

PREFABRİKE ANOLU KONSOL KÖPRÜLERİN UZUN SÜRELİ ETKİLER ALTINDA DAVRANIŞI

Turgut ÖZTÜRK* , Zübeyde ÖZTÜRK , İnci AKDENİZ*****

* İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Yapı Anabilim Dalı, İstanbul

** İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Ulaştırma Anabilim Dalı, İstanbul

*** İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Bölümü, İstanbul

ÖZET

Bu çalışmada, prefabrike anolardan oluşan dört adet köprünün uzun süreli etkilerinin belirlenmesi incelenmiştir. Prefabrike anolu konsol köprülerin elemanları, taşıyıcı sistem teşkili ve türleri, öngerme kablosu düzenleme şekilleri belirtilmiştir. Köprü tabliyesinin anoları prefabrike olup, uygun araçlarla taşınarak yerine monte edilmektedir. Uzun süreli etkilerin saptanmasında betonun deformasyonları, çözümde zorluklara neden olan enkesit değişimleri ve gerilmelerin dağılımı dikkate alınmıştır. Bu çalışmada; a- Tam artımsal adım adım analiz yaklaşımının sunulması, b- Zamana bağlı sünme ve büzülme etkilerinin belirlenmesi için basitleştirilmiş yaklaşımın geliştirilmesi, c- İki yaklaşımın karşılaştırılması, problemlerin çözümüne yönelik yorumların yapılması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Köprü, Sünme, Büzülme, Yapısal analiz

LONG-TERM BEHAVIOR OF PRECAST SEGMENTAL CANTILEVER BRIDGES

ABSTRACT

An investigation is conducted to quantify long-term effects on a family of four precast segmental bridges. Segments are prefabricated, transported, and set into place with an appropriate lifting device and a launching gantry. Attention has been paid to the effects of long-term deformations of concrete, to avoid noticeable geometrical variations in its shape but also to account for redistribution of stresses, which creates a difficult analytical problem to solve. An attempt is made to provide a practical treatment of serviceability analyses of this type of concrete structure, having an evolutive process of erection, presenting: a- an “exact” incremental step-by-step time approach; b- a simplified approach for the inclusion of time dependent effects of creep and shrinkage; and c- a comparison of both approaches, in order to treat these kinds of problems by means of a simplified approach.

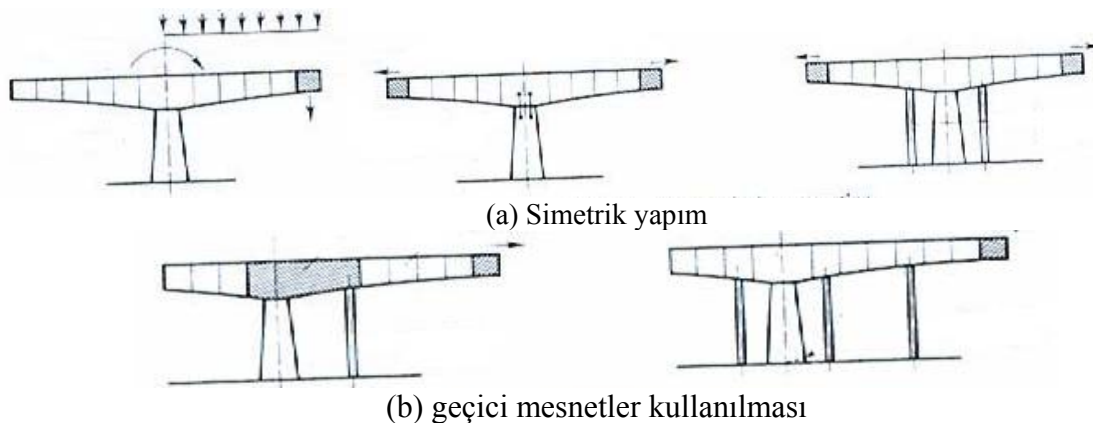
Keywords : Bridges, Creep, Shrinkage, Structural analysis

1. GİRİŞ

Genelde karşılaşılan problem, uzun süreli etkilerin sebep olduğu iç kuvvetlerin dağılımının belirlenmesidir. Uzun süreli etkiler, betonun sünme ve büzülmesi ile öngerilmeli çeliğin gevşemesinden kaynaklanan deformasyon ve gerilmelerdeki zamana bağlı değişimler olarak belirlenebilirler. Bu etkiler, deformasyonların hesabında ve iç kuvvetlerin dağılımında dikkate alınmalıdır. Uzun süreli etkiler prensip olarak hiperstatik sistemlerde ortaya çıkarlar. Konsol metodu ile inşa edilen köprülerde yapım sırasında denge değişimleri oluşmaktadır. Dengelenmiş konsol yapım yönteminde, anolar köprü ayağının her iki tarafındaki parçaların yanına yerleştirilmektedir. İyi bilinen bu ardışık yapım yönteminde köprüler konsol kiriş uzatım metoduyla inşa edilmektedir. Anolar birbiri ardına eklenerek köprünün bir ucundan köprü ayağına doğru konsol teşkil edilmekte ve bu işlem diğer açıklıklara da uygulanmaktadır [1-4]. Enkesitinde çubuk elemanlar bulunduran taşıyıcı sistemlerin uzun süreli davranışını ayrıntılı olarak inceleyen yayınlar mevcuttur. Ancak homojen olmayan enkesite sahip sistemler ile ilgili çalışmalar oldukça azdır. Anolu konsol köprüler, uzun süreli etkiler dikkate alındığında, açıklık ortalarında bulunan kuvvetler ile tüm köprünün inşa edildiği kabul edilerek aynı noktada elde edilen kuvvetler arasında bir ortalama alınarak, geleneksel olarak tasarlanırlar [2-4]. Bu çalışmanın amacı, enine ve boyuna gelişebilen yapıların uzun süreli davranışını adım adım analiz yöntemiyle genelleştirmektir. Bunun için üç ana hedef belirlenmiştir. Bunlardan ilki, tüm uzun süreli etkileri dikkate alan kesin artımsal adım adım zaman yaklaşım yöntemini ortaya koymaktır. İkinci hedef ise, geleneksel yöntemeye dayanan ve uzun süreli sünme ve rötre etkilerini içeren basitleştirilmiş bir yaklaşımı tanıtmaktır. Son olarak, iki yaklaşımın performansının karşılaştırılması ve bu tür yapıların uzun süreli davranışını önceden belirleyebilmek için ampirik bir yöntemin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

