

FATİH SULTAN MEHMET KÖPRÜSÜ YAPISAL DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ

Kubilay KAPTAN¹

¹*Istanbul Aydın Üniversitesi – Afet Eğitim, Uygulama ve Araştırma Merkezi, İSTANBUL*

kubilaykaptan@aydin.edu.tr

(Geliş/Received: 06.05.2013; Kabul/Accepted in Revised Form: 18.07.2013)

ÖZET: Köprüler gibi önemli mühendislik yapılarının değişen yükler altındaki dinamik davranışlarının belirlenmesinde sonlu eleman analizlerinden yararlanılmaktadır. Fakat sonlu eleman analizlerine dayalı analitik çözümlerinde, yapıların sanki bir anda inşa edildiği ve yüklendiği kabul edilmektedir. Bu tür çözüm yöntemleri her zaman güvenilir sonuçlar vermeyebilir. Çünkü köprü gibi önemli mühendislik yapılarının inşası uzun zaman almakta ve maruz kaldığı yükler yapım süresince devamlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla analizler sırasında yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının da dikkate alınması gerekmektedir. Bu çalışmada, asma köprülerin yapısal davranışına yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonları etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, İstanbul'da bulunan ve Asya ile Avrupa kıtalarını birbirine bağlayan Fatih Sultan Mehmet Köprüsü örnek olarak seçilmiştir. Köprü'nün iki boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 programında oluşturulmuştur. Yapım aşamalarının etkisini daha iyi belirlemek amacıyla analizler yapım aşamalarının dikkate alınmadığı durum için de tekrarlanmış, tabliye uzunluğu ve kule yüksekliği boyunca elde edilen yer değiştirmeler ile kesit tesirleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmanın sonunda, asma köprülerin yapısal davranışlarının belirlenmesinde yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınması gerektiği belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: *Fatih Sultan Mehmet Köprüsü, Sonlu eleman analizi, Yapım aşaması, Zamana bağlı deformasyon.*

Structural Behavior Fatih Sultan Mehmet Bridge

ABSTRACT: Finite element analyzes are used to determine the dynamic behavior of major engineering structures such as bridges under varying loads. However, based on the finite element analysis, the analytical framework considers the structures as they have been built and installed at the same time. This type of solution methods may not always give reliable results. Because, construction of engineering structures such as bridges take a long time and they are exposed to changing loads during construction. Therefore, construction phases and time-dependent deformations of the material must be taken into account during the analyzes. In this study, the effect of construction steps and the time-dependent deformation of the material on the structural behavior of suspension bridges are tried to be determined. Within this study, linking the continents of Asia and Europe in Istanbul, Fatih Sultan Mehmet Bridge was chosen as an example. A two-dimensional finite element model of the bridge was created by SAP2000.

To understand the effect of construction phases, analyses have been repeated for the case in which construction stages are not taken into account. Deck length and displacements obtained during the height of the tower are investigated in comparison with the cross-sectional effects. At the end of the study, the structural behavior of suspension bridges in determining the stages of production and time-dependent deformation of the material is determined to be taken into account.

Keywords: Fatih Sultan Mehmet Bridge, Finite elements analysis, Construction phases, Time dependent deformation.

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Köprüler, insanoğlunun varoluşundan beri hayatını kolaylaştıran en önemli mühendislik yapılarından biridir. Eski zamanlardan beri köprüler, akarsuları, derin vadileri, hatta kıtaları geçmeyi sağlayarak insanları birbirlerine kavuşturmuştur. Eski zamanlarda yapılan köprüler dar, küçük açıklıklı ve hafif yükleri taşıyabilecek nitelikte, kâgir ve ahşap malzemelerden yapılırken; günümüzde bu köprülerin yerini betonarme ve çelik köprüler almıştır. Bu amaçla günümüzde geniş, büyük açıklıklı ve ağır yükleri taşıyabilecek betonarme ve çelik köprüler inşa edilmektedir. Bu tip yapılar arasında 550 m'den daha uzun olan asma köprüler, gerek büyük açıklıkların geçilmesi gerekse köprü altında kalan alanların rahatça kullanılabilmesi açısından benzerlerinden daha ekonomik mühendislik yapılarıdır. Bu tarz köprülerinin yüksek yapım maliyetleri ve buldukları bölgelerdeki lojistik önemleri dikkate alındığında, bu tür mühendislik yapılarının yapısal davranışlarının çok iyi belirlenmesi gerekmektedir.

Asma köprülerin yapısal davranışlarının belirlenmesinde genellikle sonlu eleman analizleri kullanılmaktadır. Analizler bilimsel dünyada kabul görmüş sonlu eleman paket programları ile gerçekleştirilmektedir. Bu analizlerde inşa edilecek olan yapının statik, dinamik, lineer ve lineer olmayan davranışları belirli kabuller dikkate alınarak belirlenmektedir. Bu kabullerin başında, yapıların sanki aniden inşa edildiği, yüklendiği ve malzeme özelliklerinin inşa süresince değişmediği kabulü gelmektedir. Fakat asma köprüler gibi önemli mühendislik yapılarının yapımı yıllar alabilmektedir. Bu nedenle bu tür köprülerin sonlu eleman analizleri sırasında köprünün yapım aşamalarının ve malzeme özelliklerindeki değişimlerinin dikkate alınması gerekmektedir.

