

## Betonarme Yapı Elemanlarında En Uygun Donatı Yerleşiminin Belirlenmesi: Konsol Kiriş Örneği

Fatih Mehmet ÖZKAL<sup>1</sup>, Habib UYSAL<sup>2</sup>

**ÖZET:** Bu çalışma kapsamında, betonarme yapı elemanlarının kesme etkisinin hâkim olduğu bölgelerindeki hesap ve tasarım zorluklarının üstesinden gelmek için geleneksel yöntemler yerine çoğunlukla tercih edilen çubuk benzeşimi yöntemiyle donatı düzeninin belirlenmesi üzerine bir yaklaşım sunulmuştur. Çalışma dâhilinde kullanılan topoloji eniyilemesi algoritması, muhtelif yönlerden daha da iyileştirilmek ve çubuk benzeşimi yöntemiyle bütünleştirilmek suretiyle betonarme bir konsol kirişe uygulanmıştır. Deneysel aşamada hem geleneksel tasarım adımlarıyla ve hem de tümleşik tasarım yöntemiyle deney numunelerinin donatı düzenleri oluşturulmuş ve yapısal davranışlarının mukayesesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında, topoloji eniyilemesi ve çubuk benzeşimi yöntemlerinin birlikte kullanılması halinde, betonarme yapı elemanlarının tasarımı için geleneksel yöntemlere nazaran daha başarılı sonuçlara ulaşıldığı ve önerilen yöntemin kullanılmasıyla tasarım mühendisleri için tecrübe gerektirmeden büyük kolaylıklar sağlanacağı düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Betonarme, çubuk benzeşimi, donatı yerleşimi, sonlu elemanlar yöntemi, topoloji eniyilemesi

## Determination of the Optimum Reinforcement Layout in RC Structural Members: Cantilever Beam Example

**ABSTRACT:** In this study, a reinforcement detailing approach based on strut-and-tie modeling is presented. This method is mostly preferred instead of conventional methods in order to overcome the calculation and design difficulties at the regions of reinforced concrete (RC) structures where shear effect is dominant. Topology optimization algorithm has been improved from various aspects, integrated with strut-and-tie method and applied on an RC cantilever beam. At the experimental stage of the study, reinforcement layout of test specimens have been designed by conventional method as well as integrated design method and a structural behavior comparison has been performed. Based on the results obtained, it has been concluded that superior results could be achieved for the design of RC structural members and provide convenience to the design engineers by eliminating the experience required in case topology optimization and strut-and-tie methods are applied together.

**Keywords:** Finite element method, reinforced concrete, reinforcement layout, strut-and-tie, topology optimization

<sup>1</sup> Erzincan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzincan, Türkiye

<sup>2</sup> Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

Sorumlu yazar/Corresponding Author: Fatih Mehmet ÖZKAL, fmozkal@erzincan.edu.tr

## GİRİŞ

Topoloji kavramı, en basit haliyle bir elemanı oluşturan ağ yapısı ya da iç geometrisi olarak ifade edilebilir. Topoloji eniyilemesi tabanlı yöntemler arasında yer alan “evrimsel yapı eniyilemesi” (ESO), tasarım alanındaki sonlu elemanlar arasında etkisiz olanların bulunup yapıdan ihraç edilmesi mantığı üzerine kurulmuştur. Gerçekleştirilen sonlu eleman çözümlemesi sonucunda maruz kaldığı gerilme veya şekil değiştirme enerjisi değeri düşük olan elemanların, yapı davranışına sunduğu katkının da düşük olduğu fikrinden hareketle bu elemanların kaldırılması halinde kalan elemanların daha etkin bir katkıya sahip olacağı ve yapı başarımının artırılacağı düşünülmüştür.

Betonarme bir elemandaki sürekli ortamı çubuk sisteme çevirerek yapılan eniyileme çalışmaları ise 20.nci yüzyılın başlarında görülmüş, bunu takiben aynı fikirden hareketle bazı benzeşim yöntemleri geliştirilmiştir. Bahsedilen benzeşim yöntemleri arasında bulunan çubuk benzeşimi yöntemi, belirlenen iç gerilme yörüngeleriyle uyumlu olarak eleman içerisinde hayali bir kafes sistem olduğu, uygulanan yükün bu kafes üzerinden mesnetlere aktarıldığı fikrine dayanmaktadır (Özkal and Uysal, 2016). İç gerilme yörüngelerini yorumlayıp kafes sistemin belirlenmesi aşamasındaki uygulama tecrübesi gerekliliğini bertaraf etmek için topoloji eniyilemesinin kullanılması üzerine literatürde tavsiye niteliğinde çalışmalar bulunmaktadır. Ancak donatı detaylandırması için topoloji eniyilemesi ve çubuk benzeşimi yöntemlerinin birlikte kullanılabilceğini ifade eden bu çalışmalar kuramsal nitelikte kalmış, mevcut standartlara dayalı detaylı bir çalışma ise yapılmamıştır.

Gerçekleştirilen çalışmada, bu husus üzerinde durulmuş ve evrimsel yapı eniyilemesi temeline sahip topoloji eniyilemesi yöntemi ile çubuk benzeşimi yöntemi birlikte ele alınarak betonarme yapı elemanlarında donatı detayının belirlenmesi üzerine yeni bir tasarım yaklaşımında bulunulmuştur.