2. TAŞIYICI SİSTEM TEŞKİLİ

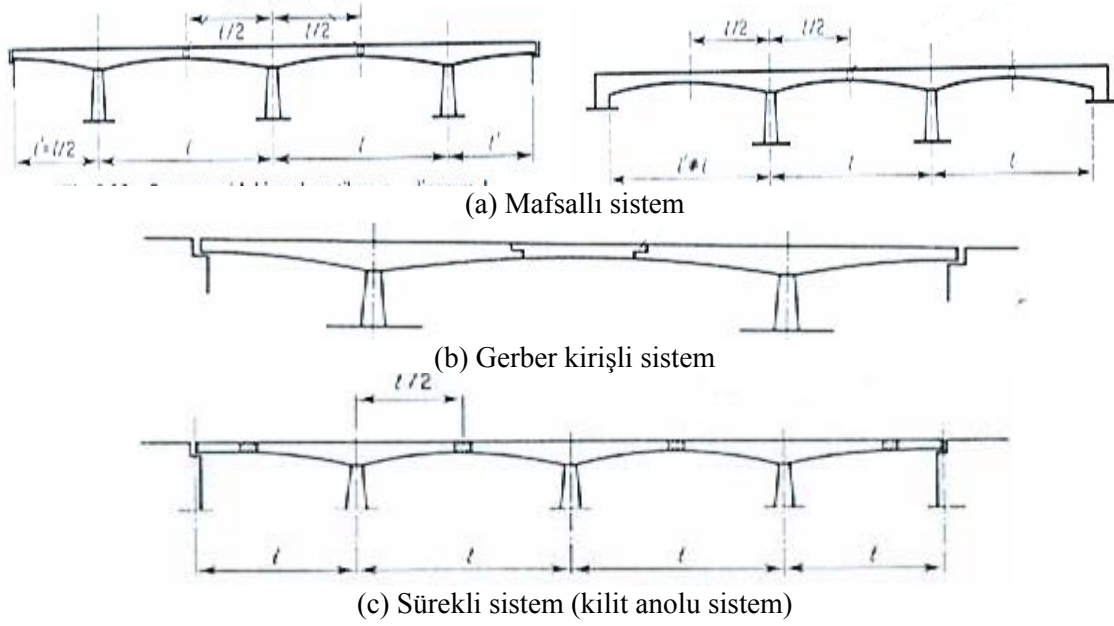
Prefabrike anolu konsol köprüler genel olarak tabliye ve ayaklardan oluşmaktadır. Yapım genellikle kenar ve orta ayaklardan başlamaktadır. Prefabrike anolar bir ayaktan başlayıp simetrik olarak birleştirilmekte, bu işleme açıklığa ve diğer ayağa doğru devam edilmektedir. Bazen de geçici mesnetler kullanılmaktadır (Şekil 1).



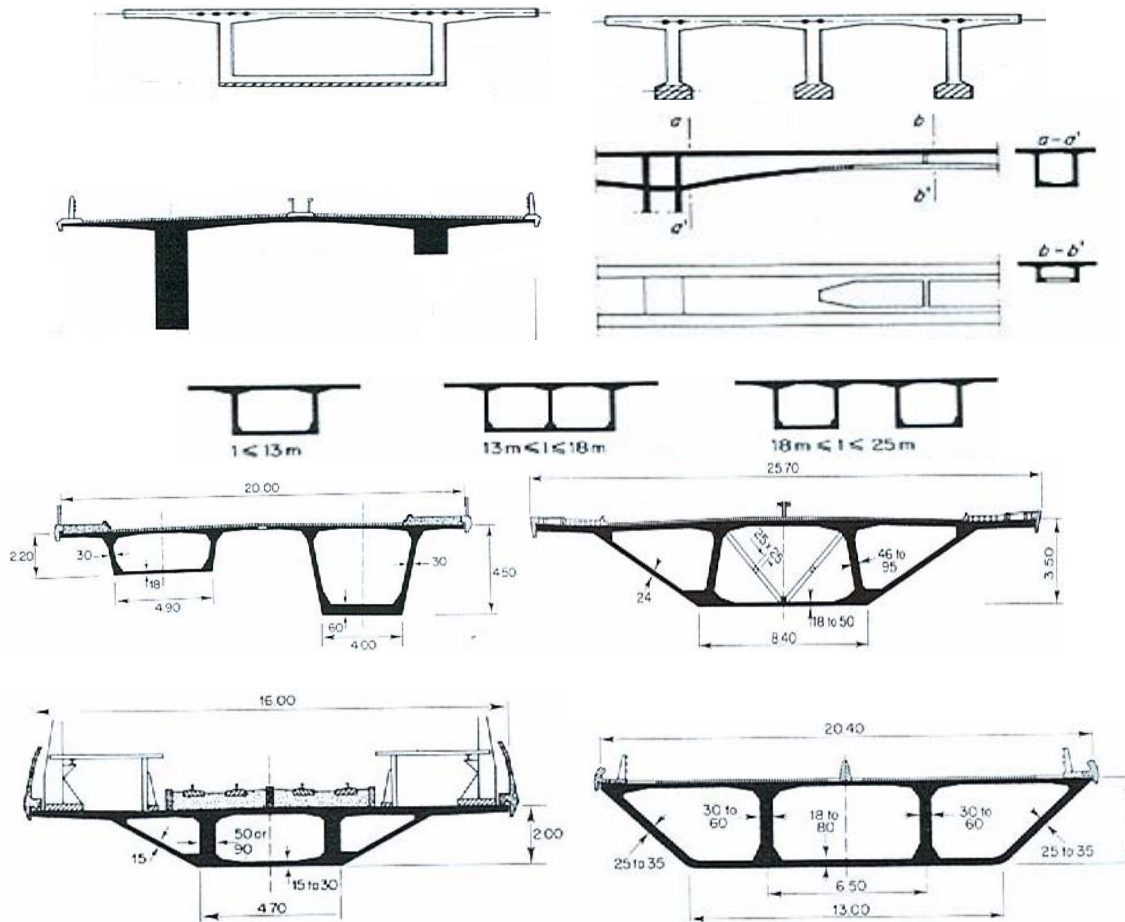
Şekil 1. Prefabrike anolu konsol köprülerin yapımı

Köprü açıklıklarının teşkili de önem kazanmaktadır. Bu amaçla mafsallı, askı kirişli (gerber kirişi) ve sürekli konsol köprüler uygulanmaktadır (Şekil 2). Köprü ve viyadüklerin tabliye enkesitleri kutu kesit, T kesit ve değişik kesitli yapılmaktadır (Şekil 3). Bu kesit türlerinin

