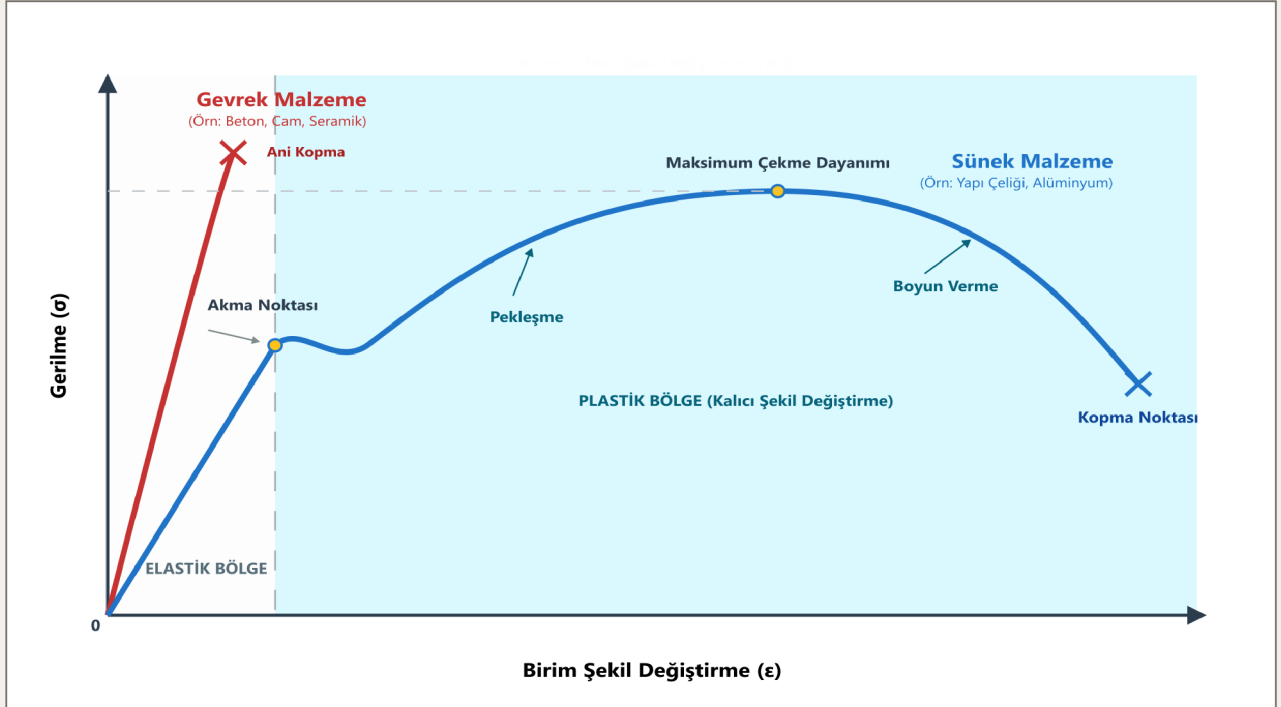




YAPISAL TASARIM

Süneklik Nedir? Hesabı ve Türleri

Süneklik, bir malzeme veya yapının kopmadan/göçmeden önce plastik şekil değiştirebilme yeteneğidir. Malzeme, eleman ve sistem sünekliği arasındaki farklarla, süneklik oranı hesabı ve sünekliği artırma yöntemleriyle birlikte açıklanıyor.



Süneklik, malzemenin, yapı elemanının veya yapının taşıyıcı sisteminin ciddi bir dayanım kaybı yaşamadan plastik şekil değiştirebilme kapasitesidir. Deprem mühendisliğinde süneklik, yapının göçmeden önce enerji soğurmasının ve dolayısıyla can güvenliğinin en temel güvencesidir. Bu yazıda süneklik nedir, depreme dayanıklı yapı tasarımında neden bu kadar önemlidir, gerilme-şekil değiştirme eğrisinden nasıl hesaplanır ve malzeme, eleman ile sistem düzeyinde nasıl farklılaştığı ele alınıyor.