## MATERYAL VE YÖNTEM

### En Uygun Topolojik Tasarımın Belirlenmesi

Yapısal eniyileme, önceden tanımlanan bazı gereksinimleri karşılayan ve istenen amaca belirli geometrik ve davranış kısıtları altında ulaşmayı sağlayan makul bir yapı elde etme temeli üzerine kurulmuş olup (Tang et al., 2005); en basit haliyle bir yapı için en iyi başarıma ulaşmayı hedefleyen mühendislik, matematik, fen bilimleri ve teknoloji alanlarında bir kaynaşma olarak kabul edilmektedir (Querín et al., 2000). Yapısal eniyileme, tasarım aşamasında zaman zaman uğraştırıcı bir niteliğe sahip olsa da ekonomik yönden de en mükâfatlandırıcı işlem olarak tanımlanmıştır (Xie and Steven, 1993). Ön tasarım safhasında etkili bir karar mekanizması olan topoloji eniyilemesi, günümüzde önemli derecede rağbet görmekte ve uygulama alanı sürekli genişlemektedir. Hiyerarşik yönden altta kalan boyut ve şekil eniyilemesi yöntemleri ile mukayese edildiğinde, yapı başarımının artırılmasında daha fazla etkinliğe sahip olduğu çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur (Jang and Kwak, 2005). Ayrıca yapısal eniyileme yöntemlerinde dikkate alınan hususlardan birisi de tam gerilmeli tasarım (FSD) kavramını karşılayan sonuçlar elde etmektir. Tam gerilmeli tasarım durumunda, yapı elemanlarının her biri izin verilen azami ya da asgari değerde gerilmeye maruzdur. Sınır gerilme değerleri, her bir yapısal bileşen için eşit ise söz konusu yapı ayrıca eşit gerilmeli bir yapı olarak da nitelendirilmektedir. Yapı malzemesinin bütünüyle eşit gerilme altında olduğu yani kullanılan malzemedan azami oranda fayda sağlandığı yapılar da çoğunlukla literatürde tam gerilmeli yapı olarak kabul edilmektedirler (Tanskanen, 2002).

ESO yöntemi uygulanarak bir yapı için en iyi tasarımın aranması sürecinde işlem sonuna kadar gerçekleştirilen her döngüdeki tasarım, en iyi tasarım olarak nitelendirilebilir. Ancak bunun için belirli kıstaslar konulmalı, diğer bir ifadeyle topoloji eniyilemesinin hangi amaçla gerçekleştirdiği belirlenmelidir. Özellikle ESO'nun da temel hedeflerinden biri olan “tam gerilmeli tasarım durumu” göz önünde tutulmalı ve bu duru-

ma yakın tasarımlar içerisinde toplam ağırlık (hacim), rijitlik, yapı bütünlüğü ve uygulanabilirlik gibi hususlara göre seçim yapılmalıdır. Bu konu üzerine literatürde farklı yaklaşımlar bulunmakta olup, bu çalışma kapsamında da yeni bir yaklaşımla geliştirilen aşağıdaki başarımların göstergesi kullanılmıştır (Özkal, 2012). Başarımların göstergesi kavramından kasıt, yapısal davranışın belirlenen kıstaslar temelindeki performans seviyesidir.

$$PI_{fsd} = \frac{(\sigma_{0,max}^{vM}/\sigma_{0,avg}^{vM}) \cdot u_{0,max} \cdot W_0}{(\sigma_{i,max}^{vM}/\sigma_{i,avg}^{vM}) \cdot u_{i,max} \cdot W_i} \quad (1)$$

Oluşturulan başarımların göstergesinde tam gerilmeli tasarım (fully stressed design) hedefine dikkat çekmek ve literatürde bugüne dek sunulan diğer başarımların göstergeleriyle karıştırılmasını engellemek amacıyla  $PI_{fsd}$  isimlendirmesi kullanılmıştır. Yukarıdaki ifadede 0 alt indisi başlangıç tasarımını,  $i$  alt indisi ise eniyileme sürecindeki mevcut döngüye ait tasarımı belirtirken;  $\sigma_{0,max}^{vM}$  ve  $\sigma_{i,max}^{vM}$  ile en büyük von Mises gerilmeleri,  $\sigma_{0,avg}^{vM}$  ve  $\sigma_{i,avg}^{vM}$  ile ortalama von Mises gerilmeleri,  $u_{0,max}$  ve  $u_{i,max}$  ile en büyük yer değiştirmeler,  $W_0$  ve  $W_i$  ile de yapı ağırlıkları tanımlanmaktadır.

### Çubuk Benzeşimi Yöntemi

İnşaat mühendisliği alanında kafes sistemler üzerine yapılan çalışma yoğunluğunun aksine betonarme yapı elemanlarının tasarımına yönelik eniyileme çalışmalarının genellikle gölgede kaldığı ve araştırmacıların bu konu üzerine yeterince eğilmediği söylenebilir. Bu durumun sebebinin, betonarme yapı davranışının kesin olarak tahmin edilememesi olduğu ileri sürülebilmektedir. Ancak bilgisayar teknolojisindeki yenilikler ile özellikle sonlu elemanlar yönteminin gelişimi ve kullanım kolaylığı, bu yöndeki şüpheleri daha az indirmektedir. Son yirmi yılda betonarme elemanların çubuk sistemle tasarımı üzerine yoğun araştırmalar yapılmış ve hesap yöntemleri geliştirilmiştir (Ersoy ve Özcebe, 2001). Bütün yapı elemanları için tahmini, deneysel veya yaklaşık hesap yöntemlerinin yerine fiziksel modellere dayanan ve tutarlı bir tasarım yöntemine duyulan ihtiyaç sebebiyle, kafes ben-

zeşiminin geliştirilmiş hali olan “çubuk benzeşimi yöntemi” geliştirilmiştir (Schlaich et al., 1987). Çubuk benzeşimi yöntemi, iç kuvvetler akımında karışıklık görülen süreksizlik bölgelerinin yanı sıra dışı yapıların tasarımında ve boyutlandırılmasında etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemde en önemli husus, tasarımcının yeterli seviyede bilgi ve deneyime sahip olması gerektirir. Aksi takdirde başarımların yüksek tasarımların elde edilmesi mümkün olmayacağı gibi hayati hatalarla karşılaşmak da muhtemel görünmektedir.

