



Makale / Research Paper

**Dilimsel Dengeli Konsol Yöntemi ile Tasarlanan Bir Köprünün Yapım Aşamaları Dikkate Alınarak Yapısal Davranışının İncelenmesi**

Özlem ÇAVDAR<sup>a\*</sup>, Muhammed Abdullah ŞENER<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane/TÜRKİYE

<sup>b</sup>Özde Yapı İnşaat Şantiyesi Akçaabat / Trabzon /TÜRKİYE

\*ozlem\_cavdar@hotmail.com

Received/Geliş: 03.07.2021

Accepted/Kabul: 29.11.2021

**Öz:** Dilimli dengeli konsol, köprü üstyapısının boyuna doğrultusunda dilimlere bölünerek inşa edilmesine dayanan bir yöntemdir. Köprü modeli açıklık ortasında kapatma dilimi döküldükten sonra sürekli hale gelir. Dolayısıyla dilimli yapım metoduyla yapılan viyadüğün tasarımında iki ayrı aşama dikkate alınması gerekir. Bu çalışmanın amacı, dilimli dengeli konsol yöntemine göre tasarlanmış bir köprünün, tasarımında yapım aşamalarının dikkate alınmasının köprünün sürekli sistem olarak tasarımı ile ortaya çıkan kesit tesirleri ile mukayesesini yapmaktır. Bu amaca yönelik olarak; 2 ayaklı 3 açıklıklı toplam 345 m uzunluğunda bir dengeli konsol köprü tasarlanmıştır. Örnek köprü modeli, Trabzon ili Ortahisar ilçesinde yer alan ve prekast kirişli köprü yöntemine göre yapımı halen devam etmekte olan Karşıyaka Viyadüğü'nün aplikasyonuna göre tasarlanmıştır. Yapım aşaması dikkate alınarak yapılan çözüm metodunda elde edilen sonuçlar %14 daha yüksek eğilme momenti ortaya çıkarmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Dengeli konsol köprü, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Yapım aşaması analizi, Zamana bağlı malzeme özellikleri.

**Investigation of Structural Behavior of a Bridge Designed by the Segmentally Constructed Balanced Cantilever Method**

**Abstract:** Segmentally constructed balanced cantilever bridge is a construction method slicing the superstructure vertically. The bridge model becomes continuously system after pouring the closing slice in the middle of the span. As a result, two different stages should be taken into account in the design of the viaduct in the segmentally construction method. The purpose of this study is to compare the internal forces that occur with the design of the bridge as a continuous system, considering the construction stages of a bridge designed according to the segmentally constructed cantilever method. For this purpose, a balanced cantilever bridge with a total length of 345 m with 2 piers and 3 spans was designed and the analyzes were carried out on this bridge. The sample bridge model was designed according to the application of Karşıyaka Viaduct in Trabzon, Ortahisar district, which is still under construction according to the precast beam bridge method. The results obtained in this method made taking into account the construction stage revealed a 14% higher bending moment.

**Keywords:** Balanced cantilever bridge, Finite element analysis, Construction stage analysis, Time dependent material properties.

*Bu makaleye atıf yapmak için*

Çavdar, Ö., Şener, MA., "Dilimsel Dengeli Konsol Yöntemi ile Tasarlanan Bir Köprünün Yapım Aşamaları Dikkate Alınarak Yapısal Davranışının İncelenmesi" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2022, 9 (2); 469-491.

*How to cite this article*

Çavdar, Ö., Şener, MA., 'Investigation of Structural Behavior of a Bridge Designed by the Segmentally Constructed Balanced Cantilever Method' El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2022, 9 (2); 469-491.

ORCID ID: <sup>a</sup>0000-0002-5459-0769; <sup>b</sup>0000-0002-5085-7980

## 1. Giriş

Köprü mühendisliğinin özel uygulamalarından olan dengeli konsol yöntemi çok büyük açıklıkların geçilmesinde yaygın olarak kullanılan bir yapım tekniğidir. Çok fazla köprü ayak yapımının köprünün inşa edildiği çevreden ve bununla beraber jeolojik özelliklerinden kaynaklanan nedenlerden dolayı mümkün olamadığı ve tabliye açıklıklarının 100 m'den daha yüksek olması durumunda dengeli konsol yapım tekniği rakipsiz kalmaktadır. Bu çalışmada dikkate alınan, dilimli dengeli konsol yöntemi köprü üstyapısının boyuna doğrultusunda dilimlere bölünmesine dayanan bir yöntem çeşididir. Köprü ayaklarından açıklık ortasına gidildikçe dilim enkesitleri değişken yükseltilere sahip olduğundan köprü üstyapısı boyuna yönde parabolik bir tasarım oluşturmaktadır. Bu da köprü estetiği açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Ardgermeli beton malzemesinden oluşan kutu kesitli dilimlere sahip köprü üstyapısı yapımı diğer yöntemlere göre daha yavaş ilerleyen bir yapım tekniğidir. Beton malzemesinin zamana bağlı oluşan büzülme ve sünme etkileri ve yüksek mukavemetli öngerme çeliğinin gevşemesi farklı zamanlarda inşa edilen yerinde dökme dilimlerin tasarımında dikkate alınması gereken hususlardır. Dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen köprü yapım aşamasında ve daha sonra sürekli sistem oluşturma aşamasında farklı etkilere maruz kalmaktadır. Köprü inşa edilirken konsol gibi çalışmasına rağmen, tamamlandıktan sonra giriş sistemine dönüşmektedir. Bu yüzden köprü tasarımı bu iki farklı aşamada meydana gelen kesit tesirleri dikkate alınarak yapılması gerekmektedir.

## 2. Literatür Özeti

Köprülerin dinamik karakteristiklerinin ve dinamik etkiler altındaki davranışlarının analitik olarak belirlenmesi konusunda geçmişten günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından çeşitli çalışmalar yapılmıştır. İlk dönemlerde yapılan çalışmalarda köprülerinin statik ve dinamik etkiler altındaki lineer davranışları çeşitli modelleme teknikleri kullanılarak incelenmiştir.

Dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen karayolu köprülerinin sonlu eleman analizlerinde zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınması konusunda çalışmışlardır. Çalışma kapsamında, dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen karayolu köprülerinin yapım aşamasında tahmin edilenden daha büyük yerdeğiştirmelerin meydana gelebileceği belirtilmiştir [1]. Çok açıklıklı bir karayolu köprüsünün dinamik karakteristiklerini ve sismik davranışını belirlemek amacıyla deneysel ortamında köprünün 1:50 ölçekli modelini oluşturmuşlardır. Model köprü, 4 m uzunluğunda ve dört açıklıklı olup, ayakları farklı yükseklikte zemine oturmaktadır. Köprü ayaklarının düşey ve yatay yüklemeler altında göstereceği davranışı belirlemek amacıyla dört farklı kesit tipi dikkate almışlardır [2]. Literatürde köprülerin yapım aşaması analizi ile ilgili bazı makaleler bulunmaktadır [3-7]. Bu çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde mevcut olan köprüler üzerinde yapım aşamaları konusu incelenmiştir [3, 10-14]. Dilimli dengeli konsol yöntemi ile tasarlanmış köprü üstyapısına yönelik literatürde sınırlı sayıda çalışma vardır.

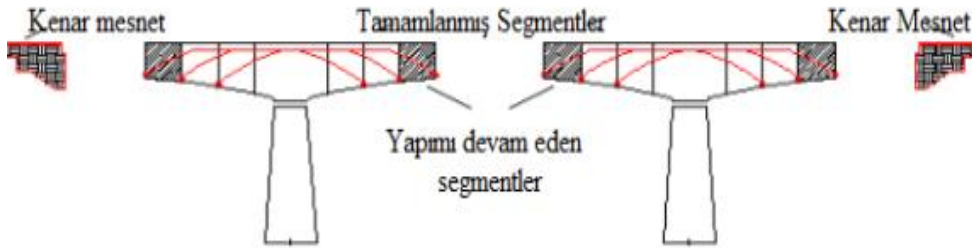
Bu çalışmada dilimli dengeli konsol yöntemine göre tasarlanmış bir köprünün tasarımında yapım aşamaları da dikkate alınarak elde edilen kesit tesirlerinin, köprünün tamamlanarak sürekli sistem haline gelmesi sonrası oluşan kesit tesirleri ile mukayesesi yapılmıştır. Bu amaca yönelik olarak 2 ayaklı 3 açıklıklı toplam 345 m uzunluğunda bir dengeli konsol tasarlanmış ve analizler bu köprü üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ülkemizde aktif olarak kullanılan diğer bir köprü çeşidi prekast kirişli köprüdür. Bu köprü metodu dengeli konsoldan daha fazla kullanılmaktadır. Özellikle derin vadilerin geçilmesinde köprü çeşitleri birbirini kovalamaktadır. Bu tür devasa yapıların yapılmasında ise maliyet ön plandadır. Ayrıca yapılan bu çalışmadaki örnek köprü modeli, Trabzon ili Ortahisar ilçesinde yer alan ve prekast kirişli köprü yöntemine göre yapımı halen devam etmekte olan Karşıyaka Viyadüğü'nün aplikasyonuna göre tasarlanmıştır.

### 3. Metot

#### 3.1. Dilimli Dengeli Konsol Köprü Yöntemi

Uzun açıklıkların geçilmesi gereken yerlerde genel olarak betonarme köprüler, asma köprüler ve kablolu köprüler tercih edilmiştir. Bu köprü tipleri arasında özellikle betonarme karayolu köprüleri yapım aşamalarından ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarından daha fazla etkilenmiştir. Betonarme karayolu köprüleri ile geniş ve uzun bir vadiyi maksimum açıklık ve minimum sayıda ayakla geçebilmek için en uygun ve en iyi yöntem yerinde dökme dengeli konsol yöntemidir [15].

Dengeli konsol yöntemi önerilmeli beton kullanılarak büyük açıklıkların geçilmesinde yaygın olarak kullanılmıştır. Bu yöntemde, köprü üst yapısının her bir açıklığı, boyuna doğrultuda dilim denilen parçalara bölünmekte ve bu dilimler parça parça inşa edilmektedir. Zeminden ek bir destek alınmadan, sabit bir noktadan dışarıya doğru konsol biçiminde uzanan ve yük taşıyabilen bir yapı ardışık adımlarla inşa edilir (Şekil 1). Köprü orta ayağının her iki tarafında birbirini dengeleyecek biçimde yapılan bu yapım tekniği dengeli konsol yöntemi olarak adlandırılmıştır. Dilimler köprü ayağı başlarından itibaren iki ters yönde aynı anda uygulanmakta olup ayak üstü mesnet bölgesinde meydana gelen eğilme momentlerini sıfıra indirecek şekilde olacaktır. Bu şekilde inşa edilen bir dengeli konsol sisteminde eğilme momenti dengesinin sağlanması önem arz etmektedir [15].



**Şekil 1.** Köprü üst yapısını oluşturan dilimlerin inşasına ait şematik gösterim.

Betonarme yapıların tasarımları bir anda bitecekmiş gibi yapılmaktadır. Bu durum uygulamada ise farklılık göstermektedir. Örneğin bir betonarme dengeli konsol köprüsünün hem köprü ayakları hem de tabliyesi dilim dilim yapılmaktadır. Ama ortaya çıkan gerilme ve eğilme momenti değerleri farklılık göstermektedir. Bu ise donatı ve halat hesabını etkileyen bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle viyadükler gibi yüksek maliyete sahip olan yapıların tasarımında yapım aşaması hesap yönteminin kullanılmasında büyük fayda vardır.

