

PASİF KONTROL SİSTEMLERİNDEN OVAL DELİKLİ, SÜRTÜNME – BULONLU BİRLEŞİMLER

Bülent DEVECİ

İnşaat Yüksek Mühendisi

1- Giriş

Yapıların deprem güvenlikleri, esas olarak; taşıyıcı sistemlerinin konfigürasyonuna, malzemesine ve buldukları zemin koşullarına bağlıdır. Bunlardan ilk iki parametreye, deprem hareketinin oluşturduğu enerjiyi sönmülemde etkili olurken, üçüncü parametreye ise bu enerjinin kaynağı gözüyle bakmak mümkündür. Depreme dayanıklı yapı tasarımına, mekanikten bilinen, enerjinin korunumu gözüyle bakılırsa, iyi tasarlanmış bir yapı için (1) eşitliği yazılabilir.

$$E_i = E_k + E_d + E_p + E_h \quad (1)$$

Burada : E_i girdi (input) enerjisi, E_k kinetik enerji, E_d modal sönm (damping) enerjisi, E_p elastik (potansiyel) enerji ve E_h ise çevrimsel (Hysteretic) enerjidir.

Kinetik enerji; yapının yere göre bağıl hızından, elastik enerji ise elastik şekil değiştirmesinden kaynaklanmaktadır. Yer hareketi sonrasında denge konumuna dönen hasarsız bir yapıda bu iki terimin sıfır değerine ulaşacağı aşıkardır. Modal sönm enerjisini; yapı elemanlarını oluşturan malzemelerin içsel sürtünmesi, düğüm noktalarındaki sürtünmeler ve yapı-zemin etkileşiminden kaynaklanan radyasyon sönmü gibi etmenlere bağlamak mümkündür. Ancak, bu üç enerji teriminin toplamı girdi enerjisini karşılamakta oldukça yetersiz kalır. E_h ile gösterilmiş olan ve taşıyıcı sistem elemanlarının elastik ötesi şekil değiştirmesinden kaynaklanan çevrimsel enerji, bu dengenin en önemli terimidir. Zira, depreme dayanıklı yapı tasarımının felsefesi bu terimi kontrol altına almakta yatmaktadır. Deprem yönetmeliklerinde verilen taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R), E_h teriminden kaynaklanan enerji sönmülenmesini göz önüne almakta ve “süneklik düzeyi

yüksek, orta ve normal sistemler” gibi bir takım tanımlar getirmektedir. Kısaca, gereği gibi tasarlanmış bir yapı yüksek miktarlarda enerji sönmülemekte buna mukabil, kötü tasarlanmış yapılar ise bu görevlerini yerine getirememekte ve (1)’ de verilen dengeyi sağlayamamaktadırlar.

Buraya kadar yazılanlar teorik anlamda anlaşılır görünmekle birlikte, girdi enerjisinin ne miktarda olduğu ve bunun hangi terimlerle ne miktarlarda karşılandığının tespiti o kadar kolay değildir. Zira, girdi enerjisi, yapı davranışı ve yer hareketinin bir fonksiyonudur ve aynı bir yapı için bile sabit değildir. Bununla birlikte, malzemenin elastik ötesi davranış sergilediği ve çevrimsel enerjinin ortaya çıktığı noktaların yapı sistemi içindeki dağılımları ve büyüklükleri, gerçek dünyada var olan birçok nedenden ötürü, bugün için, matematiksel olarak ifade edilememektedir. Bilinen tek şeyin, (1) ile ifade edilen dengenin varlığı ve bunun en önemli teriminin E_h olduğudur.

Bu mantıktan yola çıkan yapı mühendisleri (E. Popov ve ekibi), var olan problemi daha basitleştirici bir yöntem geliştirme işine girişmişler ve çevrimsel enerjinin ortaya çıktığı noktaları belirgin hale getirmeye çalışmışlardır. Bu suretle, hem çevrimsel hareketten kaynaklanan elastik ötesi şekil değiştirmeler istenilen yerlerde yoğunlaştırılabilmiş, hem de yapının diğer yerlerinin elastik kalması sağlanabilmiştir. Böylece, depreme dayanıklı ve aynı zamanda düşük onarım maliyetlerine haiz yapıların üretilebilmesine olanak sağlanmıştır.

Yapılan bu çalışmalar, aktif ve pasif kontrol sistemleri adı altında iki ana grupta toplanabilir. Aktif kontrol sistemleri bu yazının amacı dışında olup esas itibari ile

yapıların dinamik davranışlarını düzenleme ve/veya kontrol altına alma açısından önem arz etmekte ve kullanımları ileri teknolojileri gerektirmektedir. Pasif kontrol sistemleri ise, hem yapıların dinamik davranışlarını kontrol etmekte hem de elastik ötesi şekil değiştirmelerin yer ve miktarlarının kontrol edilmesinde kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, pasif kontrol sistemlerinden “oval delikli, sürtünme-bulonlu birleşimlerin” (Slotted Bolted Connections) çelik yapılara uyarlanması ve tasarımı üzerinde durulacaktır.