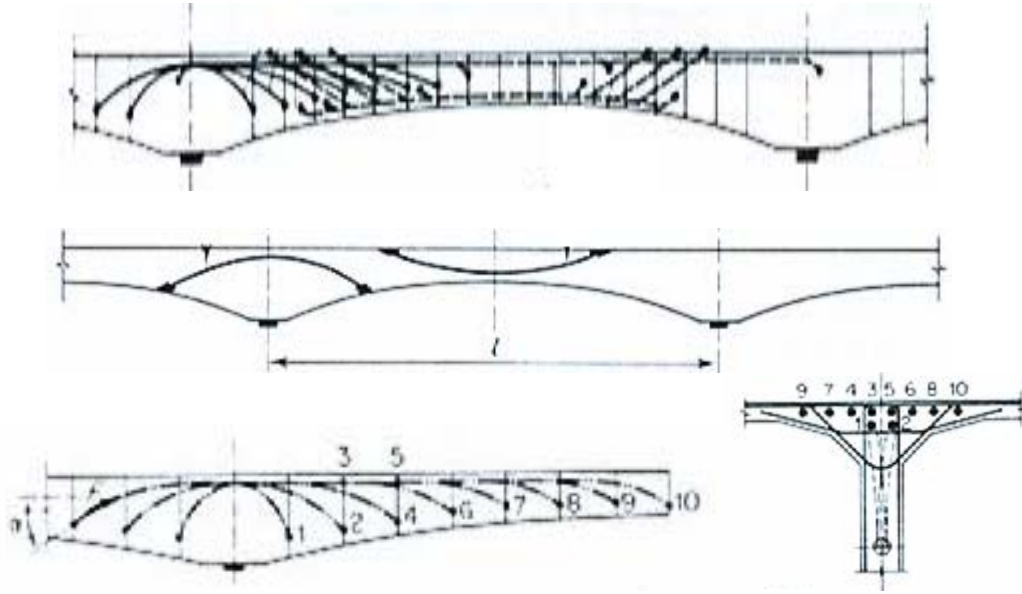
adedi ve şekilleri de değişiklikler gösterebilmektedir. Öngerme kablolarının düzenlenmesi ile ilgili detaylar Şekil 4’de verilmektedir.



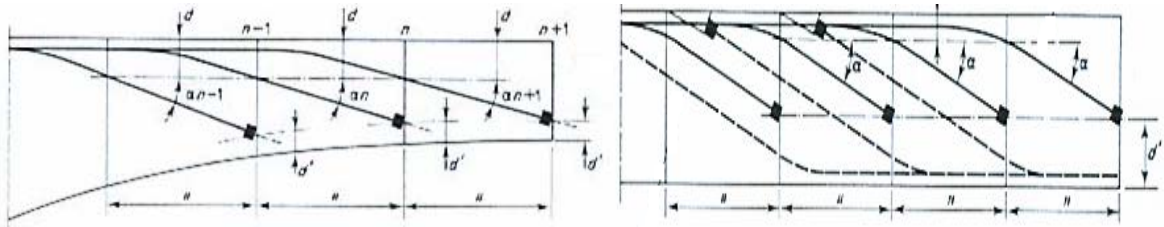
Şekil 2. Prefabrike anolu konsol köprülerde açıklıkların teşkili



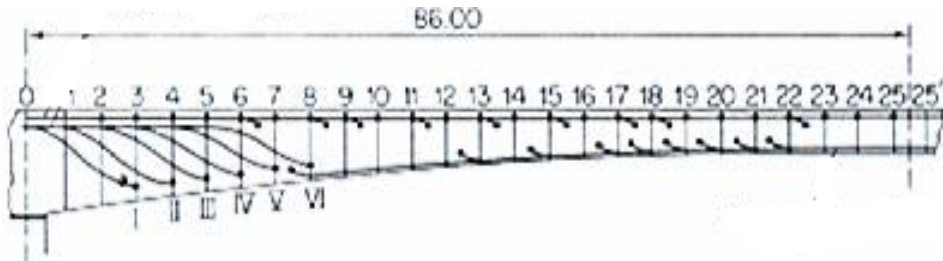
Şekil 3. Enkesit türleri ve uygulamaları



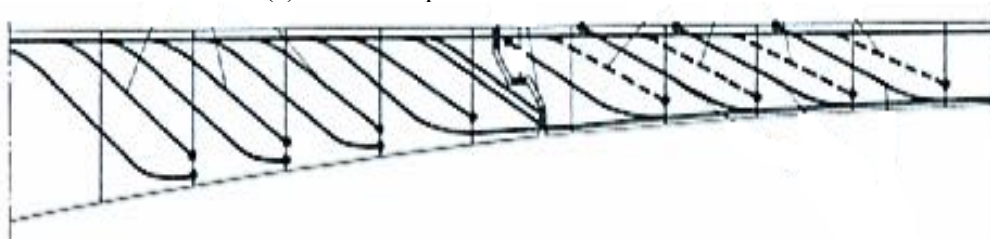
(a) Konsol kirişte öngerme kablosu düzenlenmesi



(b) Yüksekliği değişken ve sabit kirişte öngerme kablosu yörüngeleri



(c) Konsol köprüde kablo düzenlenmesi



(d) Mafsallı konsol köprüde kablo düzenlemesi

Şekil 4. Öngerme kablosu uygulama detayları

Konsol kiriş köprülerin seçimi, yapım aşamasındaki zorlukları en aza indirmektedir. Bu yapım tarzında, yeni kısımlar eski kısımlara taşınır. Büyük açıklıkların hızlı olarak geçilmesini sağlaması önemli avantajlarından. Birbirine birleştirilen parçaların prefabrike olarak imal edilmesi hem zaman hem maliyet tasarrufu sağlamaktadır.

3. TASARIM YÖNTEMİ

3.1. Sürekli Yüklerden Oluşan Deformasyonların Hesabı

Uzun süreli etkiler dikkate alınarak sürekli yüklerden oluşan deformasyonlar uygun bir şekilde kontrol edilmelidir [5-10]. Bu etkilerin yeterince dikkate alınmaması, özellikle yerinde dökme betonlu enkesite sahip prefabrike anolu köprülerde (çekirdek ve flanşları olan kutu kesitler) olduğu gibi beklenmeyen çekme gerilmelerinin çıkmasına yol açabilmektedir. Bu durumda, aşağıda belirtilen yüklerden oluşan gerilmelerin artması ile uzun süreli deformasyonlar meydana gelmektedir. Bu yükleme durumları; 1) Elemanın kendi ağırlığı, başlangıçtaki öngerme, yapım ve öngermeden sonraki aşamalar (bu yükler enkesit çekirdeğine uygulanır), 2) Dolaylı sabit yükler ve öngerme kuvveti kayıpları (çekirdek ve flanşlara etmektedir).