Bir köprü ayağının iki tarafındaki dilimlerin imal edilmesi yaklaşık bir haftada tamamlanmaktadır ve yapım aşamaları aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

- Kalıp arabasının imalatı tamamlanmış dilimlerden sökülüp bir sonraki dilimin yapılması için ilerlemesi.
- Alt flanş ve gövde donatılarının yerleşmesi, iç kalıbın ilerlemesi, üst flanş donatısının, kılıfların ve demetlerin yerleşmesi.
- Dilim betonun dökülmesi
- Betonun priz alması ve betonun tasarımda belirlenen mukavemetini kazandıktan sonra ardgerme tekniğinin uygulanması.
- Kalıp arabasının bir sonraki dilime geçmesi

### 3.2. Dengeli Konsol Köprü Boyutlandırılması

Kutu formuna sahip köprü üstyapı tabliyesi açıklık ortasından mesnetlere doğru parabolik bir değişim göstermektedir. Bu bölümde öntasarım için köprü üstyapısı kesit altında parabol gibi düşünülmekte olup uygun formüllerle eğriliği ifade edilecektir. Kesit yüksekliği  $H$  ile köprü orta açıklığı  $L$  ile ifade edilsin.  $H/L$  oranı orta ayak köprü ayağı üstü mesnedinde  $\alpha$  ile ve açıklık ortasında  $\beta$  ile gösterilsin. Tablo 1’de açıklık boylarına göre kesit yükseklik oranları verilmiştir. Bu oransal değer açıklıkların büyümesi ile değişiklik göstermekte olup tasarım pratiği yönünden ön boyutlandırma aşamasından itibaren dikkate alınması gerekir.

**Tablo 1.** Açıklık boylarına göre kesit yükseklik oranları

Açıklık Boyları, L(m)	Mesnette $a=H/L$	Açıklıkta $B=H/L$	$\alpha / \beta$
80-120	1/18-1/20	1/36-1/40	2,0
120-150	1/18-1/20	1/40-1/42	2,1
150-180	1/20	1/42-1/45	2,2
>250	1/20	1/48	2,4 -2,5

Belirtilen hesap parametreleri dışında yine köprü üstyapısı ön boyutlandırması için Service d’Etudes Techniques des Routes et Autoroutes kurumu [16] tarafından önerilen ampirik bağıntılarda kullanılmaktadır. Şekil 2’de belirtilen  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $L_{kenar}$  ve  $L_{orta}$  ifadelerinden oluşturulan formüllerle mesnet ve açıklık ortasındaki kesit hesabı yapılabilmektedir.

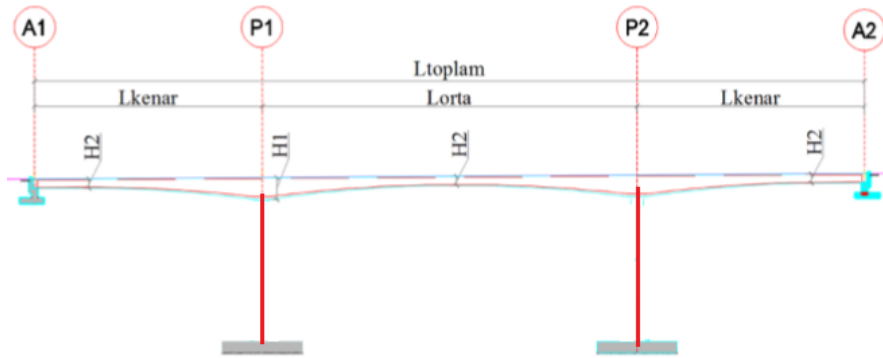
Mesnet üzerinde,

$$\frac{L_{orta}}{H_1} = 14 + \frac{L_{orta}}{45} \quad (1)$$

formülü ile mesnet bölgesinde hesap edilmektedir. Açıklık ortasında,

$$\frac{L_{orta}}{H_2} = 19 + \frac{L_{orta}}{7} \quad (2)$$

formülüyle açıklık ortasında kesit boyutu hesabı yapılabilmektedir.



**Şekil 2.** Köprü boykesit görünüşü

Dengeli konsol kesit üstü hesabı için kesit alanları, eğilme momenti ve kesme kuvvetleri değerlerinin bulunması gerekir. Bunlar belirlendikten sonra halat hesabı yapılmıştır. Başlık kesitindeki kesit alanı  $A_0$  ve açıklık bölgesi enkesit alanı  $A_{18}$  olmak üzere; parabolik bağıntı

açıklık ortasından mesnete doğru ilerleyen  $x$  mesafesine bağlı olarak Denklem 3'te görüldüğü gibi verilebilir.

$$A(x) = A_{18} + (A_0 - A_{18}) \cdot \left(\frac{x}{L_{\text{hesap}}}\right)^2 \quad (3)$$

Denklem 3'te Lhesap, dengeli konsolun bir tarafının konsol uzunluğunu ifade etmektedir.

$$g(x) = A(x) \cdot 25 \frac{kN}{m^3} \quad (4)$$

Denklem (4) enkesit alanlarına bağlı olarak yayılı yük değişimini göstermektedir. Buradaki 25  $kN/m^3$  betonun birim hacim ağırlığıdır.

$$T(x) = \int_0^x g(x) dx \quad \text{Kesme kuvveti değişim bağıntısı} \quad (5)$$

$$M(x) = \int_0^x T(x) dx \quad \text{Eğilme momenti değişim bağıntısı} \quad (6)$$

Denklem (5)-(6) sırasıyla kesme kuvveti ve eğilme momenti değişimini göstermektedir. Burada konsol eğilme momenti negatiftir. Yapım aşamasında bulunan eğilme momentidir. Bu bağıntılardan elde edilen eğilme momenti değerleri dilim ağırlığından dolayı elde edilen eğilme momentlerine yakın sonuçlar vermesi gerekmektedir.

Yapılan çalışmalar sonucunda köprü üstyapısında herhangi bir kesitinde oluşan eğilme momenti değerini kesitin  $x$  mesafesi değerini kullanarak elde etmek mümkün olmaktadır. Gerekli halat sayısının hesabı için köprü üstyapısı yapım aşaması halinde, diğer bir deyişle dengeli konsol durumunda mesnet kesitinde meydana gelen en yüksek eğilme momenti değerine ihtiyaç duyulmaktadır.

En son dilim yapıldıktan sonra kapatma diliminin yapılması için kalıp arabasının en son dilim ucundaki durumundan dolayı oluşan eğilme momenti değeri gerekmektedir. Bu değer Denklem 7'ye göre elde edilmektedir.

$$M_{\text{Kalıp Arabası}} = P_{\text{Kalıp Arabası}} \times 1,1 \times L_{\text{hesap}} \quad (7)$$

En son dilim yapılana kadar inşaatla beraber ilerleyen imalat yüklerden dolayı meydana gelen eğilme momenti:

$$M_{\text{imalat}} = (0,5 \times \text{Köprü Genişliği} \times (L_{\text{hesap}})^2) / 2 \quad (8)$$

formülü ile hesabı yapılmaktadır.

Halat adedinin bulunması için yapım aşamasında dikkate alınan yüklerden dolayı mesnet kesitinde meydana gelen toplam eğilme momenti:

$$M_{\text{servis}} = M_{\text{dilim}} + M_{\text{kalıp arabası}} + M_{\text{imalat}} \quad (9)$$

gelen toplam eğilme momentiler ile hesapta kullanılan eğilme momenti değeri bulunabilmektedir.

Köprü kesitlerinde dış yüklemelerden ve ardgerme kuvvetinden oluşan gerilmeler izin verilen çekme gerilmesi sınırı ile sınırlandırılacaktır. Bu sebepten gerekli halat adedinin hesabı için oluşan gerilme değerinden çekme gerilmesi sınırı değeri düşürülerek işlem yapılacaktır. Dış yüklerin etkisi

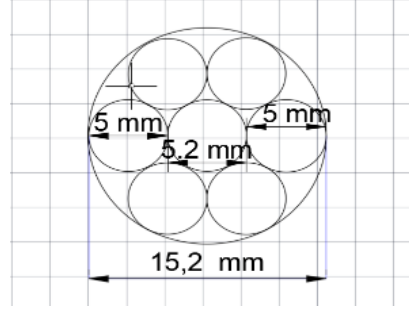
altında mesnet kesitinde negatif eğilme momenti, dolayısıyla çekme gerilmeleri kesit üstünde meydana gelecektir. İzin verilen çekme gerilmesi sınırı Denklem (10) ile belirlenmektedir.

$$\sigma_{em\_çekme} = -0,24 \sqrt{f_{ci}} \quad (10)$$

Denklem (10)'da  $\sigma_{em\_çekme}$  yapım aşamasında izin verilen beton çekme dayanımını,  $f_{ci}$  betonun karakteristik çekme dayanımını ifade etmektedir.

Tasarımlarda genellikle kullanılan halat 270K sınıfı halattır. Bu halatın kopma dayanımı  $1860 \text{ N/mm}^2$ 'dir. Halat çapı  $15,2 \text{ mm}$  olup kesit alanı  $140 \text{ mm}^2$ 'dir. Bir halat 7 adet telden oluşmaktadır. Piyasada bulunan kablolar ise 9, 12, 15, 19, 22, 27 ve 31 halattan oluşmaktadır.

Halat hesabında kayıpların hesaba katılması gerekmektedir Bunun için halat hesabı yapılırken 0,85 güvenlik katsayısı ile çarpılmaktadır. Ayrıca ardgerme işleminde çekilen halat için bir çekim basıncı vardır. Bu da 0,75 katsayısı ile çarpılmaktadır. Yani K270 çeliğinin kopma dayanımı  $1860 \text{ N/mm}^2$  ama uygulanan basınç  $1395 \text{ N/mm}^2$  olmaktadır. K270 ardgerme çeliğinin şematik olarak halat tasarımı Şekil 3'te gösterilmiştir. Kenarlarında  $5 \text{ mm}$  çapında 6 adet tel ve  $5,2 \text{ mm}$  çapında 1 adet telden oluşmaktadır.



