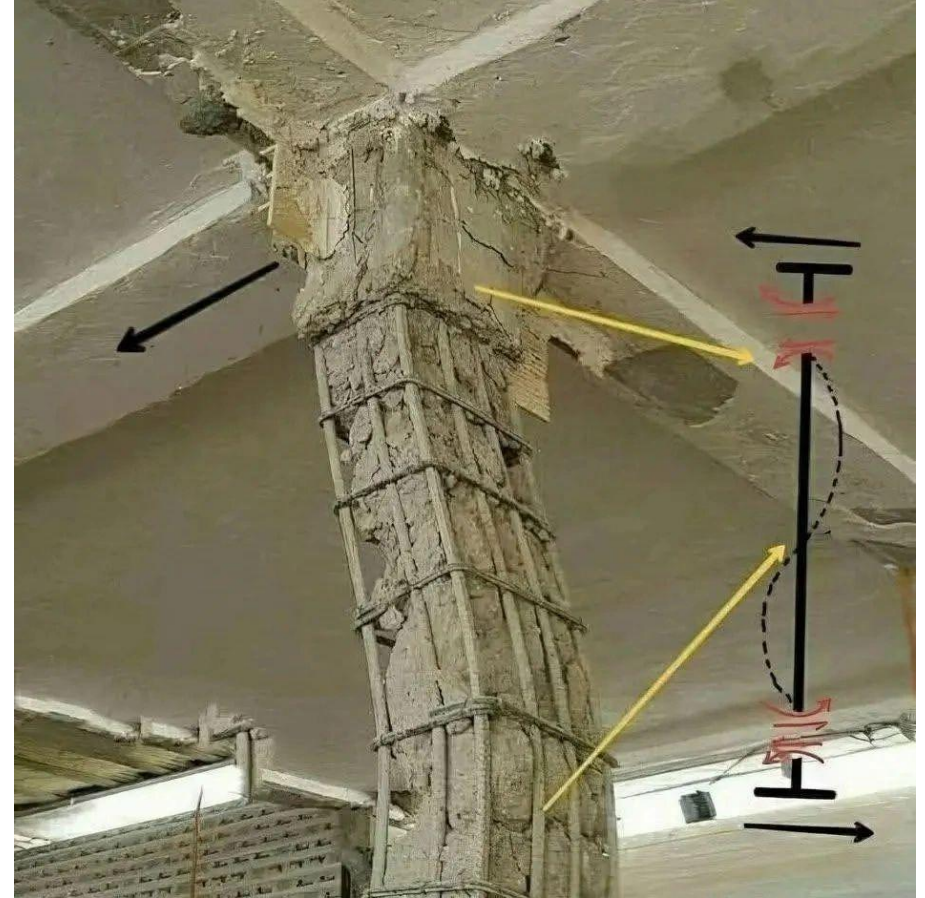
Kesit Tipi Göçme (Section-type collapse)

- Bir elemanın enkesitinin veya kabuk/shell gibi yapıların bir kısmının kesilmesi ya da hasar görmesi durumunda ortaya çıkar.
- O kısmın taşıdığı iç kuvvetler kalan enkesite aktarıldığında, stres doğrudan bitişik kısımlarda yoğunlaşır ve hasar tüm enkesit boyunca ilerleyerek kesitin tamamen kopmasına/hasar almasına yol açar.



Kararsızlık Tipi Göçme (Instability-type collapse)

- Basınç altındaki ana yük taşıyıcı elemanları (kolon vb.) stabilize eden destek veya rijitlik elemanlarının göçmesi sonucu oluşur.
- Destekleri ortadan kalkan basınç elemanları küçük yük artışı karşısında kararsız hale gelip burkularak göçer.
- Bu durum, ardışık elemanların kararsızlaşması ile yapıda sürekli bir ilerleme gösterebilir



Kaynak (sol): <https://fsel.engr.utexas.edu/research/spotlight/293-time-dependent-buckling>

Kaynak (sağ): https://www.linkedin.com/posts/mayoua-chouaibou-b58202306_construction-column-activity-7391574460102955008-ocRR/

Karma Tip Göçme (Mixed-type collapse)

- Yukarıda bahsedilen temel göçme türlerine ait özelliklerin aynı anda meydana geldiği, birbirleriyle etkileşime girdiği ve hatta göçmeyi hızlandırmak için birbirini güçlendirdiği karmaşık senaryolardır.
- Karma göçmelerin genellikle fermuar, kararsızlık veya domino tipi özellikler taşıyan yatay bir ilerleme bileşeni ve krep tipi veya kararsızlık tipi özellikler taşıyan dikey bir ilerleme bileşeni bulunur.



Sampoong Superstore, çatı döşemesinin zımbalaması (Seoul, South Korea, 1995)

Kaynak: Starossek (2017)

İlerlemeli Göçmeyi Tetikleyen Faktörler

İlerlemeli göçmeyi tetikleyen bu özellikler yapının kendisine değil, göçme mekanizmasına aittir.

- **Dinamik etki ve kuvvet yığılması:** Bir eleman göçtüğünde sıradaki eleman üzerinde oluşan kuvvet yığılması ve dinamik etkiler göçmenin ilerlemesini kolaylaştırır.
- **Gevrek malzeme davranışı:** Dinamik etki ve kuvvet yığılmaları, sıradaki elemanın malzemesi ne kadar gevrekse o kadar yıkıcı olur. Sünek malzemeler ise kinetik enerjiyi sönmüleyebildiği ve yük dağılımını daha dengeli yapabildiği için göçmeyi yavaşlatmada çok daha faydalıdır.
- **Rezerv/artık kapasite eksikliği:** Düşük dayanım veya rijitlik rezervine sahip yapılar, bir göçme başladığında ortaya çıkan anormal iç kuvvetleri ve stabilite kaybını tolere edemez ve göçmeyi kolaylaştırır.
- **Aşırı dayanım ve sünek malzeme davranışı:** Normalde faydalı olan süneklik ve aşırı dayanım bazı durumlarda (özellikle domino tipi göçmelerde) göçmeyi hızlandırabilir. Eğer aktarıcı bir eleman çok güçlü ve sünek ise kopmak yerine oluşan aşırı kuvveti bir sonraki elemana aktararak zincirleme bir yıkıma yol açar.
- **Süreklilik veya süreksizlik:** Süreklilik ve yüksek hiperstatiklik, yapıda alternatif yük yollarının oluşması için faydalıdır. Öte yandan süreksizlik, göçen kısımların yapıdan izole edilmesi amacıyla kullanılan yapısal bölütleme (segmentasyon) yöntemi için büyük bir avantajdır.

İlerlemeli Göçmeyi Tetikleyen Faktörler

- **Seri veya paralel yük aktarımı:** Seri yük aktarımı olan yapılar (örn. yüksek katlı binalar) tek bir elemanın bile kaybıyla tüm sistemin çökmesine neden olabileceği için istenmeyen bir durumdur. Paralel yük aktarımı alternatif yollar sağlasa da, bu yolların anlık yük artışına dayanacak kadar güçlü olmaması fermuar (zipper) tipi göçmeye yol açabilir.
- **Mekansal yönelim ve narinlik (Spatial orientation and slenderness):** Yapıların ana yönelimi göçme türünü belirler. Düşey hizalanmış yapılar (gökdelenler) "pankek (pancake) tipi" göçmeye yatkınken, yatay ekseninde hizalanmış yapılar (köprüler) "domino tipi" göçmeye yatkındır. Narinlik ise devrilme veya stabilite kaybı sonucu ortaya çıkan domino ve istabilite tipi göçmeleri tetikleyen önemli bir unsurdur.
- **Boyut ve aralık (Size and spacing):** İlerlemeli göçme riski yapının genel boyutu büyüdükçe artar. Elemanlar arası mesafelerin fazla olması da riski artırır; yatayda kolon açıklıklarının fazla olması alternatif yük yolları bulmayı zorlaştırırken, düşeyde kat aralıklarının yüksek olması kopan parçaların düşme yüksekliğini ve dolayısıyla çarpma kuvvetini artırır.
- **Düzensizlik (Irregularity):** Düzensiz yapısal yerleşimlere sahip binalarda alternatif yük yollarının bulunma ihtimali daha düşüktür. Düzenli açıklıklara sahip olmayan bir sistemde oluşan tek bir kolon hasarı bile, yandaki kolonlara beklenenden çok daha fazla yük bindirerek fermuar tipi bir ilerlemeli göçmeye neden olabilir.

Tasarım Yaklaşımları

Literatürde ilerlemeli göçme olasılığını azaltmak için iki genel yaklaşım tanımlanmıştır:

1. Doğrudan Tasarım (Direct Design) Yaklaşımı:

- Tasarım sürecinde ilerlemeli göçmeye karşı dayanımın açıkça dikkate alınmasını içerir.

2. Dolaylı Tasarım (Indirect Design) Yaklaşımı:

- İlerlemeli göçmeye karşı dayanım, “minimum dayanım, süreklilik ve süneklik düzeylerinin sağlanması” yoluyla dolaylı olarak ele alınır.
- ASCE 7, TBDY-2018, EUROCODE vb. yönetmeliklerde yapısal bütünlüğü artırmaya yönelik genel tasarım ilkeleri sunulmaktadır.

Doğrudan Tasarım Yaklaşımı:

Bu yöntemler, belirli tasarım hedeflerinden hareket eder ve genellikle yapısal analizlere dayanır.

1. Lokal Hasarın Önlenmesi (Tasarım Stratejisi 1)

1.1. Belirli lokal dayanımın artırılması

1.2. Koruyucu önlemler

2. Lokal Hasarın Varsayılması (Tasarım Stratejisi 2)

2.1. Alternatif yük yolları

2.2. Segmentasyon (bölümlendirme)

Tasarım Stratejisi 1, yapının **kritik** elemanlarında lokal güvenlik düzeyini artırmayı hedefler ve bu elemanların hasara karşı hassasiyetini azaltır.

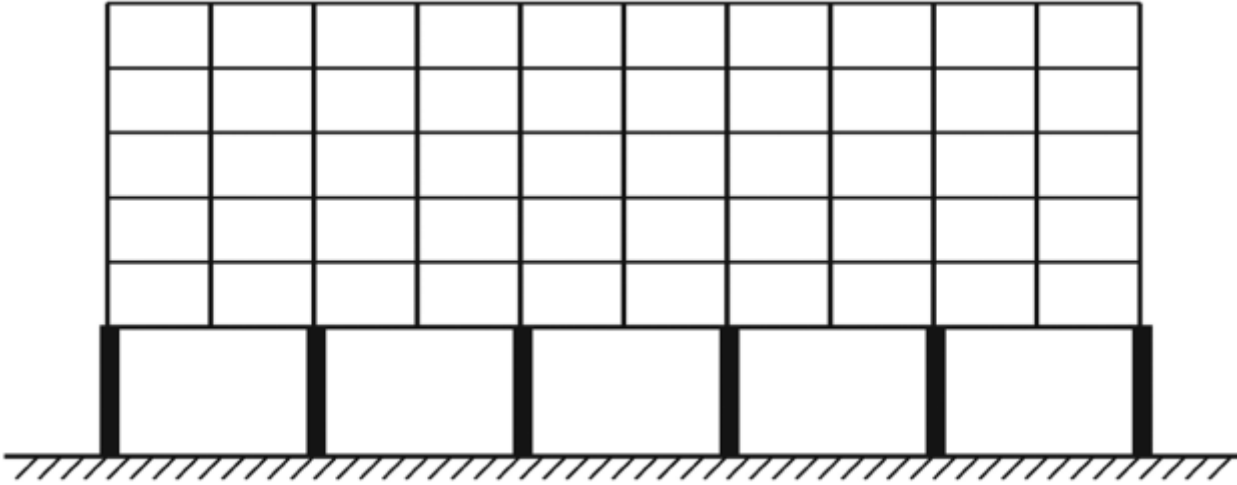
Tasarım Stratejisi 2 ise başlangıçta meydana gelen lokal bir hasarın varsayıldığı senaryolar altında, toplam hasarın doğrulanması ve sınırlandırılmasına dayanır.