Söz konusu yöntem, kiriş-kolon birleşimleri, yüksek kirişler, kısa konsollar, mesnet üzerine oturan kiriş bölgeleri gibi çok sık uygulanmayan ve her bir durum için ayrı detaylandırma gerektiren yapıların tasarımında ve boyutlandırılmasında etkili bir yaklaşım olarak kullanılmaktadır. Asal bir detaylandırma yöntemi olarak da nitelendirilebilen çubuk benzeşimi yöntemi; deneysel yöntemler, yaklaşık hesaplar ve tahmine dayalı uygulamaların yerini almakta olup, betonarme yapıların davranışını anlamak için yol göstericidir (Yavuz, 1999).

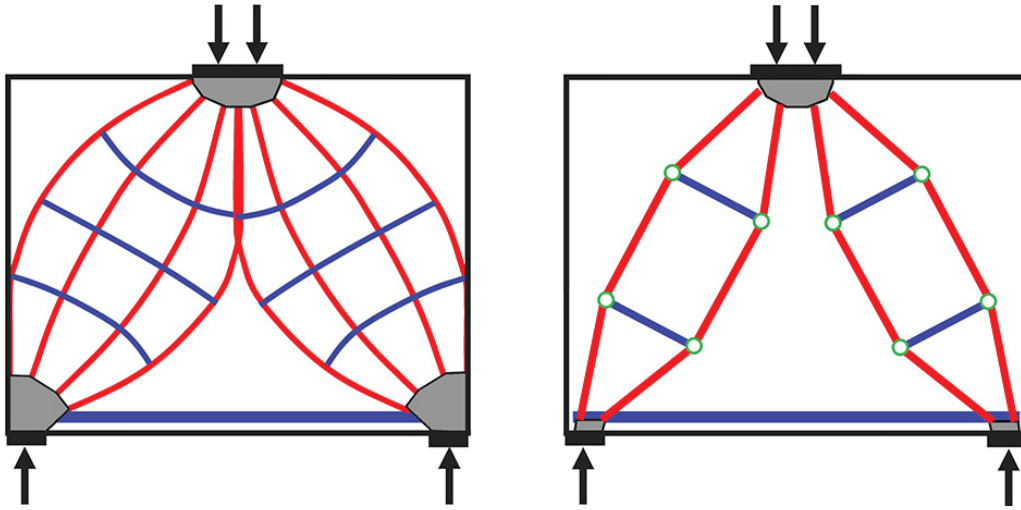
Çubuk benzeşimi yönteminin uygulanmasındaki beceriklilik, yapı davranışını anlamak için ileri seviyede bir tahlil gücü ve geçmişe dönük uygulama tecrübesini gerektirmektedir. Ancak bu yöntemle bir yapı geometrisi için belirli bir detaylandırma yapılamamaktadır. Zira mesnet ve yükleme koşullarına göre birbirinden çok farklı sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. Dolayısıyla bu yöntem tasarımcılara yeni uygun modeller için sadece gerekli teknikleri ve kuralları aktarmakta; yöntemin başarılı olması için gerekli en önemli husus olan kafes sistemin seçimini ise tasarımcıya bırakmaktadır.

Çubuk benzeşimi modelinin oluşturulması, esasen sonlu elemanlar analiziyle kolayca belirlenebilecek yapı elemanındaki asal gerilme yörelerine dayanmaktadır. Eğer bu yörelerin tespiti mümkün değilse, tahmini olarak yük yolunun belirlenmesiyle model oluşturma aşamasına geçilebilmektedir. Ancak bu yöntemle gerçekleştirilen tasarım çalışmalarında da birden çok çubuk benzeşimi modeliyle karşılaş-

mak mümkün olup, en uygun modelin seçilip seçilmediği kesin değildir.

Daha önce belirtildiği üzere model oluşturmada tasarımcının kararları ön plânda yer almaktadır. Bu durumda önerilen yöntem ise elemana uygulanan yükün en düşük değerinde kuvvet taşıyacak ve yine en düşük değerinde şekil değiştirmeye uğrayacak durumda en kısa yoldan mesnetlere ulaştığını kabul etmektir. Çeliğin şekil değiştirme kapasitesi betona nazaran daha yüksek

olduğundan en az donatı gerektiren modelin en uygun model olduğu literatürdeki öneriler arasındadır (Mataji, 1997). Şekil 1'e dikkat edilecek olursa tekil yüklemeye maruz bir yüksek kirişte gerilme yörüngeleri belirlenmiş ve bu yörüngelere göre eleman detaylandırmasında şişe şekilli basınç çubukları ile çekme çubukları yerleştirilmiştir. Betonarme yapılarıdaki basınç çubukları ile düğüm noktaları beton, çekme çubukları ise çelik olarak uygulanmaktadır.



