

İTME SÜRME YÖNTEMİ İLE İNŞA EDİLMİŞ SÜREKLİ ARDGERMELİ KÖPRÜLERİN DEPREM TASARIMI

¹Özgür ÖZKUL, ²Hatice KARAYİĞİT, ³J. Erdem ERDOĞAN

Acıbadem Mh. Sokullu Sk. No:12 Kadıköy/İstanbul/ Türkiye Tel: (216) 349 87 75

¹E-mail: ozgur.ozkul@freysas.com.tr

²E-mail: hatice.karayigit@freysas.com.tr

³E-mail: erdem.erdogan@freysas.com.tr

Özet

Dünya çapında birçok uygulamaları bulunan İtme Sürme Yöntemi (Incremental Launch Method-ILM) ülkemizde de kullanılmaya başlanmış bir köprü yapım yöntemidir. Bu yöntem ile köprü tabliyesi tek kalıp kullanılarak, vadinin bir kenarında dökülmekte ve itilmektedir. Önce ayakların inşa edilmesi ile başlayan üretim, sabit kalıp sahasının kurulması ile devam eder. Ardından, tabliye birbiri ardına dökülerek, kalıptan itilir. Köprü ayaklarında, kayıcı mesnetler kullanılarak itme sırasındaki sürtünme kuvvetleri azaltılır. Tabliye açıklıkları genelde 40m–60m arasında değişmekte, uzunlukları 700m–800m'ye varan sürekli tabliyeler oluşmaktadır. İnşaat süresinin kısalması, hiperstatik sürekli tabliye ile malzeme miktarlarındaki azalma, mesnet sayısının ve genleşme derz sayısının azalması, bu metodun sağladığı en büyük ekonomik faydalardır.

Bunun yanında, esnek ayak tasarımıyla da ayaklarda ve temelerde önemli malzeme tasarrufu sağlanmaktadır. Boyuna yönde (köprü uzunluğu boyunca) bütün mesnetler kayıcı bırakılarak, en uzun birkaç ayak tabliyeye bağlanmakta ve periyodu yüksek bir yapı oluşturulmaktadır. Böylece ayaklara gelen deprem ivmesi ciddi miktarda azaltılmaktadır. Artan periyot ile yükselen deprem deplasmanları, gerekli ise viskoz akışkanlı sönümleyiciler (FVD) kullanılarak kontrol altına alınabilmektedir.

Enine yönde, bütün ayaklar tabliyeye bağlı olarak tasarlanmakta, yüksekliğe bağlı olarak enine yönde betonarme çerçeve oluşturulmakta ve farklı ayak tipleri kullanılmaktadır. Böylece, enine yöndeki rijitlik bütün ayaklara yaklaşık olarak aynı oranda dağıtılmaya çalışılarak, kuvvet dağılımı kontrol altına alınmaktadır. Yapılan varsayımlara göre, plastik mafsal ve süneklik kontrolleri yapılmalıdır.

Yavuz Sultan Selim Köprüsü (3. Boğaz Köprüsü) bağlantı yollarını oluşturan Kuzey Marmara Çevreyolu viyadüklerinin bir kısmı, itme sürme yöntemi ile inşa edilmektedir. Ayak yükseklikleri 80m'yi bulan ve 55m açıklıkla inşa edilen bu viyadüklerin deprem tasarımı örneklenerek detayları paylaşılabilmektedir.

Giriş

Köprü yapım metodu olarak İtme Sürme Yönteminin kullanılması, ülkemiz de yaygın olmayan bir uygulamadır. Bu yöntemle, uzunluğu 40m–60m arasında değişen açıklıklar geçilebilmekte, geçici ayak kullanımı ile açıklık uzunluğu daha da arttırılabilmektedir. Yöntemin uygulamasında, tabliye, kenar ayak arkasında oluşturulan döküm sahasında dökülmekte ve beton prizini aldıktan sonra köprü eksenı boyunca itilmektedir. İtme işlemi süresince, üstyapıda oluşacak eğilme momentlerini sınırlandırmak için “Gaga” adı verilen ve tabliyeye rijit olarak bağlanan çelik yapı elemanı kullanılabilir. Ayrıca, sürme işlemi süresince ayaklarda geçici kayıcı mesnetler kullanılarak, itmeden dolayı oluşan etkiler azaltılmak istenmektedir.