Literatürde, köprülerin yapım aşamalarını ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarını dikkate alarak gerçekleştirilen bazı çalışmalar mevcuttur. Wang ve diğ. (2004) dengeli konsol yöntemi kullanılarak inşa edilen kablolu köprülerin farklı yapım aşamaları dikkate alınarak yapısal davranışlarının belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Alp (2007) yaygın yöntemlerle yapılan yapısal analiz sonuçlarının kademeli yükleme etkisi göz önüne alınarak yapısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmasını incelemiştir. Cho ve Kim (2008) bilgisayar yardımıyla simülasyon edilen bir asma köprünün yapım aşamaları esnasında olasılıksal risk değerlendirilmesini sonlu eleman analizlerine dayalı olarak gerçekleştirmişlerdir. Karakaplan ve diğ. (2009) yapım aşamaları dikkate alınarak elde edilen analiz sonuçlarının klasik çözümleme sonuçları ile karşılaştırılmalı olarak incelenmesi amacıyla seçilen bir yaya köprüsünün, bir öngerilmeli karayolu köprüsünün ve çok katlı bir binanın sonlu eleman analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Adanur ve Günaydın (2010) Boğaziçi Köprüsü'nün sonlu eleman analizlerinde yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınması konusunda çalışmışlardır. Altunışık ve diğ. (2010) uzun açıklıklı, değişken kesitli ve dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen betonarme karayolu köprülerinin sonlu eleman analizlerinde yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınması konusunda çalışmışlardır. Ateş (2010) uzun açıklıklı, betonarme kutu kesitli ve dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen karayolu köprülerinin sonlu eleman analizlerinde yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınması konusunda çalışmıştır. Malm ve Sundquist (2010) dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen karayolu köprülerinin sonlu eleman analizlerinde zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınması konusunda çalışmışlardır. Soyluk ve diğ. (2010) konsol dilimler halinde inşa edilmiş kablolu köprülerin lineer olmayan analizi konusunda çalışmışlardır. Günaydın (2011) İstanbul'da bulunan Boğaziçi Köprüsü ve İngiltere'de bulunan Humber Köprülerinin sonlu eleman

analizlerinde yapım aşamalarının ve zaman bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınması konusunda çalışmıştır.

UYGULAMA ÖRNEĞİ (Case Study)

Fatih Sultan Mehmet Köprüsü (Fatih Sultan Mehmet Bridge)

Bu çalışmada sayısal uygulama için İstanbul'da bulunan ve Asya ile Avrupa'yı birbirine bağlayan Fatih Sultan Mehmet Köprüsü (Şekil 1) örnek olarak seçilmiştir. Yapımına 1985 yılında başlanmış olan köprü 1988 yılında tamamlanmıştır. Fatih Sultan Mehmet Köprüsü ana açıklığı 1090 m olup ana açıklığın deniz seviyesinden yüksekliği yaklaşık 64 m dir. Kule temelleri Boğaz'ın iki yakasındaki yamaçlara yerleştirilmiş olup, kuleler hemen hemen tabliye mesnet seviyesinden başlamaktadır. 110 m yüksekliğinde olan çelik kuleler ikişer adet yatay kiriş ile birbirine bağlanmıştır. Kulelerin boyutları tabanda 5x4 m., tepede ise 3x4 m. dir. Ana kablolar arasındaki mesafe 33,8 m dir. Her biri 4 şerit olan, biri gidiş diğeri dönüş toplam iki yolu bulunmaktadır. Tabliye aerodinamik enkesitli kutu şeklindedir. Kutu kesitli tabliye 33,80 m genişliğinde ve 3 m yüksekliğinde olup her iki yanında 2,8 m genişliğinde konsol şeklinde yaya yolları yer almaktadır. Tabliye 61 üniteden oluşmaktadır.



Şekil 1 :Fatih Sultan Mehmet Köprüsü.

Sonlu Eleman Modeli (Finite Element Model)

Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün yapısal davranışını belirlemek için köprü'nün iki boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 sonlu eleman paket programından faydalanılarak oluşturulmuştur. Köprü'nün sonlu eleman modelinde (Şekil 2) tabliye, kuleler ve kablo kiriş elemanlar ile askılar ise kafes elemanlar ile temsil edilmiştir. Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün iki boyutlu sonlu eleman modeli 149 düğüm noktası, 142 kiriş eleman ve 60 kafes elemandan oluşmaktadır. Ayrıca sonlu eleman modeli 418 serbestlik derecesi ile temsil edilmiştir.



Şekil 2 :Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün iki boyutlu sonlu eleman modeli.