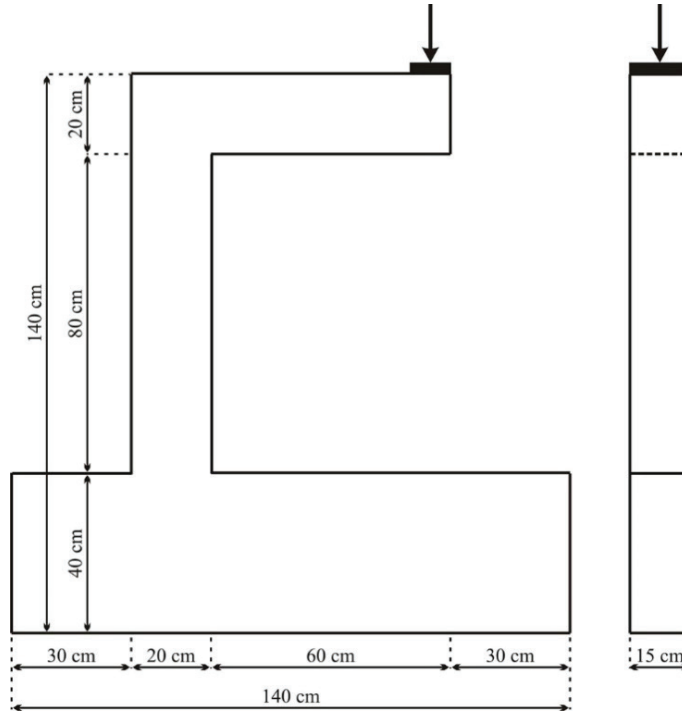
Şekil 1. Tekil yük uygulanan yüksek bir kirişteki çubuk benzeşimi modeli (Özkal, 2012)

### Deney Numunelerinin Tasarımı

Bu çalışma kapsamında belirlenen konsol kirişe ait bir numune TS500 standardı dâhilindeki yönergelerle, diğer numune ise önce topoloji eniyilemesi ve ardından da çubuk benzeşimi yöntemlerinin uygulanmasıyla oluşturulmuştur. Gerek bu çalışma kapsamında tanıtılan yöntem ve gerekse geleneksel yöntemle oluşturulan deney numunelerinin her ikisinde de kolonların donatı detaylandırmasında bir farklılık bulunmamaktadır. Söz konusu yöntem özellikle kolon-kiriş birleşimleri ve yük uygulanan bölgelerde (süreksizlik bölgeleri) etkili olduğu için kolonların donatı detayları da geleneksel yöntemle belirlenmiştir. Bu sayede yeni detaylandırma yöntemine dair daha açık bir muhakeme yapılması mümkün olacaktır.

Geleneksel yöntemle tasarlanan deney numunesi, Türk standardının (TS500-2000) dikkate alınmasından

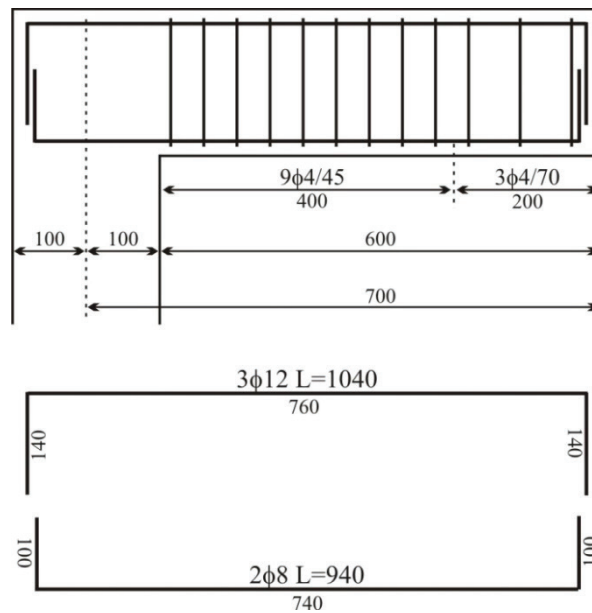
dolayı "TS" ön takısıyla, yeni yöntemle tasarlanan numune ise çubuk benzeşimi yönteminden (strut-and-tie model) hareketle "STM" ön takısıyla isimlendirilmiştir. Ancak burada unutulmaması gereken nokta, çubuk benzeşimi modellerinde de esas itibarıyla TS500 standardı göz önünde tutulmuştur. Sadece bu yöntemle has emniyet şartları (düğüm bölgelerindeki emniyet gerilmeleri, basınç ve çekme çubukları arasındaki açılar, vs.) için literatürden faydalanılarak yine Türk standardına uyarlanmak suretiyle hesaplarda kullanılmıştır. Ayrıca bütün numunelerin betonarme hesabında beton ( $\gamma_{mc}$ ) ve çelik ( $\gamma_{ms}$ ) için malzeme emniyet katsayıları da 1,0 olarak alınmış ve bu şekilde tasarım dayanımları elde edilmiştir. Deney modeli, Şekil 2'den kalıp boyutları ve yükleme şekli görüleceği üzere, kiriş uç noktasından 30 kN değerinde tekil yük uygulanan, kolon üzerine oturmuş konsol bir kiriş olarak ele alınmıştır.