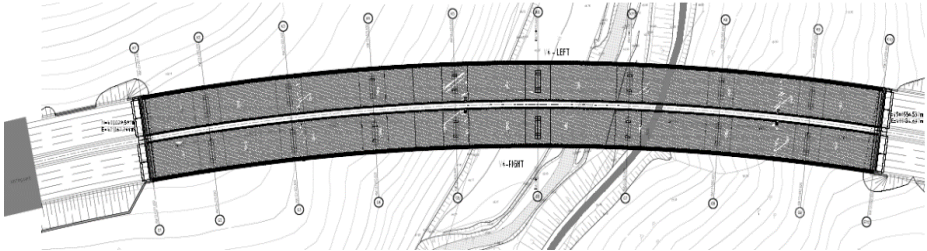
İtme Sürme Yöntemi kullanılan yüksek ayaklı köprü uygulamalarında, deprem etkilerine karşı yapı elemanlarının tasarımı önemli bir konudur. Deprem tasarımında daha esnek ayaklar kullanılarak efektif periyodun artması amaçlanmakta ve böylece ayaklara gelen deprem ivmesinin azalması sağlanmaktadır. Ancak, artan efektif periyot sebebiyle ayaklardaki deplasman artmaktadır. Köprü tasarımında, deplasman değerlerini sınırlandırmak ve esnek ayaklarda oluşacak deprem tesirlerini azalmak için viskoz akışkanlı sönümleyicilerin kullanılması, hem tasarım hem de malzeme miktarı açısından büyük avantaj sağlamaktadır.

Bu çalışmada Yavuz Sultan Selim Köprüsü (3. Boğaz Köprüsü) bağlantı yollarını içeren Kuzey Marmara Çevreyolu viyadüklerinden, V06 viyadüğünün özellikleri ve Eurocode – 8 (2005)'e göre deprem analizi incelenecektir.

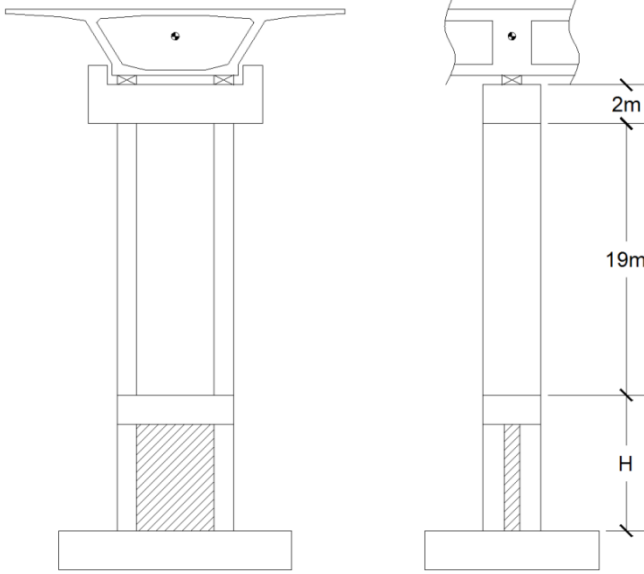
Örnek Çalışma

Viyadük Özellikleri

V06, Kuzey Marmara Çevreyolu köprüleri içerisinde en uzun ayaklara sahip viyadüktür. Viyadük plan görünüşü Şekil 1'de, boykesiti Şekil 2'de ve üstyapı enkesiti Şekil 3'de verilmiştir. Ayak yükseklikleri 10m ve 80m arasında değişmektedir. Köprü toplam uzunluğu (38m+4x50m+3x55m+42m) 427m'dir. V06 Viyadüğü, genişliği 22m olan yan yana iki köprüden oluşmaktadır.