Şekil 3. Halatın şematik olarak görünüşü

$$P_{halat} = 0.75 \times 0.85 \times \text{Halat Kopma Dayanımı} \times \text{Halat Kesit Alanı} \quad (11)$$

P halat bir halatın güvenle taşıyacağı çekme kuvveti, kısa vadeli etkilerin hesabında kablolarda %15 kayıpların olduğu varsayımıyla;

$$P_{çekme} = (M_{servis}/I_{kesit \times \text{Süst}} + \sigma_{emniyet}) / (1/A + e/I_{kesit \times \text{Süst}}) \quad (12)$$

toplam karşılanması gereken kuvveti ifade etmektedir. Denklem 12'de,  $M_{servis}$  tabliyede oluşan toplam eğilme momentini ifade etmektedir. I atalet momenti, A kesit alanı, e tarafsız eksene olan uzaklık ve  $\sigma$  çekme dayanımını ifade etmektedir. Gerekli Halat Adeti;

$$N_{gereklihalat} = P_{çekme}/P_{halat} \quad (13)$$

ile kesit üstü halat hesabı yapılmaktadır. Kesit altı hesabı yapılırken bulunan servis momentinden hareketle kesit altı hesabı yapılabilmektedir. Tabliyede oluşan toplam eğilme momenti; dilim ağırlığından, kaplama ve kamyon ağırlıklarından dolayı oluşan toplam eğilme momentidir.

$$M_{servis} = M_{dilim\_ağırlık} + M_{kaplama} + M_{kamyon} \quad (14)$$

formülleriyle kesit altı için eğilme momenti hesabı yapılır.

$$\sigma_{emniyetçekme} = -0,6\sqrt{fc} \quad (15)$$

formülü ise kesit altı için çekme gerilmesidir.

$$P_{çekme} = (M_{servis}/I_{kesitxyalt} + \sigma_{emniyet})/(1/A + e/I_{kesityalt}) \quad (16)$$

formülü ile hesabı yapılmaktadır. Gerekli Halat Adeti;

$$N_{mevcut} = P_{çekme}/P_{halat} \quad (17)$$

ile hesabı yapılabilmektedir.

### 3.3. Artımsal Zaman Adımı Yöntemi

Dilimli dengeli konsol yapım metoduyla yapılan köprü üstyapısı farklı şekillerde ve ardgerme kuvveti uygulama anında farklı gün cinsinden beton yaşına sahip olduğundan dilimler zamana bağlı etkiler altında basit açıklıklı kirişlere göre farklı davranış gösterebilmektedir. Kesit yükseklikleri fazla ve dilim boyları büyük olduğundan kesitlerde meydana gelen gerilme değişimleri özel çözüm hesabı gerektirmektedir. Her bir yapım metodunun zamanına ve dilimlere ardgerme kuvvetinin uygulanma anındaki beton zamanına bağlı olarak kesitlere etkileyen ardgerme kuvveti bileşenleri için zamana bağlı meydana gelen kayıplar ayrı ayrı hesap edilmelidir. Bunun dışında bu yöntem kesitlerde her bir zaman adımında meydana gelen eğrilik ve buna bağlı çözülme düşey yerdeğiştirme için çok önem arz etmektedir. Yapım zamanları ve köprü açıklığı yeterli sayıda parçalara bölünmek üzere köprünün beton dökme zamanında geometri kontrolü gerekli hassasiyetle takip edilebilir. Bu çalışma kapsamında, 7 günlük yapım süreleri zaman adımı olarak, dilim boyları ise büyük açıklığa sahip köprünün bölünmesi hedeflenen parça boyları olarak ele alınmıştır. Zamana bağlı öngerme kayıplarının çözümü ve betonda oluşan etkiler köprü servis ömrünün sonundaki zamana göre çözülerek dikkate alınırsa kesin sonuçlar elde etmek mümkün olmayacaktır. Bu sebepten ötürüdür ki her bir dikkate alınan zaman dilimi sonucunda zaman periyoduna bağlı etkilere bağlı olarak bulunan öngerme kuvveti bir sonraki zaman dilimi için başlangıç değeri olarak alınacaktır. Böylece her bir kesit için çok sayıda ardgerme kuvveti bileşeni bulunmuş olduğundan artımsal zaman adımı yöntemini kullanmak amaca uygun olacaktır. Bu hesap yöntemi özel köprülerin inşaat aşamalarına göre analizini yapan bilgisayar programlarının temelini oluşturmaktadır [15].

Çeşitli yapım aşamalarında dilimlere uygulanan ardgerme kuvveti ve bileşenleri tabliye profili ve planı üzerindeki dağılımı sırasıyla Şekil 4'te verilmektedir. Şekil 4'te görüleceği üzere her bir yapım aşamasında kesitlerde etkileyen ardgerme kuvvet bileşen sayısı giderek artmaktadır ve beton yaşı ve ilerleyen yapım zamanlarına ve zamana bağlı olarak her biri kendi içinde değişim göstermektedir. Kuvvet ifadesindeki ilk alt indis ilgili kesiti, ikinci alt indis ise ele alınan kesite montajı yapılan ana halatı, dolayısıyla ele alınan kesite uygulanan ardgerme kuvvet bileşenini belirlemektedir.

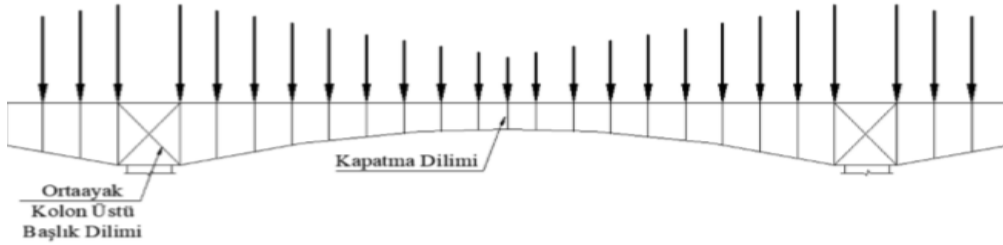


**Şekil 4.** Farklı yapım aşamaları sonunda uygulanan ardgerme kuvveti ve bileşenleri-tabliye plan görüntüsü

### 3.4. Kesit Tesirleri

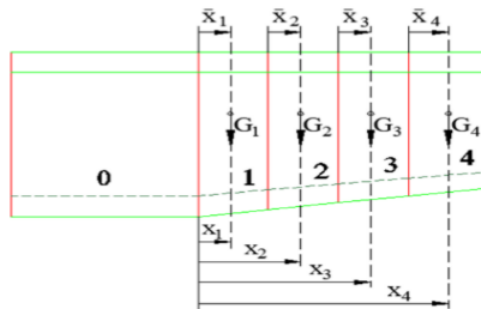
Bütün dilimlerin boyuna yönde farklı şekle sahip olduğu başlangıç ve bitiş kesitleri farklı özelliklere

sahip olduğu dengeli konsolun olmazsa olmazıdır. Dilimlerin üzerlerindeki ölü yük dağılımı trapez yayılı yük olacağından başlangıç ve bitiş kesitleri dikkate alınabilir.



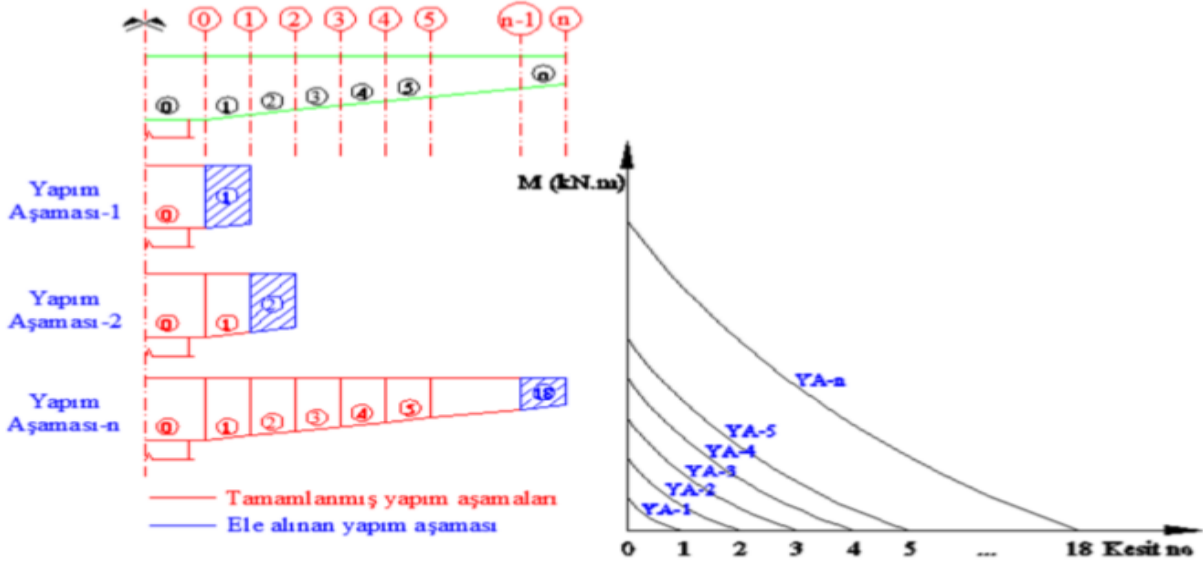
**Şekil 5.** Köprü üstyapısı dilimlerin ölü yük dağılımı

Şekil 5'te görüleceği üzere her bir dilimin başlangıç ve bitiş enkesit alanlarına bağlı olarak köprü üstyapısı üzerinde dilimlerin ölü yük dağılımı parabolik olarak değişim göstermemektedir. Üstyapı için ayrıntılı analiz hesap sonucu bulunan eğilme momenti değerleri parabolik yaklaşımla bulunan değerlerden daha küçük değerlere sahip olacaktır.



**Şekil 6.** Dilim başlangıç ve bitiş enkesit alanına bağlı ağırlık merkezi yeri hesap örneği





Şekil 7. İlerleyen yapım aşamalarında dilim ölü yüklerinden dolayı meydana gelen eğilme momenti diyagramı.

Şekil 6'da  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n$  : ilgili dilimin ağırlık merkezinin başlangıç enkesitine göre eğilme momenti kolu,  $x_1, x_2, \dots, x_n$ : ilgili dilimin ağırlık merkezinin ele alınan kesite göre eğilme momenti kolu,  $G_1, G_2, G_n$ : ilgili dilimin kN cinsinden ağırlığı. Dilim başlangıç enkesitlerinde dilim ölü yükünden dolayı meydana gelen negatif konsol eğilme momentleri (Şekil 7) aşağıdaki şekilde hesaplanacaktır:

$$M_{n-1} = G_n \times \bar{x}_n \quad (18)$$

Herhangi bir kesitin yapımının sonucu oluşan yükten dolayı meydana gelen konsol eğilme momentleri aşağıdaki şekilde hesaplanabilmektedir.

$$M_{mn} = G_n \times X_{mn} \quad (19)$$

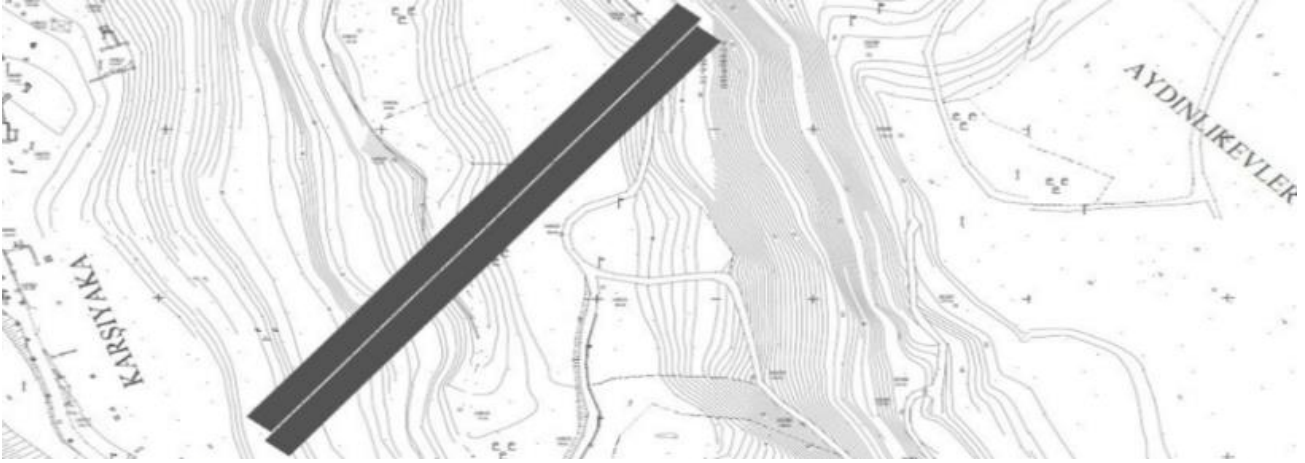
Elde edilen eğilme momentlerine göre bu eğilme momentlerini karşılayacak halatların hesabı yapılacaktır.