Şekil 2. Deney modeline ait kalıp ve yükleme detayları

Her iki deney numunesi için özdeş olarak tasarlanan kolona yönelik yapılan hesaba göre  $2\phi 8+4\phi 12$  boyuna donatı yerleştirilmiştir. Etriyeler için ise orta bölgede  $\phi 4/70$  mm, sarılma bölgeleri ve temel içinde ise  $\phi 4/50$  mm sonucuna ulaşılmıştır. Konsol kiriş için takip edilen geleneksel tasarım adımlarına göre gerekli donatı alanı

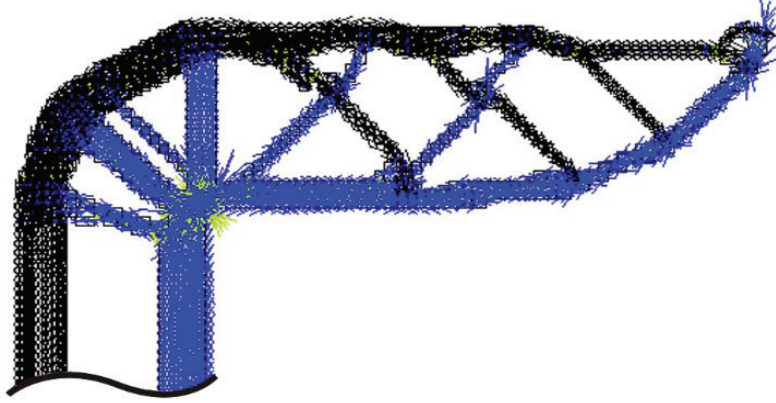
kiriş üst bölgesinde  $300,7 \text{ mm}^2$  olarak hesaplanmış ve yerleştirilecek donatılar  $3\phi 12$  ( $339,3 \text{ mm}^2$ ) olarak belirlenmiştir. Etriye hesabıyla da uç bölgede  $\phi 4/70$  mm, sarılma bölgesinde ise  $\phi 4/45$  mm sonucu elde edilmiştir. TS500'e göre belirlenen konsol kirişteki donatı yerleşimi Şekil 3'te verilmiştir.



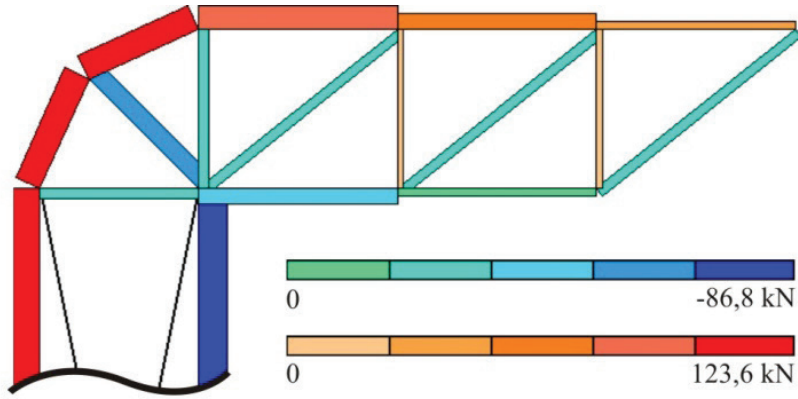
Şekil 3. TS deney numunesine ait kirişte donatı yerleşimi (birimler mm'dir)

Çubuk benzeşimi yöntemiyle tasarım için ise ilk olarak kolon ve konsol kirişe birlikte topoloji eniyilemesi uygulanmıştır. Başarım göstergesi ( $PI_{fsd}$ ) dikkate alınarak belirlenen en iyi tasarımın asal gerilme dağılımına göre vektörel gösterimi Şekil 4'te sunulmuştur. Siyah vektörler çekme gerilmelerini, mavi vektörler ise basınç gerilmelerini temsil etmektedir. Bu tasarı-

ma dayanılarak ve sistemdeki oynaklığı önlemek için düşük değerde gerilme bulunan bölgelere ilave çubuk yerleştirilerek hazırlanan kafes sistemin sonlu elemanlar çözümlemesi gerçekleştirilmiş ve kafes sistemdeki çubukların taşıdığı kuvvetlerin görsel biçimde sunumu Şekil 5'te verilmiştir.



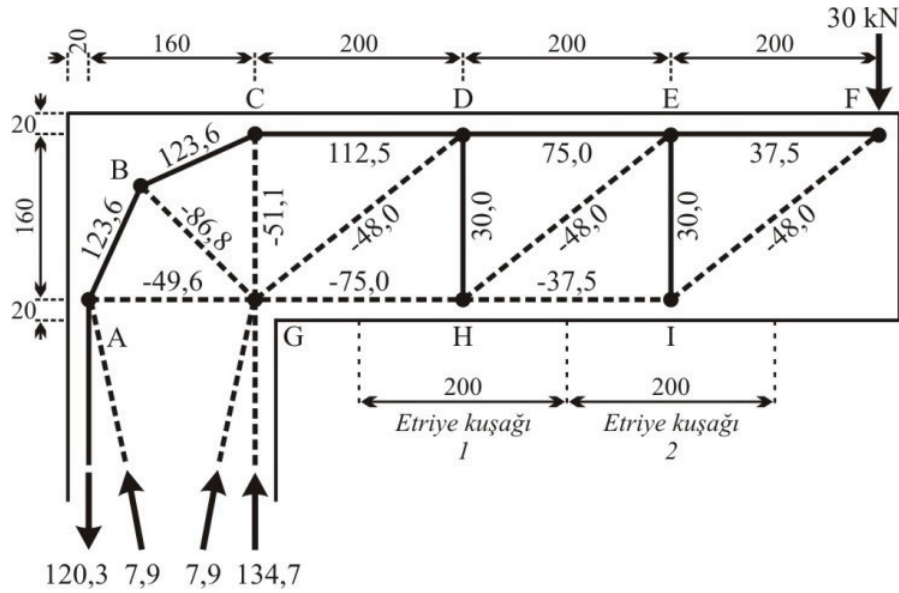
Şekil 4. STM deney numunesine ait en iyi topolojik tasarım



Şekil 5. STM deney numunesi için oluşturulan kafes sistem

Şekil 4'te siyah vektörlerle gösterilen çekme gerilmesine maruz çapraz kısımlar kiriş eksenine dik hale getirilerek etriye olarak değerlendirilmesi sağlanmıştır.