2- İnceleme Konusu Yapı

İnceleme konusu yapı 6 katlı, merkezi çaprazlı ve moment çerçevesel çelik bir sistem olup, tipik kat kalıp planı şekil-4’te gösterildiği gibidir. Çözümleme için kullanılan ivme kayıtları şekil 1’de verilmiş ve tüm modlar için %5’lik modal sönm öngörülmüştür.

Deprem kaydı olarak, 3 Mart 1992 Erzincan Depremi D-B (ER-WE) ve 12 Kasım 1999 Düzce Depremi K-G (BOL-NS) bileşenlerine ait ivme kayıtları kullanılmıştır (şekil-1). İvme kayıtları, 1998 Türk Deprem Yönetmeliği madde 6.9’a göre ve yerel zemin sınıfının Z3 olması durumu göre ölçeklendirilmiştir. Ölçek çarpanları tablo-1’de verilmiştir. Söz konusu yapı sadece x-x yönünde incelenmiştir.

Kayıt	V_{max}	Ölçek
1- Mart 1992 Erzincan	0.50g	1.15
2- Kasım 1999 Düzce	0.75g	0.83

Tablo-1

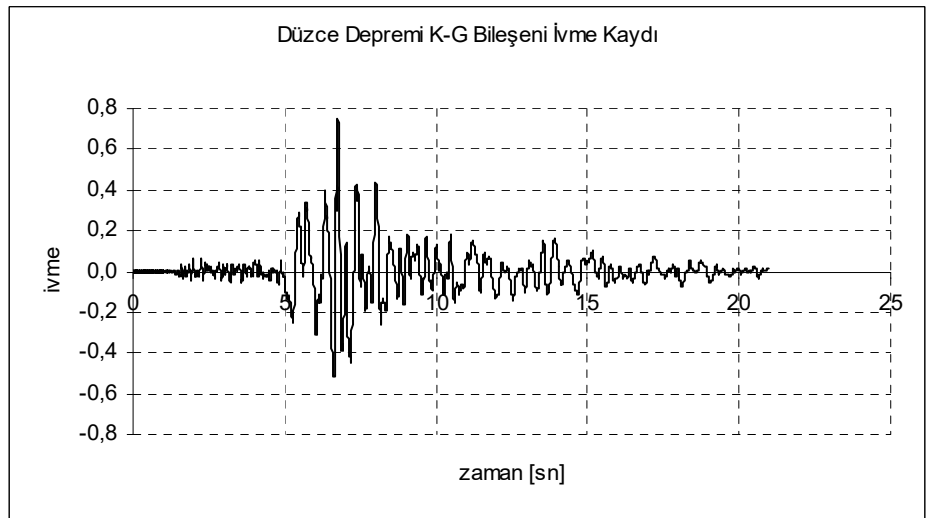
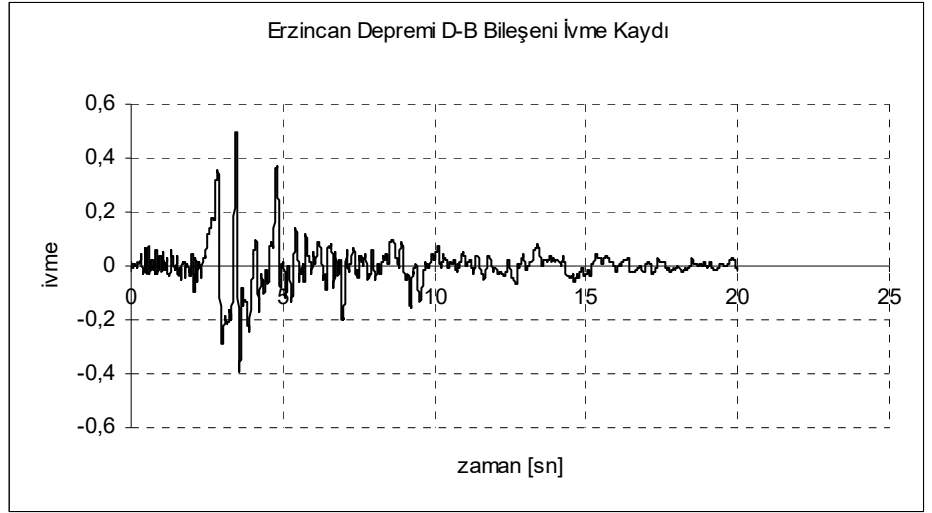
3- Doğrusal Elastik Çözümleme

İnceleme konusu yapının doğrusal elastik modeli, ETABS Non-Linear bilgisayar programı ile modellenmiş ve ilgili ivme kayıtları ile "zaman tanım alanında doğrusal elastik" çözümleme yapılmıştır (Linear Elastic Time History Analysis). Depreme esas yapı ağırlığı 11850kN'dur. Ön boyutlar, R=3 ve şekil-1'deki ivme kayıtları kullanılarak belirlenmiş; kirişler IPE360, kolonlar HEM400 ve çaprazlar HEB240 seçilmiştir. AISC-ASD yönetmeliğine göre kontrol edilen kesitlerin elastik sınırlar içinde kaldığı görülmüştür.