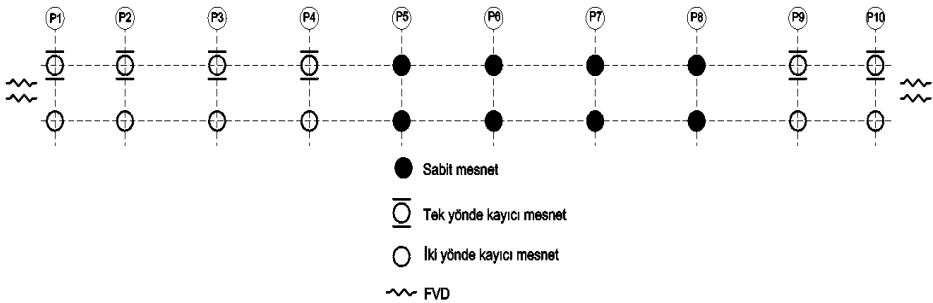


Şekil 1. V06 viyadüğü plan görünüşü.



Şekil 4. Viyadük ayak boykesiti.

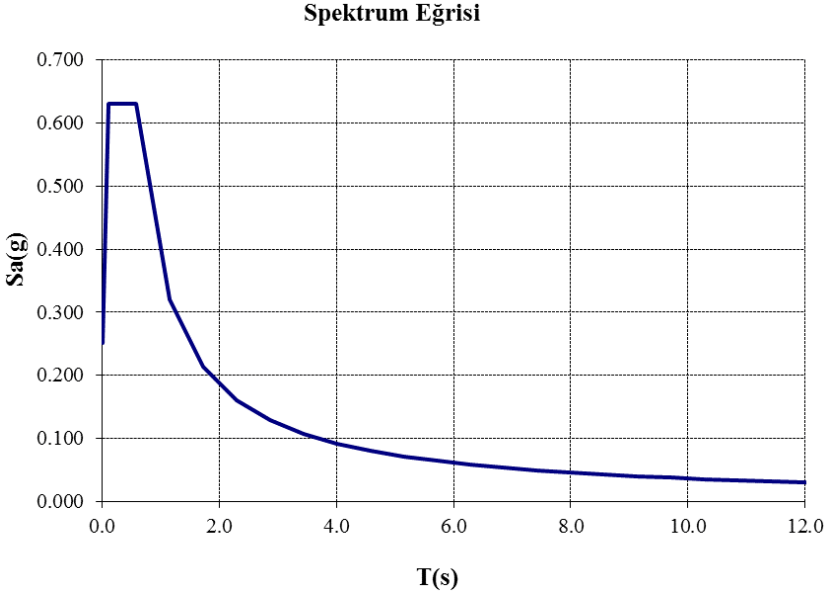
Deprem etkilerinin ayaklarda dağılımını daha efektif yapmak için köprü mesnetlenme şekilleri büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle V06 köprü tabliyesi Şekil 5.'de verildiği gibi, köprü boyuna doğrultusunda dört yüksek ayakta tutulu, kenar ayaklarla birlikte diğer ayaklarda serbest bırakılmıştır. Enine doğrultuda ise; dört uzun ayakta tutulu, diğer ayaklarda mesnetlerden birisi serbest diğeri tutulu kabul edilmiştir.



Şekil 5. Mesnet yerleşimi.

Deprem Parametreleri

V06 viyadüğü 3. Derece deprem bölgesindedir. Zemin sınıfı, DLH (2008) şartnamesine göre B zemin sınıfıdır. DLH şartnamesine göre 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan (475 yıl geri dönüş periyodu olan) deprem için spektrum eğrisi oluşturulmuştur (Şekil 6). Ayaktaki deprem etkilerinin hesabında, deprem yükü azaltma katsayısı boyuna yön için $R=1$, enine yön için ise $R=4$ seçilmiştir. Enine yön deprem hesabında, çerçeve kesitle ayaklarda plastik mafsall oluşumuna izin verilmektedir.