### 3.5. Dengeli Konsol Köprü Tasarımı

#### 3.5.1. Tasarım Aşamaları

Tasarlanan dengeli konsol köprü modeli, prekast kirişli olarak inşa edilen Trabzon Karşıyaka Viyadüğünün aplikasyonuna göre tasarlanmıştır. Model A ve B kolu olacak şekilde ayrı ayrı 2 adet yoldan oluşmaktadır. Modelin toplam boyu 345 metre uzunluğundadır. Köprü tabliye genişliği ise 18,5 metredir. Tabliye dilimleri köprü ayağı tarafından ilk üç adeti 3 metre, sonraki 3 adeti 3,5 metre, 2 adeti 4 metre ve 10 adeti 5 metre uzunluğundadır. Bunlar orta ayak kolonun bir tarafına ait verilerdir. Köprü ayağının sağ ve sol tarafı düşünülünce dilim sayısı iki katına, ikinci köprü ayağı hesaba katıldığında dört katına ve her iki şeridi hesaplandığında bu sekiz katına çıkmaktadır. Yani dengeli konsol köprüde toplamda  $18 \times 8 = 144$  adet dilim bulunmaktadır. Ayrıca köprü ayaklarının tepesinde kafa dilimi bulunmaktadır. Bunların toplam genişliği ise 8 metredir. İki adet köprü ayağının tabliyelerinin birleşim noktasında 1 adet dilim daha vardır. Buna kapatma dilimi denilmektedir. Bu da 2 metre uzunluğundadır. Modelin köprü ayağı yükseklikleri ise 45 ve 53

metre uzunluğundadır. Bu yükseklikler köprünün arazi koşullarına ve zemin özelliklerine bağlı olarak belirlenmiştir (Şekil 8-9).



**Şekil 8.** Tasarım köprüsü güzergahı

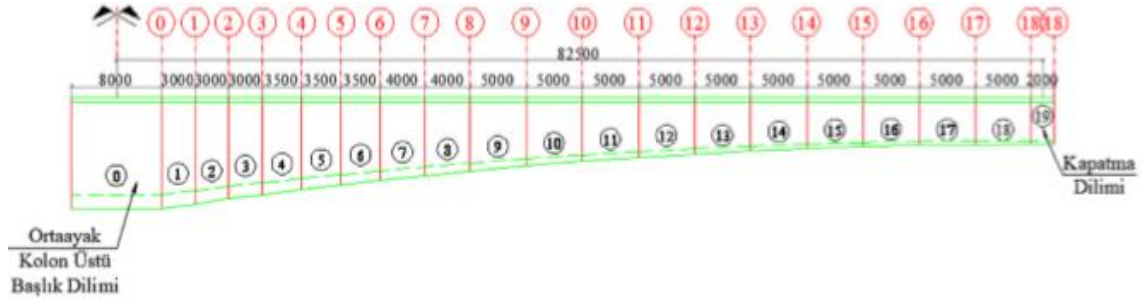
Dengeli konsol köprü modelinin tabliye kesit özellikleri boyunca 90 m, 165 m, 90 m olarak devam etmektedir. Modelin giriş ve çıkış kotları 3+777.50 ve 4+119.25'tir. Mevcut hali ile Türk Deprem yönetmeliğinde köprü ile tasarım parametreleri olmadığı için Karayolları Kurumu AASHTO LRFD yönetmeliği kullanılmaktadır. Köprü tasarımı bu yönetmeliğe göre yapılmıştır. Köprünün modellenmesinde SETRA kurumunun 2007 yılında yayınlamış olduğu tasarım parametreleri kullanılmıştır. Tasarlanan dengeli konsol köprü modeli akstan aksa 90 m, 165 m, 90 m olmasına rağmen köprü ayağının başında bulunan kafa diliminden dolayı tabliye net açıklıkları 86 m, 8 m, 157 m, 8 m, 86 m olarak başlayıp bitmektedir. Şekil 10'de tabliye kesit özellikleri görülmektedir. Tabliye değişken kesitli olarak gitmektedir.



**Şekil 9.** Akslar arası açıklık düzeni (birimler m cinsindedir)

Köprü ayağı üstü başlık dilimi 9.5 m'den başlayıp açıklık ortasında noktada 4 m olarak bitmektedir. Şekil 11'de görüldüğü gibi tabliye kesiti yüksekliği, talt ve dikine perdeler ve guselerin ölçüleri değişkenlik göstermektedir. Dengeli konsol köprülerin ana felsefesi gereği bu üst kısımda parametrik bir değişim meydana gelmemektedir. Şekil 11'de gösterilen üst yapı modeli köprü boyunca hep aynı gitmektedir.





**Şekil 13.** Köprü üst yapısına ait dilim düzeni

Tablo 2’de verilen hesaplardan üst başlık alanı Şekil 11’de görüleceği üzere verilen ölçülerden hesaplanmıştır. Guse, alt döşeme alanları ise Şekil 12’te verilen kesit ölçülerinden hesaplanmıştır. Üst başlık yüksekliği tabliye kesiti boyunca değişkenlik göstermemektedir. Alt tabliye kalınlığı ise A0 diliminden başlayıp A18 dilimine doğru lineer olarak azalım göstermektedir.

Tablo 3’te gösterilen ortalama alanlar kesitin başlangıç ve bitiş alanlarından oluşturulmuştur. 1. Dilim kesit ortalama alanı bulunurken başlangıç  $33,95 \text{ m}^2$  ve bitiş  $32,76 \text{ m}^2$ ’dir. Bunların ortalaması olarak  $33,35 \text{ m}^2$ ’lik bir ortalama kesit elde edilmiştir. Dilimin boyu ile çarpılarak dilim hacmi  $100,05 \text{ m}^3$  olarak elde edilmiştir. Betonun birim hacim ağırlığı ile çarpılarak dilim ağırlığı bulunmuştur. Tablo 3’te dilim ağırlık ve yayılı yük hesabı verilmektedir. Tablo 4’te atalet momenti ve mesafeler hesaplanmıştır. Bu işlem tüm kesitler için hem kendi kesiti içindeki konumu ve başlangıç noktasına göre bulunmuştur. Kesitin kendi ağırlığından kaynaklı eğilme momentleri hesap edilmiştir. Bu eğilme momentleri hesap edilirken dilimin ağırlığı ile eğilme momenti kolu çarpılarak elde edilmiştir. Yine kalıp arabasından kaynaklı eğilme momentleri hesaplanmıştır. Bu eğilme momentler için kalıp arabası  $800 \text{ kN}$  alınmıştır. Daha sonra imalat yüklerinden kaynaklı eğilme momentleri hesaplanmıştır. Bu eğilme momentleri hesap edilirken imalat yayılı yükü yönetmelikte belirtildiği gibi  $0,5 \text{ kN/m}^2$  olarak alınmış ve momentler hesaplanmıştır.

**Tablo 2.** Dilim kesit özellikleri

Dilimler	Kesitler	Toplam Yükseklik(m)	Üst başlık yüksekliği(m)	Alt tabliye kalınlığı(m)
	A0	9,500	1,05	1,200
1	A1	9,082	1,05	1,135
2	A2	8,681	1,05	1,073
3	A3	8,297	1,05	1,014
4	A4	7,859	1,05	0,948
5	A5	7,463	1,05	0,885
6	A6	7,080	1,05	0,826
7	A7	6,670	1,05	0,763
8	A8	6,289	1,05	0,704
9	A9	5,854	1,05	0,637
10	A10	5,465	1,05	0,576
11	A11	5,122	1,05	0,523
12	A12	4,824	1,05	0,477
13	A13	4,572	1,05	0,438
14	A14	4,366	1,05	0,407
15	A15	4,206	1,05	0,382
16	A16	4,092	1,05	0,364
17	A17	4,023	1,05	0,354
18	A18	4,000	1,05	0,350

Buradan Toplam uzunluk:  $77,5 \text{ m}$ ; Gerçek Toplam kütle:  $45626,87 \text{ kN}$ ; Yayılı yükten toplam kütle:  $50651,09375 \text{ kN}$ ; Azaltma katsayısı:  $0,90$  olarak hesaplanır.

### 3.5.2. Yüklerin Tanımı ve Yük Birleşimleri

Köprü yapım aşamasında dengeli konsol durumunda iken mesnet üstü negatif eğilme momentlerini karşılamak amacıyla kesit üst life yakın bölgelere kablolar yerleştirilmektedir.

**Tablo 3.** Dilimlerin alanı, dilim ağırlık ve yayılı yük hesabı

Dilimler	Yan Perde Alanları	Guse Alanları (m <sup>2</sup> )	Alt Döşeme Alanı(m <sup>2</sup> )	Üst başlık alanı (m <sup>2</sup> )	Toplam alan (m <sup>2</sup> )	Dilim uzunluk (m)	Hacim (m <sup>3</sup> )	Beton (kN)	Toplam Kütle (kN)	Yayılı yük kN/m
Baş.Dil.	10,15	0,525	12,84	10,43	33,95	8	271,56	25	6789,00	848,63
1	9,656	0,525	12,145	10,43	32,76	3	100,05	25	2501,26	818,88
2	9,181	0,525	11,481	10,43	31,62	3	96,56	25	2413,97	790,43
3	8,726	0,525	10,85	10,43	30,53	3	93,22	25	2330,56	763,28
4	8,205	0,525	10,144	10,43	29,3	3,5	104,71	25	2617,78	732,60
5	7,739	0,525	9,47	10,43	28,16	3,5	100,57	25	2514,21	704,09
6	7,286	0,525	8,838	10,43	27,08	3,5	96,67	25	2416,86	676,97
7	6,8	0,525	8,164	10,43	25,92	4	106,00	25	2649,89	647,97
8	6,349	0,525	7,533	10,43	24,84	4	101,51	25	2537,79	620,92
9	5,834	0,525	6,816	10,43	23,6	5	121,10	25	3027,59	590,12
10	5,375	0,525	6,163	10,43	22,49	5	115,24	25	2881,09	562,32
11	4,969	0,525	5,596	10,43	21,52	5	110,03	25	2750,78	537,99
12	4,616	0,525	5,104	10,43	20,67	5	105,49	25	2637,15	516,87
13	4,318	0,525	4,687	10,43	19,96	5	101,58	25	2539,62	498,98
14	4,073	0,525	4,355	10,43	19,38	5	98,35	25	2458,86	484,56
15	3,884	0,525	4,087	10,43	18,93	5	95,77	25	2394,28	473,15
16	3,749	0,525	3,895	10,43	18,6	5	93,81	25	2345,31	464,98
17	3,667	0,525	3,788	10,43	18,41	5	92,52	25	2313,03	460,24
18	3,64	0,525	3,745	10,43	18,34	5	91,87	25	2296,84	458,50