Yapım Aşamalarının Dikkate Alınması (Time Consideration of Construction Phases)

Yapım aşaması çözümlenmesi, yapının bir anda inşa edilmesi ve yüklenmesi yerine sahada yüklenici firma yapıyı nasıl inşa ediyorsa, proje ofisinde bulunan mühendislerin bu yapım aşamalarını zamana bağlı olarak bilgisayar ortamında bir araya getirmeleri demektir (Karakaplan ve diğ. 2009). Çünkü köprü gibi önemli mühendislik yapılarının inşası uzun zaman almakta ve maruz kaldığı yükler yapım süresince devamlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla analizler sırasında yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının da dikkate alınması gerekmektedir. Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün yapısal davranışına yapım aşamalarının etkisini belirlemek amacıyla köprü'nün sonlu eleman modeli 33 adımda oluşturulmuştur. Toplam inşaat süresi 604 gün olarak dikkate alınmıştır. Modellemeler sırasında toplam adım sayısı ve maksimum iterasyon sayısı sırasıyla 200 ve 50 olarak dikkate alınmıştır. Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün yapım aşamalarına ait sonlu eleman modelleri Şekil 3'te verilmiştir.

Zamana Bağlı Malzeme Deformasyonlarının Dikkate Alınması (Time Dependent Material Deformation)

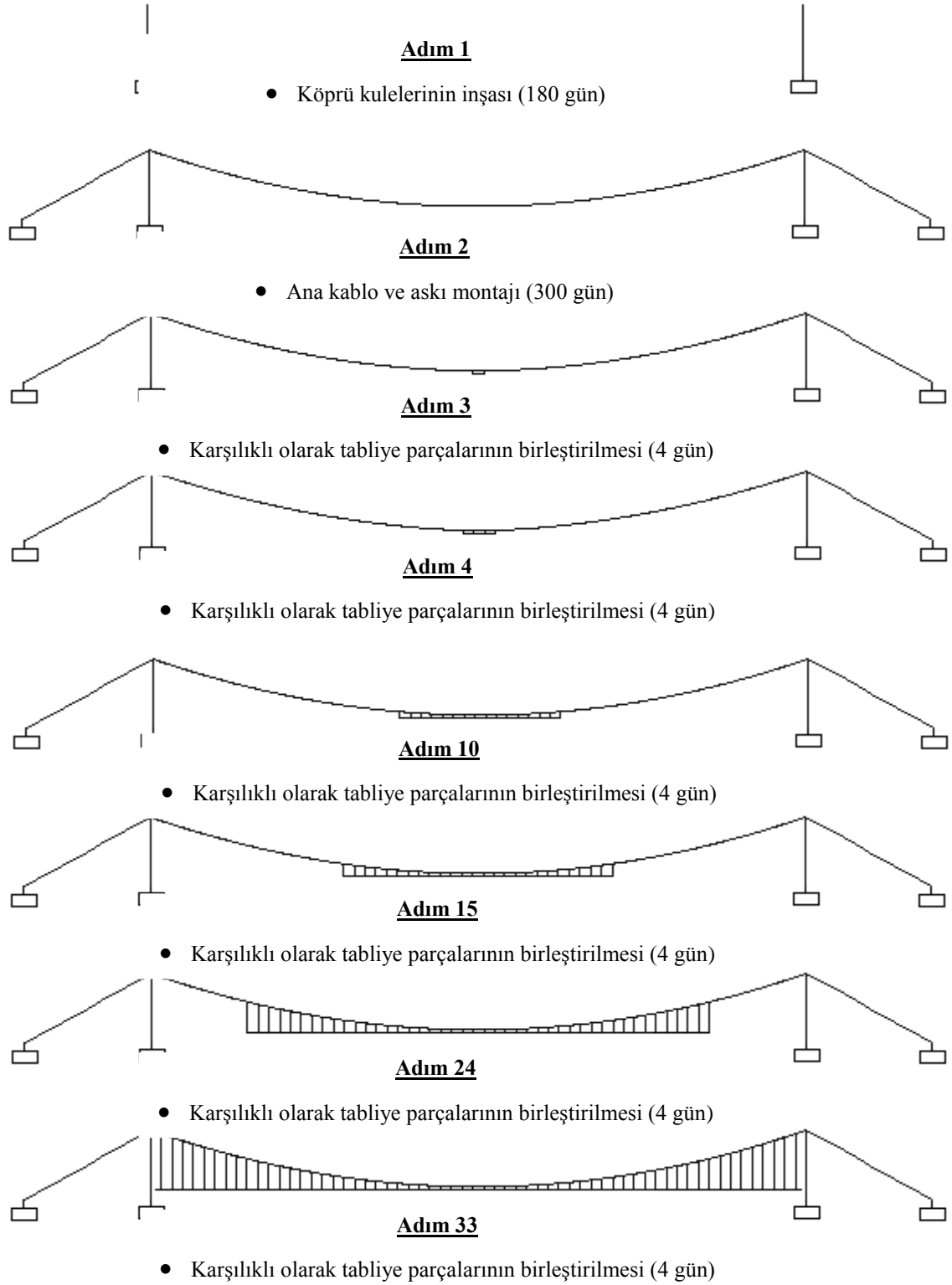
Yapım aşamalarını zamana bağlı olarak bilgisayar ortamında bir araya getirmeye çalışan proje mühendislerinin zamana bağlı malzeme deformasyonlarını dikkate almaları gerekir. Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün yapısal davranışına zamana bağlı malzeme deformasyonlarının etkisini belirlemek amacıyla analizlerde çelik malzemesi için çeliğin gevşemesi dikkate alınmıştır. Çünkü çelik gibi yapı malzemelerin özellikleri iklim şartlarına ve yükleme şekline bağlı olarak sürekli bir değişkenlik gösterebilmektedir. Çelik için gerilme şekil değiştirme ve zamana bağlı değişen malzeme özellikleri grafikleri Şekil 4'te verilmektedir. Analizlerde dikkate alınan bu parametreler SAP2000 sonlu eleman programı içerisinde de bulunan CEB-FIP tasarım kodunun yardımıyla belirlenmiştir. Bu parametrelere bağlı olarak Şekil 4'te verilen grafikler otomatik olarak değişmektedir.