Şekil 6. DLH Spektrum Eğrisi.

Deprem Tasarımı

Viskoz Akışkanlı Sönümleyici Kullanılmadan Deprem Analizi

Köprü deprem tasarımında üst yapının yatay hareketi tutulu ayakların rijitlikleri ile karşılanmaktadır. Bu nedenle köprünün boyuna yöndeki periyodu tutulu ayakların rijitliklerine göre hesaplanmaktadır. Periyot hesabında kullanılan ayak rijitlikleri Tablo 1.'de verilmiştir.

Tablo 1. Tutulu ayakların boyuna yönde rijitlikleri.

P5 (kN/m)	P6 (kN/m)	P7 (kN/m)	P8 (kN/m)	Toplam (kN/m)
8,846	7,403	7,198	11,329	34,776

Ayak rijitliklerine bağlı olarak, köprü boyuna yöndeki periyodu 5.51sn olarak hesaplanmıştır. Bu periyot ile %5 sönümlü spektrumdan elde edilen ivme değeri $S_a=0.067g$ ve deplasman değeri $D=506mm$ 'dir.

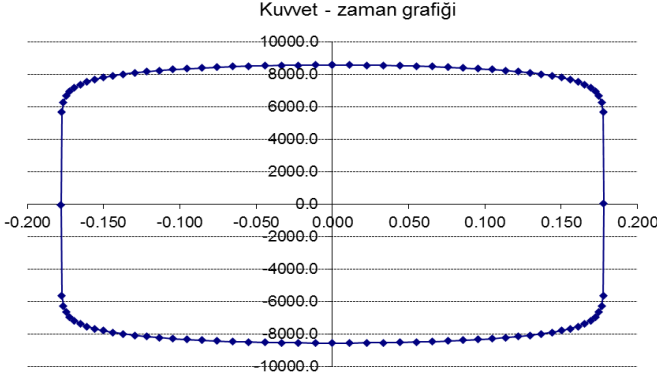
Hesaplanan deplasman değeri azaltılmak istendiğinde, daha rijit ayaklara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da köprü periyodunu kısaltarak; hem ayak tesirlerini artırmakta, hem de büyük kütleli ayaklar (80m) ve temel gerektirmektedir. Bu sebeple, FVD'siz yöntem ekonomik bir tasarım sunmamaktadır. Ayak kesitleri değiştirilmeden, FVD kullanımı ile sisteme ilave sönüm sağlanarak deplasman değerleri ve deprem tesirleri azaltılabilmektedir.

Seçilen Viskoz Akışkanlı Sönümleyici Özellikleri

Köprünün boyuna yöndeki deprem deplasmanını sınırlandırmak için viskoz akışkanlı sönümleyicilerin (FVD) kullanılmasına karar verilmiştir. FVD'ler, kuvveti hız ile doğru orantılı değişen cihazlardır. Viskoz akışkanlı sismik sönümleyici kuvveti $F=C.V^{\eta}$ bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Burada "V" deprem hareketi esnasında üst yapının, kenar ayaklara göre hareketinin hızıdır. "C" sönüm katsayısı ve " η " ise hız parametresidir. V06 viyadüğü tasarımında kullanılması öngörölmüş FVD özellikleri şu şekildedir:

- Maksimum deplasman kapasitesi: ± 180 mm
- Maksimum kuvvet kapasitesi: 2,200 kN

Köprü deprem tasarımında kullanılan FVD'lere ait kuvvet–zaman grafiği Şekil 7'de verilmiştir. Grafiğin kapsadığı alan, FVD'lerin sisteme sağladığı enerji sönüm etkisini vermektedir.