**Tablo 4.** Tabliye kesit özellikleri

Dilim no	Kesit yükseklikleri(m)	Alt tabliye kalınlığı (m)	Kesit alanı (m <sup>2</sup> )	S <sub>alt</sub>	S <sub>üst</sub>	Atalet momenti (m <sup>4</sup> )	e <sub>alt</sub>	e <sub>üst</sub>
A0	9.500	1.200	33.95	4.50	5.00	473.27	4.30	4.80
A1	9.082	1.135	32.76	4.36	4.72	419.27	4.16	4.52
A2	8.681	1.073	31.62	4.22	4.46	371.17	4.02	4.26
A3	8.297	1.014	30.53	4.09	4.20	328.41	3.89	4.00
A4	7.859	0.948	29.30	3.94	3.92	283.54	3.74	3.72
A5	7.463	0.885	28.16	3.80	3.66	246.08	3.60	3.46
A6	7.080	0.826	27.08	3.67	3.41	212.97	3.47	3.21
A7	6.670	0.763	25.92	3.52	3.15	180.65	3.32	2.95
A8	6.289	0.704	24.84	3.38	2.91	153.40	3.18	2.71
A9	5.854	0.637	23.60	3.21	2.64	125.49	3.01	2.44
A10	5.465	0.576	22.49	3.06	2.40	103.24	2.86	2.20
A11	5.122	0.523	21.52	2.92	2.20	85.76	2.72	2.00
A12	4.824	0.477	20.67	2.80	2.02	72.11	2.60	1.82
A13	4.572	0.438	19.96	2.70	1.87	61.64	2.50	1.67
A14	4.366	0.407	19.38	2.61	1.76	53.83	2.41	1.56
A15	4.206	0.382	18.93	2.54	1.67	48.16	2.34	1.47
A16	4.092	0.364	18.60	2.49	1.60	44.34	2.29	1.40
A17	4.023	0.354	18.41	2.46	1.56	42.15	2.26	1.36
A18	4.000	0.350	18.34	2.45	1.55	41.41	2.25	1.35

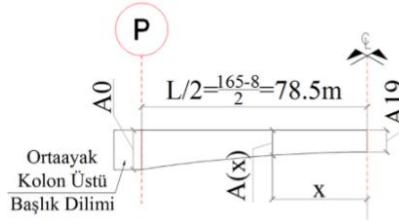
Kablo adedini tahmin etmek için köprü analizinde kullanılan ve en kritik durumu temsil eden yük birleşimi aşağıda biçimde dikkate alınmıştır.

$$DC + DIFF + CLL + (CE + IE) \quad (20)$$

*DC*: dilimlerin kendi ağırlığı, *DIFF*: sabit yükün bir konsolda diğer konsola göre %2 oranında fazla olduğu kabul edilir. *CLL*: yapım aşamasında köprü üstyapısının genişliğine  $L_{hesap}=77,5$  m Köprü ayağı üstü başlık diliminden açıklık ortasına kadar mesafe:  $(165-8)/2=78,5$  m. Kapatma dilimi ortasına kadar mesafe 78.5m.

Denklem 3'e göre

$A(x)=18,34+(33,34-18,34) \times (\frac{x}{78,5})^2 = 18,34+0,0024341758x^2$  olarak elde edilmiştir (Şekil 14).



**Şekil 14.** Köprü açıklığı boyunca enkesit alanlarının mesafeye göre değişimi

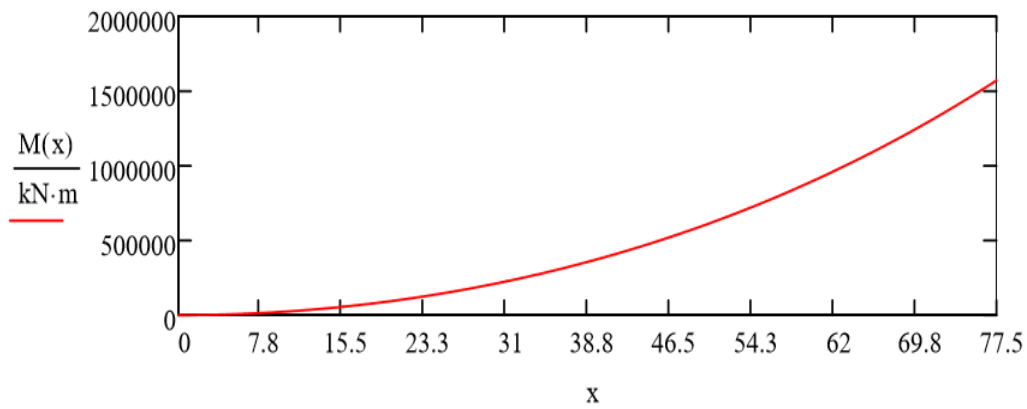
Denklem 4'e göre enkesit alanlarına bağlı olarak yayılı yük değişimi;

$g(x)=A(x) \cdot 25 \text{KN/m}^3 = 458,5+0,060854395x^2$  olarak hesap edilmektedir. Denklem 4-5'e göre kesme kuvveti ve eğilme momenti değişimi aşağıdaki şekilde elde edilmiştir.

$$T(x)=\int_0^x g(x)dx = 458,5x+0,0202847967x^3.$$

$$M(x)=\int_0^x T(x)dx = 229,5x^2+0,0050711992x^4$$

Bu negatif konsol eğilme momenti yapım aşamasında bulunan eğilme momentidir (Şekil 15). Bu hesaba göre elde edilen eğilme momenti 1606799,1kNm'dir. Dilim ağırlığından dolayı yapılan hesaplarda elde edilen eğilme momenti ise 1572261,1 kNm'dir. Buradan da anlaşılacağı üzere parabolik yaklaşım güvenli bir sonuç vermektedir.

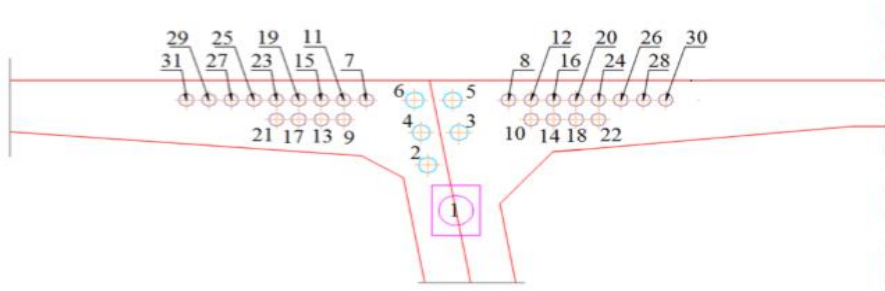


**Şekil 15.** Eğilme momenti değişimi

Dilim ağırlıklarından dolayı meydana gelen maksimum eğilme momenti ve kalıp arabası Denklem 7'den;  $M(77,5m)=1572261,1$  kNm ve  $P_{kalıp arabası}=800$  kN olarak dikkate alınmıştır. En son

dilim yapıldıktan sonra kapatma diliminin yapılması için kalıp arabasının en son dilim ucundaki durumundan dolayı oluşan eğilme momenti değeri Denklem 8'den:  $M_{\text{Kalıp Arabası}} = P_{\text{kalıp Arabası}} \times 1,1 \times 77,5 = 68200 \text{ kNm}$ . En son dilim yapılanaya kadar inşaatla beraber ilerleyen imalat yüklerden dolayı meydana gelen eğilme momenti:  $M_{\text{imalat}} = 0,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 18,5 \text{ m} \times 0,5 \times (77,5)^2 = 27778,9 \text{ kNm}$  bulunur.

Halat adedinin bulunması için yapım aşamasında dikkate alınan yüklerde dolayı mesnet kesitinde meydana gelen toplam eğilme momenti;  $M_{\text{servis}} = 1668240 \text{ kNm}$ 'dir. Halat adedinin hesaplanması ve seçimi: Beton Sınıfı = C40 ve Beton Basınç Dayanımı  $f_c = 40 \text{ N/mm}^2$   $f_{ci} = 0,8f_c = 32 \text{ N/mm}^2$  Argerme kuvvetinin uygulanabilmesi için betonun oluşması gereken dayanımdır. İzin verilen çekme gerilmesi sınırı Denklem 10'a göre;  $\sigma_{\text{em çekme}} = -1,358 \text{ N/mm}^2$  yapım aşamasında izin verilen beton çekme dayanımı Kesit Özellikleri:  $I_{\text{kesit}} = 473,27 \text{ m}^4$ ,  $S_{\text{üst}} = 5 \text{ m}$ ,  $A = 33,95 \text{ m}^2$ ,  $e = S_{\text{üst}} - 0,2 \text{ m} = 4,8 \text{ m}$   $P_{\text{halat}} = 0,75 \times 0,85 \times 1862 \text{ N/mm}^2 \times 140 \text{ mm}^2 = 166,183 \text{ kN}$  olarak hesap edilmiştir. Bir halatın güvenle taşıyacağı çekme kuvveti, kısa vadeli etkilerin hesabında kablolarda %15 kayıpların olduğu varsayımıyla; Denklem 12'ye göre  $P_{\text{çekme}} = 202915,8 \text{ kN}$  toplam karşılanması gereken kuvvet elde edilmiştir. Denklem 13'e göre gerekli halat adeti 1221 olarak belirlenmiştir. Seçilen Halat Adeti:  $N_{\text{mevcut}} = 31 \times 2 \times 6 + 22 \times 4 \times 12 = 1428$ . İlk 6 Dilim için 31'lik sonrakiler için 22'lik halat seçilmiştir (Şekil16).



**Şekil 16.** Mesnet dilim kesitinde argerme kablo kanalları yerleşimi ve numaralandırılması

Tüm kablolar başlık diliminden geçmektedir. Her dilim sonunda bu kablolar gerilip kesit tamamlanmaktadır. Kesit altı halat hesabı yapılırken konsol, kaplama ve kamyon eğilme momenti hesaba katılması gerekmektedir. Bu elde edilen eğilme momenti ve kesit özellikleri dikkate alınarak kesit altı halat hesabı yapılır (Denklem 14-17).

$$M_{\text{dilim ağırlık}} = 211371,11 \text{ kNm}, M_{\text{kaplama}} = 10580 \text{ kNm}, M_{\text{kamyon}} = 11224 \text{ kNm}$$

$$M_{\text{servis}} = M_{\text{dilim ağırlık}} + M_{\text{kaplama}} + M_{\text{kamyon}} = 233175,1 \text{ kNm}$$

Betonun basınç dayanımı =  $40 \text{ N/mm}^2$   $\sigma_{\text{emniyet çekme}} = -0,6\sqrt{f_c} = 3,795 \text{ N/mm}^2$  uzun vadeli etkilerin hesabında betonun emniyetli çekme dayanımıdır.

$$I_{\text{kesit}} = 41,41 \text{ m}^4, S_{\text{alt}} = 2,45 \text{ m}, A = 18,34 \text{ m}^2, e = S_{\text{alt}} - 0,2 = 2,25 \text{ m}$$

$$P_{\text{halat}} = 0,75 \times 0,75 \times 1862 \text{ N/mm}^2 \times 140 \text{ mm}^2 = 146,632 \text{ kN}$$

$$P_{\text{çekme}} = 53297 \text{ kN}$$

Gerekli Halat Adeti:  $P_{\text{çekme}}/P_{\text{halat}} = 363$ ,  $N_{\text{mevcut}} = 13 \times 2 \times 19 = 494$  olarak belirlenmiştir. Açıklık ortasından itibaren (18. dilim dahil olmak üzere) toplamda 13 adet dilimde 19'luk kablo kullanılmıştır. Şekil 17'de kesit altı halat yerleşim planı görülmektedir.