Yapım Aşamaları ve Malzeme Deformasyonlarının Dikkate Alındığı Analizler

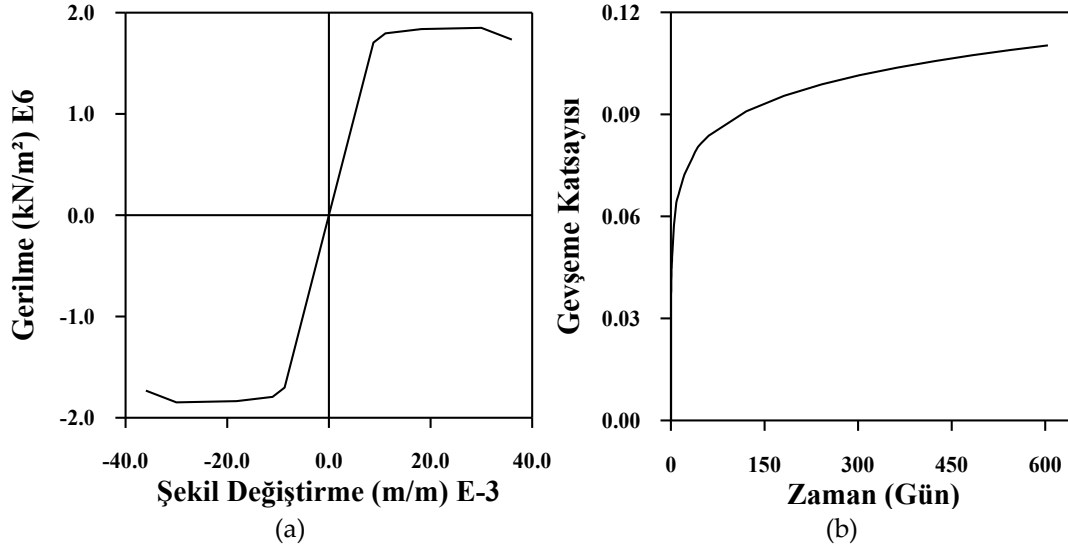
Asma köprülerin yapısal davranışına yapım aşamaları ve malzeme deformasyonlarının etkisini belirlemek amacıyla İstanbul'da bulunan Fatih Sultan Mehmet Köprüsü örnek olarak seçilmiştir. Köprü ana açıklığı 1090 m olup ana açıklığın deniz seviyesinden yüksekliği yaklaşık 64 m dir. Kulelerin boyutları tabanda 5x4 m tepede ise 3x4 m olup 110 m yüksekliğindedir. Analizler SAP2000 sonlu eleman paket programında gerçekleştirilmiştir. Analiz tipi olarak "Nonlinear Staged Construction" ve geometrik parametreler için "P-Delta Etkisi" dikkate alınmıştır. Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün yapım aşamaları dikkate alınarak gerçekleştirilen analizlerde aşağıda belirtilen yükleme durumları dikkate alınmıştır.

Sabit Yük: Tüm elemanların kendi ağırlıklarıdır.

Ek Sabit Yük: Asfalt, bordür, boru hattı ve destekleri, korkuluk gibi ek olarak etki eden ağırlıklardır. Bu ağırlıklar 40 kN/m olarak dikkate alınmıştır.