Bu bağlamda, yalnızca **Tasarım Stratejisi 2**, bir yapının **göçmeye karşı dirençlilik** düzeyinin doğrulanmasını veya artırılmasını doğrudan hedefler.

Lokal Hasarın Önlenmesi

Bu strateji, "kritik elemanların" göçme güvenliğini artırarak hasarın başlamasını engellemeye odaklanır. İki ana yöntemi vardır:

- **Özel lokal Dayanım (Specific Local Resistance):** Kilit taşıyıcı elemanların, patlama veya çarpma gibi belirlenmiş olağandışı etkilere (abnormal actions) dayanacak şekilde ekstra güçlü tasarlanmasıdır.
- **Koruyucu Önlemler (Protective Measures):** Özel yerel dayanım sağlamanın zor veya maliyetli olduğu durumlarda, tehlikeyi yapıya ulaşmadan bertaraf eden güvenlik önlemleridir. Araç girişini engelleyen bariyerler, yapıyla tehlike arasında bırakılan güvenlik mesafeleri veya koruyucu elemanlar kullanılması bu yöntem girer.



Lokal Hasarın Varsayılması

Kritik elemanların mutlak güvenliğinin sağlanamayacağı veya maliyetinin aşırı yüksek olacağı durumlarda, elemanın hasar göreceği baştan varsayılır. Amaç, bu hasar sonrası yapının vereceği tepkiyi kontrol ederek toplam hasarı kabul edilebilir bir sınırdan tutmaktır. İki yöntemi vardır:

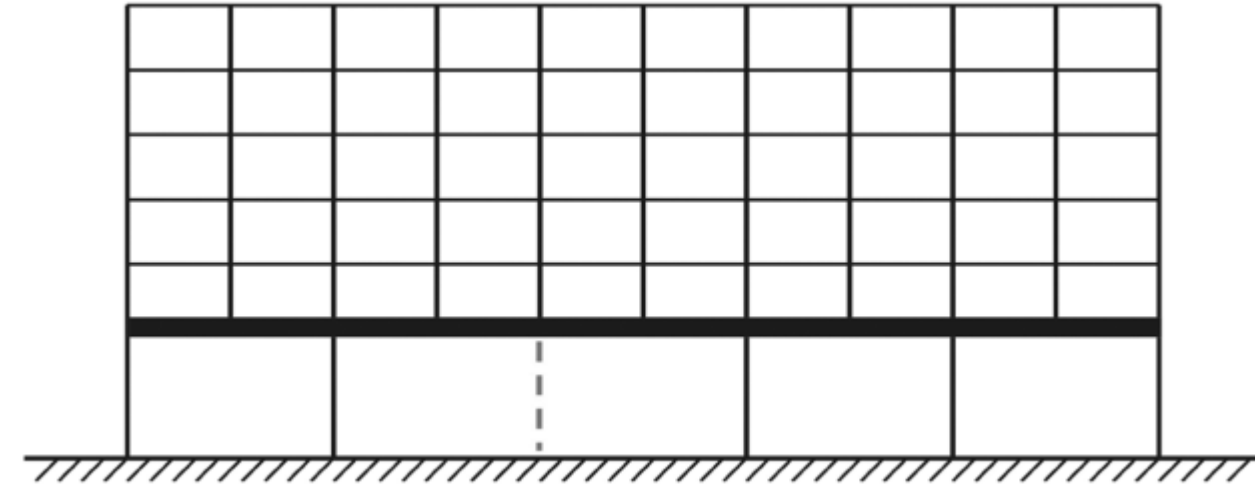
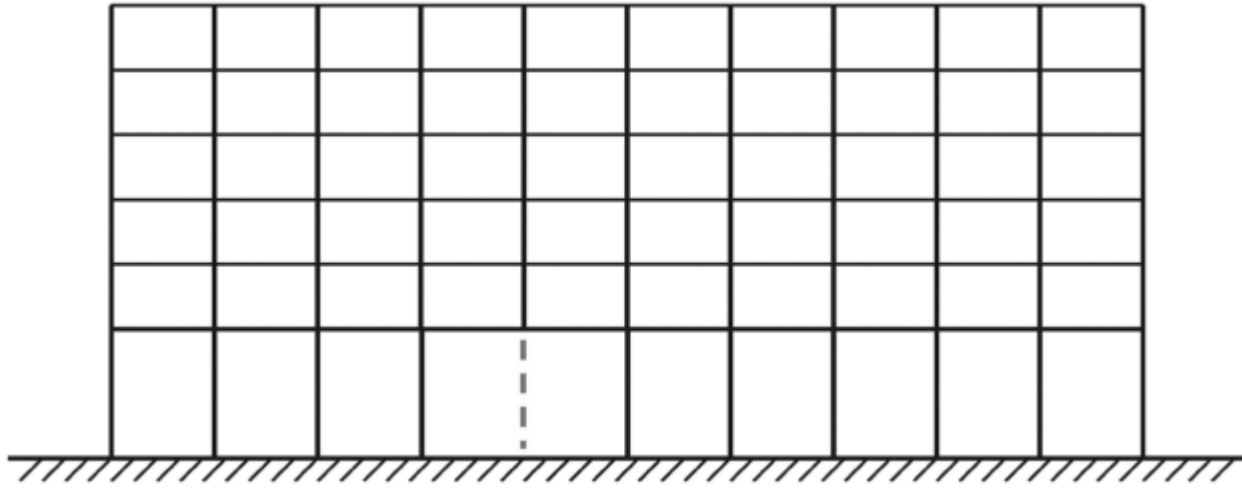
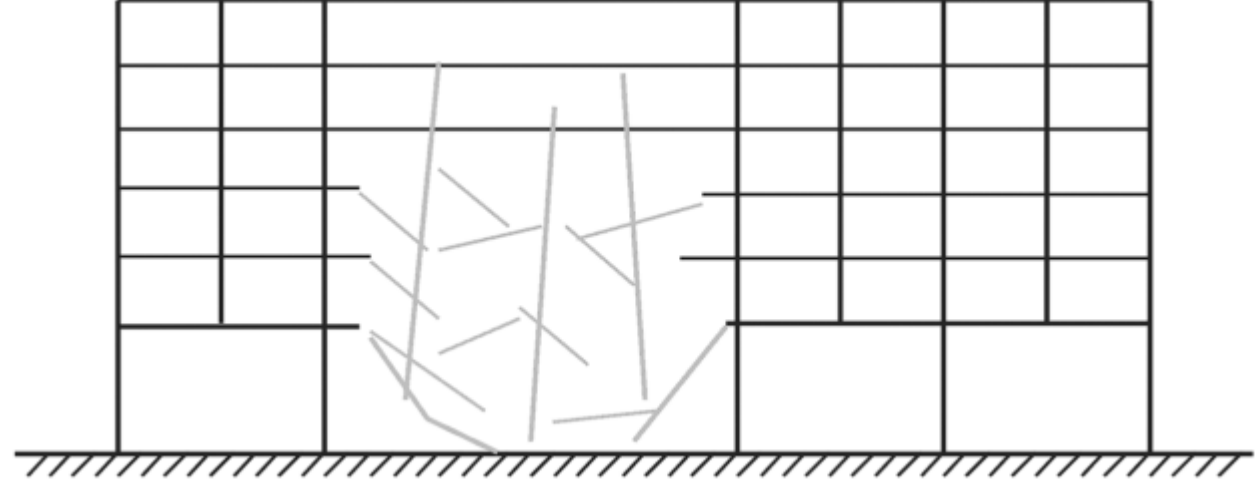
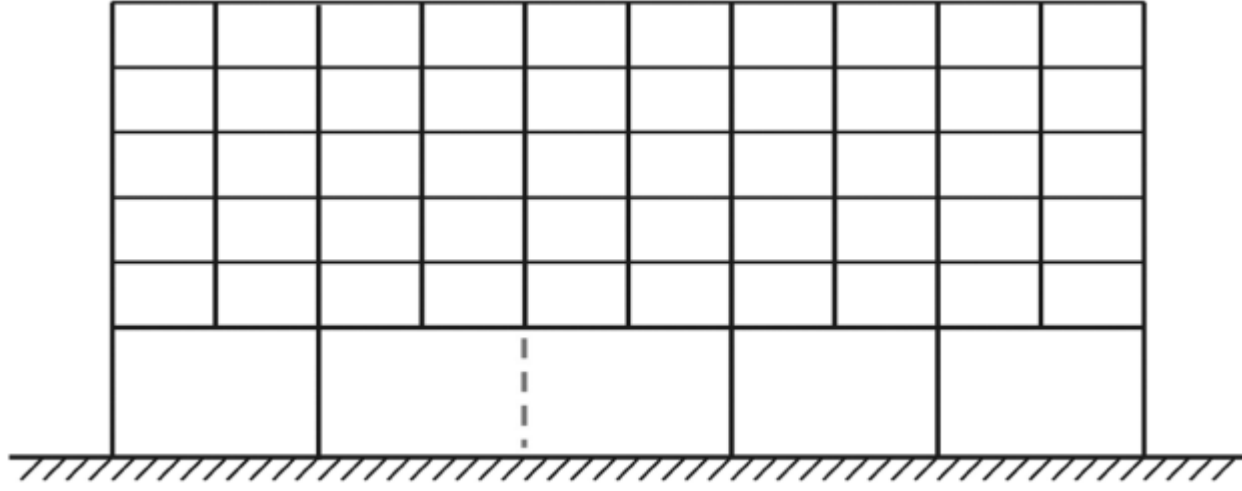
1. Alternatif Yük Yolları (Alternative Load Paths):

- Hasar gören elemanın taşıdığı kuvvetlerin yapının geri kalanına dağıtılabilmesi için yapıda yedekli (redundant) yollar oluşturulmasıdır.
- Bu yöntem, kuvvet aktarımında sürekli bir yapı gerektirir ve eğilme yük aktarımının çekme yük aktarımına (katenary etki / membran etki) dönüşmesi gibi plastik rezervlerin ve olağandışı yük aktarım mekanizmalarının seferber edilmesini kapsar.