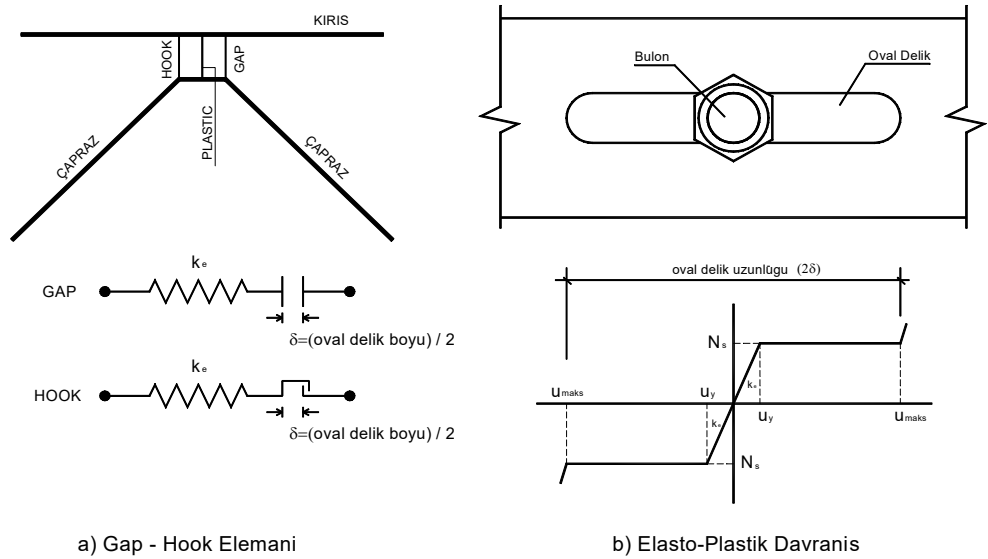
4 - Doğrusal Olmayan Elastik Çözümleme

Doğrusal elastik (Linear Elastic) çözümlemesi yapılan sistem, çaprazların bağlantı noktalarındaki oval deliklerin modele dahil edilmesi ve bu noktaların doğrusal olmayan gerilme-şekildeğiştirme bağıntılarının tanımlanması ile yeniden irdelenmiştir (şekil-2). Söz konusu tipik çapraz bağlantı detayı Şekil-3'te verilmiştir.

Çapraz – kiriş ara yüzeyinde, sabit sürtünme kuvvetinin sağlanabilmesi için, piriç levhalardan mamul şim kullanılmıştır. Bu suretle, oldukça düzgün hatlara sahip çevrimsel davranış elde edilebilmektedir. Çapraz – kiriş arası sürtünme kuvveti, bulonlara verilen öngörme kuvveti ile sağlanmaktadır. Yapının performansını belirleyen, bu kuvvetin büyüklüğüdür. Şekil-3'te verilen birleşim, bulonların belirli bir yatay yük değerinden sonra kaymaya başlaması ve böylece girdi enerjisinin büyük bir kısmının ısı enerjisine dönüşmesi prensibine dayanmaktadır. Sönümlenen bu enerji, "çevrimsel enerji" olarak isimlendirilmektedir. Söz konusu düğüm noktasının gerilme-şekildeğiştirme davranışı ideal elasto-plastiktir. Bu davranış, sürtünme kuvvetinin aşılması aralığında



Şekil –1) İvme Kayıtları



Şekil – 2) Çapraz-Kiriş birleşim noktasının matematik modeli

elastik, bunun ötesinde ise sabit yükü hareketine devam eden plastik yapıdadır (şekil -2). Akma kuvveti (sürtünme kuvveti), (2) ifadesi ile belirlenmektedir.

$$N_s = 2 n N_b \mu \quad (2)$$

Burada :

- n : Bulon sayısı
- N_b : Bulon öngerme kuvveti
- μ : sürtünme katsayısı

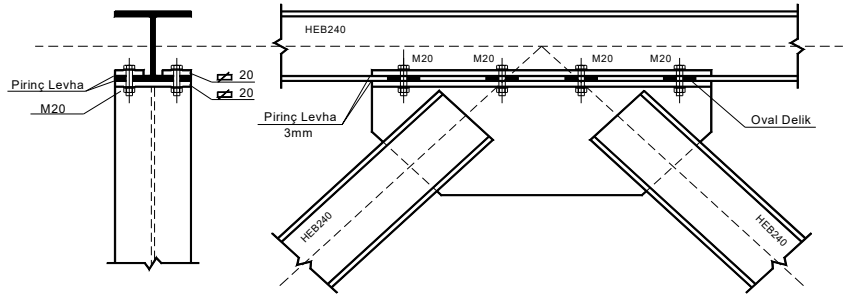
DeneySEL çalışmalar, çapraz – giriş ara yüzeyinde pirinç şim kullanılması durumunda sürtünme katsayısının $\mu = 0.5$ kabul edilebileceğini göstermiştir.

