

## EĞİK GERGİLİ KÖPRÜLERDE GERİLME İLERLEYİŞİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

**<sup>1</sup>Çağlayan HIZAL, <sup>2</sup>Gürsoy TURAN**

<sup>1</sup>İnşaat Müh. Bölümü, İYTE, İzmir, Tel: +90(232)750 66 08, E-Mail: caglayanhizal@iyte.edu.tr

<sup>2</sup>İnşaat Müh. Bölümü, İYTE, İzmir, Tel: +90(232)750 68 04, E-Mail: gursoyturan@iyte.edu.tr

### Özet

Eğik gergili köprülerin uzun yapılar olması nedeniyle, malzeme içindeki gerilme ilerleyişi dikkate alındığında, iç kuvvetlerin gerçek zamanlı çözümü, kapalı çözüme oranla daha gerçekçi sonuç verecektir. Çözüm yöntemlerinin arasındaki farkın anlaşılabilmesi için Bill Emerson Memorial kablolu köprüsünün modeli kullanılarak iki farklı yöntem ile analiz yapılmıştır. Depremün köprü ayaklarına ulaşma zamanlarını dikkate alınarak, direkt integrasyon yönteminin sonuçları, mod birleştirme yönteminin sonuçları ile kıyaslanmıştır. Bu köprünün tasarımında kritik rolü olan köprü ayaklarında meydana gelen kesme kuvvetleri grafiksel olarak sunulmuştur.

### Giriş

Eğik gergili köprüler, büyük açıklıkların geçilmesinde kullanılan ve geleneksel kablolu köprülere nazaran hem yapımının daha kolay olması hem de eleman sayısının daha az olması ve bu nedenle yapım maliyetinin daha düşük olması nedeniyle birçok tasarımcı mühendis tarafından tercih edilen bir mühendislik uygulamasıdır. Söz konusu köprülerin gerçeğe mümkün olduğunca yakın olarak modellenmesi ve analizlerinin yapılması hem köprünün güvenliği hem de yapım maliyeti açısından büyük önem arz etmektedir. Bu türden büyük ölçekli yapıların tasarımı sırasında mühendislerin karşılaşabileceği problemler, ilgili şartname ve yönetmeliklerce öngörülen durumların ötesine geçebilmektedir. Bu nedenle özellikle depreme karşı tasarımda izlenecek olan yol ve kullanılacak matematiksel hesap modeli oldukça büyük önem arz etmektedir.

Uzun açıklıklı köprülerde, dinamik analizin tasarım spektrumuna göre yapılması ile gerçeğe yakın sonuçlar elde edilemeyebilir. Senaryo depremine göre tasarım yapılması durumunda ise sistemin zamana bağlı çözümü iki şekilde yapılabilmektedir. Bunlardan ilki, mod birleştirme yöntemi olarak adlandırılan ve sistemin serbestlik derecesi sayısı yani mod adedi kadar tek serbestlik dereceli alt sistemlere ayrılması ve zamana bağlı çözüm yapıldıktan sonra hesaba katılmak istenen mod sayısı kadar alt sistemin birleştirilmesi esasına dayanmaktadır. İkinci yöntem ise tüm serbestlik derecelerinin hesaba katılarak sistemin tamamının çözümü esasına dayanan direkt integrasyon yöntemidir. Kullanılan çözüm yöntemlerinin yanı sıra, deprem dalgasının sisteme giriş şekli de tasarımda önem arz etmektedir. Çoğu mühendislik yapısının tasarımındaki genel yaklaşım, sistemin zemine bağlandığı her noktadan, aynı deprem hareketinin aynı zamanda etki etmeye başladığıdır.

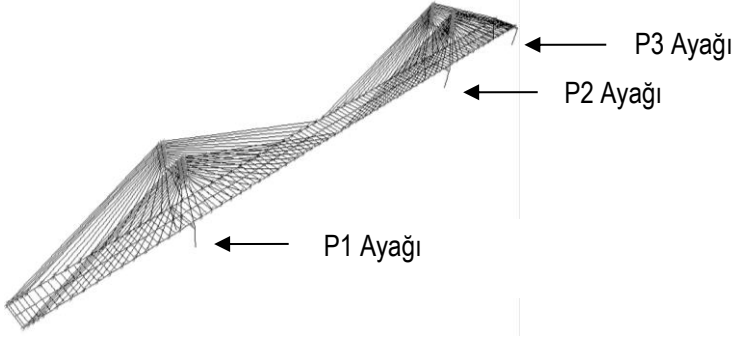
Kablolu köprüler türü uzun açıklıklı yapılarda ise deprem dalgasının bir köprü ayağından diğerine ulaşınca kadar geçen sürenin, zeminin yapısına bağlı olmakla birlikte, köprünün dinamik davranışında ne ölçüde etkili olduğu merak konusu olmaktadır. Son yıllarda birçok araştırmacı bu konuyla ilgili hem teorik hem de uygulamalı çalışmalar yapmıştır. Quan ve diğerleri[7], büyük açıklıklı ve eğik gergili bir köprünün, köprü ayaklarına farklı deprem ivmeleri uygulanması durumundaki köprü dinamik davranışını incelemişlerdir.