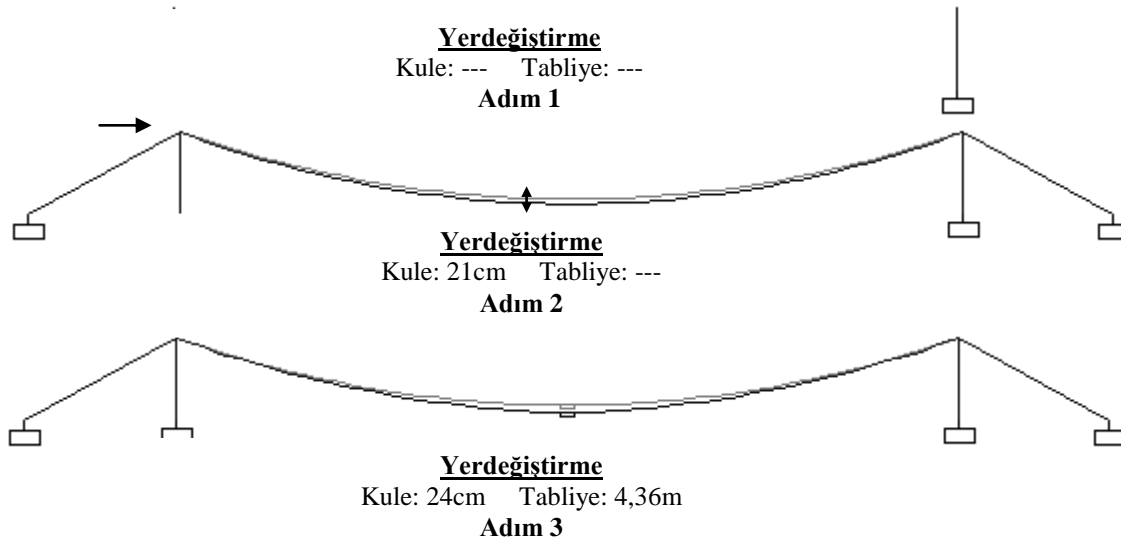
Şekil 3: Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün yapım aşamalarına ait bazı sonlu eleman modeli.