Şekil 7. FVD kuvvet-zaman grafiği.

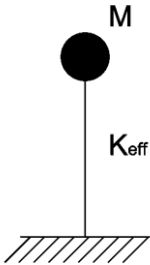
Viskoz Akışkanlı Sönümleyici Kullanılması Durumunda Deprem Analizi

V06 Viyadüğü sismik analizleri, Eurocode 8-2 (2005)'e göre yapılmaktadır. Eurocode 8-2, Bölüm 7'de belirtilen analiz yöntemleri şunlardır.

- Monomodal Spektral Analiz Metodu
- Multi Mod Spektral Analiz Metodu
- Zaman Tanım Alanı Analiz Metodu

Monomodal Spektral Analiz Metodu (EN1998-2, 7.5.4)

Monomodal spektral analiz, köprünün konum olarak aktif faya 10km'den daha fazla mesafede olması, EN1998-1:2004'de belirtilen zemin sınıflarından birinde olması ve efektif sönümün %30'u aşmaması durumunda uygulanabilmektedir. Metodun uygulamasında, rijit tabliye tanımını yapılarak, tek serbestlik dereceli sistem çözümü yapılmaktadır.



$$\text{Efektif periyot: } T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{eff}}}$$

$$\text{Spektral ivme: } S_a(g)$$

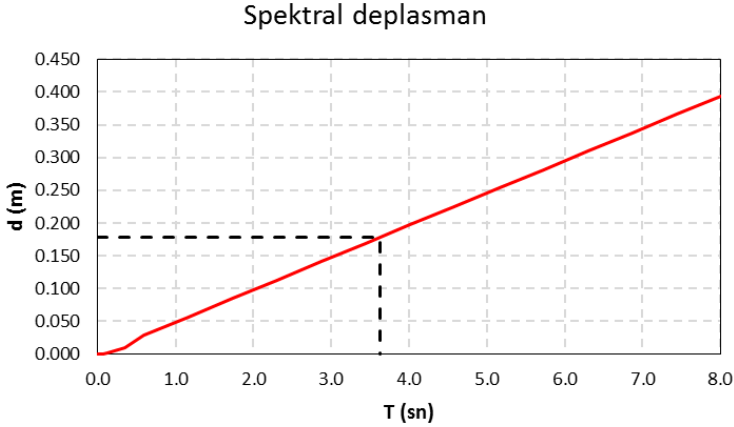
$$\text{Spektral deplasman: } S_d = S_a(g) \left(\frac{T_{eff}}{2\pi}\right)^2$$

$$\text{Sönüm azaltma katsayısı: } \eta = \sqrt{\frac{0.10}{0.05 + \zeta_{eff}}}$$

$$\text{Sönümün etkilmesi durumunda Deplasman: } D = S_d \cdot \eta$$

Monomodal spektral analiz için, ilk olarak sistem efektif sönümü ve spektral deplasmanı için kabul yapılmaktadır (SETRA, 2012). Efektif sönümün etkilendiği spektrumdan, kabul edilen deplasmana karşılık gelen periyot değeri alınarak, tabliye kütlelerine bağlı olarak efektif yapı rijitliği elde edilmektedir. Efektif rijitlik ve ayak rijitlikleri arasındaki fark, FVD'lerin sisteme sağlaması gereken rijitliği vermektedir.

Bu metot için, sistemin efektif sönümü $\leq 30\%$ ve deplasman değeri 178mm olarak alınmıştır. Tabliye toplam ağırlığı $26,750\text{ton} \times 9.81 = 262,417\text{kN}$ 'dur. Sönümsüz (undamped-%5) sistem deplasmanı $D=333\text{mm}$ olmaktadır. %30 sönümün etkilendiği spektrumdan, $D=178\text{mm}$ 'ye karşılık gelen efektif periyot değeri $T_{\text{eff}}=3.62\text{sn}$ ve sistem efektif rijitliği $K_{\text{eff}}=80,500\text{kN/m}$ olarak bulunmuştur (Şekil 8). Bu durumda FVD'lerin rijitliği $K_{\text{FVD}}=K_{\text{eff}}-K_{\text{ayak}}=45,724\text{kN/m}$ olarak hesaplanmaktadır.