Bu çalışma kapsamında incelemek için Bill-Emerson Köprüsü seçilmiştir. Birçok araştırmacı tarafından konu edilmesi ve özellikle yapılan saha ölçümleri sayesinde gerçeğe yakın olarak elde edilen serbest titreşim frekans değerleri sayesinde model kıyaslaması yapılmıştır. Turan ve diğerlerinin[1] Bill Emerson Köprüsünü temel alarak yaptığı çalışmada, köprünün sismik davranışı üzerinde en uygun kontrol ve  $\mu$ -sentezli kontrol uygulaması temel alınmıştır. Zhang ve diğerleri[8], Bill Emerson köprüsünün modal parametrelerini sistem tanılama yöntemlerinden biri olan NExT-ERA(Doğal uyarım tekniği[NExT]- özsistem realizasyonu algoritması[ERA]) yöntemini kullanarak belirlemişlerdir. Yan ve Chen[6], Bill Emerson köprüsünün sismik davranışı incelemiş ve ölçüm değerleriyle kıyaslamışlardır.

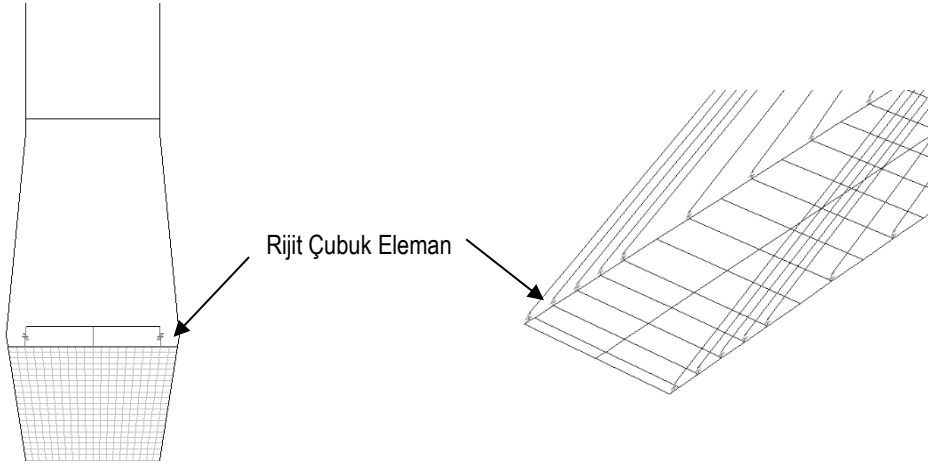
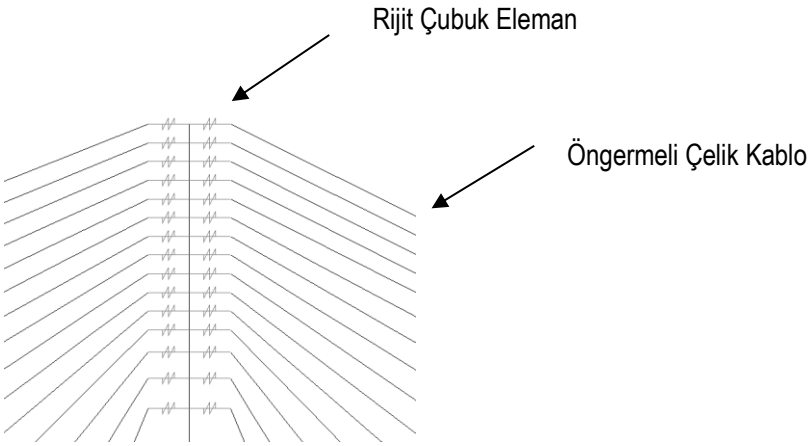
Dyke ve ekibinin[3,4] kablolu köprülerin sismik davranışı üzerine yaptığı kapsamlı bir çalışma sonucunda ise tasarım sırasında iki önemli hususa dikkat edilmesi öngörülmüştür. Bunlardan ilki, deprem hareketinin, köprü trafik akış yönünde oluşması durumunun dikkate alınması, ikincisi ise köprü tasarımında kritik rol oynayan iç kuvvetlerin, kulelerde meydana gelen kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri ile taban kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri olduğudur[1]. Bu nedenle, mevcut çalışmada aynı deprem ivmesinin aynı anda ve farklı zamanlarda etki etmesi durumlarında, mod birleştirme ve direkt integrasyon yöntemlerinin, köprü ayaklarının tabanında oluşan kesme kuvvetlerine olan etkisinin üzerinde durulmuştur. Yapılan analizlerde Sap 2000 V14 programı kullanılmıştır.