Süneklik Nedir? Temel Tanım

Süneklik, tanım olarak malzemenin, yapı elemanının veya yapının gözle görülür ciddi bir dayanım kaybı olmadan plastik şekil değiştirme yapabilmesine denir. Sayısal olarak da toplam yer değiştirme bölü elastik yer değiştirme olarak tanımlanır.

Bu tanım soyut görünse de fiziksel karşılığı son derece somuttur: deprem sırasında yapıya büyük miktarda enerji aktarılır. Yapı bu enerjiyi iki şekilde yönetebilir; ya **dayanımıyla** (elastik kalarak kuvvetlere doğrudan direnç göstererek) ya da **sünekliğiyle** (plastik şekil değiştirerek enerjiyi ısıya dönüştürerek). Tamamen elastik kalan bir yapı tasarlamak teorik olarak mümkündür, ancak ekonomik açıdan son derece maliyetlidir. Bu yüzden mühendislik, çoğu durumda bu ikilemi süneklığe dayanarak çözer.

Deprem Mühendisliğinde Süneklik Neden Önemlidir?

Bir depremin bir yapıda tam olarak ne kadar ivme oluşturacağını önceden kestirmek son derece zordur: yer ivmesinin büyüklüğü fay kırılmasına, dalganın kat ettiği yola ve yerel zemin koşullarına bağlıdır; hiçbir iki deprem birbiriyle aynı talebi oluşturmaz. Bir yapıyı karşılaşılabileceği her ivme altında tamamen elastik kalacak şekilde tasarlamak, ekonomik açıdan makul olandan çok daha fazla dayanım ve malzeme gerektirir. Süneklik, bu belirsizliğe karşı bir tür sigorta görevi görür: doğru talebi tam olarak kestirmeye çalışmak yerine, yapıya öngörülenden daha yüksek bir ivmeyi, tamamen kırılmak yerine plastik şekil değiştirerek karşılama kapasitesi kazandırır.

Plastik şekil değiştirmeyi bu şekilde kabul etmek, ekonominin ötesinde **deprem mühendisliği açısından yaşamsal bir önem** taşır: bir yapının göçme biçimi, içindeki insanların bir uyarı alıp almayacağını belirler.

Sünek göçme: Öncesinde büyük deformasyonlar, gözle görülür çatlaklar ve ezilmeler oluşur. Bu görsel uyarılar tahliye zaman tanır.

Gevrek göçme: Önceden belirgin bir uyarı işareti vermez. Yapı aniden çöker. Tahliye imkânı yoktur.

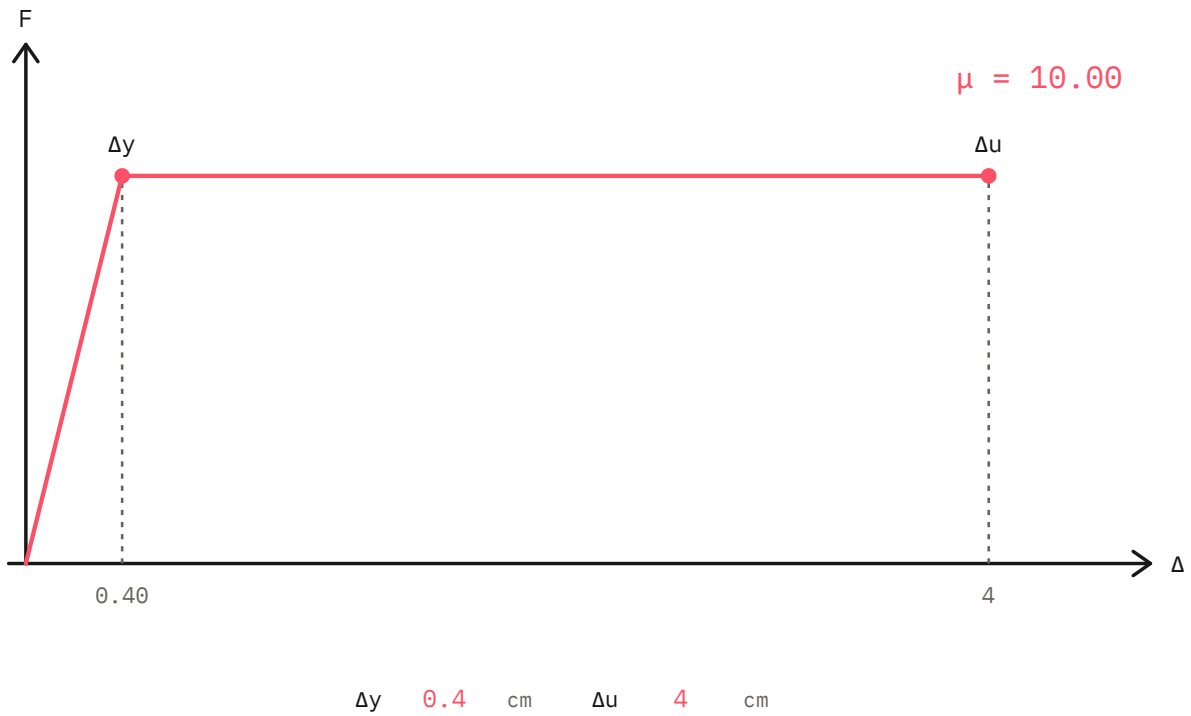
Yönetmeliklerin, kağıt üzerinde aynı yükü taşısa bile tasarımcıları gevrek değil sünek göçme biçimlerine yönlendirmesinin nedeni tam olarak budur: süneklik hem ekonomik hem de göçmenin ani olmasını önleyen bir tercihtir.

