

## DEPREME DAYANIKLI YAPI TASARIMINDA GENEL İLKELER

Bilindiği gibi depremler, yapıya, zamana bağlı olarak değişen yüklerin etkimesine neden olurlar. Buna karşılık olarak da, yapıda zamana bağlı olarak değişen iç kuvvetler oluşur. Depreme dayanıklı yapı tasarımında amaç, sözü edilen bu iç kuvvetlerin etkisinde ortaya çıkması olası hasarın sınırlandırılmasıdır. Bu durumda, cevaplanması gereken iki temel soru vardır.

- **Yapıda ortaya çıkması olası hasarın kabul edilebilir sınırı nedir?**
- **Bu kabul edilebilir hasar, hangi deprem veya depremlerin etkisinde ortaya çıkacaktır?**

Bu iki soruya verilecek cevap depreme dayanıklı yapı tasarımının da temel ilkesini ortaya koyacaktır. Bu temel ilke, 1998’de yürürlüğe giren Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY98)’de aşağıdaki gibi ifade edilmiştir;

*“**Hafif şiddetteki depremlerde binalardaki yapısal ve yapısal olmayan sistem elemanlarının her hangi bir hasar görmemesi, orta şiddetteki depremlerde yapısal ve yapısal olmayan elemanlardaki hasarın onarılabilir düzeyde olması, şiddetli depremlerde ise can kaybını önlemek amacı ile binaların kısmen veya tamamen göçmesinin önlenmesi**”*

Yukarıda sözü edilen **şiddetli deprem, 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan tasarım depremidir**. Yani, konut ve işyeri gibi binaların tasarımında kullanılacak olan depremdir. Halkın yoğun olarak bulunduğu sinema, tiyatro, okul, spor tesisleri gibi binalar ile depremden hemen sonra kullanılması gereken binalarda (hastaneler, itfaiye, sağlık ocakları, ulaşım istasyonları, enerji tesisleri vb.) ise bina önem katsayısı kullanılmak suretiyle, söz konusu tasarım depremi büyütülerek kullanılır.

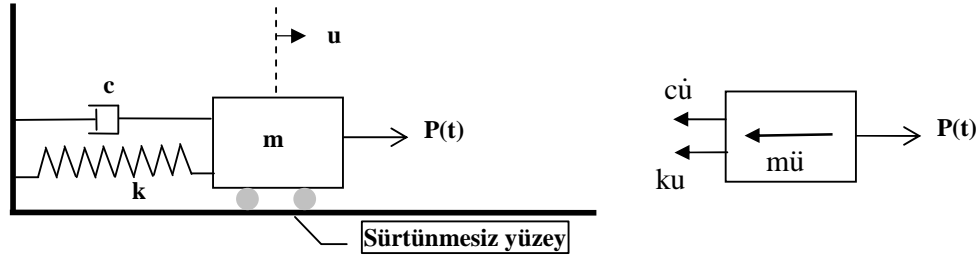
Özet olarak, eğer bir bina, ABYYHY98’de verilmiş koşullara uyularak tasarlanmış ve inşa edilmiş ise, ve depremler etkisinde yukarıda açıklanan depreme dayanıklı yapı tasarımının temel ilkesine uygun bir performans gösteriyorsa, tasarım amacına ulaşmış demektir.

Depreme dayanıklı bir yapının, yeterli dayanım (kapasite), yeterli rijitlik ve yeterli sünekliğe sahip olması gerekir. Esasen, depreme dayanıklı yapı tasarımıyla yapılan da, yapıya bu özelliklerin kazandırılmasıdır.

## SPEKTRUM KAVRAMI ve ELASTİK DEPREM YÜKÜ

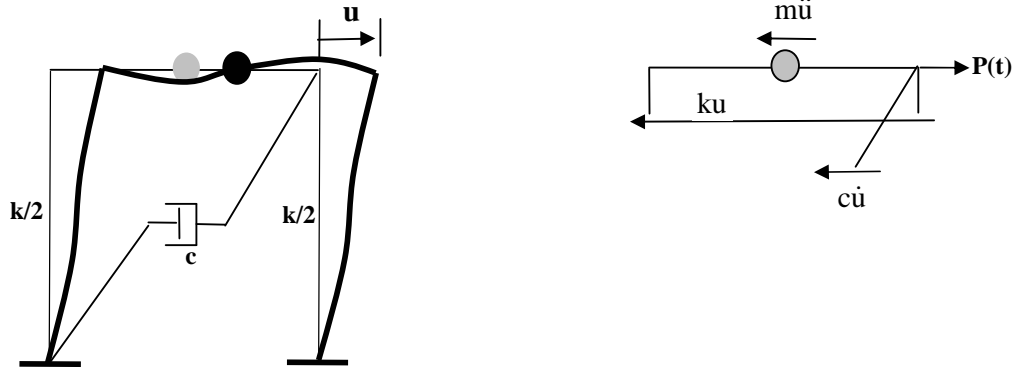
Bu bölümde, tasarıma esas alınacak deprem yükünün nasıl hesaplanacağı özetlenecektir. Bu bağlamda, spektrum kavramına da değinilecektir. Yapı dinamiğinden bilindiği gibi, Şekil 1’de verilmiş, zamana bağlı olarak değişen  $P(t)$  yükü etkisindeki bir sistemin hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = P(t) \quad (1)$$



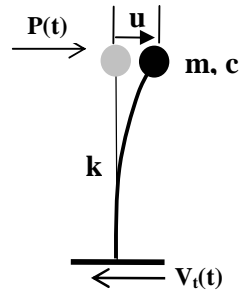
Şekil 1

Denklem (1)'de  $m$  yapının kütesini,  $c$  sönüm katsayısını,  $k$  ise yapının rijitliğini temsil eder. Şekil 1'de gösterilen kuvvetler, Şekil 2'deki, kat döşemesi rijit diyafram tanımına uyan tek serbestlik dereceli yapısal sistem üzerinde de gösterilebilir.



Şekil 2

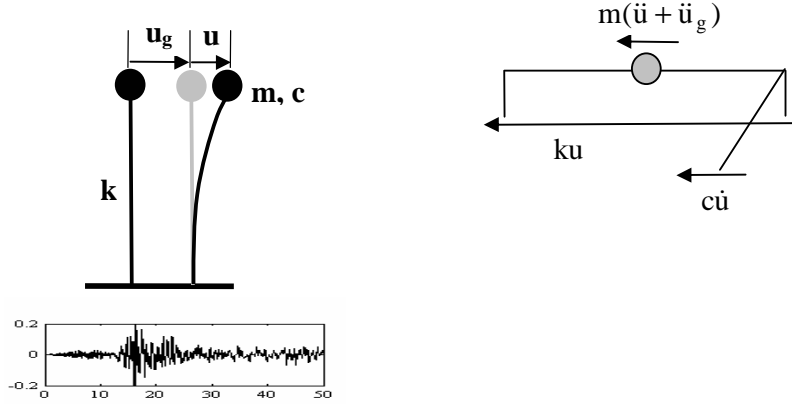
Şekil 2'den de görüleceği gibi, yapıya etkileyen  $P(t)$  kuvvetine, bu kuvvete zıt yönde 3 farklı kuvvet karşı koymaktadır. Bu kuvvetlerden,  $m\ddot{u}(t)$  eylemsizlik kuvveti olarak bilinir ve ivmeyle orantılıdır.  $c\dot{u}(t)$ , sönüm kuvveti olarak adlandırılır ve hız ile orantılıdır.  $ku(t)$  ise yapının yer değiştirmesiyle orantılıdır ve yapıda oluşan iç kuvvetleri temsil eder. Bu aşamada Şekil 2'deki tek serbestlik dereceli yapısal sistem Şekil 3'deki gibi gösterilebilir.



Şekil 3

Şekil 3' de verilen sistemde, kütle tepe noktasına toplanmıştır. Yapının rijitliği ise bir konsol çubukla ifade edilmiştir, bu çubuğun kütlesi  $m$  kütesinin yanında çok küçüktür ve ihmal edilebilir.

Şimdi; sistemin, zamana bağlı olarak değişen  $P(t)$  kuvveti yerine, yer hareketi etkisi altında olduğunu düşünelim.