Kafes sistemin çözümü ile bütün çubukların taşıdığı kuvvet değerleri elde edilmiş ve çelik çekme çubukları ile beton basınç çubukları belirlenmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. STM deney numunesine ait kiriş için oluşturulan çubuk benzeşimi modeli (birimler kN ve mm'dir)

Kafes sistemdeki enine çekme çubukları da iki etriye kuşağı oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Donatı yerleşiminin belirlenmesi için öncelikle boyuna donatılar ve etriye aralıkları belirlenmiş, sonrasında ise beton basınç çubukları ve düğüm noktaları için emniyet tahkikleri gerçekleştirilmiştir. Basınç çubukları ve düğüm noktalarının tahkiki sonucunda STM numunesi için çubuk benzeşimi yöntemiyle oluşturulan konsol kirişteki donatı yerleşimi Şekil 7'de verilmiştir. Oluşturulan kafesteki etriye kuşakları haricinde kalan kısımlara ise yine montaj kolaylığı gayesiyle TS numunesindeki etriye yerleşimleri uygulanmıştır.

STM numunesinin donatı detaylandırmasında konsol kirişin üst kısmında bulunan  $\phi 12$ 'lik donatılar kesilmesi gereken noktalarda kesilmemiş, çubuk eksenini doğrultusunda kenetlenme payı bırakmak yerine topolojik tasarımdan hareketle çapraz olarak kiriş alt kısmına indirilmiş ve uçlarında kanca oluşturulmuştur. Bu sayede hem donatı-beton kenetlenmesinin artırılması ve ayrıca kenetlenme boyunun da kesme etkilerine karşı yapı elemanının dayanımına katkı sunması hedeflenmiştir. Boyuna donatı çapları küçültülüp sayısı artırılmak suretiyle çubuk benzeşimi modelinin daha etkin çalışması da mümkündür ancak beton yerleşim kolaylığı düşünülerek bu fikir uygulanmamıştır.