Süneklik Oranı Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisinden Nasıl Hesaplanır?

Örneğin bir çelik test numunesi akma noktasına kadar 0.4 cm, kopma anına kadar ise toplam 4 cm uzuyorsa, numunenin süneklik oranı $4/0.4 = 10$ olarak bulunur. Buna İngilizce’de **Ductility Ratio (Süneklik Oranı)** denir.

$$\mu = u_{\text{toplam}}/u_{\text{elastik}}$$

Bir gerilme-şekil değiştirme (ya da kuvvet-deplasman) eğrisinde bu oran grafikten doğrudan okunur: elastik bölge akma noktasına kadar olan ilk düz kısımdır, ondan sonrası ise göçme noktasına kadar uzanan plastik bölgedir. Süneklik oranı, eğrinin göçme noktasına kadar kat ettiği toplam mesafenin, akmaya kadar kat ettiği mesafeye oranından başka bir şey değildir.



Görsel 1 - Süneklik oranı hesaplayıcı. Akma (Δy) ve göçme (Δu) deplasmanlarını girin: μ oranı ve kuvvet-deplasman eğrisindeki konumları anında güncellenir.

Sünek ve Gevrek Malzemeler Arasındaki Fark Nedir?

Gerilme-şekil değiştirme eğrisinde, sünek ve gevrek davranışlar akma noktasından hemen sonra ayrışır. Sünek bir malzeme akma sınırından sonra dayanım kaybı yaşamadan plastik şekil değiştirme yapabilirken, gevrek bir malzeme ya doğrudan akma sınırında ya da kısa bir plastik bölgenin ardından aniden kırılır.

Tipik sünek yapı malzemeleri çelik ve alüminyumdur; tipik gevrek malzemeler ise sargısız beton, cam ve seramiktir. Yukarıda değinildiği gibi bu ayrım yalnızca akademik bir mesele değildir: içindikileri uyaran bir yapı ile uyarmayan bir yapı arasındaki farktır.

Süneklik Oranı Formülleri Nelerdir?

Süneklik illa yer değiştirme ile tanımlanmak zorunda değildir; eğrilik veya dönme gibi başka büyüklüklerle de tanımlanabilir. Bu nedenle literatürde birkaç farklı süneklik oranı tanımı kullanılır:



Görsel 2 - Her süneklik oranının nerede ölçüldüğü: deplasman u tüm yapı üzerinde, eğrilik ϕ bir kesitte, dönme θ bir plastik mafsalda

Deplasman Sünekliği

$$\mu_u = u_{toplam}/u_{elastik}$$

En yaygın kullanılan tanım. Yapının akma sonrası toplam deplasmanının elastik deplasmana oranıdır.