### **Köprü Sonlu Elemanlar Modeli**

Bu çalışma kapsamında incelenen Bill Emerson köprüsünün 3 boyutlu hesap modeli, yapının dinamik davranışının belirlenmesi için kullanılacak olan direkt integrasyon ve mod birleştirme yöntemlerinin, analiz süresine ve elde edilecek olan çözümün hassasiyetine olan etkisini görebilmek amacıyla iki farklı şekilde kurulmuş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Model-1'de dinamik yükleme için uygun olmayan ve hesaplamada sıkıntı yaratabilen bir modelleme uygulanmıştır. Burada kablo elemanları kule kollarına ve tabliye kenar kirişlerine sonsuz rijit elemanlarla bağlanmıştır. Bu rijit elemanlar, dinamik analizde sorun yaratabilen bağlantı türleri olarak karşımıza çıkabilmektedir. Kule perde duvarları, 400'er adet sonlu eleman ağına bölünmüş, tabliyenin kule kirişi ile bağlantısı yine sonsuz rijit bağlantı elemanları kullanılarak yapılmıştır. Model-1'e ait hesap modeli toplam 1028 adet çubuk eleman, 2262 adet düğüm noktası, 128 adet öngermeli çelik kablo ve 265 adet rijit bağlantıdan oluşmaktadır ve 13572 adet serbestlik derecesine sahiptir.

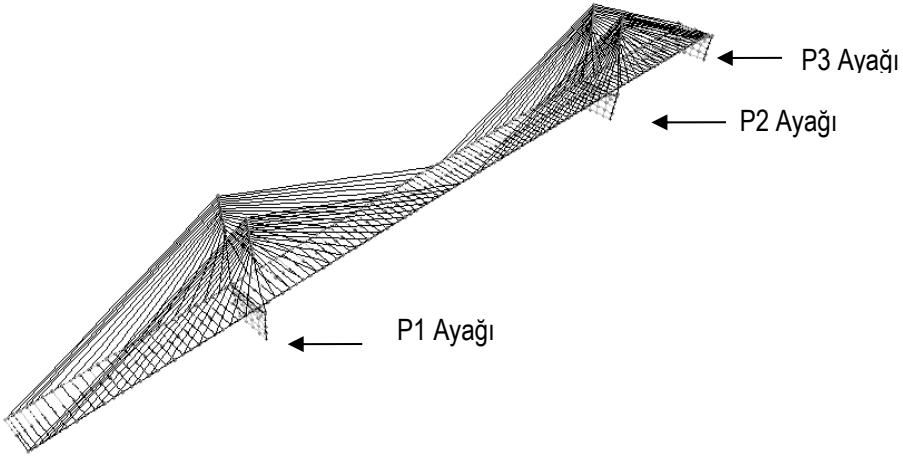


Şekil 1. Model-1'e ait 3 boyutlu hesap modeli

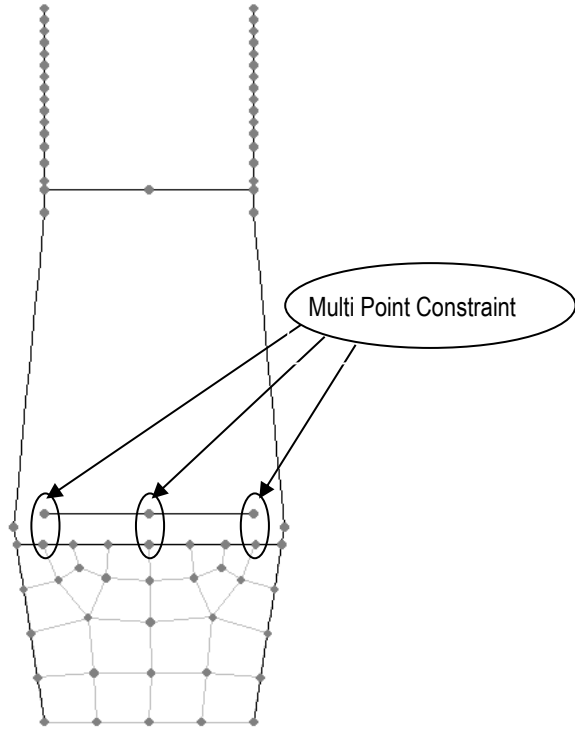


Şekil 2. Öngermeli çelik kabloların kuleyle ve tabliye kenar kirişleriyle, tabliyenin de kule kirişiyle olan bağlantı modeli

Model-2 olarak adlandırılan ve Şekil-2'de gösterilen ikinci modellemede ise kablo elemanları kule kollarına ve tabliye kenar kirişlerine sonsuz rijit elemanlar kullanılmaksızın, direkt olarak bağlanmıştır. Kule perde duvarları, 22'şer adet sonlu eleman ağına bölünmüş, tabliyenin kule kirişi ile bağlantısı ise Multi Point Constraint(MPC) tanımlanarak yapılmıştır. Bu tanımlama uyarınca birbirlerine bağlanan düğüm noktalarının, x, y ve z doğrultusundaki deplasmanları birbirlerine eşit tutulmakla birlikte, dönmeleri serbesttir. Model-2'ye ait hesap modeli toplam 1028 adet çubuk eleman, 1826 adet düğüm noktasından oluşmaktadır 10956 adet serbestlik derecesine sahiptir.