Şekil 4

Şekil 4'ten görüldüğü gibi, yer hareketi etkisi altında oluşacak toplam yer değiştirme, sistemin göreceli yer değiştirmesiyle, yerin yer değiştirmesinin toplamına eşit olacaktır. Bu durumda, oluşacak eylemsizlik kuvveti de, kütleyle toplam ivmenin çarpımına eşit olacaktır. Bu durumda hareket denklemi, (1) denklemindekine benzer biçimde, aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$m[\ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t)] + c\dot{u}(t) + ku(t) = 0 \quad (2)$$

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (3)$$

(3) denklemi, tek serbestlik dereceli sistemin, yer hareketi etkisinde sönümlü zorlanmış titreşimine ait hareket denklemidir. Eylemsizlik kuvveti toplam ivme cinsinden yazılırken, sönüm kuvveti ve yapıya geçen kuvvet, bağıl hız ve bağıl yer değiştirme ile orantılı olduklarından, bağıl hız ve yer değiştirmeye bağıl olarak ifade edilirler. Bu kuvvetler, Şekil 4'te, Şekil 2'dekine benzer biçimde gösterilmiştir. (3) denklemin her iki tarafı  $m$ 'ye bölünürse, (4)'teki dönüşümleri yapmak koşuluyla (5) denklemi elde edilir.

$$c = 2m\omega\xi \quad (4a)$$

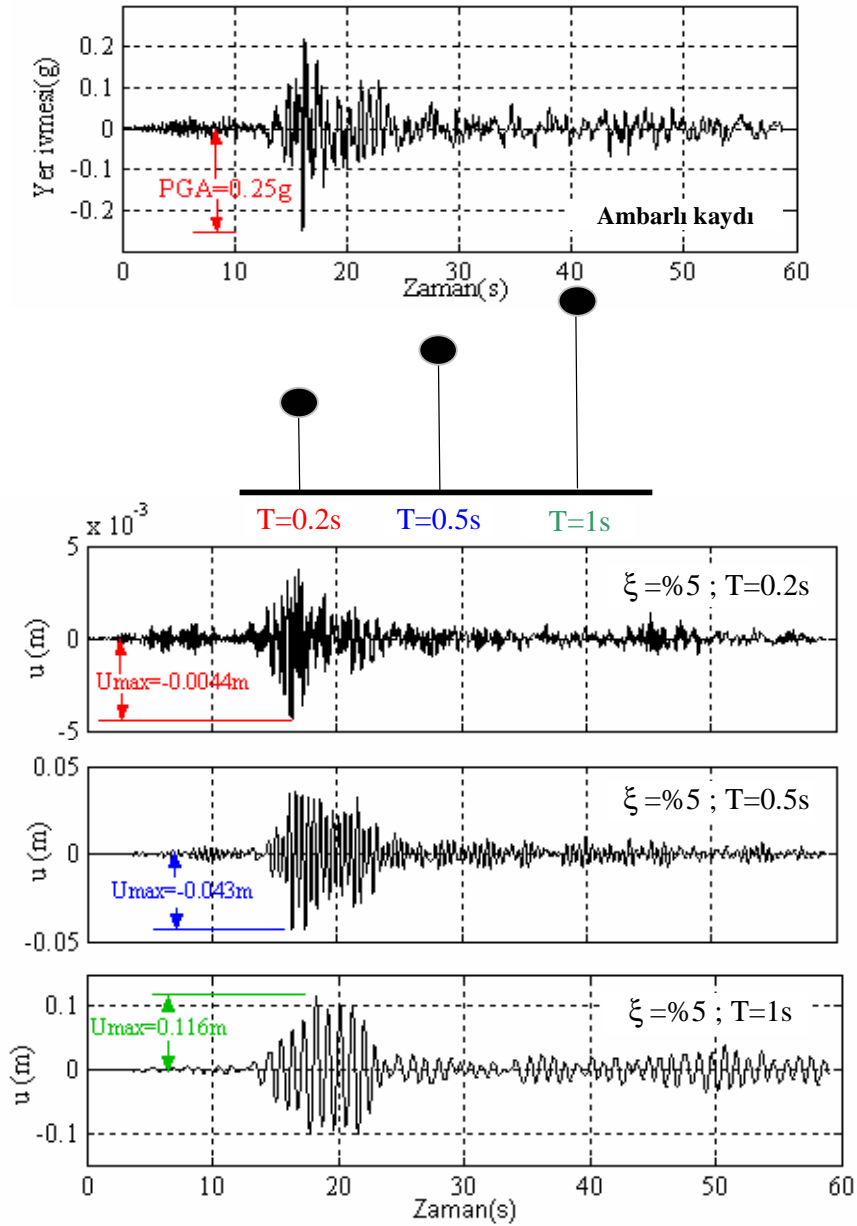
$$\frac{k}{m} = \omega^2 \quad (4b)$$

$$\ddot{u}(t) + 2\omega\xi\dot{u}(t) + \omega^2u(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (5)$$

(4) denklemlerinde görülen  $\omega$ , açısal frekansı ifade eder, yapının doğal titreşim periyodu  $T$  ile arasında  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  bağıntısı vardır.  $\xi$  sönüm oranı olarak adlandırılır, betonarme yapılar için genelde %5 olduğu varsayılır.

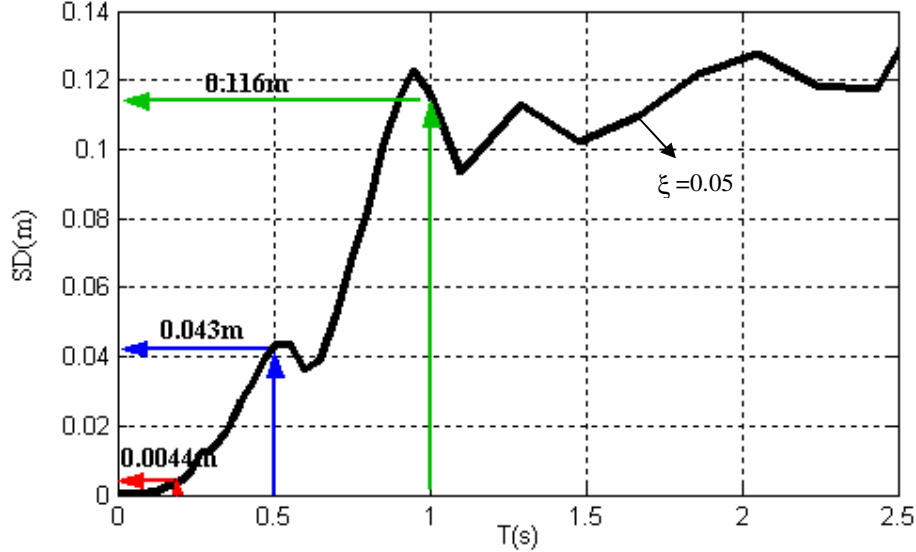
(5) denklemi her hangi bir sayısal çözümleme yöntemiyle çözülürse, zamana bağlı olarak değişen yer ivmesi ( $\ddot{u}_g(t)$ ) altında oluşacak yer değiştirme ( $u(t)$ ), sabit bir sönüm oranı ( $\xi$ )

için zamana bağlı olarak bulunabilir (time history analysis). Buna bağlı olarak da, taban kesme kuvveti ( $V_i(t)$ ) ve iç kuvvetler gibi diğer tasarım parametreleri de zamana bağlı olarak belirlenebilir. Aynı çözümler, doğal titreşim periyodu ( $T$ ) farklı **tek serbestlik dereceli sistemler** için de yapılabilir. Şekil 5'te, 1999 Kocaeli depremi sırasında kaydedilmiş Ambarlı kaydı gösterilmiştir. Yatay eksen saniye (s) cinsinden zamanı, düşey eksen ise yer çekimi ivmesi (g) cinsinden yer ivmesini göstermektedir. Şekil 5'te işaretlendiği gibi, **maksimum yer ivmesi (peak ground acceleration-PGA)**  $0.25g$  ( $\sim 2.5 \text{ m/s}^2$ )dir. Sönüm oranı %5 olmak kaydıyla, periyotları farklı 3 ayrı sistemin, söz konusu yer hareketi altında yer değiştirme değerleri zamana bağlı olarak gösterilmiştir. Farklı periyotlar için hesap yapılmasının nedeni, periyodun yapının kütlesi ve rijitliğine bağlı bir parametre olmasıdır (bkz. Denklem (4b)). Farklı periyotlara sahip tek serbestlik dereceli sistemleri göz önüne almak, rijitlikleri ve kütleleri farklı tek serbestlik dereceli sistemler için hesap yapmayı sağlar.