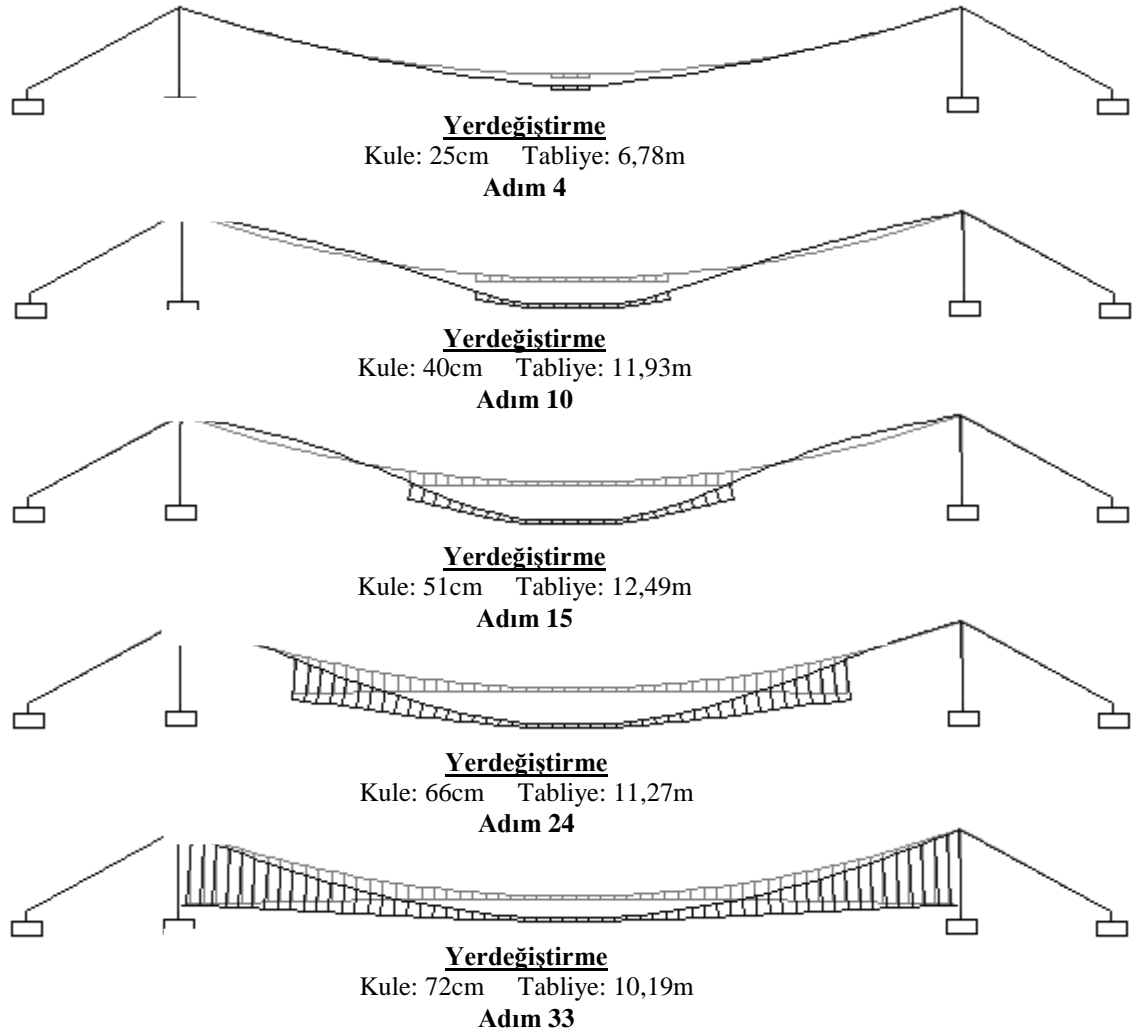


Şekil 4: Ön gerilmeli çelik için gerilme şekil-değişirme (a) ve zamana bağlı malzeme özellikleri değişimi (b) diyagramları.

Yapım Aşamalarına Bağlı Deformasyon Şekilleri (Deformation Graphics due to Construction phases)

Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen deformasyon şekilleri ile kule ve tabliyeye ait yerdeğiştirme değerleri Şekil 5'te verilmektedir. Şekil 5'te görüldüğü gibi köprü inşası ilerledikçe tabliye ve kulelerde meydana gelen yerdeğiştirmeler artmaktadır. Maksimum yerdeğiştirme tabliye orta noktasında olup 15'inci adımda 12,59 m değerine ulaşmaktadır. Köprü inşası 33'üncü adımda tamamlandığı zaman tabliye orta noktasında meydana gelen maksimum yerdeğiştirme değeri 10,19 m olmaktadır. Kule yüksekliği boyunca yatay yerdeğiştirmenin arttığı ve maksimum yerdeğiştirmenin yapım aşamalarının dikkate alındığı durum için adım 33'te kule tepe noktasında 72 cm olarak elde edildiği görülmüştür.

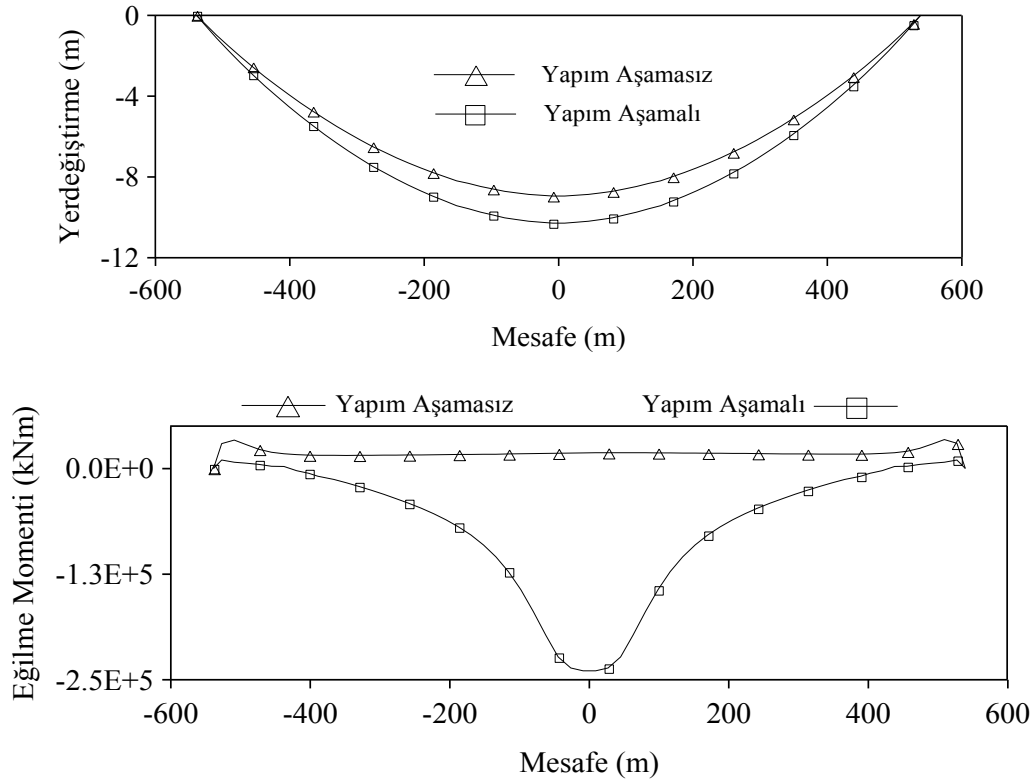




Şekil 5: Fatih Sultan Mehmet Köprüsü yapım aşamalarına ait bazı deformasyon şekilleri.