Eğrilik Sünekliği

$$\mu_{\phi} = \phi_u / \phi_y$$

Bir kirişin taşıma kapasitesine ulaştığı andaki eğrilik (ϕ_u), kirişin akma momentine ulaştığı andaki eğriliğe (ϕ_y) bölünür. Kesit düzeyindeki sünekliği ifade eder.

Dönme Sünekliği

$$\mu_{\theta} = \theta_u / \theta_y$$

Plastik mafsallardaki toplam (nihai) dönmenin akma dönmesine oranıdır. TBDY 2018'deki şekil değiştirme sınırları (ϵ_c , ϵ_s , θ_p) doğrudan bu kavramla ilişkilidir.

Deplasman, Eğrilik ve Dönme Sünekliği Arasındaki Fark Nedir?

Üç tanım arasındaki hiyerarşi şöyledir: malzeme düzeyindeki birim şekil değiştirme kapasitesi → eleman düzeyindeki dönme sünekliği → sistem düzeyindeki deplasman sünekliği. Her üst seviye, altındaki seviyenin kapasitesine bağlıdır.

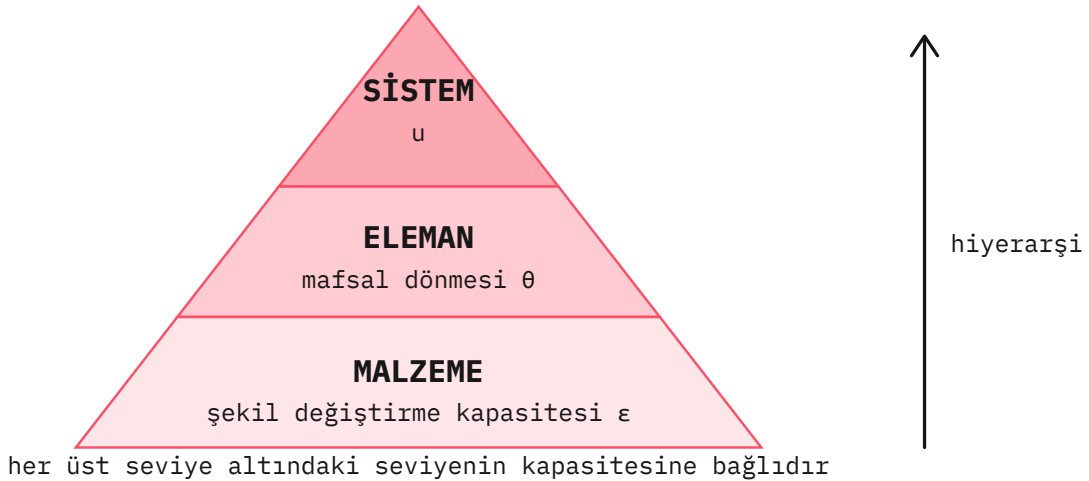
Deplasman sünekliği, taşıyıcı sistemin bütünüdür davranışını tarif eder: sistem akma sonrası ne kadar öteleniyor, akmaya ulaşmak için ne kadar ötelenmesi gerekiyor. Eğrilik sünekliği tek bir kesite odaklanır ve bir kiriş ya da kolonun akma momentinin ötesinde, kapasitesine ulaşana kadar ne kadar eğrilebildiğini yakalar. Dönme sünekliği ikisinin arasında yer alır ve bir plastik mafsallardaki bölgesinin elastik sınırının ötesinde ne kadar dönebildiğini tarif eder.

Bu üç ölçeğin hiçbiri tek başına tam resmi vermez. Mükemmel eğrilik sünekliğine sahip bir kesit, sistemin elemanları doğru şekilde birbirine bağlanmadıysa yine de zayıf deplasman sünekliğine sahip bir sistemin parçası olabilir; bu da tam olarak bir sonraki bölümün konusudur.

Malzeme, Eleman ve Sistem Sünekliği Arasındaki Fark Nedir?

Süneklik farklı düzeylerde ele alınır: malzeme, eleman ve sistem sünekliği. Sünek bir yapı tasarlamak için kullanılan malzemelerin sünek olması, elemanların sünek davranacak şekilde tasarlanması ve taşıyıcı sistemin de yeterli sünekliği sunabilmesi gerekir. **Sadece sünek malzeme kullandım diye yapı da sünek olmuyor.** Bu kritik nokta sıkça gözden kaçan bir yanılgıdır.