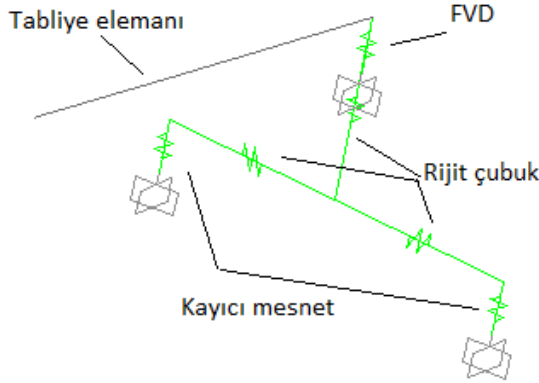
Şekil 8. %30 sönüm etkililmiş spektral deplasman grafiği.

Seçilen 4 adet FVD'nin kuvvet kapasitesine ve deplasman kapasitesine bağlı olarak hesaplanan FVD rijitliği $K_{\text{FVD}} = 4 \times 2,200 / 0.176 = 49,438\text{kN/m}$, bu durumda hesaplanan sistem efektif periyodu $T_{\text{eff}}=3.54\text{sn}$ ve efektif sönüm %29 olmaktadır. Bunun sonucunda spektrumdan elde edilen sistem deplasmanı 176mm olmakta ve bu da seçilen FVD'lerin yeterli olduğunu göstermektedir.

Multi Mod Spektral Analiz Metodu (EN1998-2, 7.5.5)

Multi mod spektral analiz metodu, EN1998-1:2004'de belirtilen zemin sınıflarından birinde olması ve efektif sönümün %30'u aşmaması durumunda uygulanabilmektedir. Tabliye elemanları plandaki deplasmanları yapacak şekilde modellenmelidir. Ayaklara aktarılabilecek üst yapı kütlelerinin hesabı ve modellenmesi gerçeğe uygun olarak yapılmalıdır. Multi mod spektral analizde, izolasyon sistemi için hesaplanan efektif sönüm değeri, periyodu $T=0.8T_{eff}$ 'den büyük olan modlara etkililmektedir. Diğer modlarda ise, yapının izolasyonsuz olarak kabul edilen %5'lik sönüm değeri kullanılmaktadır. Sismik etkilerin hesabında, her iki doğrultudaki deprem etkileri kombinasyonlu olarak ($E_x+0.3E_y; E_y+0.3E_x$) göz önüne alınmalıdır.

Köprü tasarımında, köprü taşıyıcı sisteminin gerçeğe uygun olarak modellenmesi, analiz sonuçları bakımından önemli olmaktadır. Bu nedenle, her bir yapı elemanı, modelleme esnasında göz önüne alınmalıdır. Bu çalışmada, V06 viyadüğü multimodal deprem analizi SAP2000 programında yapılmıştır. Köprü modelinde, tabliye elemanları çubuk eleman olarak tanımlanmış ve bu elemanların ayak üst noktasına bağlantısında link elemanlar kullanılmıştır (Şekil 9). Kenar ayaklarda 2'şer adet olmak üzere, toplamda 4 adet viskoz akışkanlı sönümleyici tanımlanmıştır. Ayaklar temele tam ankastre olarak modellenmiştir.