Elasto-plastik davranış gösteren düğüm noktaları, "ETABS Non-linear" bilgisayar programı ile şekil-2'de verildiği gibi tanımlanmıştır.

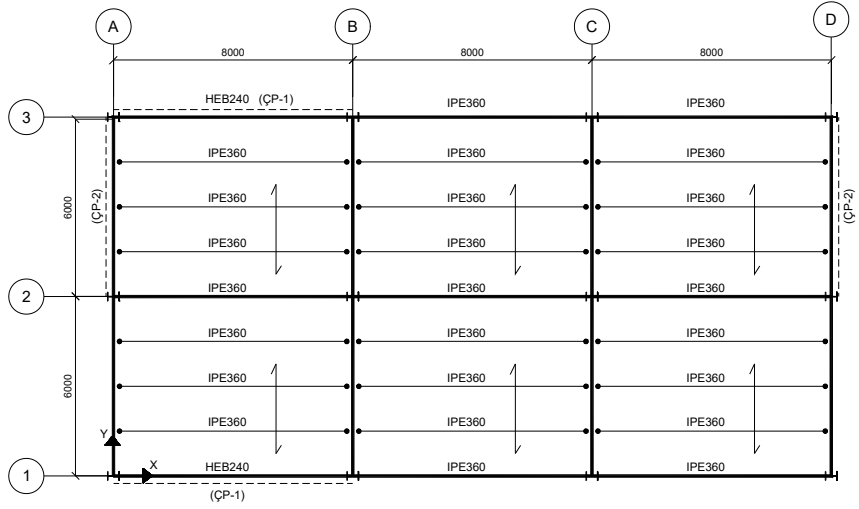
Burada :

- k_e : Elastik rijitlik
- N_s : Akma (sürtünme) kuvveti
- 2δ : Oval Delik uzunluğu
- u_y : Akma uzaması
- u_{maks} : Toplam Yerdeğiştirme olarak tanımlanmıştır.

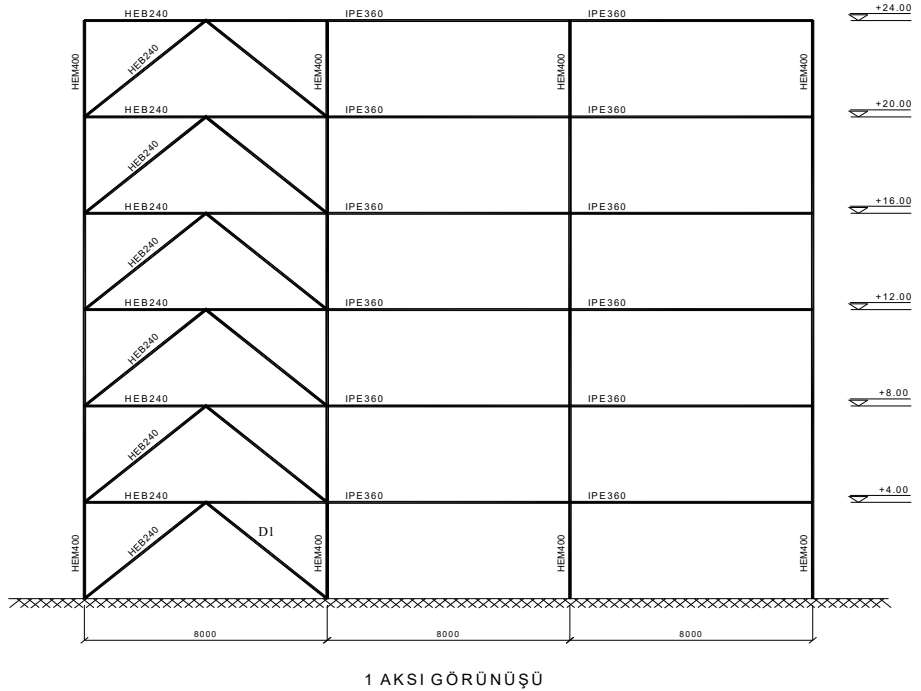
Elastik rijitlik, düğüm noktasının kayma öncesi rijitliği olup oldukça büyük değerler alabilmektedir. Kesin değer, birim yüklemekten elde edilebilmekle beraber, bu örnekte $k_e=10^6$ kN/m seçilmiştir. Akma kuvveti (sürtünme kuvveti), bulonlara verilen öngerme kuvvetidir ve bu kuvvetin aşılması durumunda düğüm noktasındaki kayma hareketi başlamış olur. Akma uzaması, girdi olarak verilmemesine rağmen kayma hareketinin başladığı yerdeğiştirme olarak program tarafından hesaplanır. Oval delik uzunluğu şekil-2'de gösterilen mesafedir. Bu mesafenin gereğinden küçük seçilmesi veya beklenenden büyük bir depremin gerçekleşmesi durumunda, bulonlar ek levhasına temas eder ve sistemde darbeli iç kuvvet artışı olur. Söz konusu mesafenin gereğinden büyük seçilmesi durumunda ise ikinci mertbe etkileri önem kazanır.