Süneklik hiyerarşik bir özelliktir: malzeme → eleman → sistem. Bir alt seviyedeki gevreklik zincirin tamamını kırar. Sünek çelik kullanmak, yanlış etriye kancaları veya yetersiz bindirme boyu nedeniyle bir düğüm noktasının gevrekleşmesini engelleyemez.



Görsel 3 - Süneklik hiyerarşisi: malzeme → eleman → sistem. Zincirin herhangi bir noktasındaki gevreklik, yapının tamamını gevrek hale getirir.

Malzeme Sünekliği

Malzeme sünekliği, bir malzemenin gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinde akma noktasından sonra ne kadar plastik uzama yapabildiğini ifade eder.

Çelik: Akma sınırından sonra dayanım kaybı yaşamadan büyük plastik uzamalar yapabilir. Bu özelliği nedeniyle çelik sünek bir yapı malzemesidir. Tipik yapısal çeliklerde kopma birim uzaması %20–25'e kadar çıkabilirken elastik sınır yalnızca %0.1–0.2 düzeyindedir. Bu, süneklik oranının 100 ile 200 arasında olduğu anlamına gelir.

Sargısız Beton: Betonun gerilme-birim şekil değiştirme grafiğine bakıldığında, tepe dayanımına ulaştıktan sonra dayanım kaybı yaşadığı görülür. Bu yüzden beton gevrek bir yapı malzemesi olarak anılır. Tipik sargısız betonun göçme birim kısalması yaklaşık $\epsilon_{cu} \approx 0.003-0.004$ 'tür.

Sargılı Beton: Kolon sarılma bölgelerindeki etriye ve çirozlar, betonun hacimsel şekil değiştirmesini kısıtlar. Bu “sargı etkisi” betonun hem basınç dayanımını hem de göçme birim kısalmasını önemli ölçüde artırır.

Eleman (Kesit) Sünekliği

Malzemeler dışında kiriş, kolon, perde duvar gibi yapı elemanları da gevrek veya sünek davranabilir. Bu elemanların gevrek veya sünek davranmasındaki asıl belirleyici, onları tasarlayan mühendistir.

Tasarımı düzgün yapılmış bir betonarme veya çelik kiriş sünek davranabilirken, aynı yapı malzemelerinden üretilse dahi kötü tasarlanmış bir kiriş gevrek davranış gösterebilir.

Betonarme için, özellikle bağlantı bölgelerindeki donatı detaylandırması bu ayırmada rol oynarken; çelikte genellikle bağlantı bölgeleri belirleyicidir. Çelik yapılarda sünek olmayan birleşim detayları, tüm sistemin gevrek göçmesine yol açabilir.

Sistem Sünekliği

Taşıyıcı sistemler de tasarımın doğru yapılıp yapılmadığına bağlı olarak gevrek veya sünek davranış gösterebilir.

Kritik nokta: Kağıt üzerinde oldukça sünek davranması gereken bir taşıyıcı sistemde, yanlış tasarım sonucu ilk plastik mafsalların veya göçmelerin **kolonlarda** meydana gelmesi, sistemi oldukça gevrek davranır hale getirebilir. Sünek malzemelerden ve sünek elemanlardan oluşan bir taşıyıcı sistem, yanlış tasarım sonucunda yine de gevrek davranabilir.

Sistem sünekliği yalnızca elemanların bireysel kapasitelerine değil, **plastik mafsalların oluşum sırasına** da bağlıdır. İdeal sıra: önce kirişler akar, kolonlar elastik kalır. Buna **Güçlü Kolon, Zayıf Kiriş** ilkesi denir.

Yedeklilik (redundans) de sistem düzeyinde belirleyici bir rol oynar. Birden fazla çerçeve veya perde duvarın birlikte çalıştığı bir yapıda paralel taşıyıcı elemanlar bulunur; bunlardan biri kapasitesini yitirdiğinde talep kalan elemanlara yeniden dağıtılabilir, bu da sisteme enerji soğurmak

için birden fazla şans tanır. Tek bir yük aktarım yoluna sahip bir yapıda böyle bir yedek yoktur: o tek yol göçerse, elemanları ne kadar sünek tasarlanmış olursa olsun yükü taşıyacak başka bir şey kalmaz.