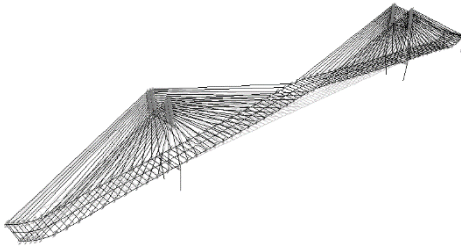


Şekil 3. Model-2'ye ait 3 boyutlu hesap modeli

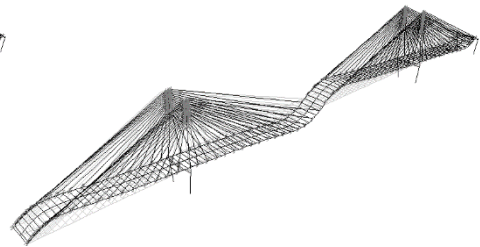


Şekil 4. Tabliyenin kule kirişiyle bağlantı detayı

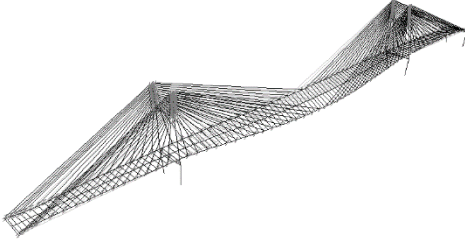
Kurulan modellerin yalnızca kendi ağırlığı altında köprü açıklık ortasındaki statik deplasmanı Model-1 için 35.83 cm, Model-2 için 44.81 cm olarak bulunmuştur. Oluşturulan modellerin serbest titreşim analizi sonucu elde edilen frekans değerleri, daha önce yapılan çalışmalarla kıyaslamalı olarak Tablo-1'de, mod şekilleri ise Şekil-5'de sunulmuştur.