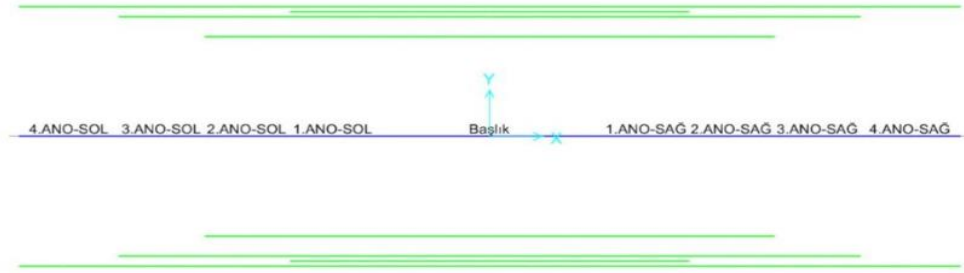
Şekil 17. Kesit altı halat yerleşim planı

#### 4. Bulgular ve Tartışma

Yönetmeliklere göre tasarımı yapılan dengeli konsol köprü modelinin üç boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 programında oluşturulmuştur [17]. Üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulduktan sonra öncelikle yapım aşamasına göre analiz yapıp gerilme, yerdeğiştirme, eğilme momenti ve kesme kuvveti tahkikleri yapılmıştır. Servis durumu için tekrar analizler gerçekleştirilerek yerdeğiştirme, eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri elde edilmiştir ve her iki durumda oluşan etkiler mukayese edilmiştir. Köprüler gibi yapımı uzun süren önemli mühendislik yapılarında yapım aşamalarının dikkate alınmasının gerekliliği bu şekilde incelenmiştir. Tasarlanan dengeli konsol köprü modeli için hem yapım aşaması hem de servis aşaması için ayrı ayrı analizler yapılmıştır.

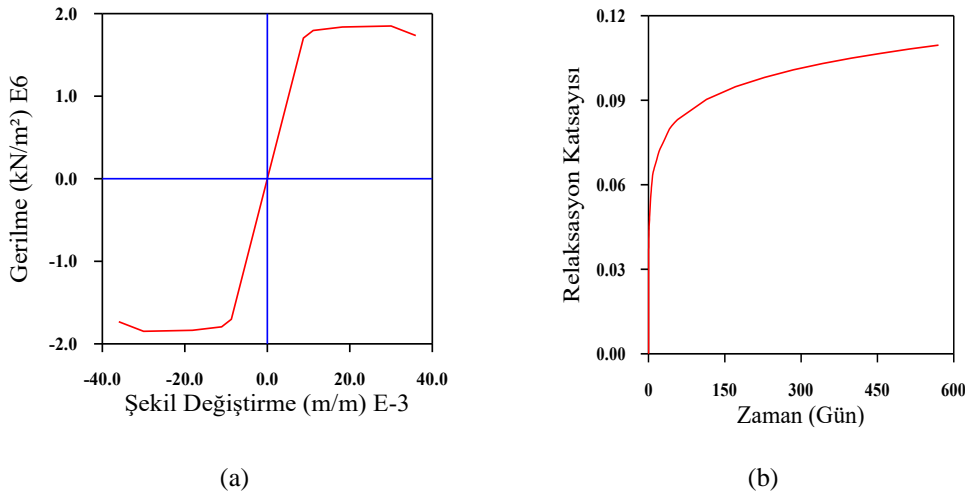
##### 4.1. Dengeli Konsol Köprünün Yapım Aşaması Analizi

Şekil 18’da gösterilen SAP2000 çıktısında ilk 4 dilimi ve yapım aşamasında uygulanacak ve negatif konsol eğilme momenti karşılayacak yeşil tendon elemanları (ardgerme kabloları) gösterilmiştir.



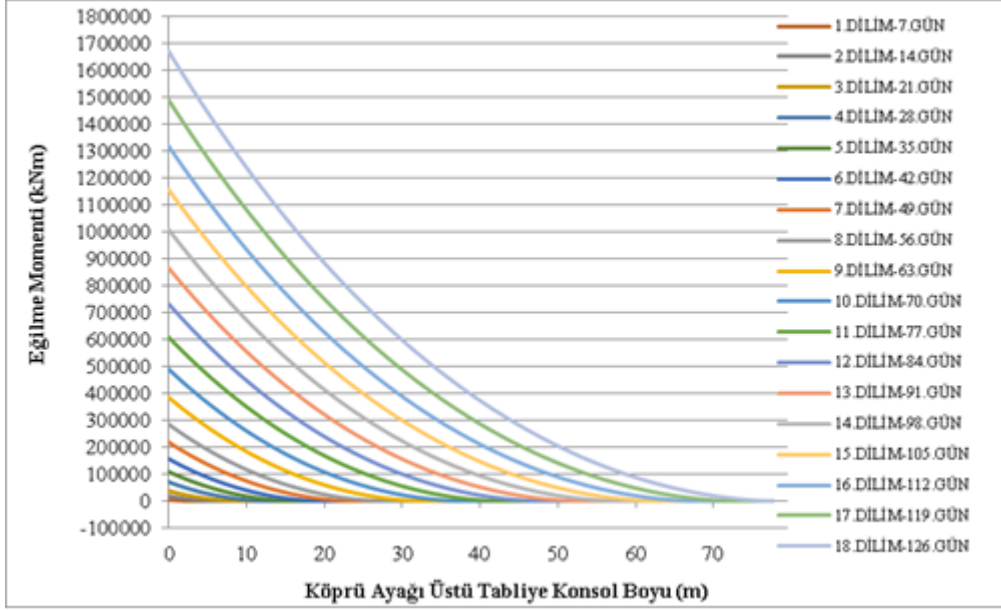
Şekil 18. Sistemin ardgerme tasarımı

Çelik için gerilme şekil değiştirme ve zamana bağlı değişen malzeme özellikleri grafikleri Şekil 19’da verilmektedir. Analizlerde dikkate alınan bu parametreler SAP 2000 sonlu eleman programı içerisinde de bulunan CEB-FIP tasarım kodu yardımıyla belirlenmiştir [18].



Şekil 19. Öngerilmeli çelik için gerilme şekil-değiştirme (a) ve zamana bağlı malzeme özellikleri değişimi (b) diyagramları

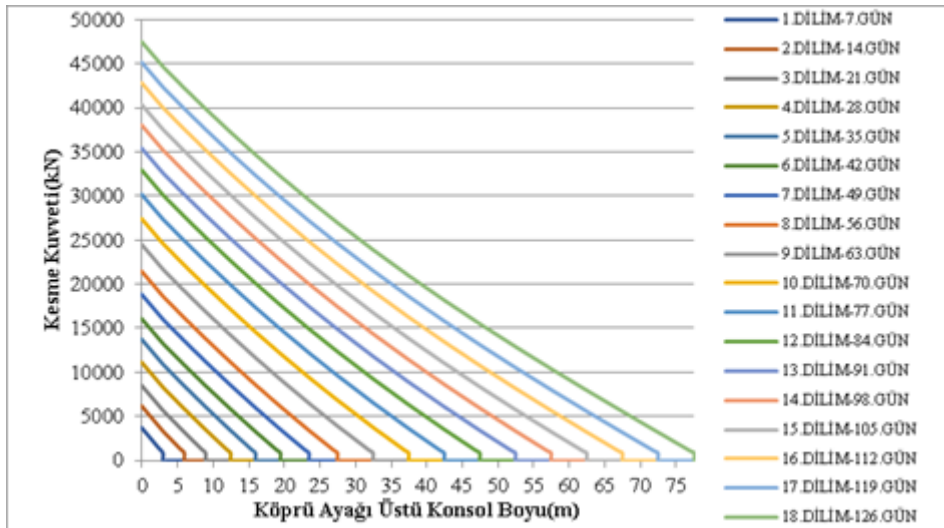




**Şekil 20.** Her dilim sonunda meydana gelen eğilme momenti değerleri

Şekil 20'de dikey sütun tabliye kesitinde meydana gelen eğilme momenti değerlerini göstermektedir. Yatay sütun ise tabliye kesitinin tek bir köprü ayağı üzerinde bir tarafına ait olan mesafe yani 79,5 m göstermektedir. Bu değere karşılık gelen eğilme momenti değeri ise 1669925 kNm'dir. Burada her kesitin meydana getirdiği eğilme momenti değeri 1. dilimden 18. dilime kadar belirlenmiştir. Yapım aşamasından kaynaklı maksimum eğilme momenti değeri Şekil 20'de 1669925 kNm olarak görülmektedir. Elle yapılan hesap sonucunda elde edilen 1572261,1 kNm değerine yakın bir değer elde edilmiştir. Yapılan hesabın güvenli olduğunu göstermiştir.

Şekil 21'de görüleceği üzere kesme kuvveti değeri her bir dilimin yapımından sonra artmıştır. Tüm dilimlerin yapılmasıyla elde edilen maksimum kesme kuvveti değeri 4750 kN'dur. Yapım aşamasında dilimlerin yapımında elde edilen kesme kuvvetleri gösterilmiştir.



**Şekil 21.** Yapım aşamasına göre elde edilen kesme kuvveti değerleri

#### 4. 1. 2. Kesitlerde Meydana Gelen Gerilme Tahkikleri

Modelin dengeli konsol yapım aşaması için kesitlerde meydana gelen gerilme farklılıkları kesit üst ve alt lifler için verilmiştir. Ortaya çıkan değerler köprünün servis durumunda soğuk derzlerde donatı bağlantısı olması durumunda izin verilen gerilme sınırları ile kontrol edilecektir. Bununla birlikte kesitlerin doğrusal elastik davranış sergilediklerini göstermek amacı ile kesitlerde meydana gelen basınç gerilmeleri ilgili yönetmelik tarafından belirlenen basınç gerilmesi sınırı ile kontrol edilmiştir. İzin verilen çekme ve basınç gerilmesi sınırı;

$$\sigma_{\text{çekme}} < 0,24\sqrt{f_{ci}} = 0,24\sqrt{32} = 1,358\text{N/mm}^2 \quad (21)$$

$$\sigma_{\text{basınç}} < 0,6\sqrt{f_{ci}} = 0,6\sqrt{32} = 19,2 \quad \text{N/mm}^2 \quad (22)$$

Denklem (21)-(22)'de  $f_{ci}$ , Ardgerme kuvveti uygulanması zamanında betonun basınç dayanımıdır ve değeri  $0,8 \times 40 = 32 \text{ N/mm}^2$ 'dir. Çekme gerilmesi sınır 1 değeri kısa vadede sınır değeridir. Bu elde edilen gerilme kalıp arabasının üstüne donatı montajı, beton dökülmesi ve ardgerme uygulandıktan sonra elde edilen gerilme değeridir.