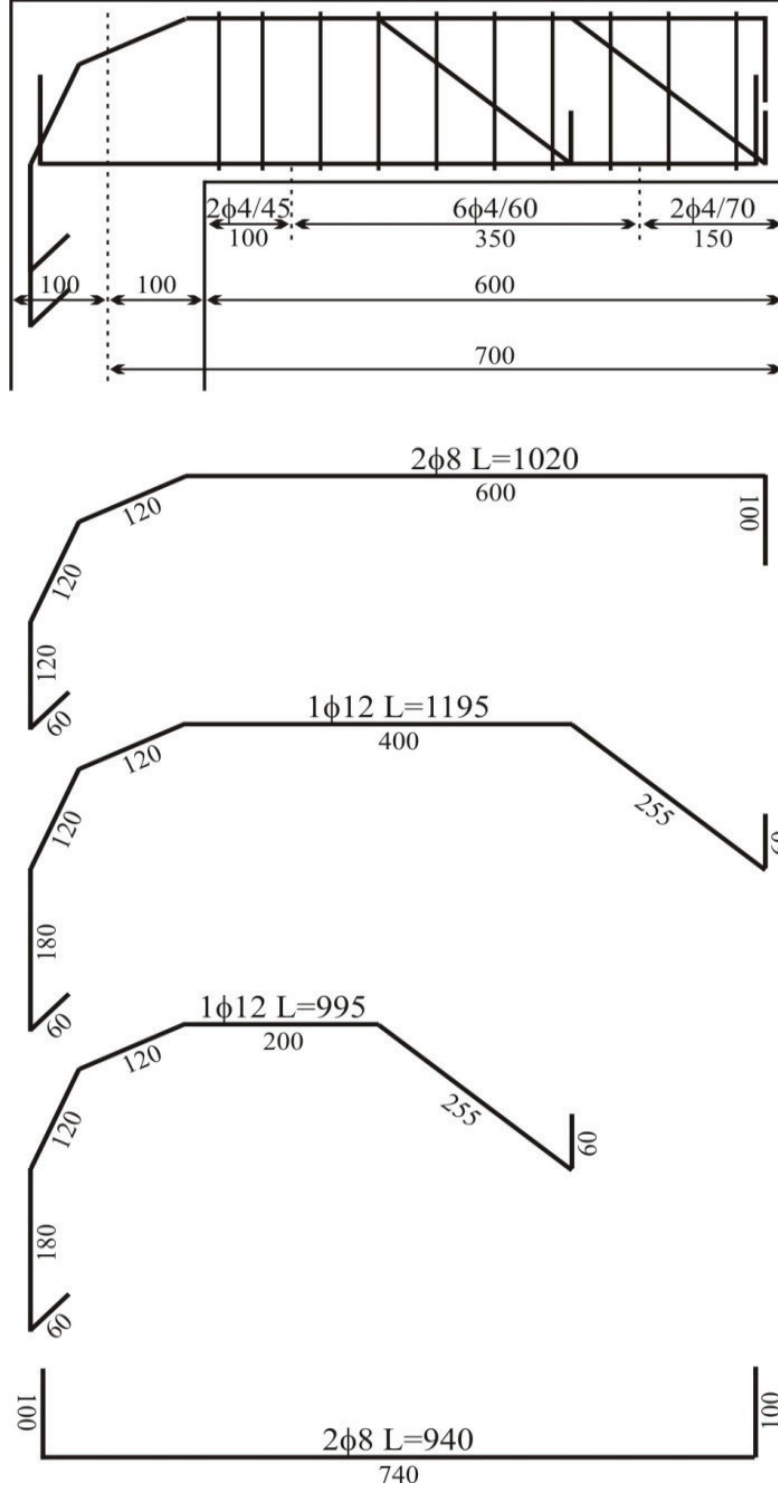
### Malzemeler ve Deney Düzenegi

Kullanılan beton, bütün deney elemanlarının aynı gün ve tek dökümlü olarak hazırlanabilmesi için hazır beton santralinden temin edilmiştir. Hazır beton santraline verilen siparişte betonun en büyük tane çapının 15 mm, 28 günlük dayanımının 30 MPa ve çökme değerinin 20 cm olması istenmiştir. Betonarme deney numunelerinde kullanılan tüm donatılar S420 ve S220 kalitesinde seçilmiş olup tek seferde ve bir üretimden alınmıştır. Yapılan deneyler sonucunda çekme dayanımı değerleri, boyuna donatılar ( $\phi 8$ ,  $\phi 10$ ,  $\phi 12$ ,  $\phi 16$ ) için 428 MPa, enine donatılar ( $\phi 4$ ,  $\phi 6$ ) için ise 233 MPa olarak tespit edilmiştir.

Bu çalışma kapsamındaki betonarme deneyler, Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Tatbiki Mekanik Laboratuvarı'ndaki deney düzeneginde gerçekleştirilmiştir. 245 kN basınç kapasiteli ve çift tesirli hidrolik yükleme silindiri ile el kontrollü ve çift tesirli bir pompa kullanılarak yükleme yapılmıştır. Deney numunelerinin hesap yüklerine göre her biri için farklı değer aralıklarında olmak üzere başlangıçta yük kontrollü, tasarım akma dayanımı için hesaplanan yük değerinden sonra ise yer değiştirme kontrollü olarak tekdüze yükleme programı uygulanmıştır.

Deney numunelerine uygulanan yük değerleri, 250 kN kapasiteli ve çift yönlü (basınç/çekme) çalışabilen yassı tip bir yük hücresiyle ölçülmüştür. Yer değiştirme ölçümlerinde, 100 mm ölçüm kapasitesine sahip yer değiştirme ölçer kullanılmıştır. Eğrilik ölçümleri

için kolon-kiriş birleşim bölgelerinde betonun dış lifleri üzerindeki şekil değiştirmeleri tespit amacıyla 30 mm boyundaki gerinim pulları yapıştırılmış ve yeterli ölçüm hassasiyetini sağlamak için özel bir malzemeyle kaplanmıştır.



Şekil 7. STM deney numunesine ait kirişte donatı yerleşimi (birimler mm'dir)







Şekil 9. TS numunesinin göçme sonrasındaki görünüşü

STM deney numunesine uygulanan yükleme programında ise 15 kN değerine ulaşıldığında, TS numunesine nazaran sistem daha mukavim davranış göstererek kolonun üst kısımlarında iki yatay çatlak, kirişin ise birleşim noktası hizasında bir düşey çatlak oluştuğu gözlenmiştir. 20 kN seviyelerinde ise kolon ve kirişteki çatlaklar uzamış, kolon boyunca düzenli aralıklarla yeni yatay çatlaklar gelişmiştir. 25 kN'da iyice uzayan ancak henüz kolon eksenini geçmeyen çatlaklara 30 kN'da kolon-kiriş birleşim bölgesinin dıştaki köşesinden başlayıp 45° eğimle içteki köşeye uzanan bir çatlak ve konsol kirişin üst kısmında fazla uzun boyda olmayan üç çatlak daha eklenmiştir. 35 kN'da ise birleşim bölgesi ve kolondaki çatlaklar bir miktar daha uzama göstermiş ve aralarında birkaç yeni çatlak daha gelişmiştir.

Yüklemeye devam edildikçe kolondaki çatlaklar artık kolon eksenini iyice geçmiş ve hatta kolonun üst kısımlarındaki çatlaklar genişlemiştir. 44 kN değerine ulaşıldığında ise kolonda bulunan, kolon-kiriş birleşim bölgesinin 15 cm aşağısındaki ardışık iki çatlakta dikkate değer biçimde beton ayrılması gerçekleşmiş ve bu çatlakların hizasında kolonun iç tarafında da beton kabuğun ezilmeye başladığı görülmüştür. Nihayet 46,15 kN'un görülmesini takiben yük değeri düşmeye başlamış ve sonrasında sistemin göçtüğü kabul edilmiştir.

STM deney numunesinin göçme anında çekilen fotoğrafı Şekil 10'da verilmiştir

Bu değerden sonra da yükleme devam ettirildiğinde sistemin hâlâ yük aldığı ve yük değerinde ani düşme yaşanmadığı görülmüştür. Zira 25 kN değerine kadar küçük aralıklı yük düşmeleri gerçekleşmiş ve hidrolik silindirin yükleme başlığının uzama kapasitesine ulaşıldığında deneye son verilmek zorunda kalınmıştır.