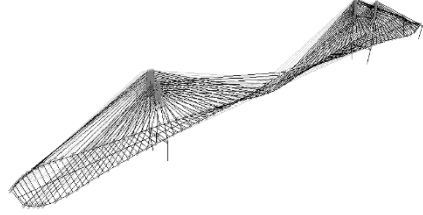
Mod-1



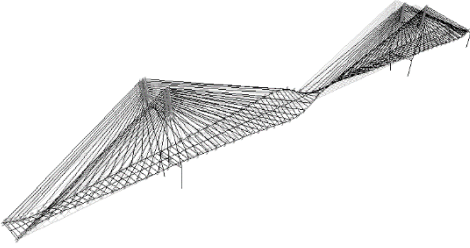
Mod-2



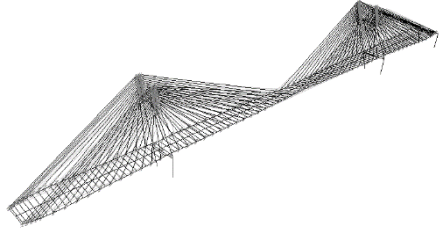
Mod-3



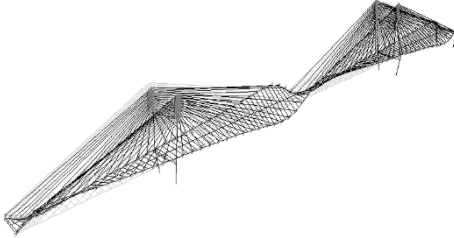
Mod-4



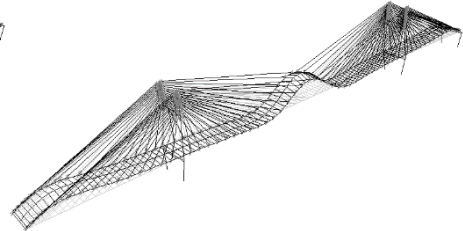
Mod-5



Mod-6



Mod-7



Mod-8

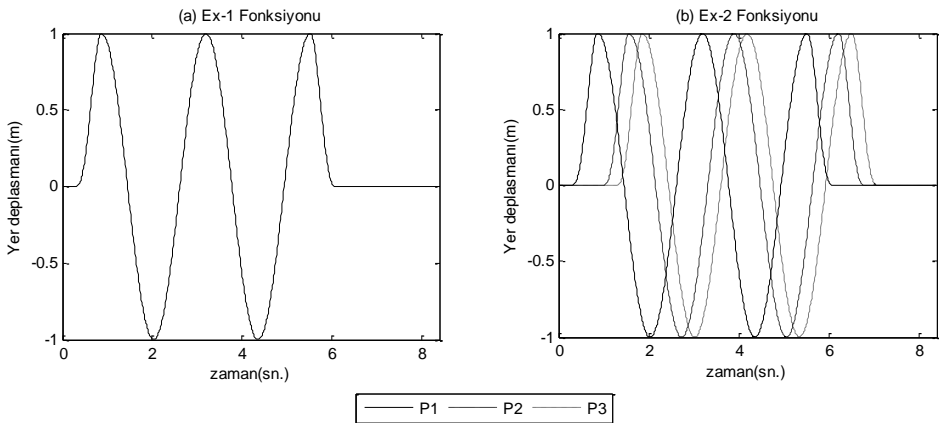
Şekil 5. Model-1 ve Model-2'ye ait serbest titreşim mod şekilleri

Tablo 1. Model-1 ve Model-2'nin karşılaştırmalı serbest titreşim frekansları(Hz.)

Mod No.	Model-1	Model-2	G. Turan ve diğerleri [1]	Y.X. Zhang ve diğerleri [8]	D.M. Yan ve G.D. Chen [6]
1	0,355	0,285	0,290	0,314	0,340
2	0,438	0,326	0,369	0,412	0,420
3	0,456	0,354	0,468	0,573	0,500
4	0,490	0,403	0,516	0,634	0,590
5	0,578	0,491	0,581	0,701	0,650
6	0,586	0,498	0,649	0,766	0,710
7	0,602	0,539	0,669	0,901	0,780
8	0,776	0,668	0,697	-	-

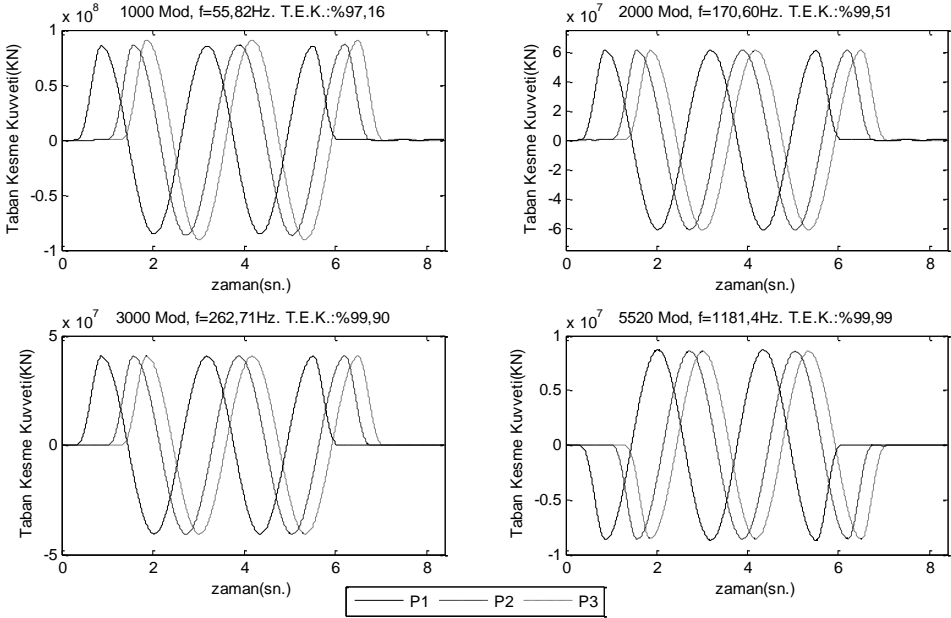
### Zorlanmış Titreşim Analizi

Bu çalışma kapsamında incelenen Bill Emerson Memorial köprüsünün zorlanmış titreşim analizi, kurulan her iki model için iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada köprü ayaklarının her birine, trafik akış yönünde, Şekil 6.(a)'da sunulan ve Ex-1 olarak adlandırılan deplasman fonksiyonu verilerek hem mod birleştirme hem de direkt integrasyon yöntemi uygulanmıştır. İkinci aşamada ise P1, P2 ve P3 olarak adlandırılan köprü ayaklarının aynı deprem hareketine farklı zamanlarda maruz kalması durumu için, başka bir deyişle, deprem hareketinin zemindeki ilerleyişini de hesaba katmak ve titreşim üzerindeki etkisini irdelemek amacıyla dalganın zemindeki yayılma hızı  $V_s=500\text{m/sn}$  alınarak çözülmüştür. Bu amaçla köprü ayakları için tanımlanan ve Ex-2 olarak adlandırılan deplasman fonksiyonu da Şekil 6.(b)'de sunulmuştur.