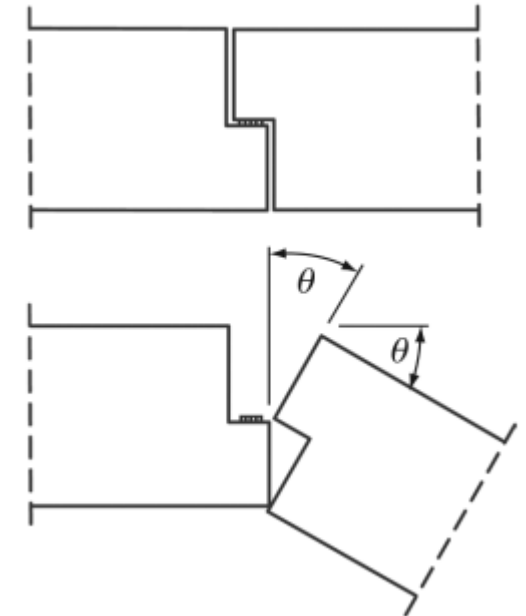
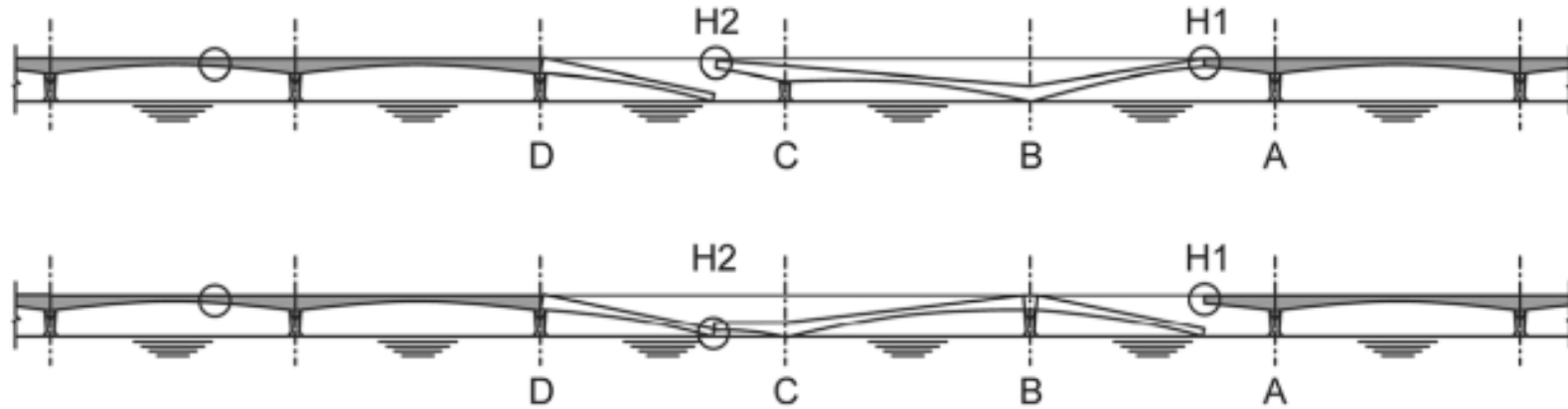
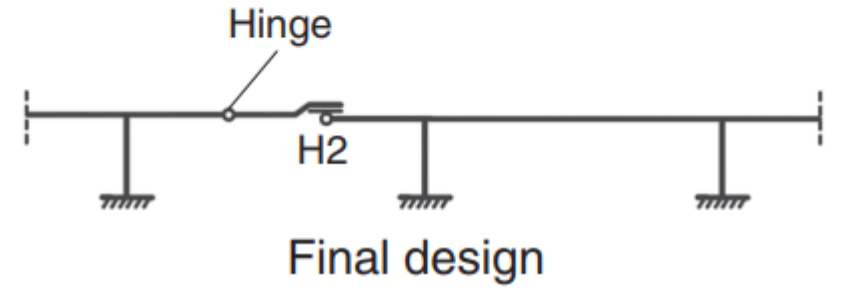
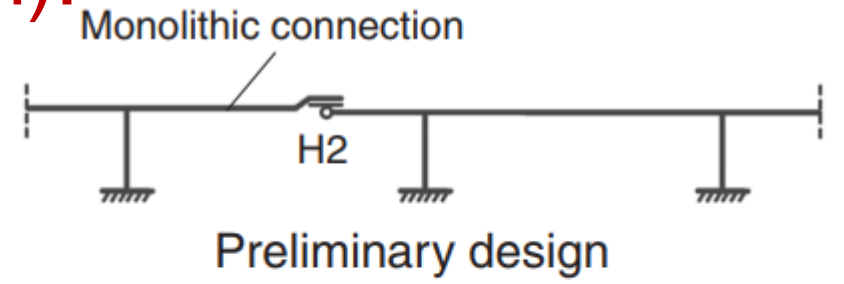
2. Bölümleme/Segmentasyon (Segmentation):

- Yapının, ilerleyen bir göçmeyi kendi içinde hapsedecek ve diğer kısımlara yayılmasını önleyecek şekilde yalıtıcı sınırlarla (segment borders) bölümlere ayrılmasıdır.
- Yalıtıcı elemanlar üç farklı mekanizmayla çalışabilir:
 - Büyük kuvvetlere dayanacak kadar güçlü tasarlanırlar (yüksek yerel dayanım),
 - Yapısal süreklilik bilinçli olarak kesilerek (örneğin mafsallar veya genişleme derzleri eklenerek) büyük deformasyonlara izin verilir,
 - Yüksek süneklik ile enerjinin sönmülmesi sağlanır.

Alternatif Yük Yolları (Alternative Load Paths):



Bölümleme/Segmentasyon (Segmentation):



Tasarım Karşılaştırması ve Strateji Seçimi

- **Güvenilirlik ve Maliyet:** "Lokal Hasarı Varsayan" yöntemler (Strateji 2), tehlikenin türünden veya patlamanın büyüklüğünden (olağandışı olayın ne olduğundan) bağımsız olduğu için genellikle daha güvenilir ve uygun maliyetli kabul edilir.
- **Seçim Kriterleri:** Sürekliliği artırarak alternatif yük yolları sağlamak küçük çaplı hasarlarda çok etkiliyken, büyük çaplı olağandışı olaylarda (büyük boyutlu ilk hasarlarda) artan bu süreklilik yapının geri kalanını da aşağı çekebilir. Çok geniş çaplı hasar riski taşıyan durumlarda veya uzun açıklıklı köprülerde "Bölümleme/Segmentasyon" daha etkili bir yaklaşımdır.
- **Uygulanabilirlik:** Alternatif yük yolu veya segmentasyon yaratmanın mimari ve statik açıdan olanaksız olduğu yapılarda (örneğin çok yüksek narin gökdelenlerin ana taşıyıcıları) "Lokal Hasarı Önleme" (Strateji 1) yöntemleri mecburidir.
- **Karma Kullanım:** Tasarımda bu yöntemler birbirini dışlamaz; küçük olaylar için "Özel Lokal Dayanım", orta çaplılar için "Alternatif Yük Yolları" ve en kötü senaryolar için "Segmentasyon" aynı projede bir arada kullanılabilir.

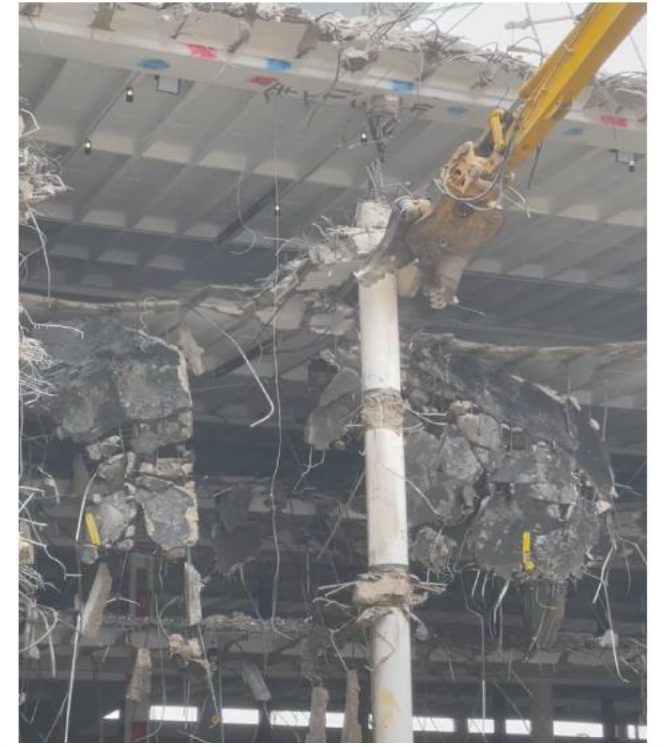
Bilimsel Çalışmalar



Kaynak: Xiao et al , 2015



Kaynak: Sagioglu (2012)

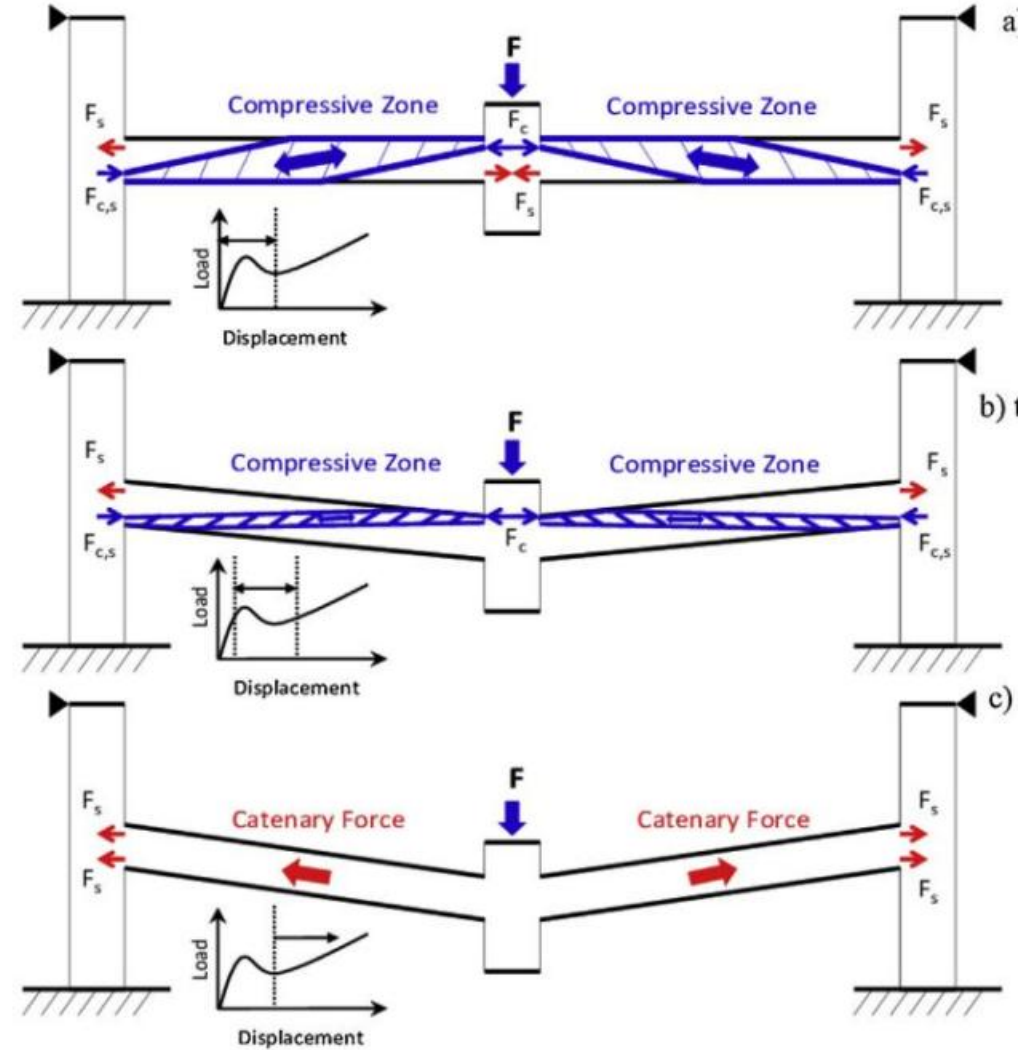
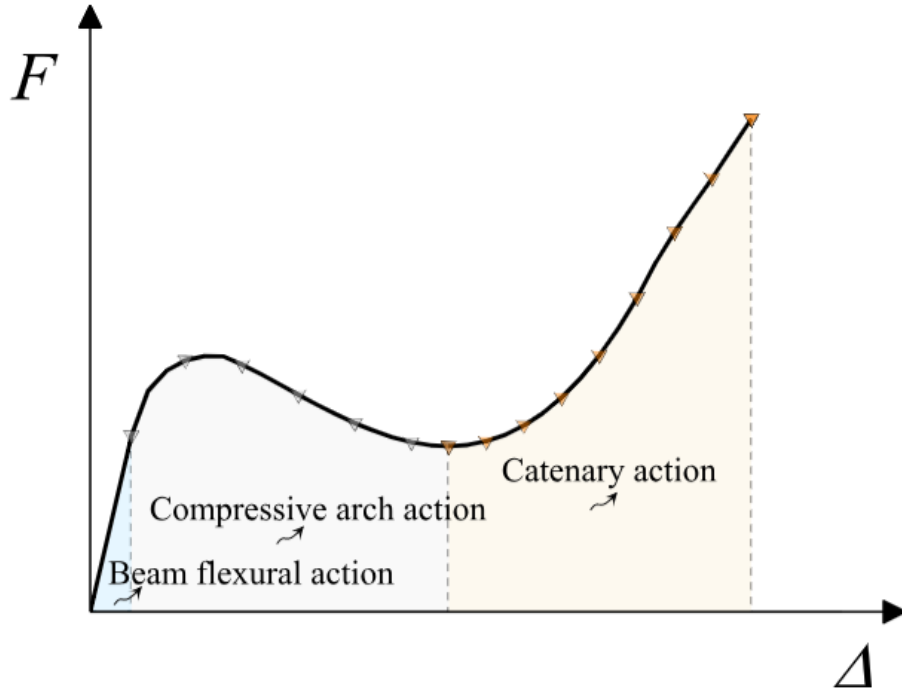


Kaynak: Song & Sezen (2013)

Yük Aktarım Mekanizmaları (Load Transfer Mechanisms)

Bir orta kolonun ani kaybı, düşey yük taşıma yolunun kesintiye uğramasına neden olur ve sistemin alternatif yük yolları üzerinden yeniden dengeye gelmesini gerektirir. Bu durumda devreye giren başlıca mekanizmalar:

1. Kiriş Eğilme (Flexural Action) Mekanizması
2. Vierendeel (Çerçeve) Mekanizması
3. Katenary (Zincirleme/Askı) Mekanizması
4. Döşeme Membran (Membrane) Etkisi
5. İkincil Elemanların Katkısı



Doğrudan Tasarım Yaklaşımı:

UFC 4-023-03
14 July 2009
Change 4, 10 June 2024

UNIFIED FACILITIES CRITERIA (UFC)

DESIGN OF BUILDINGS TO RESIST PROGRESSIVE COLLAPSE



APPROVED FOR PUBLIC RELEASE; DISTRIBUTION UNLIMITED



GENERAL SERVICES ADMINISTRATION ALTERNATE PATH ANALYSIS & DESIGN GUIDELINES FOR PROGRESSIVE COLLAPSE RESISTANCE



OCTOBER 24, 2013
REVISION 1, JANUARY 28, 2016

APPROVED FOR PUBLIC RELEASE;
DISTRIBUTION UNLIMITED

ASCE STANDARD

ASCE/SEI

76-23

Standard for Mitigation of Disproportionate Collapse Potential in Buildings and Other Structures

Downloaded from ascelibrary.org by UCLA Digital Call Services on 09/22/24. Copyright ASCE. For personal use only; all rights reserved.