Tabliye Davranışı (Slab Behavior)

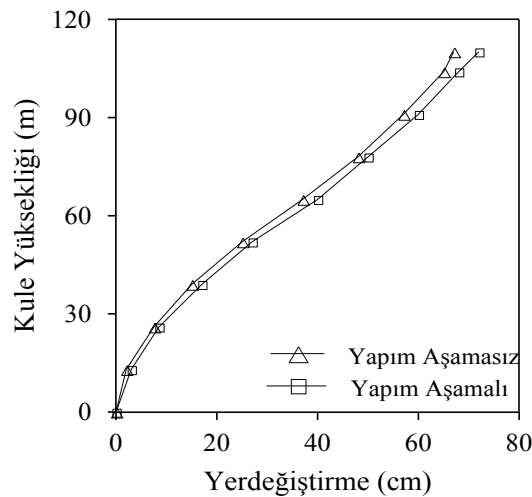
Yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin ve eğilme momentlerinin tabliye boyunca değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Düşey yerdeğiştirmeler tabliye boyunca artmakta olup maksimum değerini tabliye orta noktasında almaktadır. Yapım aşamalarının dikkate alındığı analizlerde maksimum yerdeğiştirme tabliye orta noktasında 10,19 m olarak elde edilirken, yapım aşamalarının dikkate alınmadığı analizlerde maksimum yerdeğiştirme 8,95 m olarak elde edilmiştir. Eğilme momenti değerleri yapım aşamalarının dikkate alınmadığı analizlerde tabliye boyunca hemen hemen sabit kalırken, yapım aşamalarının dikkate alındığı analizlerde tabliye boyunca sabit kalmamaktadır. Yapım aşamalarının dikkate alınmadığı analizlerde maksimum eğilme momenti tabliye boyunca hemen hemen 1,8E4 kNm olarak elde edilirken bu değer yapım aşamalarının dikkate alındığı analizlerde maksimum 2,4E5 kNm olarak tabliye orta noktasında elde edilmiştir.



Şekil 6: Düşey yer değiştirmelerin ve eğilme momentlerinin tabliye boyunca değişimi.

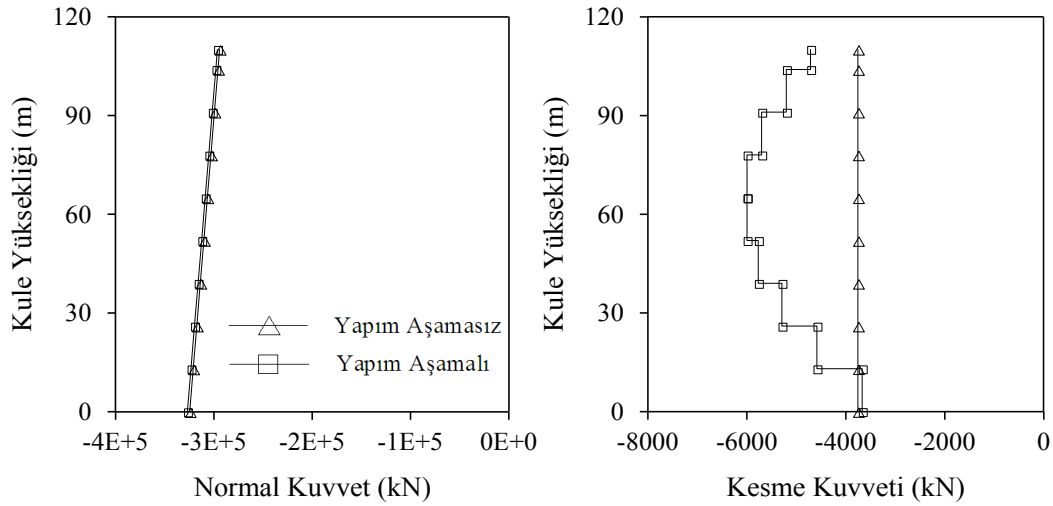
Kule Davranışı (Tower Behavior)

Yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen yatay yer değiştirmelerin kule yüksekliği boyunca değişimi Şekil 7'de verilmiştir. Yatay yer değiştirmelerin kule yüksekliği boyunca arttığı ve maksimum yer değiştirmenin yapım aşamalarının dikkate alındığı durum için kule tepe noktasında 72 cm olarak elde edildiği görülmüştür. Yapım aşamalarının dikkate alınmadığı durum için maksimum yer değiştirme kule tepe noktasında 67 cm olarak elde edilmiştir.



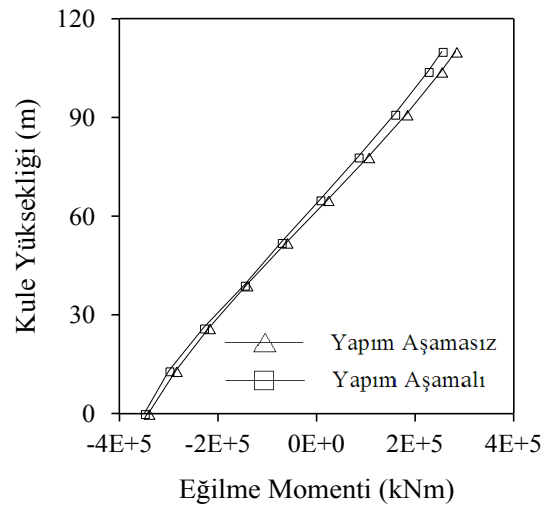
Şekil 7: Yatay yer değiştirmelerin kule yüksekliği boyunca değişimi.