3.2. Taşıyıcı Sistemdeki Değişim Nedeniyle İç Kuvvetlerin Yeniden Dağılımı

Dengelenmiş konsol yapım oluşumu, taşıyıcı sistemdeki değişim ve uzun süreli deformasyonlar nedeniyle oluşan iç kuvvetlerin yeniden dağılımının tipik bir örneğidir. Sünme ve büzülme etkileyen parametrelerdeki büyük değişim, ölü yük artışı öngerme için ortalama bir sünme katsayısına dayanan hesaplamalar, orta açıklıkta sürekli olan serbest konsol köprüler için kabul edilebilir yaklaşım olmaktadır. Nihai tam yayılı gerilmenin tipik tahminleri aşağıdaki ortalamaya dayanmaktadır.

$$\sigma_{\infty} = \sigma_A + k(\sigma_E - \sigma_A) \quad (1)$$

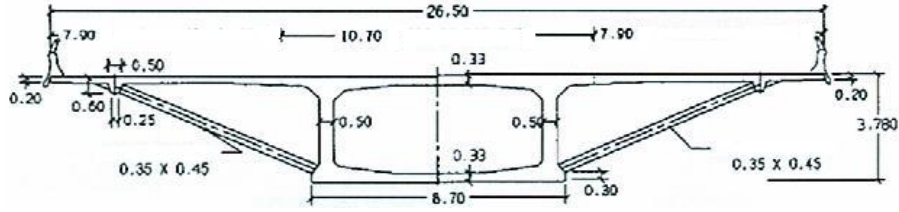
Burada, yeniden dağılım faktörü, prefabrike anolu köprülerde $0.4 \leq k \leq 0.6$, σ_A : açıklık ortasında gerçek gerilme değeri, σ_E : tüm yapının aynı anda yapılması kabulüyle elde edilen gerilmedir. Konsol kirişler arasındaki nihai yaş farkını dikkate almayan bu yaklaşımın, biri diğerinden sonra yapıldıysa her konsolun birleşim bölgesindeki momentler için aşırı sonuçlar verdiği görülmektedir. Ancak, iki konsol kiriş aynı anda ve hızla inşa edilirse, özellikle prefabrike yapılarda, bu yaklaşımın uygun olduğu kanıtlanmıştır [2].

3.3. Analizi Yapılan Köprülerin Tanımı

Tüm sayısal analizler, dört adet prefabrike anolu köprüye uygulanmıştır. Bu viyadüklerin adı, yapım yılı, İspanya’da bulundukları yer, toplam uzunluğu, derinliği, açıklıkların dağılımı gibi bilgiler aşağıda Çizelge 1’de sırasıyla verilmiştir. İncelenen köprülerin tabliyeleri Şekil 5’de gösterildiği gibi iki aşamada yapılmıştır. Çekirdek kısım prefabrike olup kutu kesitin flanşları yerinde dökme beton olarak yapılmıştır. Flanşlar iki adet prefabrike payanda ile desteklenmektedir. Bu köprüler dengeli konsol uzatım tekniği kullanılarak inşa edilmiştir [3].

Çizelge 1. İncelenen viyadüklerin özellikleri

- Espineiro (2000), Northwestern Motorway, Lugo, 405.0m, 3.70m (sabit), (52.0+4x75.0+52.0)m	
- Ferreiras (2000),	385.0m, 3.70m (sabit), (43.0+4x75.0+43.0)m
- Acebo (2001), Cantabrico Motorway, Ribadesella, 449.6m, 3.70m (sabit), (47.0+5x70.7+49.1)m	
- River Sella (2002),	530.0m, 4.70m, (56.0+106.0+74.0)m,
	3.78m, (+2x69.5)m
	3.70m, (+65.0+56.0+35.0)m

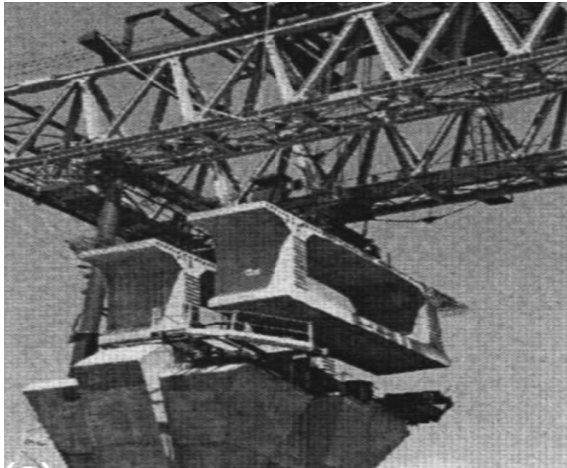


Şekil 5. River Sella viyadüğünün 106.0m lik orta açıklığında prefabrike eleman ile flanşlar

Boyuna ve enine yönde yapım yöntemi nedeniyle oluşan uzun süreli etkilerin analizi çok tabakalı model esasına dayandırılmaktadır. Bu yaklaşım, Navier Kuralı (enkesit düzeyinde analiz ve yapı seviyesinde global analiz) göz önüne alınarak geliştirilmiştir. Tüm öngerme kuvveti sadece enkesitin çekirdek kısmına uygulandığından, flanşlara ne kadarlık öngerme kuvveti geçtiğinin belirlenmesi önem kazanmaktadır. Başka önemli bir nokta da, basınç gerilmesinin geçişi nedeniyle çekirdekte beklenmeyen çekme gerilmesini önlemek için enkesit çekirdeğinden geçen donatı olmamasıdır.

3.4. Yapım Yöntemi

Şekil 6'da gösterilen yapım aşamaları aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir: 1) Köprü ayağının her iki tarafına simetrik olarak konsol yapılır. Birleşim bölgesinde epoksi katkılı harç kullanılmaktadır. 2) Açıklık ortasında kapanma sağlanır ve alttaki plağa öngerme uygulanır. Yapımın ilerleyen aşamalarında ilave bir öngerme kuvveti uygulanmamaktadır. 3) Tüm açıklıklar tamamlandığında mesnetlerden itibaren flanşların aynı anda dökümüne başlanır. Eksenden eksene mesafesi 4.0m olan prefabrike kirişler ile desteklenen flanşlar betonarme üstyapı olarak düşünülebilmektedir. Öngerme kuvveti çekirdekten aktarılmakta ve bu transfer işlemi sünme ve büzülme nedeniyle uzun süreli deformasyonlara sebep olmaktadır [3].