Şekil 5

Yapı tasarımında, çoğu zaman, yapıya etkiyen yüklerin zamana bağlı olarak değişimi tasarımcıyı ilgilendirmez. Tasarıma esas olan, yapıya etkiyen yüklerin alabileceği en büyük değerdir. Dolayısıyla tasarım açısından, Şekil 5'te verilmiş olan yer değiştirme-zaman değişiminden çok, bu zaman aralığında yer değiştirmenin aldığı en büyük değer önemlidir. Her bir sistem için bu yer değiştirme değeri Şekil 5'te işaretlenmiştir. Bu kez (5) denklemi, sabit bir sönüm oranı için, yukarıda tarif edildiği gibi periyodu farklı (örneğin  $0.01s \leq T \leq 2.5s$  arasında 0.05s'lik artımlarla) bir çok *tek serbestlik dereceli sistem* için çözülür, elde edilen en büyük yer değiştirmeler, yatay ekseninde yapı periyodunu, düşey ekseninde de en büyük yer değiştirmeyi gösteren bir grafiğe işaretlenirse, Şekil 6'da gösterilen yer değiştirme spektrumu elde edilir.



Şekil 6 Yer değiştirme spektrumu (1999-Kocaeli depremi-Ambarlı yer kaydı)

Yukarıdaki paragrafta açıklandığı gibi, **yer değiştirme spektrumları, belirli bir yer hareketi etkisinde, sabit bir sönüm oranı için, periyotları farklı tek serbestlik dereceli sistemlerin yapacağı en büyük yer değiştirme değerlerini gösterirler.** Bu spektrumdan, periyoda bağlı olarak okunacak yer değiştirmeye de **spektral yer değiştirme (spectral displacement - SD)** adı verilir.

Yer değiştirme en büyük değerini aldığı anda, yapıda oluşan iç kuvvetleri veren bağıntı (6) denklemiyle bulunabilir.

$$F = k(u_{\max}) = k(SD) \quad (6)$$

F kuvvetinin, yapıya statik olarak etkideği varsayılp, statikten bilinen yöntemlerle iç kuvvetler hesaplanabilir. Bu durumda bulunacak iç kuvvetler, yer hareketi etkisinde oluşan en büyük iç kuvvetler olarak kabul edilip, tasarımda kullanılabilirler. (6) denklemi, (4b) denklemi kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$F = m\omega^2(SD) \quad (7)$$

(7) denklemi, **yer değiştirmenin en büyük değerine ulaştığı anda yapıya geçen kuvvetin, eylemsizlik kuvveti cinsinden ifadesidir.** Bir cisme etkiyen yük, Newton kanunu gereği,

cismnin kütleyle ivmesinin çarpımına eşittir. Bu durumda, (7) denkleminde  $\omega^2SD$  terimleri ivmeyi ifade ederler. Dolayısıyla, spektral yer değıştirmesi belirli bir sistem için ivme değeri, sistemin spektral yer değıştirmesi ile açışal frekansının karesinin çarpımıyla bulunabilir.

Bu ivme değeri, (5) denkleminin çözümlüyle de elde edilebilir. Toplam ivme (yapının ivmesiyle yer ivmesinin toplamı), (5) denkleminin çözümlüyle aşığıdaki gibi bulunur.

$$\ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t) = -2\omega\xi\dot{u}(t) - \omega^2u(t) \quad (8)$$

Yer değıştirmenin en büyük değeri ulaşığı an  $t=t_i$  olarak kabul edilirse, bu denklem, yer değıştirmenin en büyük değeri ulaşığı  $t_i$  anı için, yani spektral yer değıştirme için (9) denklemindeki gibi yazılabilir.

$$\ddot{u}(t_i) + \ddot{u}_g(t_i) = -2\omega\xi\dot{u}(t_i) - \omega^2u_{\max} = -2\omega\xi\dot{u}(t_i) - \omega^2SD \quad (9)$$

Yer değıştirme en büyük değeri ulaşığı an, hız  $\dot{u}(t_i)$  sıfıra eşit olacağından  $-2\omega\xi\dot{u}(t_i)$  terimi de sıfır olacaktır. Bu durumda (9) denklemleri aşığıdaki halini alır.

$$\ddot{u}(t_i) + \ddot{u}_g(t_i) = -\omega^2(SD) \quad (10)$$

Görüldüğü gibi (10) denklemlüyle bulunan ivme, sistemin spektral yer değıştirmesi ve açışal frekansının çarpımıyla bulunan ivmenin mutlak değerce aynıdır. Ancak bu durum, sadece, yer değıştirmenin en büyük değeri ulaşığı an geçerlidir. Aksi halde hız sıfırdan farklı olacağından her iki şekilde bulunacak ivme değeri farklı olacaktır ( $\omega^2SD$  ile  $(\ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t))$  sönümsüz sistemler için her zaman eşittir, sönümsüz bir sistemde  $\xi=0$  olacağından,  $-2\omega\xi\dot{u}(t)$  her zaman sıfırdır). Ayrıca, bu şekilde bulunan ivme ( $\omega^2SD$ ) toplam ivmenin  $(\ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t))$  en büyük değeri değildir. Yer değıştirmenin en büyük değeri aldığı an oluşan ivmedir. Toplam ivme, en büyük değeri yer hareketi süresince başka bir “t” anında ulaşır. Ancak, yapıya statik olarak etki ettirilecek kuvvetin hesabı için, (6) ve (7) denklemlerinden de görüleceğı gibi toplam ivmenin en büyük değeri değil, en büyük yer değıştirmeye karşılık gelen ivme değeri gereklidir. Çünkü yapıya geçen kuvvet görelü yer değıştirmeyle orantılıdır. Bu aşamada, spektrum tanımını hatırlamakta fayda vardır. Yer değıştirme spektrumunda açıklandığı gibi, spektrumlar, belirli bir yer hareketi etkisinde, sabit bir sönüm oranı için, periyotları farklı tek serbestlik dereceli sistemlerin o yer hareketine vereceğı tepkinin (response) (yer değıştirme, hız, ivme) en büyük değeri gösterirler. Yer değıştirme spektrumuyla, periyotları farklı tek serbestlik dereceli sistemlerin, o yer hareketi altında yapacakları en büyük yer değıştirmelerin gösterildiğinden yukarıda söz edilmişti. Bu tanımdan hareketle, ivme spektrumuyla da, periyodu farklı tek serbestlik dereceli sistemlerin, o yer hareketi altında, maruz kalacakları toplam ivmenin  $(\ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t))$  en büyük değeri gösterileceğı düşünülebilir. Ancak, yapıda oluşan iç kuvvetlerin, eylemsizlik kuvveti cinsinden hesabında kullanılacak spektrum, toplam ivme  $(\ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t))$  yerine, yer değıştirmenin en büyük değeri aldığı andaki ivmeyi ( $\omega^2SD$ ) gösterir.

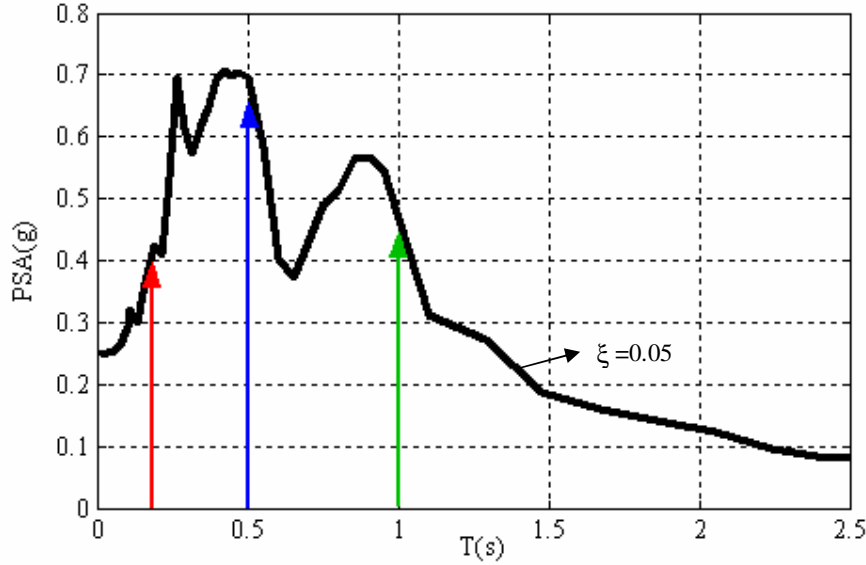
İç kuvvetlerin eylemsizlik kuvveti cinsinden hesabında (denklem (7)), toplam ivmenin en büyük değeri yerine kullanılan bu ivmeye ( $\omega^2SD$ ) **sözde ivme veya yalancı ivme (pseudo acceleration), periyotları farklı tek serbestlik dereceli sistemlerin sözde ivme değeri**