Kule yüksekliği boyunca elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerleri Şekil 8’de verilmiştir. Normal kuvvet değerleri her iki analiz türü için hemen hemen eşit olup $3,3E5$ kN değerinde elde edilmiştir. Kesme kuvveti yapım aşamalarının dikkate alınmadığı analizlerde kule yüksekliği boyunca sabit olup $0,4E4$ kN değerinde elde edilmiştir. Yapım aşamalarının dikkate alındığı analizlerde ise kesme kuvveti değeri lineer olmayan bir davranış gösterip maksimum $0,6E4$ kN değerinde elde edilmiştir.



Şekil 8: Normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi.

Kule yüksekliği boyunca elde edilen eğilme momenti değerleri Şekil 9’da verilmiştir. Eğilme momenti değerleri her iki analiz türü için hemen hemen eşit olup maksimum kule alt noktasında $3,5E5$ kNm olarak elde edilmiştir.



Şekil 9: Eğilme moment değerlerinin kule yüksekliği boyunca değişimi.

SONUÇLAR (Conclusions)

Bu çalışmada, yapım aşamaları ve zamana bağlı meydana gelen malzeme deformasyonlarının dikkate alınarak asma köprülerin sonlu eleman analizlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Örnek olarak İstanbul'da bulunan Fatih Sultan Mehmet Köprüsü seçilmiştir. Bu çalışma ile aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir:

- Yapım aşamalarının dikkate alındığı analizlerde maksimum yerdeğiştirme tabliye orta noktasında 10,19 m olarak elde edilirken, yapım aşamalarının dikkate alınmadığı analizlerde maksimum yer değiştirme 8,95 m olarak elde edilmiştir. Yapım aşamalarının dikkate alındığı analizlerde kule tepe noktasında 72 cm olarak elde edilen maksimum yerdeğiştirme, yapım aşamalarının dikkate alınmadığı analizlerde 67 cm olarak elde edilmiştir.
- Yapım aşamalarının dikkate alınmadığı analizlerde maksimum eğilme momenti tabliye boyunca hemen hemen sabit olup 1,8E4 kNm olarak elde edilirken, bu değer yapım aşamalarının dikkate alındığı analizlerde maksimum 2,4E5 kNm olarak tabliye orta noktasında elde edilmiştir.
- Yapım aşamalarının dikkate alınmadığı analizlerde kesme kuvveti kule yüksekliği boyunca sabit olup 0,4E4 kN olarak elde edilmiştir. Yapım aşamalarının dikkate alındığı analizlerde kesme kuvveti değeri kule yüksekliği boyunca lineer olmayan bir davranış gösterip maksimum 0,6E4 kN değerinde elde edilmiştir.
- Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alındığı analizler ile dikkate alınmadığı analizler arasında bazı farklılıklar olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla asma köprüler gibi önemli mühendislik yapılarının yapısal davranışlarının daha hassas bir şekilde belirlenebilmesi için yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınması gerekmektedir.

KAYNAKLAR (References)

- Adanur S., Günaydın M. (2010) Construction Stage Analysis of Bosphorus Suspension Bridge. *9th International Congress on Advances in Civil Engineering, Bildiriler Kitabı*, Trabzon, s. 309.
- Alp, Y.Z. (2007) *Yaygın Yöntemlerle Yapılan Yapısal Analiz Sonuçlarının Kademeli Yükleme Etkisi Gözönüne Alınarak Yapılan Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Altunışık A.C., Bayraktar., A Sevim B., Adanur S., Domaniç A. (2010) Construction stage analysis of kömürhan highway bridge using time dependent material properties. *Structural Engineering and Mechanics*, 36(2) pp 207-244.
- Ateş Ş., (2010) Numerical modelling of continuous concrete box girder bridges considering construction stages. *Applied Mathematical Modelling*, 35(8) pp 3809-3820.
- Cho T., Kim T.S. (2008) Probabilistic risk assessment for the construction phases of a bridge construction based on finite element analysis. *Finite Elements in Analysis and Design*, 44 pp 383-400.
- Günaydın, M. (2011) *Asma Köprülerin Yapısal Davranışının Yapım Aşamaları Dikkate Alınarak Belirlenmesi* Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Karakaplan A., Caner A., Kurç Ö., Domaniç A., Lüleç A. (2007) Yapı Çözümlemesinde Yeni Bir Devir. *Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Antalya, s.141-153.
- Malm R., Sundquist H., (2010) Time-dependent analyses of segmentally constructed balanced cantilever bridges. *Engineering Structures*, 32 pp 1038-1045.
- Wang P.H., Tang T.Y., Zheng H.N. (2004) Analysis of cable-stayed bridges during construction by cantilever methods. *Computer and Structures*, 82 pp 329-346.