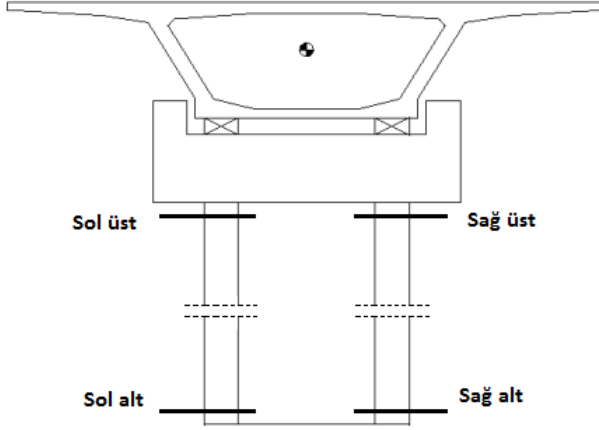


Şekil 9. Mesnet tanımları.

Viskoz sönümleyiciler ile köprü sistemi efektif sönümü %30 olacak şekilde tek iteratif spektral hesap yapılmaktadır. Elde edilen %30'luk sönümün sisteme etkilmesi ile yapı efektif periyodu $T_{eff}=3.36$ sn, deprem ivmesi $S_a=0.060g$ ve deplasman $D=179$ mm olarak hesaplanmıştır. Boyuna yön deprem analizi sırasında FVD'lerde oluşan maksimum kuvvet değeri $F_{max}= 2,139$ kN olarak hesaplanmış ve FVD'nin taşıyacağı maksimum kuvvet değerini aşmamıştır.

Köprü enine yönde deprem tasarımı yapıldığında, enine doğrultudaki efektif periyot $T_{eff}=2.77$ sn olmaktadır. Enine yönde deprem tasarımı yapılırken, çerçeve kesitlerinin alt ve üst noktalarında plastik mafsal oluşmasına izin verilmektedir.

Böylece, ayakların plastik kapasitelerinden faydalanılmaktadır. Buna bağlı olarak ayakların süneklik kontrolleri yapılmaktadır. Ayakların enine yönde deprem hesabında $R=4$ alınmış ve bu değere bağlı olarak süneklik kontrolü yapılmıştır. Tablo 2'de P5 ayağı süneklik kontrolü özetlenmiştir. Toplam şekil değiştirmenin elastik şekil değiştirmeye oranı ($\Delta c/\Delta y$), $R=4$ değerini sağlamaktadır.



Şekil 10. Plastik mafsall oluşması beklenen kesitler.

Tablo 2. P5 Ayağı Süneklik Hesabı

	θ_p (rad)	Δy (m)	Δp (m)	Δc (m)	$\Delta c/\Delta y$
Sağ üst	0.132	0.190	1.054	1.244	6.5 > 4
Sağ alt	0.145	0.287	1.431	1.718	6.0 > 4
Sol üst	0.145	0.121	1.052	1.173	9.7 > 4
Sol alt	0.187	0.254	1.986	2.240	8.8 > 4

Zaman Tanım Alanı Metodu (EN1998-2, 7.5.6)

Zaman tanım alanı metodu, uygun yapı modeli oluşturularak ve bu modelde malzemelerin doğrusal olmayan (nonlineer) özellikleri tanımlanarak yapılmaktadır. Sismik izolatör kullanılan sistemlerde, efektif sönümün %30'u aşması durumunda, sistemin deprem analizinin zaman tanım alanı metodu ile yapılması gerekmektedir.

İzolatörlerin ve sönümleyicilerin, doğrusal olmayan özelliklerinin analiz modelinde doğru bir şekilde tanımlanması analiz açısından önemlidir. Metodun kullanılacağı köprülerin; en az yedi çift deprem kaydı için analizi yapılmalı ve elde edilen etkilerin ortalaması alınarak yapısal elemanların tasarımı ve kontrolü yapılmalıdır. Yediden az deprem kaydı kullanılması durumunda, elde edilen sismik etkiler içerisinde maksimum etkilerin oluştuğu değerler alınmalı, buna göre de köprünün tasarımı ve kontrolü yapılmalıdır.