**gösteren spektruma da sözde ivme davranış spektrumu (pseudo acceleration spectra)** adı verilir. Yer değiştirme spektrumu elde edildikten sonra, her bir periyot değeri için  $\omega^2SD$  değeri hesaplanarak sözde ivme davranış spektrumu elde edilir. Bu spektrumdan, belirli bir periyot için okunacak ivme değeri de **sözde spektral ivme (pseudo spectral acceleration – PSA)** olarak adlandırılır. Sözde spektral ivmeyle spektral yer değiştirme arasındaki ilişki (11) denkleminde verilmiştir.

$$PSA = \omega^2(SD) \quad (11)$$

Şekil 7’de, Ambarlı kaydı için elde edilen sözde ivme davranış spektrumu gösterilmiştir. Şekil 5’te verilmiş olan sistemlerin sözde spektral ivmeleri de davranış spektrumu üzerinde işaretlenmiştir. Örneğin, periyodu 0.5s olan tek serbestlik dereceli sistem için, (11) denklemi kullanılarak,

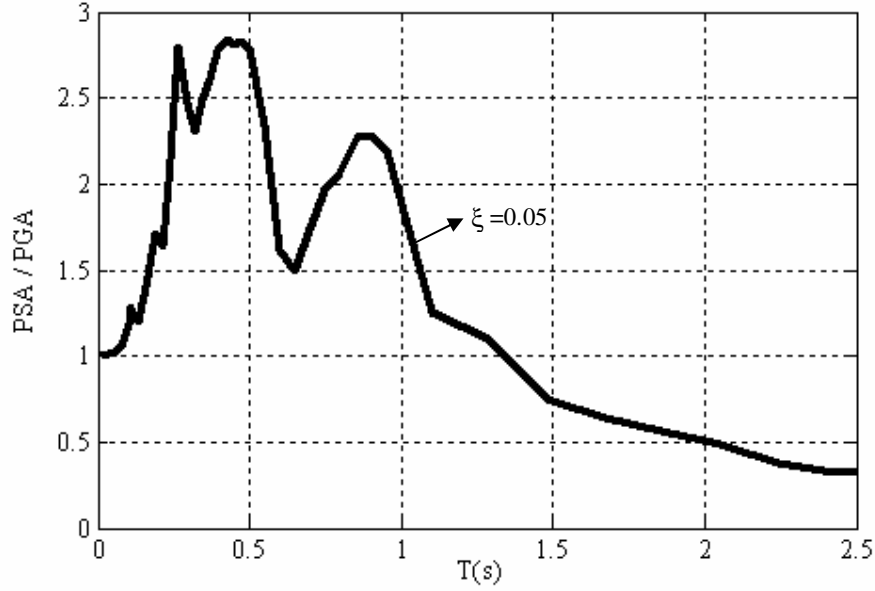
$$\omega^2 = \left(\frac{2\pi}{0.5}\right)^2 = 157.75 \frac{1}{s^2} \Rightarrow PSA = 157.75(0.043) = 6.78 \frac{m}{s^2} = 0.678g \text{ şeklinde hesaplanabilir.}$$



Şekil 7 Sözde ivme davranış spektrumu (1999-Kocaeli depremi-Ambarlı yer kaydı)

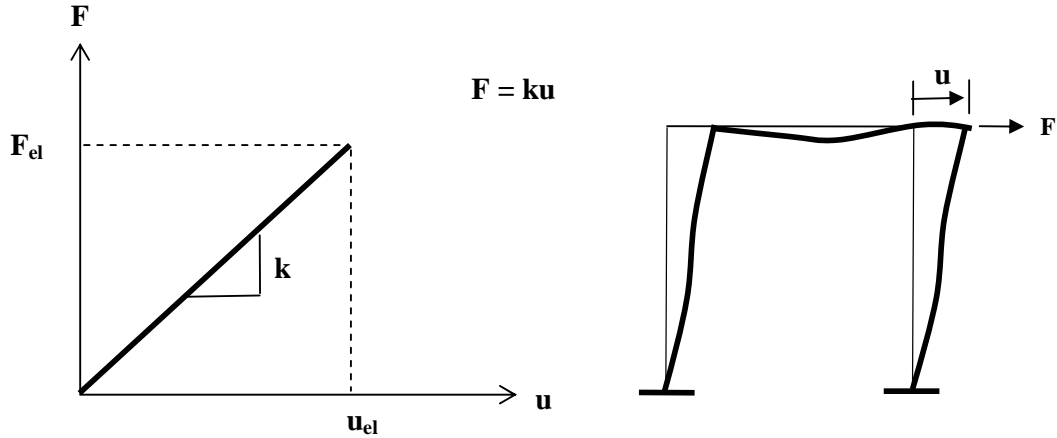
Şekil 7’de görüldüğü gibi, yatay eksen yer değiştirme spektrumunda olduğu gibi tek serbestlik dereceli sistemlere ait periyotları, dikey eksen ise bu defa yer çekimi ivmesi (g) cinsinden sözde spektral ivmeleri göstermektedir. Burada unutulmaması gereken nokta, Şekil 7’de verilen sözde ivme davranış spektrumunun sadece bir depremin, belirli bir bölgeden alınmış kaydı için çizildiğidir. Dolayısıyla, sadece o yer kaydı için geçerlidir. Farklı yer hareketleri için çizilmiş davranış spektrumları birbiriyle karşılaştırabilmek için, sözde ivme değerleri geçerli oldukları yer hareketine ait maksimum yer ivmesiyle (peak ground acceleration-PGA) normalize edilir ve normalize edilmiş sözde ivme davranış spektrumları çizilir. Şekil 8’de, Şekil 7’de verilen sözde ivme davranış spektrumunun normalize edilmiş hali gösterilmiştir. Ambarlı kaydının en büyük yer ivmesi (PGA) değerinin 0.25g olduğundan söz edilmişti. Periyodu 0.5s olan tek serbestlik dereceli sistem için sözde ivme değeri 0.678g olarak

bulunmuştu. Bu durumda, söz konusu sistem için normalize ivme  $\frac{PSA}{PGA} = \frac{0.648}{0.25} = 2.59$  olacaktır.



Şekil 8 Normalize edilmiş sözde ivme davranış spektrumu (1999-Kocaeli depremi-Ambarlı yer kaydı)

Buraya kadar yapılan açıklamalar yapı davranışının doğrusal elastik olduğu varsayımına dayanmaktadır. Şekil 9'da bu varsayım şematik olarak gösterilmiştir.



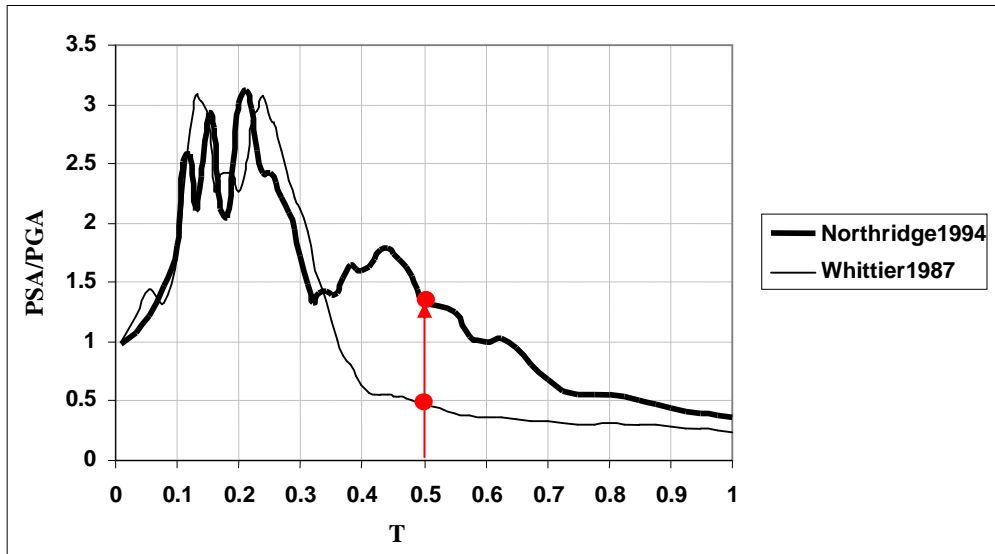
Şekil 9 Doğrusal elastik davranış varsayımı