**Tablo 5.** Gerilme sınır değerleri

Beton karakteristik basınç dayanımı	$f_c'$	40	N/mm <sup>2</sup>
Ardgerme kuvveti aktarma anında dayanım	$f_{ci}$	32	N/mm <sup>2</sup>
Kısa vadeli basınç emniyet gerilmesi	$\sigma_{\text{bas,emn,1}}$	19,2	N/mm <sup>2</sup>
Kısa vadeli çekme emniyet gerilmesi	$\sigma_{\text{çek,emn,1}}$	1,36	N/mm <sup>2</sup>
Uzun vadeli basınç emniyet gerilmesi	$\sigma_{\text{bas,emn,2}}$	24	N/mm <sup>2</sup>
Uzun vadeli çekme emniyet gerilmesi	$\sigma_{\text{çek,emn,2}}$	3,79	N/mm <sup>2</sup>

Çekme gerilmesi sınır 2 değeri ise uzun vadede gerilme değeridir. Bu ise köprü servis duruma geldikten sonra elde edilen çekme gerilmesidir. Yani 28 gün sonunda elde edilen gerilmedir. Basınç gerilmesi sınır 1 değeri kısa vadede basınç gerilmesidir. Basınç gerilmesi sınır 2 değeri ise uzun vadede basınç gerilmesidir. Yönetmelik gereği bu sınır değerlerin aşılması gerekmektedir.

$$\text{Uzun vadeli çekme gerilmesi} \quad 0,6\sqrt{f_c'} \quad (23)$$

$$\text{Uzun vadeli basınç gerilmesi} \quad 0,6 \times f_c' \quad (24)$$

Tablo 5'te belirtilen sınır ana aralıkları Denklem (23)-(24)'e göre hesap edilmektedir. Bu belirtilen sınır aralıklarında kalınması gerekmektedir. Tablo 6'da görüleceği üzere alt çekme sınır gerilme değeri bazı dilimlerde aşılsa da yönetmelikçe belirtilen gerilme üst değerinin dilimlerin tamamında aşılmadığı görülmektedir. Yapılan gerilme tahkikleri gösteriyor ki gerilme açısından güvenilir tarafta kalınmıştır.

**Tablo 6.** Gerilme değişimleri

Yapım Günleri	İmalat Yeri	Çekme Gerilmesi	Basınç Gerilmesi	Kısa Vadeli Emniyetli Basınç gerilmesi	Kısa Vadeli Emniyetli Çekme Gerilmesi	Uzun vadeli Basınç Emniyet Gerilmesi	Uzun Vadeli Çekme Emniyet Gerilmesi
		N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
0	Kolon - 1	0	0	-19,2	1,36	-24	3,79
0	Baslık DİLİM - 1	0	0	-19,2	1,36	-24	3,79
3	1.DİLİM-1 - 1	0,043	-0,04	-19,2	1,36	-24	3,79
6	1.DİLİM-2 - 1	-0,673	0,097	-19,2	1,36	-24	3,79
7	1.DİLİM-3 - 1	-0,645	0,071	-19,2	1,36	-24	3,79
10	2.DİLİM-1 - 1	-0,535	-0,033	-19,2	1,36	-24	3,79
13	2.DİLİM-2 - 1	-1,269	0,123	-19,2	1,36	-24	3,79
14	2.DİLİM-3 - 1	-1,241	0,096	-19,2	1,36	-24	3,79
17	3.DİLİM-1 - 1	-1,063	-0,071	-19,2	1,36	-24	3,79
20	3.DİLİM-2 - 1	-1,796	0,084	-19,2	1,36	-24	3,79
21	3.DİLİM-3 - 1	-1,767	0,057	-19,2	1,36	-24	3,79
24	4.DİLİM-1 - 1	-1,482	-0,212	-19,2	1,36	-24	3,79
27	4.DİLİM-2 - 1	-2,234	-0,037	-19,2	1,36	-24	3,79
28	4.DİLİM-3 - 1	-2,199	-0,07	-19,2	1,36	-24	3,79
31	5.DİLİM-1 - 1	-1,837	-0,413	-19,2	1,36	-24	3,79
34	5.DİLİM-2 - 1	-2,586	-0,239	-19,2	1,36	-24	3,79
35	5.DİLİM-3 - 1	-2,551	-0,272	-19,2	1,36	-24	3,79
38	6.DİLİM-1 - 1	-2,118	-0,683	-19,2	1,36	-24	3,79
41	6.DİLİM-2 - 1	-3,008	-0,494	-19,2	1,36	-24	3,79
42	6.DİLİM-3 - 1	-2,972	-0,529	-19,2	1,36	-24	3,79
45	7.DİLİM-1 - 1	-2,399	-1,073	-19,2	1,36	-24	3,79
48	7.DİLİM-2 - 1	-3,286	-0,885	-19,2	1,36	-24	3,79
49	7.DİLİM-3 - 1	-3,243	-0,926	-19,2	1,36	-24	3,79
52	8.DİLİM-1 - 1	-2,595	-1,544	-19,2	1,36	-24	3,79
55	8.DİLİM-2 - 1	-3,48	-1,356	-19,2	1,36	-24	3,79
56	8.DİLİM-3 - 1	-3,435	-1,399	-19,2	1,36	-24	3,79
59	9.DİLİM-1 - 1	-2,528	-2,266	-19,2	1,36	-24	3,79
62	9.DİLİM-2 - 1	-3,435	-2,054	-19,2	1,36	-24	3,79
63	9.DİLİM-3 - 1	-3,378	-2,109	-19,2	1,36	-24	3,79
66	10.DİLİM-1 - 1	-2,373	-3,071	-19,2	1,36	-24	3,79
69	10.DİLİM-2 - 1	-3,277	-2,861	-19,2	1,36	-24	3,79
70	10.DİLİM-3 - 1	-3,217	-2,919	-19,2	1,36	-24	3,79
73	11.DİLİM-1 - 1	-2,125	-3,967	-19,2	1,36	-24	3,79
76	11.DİLİM-2 - 1	-3,025	-3,759	-19,2	1,36	-24	3,79
77	11.DİLİM-3 - 1	-2,963	-3,818	-19,2	1,36	-24	3,79
80	12.DİLİM-1 - 1	-1,789	-4,948	-19,2	1,36	-24	3,79
83	12.DİLİM-2 - 1	-2,686	-4,741	-19,2	1,36	-24	3,79
84	12.DİLİM-3 - 1	-2,622	-4,803	-19,2	1,36	-24	3,79
87	13.DİLİM-1 - 1	-1,368	-6,011	-19,2	1,36	-24	3,79
90	13.DİLİM-2 - 1	-2,261	-5,805	-19,2	1,36	-24	3,79
91	13.DİLİM-3 - 1	-2,195	-5,869	-19,2	1,36	-24	3,79
94	14.DİLİM-1 - 1	-0,865	-7,155	-19,2	1,36	-24	3,79
97	14.DİLİM-2 - 1	-1,753	-6,952	-19,2	1,36	-24	3,79
98	14.DİLİM-3 - 1	-1,685	-7,018	-19,2	1,36	-24	3,79
101	15.DİLİM-1 - 1	-0,277	-8,383	-19,2	1,36	-24	3,79
104	15.DİLİM-2 - 1	-1,161	-8,182	-19,2	1,36	-24	3,79
105	15.DİLİM-3 - 1	-1,091	-8,25	-19,2	1,36	-24	3,79
108	16.DİLİM-1 - 1	0,4	-9,698	-19,2	1,36	-24	3,79
111	16.DİLİM-2 - 1	-0,479	-9,5	-19,2	1,36	-24	3,79
112	16.DİLİM-3 - 1	-0,407	-9,57	-19,2	1,36	-24	3,79
115	17.DİLİM-1 - 1	1,172	-11,107	-19,2	1,36	-24	3,79
118	17.DİLİM-2 - 1	0,3	-10,913	-19,2	1,36	-24	3,79
119	17.DİLİM-3 - 1	0,374	-10,986	-19,2	1,36	-24	3,79
122	18.DİLİM-1 - 1	2,048	-12,619	-19,2	1,36	-24	3,79
125	18.DİLİM-2 - 1	1,185	-12,432	-19,2	1,36	-24	3,79
126	18.DİLİM-3 - 1	1,261	-12,506	-19,2	1,36	-24	3,79

#### 4. 1. 3. Yapım Aşamasına Göre Yerdeğiştirme Değişimleri

Yapım aşamaları dikkate alınarak yapılan yerdeğiştirme hesabında her bir kesit için ayrı ayrı yerdeğiştirme hesabı AASHTO LRFD [19] göre yapılmıştır. Tablo 7’de gösterildiği gibi 18. dilimin yapımıyla maksimum yerdeğiştirme 3,61 mm olarak elde edilmiştir. Yerdeğiştirme Sınır Değeri;

$$L/375$$

$$(24)$$

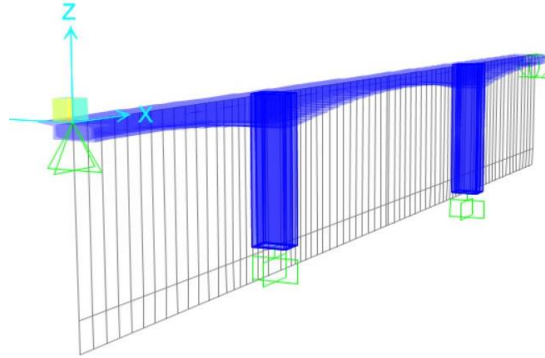
Denklem (24)'te L, başlık dilimine göre olan mesafeyi ifade etmektedir. 1. Dilim için 3m, 18. Dilim için 77, 5 m'dir. Yani aradaki mesafe dilimin başlangıç noktasına olan uzaklık değeridir. Tablo 7'de belirtildiği gibi tasarlanan dengeli konsol köprünün tabliyesi boyunca elde edilen yerdeğiştirmeler, izin verilen sınır değerleri aşmamıştır.