ASCE
AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS



Doğrudan Tasarım Yaklaşımı:

Doğrudan Tasarım, “tasarım sürecinde ilerlemeli göçmeye karşı dayanımın açıkça dikkate alınmasını” içerir. Bu kapsamda:

Bağ Kuvvetleri (Tie Forces) Yöntemi:

Döşeme veya çatı sisteminin belirli bir çekme kuvveti kapasitesine sahip olmasını sağlayarak, hasarlı bölgedeki yüklerin hasarsız bölgelere aktarılmasına imkân verir.

Alternatif Yük Yolu (Alternate Path – AP) Yöntemi:

Yapının, herhangi bir taşıyıcı elemanın kaybı durumunda yükü alternatif yollarla taşıyabilmesini ve oluşan hasarın lokal kalmasını gerektirir.

Arttırılmış Lokal Dayanım (Enhanced Local Resistance - ELR) Yöntemi:

Yapının veya belirli bölümlerinin, tanımlı bir yük veya tehdit etkisine karşı yeterli dayanımı sağlamasını gerektirir. Çevre kolonları ve perdelerin kesme ve eğilme dayanımlarının artırılmasıyla, başlangıç hasarının oluşma olasılığı ve yayılma etkisi azaltılır.

Doğrudan Tasarım Yaklaşımı:

Hem yeni hem de mevcut yapılar için ilerlemeli göçmeye karşı tasarım düzeyi, yapının **Risk Kategorisi (RC)** esas alınarak belirlenir.

Belirli bir yapı için **Risk Kategorisi (RC)**, yapıya en yakın durumu temsil eden Tablo 2-1 kullanılarak belirlenmelidir. Risk kategorisi, **UFC 3-301-01 Structural Engineering** dokümanındaki tanımlara dayanmaktadır.

RC seviyesi, ilerlemeli göçme durumunda ortaya çıkabilecek sonuçların bir göstergesi olarak değerlendirilebilir ve iki ana faktöre bağlıdır:

- **Yapının kullanım yoğunluğu** (occupancy level)
- **Yapının fonksiyonu veya kritikliği** (function / criticality)

Table 2-1. Risk Categories

Nature of Occupancy	Risk Category ^c
<ul style="list-style-type: none">• Buildings in Risk Category I in Table 2-2 of UFC 3-301-01. /1/• Low Occupancy Buildings^A	I
<ul style="list-style-type: none">• Buildings in Risk Category II in Table 2-2 of UFC 3-301-01. /1/• Inhabited buildings with less than 50 personnel, primary gathering buildings, billeting, and high occupancy family housing^{A,B}	II
<ul style="list-style-type: none">• Buildings in Risk Category III in Table 2-2 of UFC 3-301-01. /1/	III
<ul style="list-style-type: none">• Buildings in Risk Category IV in Table 2-2 of UFC 3-301-01. /1/• Buildings in Risk Category V in Table 2-2 of UFC 3-301-01. /1/	IV

Doğrudan Tasarım Yaklaşımı:

Risk Kategorileri ve Tasarım Gereksinimleri

Risk Kategorisi (RC)	Tasarım Gereksinimi
I	Özel bir gereksinim yoktur.
II	Seçenek 1: Tüm yapı için Bağ Kuvvetleri (TF) ve birinci kattaki köşe ve bir içteki (penultimate) kolonlar veya perdeler için Geliştirilmiş Yerel Dayanım (ELR) uygulanır. VEYA Seçenek 2: Belirlenen kolon ve perde kaldırma senaryoları için Alternatif Yük Yolu (AP) yöntemi uygulanır.
III	Belirlenen kolon ve perde kaldırma senaryoları için Alternatif Yük Yolu (AP) yöntemi ve birinci kattaki tüm çevre kolonları veya perdeler için Geliştirilmiş Yerel Dayanım (ELR) uygulanır.
IV	Tüm yapı için Bağ Kuvvetleri (TF) ve belirlenen kolon ve perde kaldırma senaryoları için Alternatif Yük Yolu (AP) yöntemi ve birinci kattaki tüm çevre kolonları veya perdeler için Geliştirilmiş Yerel Dayanım (ELR) uygulanır.

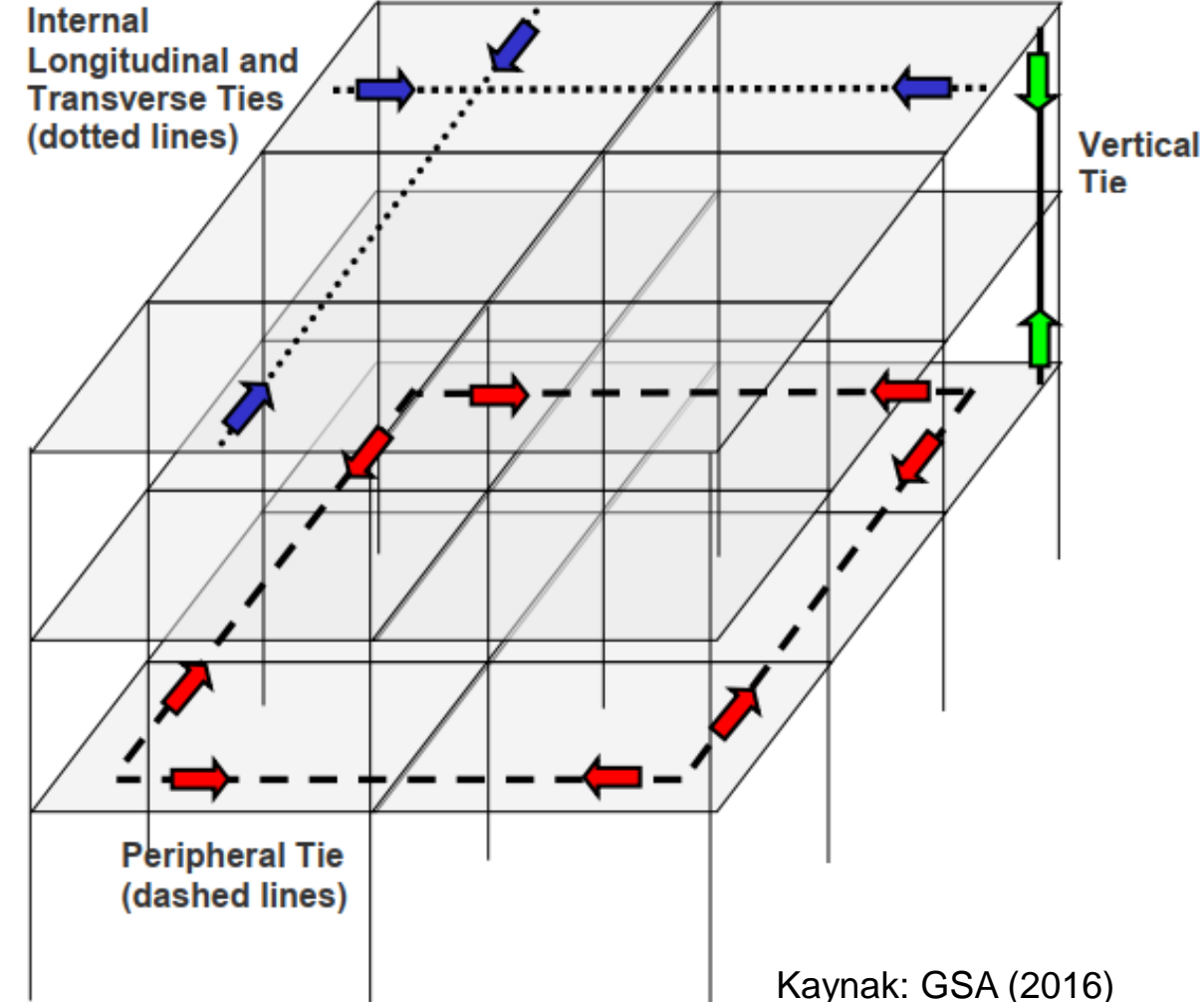
Doğrudan Tasarım Yaklaşımı: Bağ Kuvvetleri (Tie Forces)

Bağ Kuvveti yaklaşımında yapı, mekanik olarak birbirine bağlanarak süreklilik, süneklik ve alternatif yük yollarının oluşumu artırılır. Bağ kuvvetleri, yapıya etkiyen standart yükleri taşımak üzere geleneksel tasarım yöntemleriyle boyutlandırılmış mevcut taşıyıcı elemanlar tarafından sağlanabilir.

Sağlanması gereken üç adet yatay bağ bulunmaktadır:

- Boyuna (longitudinal) bağlar
- Enine (transverse) bağlar
- Çevresel (peripheral) bağlar

Buna ek olarak, kolonlar ve taşıyıcı duvarlar içerisinde düşey bağlar da gereklidir.



Doğrudan Tasarım Yaklaşımı: Alternatif Yük Yolu (Alternate Path)

Bu Yöntemde, tasarımcı yapının kaldırılan bir kolon veya duvar parçası üzerinden yükü aktarabilecek (köprüleyebilecek) kapasitede olduğunu ve oluşan deformasyonların ile iç kuvvetlerin hasar sınır kriterlerini aşmadığını göstermek zorundadır.

Bu amaçla üç analiz yöntemi kullanılmasına izin verilir:

- Doğrusal Statik Analiz
- Doğrusal Olmayan Statik Analiz
- **Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz**

Alternatif Yük Yolu (Alternate Path): Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz Yöntemi

- Bir yapıyı modellemek, analiz etmek ve değerlendirmek için, üç boyutlu bir eleman ve bileşen montajı kullanılır.
- Malzeme ve geometrik doğrusal olmama durumları dikkate alınır.
- Ani eleman kaldırma senaryosu uygulanır.
- Dinamik etkiler (atalet, sönüm) doğrudan hesaba katılır.
- Birincil taşıyıcı bileşenlerin rijitliği ve dayanımı modele dâhil edilir. İkincil bileşenlerin modele dahil edilmesi isteğe bağlıdır.
- Her bir bileşenin yük–şekil değiştirme davranışı, elemanın boyu boyunca ayırıklaştırılarak doğrusal olmayan davranışın ortaya çıkacağı bölgeler belirlenir. Tüm bileşenlerin kuvvet–yer değiştirme davranışı, varsa dayanım azalması ve artık dayanım da dahil olmak üzere açık şekilde modellenmelidir.
- Zaman tanım alanında analiz yapılır.
- P-delta etkileri dikkate alınır.

Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz Yöntemi: Yükler

Şekil değiştirme kontrollü ve kuvvet kontrollü etkilerin hesaplanabilmesi için, aşağıdaki düşey yükler uygulanır.

Tüm Yapı İçin Düşey Yükler:

$$G_{ND} = 1.2D + (0.5L \text{ veya } 0.2S)$$

Burada:

D = Cephe yükleri dâhil ölü yük

L = Azaltılmış hareketli yük dâhil hareketli yük.

S = Kar yükü

Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz Yöntemi: Yükleme Prosedürü

- Sıfır yük durumundan başlanarak, tüm modele etki eden **düşey yükler** monotonik ve orantılı şekilde artırılır (yani kolon veya duvar bölümü henüz kaldırılmamış durumdadır) ve **denge sağlanıncaya kadar** yükleme devam ettirilir.
- Çerçevesel ve taşıyıcı duvar sistemlerinde denge sağlandıktan sonra, **kolon veya duvar bölümü sistemden kaldırılır**. Kolon veya duvar bölümünün anlık olarak kaldırılması tercih edilmekle birlikte, kaldırma süresi; kaldırılan kolonun üzerindeki katların düşey doğrultudaki **yapısal tepki moduna karşılık gelen periyodun onda birinden daha küçük** olmalıdır. Bu periyot, kolon veya duvar bölümü kaldırıldıktan sonra oluşturulan analitik model üzerinden belirlenir.
- Analizin süresi, ya **maksimum yer değiştirme değerine ulaşılan** kadar ya da kolon/duvar kaldırma noktasında bir **düşey titreşim çevrimi tamamlanana** kadar sürdürülür; bu iki durumdan hangisi daha büyük süre gerektiriyorsa o esas alınır.

Taşıyıcı Sistem Elemanlarının Kaldırma Konumu

Binanın kısa kenarının orta bölgesine yakın, uzun kenarının orta bölgesine yakın, bina köşesinde ve köşeye komşu (yani sondan bir önceki) konumlarda yer alan dış kolonlar kaldırılır. Bu yerleşim, Şekil 3.9'da gösterilmiştir.

Yer altı otoparkı veya kontrolsüz kamu erişimine açık alanları bulunan yapılarda, kontrolsüz alan içinde yer alan iç kolonlar; kısa kenarın orta bölgesine yakın, uzun kenarın orta bölgesine yakın ve kontrolsüz alanın köşe noktasında olacak şekilde kaldırılır.

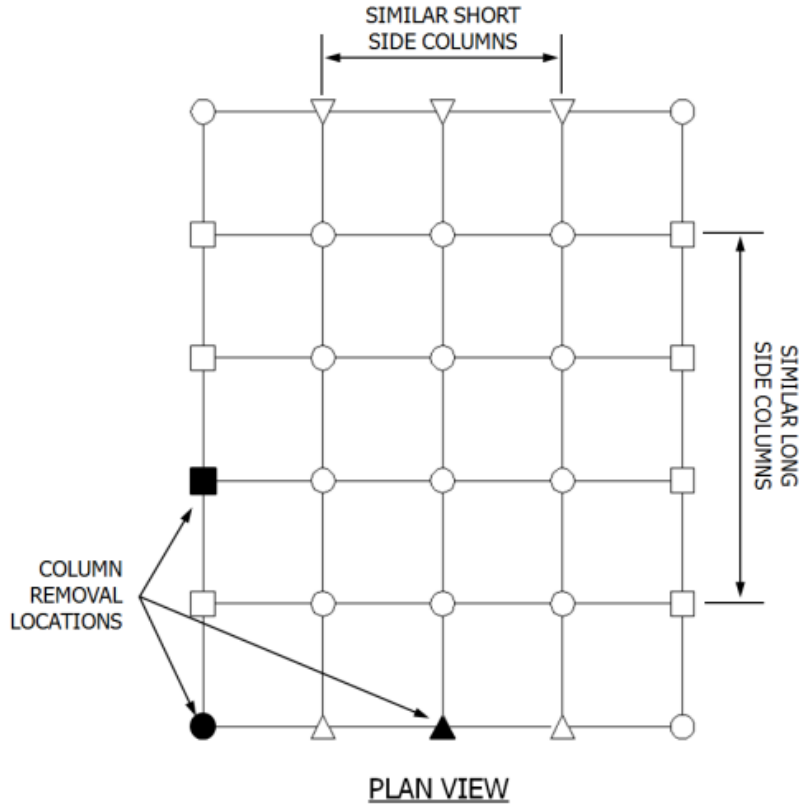


Figure 3.9. Location of External Column Removal

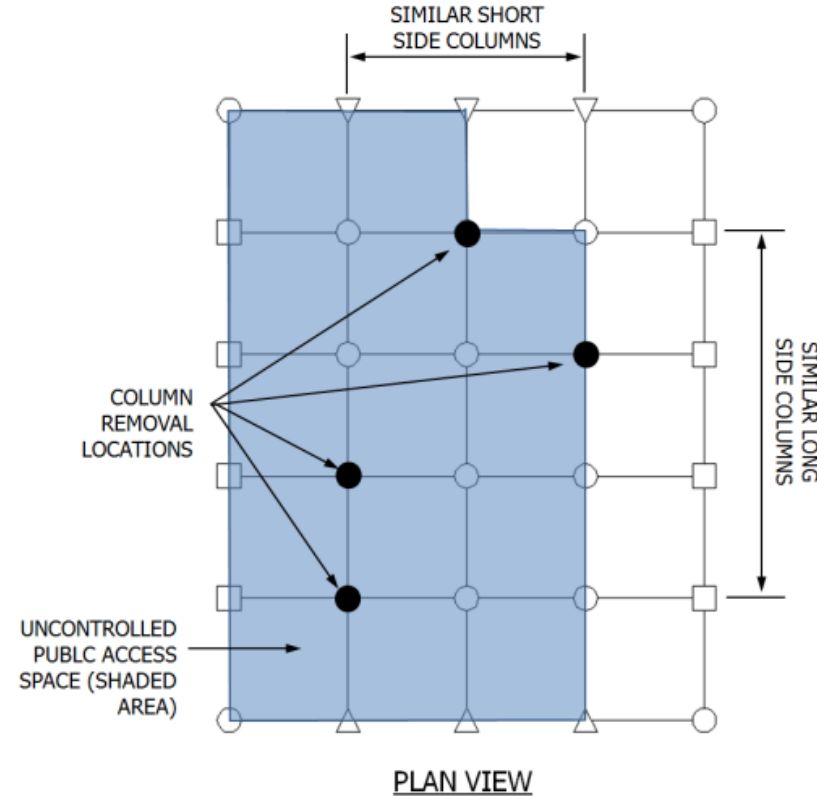


Figure 3.10. Location of Internal Column Removal

Yapısal Hasar ve Performans Kontrolü

Yapının değerlendirilmesi, doğrusal olmayan analiz sonuçlarına bağlı olarak eleman ve sistem performansının belirli limit durumları karşılayıp karşılamadığı esasına dayanır.

1. Şekil Değiştirme Kontrollü Elemanlar

Birincil ve ikincil elemanların beklenen şekil değiştirme kapasiteleri, analizden elde edilen maksimum şekil değiştirme taleplerinden büyük olmalıdır. Tüm eşzamanlı kuvvet ve deformasyon etkileri dikkate alınarak tanımlanan kapasite sınırları aşılmamalıdır.

2. Kuvvet Kontrollü Elemanlar

Kuvvet kontrollü etkiler için aşağıdaki şart sağlanmalıdır:

$$\Phi Q_{CL} \geq Q_{UF}$$

Burada analizden elde edilen kuvvet talepleri, elemanların alt sınır dayanım kapasitesini (uygun dayanım azaltma katsayıları ile birlikte) aşmamalıdır.

3. Bağlantılar ve Yerel Davranış

Bağlantılar, bağlı oldukları elemanlara göre daha düşük dayanım veya sünekliğe sahipse ya da bağlantı rijitliğinin sistem davranışına etkisi %10'dan fazla ise, bağlantılar ayrıca açık şekilde modellenmeli ve yerel kabul kriterlerine göre değerlendirilmelidir.

4. Sistem Düzeyi Performans ve Göçme Sınırları

Yapısal sistem, yerel veya ilerleyici göçmeye yol açacak orantısız hasar mekanizmaları geliştirmemelidir. Taşıyıcı bir elemanın kaybı durumunda oluşan göçme alanı, tanımlanan sınır yüzdeleri (dış ve iç durumlar için sırasıyla %15 ve %30) aşmamalıdır.

5. Genel Stabilite ve Süreklilik

Analiz süresince yapının global stabilitesi korunmalı, ani rijitlik kayıpları veya kontrolsüz yer değiştirme artışları gözlenmemelidir. Sistem, yüklerin yeniden dağıtılmasına izin verecek şekilde alternatif yük yolu oluşturabilmelidir.

Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz Yöntemi: Bina Performansı

Analiz süresince yapının **global stabilitesi korunmalı**, ani **rijitlik kayıpları** veya **kontROLSÜZ yer değiştirme artışları** gözlenmemelidir. Sistem, yüklerin yeniden dağıtılmasına izin verecek şekilde alternatif yük yolu oluşturabilmelidir.

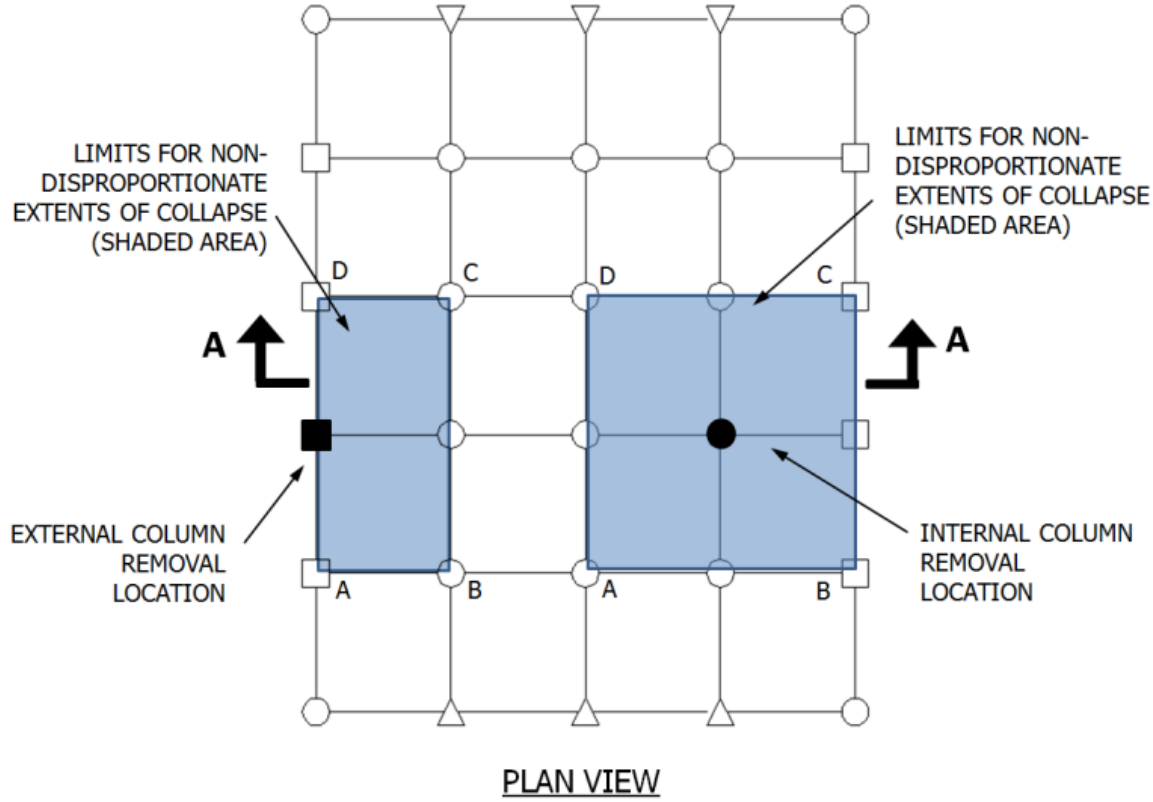


Figure 3.13. Allowable Extents of Collapse for Interior and Exterior Column Removal in Plan