Şekil 9'dan görüldüğü gibi, doğrusal elastik davranış durumunda, yapıya etkiyen kuvvet ile yapının yer değiştirmesi birbirleriyle orantılıdır. Benzer biçimde, doğrusal elastik davranış kabulü ile çizilecek spektrumlar vasıtasıyla elde edilecek deprem kuvveti de elastik deprem yükü olacaktır. Sonuç olarak elastik deprem kuvveti, sözde spektral ivme kullanılarak, eylemsizlik kuvveti cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$F_{el} = m(PSA) \quad (12)$$

## TASARIM SPEKTRUMU

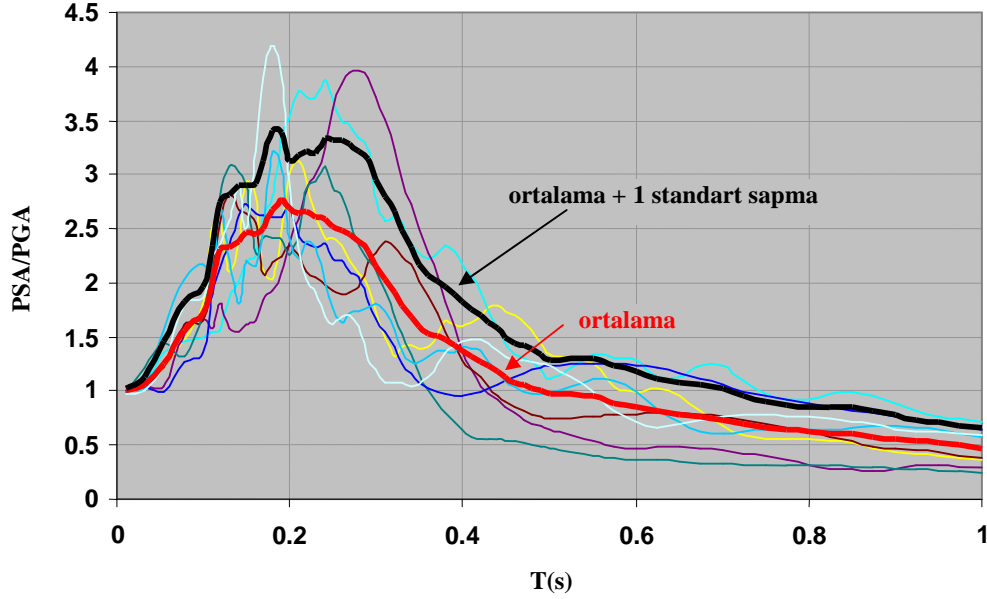
Spektrumların, belirli bir yer hareketi etkisinde, sabit bir sönüm oranı için, tek serbestlik dereceli sistemlerin, o yer hareketine verdiği tepkinin (ivme, hız, yer değiştirme) en büyük değerini gösterdiğinden daha önce söz edilmişti. Tasarım spektrumları ise yeni yapıların tasarımında kullanılacak deprem yükünü belirlemekte kullanılır. Başka bir deyişle, tasarım spektrumu, kaydedilmiş bir deprem için değil, gelecekte ortaya çıkması olası depremler için belirlenir. Doğaldır ki, bir bölgede, gelecekte ortaya çıkması olası depremlere ilişkin bir tasarım spektrumu hazırlamak için, aynı bölgede geçmişte ortaya çıkmış depremlerden yararlanır. Eğer, o bölgede, geçmişte yeteri kadar kayıt elde edilememişse, bu durumda benzer özelliklere sahip (deprem odağının kayıt yerinden olan uzaklığı, fay mekanizması, sismik dalgaların yayıldığı zemin cinsi ve yerel zemin koşulları gibi) başka bir bölgede elde edilmiş kayıtlardan yararlanır. Şekil 7 ve 8’de görüldüğü gibi, tek bir yer hareketi için çizilmiş ivme spektrumu kırıklı bir yapıya sahiptir. Aynı bölgede, farklı zamanlarda kaydedilmiş yer hareketleri için çizilecek spektrumlarda benzer şekilde kırıklı olacaktır. Şekil 10’da, Los Angeles Obregon Park istasyonunda, 1987 Whittier ve 1994 Northridge depremlerinde alınmış kayıtlara ait spektrumlar görülmektedir.



Şekil 10

Görüldüğü gibi spektrumlar genel karakteristikleri itibarıyla birbirinden farklı ve oldukça kırıklıdır. Bu farklılıklar nedeniyle, örneğin, periyodu 0.5s olan tek serbestlik dereceli sistem için bir birinden çok farklı değerler almaktadırlar. Ayrıca, maksimum değerlerine de farklı periyotlarda ulaşmaktadırlar. Bu durumda, aynı bölgede kaydedilmiş olmalarına rağmen, bu depremlerin hiç biri tek başlarına, gelecekte gerçekleşmesi olası depremleri temsil etmezler. Zaten gelecekte gerçekleşmesi olası depremler için böylesine kırıklı bir spektrum tahmin etmek olanaklı değildir. Ancak, bu bölge için bir tasarım spektrumu elde etmekte kullanılabilirler. Tasarım spektrumları, genelde, o bölgede kaydedilmiş çok sayıda deprem için çizilmiş spektrumların istatistik yöntemlerle değerlendirilmesi sonucu elde edilirler. Kimi

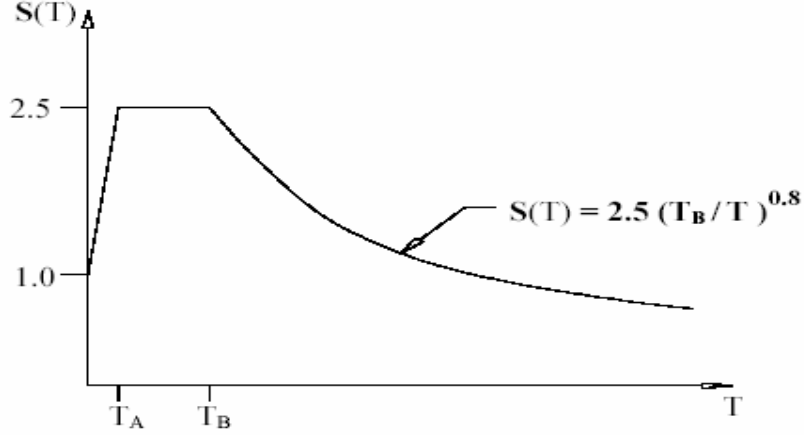
zaman, her periyot değeri için, farklı spektrumlarda elde edilen değerlerin ortalaması kullanılır. Bazı durumlarda ise ortalama yerine, ortalamaya standart sapmanın eklenmesiyle (ortalama+1standart sapma) elde edilen spektrum tasarım spektrumu olarak kabul edilir. Bazen de, eldeki bütün spektrumları içine alan zarf spektrumu tasarım spektrumu olarak kullanılabilir. Şekil 11’de, sözü edilen istasyonda, 1987 Whittier, 1991 Sierra ve 1994 Northridge depremlerinde alınmış 8 farklı kayıt için çizilen spektrumlar, ortalama spektrum ve ortalama+1standart sapmaya karşılık gelen spektrum gösterilmiştir.



Şekil 11

İstatistik değerlendirmenin sonucunda, Şekil 11’de de görüldüğü gibi daha düzgün ve yumuşak spektrumlar elde edilir. Göz önüne alınan yer hareketi sayısı arttıkça, istatistik değerlendirmeyle elde edilen eğrilerin kırıklığı azalır. Bu nedenle, yönetmelikler de verilen spektrumlar, tek bir yer hareketi için çizilmiş spektrumlara göre çok daha düzgündür. ABYYHY98’de elastik deprem yükünü hesaplamakta kullanılacak, normalize edilmiş elastik tasarım spektrumu, yerel zemin sınıflarına bağlı olarak verilmiştir. Bu spektrum genel haliyle Şekil 12’de gösterilmiştir. Şekil 12’de verilmiş olan spektrumun yatay ekseninde yapı periyodu, dikey ekseninde ise  $S(T)$  ile gösterilen yapı periyoduna bağlı **spektrum katsayısı** verilmiştir. Spektrum katsayısı terimi, Şekil 8’de verilen normalize edilmiş spektrumda gösterilmiş olan (PSA/PGA) parametresine karşılık gelir.

Elastik deprem yükünün hesabı için spektrum katsayısının verilmiş olması yeterli değildir. Sözde spektral ivmenin belirlenebilmesi için maksimum yer ivmesi (PGA) değerine ihtiyaç vardır. Maksimum yer ivmesi, ABYYHY98’de **etkin yer ivmesi katsayısı**( $A_0$ )’na bağlı olarak verilmiştir. Tablo 1’de, deprem bölgesine bağlı olarak kullanılması gereken etkin yer ivmesi katsayıları verilmiştir.