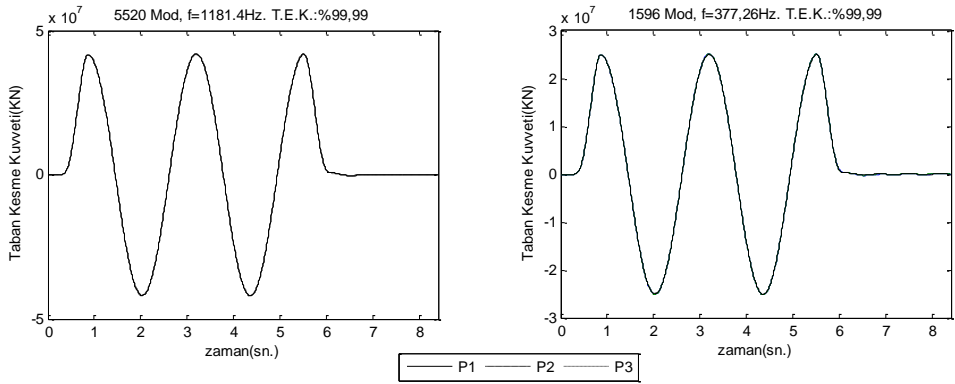
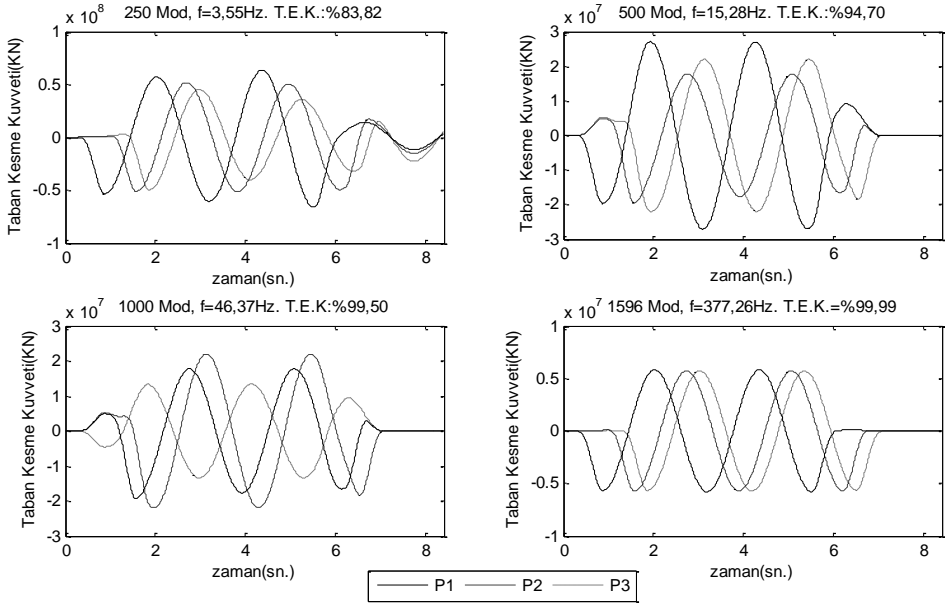
Şekil 6. Ex-1 ve Ex-2 deplasman fonksiyonlarının zaman geçmişi

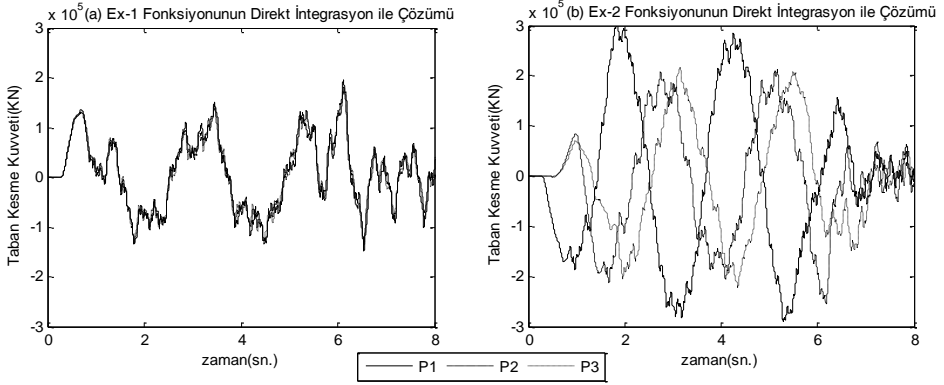
Deprem dalgasının zemindeki yayılma hızının 500m/sn olarak alınması durumunda, İkinci kule ayağındaki yer hareketi, birinci kule ayağındaki yer hareketinden yaklaşık olarak 0,70sn. sonra, üçüncü kulenin tabanındaki hareket ise ikinci kulenin tabanındaki yer hareketinden yaklaşık olarak 0,28sn. sonra başlamaktadır. Model-1 ve 2'nin modal titreşim analizleri, her bir model için, mod sayısı artırılarak tekrarlanmış ve toplam etkin kütle oranının(T.E.K.) %99,99'a ulaştığı mod sayısında analiz tamamlanmıştır. Direkt integrasyon yönteminde ise sistemin tamamı Newmark-Beta, sabit ivme yöntemi kullanılarak, zaman aralığı  $dt=0,001$  için çözülmüştür. Model-1'de yüksek rijitlikteki elemanlar tanımlanmış olduğundan, yüksek frekansların devreye girmesi nedeniyle, direkt integrasyon yöntemi ile sonuç elde edebilmek için  $dt$ 'nin oldukça küçük bir değer olması gerekmektedir, bu durum da analiz süresini çok fazla uzatmaktadır. Bu nedenle Model-1 için direkt integrasyon yöntemi ile çözüm yapılmamıştır.