Şekil – 3) Çapraz Birleşim Detayı



GENEL KONSTRÜKSİYON PLANI - TİPİK -



1 AKSI GÖRÜNÜŞÜ

Şekil-4) İnceleme Konusu Yapı

5- Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Sistem, tablo 3'te gösterildiği gibi dört farklı oval delik uzunluğuna ve dört ayrı öngerme kuvvetine göre irdelenmiştir. Birinci adımda kullanılan F_s sürtünme kuvveti, davranış katsayısına bölünmüş elastik deprem yüklerinden hesaplanmıştır ($R=3$). Diğer adımlar, elastik deprem yüklerinin sırasıyla; 0.75, 0.50 ve 0.25 katsayıları ile çarpımından elde edilmiştir. Oval delik uzunlukları sırasıyla; 40mm, 60mm, 80mm ve sınırsız olmak üzere dört farklı değer için ele alınmıştır.

Dört ayrı adım ve dört farklı oval delik uzunluğu göz önüne alınarak oluşturulan modelde, aşağıda sıralanan sonuçlar irdelenmiştir.

- elastik taban kesme kuvvetleri
- toplam kat yerdeğıştirmeleri
- görelî kat yerdeğıştirmeleri
- kalıcı kat yerdeğıştirmeleri
- kolonlar, kirişler ve çaprazlar için sırasıyla; M_h/M_p ve P_h/P_p oranları
- harcanan enerji miktarları

“Elastik taban kesme kuvveti – sürtünme kuvveti” arasındaki ilişki şekil-5'te verilmiştir. Söz konusu yapı için elde edilen eğriler incelendiğinde şu hususlar, doğal olarak, göze çarpmaktadır:

- Oval delik boyunun sınırsız olması ve çok küçük sürtünme kuvveti değerleri için salt çerçeve davranışına karşı gelen taban kesme kuvvetleri oluşmaktadır ($V_t \approx 3800$ kN).
- Oval delik boyunun sıfır veya sürtünme kuvvetinin çok büyük olması durumunda ise doğrusal elastik modeldeki taban kesme kuvvetleri ortaya çıkmak-tadır ($V_t = 11850$ kN).

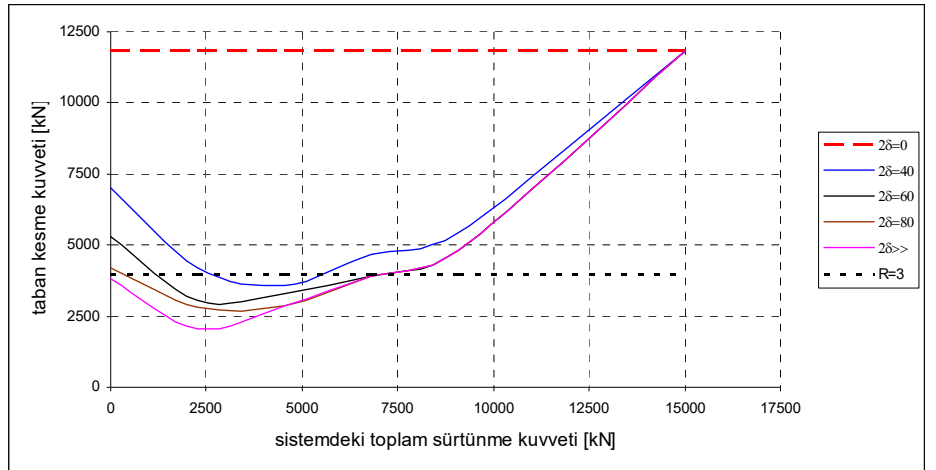
İnceleme konusu yapının bundan sonraki adımlarında, sürtünme kuvvetinin 2280 kN (4.adım) olduğu ve oval delik uzunluğunun 60mm seçildiği durum irdelenmiştir.