Şekil 12

Tablo 1 Etkin yer ivmesi katsayısı

<i>Deprem Bölgesi</i>	$A_0$
1	0.40
2	0.30
3	0.20
4	0.10

Maksimum yer ivmesi ile etkin yer ivmesi katsayısı arasında aşağıdaki ilişki vardır.

$$PGA = A_0 g$$

Böylece, elastik deprem kuvvetini hesaplamak için gerekli olan ve spektrum katsayısı ile etkin yer ivmesi katsayısının ve yer çekimi ivmesinin çarpılması ile bulunacak olan sözde spektral ivme değeri tanımlanmış olmaktadır.

$$PSA = \left( \frac{PSA}{PGA} \right) PGA \rightarrow A_0 g \text{ [Yönetmelikte deprem bölgesine bağlı olarak verilir]}$$

$$\downarrow$$

$$S(T) \text{ [Yönetmelikte yerel zemin sınıfına bağlı olarak verilir]}$$

$$PSA = S(T) A_0 g$$

Şekil 12'de verilmiş olan spektrumun yatay ekseninde görülen  $T_A$  ve  $T_B$  periyotları, **spektrum karakteristik periyotları** olarak adlandırılırlar. Bu periyotlar, ABYYHY98'de yerel zemin sınıfına bağlı olarak verilmiştir.

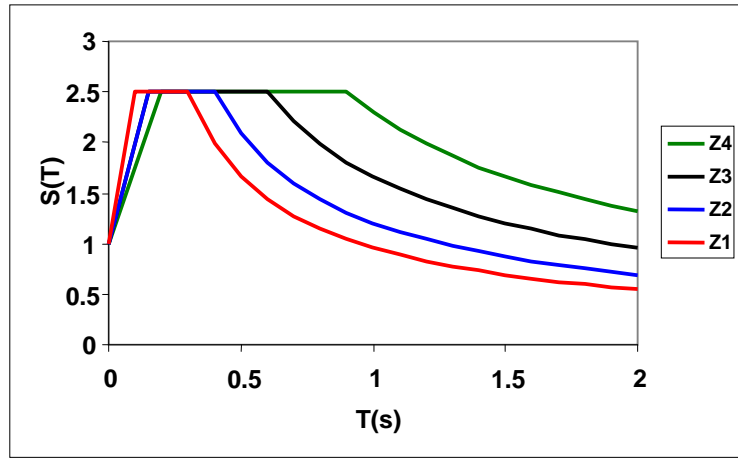
Tablo 2 Spektrum karakteristik periyotları

<i>Tablo 12.2'ye göre Yerel Zemin Sınıfı</i>	$T_A$ (saniye)	$T_B$ (saniye)
<b>Z1</b>	<b>0.10</b>	<b>0.30</b>
<b>Z2</b>	<b>0.15</b>	<b>0.40</b>
<b>Z3</b>	<b>0.15</b>	<b>0.60</b>
<b>Z4</b>	<b>0.20</b>	<b>0.90</b>

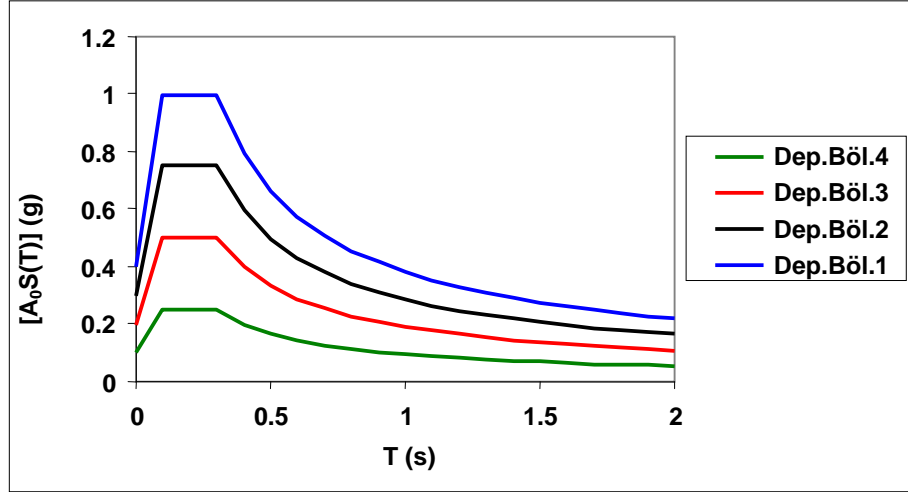
Böylece, her bir yerel zemin sınıfı ve deprem bölgesi için, elastik deprem yükünü hesaplamakta kullanılacak olan sözde ivme spektrumu tanımlanmış olmaktadır. Şekil 13'de her bir yerel zemin sınıfı için spektrum katsayıları gösterilmiştir. Şekil 14'de ise yerel zemin sınıfı 1 için, 1.,2.,3. ve 4. derece deprem bölgelerinde kullanılacak olan sözde ivme spektrumu gösterilmiştir.

Bir yapının tasarımına esas alınacak elastik deprem yükü, eğer tasarımda kullanılmak üzere hazırlanmış bir sözde ivme spektrumu varsa, (12) denklemiyle bulunabilir. 1. derece deprem bölgesinde, ağırlığı 2000 kN, periyodu 0.5s. olan bir yapının tasarımında kullanılacak elastik deprem yükünü, zemin sınıfı 4 için hesaplayalım. Yapı 1.derece deprem bölgesinde yer aldığı için etkin yer ivmesi katsayısı ( $A_0$ ) 0.40, başka bir deyişle, en büyük yer ivmesi (PGA) 0.40g olacaktır. (12) denklemi, sözde spektral ivme yerine, maksimum yer ivmesine göre normalize edilmiş ivme cinsinden yeniden yazılacak olursa (13) denklemi elde edilir.

$$F_{el} = m \left( \frac{PSA}{PGA} \right) PGA \quad (13)$$



Şekil 13 Yerel zemin sınıfına bağlı spektrum katsayıları



Şekil 14 Yerel zemin sınıfı 1 için ivme spektrumları

(13) denklemini eldeki veriler yerine konulduğunda aşağıdaki halini alır.  $\frac{PSA}{PGA}$  oranı başka bir anlam ifade ettiğinden, bu oranda PGA yerine 0.40g yazılmamıştır.

$$F_{el} = m \left( \frac{PSA}{PGA} \right) 0.4g \quad (14)$$

$$F_{el} = W \left( \frac{PSA}{PGA} \right) 0.4 \quad (15)$$

Etkin yer ivmesi katsayısı( $A_0$ )'nın 1. derece deprem bölgesi için 0.40 olduğu daha önce belirtilmişti. Bu durumda (15) denklemini (16)'daki gibi yazılabilir.

$$F_{el} = W \left( \frac{PSA}{PGA} \right) A_0 \quad (16)$$

Bu aşamada, elastik deprem kuvvetinin hesabı için  $\frac{PSA}{PGA}$  oranının belirlenmesi gereklidir. Bu oran, yönetmelikte spektrum katsayısı ( $S(T)$ ) olarak tanımlandığı daha önce belirtilmişti. Ayrıca, bu oranın, sözde ivme spektrumu değerinin maksimum yer ivmesiyle normalize edilmesi sonucu elde edilebileceği de açıklanmıştı (Şekil 8). Bu durumda (16) denklemini (17) denklemindeki halini alır.

$$F_{el} = WS(T)A_0 \quad (17)$$

ABYYHY98, yapıların tasarımında kullanılacak olan elastik deprem yükünün (17) denkleminde hesaplanmasını öngörmektedir. Bununla beraber, bu elastik deprem yükü, konut, işyeri ve oteller gibi yapıların tasarımında kullanılacak deprem yüküdür. Kamu binaları, okullar, yurtlar, askeri kışlalar, hastaneler, enerji üretim ve dağıtım tesisleri, depremden hemen sonra kullanılması gereken yapılar ve halkın kısa süreli de olsa yoğun olarak bulunduğu tiyatro, sinema ve spor salonları gibi yapılar için kullanılacak deprem yükü, (17)

denklemlerle bulunan deprem yükünün birden büyük bir katsayıyla çarpılması sonucu arttırılır. Bu katsayıya **bina önem katsayısı (I)** denir.