Şekil 7. Model-1'in Ex-2 fonksiyonu için mod birleştirme yöntemi kullanılarak elde edilen kesme kuvvetleri







Şekil 10. Model-2'nin Ex-1 ve Ex-2 fonksiyonu için direkt integrasyon yöntemi kullanılarak edilen kesme kuvvetleri

Yapılan analizler, daha küçük dt değerleri için tekrarlandığında elde edilen kesme kuvveti grafiklerinin genliği değişmemekle birlikte daha pürüzsüz grafikler elde edilmektedir. Kurulan model üzerinde gerçekleştirilen zorlanmış titreşim analizlerinde elde edilen sonuçların, hem mod birleştirme yöntemi hem de direkt integrasyon yöntemi için daha önce yapılan çalışmalarla ne ölçüde uyumlu olduğunu görmek amacıyla, Model-2 tüm ayaklara aynı anda El Centro depremine ait yer ivmesinin etki etmesi durumu için çözülmüş ve elde edilen sonuçlar Turan ve diğerlerine[1] ait sonuçlar ile kıyaslamalı olarak Tablo-2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Model-2 için El Centro depremi ile elde edilen kıyaslamalı değerler

Davranış	Mod Birleştirme (1596 mod)	Direkt İntegrasyon	Turan ve diğerleri [1]
Taban Kesme Kuvveti(KN)	42241	81034	48780
Taban Momenti(Kn.m)	44,13x106	83,5x106	1,027x106
Kule maksimum Deplasmanı(m)	0,123	0,111	0,149

## Sonuçlar ve Bulgular

Bu çalışmada incelenen Bill Emerson köprüsü daha önce birçok araştırmacı tarafından çeşitli yayınlara konu edilmiştir. Bu nedenle çalışma kapsamında kurulan sonlu elemanlar modellerinin ne kadar gerçekçi olduğu kıyaslamaya imkan bulunmuştur. Yapılan serbest titreşim analizi sonucunda Model-1'in, Zang ve diğerleri [8] ile Yan ve Chen'in[6] çalışmalarında kurmuş oldukları 3 boyutlu analitik modele, Model-2'nin ise Turan ve diğerlerinin[1] kurmuş olduğu 3 boyutlu analitik modele daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Bununla birlikte elde bulunan tüm sonuçların birbirine yakın mertebede olduğu görülmüştür.

Çalışmada köprü ayaklarında farklı deprem ivmeleri meydana geldiğinde, diğer ayaklarda meydana gelen kesme kuvvetlerinin ne ölçüde etkili olduğunu ortaya koymak için Model-1 ve Model-2'nin modal analiz kısmında, mod sayısı etkin Toplam Etkin Kütle'nin(T.E.K.) %99,99'a ulaştığı ana kadar artırılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil-7 ve Şekil-8'de sunulmuştur. Şekil 7 ve 8'de görüldüğü üzere T.E.K.'nin %83-%99.90 aralığında değişmesi durumunda Taban Kesme Kuvvetinin genliği azalmaktadır. Model-1 için T.E.K.'nin %99,90 olduğu ve 3000 modun hesaba katıldığı durumda elde edilen Taban Kesme Kuvveti genliğinin, T.E.K.'nin %99,99 olduğu ve 5520 modun hesaba katıldığı durumunda elde edilen Taban Kesme Kuvveti genliğine oranla 5 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Model-2 için T.E.K.'nin %99,95 olduğu ve 1000 modun hesaba katıldığı durumda elde edilen Taban Kesme Kuvveti genliğinin, T.E.K.'nin %99,99 olduğu ve 1596 modun hesaba katıldığı durumunda elde edilen Taban Kesme Kuvveti genliğine oranla 3 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, mod birleştirme yöntemi uygulanırken, tüm modlar hesaba katılmasa bile en az T.E.K.'nin %99,99 olduğu mod sayısının hesaba katılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Model-1 için toplam mod sayısı 13572 olmasına rağmen T.E.K 5520. Mod itibarıyla %99,99'a ulaşmakta diğer modların etkisi ihmal edilebilir mertebede olmaktadır. Başka bir deyişle Titreşim hareketinde etkili mod sayısı oranı %40,1 civarında olmaktadır. Model-2'de ise bu oran %14,57 olarak hesaplanmıştır.