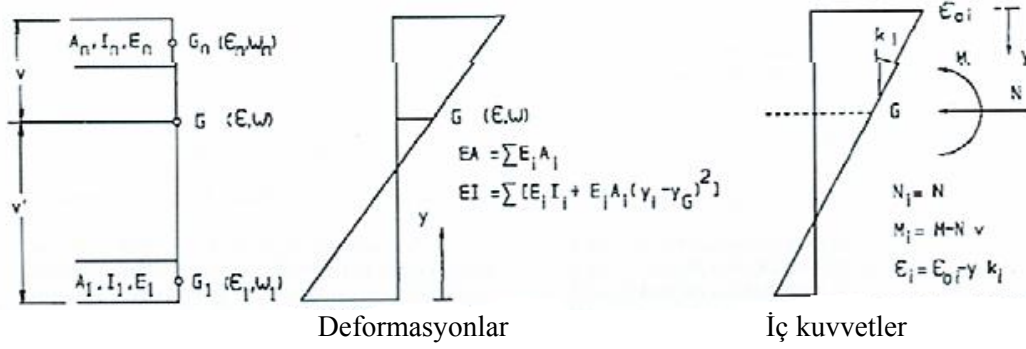


Şekil 6. River Sella viyadüğünün yapım yöntemi

3.5. Çatlamamış Kesitte Sünme ve Büzülmeden Oluşan Gerilme Dengesi Durumu

Yapının kompozit bir elemanın izole edilmiş enkesitindeki şekil değiştirme ve eğrilik ile ilgili zamana bağlı gerilmelerin analizi incelenmektedir. Enkesitin düşey eksene göre simetrik olduğu ve kesitin G ağırlık merkezinde etkiyen eksenel kuvvet ve eğilme momenti etkisinde olduğu kabul edilmektedir. Şekil 7'de görülen kesitte n tabaka sayısı, A_i , I_i , E_i i.ci

tabakanın sırasıyla alanı, G_i den geçen eksene göre atalet momenti, elastisite modulüdür. Başlangıç deformasyonları (ε_i , ω_i) genelde sünme, betonun büzülmesi, enkesitte sıcaklık değişimi veya statikçe belirsiz yapıda empoze edilmiş mesnet deplasmanları nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Eğer (ε_i , ω_i) deformasyonları G_i merkezinde i.ci tabakadaki başlangıç şekil değiştirme ve eğriliği ise, G_i merkezinden y uzaklıkta herhangi bir lifteki şekil değiştirme ve gerilme (2) ifadesi ile verilebilir.



Şekil 7. Kompozit enkesitte şekil değiştirme dağılımının analizi

$$\varepsilon = \varepsilon_i + \omega_i(y-y_i) + \sigma / E_i = \varepsilon + \omega(y-y_G) \quad (2)$$

$$\sigma = E_i \varepsilon + E_i \omega(y-y_G) - E_i \varepsilon_i - E_i \omega_i(y-y_i)$$

Burada, σ : G' 'den y mesafede bulunan lifteki denge gerilmesi, ε ve ω ise G merkezindeki şekil değiştirme ve eğriliğidir. Gerilmeyi enkesit alanı üzerinde integre ederek ve G' 'den geçen eksene göre momenti alarak denge koşulları aşağıdaki şekilde elde edilir. Görüldüğü gibi, ε normal deformasyonu ile ω eğriliği, yapının her enkesitinin G merkezinde artmaktadır.

$$N = \int \sigma dA = 0 \rightarrow \varepsilon = (\sum E_i A_i \varepsilon_i) / (EA) \quad , \quad M = \int \sigma y dA = 0 \rightarrow \omega = [(\sum E_i A_i \varepsilon_i (y_i - y_G) + \sum E_i I_i \omega_i)] / (EI) \quad (3)$$

3.6. Normal Kuvvet ve Eğilme Momenti Etkisindeki Çatlamamış Kesitte Oluşan Gerilme Dağılımı

Kısa süreli şekil değiştirme dağılımı Şekil 7'de gösterilmiştir. Kesitin üst yüzünden y mesafede bulunan kesitin bir noktasındaki normal şekil değiştirme, en üst lifin normal şekil değiştirmesi ε_{oi} ve başlangıç eğriliği k_i ile tanımlanabilmektedir. Üst lifte bulunan başlangıç normal kuvvet N_i ve eğilme momenti M_i , sırasıyla gerilme bloğunu integre ederek ve üstteki life göre momentleri alarak elde edilmektedir:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{oi} - y k_i \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \sum E_i A_i & -\sum E_i B_{oi} \\ -\sum E_i B_{oi} & \sum E_i I_{oi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{oi} \\ k_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_i \\ M_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

Burada, A_i , B_{oi} , I_{oi} , E_i sırasıyla, i. ci tabakanın alanı, mukavemet momenti, atalet momenti, elastisite modülünü göstermektedir. Bu denklemlerin ε_{oi} ve k_i ye göre çözümünden herhangi bir lifteki normal deformasyon ve eğrilik elde edilir. N_i ve M_i değerleri, yapının her adımında uygulanan öngerme kuvveti ve yükler ile artmaktadır.

4. ADIM ADIM ANALİZ YÖNTEMİ

Zamana bağlı bütün etkilerin hesaba katılması amacıyla genel bir adım adım analiz yöntemi geliştirilmiştir [3]. Kompozit bir kesitteki denge gerilmelerinin analizine ait yöntemin uygulaması incelenmiş ve bilgisayar yazılımı geliştirilmiştir. n tabakalı genel bir kompozit kesitteki gerilme ve şekil değiştirme artımlarına ait formülasyon aşağıdaki şekilde özetlenebilmektedir:

1. Verilerin okunması ve yazılması: (- Enkesit geometrisi; tabaka sayısı, görölme zamanı, her bir tabakanın geometrik konumu, - Tabaka geometrisi, - Malzeme parametreleri, - Yapım aşamaları ve her aşamada uygulanan yükler)
2. t_0 anında adım adım analizin başlaması: (- Enkesit özelliklerinin hesabı, - Yapının global rijitlik matrisi K'nın oluşturulması)
3. t_0 anında kısa süreli kuvvetlerin hesabı: (- $P(t_0)=K(t_0).d(t_0)$ ifadesinin $d(t_0)$ için çözülmesi, - Kısa süreli $N_i(t_0)$ ve $M_i(t_0)$ kuvvetlerinin hesaplanması)
4. Tabakalardaki elastik deformasyon ve gerilme: (- G_i deki elastik deformasyonun ve kısa süreli elastik gerilmenin hesabı)
5. t_0 anında dönüştürülen enkesitteki elastik deformasyonların hesabı
6. $\Delta t=t_1-t_0$ zaman aralığında sünme ve büzülme deformasyonlarının bulunması
7. t_1 anında dönüştürülmüş enkesit, $\Delta t=t_1-t_0$ zaman aralığı ile tanımlanan gerçek analiz adımı
8. t_1 anında gerilme durumunu dengeleyen sünme ve büzülme hesabı, yapının global rijitlik matrisinin oluşturulması
9. t_1 anında $P(t_1)=K(t_1).d(t_1)$ ifadesinin $P(t_1)$ için çözülmesi, statikçe belirsiz deformasyon ve gerilme analizi yapılması
10. $\Delta t=t_1-t_0$ zaman aralığının sonunda toplam deformasyonun bulunması, gerilme gevşemesi nedeniyle oluşan gerilme kaybı hesabı, bu aralık sonunda toplam gerilmenin bulunması
11. Geriye dönüp ikinci adım için benzer işlemlerin yapılması
12. Yüklemenin bir adımında tabakalardaki gerilme ve deformasyonlar ile yapıdaki deplasman ve kuvvetlerin bulunması
13. Adım adım analiz yönteminin sonu