Tablo 3 Bina önem katsayısı (I)

<i>Binanın Kullanım Amacı veya Türü</i>	<i>Bina Önem Katsayısı ( I )</i>
<p><b><u>1. Deprem sonrası kullanımı gereken binalar ve tehlikeli madde içeren binalar</u></b></p> <p>a) Deprem sonrasında hemen kullanılması gerekli binalar (Hastaneler,dispanserler, sağlık ocakları, itfaiye bina ve tesisleri, PTT ve diğer haberleşme tesisleri, ulaşım istasyonları ve terminalleri, enerji üretim ve dağıtım tesisleri; vilayet, kaymakamlık ve belediye yönetim binaları, ilk yardım ve afet planlama istasyonları)</p> <p>b) Toksik, patlayıcı, parlayıcı, vb özellikleri olan maddelerin bulunduğu veya depolandığı binalar</p>	1.5
<p><b><u>2. İnsanların uzun süreli ve yoğun olarak bulunduğu ve değerli eşyanın saklandığı binalar</u></b></p> <p>a) Okullar, diğer eğitim bina ve tesisleri, yurt ve yatakhaneler, askeri kıışlalar, cezaevleri, vb.</p> <p>b) Müzeler</p>	1.4
<p><b><u>3. İnsanların kısa süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar</u></b></p> <p>Spor tesisleri, sinema, tiyatro ve konser salonları, vb.</p>	1.2
<p><b><u>4. Diğer binalar</u></b></p> <p>Yukarıdaki tanımlara girmeyen diğer binalar (Konutlar, işyerleri, oteller, bina türü endüstri yapıları, vb)</p>	1.0

Bu durumda, (17) denklemi (18) denklemindeki halini alır.

$$F_{el} = WS(T)A_oI \quad (18)$$

Bina önem katsayısı ABYYHY98'de, Tablo3'de gösterildiği gibi verilmiştir. Yerel zemin sınıfı 4 ve deprem yükünü hesapladığımız binanın periyodu 0.5s olduğu için, spektrum katsayısı (S(T)) 2.5 olacaktır (Şekil 13). Bina kullanım amacının da konut olduğunu varsayarsak, bina önem katsayısı 1 olacaktır. Bu durumda (18) denklemi kullanılarak elastik deprem yükü bulunabilir.

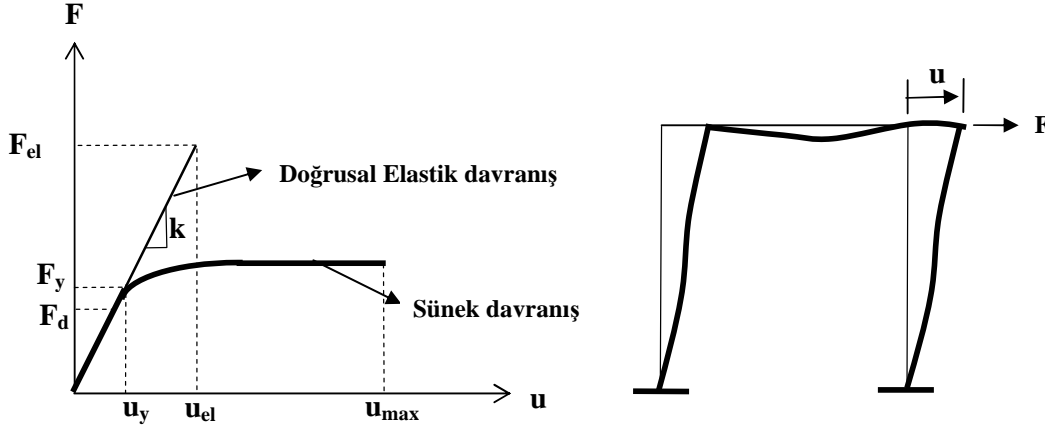
$F_{el} = (2000)(2.5)(0.40)(1) = 2000kN$  , eğer bina konut yerine okul olsaydı bina önem katsayısı 1.4 olacağından tasarımda kullanılacak elastik deprem yükü de 2800kN olacaktır. (18) denkleminde görüldüğü gibi, elastik deprem yükü, bina ağırlığıyla üç tane katsayının çarpımından oluşmaktadır. Bu katsayıların çarpımına, **spektral ivme katsayısı (A(T))** adı verilir.

$$A(T) = S(T)A_oI \quad (19)$$

## TASARIM DEPREM YÜKÜ

Depreme dayanıklı yapı tasarımının temel ilkesi daha önce açıklanmıştı. Bu ilkedan anlaşılacağı üzere, tasarımla amaçlanan, yapıların şiddetli depremleri hasarsız atlatmasını,

sağlamak değildir. Bu nedenle yapılar, bazı özel durumlar dışında hiçbir zaman elastik deprem yüküne göre tasarlanmazlar. Yani binaların elastik ötesi davranış gösterecekleri (hasar görek enerji yutacakları) daha tasarımın başında öngörülür. Bununla beraber, göçmenin önlenmesi ve can güvenliğinin korunması ilkesi her durumda geçerlidir.



Şekil 15 Sünek yapı davranışı

Bu aşamada, süneklik (ductility) kavramının tanımlanması gerekmektedir. Yer değiştirme sünekliği, bir yapının yük taşıma kapasitesinde önemli bir azalma olmadan yer değiştirme yapabilme yeteneği olarak tanımlanır. Şekil 9’da verilmiş olan doğrusal elastik davranış varsayımı Şekil 15’te tekrar gösterilmiştir. Doğrusal elastik davranışta, yapı, artan yatay yük altında, rijitliğinde her hangi bir azalma olmadan, yüklerle orantılı olarak yer değiştirme yapmaktadır. Rijitlikte her hangi bir azalma olmaması hasar oluşmadığı anlamına gelir. Ancak, yukarıda belirtildiği gibi, yapılar doğrusal elastik davranış gösterecek şekilde tasarlanmazlar. Şekil 15’te sünek bir yapının artan yükler altında göstereceği davranış da gösterilmiştir. Sünek yapının başlangıç rijitliği (k), elastik davranış gösteren yapıyla aynıdır. Sisteme etkiyen yatay yük  $F_y$ ’ye ulaşıncaya kadar, yatay yer değiştirmeler, doğrusal elastik davranış gösteren yapıda olduğu gibi, yüklerle orantılı olarak artacaktır. Yük bu değere ulaştığında, yer değiştirme değeri de  $u_y$ ’ye ulaşacaktır. Bu noktadan itibaren yapının rijitliği giderek azalmaya başlar. Yapının rijitliğinin azalmaya başladığı bu noktaya ilk akma noktası denir. Yapının akması ve rijitliğinin azalması hasarın göstergesidir. Yapının rijitliğinin giderek azalmasıyla, yapı daha fazla yük taşıyamaz. Ancak yer değiştirmeler, yapının yük taşıma kapasitesinde bir azalma olmadan, sabit yük altında artmaya devam eder. Yani yapı elemanları şekil değiştirme yaparak enerji yutar. Yer değiştirme değeri  $u_{max}$ ’a ulaştığında, yapı rijitliği çok azalmış olacağından, ya daha fazla yer değiştirme yapamayarak göçme durumuna gelir, ya da yer değiştirme yapabilese bile yük taşıma kapasitesinde önemli kayıplar olacağından göçtüğü kabul edilebilir. Şekil 15’ten yararlanarak bazı kavramlar açıklanabilir. Genel olarak sünek bir yapının göçme yer değiştirmesi ( $u_{max}$ ) değerinin yeterince büyük olması beklenir. Ancak, bu sünekliğin göstergesi değildir. Sünekliğin göstergesi, göçme yer değiştirmesinin akma yer değiştirmesine oranı olarak tanımlanan süneklik katsayısıdır ( $\mu$ ).

$$\mu = \frac{u_{max}}{u_y} \quad (20)$$

Depreme dayanıklı yapı tasarımıyla hedeflenen, yapıların deprem etkisi altında sünek davranış gösterecek şekilde tasarlanmasıdır. Dolayısıyla, tasarım deprem yükü olarak,  $F_{el}$

yerine, ondan daha küçük olan  $F_d$  kullanılır. Yani yapılar, doğrusal elastik kapasiteleri  $F_{el}$  değil,  $F_d$  olacak (gerçekte  $F_y$ ), ancak, göçmeyi engellemek için de yeterince sünek davranış gösterecek şekilde tasarlanmalıdır. Elastik deprem yükünün ( $F_{el}$ ) spektrumlar yardımıyla nasıl elde edileceği daha önce açıklanmıştı. Bu durumda, tasarım deprem yükünün ( $F_d$ ) nasıl hesaplanacağını açıklanması gerekmektedir. Yapının deprem sırasında elastik davranış göstermesi için gerekli olan kapasitenin tasarım kapasitesine oranı **deprem yükü azaltma katsayısı** ( **$R_a$ -seismic load reduction factor, response modification factor, strength reduction factor**) olarak bilinir.