Direkt integrasyon yöntemi, mod birleştirme yöntemine göre çok daha fazla vakit alan bir yöntemdir. Elde edilen sonucun hassasiyeti ve pürüzsüzlüğü, seçilen integrasyon zaman aralığı ile doğrudan ilgilidir. İntegrasyon aralığı küçüldükçe hassasiyet ve pürüzsüzlük artmaktadır. Bu çalışma kapsamında zaman aralığı  $dt=0,001$  olarak alınmış ve analizler gerçekleştirilmiştir. Model-2'nin direkt integrasyon yöntemi ile çözümü sonucu elde edilen Taban Kesme kuvveti genliğinin, mod birleştirme sonucu elde edilen Taban Kesme Kuvveti genliğinin %1,2'si civarında olmaktadır. Deprem hareketinin tüm ayaklarda aynı anda başlaması durumunda ise bu oran %0,5 olmaktadır.

Deprem hareketinin P1 ayağında başladığı 0,28. saniyeden, P2 ayağında hareketin başladığı 0,70. saniyeye kadar geçen sürede hem Model-1 hem de Model-2 için P2 ve P3 ayaklarında kesme kuvveti oluşmaktadır. Aslında bu durum, gerilme dalgasının çelik ve betondaki yayılma hızının zemindeki yayılma hızına oranla daha büyük olması nedeniyle beklenen bir durumdur; ancak bu süre zarfında meydana gelen kesme kuvveti, toplam kesme kuvveti genliğine oranla ihmal edilebilir mertebede olmaktadır. Köprü ayaklarının aynı deprem ivmesine maruz Ex-1 hareketine maruz kalması, beklendiği gibi, P1, P2 ve P3 ayaklarında oluşan kesme kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi birbirinin aynısı olmaktadır. Bu durumda elde edilen kesme kuvveti genliğinin, ayaklara farklı deplasmanların verildiği Ex-2 hareketine maruz kalması durumunda meydana gelen kesme kuvveti genliğine oranı Model-1 için %20, Model-2 için ise %24 mertebesinde olmaktadır.

Kablolu veya eğik gergili köprü türündeki yapıların modellenmesi sırasında yapılan küçük değişikliklerin analiz sonucunda büyük farklılıklar doğurduğu dikkate alınmalıdır. Yüksek

modların, özellikle iç kuvvetlerin oluşumunda çok etkili olması sebebiyle, yalnızca T.E.K. oranına göre hesap yapmak yanıltıcı sonuçlar doğurabilir.

### Kaynaklar

1. Turan, T., Voulgaris, P., Bergman, L.A. (2009) "Kablolu bir köprünün deprem davranışının  $\mu$ -sentezli aktif kontrolü." Teknik Dergi, 20(4) 4865-4889.
2. Turan, G. (2001) "Active control of a cable-stayed bridge against to earthquake excitatitons." Ph.D. Thesis, Dept. of Civil & En. Engineering, University at Urbana-Champaign.
3. Dyke, S.J., Caicedo, J.M., Turan, G., Bergman, L.A., and Hague, S., (2003) "Phase-I benchmark control problem for seismic response of cable-stayed bridges." Journal of Structural Engineering, ASCE, 129:7, 857-872.
4. Dyke, S.J., Caicedo, J.M.,Bergman, L.A., Turan, G., (2000) "Introducing a benchmark control problem for a cable stayed bridge subjected to seismic excitation." China U-S Millenium Symposium on Earthquake Engineering, Beyjing, Çin,(Kaynak: EARTHQUAKE ENGINEERING FRONTERIERS IN THE NEW MILLENNIUM, 287-292,2001).
5. Turan, T., Voulgaris, P., Bergman, L.A. (2002) " $\mu$ -syntheses control of a Cable-stayed bridge against to earthquake excitations." Third World Conference on Structural Control, Como, İtalya.
6. Yan, D.M. ve Chen, G.D. (2008) "Seismic performance evaluation of the Bill Emerson cable stayed bridge with measured acceleration records." World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, Çin.
7. Quan, H.N. ve Li, H.N. ve Liu, X.Z. (2008) "Seismic response of large-span cable-stayed bridge under multi-component multi-support earthquake excitation." World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, Çin.
8. Zhang., Y.X., Caicedo, J.M., Sim, S.H., Chang, C.M. ve Spencer, B.F. (2008) "Modal identification of Bill Emerson Bridge" World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, Çin.

**Anahtar Sözcükler:** Eğik Gergili Köprüler, Gerilme İlerleyişi, Mod Birleştirme Yöntemi, Direkt İntegrasyon Yöntemi, Taban Kesme Kuvveti.