5. BASİTLEŞTİRİLMİŞ ANALİZ YÖNTEMİ

Adım adım analiz yönteminde kullanılan verilerin hazırlanmasındaki yüksek maliyet nedeniyle, uzun süreli analizde gerekli öngerme kuvvetinin çabuk belirlenmesi için çok uygun olan basitleştirilmiş metod geliştirilmiştir. Aşağıda ayrıntıları verilen bu analiz yöntemi, daha önce tanımlanan dört adet köprünün uzun süreli davranışını belirlemek için kullanılmıştır. Doğru tahminlerde bulunabilmek için bu yöntem sık sık gerekli olmaktadır. Malzeme özelliklerinin tayinindeki belirsizlikler fazla ise tahminlerdeki değişkenlik de o derece fazla olacaktır. Bu yöntem aşağıda belirtilen çalışmalar için kullanılabilmektedir.

5.1. Yapısal Değişim Nedeniyle Oluşan İç Kuvvetlerin Dağılımı

Bu etkinin değişimini incelemek için yeniden dağılım faktörü k'nın farklı üç değeri dikkate alınmıştır. Birinci durumda $k=0.60$, $\alpha=0.40$, $\beta=0.60$; ikinci durumda $k=0.50$, $\alpha=0.50$, $\beta=0.50$ ve üçüncü durumda $k=0.40$, $\alpha=0.60$, $\beta=0.40$ alınmıştır. Görelî olarak k'nın düşük değerleri, yük geçmişinde prefabrike beton anoların yaşlı olduğunu gösterebilmektedir.

$$\sigma_{\infty} = \sigma_A + k(\sigma_E - \sigma_A) = \alpha \sum \sigma_A + \beta \sum \sigma_E \quad (6)$$

5.2. Betonun Sünme ve Büzülmesi ile Donatının Gevşemesinden Oluşan Uzun Süreli Öngerme Kaybı

Bu tür problemlerde tasarımcının sınır değerler belirlemesi tavsiye edilmektedir. Bu etkileri hesaba katmak amacıyla, yükleme anında prefabrike anoların yaşını dikate alan beklenen kayıp değerleri düşük %7, orta %12 ve yüksek %15 olarak alınmıştır.

5.3. Enkesit Değişimi Nedeniyle Oluşan İç Kuvvetlerin Yeniden Dağılımı

Statikçe belirli sünme ve büzülme gerilmesi : Sonlu eleman modeli esas alınarak t_0 anında iç kuvvet dağılımı $P(t_0)=K(t_0).d(t_0)$ dan aşağıdaki yükleme grupları için belirlenir. –Prefabrike anoların kendi ağırlığı (S_w), -Çekirdeğe uygulanan toplam öngerme kuvveti (P_f), -Flanşların kendi ağırlığı (S_{wf}). t_0 anındaki gerçek iç kuvvet $N_i(t_0)$ ve $M_i(t_0)$ dağılımı tüm yapım aşamaları bittiğinde belirlenebilir. t_0 anında herhangi bir i tabakasındaki $\varepsilon_{ei}(t_{0i})$ ve $\omega_{ei}(t_{0i})$ elastik deformasyonları (4) ve (5) ile, nihai sünme ve büzülme deformasyonları da ($t_0, t_1=\infty$) zaman aralığı ile hesaplanabilir. $t_{1i}=\infty$ anındaki gerilme ve gevşeme faktörü (7) ve (8) ile bulunur.

$$\sigma_i(\infty, y_i) = \varepsilon_i(t_{mi})R(t_{mi}, \infty) = [\sigma_i(t_{mi}, y_i)/E_i(t_{mi})]R(t_{mi}, \infty) = \sigma_i(t_{mi}, y_i)K_{1i}(t_{mi}, \infty) \quad (7)$$

$$K_{1i}(t_{mi}, \infty) = R(t_{mi}, \infty) / E_i(t_{mi}) = R(t_{mi}, \infty) / R(t_{mi}, t_{mi}) \quad (8)$$

Statikçe belirsiz sünme ve büzülme gerilmesi : Statikçe belirsiz $N_{si}(t_m)$ ve $M_{si}(t_m)$ iç kuvvet dağılımı, t_m anında sisteme etkileyen özdeğer durumundaki deformasyonlardan oluşmaktadır. Bu kuvvetler $P(t_m)=K(t_m).d(t_m)$ den sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmaktadır. Bu durumdaki gevşeme faktörü (9) ile verilmektedir.

$$K_2(t_m, \infty) = [\sum K_{1i}(t_m, \infty)] / n \quad (\text{toplam } i=1, \dots, n) \quad (9)$$

5.4. Malzeme Parametreleri ve Kabul Edilen Yüklemedeki Zaman

Tüm malzeme parametreleri CEB–FIP (MC-90) daki esaslara uygun olup ifadeler de zamandan bağımsızdır. Herhangi bir beton tabakada $t_1 > t_0$ anındaki toplam şekil değiştirme (10) ile verilmektedir. Burada; $\sigma_{ei}(t_{0i})$ başlangıçtaki sabit gerilme, $E_i(t_{0i})$ t_{0i} günlük elastisite modülü, $\phi_i(t_{0i}, t_{1i})$ ise i . ci tabakadaki sünme katsayısıdır. MC-90’a uygun olan yükleme malzeme özellikleri ve yüklemedeki yaşları Çizelge 2’de verilmektedir.

$$\Delta \varepsilon_{ci}(t_{1i}) = [\sigma_{ei}(t_{0i})/E_i(t_{0i})] \cdot [1 + \phi_i(t_{0i}, t_{1i})] \quad (10)$$