$$R_a = \frac{F_{el}}{F_d}, F_d = \frac{F_{el}}{R_a} \quad (21)$$

Bu katsayı, ABYYHY98'de, yapı periyoduna ( $T$ ) ve **taşıyıcı sistem davranış katsayısı** ( **$R$** )'na bağlı olarak belirlenir. Taşıyıcı sistem davranış katsayıları, taşıyıcı sistem tipine bağlı olarak, Tablo 4'te verilmiştir. Deprem yükü azaltma katsayısı  $T$  ve  $R$ 'ye bağlı olarak aşağıdaki denklemlerle hesaplanır.

$$R_a(T) = 1.5 + (R - 1.5) \frac{T}{T_A} \quad 0 \leq T \leq T_A \quad (22a)$$

$$R_a(T) = R \quad T > T_A \quad (22b)$$

Bu denklemlerde  $T_A$ , spektrum karakteristik periyodudur (Şekil 10). (18) denkleminde bulunan elastik deprem yükü, (22) denkleminde bulunan deprem yükü azaltma katsayısına bölünerek **tasarım deprem yükü** elde edilir. Bu yük ABYYHY98'de  $V_t$  ile gösterilir.

$$V_t = W \frac{A_0 S(T) I}{R_a} \quad (22)$$

Temel olarak, taşıyıcı sistemler, süneklik düzeyi normal ve yüksek olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Süneklik düzeyi yüksek betonarme çerçeve sistemler için kullanılacak olan tasarım deprem yükü, süneklik düzeyi normal betonarme çerçeve sistemler için kullanılacak olanın yarısıdır. Daha önce elastik deprem yükü 2000 kN olarak hesaplanan konut binasının tasarımında kullanılacak deprem yükü, binanın, sünekliği yüksek betonarme çerçeve olarak tasarlanması durumunda  $2000/8 = 250$  kN, sünekliği normal betonarme çerçeve olarak tasarlanması durumunda  $2000/4 = 500$  kN olacaktır. Görüldüğü gibi, ABYYHY98, 1.derece deprem bölgesinde yer alan (zemin sınıfı 4), taşıyıcı sistemi betonarme çerçevelerden oluşan ve periyodu 0.5s olan bir konut binasının tasarımında, binanın süneklik düzeyi normal olarak tasarlanması durumunda ağırlığının %25'i, süneklik düzeyi yüksek olarak tasarlanması durumunda ise ağırlığının %12.5'i kadar bir tasarım deprem yükünün esas alınmasını öngörmektedir.

Süneklik düzeyi yüksek bir taşıyıcı sistem tasarlamak, taşıyıcı sistemi oluşturan elemanların süneklik düzeylerinin yüksek olması halinde mümkündür. Bu nedenle, ABYYHY98, süneklik düzeyi yüksek taşıyıcı sistemlerin tasarımında daha küçük bir tasarım deprem yükü kullanılmasına izin vermekle beraber, taşıyıcı sisteme yüksek süneklik kazandırabilmek için, bazı ilave koşulların yerine getirilmesini öngörmektedir. Ani ve erken göçmeyi önlemek için ( $u_{max}$ 'ın yeterince büyük olması için), kolonların kirişlerden daha güçlü olması ve birleşim bölgelerinde kesme güvenliğinin sağlanmış olması istenir. Ayrıca, taşıyıcı sistemi oluşturan

kiriş ve kolonların tasarımında da bazı ilave koşullara uyulması gerekir (boyut, boyuna donatı oranı, basınç donatısı miktarı, enine donatı koşulları, normal kuvvetin sınırlandırılması vb.).

Tablo 4 Taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R)

<i>BİNA TAŞIYICI SİSTEMİ</i>	<i>Süneklik Düzeyi Normal Sistemler</i>	<i>Süneklik Düzeyi Yüksek Sistemler</i>
<b><u>(1) YERİNDE DÖKME BETONARME BİNALAR</u></b>		
(1.1) Deprem yüklerinin tamamının çerçevelerle taşındığı binalar.....	4	8
(1.2) Deprem yüklerinin tamamının bağ kirişli (boşluklu) perdelerle taşındığı binalar.....	4	7
(1.3) Deprem yüklerinin tamamının boşluksuz perdelerle taşındığı binalar.....	4	6
(1.4) Deprem yüklerinin çerçeveler ile boşluksuz ve/veya bağ kirişli (boşluklu) perdeler tarafından birlikte taşındığı binalar....	4	7
<b><u>(2) PREFABRİKE BETONARME BİNALAR</u></b>		
(2.1) Deprem yüklerinin tamamının, bağlantıları tersinir momentleri aktarabilen çerçevelerle taşındığı binalar .....	3	6
(2.2) Deprem yüklerinin tamamının; kolonları temelde ankastre, üstte mafsalı tek katlı çerçevelerle taşındığı binalar	—	5
(2.3) Deprem yüklerinin tamamının prefabrike boşluksuz perdelerle taşındığı binalar.....	—	4
(2.4) Deprem yüklerinin, bağlantıları tersinir momentleri aktarabilen prefabrike çerçeveler ile yerinde dökme boşluksuz ve/veya bağ kirişli (boşluklu) perdeler tarafından birlikte taşındığı binalar.....	3	5
<b><u>(3) ÇELİK BİNALAR</u></b>		
(3.1) Deprem yüklerinin tamamının çerçevelerle taşındığı binalar.....	5	8
(3.2) Deprem yüklerinin tamamının; kolonları temelde ankastre, üstte mafsalı tek katlı çerçevelerle taşındığı binalar	4	6
(3.3) Deprem yüklerinin tamamının çaprazlı perdeler veya yerinde dökme betonarme perdeler tarafından taşındığı binalar		
(a) Çaprazların merkezi olması durumu.....	3	—
(b) Çaprazların dışmerkez olması durumu.....	—	7
(c) Betonarme perde durumu.....	4	6
(3.4) Deprem yüklerinin çerçeveler ile birlikte çaprazlı çelik perdeler veya yerinde dökme betonarme perdeler tarafından birlikte taşındığı binalar		
(a) Çaprazların merkezi olması durumu.....	4	—
(b) Çaprazların dışmerkez olması durumu.....	—	8
(c) Betonarme perde durumu.....	4	7

## TASARIM DEPREM YÜKÜNÜN HESABI (ÖZET)

### 1. YAPI AĞIRLIĞI VE PERİYODU HESAPLANIR

### 2. ELASTİK DEPREM YÜKÜNÜN HESABI

2.1 Deprem bölgesine bağlı olarak etkin yer ivmesi katsayısı belirlenir ( $A_0$ )

2.2 Yerel zemin sınıfı ve yapı periyoduna bağlı olarak spektrum katsayısı belirlenir ( $S(T)$ )

2.3 Yapı kullanım amacına bağlı bina önem katsayısı seçilir ( $I$ )

2.4 Spektral ivme katsayısı hesaplanır  $A(T) = A_0 S(T) I$

2.5 Elastik deprem yükü hesaplanır  $F_{el} = W A(T)$

### 3. TASARIM DEPREM YÜKÜNÜN HESABI

3.1 Taşıyıcı sistem tipine bağlı olarak taşıyıcı sistem davranış katsayısı seçilir ( $R$ )

3.2 Taşıyıcı sistem davranış katsayısı, yerel zemin sınıfı ve yapı periyoduna bağlı deprem yükü azaltma katsayısı belirlenir ( $R_a$ )

3.3 Tasarım deprem yükü hesaplanır  $V_t = W \frac{A(T)}{R_a}$

## KAYNAKLAR

- Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık Bakanlığı
- Dynamics of Structures, A.K.CHOPRA
- Earthquake Resistant Concrete Structures, G.PENELIS, A.J.KAPPOS

## DEPREME DAYANIKLI YAPI TASARIMI İLE İLGİLİ BAZI EK KAYNAKLAR

- Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, Açıklamalar ve Örnekler, Cilt I-II, Ergin ATIMTAY
- Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı ve Deprem Müh. Giriş, Zekai CELEP, Nahit KUMBASAR
- Deprem Müh. Açısından Yapı Dinamiğine Giriş, Mustafa ERDİK, Özal YÜZÜGÜLLÜ