Kolonlar – kirişler – çaprazlar (sırasıyla)	HEM400 – IPE360 – HEB240 (ST44)
Yapı toplam ağırlığı	11850 kN (6 x 1975 kN / Kat)
x-x yönü 1. titreşim periyodu	0.57 sn (modal katılım = %75)
98 TDY'e göre Spektral İvme ($R=3$)	$A(T) = 2.5 \times 0.4 / 3 = 0.33g$
Toplam taban kesme kuvveti	3950 kN

Tablo-2

Kat	Elastik Deprem Yükleri [kN] ($R=1$)			1. Adım	2. Adım	3. Adım	4. Adım
	ER-WE	BOL-NS	Ortalama Kat Kesme Kuvveti [kN]	F_s [kN] ($R=3$)	$0.75F_s$ [kN]	$0.50F_s$ [kN]	$0.25F_s$ [kN]
1	11850	11850	11850	3950	2960	1980	990
2	10890	11380	11140				
3	9260	10420	9840	3280	2460	1640	820
4	7090	8820	7960				
5	4790	6440	5620	1870	1400	940	470
6	2640	3460	3050				
SİSTEMDEKİ TOPLAM SÜRTÜNME KUVVETİ				9100	6820	4560	2280

Tablo - 3

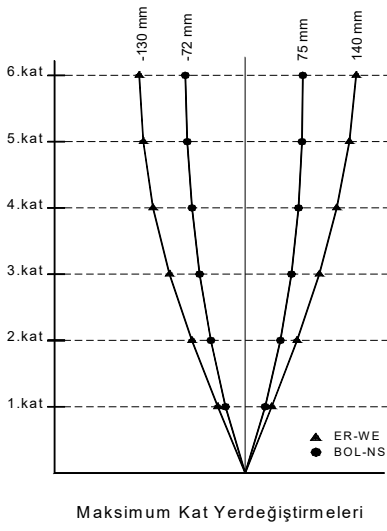


Şekil-5

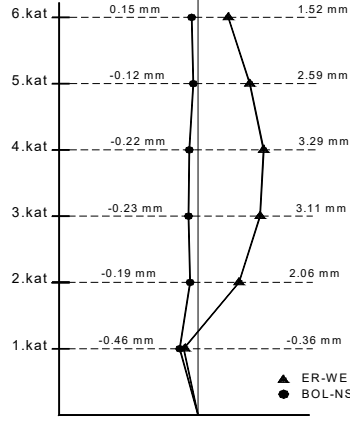
Şekil-6'da ER-WE ve BOL-NS kayıtlarına ait en büyük yatay yerdeğıştirme miktarları ve kalıcı kat yerdeğıştirmeleri verilmiştir. Burada dikkati çeken husus, kalıcı yerdeğıştirmelerin büyüklüğüdür. Bu değerleri azaltmak için iki yol izlenebilir. Birincisi, düşük sürtünme kuvvetleri uygulamak (4.adım), ikincisi ise sistemin elastik enerji kapasitesini arttırmak. Zira, sistemi başlangıç durumuna geri çeken kuvvetin (restoring force) büyüklüğü ne kadar fazla yada sürtünme kuvvetinin

büyüküğü ne kadar az olursa kalıcı yatay yerdeğıştirme miktarları da o kadar az olur.

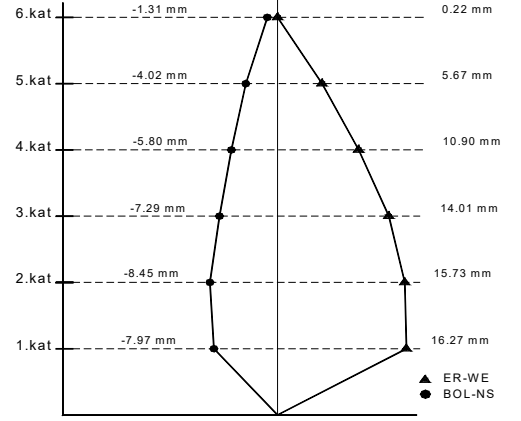
Her iki kayıt için toplam taban kesme kuvvetleri eşitlenmiş olmasına rağmen, birbirinden oldukça farklı yatay yerdeğıştirme değerleri elde edilmiştir. Buradan, yüksek frekanslı modların önem arz ettiği ve tasarım için, yerel zemin koşullarını da dikkate alan daha çok sayıda ve gerçekçi ivme kayıtlarının kullanılması gerektiği anlaşılmaktadır.



Maksimum Kat Yerdeřistirmeleri



Kalıcı Kat Yerdeřistirmeleri (4. Adım)



Kalıcı Kat Yerdeřistirmeleri (1. Adım)

Şekil - 6

Kat	1. Adım		4. Adım	
	ER-WE	BOL-NS	ER-WE	BOL-NS
6	0.0036	0.0041	0.0047	0.0019
5	0.0035	0.0040	0.0062	0.0026
4	0.0039	0.0033	0.0080	0.0039
3	0.0046	0.0035	0.0081	0.0050
2	0.0081	0.0050	0.0084	0.0065
1	0.0077	0.0045	0.0086	0.0063

Tablo-4) Görelı Kat Yerdeřistirmeleri

4. adımda ise çerçeve davranışına yakın bir durum gözlenmekte, çaprazlar yerine kirişler zorlanmaktadır. Sistemin mekanizma durumu düşünıldüğünde, 4. adımın daha uygun olduğu sonucuna varılabilir.