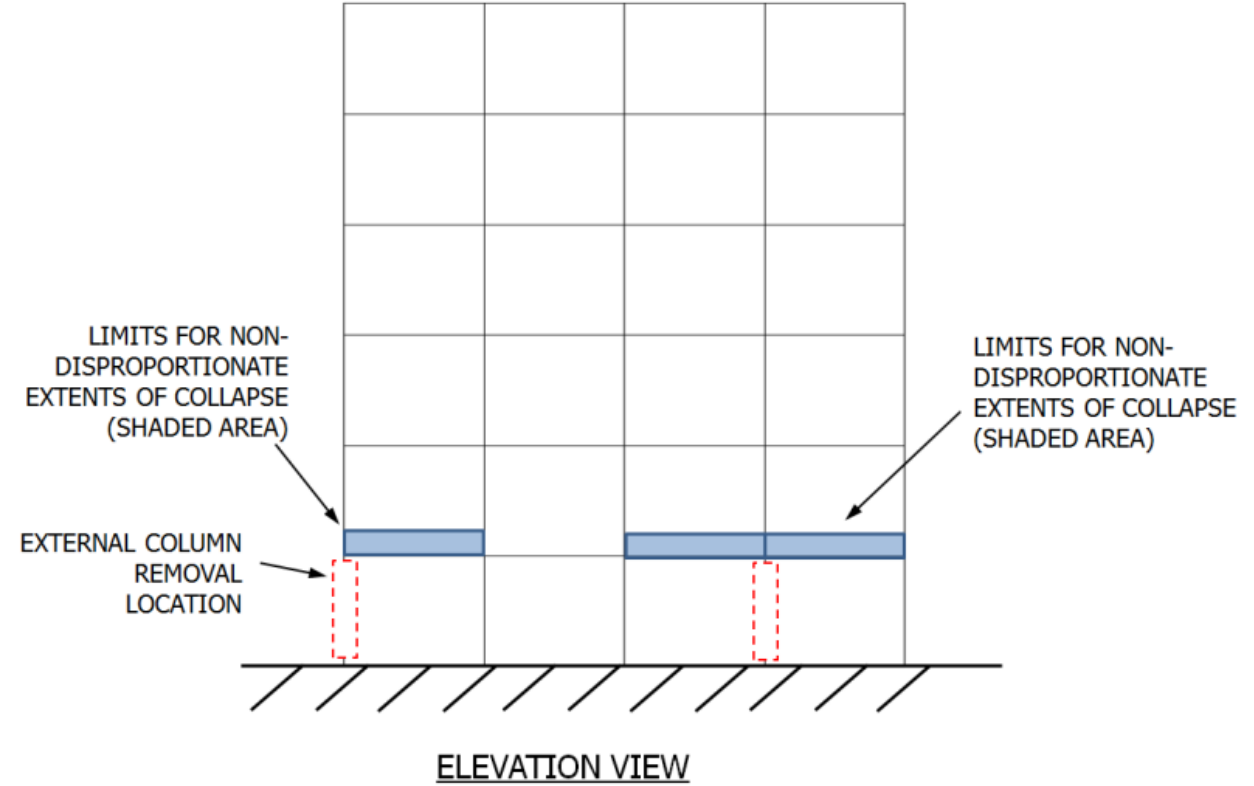
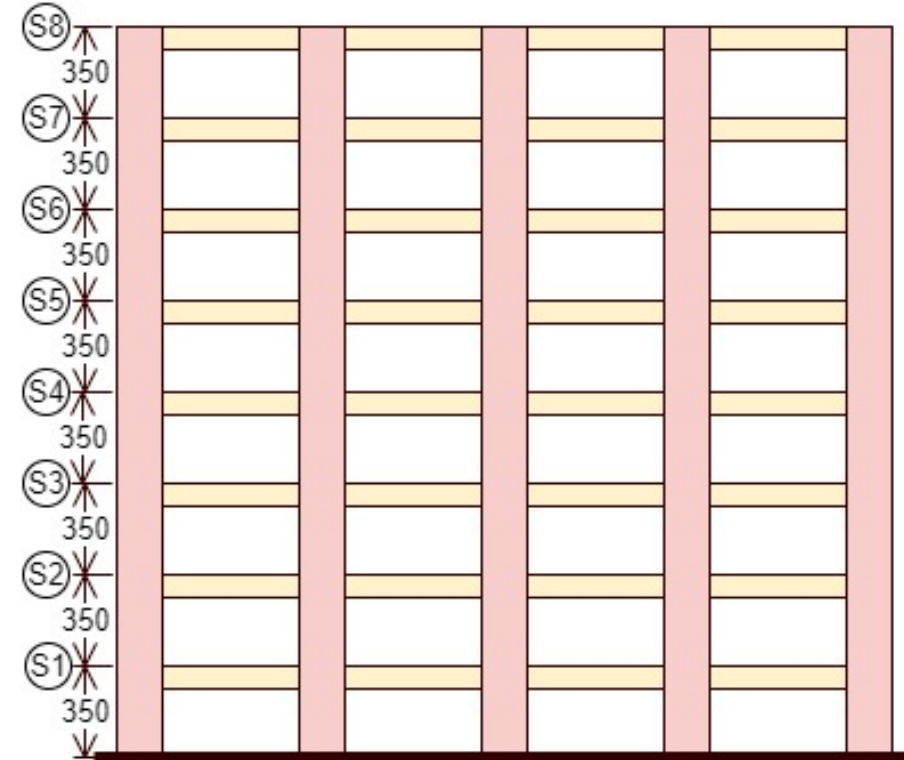
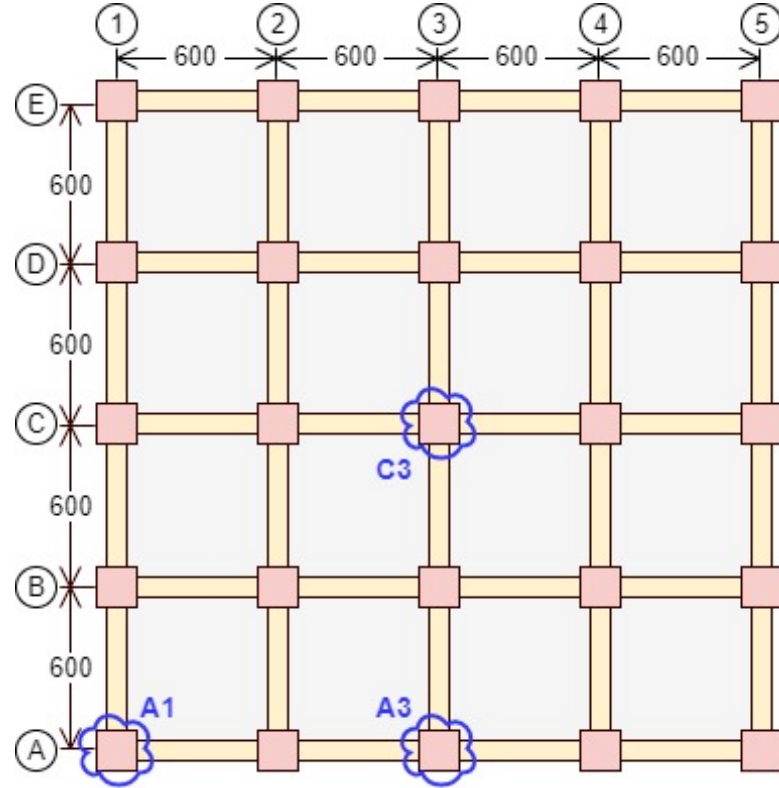


Figure 3.14. Allowable Extents of Collapse for Interior and Exterior Column Removal in Elevation

Türkiye'deki Yapıların İlerlemeli Göçme Performansları

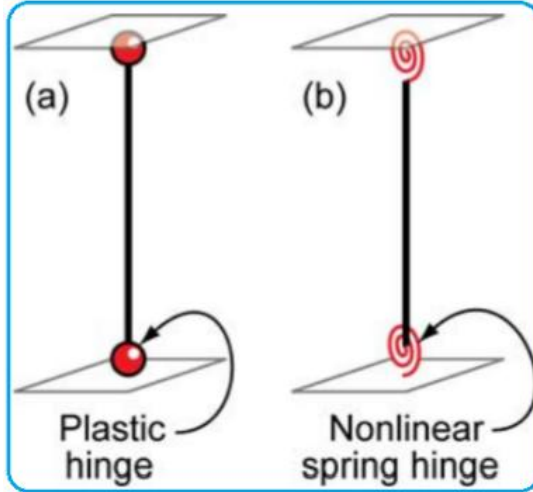
- Bina kullanım sınıfı: İş merkezi (AVM).
- Bina Yükseklikleri: 14 m (4-kat), 28 m (8-kat), and 42 m (12-kat)



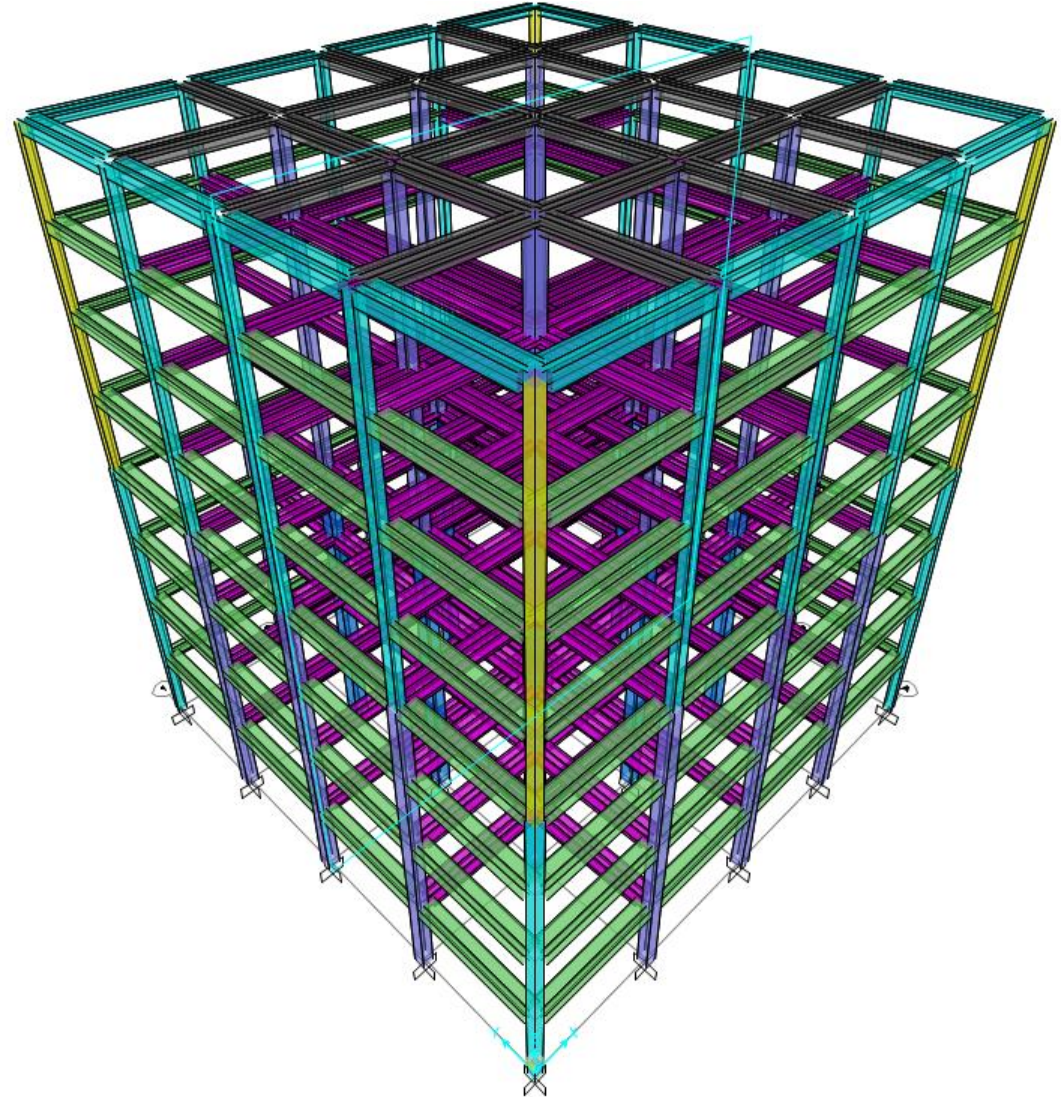
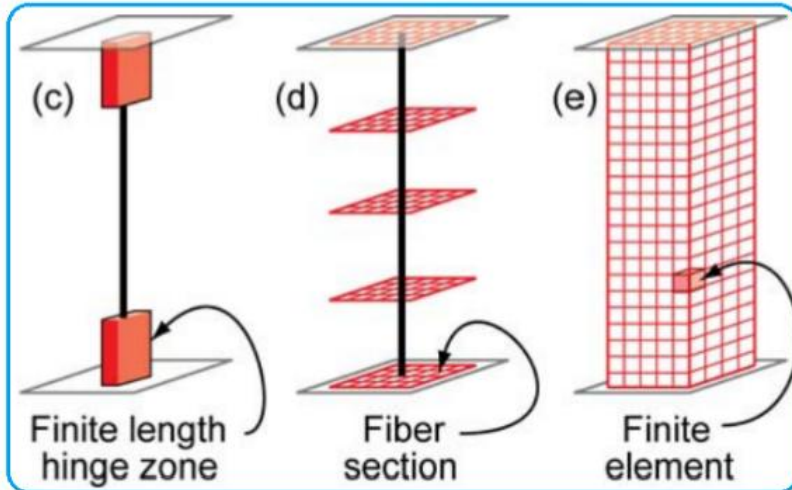
Sonlu Elemanlar Modeli:

- Doğrusal olmayan fiber mafsallar

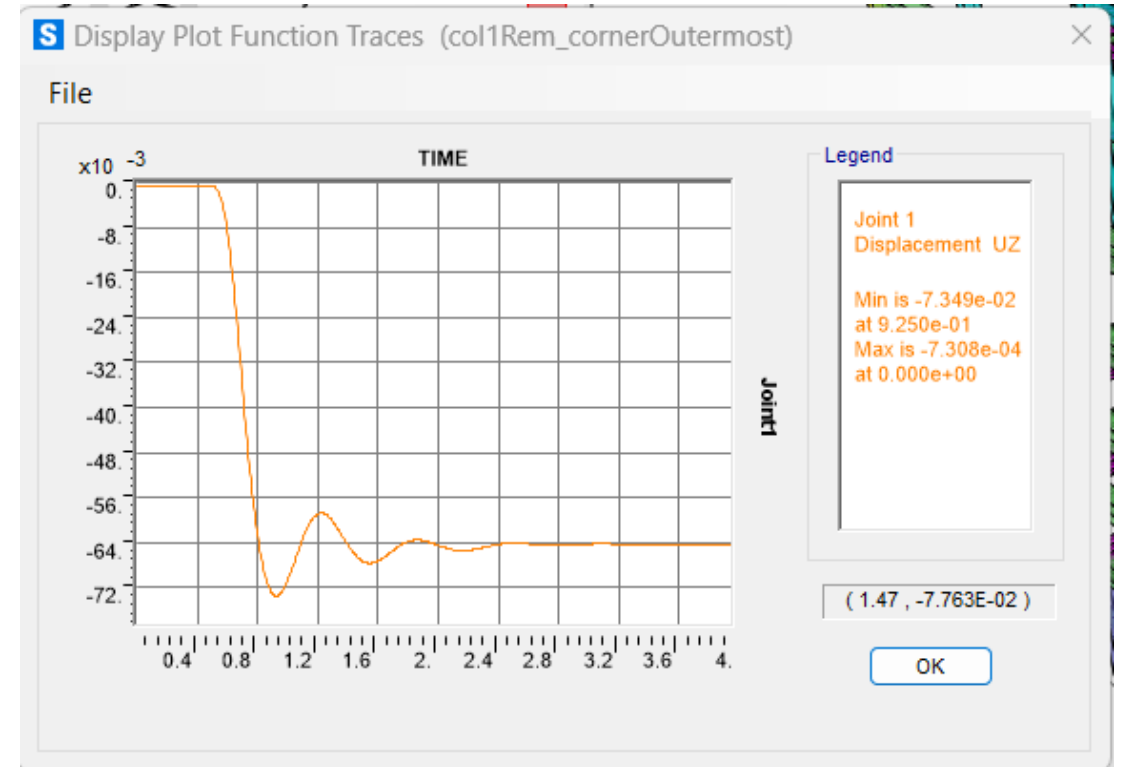
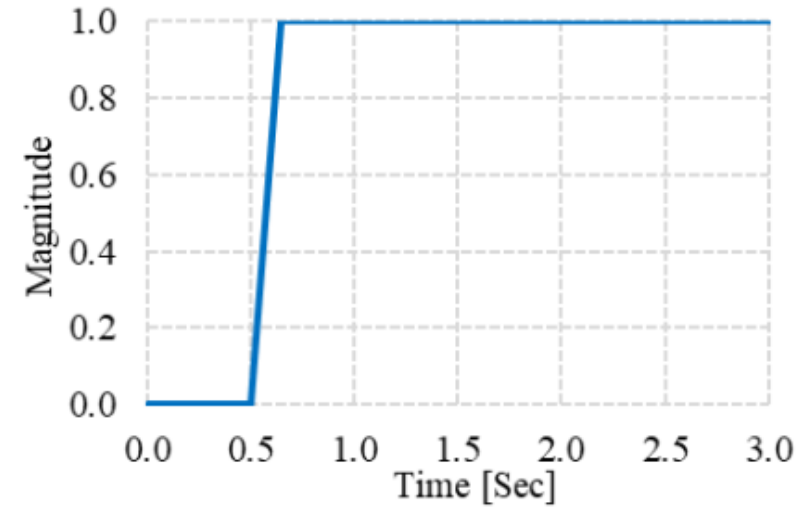
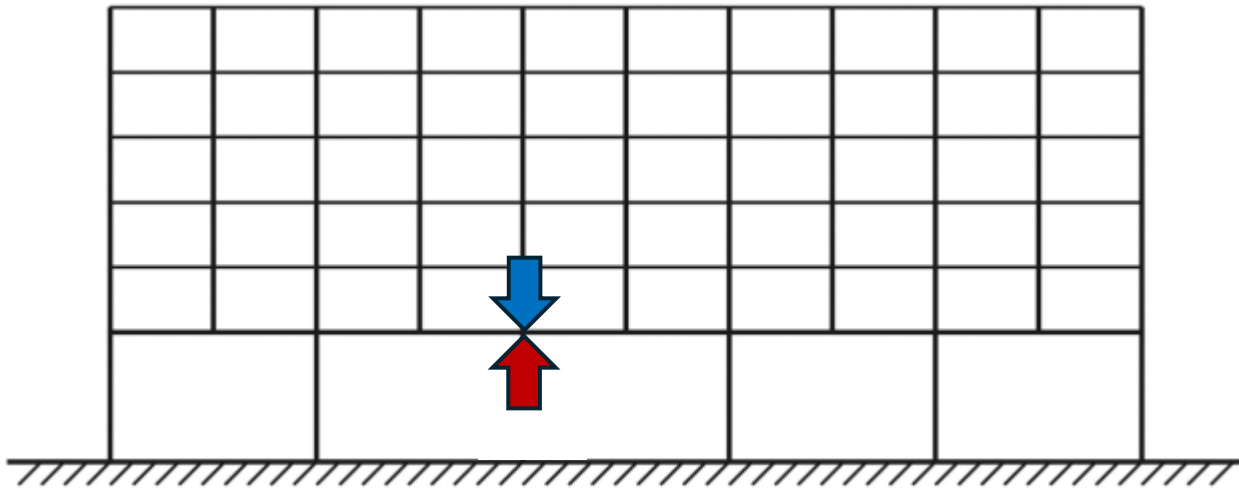
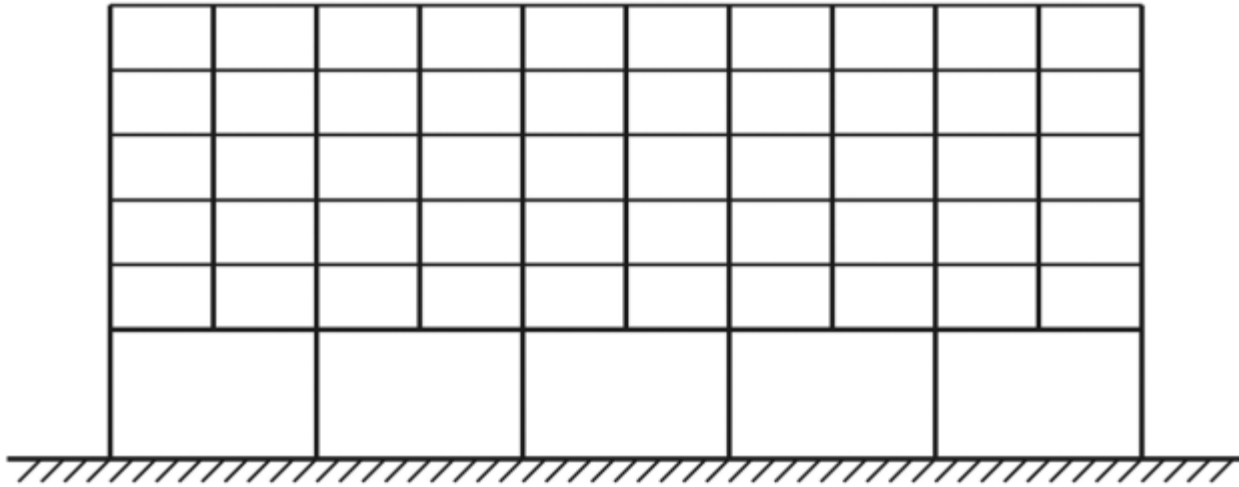
Concentrated plasticity



Distributed plasticity



Kolon Kaybı Senaryosu:

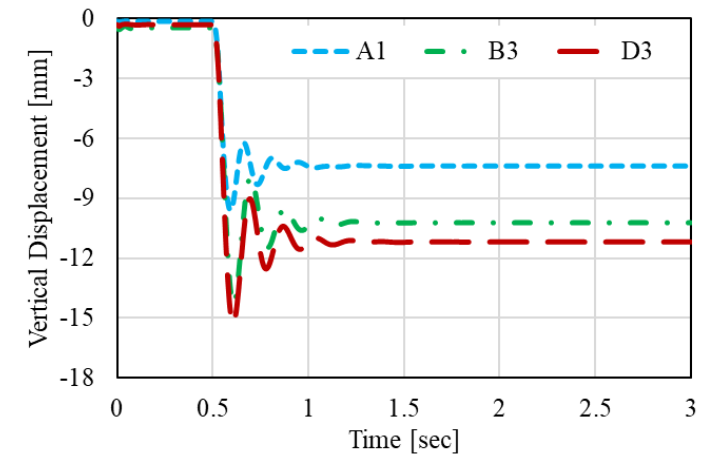
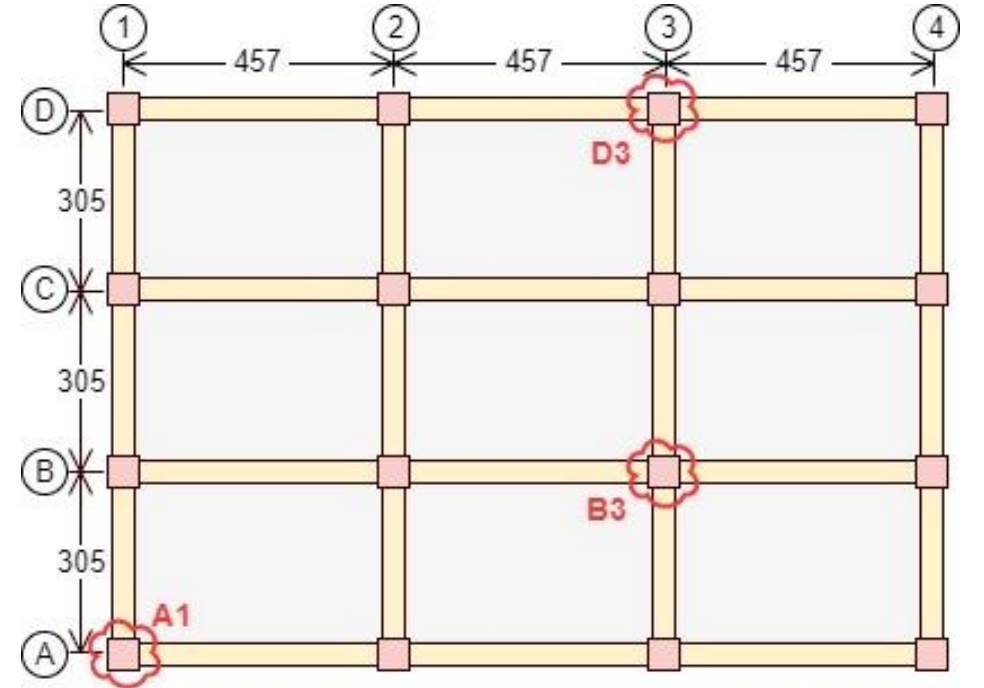