V06 Viyadüğünün zaman tanım alanında analizi için 10 adet kayıt seçilmiştir. Malzemelerin özellikleri Caltrans (2013) – 3.2.1 ve Eurocode 1998-2' e göre SAP2000 programında tanımlanmıştır. FVD'nin nonlineer özellikleri de programa girilmiştir. Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar Tablo 3'de verilmektedir.

Tablo 3. Analiz sonuçları.

Analiz	Deplasman (mm)
İvme kayıt no 1	141
İvme kayıt no 2	143
İvme kayıt no 3	206
İvme kayıt no 4	50
İvme kayıt no 5	44
İvme kayıt no 6	44
İvme kayıt no 7	203
İvme kayıt no 8	101
İvme kayıt no 9	91
İvme kayıt no 10	59
Zaman tanım alanı (ortalama)	104
Monomodal analiz	176
Multi mod spektral analiz	179

Tablo 3'de görüldüğü gibi, zaman tanım alanı metodunda ivme kayıtları sonucunda bulunan deplasmanların ortalaması alınmaktadır. Üç yöntem için de elde edilen boyuna yöndeki deprem deplasmanları Tablo 3'te özetlenmiştir.

Sonuçlar

Bu çalışmada, Kuzey Marmara Çevreyolu üzerinde, İtme Sürme Yöntemi kullanılarak yapılmakta olan V06 Viyadüğünün deprem tasarımı ile ilgili olarak yapılan kabuller ve hesap yöntemleri özetlenmiştir. Köprü ayak rijitliklerinin ve Viskoz akışkanlı sönümleyicilerin (FVD) efektif periyot ve deprem ivmesinin hesabı üzerindeki etkileri incelenmiştir. EN 1998'e göre üç farklı analiz yöntemi üzerinde durulmuştur: Monomodal spektral analiz, Multi mod spektral analiz ve Zaman tanım alanında analiz yöntemleri. Üç analiz metodu da kullanılarak yapılan hesaplamalar özetlenmiştir.

Yükseklik boyunca değişen ayak kesiti (rijit kesit ve çerçeve sistemi) kullanılarak elde edilen esnek ayaklar ve bunun yanında köprü boyuna yönde kullanılan FVD'ler sayesinde boyuna yöndeki deprem etkileri azaltılmış ve böylece malzeme miktarı açısından daha ekonomik kesitler kullanılmıştır. Malzeme miktarı bakımından diğer bir avantaj ise, temele aktarılan tesirlerin ve özellikle de deprem sebebiyle temelde oluşan moment değerlerinin büyük oranda azalması ve temel boyutlarının daha küçük olarak hesaplanmasıdır. Bu yapı sistemi sayesinde tek seferde uzun açıklık geçilerek, ayaklar üzerinde tek sıra mesnet kullanılmış ve sadece kenar ayaklarda olmak üzere iki yerde derz kullanılmıştır. Bu da, köprüler için daha az bağlantı elemanı kullanılması, buna bağlı olarak da köprü bakım ve onarım maliyetlerinin azalması anlamına gelmektedir.

Kaynaklar

1. DLH, 2008. Kıyı ve Liman Yapıları, Demiryolları, Hava Meydanları İnşaatlarına İlişkin Deprem Teknik Yönetmeliği, İstanbul.
2. Caltrans, 2013. Seismic Design Criteria, California.
3. Eurocode 8 – 1, 2004. The European Standard – Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, Brussels.
4. Eurocode 8 – 2, 2005. The European Standard – Design of structures for earthquake resistance – Part 2: Bridges, Brussels.
5. SAP 2000, Structural Analysis Program, Computers and Structures INC., Berkeley, California.
6. SETRA, 2012. Ponts en Zone Sismique – Conception et Dimensionnement Selon l'Eurocode 8, France.

Anahtar Sözcükler: İtme-sürme yöntemi, köprü deprem tasarımı, viskoz akışkanlı sönümleyici (FVD) kullanımı.