**Tablo 7.** Yerdeğiştirme sınır değer kontrolü

Dilim Adı	Dilimin Başlangıça Göre Uzaklığı (m)	Yerdeğiştirme Sınır Değeri (mm)	Yerdeğiştirme Değeri (mm)	Kontrol
1 nolu dilim	3	8	0,061	✓
2 nolu dilim	6	16	0,12	✓
3 nolu dilim	9	24	0,23	✓
4 nolu dilim	12,5	33	0,34	✓
5 nolu dilim	16	43	0,47	✓
6 nolu dilim	19,5	52	0,67	✓
7 nolu dilim	23,5	63	0,84	✓
8 nolu dilim	27,5	73	1,04	✓
9 nolu dilim	32,5	87	1,12	✓
10 nolu dilim	37,5	100	1,15	✓
11 nolu dilim	42,5	113	1,16	✓
12 nolu dilim	47,5	127	0,99	✓
13 nolu dilim	52,5	140	0,8	✓
14 nolu dilim	57,5	153	0,58	✓
15 nolu dilim	62,5	167	0,48	✓
16 nolu dilim	67,5	180	1,25	✓
17 nolu dilim	72,5	193	2,27	✓
18 nolu dilim	77,5	207	3,61	✓

#### 4. 1.4. Dengeli Konsol Köprünün Sürekli Kiriş Olarak Analizi

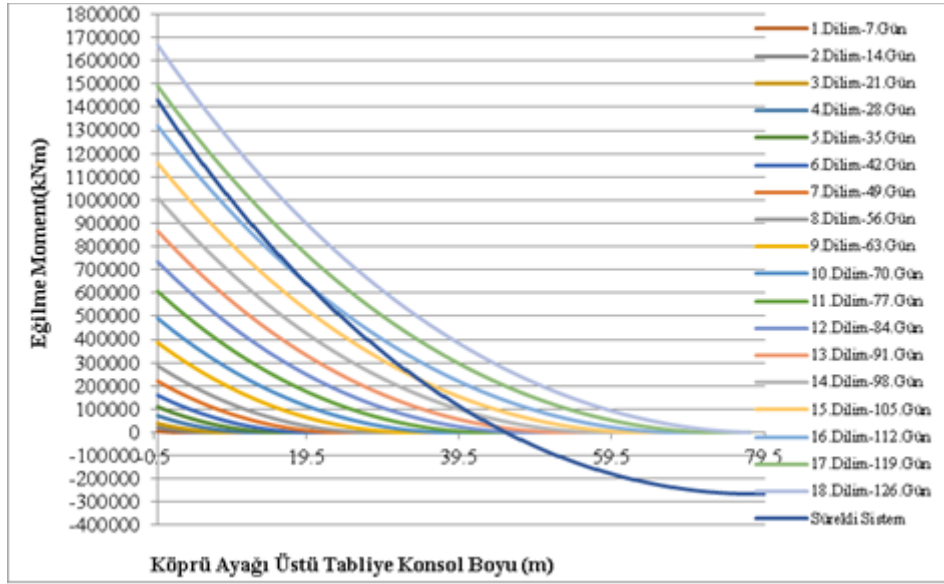
Sürekli kiriş analizi için öncelikle güzergah tayini yapılmıştır. Yapılan güzergah tayini sonunda temel, köprü ayağı ve tabliye yerleşim planı 3D sonlu eleman modeli Şekil 22'de görülmektedir. Öncelikle modele asfalt yükü etki ettirilmiştir. Burada 18,5 metre genişliğinde yola  $22\text{kN/m}^3$  birim ağırlık ile 0,06 m asfalt yapılmıştır.  $18,5\text{m} \times 22\text{kN/m}^3 \times 0,06\text{m} = 24,4\text{kN/m}$  olarak hesap edilmiştir.



**Şekil 22.** Dengeli konsol köprünün 3D sonlu eleman modeli

Kamyon yükleri aracın dingil ağırlığına göre AASHTO LRFD [19] yönetmeliğinde hesaplanmıştır. Bu yönetmelikte yolun şerit sayısına göre 2 şerit için 0,90 ve 3 şerit için 0,75 olacak şekilde katsayılar verilmiştir. Yani en kritik andaki duruma göre çözüm yapılacak olduğu için 3 kamyonun aynı anda şeritlerinden geçme durumu hesap edilmesi daha güvenli tarafta kalmayı sağlayacaktır. Bundan hareketle; H30-S24 kamyon yükünün uygulanması:  $60 \times 3 \times 0,75 = 135\text{kN}$ ;  $240 \times 3 \times 0,75 = 540\text{kN}$  burada 60 ve 240 kN kamyon yükünü 3 şerit sayısını 0,75 ise şerit sayısına göre azaltma katsayısını göstermektedir.

Şekil 23'te gösterilen grafikte yapım aşamasına ve sürekli sistem haline göre eğilme momenti karşılaştırması yapılmıştır. Grafikte koyu mavi olan sürekli sistem halindeki eğilme momenti diyagramıdır. Diğerleri ise dilimlerin yapımı sonunda elde edilen eğilme momenti diyagramıdır. Burada birinci dilimin sonunda elde edilen eğilme momentinden başlamak üzere her yapılan dilim sonrasında eğilme momenti hesap edilmiştir. Yapım aşaması dikkate alınarak yapılan çözüm metodunda elde edilen eğilme momenti sonuçları sistemin konsol olması sebebiyle negatif yönde ve %14 daha yüksek düzeyde ortaya çıkmıştır.



Şekil 23. Yapım Aşaması ve sürekli sistem eğilme momenti karşılaştırması

## 5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, dilimli dengeli konsol yapım yöntemi ile inşa edilen köprü hakkında genel bir bilgi aktarılmış olup, viyadük üstyapısı yapım aşamaları kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Köprü modeli çözümlemesi yapılırken sistemin yapım aşamalı ve sürekli sisteme geçtiği andaki analizleri dikkate alınmıştır. Analizlerde betonun zamana bağlı dayanım değişimi, elastisite modülünün değişimi, sünme ve rötre etkileri ile çeliğin relaksasyonu dikkate alınmıştır.

Uluslararası kabul gören AASHTO LRFD köprü tasarım yönetmeliği ve SETRA kurumunun şartları doğrultusunda dengeli konsol köprü tasarımı yapılarak, yapım aşamasında ele alınarak yük ve yük birleşimleri dikkate alınmıştır. Tasarlanan köprü modelinin sayısal verilerle birlikte uygun olduğu belirlenmiştir. Kapsamlı analize geçiş yapılmadan önce ön boyutlandırma yapıp köprünün mesnet üstünde, açıklık ortasında yeterli kesit yüksekliği ve güvenli tarafta kalacak biçimde seçilmiş halat adedi bulunduğu sonucuna ulaşılmıştır. Tasarımlar bir anda yapılacakmış gibi hesap edilmektedir. Bu durum yapıların statik sonuçlarını etkileyebilmektedir. Dengeli konsol köprüler gibi tasarımlarda kablo adeti yetersizliği ya da modelin toptan çökme durumları gibi sonuçlar meydana gelebilmektedir. Bu durumun etkilerinden kurtulmak için yapım aşaması ve sürekli haldeki durumu için analiz yapılması gerekmektedir.

Dilimli dengeli konsol köprü modelinde gerilme hesabı yapılmış ve AASHTO LRFD yönetmelik sınırları içinde kalındığı görülmüştür. Bir köprü imalatı sonrasında yönetmelikçe belirtilen gerilme sınır aralıklarında kalınması gerekmektedir. Ayrıca yerdeğiştirme sınır aralıklarında kalınması gerekmektedir. Dengeli konsol köprüde elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin ve eğilme momentlerinin tabliye boyunca değişimi dikkate alındığında, yerdeğiştirmelerin köprü açıklık

ortasına doğru arttığı, eğilme momenti ise köprü ayaklarının olduğu bölgede maksimum değere ulaştığı elde edilmiştir.

Yapım aşaması dikkate alınarak yapılan çözüm metodunda elde edilen eğilme momenti sonuçları sistemin konsol olması sebebiyle negatif yönde ve %14 daha yüksek düzeyde ortaya çıkmıştır. Bu durum köprünün statik hesabını etkileyen bir durum olarak öne çıkmaktadır. Böylece yapım aşamasında konsol olarak çalışan sistem için ilave tedbirler alınmıştır.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, önemli mühendislik yapılarından biri olan köprüler gibi yapımı uzun yıllar süren mühendislik yapılarının yapısal davranışlarının doğru bir şekilde belirlenmesi için zamana bağlı malzeme özellikleri ve geometrik doğrusal olmayan davranış dikkate alınarak gerçekleştirilen yapım aşamalarının dikkate alınması önem arz etmektedir.

### **Yazarların Katkıları**

Bu çalışma ÖÇ tarafından yöneticiliği üstlenilmiş MAŞ'ye ait lisans üstü tezden üretilmiştir. Her iki yazar da makalenin son halini okudu ve onayladı.

### **Çıkar Çatışması**

Yazarlar, çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

### **Kaynaklar**

- [1]. Wang, P.H., Tang, T.Y. and Zheng, H.N., "Analysis of cable-stayed bridges during construction by cantilever methods", *Comput. Struct.*, 2004, 82, 329-346.
- [2]. Zapico, J. L. , Gonzalez, M. P. , Friswell, M. I. , Taylor, C. A. ve Crewe, A. J., "Finite Element Model Updating of a Small Scale Bridge", *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 268, 993-1012.
- [3]. Adanur, S., Günaydın, M., Altunışık, A.C. and Sevim, B., "Construction stage analysis of humber suspension bridge", *Applied Mathematical Modelling*, 2012, 36, 11, 5492-5505.
- [4]. Atmaca, B., and Ateş, Ş., "Construction stage analysis of three-dimensional cable-stayed bridges", *Steel and Composite Structures*, 2012, 12, 5, 413-426.
- [5]. Çavdar, Ö., "Probabilistic sensitivity analysis of suspension bridges to near-fault ground motion". *Steel and Composite Structures*, 2013, 15(1), 15-39.
- [6]. Cluyet, N.C. and Shepherd, R., 1994, *Analysis of Concrete Cable-Stayed Bridges for Creep, Shrinkage and Relaxation Effects*. Department of Civil Engineering, Calofornia State Polytechnic University, Pomona, USA.
- [7]. Kwak, H.G. and Seo, Y.J., "Numerical analysis of time-dependent behaviour of pre-cast prestressed concrete girder bridges", *Constr. Buil. Mater.*, 2002, 16, 49-63,.
- [8]. Li, Z., Li, A. and Zhang, J., "Effect of boundary conditions on modal parameters of the Run Yang Suspension Bridge", *Smart Struct. Syst.*, 2010, 6(8), 905-920.
- [9]. Pindado, S., Meseguer, J. and Franchini, S., "The influence of the section shape of box-girder decks on the steady aerodynamic yawing moment of double cantilever bridges under construction", *J. Wind Eng. Indus. Aerod.*, 2005, 93, 547-555.
- [10]. Ubertini, F., "Prevention of Suspension Bridge flutter using multiple tuned mass damper", *Wind Struct.*, 2010,13(3), 235-256.
- [11]. Wang, S.Q., Xia, H., Guo, W.W. and Zhang, N., "Nonlinear dynamic response analysis of a long-span Suspension Bridge under running train and turbulent wind", *Interact. Multis. Mech.*, 2010,3(4), 309-320.

- [12]. Wang,X.M., Wang, H., Sun, Y., Mao, X.Y., and Tang, S.P., “Process-independent construction stage analysis of self-anchored suspension bridges”, *Automation In Construction*, 2020, 117, 107-127.
- [13]. Zhang, W.M., Ge, Y.J. and Levitan, M.L., “Aerodynamic flutter analysis of a new Suspension Bridge with double main spans”, *Wind Struct.*, 2011,14(3), 187-208.
- [14]. Somja, H. and Goyet, V.V., “A new strategy for analysis of erection stages including an efficient method for creep analysis”, 2008, *Eng. Struct.*, 30(10), 2871-2883.
- [15]. Şener, M. A., Dilimsel dengeli konsol yöntemi ile tasarlanan bir köprünün yapım aşamaları dikkate alınarak yapısal davranış ve maliyet açısından değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, 2020, Gümüşhane Üniversitesi.
- [16]. SETRA, 2007, Design Guide Pretressed Concrete Bridges Built Using the Cantilver Method. Fransa, Service d’Etudes Techniques des Routes et Autoroutes.
- [17]. SAP 2000, 2015, Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures Inc, Berkeley, California, USA.
- [18]. CEB-FIP, 1990, Model Code, Thomas Telford, London.
- [19]. AASHTO, 1998, Commentary to Standard Specifications for Highway Bridges,American Association of State Highway and Transportation Officials.