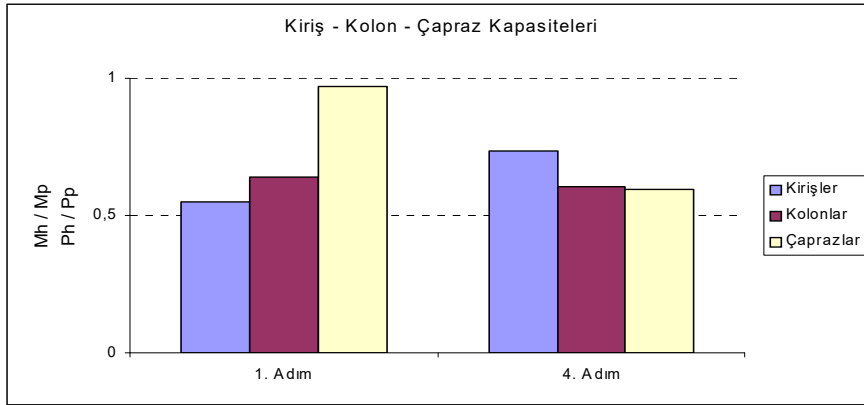
ER-WE kaydı için D1 çaprazı aksel yük değişimi şekil'8'de verilmiştir. Doğrusal elastik model ile doğrusal olmayan elastik modeldeki aksel yüklerin hemen hemen aynı değerleri alması dikkat çekicidir. Doğrusal elastik olmayan modeldeki aksel yüklerin 2.5 ve 4' üncü saniyelerde büyük değerler aldığı (bulonların delik kenarlarına teması), bunun dışında ise belirli bir değeri aşmadığı görülmektedir. Bu değer, verilen öngerme kuvvetinin çapraz eksenı üzerindeki bileşenidir.

Şekil-9'da, pasif kontrol sistemi tarafından harcanan "güç" kilowatt cinsinden ifade edilmiştir. Çevrimsel enerjinin ortaya çıktığı zaman aralığı açıkça görülmektedir.

Şekil-10, taban kesme kuvveti – üst kat yerdeşistirme ilişkisi gösterilmiştir. Buradan ;

$$\mu_{yapı} = U_{maks} / U_y \text{ ifadesi ile}$$

tüm sistem için "yapı yerdeşistirme süneklik talebi" değerleri hesaplanabilir. ER-WE kaydı için $\mu_{yapı} = 17$ ve BOL-NS kaydı için $\mu_{yapı} = 9.50$ gibi oldukça büyük değerler elde edilir.



Şekil - 7) Kiriş - Kolon - Çapraz ; Mp / Mh ve Ph / Pp Değerleri

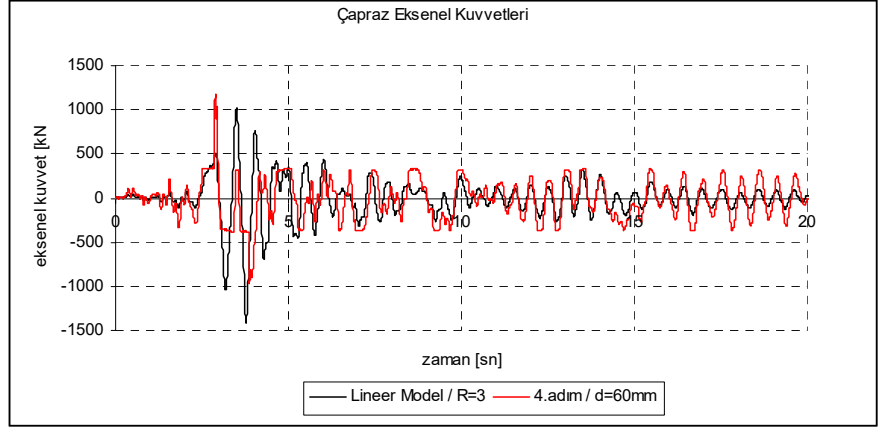
Tablo 4'te görelı kat yerdeşistirmeleri verilmiştir. Dikkat edilirse, Her iki ivme kaydının değişik modları harekete geçirdiği ve sürtünme kuvveti ile görelı kat yerdeşistirmeleri arasında doğrusal bir ilişkinin kurulamayacağı görülebilir.

Şekil 7'de, tüm sisteme ait kesit kapasite ve kesit hesap değerleri 1. ve 4. adımlar için verilmiştir. 1. adım yüksek sürtünme kuvvetlerine karşı gelmekte, dolayısıyla çapraz aksel yükleri büyük değer almakta ve kirişlerde artık kapasiteler oluşmaktadır.