Çizelge 2. Basitleştirilmiş analizde kullanılan giriş bilgileri

Sünme ve büzülme	Prefabrike çekirdek ano (i=1) ($t_{01}=300, t_{11}=10000$ gün)	Yerinde dökme flanşlar (i=2) ($t_{02}=3, t_{12}=10000$ gün)
f_{cki} (MPa)	42.5	42.5
h_{0i} (mm)	775	239
RH_i (%)	70	70
t_{si} (gün)	3	3
$\Delta \varepsilon_{shi}(t_{0i}, t_{1i})$	-16.4×10^{-5}	-20.7×10^{-5}
$\phi_i(t_{0i}, t_{1i})$	1.015	1.980
$K_{1i}(t_{mi}, t_{1i})$	0.541	0.491
$K_2(t_{mi}, t_{1i})$	0.516	

$E_i(t_{mi})$

40933

40766

Analizde kullanılan yüklemeler ve bunlara ait zamanlar aşağıdaki şekilde belirtilebilir:

- Ano dökümü ile yükleme arasında 90 gün geçmektedir. Çekirdeğin yaşı 300 gündür.
- Ano ile flanşların dökümü arasında 300 gün geçmektedir. Büzülme, flanş betonunun kürü tamamlandığında, 3 günde başlamaktadır.
- Flanşların yaşı 3 gündür ve beton kürü 3 günde tamamlanır.

K gevşeme faktörleri Çizelge 3’de verilmektedir. Burada, gerilmelerin gevşemesinin $t_m=1000$ den $t_1=\infty=10000$ güne kadar devam ettiği düşünülmüştür.

Çizelge 3. Basitleştirilmiş analizde kullanılan gevşeme faktörleri

Gevşeme faktörleri	Prefabrike çekirdek ano (i=1) ($t_{m1}=1000$, $t_{11}=10000$ gün)	Yerinde dökme flanşlar (i=2) ($t_{m2}=667$, $t_{12}=10000$ gün)
f_{cki} (MPa)	42.5	42.5
h_{0i} (mm)	775	239
RH_i (%)	70	70
$K_{1i}(t_{mi}, t_{1i})$	0.541	0.491
$K_{2i}(t_{mi}, t_{1i})$	0.516	
$E_i(t_{mi})$	40933	40766

5.5. Sonuçların Doğruluğunun İncelenmesi

Çizelge 4 ve Çizelge 5’deki sonuçlar incelendiğinde, kesin ve basitleştirilmiş analiz yöntemlerinin birbiriyle uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Tabaka sayısı ve yapım safhaları çok olan durumları göz önüne almak teorik olarak mümkün olmakla birlikte, veri oluşturulması pahalı ve zahmetli olmaktadır.

Diğer üç viyadük için de benzer sonuçlar elde edilmektedir. Basitleştirilmiş analizde 12 yükleme durumu incelenmektedir. S1 ve S2 gibi iki farklı enkesit söz konusudur. S1’de sadece prefabrike çekirdek olup, S2’de prefabrike çekirdekle birlikte yerinde dökme flanşlar bulunmaktadır.

Her yükleme durumu için her tabakanın alt ve üst liflerindeki gerilmeler elde edilmektedir. İlk üç yükleme $t_0=0$ durumuna (kısa süreli analize, Çizelge 4), diğer dokuz yükleme ise $t_1=\infty$ yani uzun süreli analize (Çizelge 5) aittir. Uzun süreli analize ait basitleştirilmiş yöntemde gerilme dağılımını belirlemek için aşağıdaki üç önemli husus dikkate alınmıştır; 1-Yapı sistemindeki değişimden oluşan iç kuvvet dağılımı, 2-Betondaki sünme ve büzülme ile çeliğin gevşemesinden oluşan uzun süreli öngerme kayıpları, 3-Enkesit değişiminden kaynaklanan kesit kuvvetlerinin dağılımı.

- No 1: Kısa süreli yük durumu (Çizelge 4). Etkiyen kuvvetler S_w ve P_f , S1 kesiti ele alınmıştır, flanşlarda gerilme yoktur.
- No 2: Kısa süreli yük durumu (Çizelge 4). Etkiyen kuvvetler S_w , S_{wf} ve P_f , S1 kesiti ele alınmıştır, flanşlarda gerilme yoktur.
- No 3: Kısa süreli yük durumu (Çizelge 4). Etkiyen kuvvetler S_w , S_{wf} , ölü yükler ve P_f , S2 kesiti ele alınmıştır. Bu yük durumunda kesin yöntem ile karşılaştırma yapılmıştır. Gerilme yayılışında farklar oluşmuştur.
- No 1-No 9: uzun süreli yük durumu (Çizelge 5). Enkesit alanı A ve E faktörlerinin üç kombinasyonu ve gerilme kaybının üç seviyesi için inceleme yapılmıştır.

Çizelge 4. Adım adım analiz ile basitleştirilmiş analizin t_0 anı için karşılaştırılması (106 m)

Yükleme	Kesit	Açıklık ortasında gerilme (MPa)				Köprü ayağında gerilme (MPa)			
		$\sigma_{f\bar{u}}$	$\sigma_{f\bar{a}}$	$\sigma_{\bar{c}\bar{u}}$	$\sigma_{\bar{c}\bar{a}}$	$\sigma_{f\bar{u}}$	$\sigma_{f\bar{a}}$	$\sigma_{\bar{c}\bar{u}}$	$\sigma_{\bar{c}\bar{a}}$
<i>(a) Basitleştirilmiş kısa süreli analiz</i>									
No 1	S1	-	-	3.1	22.6	-	-	15.3	3.0
No 2	S1	-	-	7.4	17.7	-	-	10.7	7.0
No 3	S1,S2	2.1	1.8	9.5	13.8	-3.1	-2.8	7.7	10.1
<i>(b) Adım adım kesin kısa süreli analiz</i>									
No 3	S1,S2	3.2	1.9	9.0	13.7	-4.2	-3.2	9.4	9.6

Not : Gerilme indislerinde f: flanş, ç: çekirdek, ü: üst lif, a: alt lif olarak kullanılmıştır.