Sonlu Elemanlar Modelinin Doğrulanması:

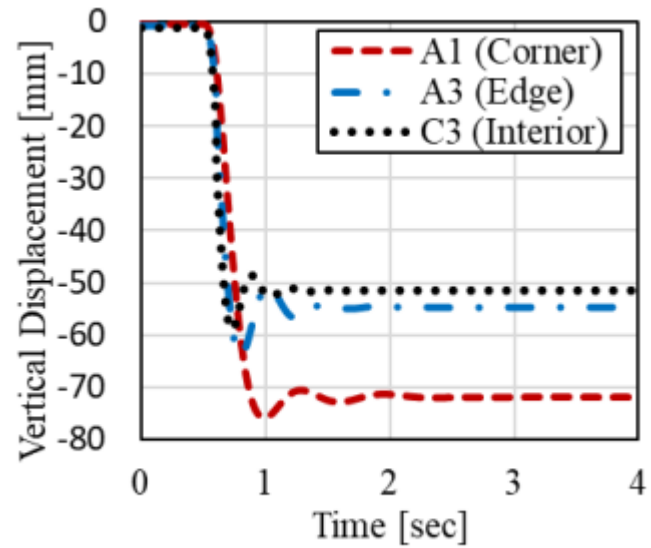
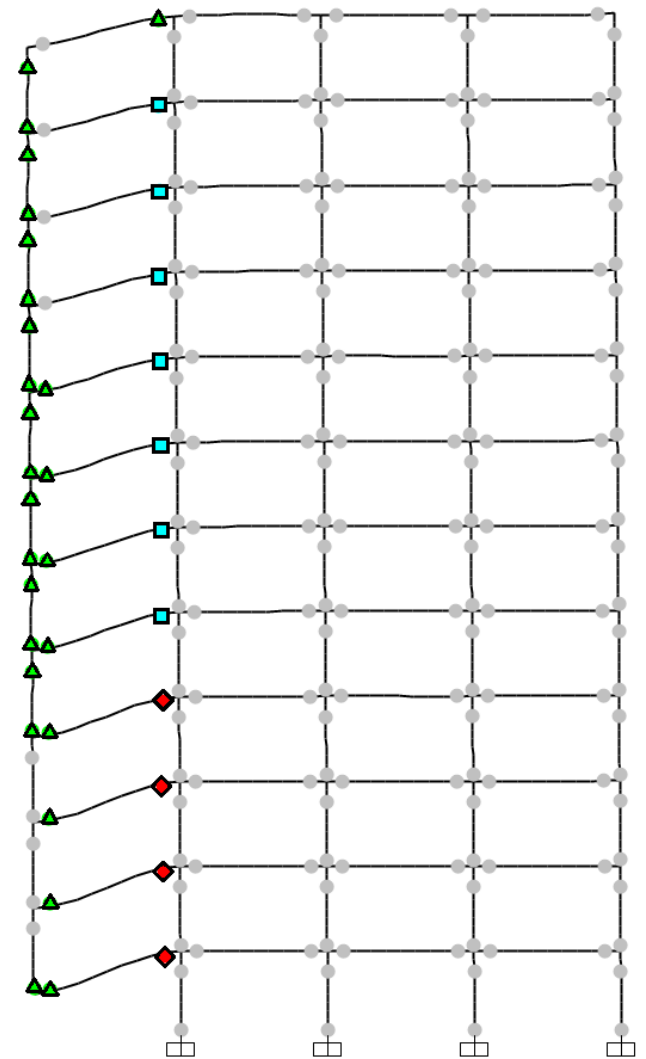
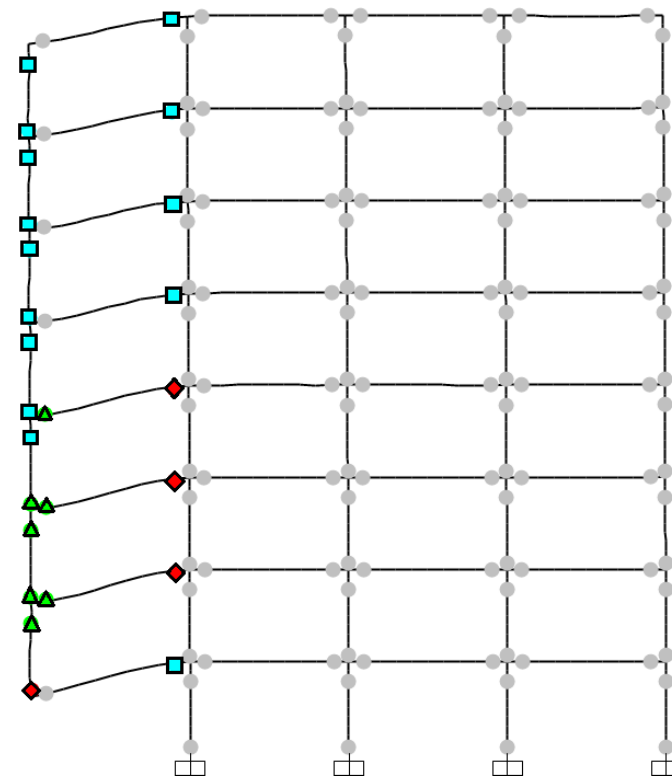
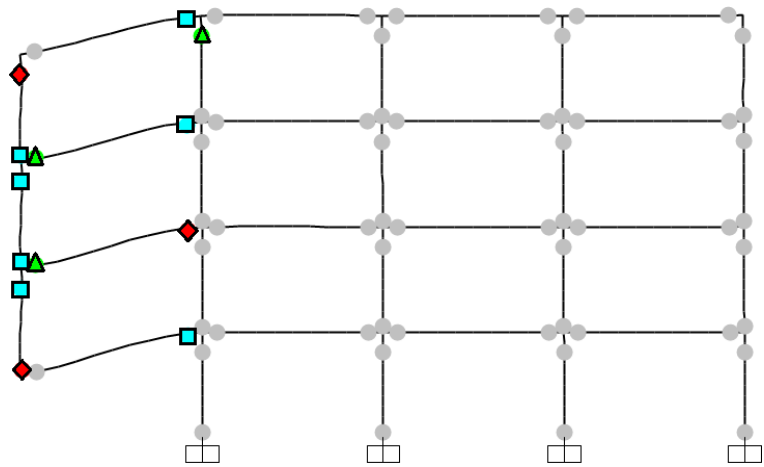


Kaynak: Xiao et al., 2015

Kaldırılan Kolon	Deney u_r (mm)	Nümerik u_r (mm)	Hata (%)
A1	-7.0	-7.4	5.7
D3	-12.0	-11.5	-4.1
B3	-11.5	-10.6	-7.8



Bina Performansının Belirlenmesi:



(a) 4-story building

Bulgular ve Deęerlendirmeler:

- TBDY-2018'e göre tasarlanan yapılarda kolon kaybı sonrası hasar genellikle **lokal kalmakta**, genel göçme oluşmamaktadır.
- Bu yapılar genel olarak **yeterli ilerlemeli göçme performansı** göstermektedir.
- **Kamu binaları**, konut türü yapılara kıyasla daha iyi performans sergilemektedir.
- **Kat yüksekliği arttıkça**, ilerlemeli göçme performansı iyileşmektedir.
- **Eski deprem yönetmeliklerine** göre tasarlanan yapıların performansı daha düşüktür.
- Yönetmelikler geliştikçe yapıların **göçmeye karşı dayanımı artmaktadır**.
- Yeterli mühendislik hizmeti almadan inşa edilen yapılar yüksek risk altındadır.
- **Kritik yapılar**, doğrudan tasarım yaklaşımı ile analiz edilmelidir.

Referanslar:

- ASCE/SEI 7-16 (2016), Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures Minimum Design Loads for Buildings and other Structures, American Society of Civil Engineers; Virginia, USA.
- GSA (2016), Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance, General Services Administration, Washington, DC, USA.
- UFC 4-023-03 (2016), Design of Building to Resist Progressive Collapse, US Department of Defense, Washington, DC, USA.
- Sagioglu, S. (2012), “Analytical and experimental evaluation of progressive collapse resistance of reinforced concrete structures”, Ph.D. Dissertation, The Department of Civil and Environmental Engineering, Northeastern University, Boston, MA.
- SAP2000 (2000), Three-Dimensional Static and Dynamic Finite Element Analysis and Design of Structures, Computer and Structures, Inc., California, USA.
- CSI Knowledge Base (2021), Technical Knowledge Base, Computers and Structures, Inc. <https://wiki.csiamerica.com>.
- Uwe Starossek (2017), Progressive Collapse of Structures (2nd ed.). ICE Publishing
- Demir, A. (2022), “Progressive collapse response of reinforced concrete buildings designed according to Turkish Earthquake Code”, *Bitlis Eren Univ. J. Sci.*, **11**(2), 694-705. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.1094003>.
- Demir, A. (2022). Progressive collapse resistance of low and mid-rise RC mercantile buildings subjected to a column failure. *Structural Engineering and Mechanics, An Int'l Journal*, **83**(4), 563-576.
- Xiao, Y., Kunnath, S.K., Li, F.W., Zhao, Y.B., Lew, H.S. and Bao, Y. (2015), “Collapse test of three-story half-scale reinforced concrete frame building”, *ACI Struct. J.*, **112**(4), 427-438. <https://doi.org/10.14359/51687746>.
- Song, B. I., & Sezen, H. (2013). Experimental and analytical progressive collapse assessment of a steel frame building. *Engineering structures*, **56**, 664-672.

Yasal Uyarı ve Sorumluluk Reddi

Bu sunumda yer alan bilgi, değerlendirme ve öneriler genel mühendislik prensiplerine dayanmaktadır ve **yalnızca eğitim amacıyla** hazırlanmıştır. Sunum içeriği, herhangi bir proje için doğrudan uygulanabilir **nihai tasarım, uygulama veya denetim dokümanı** olarak kullanılamaz.

İlerlemeli göçme analizi ve tasarımı; yapı türüne, kullanım amacına, zemin koşullarına ve ilgili yönetmeliklere bağlı olarak **proje bazında detaylı mühendislik çalışması** gerektirir. Bu nedenle, burada sunulan yaklaşımların uygulanması öncesinde **ilgili standartlar** ve **güncel yönetmelikler** doğrultusunda **yetkin mühendisler** tarafından detaylı analiz ve tasarım yapılmalıdır.

Bu sunumun ve anlatılanların kullanımı sonucunda oluşabilecek **doğrudan veya dolaylı zararlardan sunumu hazırlayan ve sunan kişi sorumlu tutulamaz**. Tüm sorumluluk, **bilgiyi kullanan kişi** ve **kurumlara aittir**.

Teşekkürler