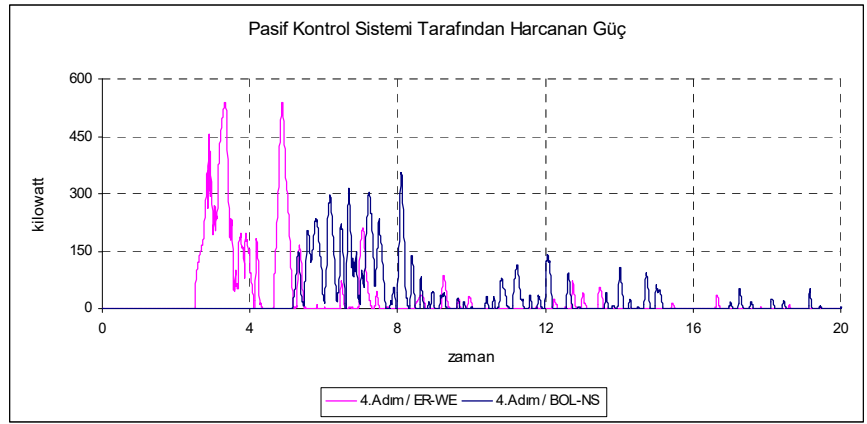
6- Sonuç

Hesaplarda davranış katsayısı $R=1$ alındığı halde kesit tesirleri elastik sınırlar içinde kalmakta, oval delik boyunun yetersiz kaldığı durumlarda ise taşıyıcı elemanlarda var olan ek kapasiteler kullanılmaktadır. Söz konusu pasif kontrol sistemi, diğer pasif kontrol sistemlerine oranla oldukça düşük maliyette olup yüksek kalifiye işçiliğine gereksinim duymamaktadır. Özen gösterilmesi gereken en önemli nokta; diğer sistemlerde de olduğu gibi, yerel zemin koşullarını nitelik ve nicelik bakımından en iyi şekilde temsil edebilecek ivme kayıtlarının kullanılmasıdır. Deprem sonrasında ortaya çıkan kalıcı yerdeğiştirmeleri azaltmak için sistemin hiperstatikliği (redundancy) veya rijitliğini arttırmak bir yöntem olabileceği gibi yer hareketi sonrasında bulonların gevşetilmesi veya yenilenmesi ile de tamamen ortadan kaldırılabilir.

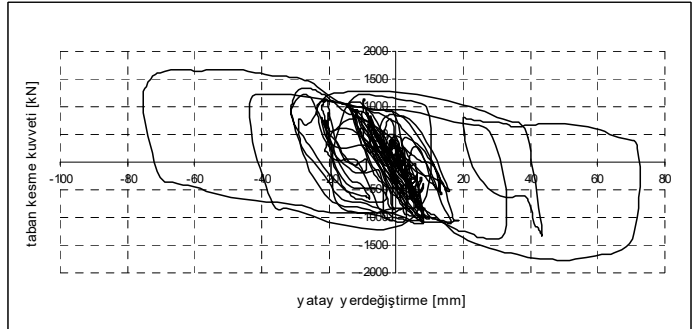
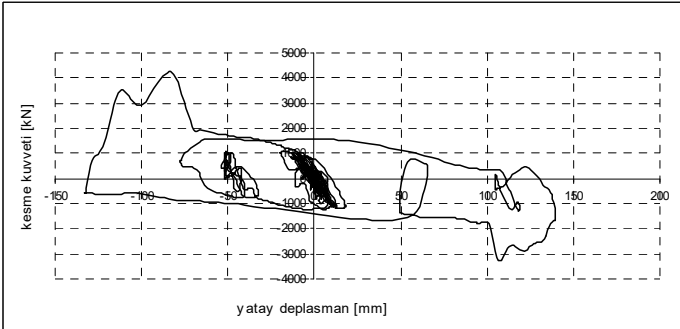
Çelik yapılarda "oval delikli, sürtünme-bulonlu birleşimler" uygulamada henüz yaygın olarak kullanılmasa da, yakın bir gelecek-



Şekil-8) ER-WE Kaydı için D1 Çapraz eksenel yük değişimi



Şekil-9) Düğüm noktalarında harcanan toplam güç



Şekil-10) Üst Kat – Taban Kesme Kuvveti İlişkisi

te, özellikle mevcut çelik yapıların veya betonarme narin çerçeve yapıların güçlendirilmesi konusunda yapı mühendislerinin dikkatini çekecek ve geniş bir uygulama alanı bulabilecektir.

Referanslar

Computers and Structures Inc., Etabs-Nonlinear Version 8, Berkeley, California,2002

Priestley, M.,Calvi, G., M., "Seismic Design and Retrofit of Bridges", John Willey & Sons, Inc., New York,1996.

Celep, Z., Kumbasar,N., "Deprem Mühendisliğine Giriş", Beta Dağıtım, 2000

Butterworth, J.W., "Ductile Concentrically Braced Frames Using Slotted Bolted Joints" Journal of the Structural Engineering Society, New Zealand, 2001.