Çizelge 5. Adım adım analiz ile basitleştirilmiş analizin $t_1=\infty$ için karşılaştırılması (106 m)

Yükleme	Kesit	Açıklık ortasında gerilme (MPa)				Köprü ayağında gerilme (MPa)				S_w
		$\sigma_{f\bar{u}}$	$\sigma_{f\bar{a}}$	$\sigma_{\bar{c}\bar{u}}$	$\sigma_{\bar{c}\bar{a}}$	$\sigma_{f\bar{u}}$	$\sigma_{f\bar{a}}$	$\sigma_{\bar{c}\bar{u}}$	$\sigma_{\bar{c}\bar{a}}$	
No 1 (%7)	S1,S2	4.2	4.2	8.3	11.3	-1.2	-0.9	6.3	9.6	0.6A+
No 2 (%12)	S1,S2	4.3	4.2	8.4	9.9	-2.3	-1.9	5.2	10.0	0.4E
No 3 (%15)	S1,S2	4.4	4.2	8.5	9.0	-3.0	-2.6	4.5	10.2	
No 4 (%7)	S1,S2	4.2	4.2	8.3	11.3	-1.2	-0.9	6.5	9.4	0.5A+
No 5 (%12)	S1,S2	4.3	4.2	8.4	9.9	-2.3	-1.9	5.4	9.8	0.5E
No 6 (%15)	S1,S2	4.4	4.2	8.5	9.0	-3.0	-2.6	4.7	10.0	
No 7 (%7)	S1,S2	4.2	4.2	8.2	11.4	-1.2	-0.9	6.7	9.3	0.5A+
No 8 (%12)	S1,S2	4.3	4.2	8.4	10.0	-2.3	-1.9	5.6	9.6	0.5E
No 9 (%15)	S1,S2	4.4	4.2	8.4	9.1	-3.0	-2.6	4.9	9.8	
Adım adım kesin an. $t_1=\infty$		3.5	3.9	8.9	11.8	-2.8	-2.3	8.0	9.8	

Not : Gerilme indislerinde f: flanş, ç: çekirdek, ü: üst lif, a: alt lif olarak kullanılmıştır.

Tüm yüklemelerde S_w , S_{wf} , P_f ölü yük, P_{fk} (öngerme kaybı), sünme, büzülme vardır.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada dört adet prefabrike anolu konsol köprü incelenmiştir. Prefabrike anolar yerine nakledilip uygun vinçler kullanılarak monte edilmektedir. Köprü kesitinin geometrik değişimi ve gerilmelerin yeniden dağılımı dikkate alınarak betonun uzun süreli deformasyonlarının etkisi ortaya konulmuştur.

- Çalışmada iki önemli problem ile karşılaşmıştır:

* Problem 1: Gerilme dağılımının doğru bir şekilde belirlenmesi: Bu husus, çekme gerilmesine müsaade edilmeyen ve flanşlara öngerme uygulanmayan prefabrike anolu köprüler için özellikle önemlidir.

* Problem 2: Yapının nihai durumunu görmek için gerçek sehimler belirlenmesi: Bu husus, yapının başlangıcında rijit cisim durumu olan ve anoların yerleşimi sırasında değişiklik yapılması genelde mümkün olmayan prefabrike anolu köprüler için özellikle önem kazanmaktadır.

- Uzun süreli etkilerin çok kompleks bir olay olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumda oluşan problemleri giderebilmek amacıyla basitleştirilmiş yöntem veya adım adım analiz yöntemleri kullanılabilir.

- Gerilmelerin yeniden dağılımını etkileyen tüm parametrelerin analizi için bir bilgisayar programı kullanılmıştır. Analizde her anonun yaşı, anolar arasındaki birleşim malzemeleri, beton kürleri, öngerme tendonlarındaki harcın zamanı ve diğer işlemler dikkate alınmıştır.
- Her iki analiz yöntemi ile elde edilen gerilme durumunun karşılaştırmasından, tipik yayılı gerilmenin tüm kesitlere uygulanabildiği görülmektedir. Adım adım analiz yöntemi, yaklaşık yöntemden küçük sapmaların olduğunu göstermektedir.
- Taşıyıcı sistemin türüne bağlı olarak dağılım faktörü k ve öngerme kayıpları için farklı değerler önerilmesine rağmen, bunun sonuçlara etkisinin az olduğu bilinmektedir. k değerinin, prefabrike anolu köprülerde alınan $k=0.5$ değerinden çok farklı olmadığı durumlarda gerilme dağılımının fazla değişmediği anlaşılmaktadır.
- Adım adım analiz yönteminin uygulamaları, öngerme tabakalarının boyut ve konumunu belirlemek için kullanılan önceki analizleri işaret etmektedir. Sonuç olarak, bir yapının doğru bir tasarımı için aşağıdaki iki adımın uygulanması gerekmektedir; a) Tüm boyutlandırmalar yapılmalı ve öngermenin konumu ve değeri belirlenmelidir. Basitleştirilmiş analiz ile gerilme yayılımı belirlenir (Problem 1). b) Basitleştirilmiş analiz ile bulunan sonuçları doğrulamak (Problem 1), yapının uzun süreli sehimlerini ve prefabrike anolar arasındaki sehimleri belirlemek (Problem 2) amacıyla adım adım analiz yöntemi uygulanır

KAYNAKÇA

- [1] K. Özden, İ. Eren, A. L. Trupia, T. Öztürk, 1998, “Öngerilmeli Beton”, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, Sayı 1603, İstanbul.
- [2] J. Mathivat, 1984, “The Cantilever Construction of Prestressed Concrete Bridges”, John Wiley & Sons, New York, USA.
- [3] C. Iglesias, 2006, “Long-Term Behavior of Precast Segmental Cantilever Bridges”, Journal of Bridge Engineering, ASCE, May-June, 2006.
- [4] H. K. Ryu, Y. J. Kim, S. P. Chang, 2007, “Crack Control of a Continuous Composite Two-Girder Bridge with Prefabricated Slabs under Static and Fatigue Loads”, Elsevier, Engineering Structures, 29, 851-864.
- [5] TS 3233, 1979, “Öngerilmeli Beton Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları”, TSE, Ankara.
- [6] AASHTO, 1989, “Standart Specifications for Highway Bridges”, Washington, USA.
- [7] ACI 318 RM-83, 1983, “Commentary on Building Code Requirements for Reinforced Concrete”, American Concrete Insitute, Detroit, Mich., USA.
- [8] H. N. Arthur, 1987, “Design of Prestressed Concrete”, John Wiley & Sons. Inc., New York, USA.
- [9] A. S. G. Bruggeling, G. F. Huyghe, 1991, “Prefabrication with Concrete. A.A.”, Balkema, Rotterdam, Netherland.
- [10] H. G. Kwak, Y. J. Seo, 2000, “Long-Term Behavior of Composite Girder Bridges”, Pergamon, Computers & Structures, 74, 583-599.
- [11] A. Williams, 1998, “Seismic Design of Building and Bridges”, Engineering Press, Austin, Texas, USA.
- [12] D. J. Dowrick, 1987, “Earthquake Resistant Design”, John Wiley & Sons, New York.