Bir Yapının Sünekliği Nasıl Artırılır?

Süneklik, tasarımın her düzeyinde iyileştirilebilir:

Malzeme seçimi: Başta çelik olmak üzere doğası gereği sünek malzemeler kullanmak, yapının dayanım kaybetmeden önce yapabileceği plastik şekil değiştirme miktarını artırır.

Sargılama: Betonlu sık aralıklı etriye ve çirozlarla sarmak, yük altındaki yanal genişlemesini kısıtlar; bu da hem dayanımını hem de göçmeden önce taşıyabileceği birim kısalmayı önemli ölçüde artırır.

Detaylandırma: Bağlantılardaki doğru donatı detaylandırması, bir elemanın tasarlandığı gibi davranıp davranmayacağını belirler. Kötü detaylandırma, sünek bir malzemeyi bile gevrek bir göçme noktasına dönüştürebilir.

Yedeklilik: Tek bir yük aktarım yolu yerine birden fazla paralel taşıyıcı eleman sağlamak, bir eleman kapasitesini yitirdiğinde sistemin talebi yeniden dağıtmasına imkân tanır; bu da tek bir şans yerine birden fazla enerji soğurma fırsatı verir.

Kapasite tasarımı: Elemanları, göçmenin öngörülebilir ve sünek noktalarda gerçekleşmesini sağlayacak şekilde boyutlandırmaktır; örneğin kirişleri kolonlardan daha zayıf tasarlamak gibi. Bu yaklaşım, plastik mafsalların rastgele en zayıf noktada değil, tasarımın öngördüğü yerlerde oluşmasını garanti eder.

Bu önlemlerin hiçbiri tek başına yeterli değildir. Bir yapı, ancak malzeme, elemanlar ve genel sistem birlikte bu şekilde davranacak biçimde tasarlandığında gerçekten sünek olur. Bu da tam olarak yukarıda anlatılan malzeme-eleman-sistem hiyerarşisinin gösterdiği şeydir.

Sonuç

Süneklik, deprem mühendisliğinin hem en temel hem de en sık yanlış anlaşılan kavramlarından biridir. “Sünek malzeme kullandım, o zaman yapım sünek” yanılgısı, gerçek depremlerde can kaybına dönüşebilir.

Bu yazıda öğrendiklerimizi özetlersek:

- Süneklik **üç hiyerarşik düzeyde** ele alınır: malzeme, eleman ve sistem. Bir yapı, ancak bu zincirdeki en zayıf halkası kadar sünektir.
- **Deplasman, eğrilik ve dönme sünekliği**, farklı ölçek düzeylerindeki aynı kavramın ifadeleridir.
- Süneklik; malzeme seçimi, sargılama, detaylandırma, **yedeklilik** ve kapasite tasarımıyla tasarımın her aşamasında artırılabilir.

Kaynaklar

1. Georgia Institute of Technology. Ductility. Physics Book.
2. Hibbeler, R. C. (2014). Malzeme Mekaniği (Mechanics of Materials). Literatür Yayıncılık.
3. Ersoy, U., Özcebe, G., & Tankut, T. (2019). Betonarme. Evrim Yayınevi.
4. Chopra, A. K. (2010). Deprem Mühendisliği ve Yapı Dinamiği.
5. TBDY-2018 (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD).
6. Buyukozturk, O. Lecture Notes: Mechanics and Design of Concrete Structures. MIT OpenCourseWare.

Bizi Takip Edin



LinkedIn

Yapı Tasarım Akademisi



YouTube

Yapı Tasarım Akademisi



Apple Podcasts

Yapısal Podcast



Instagram

@yapitasarimakademisi



Spotify

Yapısal Podcast



X (Twitter)

@AkademisiYap

Bu belge eğitim amaçlı hazırlanmıştır. Proje ve uygulama kararlarında güncel yönetmelik ve ilgili standartlara başvurunuz. Hata bildirimi için: iletisim@yapitasarimakademisi.com