Deney sonunda STM numunesi (Şekil 11) incelendiğinde kolonun üst kısmındaki çatlaklardan ilkinin, kirişten gelip çeyrek bir daire çizerek kolona inen 8 mm'lik donatının kancası hizasında olduğu görülmüştür. Ancak STM numunesinde kirişteki donatıların çapları farklı olduğundan kenetlenme boyları da farklı uygulanmıştır. Bu kancadan 60 mm aşağıda ise 12 mm'lik iki ayrı donatının kancaları bulunmaktadır.

Kenetlenme boylarının farklı olması sebebiyle ikinci önemi çatlak da bu kanca hizasında açılmış ve kolonda ani bir kırılma olmadan sistem sünekliğini muhafaza edebilmiştir. Ayrıca kolon-kiriş birleşim bölgesine bakılacak olursa, TS numunesinin aksine STM numunesinde tehlike arz eden en ufak bir hasarın gelişmemiş olması da dikkate değer ve çok önemli bir husustur.



Şekil 10. STM numunesinin göçme anındaki görünüşü



Şekil 11. STM numunesinin göçme sonrasındaki görünüşü

## BULGULAR VE TARTIŞMA

TS numunesi için yapılan hesaba göre konsol kiriş üstünde çekme donatısı olarak  $300,7 \text{ mm}^2$  olarak hesaplanmış ve yerleştirilecek donatılar  $3\phi 12$  ( $339,3 \text{ mm}^2$ ) olarak belirlenmiştir. STM numunesinde ise topoloji eniyilemesi ve çubuk benzeşimi yöntemlerinin uygulanmasını takiben  $288,7 \text{ mm}^2$  gerekli donatı alanı hesaplanmış,  $2\phi 8 + 2\phi 12$  ( $326,2 \text{ mm}^2$ ) şeklinde donatı seçimi yapılmıştır. Kiriş üst kısmındaki donatıların tümü birleşim noktasında çeyrek bir daire biçiminde kolona indirilirken,  $\phi 8$ 'lik donatılar ise kirişin  $1/3$  ve

$2/3$ 'ünde eğimli şekilde kiriş altına yönlendirilmiştir. Belirlenen kafes modelini benzeştirebilmek gayesiyle gerekenden %13 daha fazla donatı kullanılmış olmasına karşın yine de TS numunesindeki donatı miktarına kıyasla daha düşük değerde kalmıştır. Kesme donatısı bakımından ise TS numunesindeki 12 adet etriyeye karşılık STM numunesinde daha seyrek bir etriye yerleşimi uygulanmış ve aynı çapta 10 adet etriye kullanılmıştır. TS numunesi  $36,44 \text{ kN}$  değerine kadar yük taşıyıp kolon üst hizasında konsol kirişin ayrılması suretiyle göçmüştür. STM numunesi ise  $46,15 \text{ kN}$

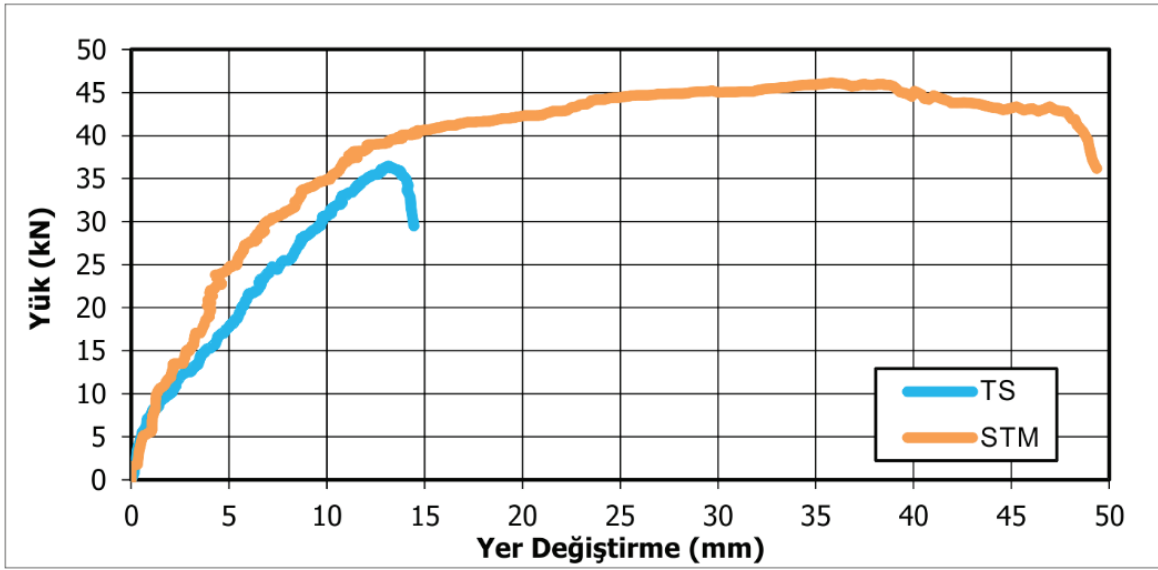
yük seviyesinde kirişten gelip çeyrek bir daire çizerek kolona inen donatıların kancaları hizasında iki ayrı çatlağın önemli derecede açılmasıyla ani bir kırılma olmadan göçmeyi tamamlamıştır.

Deneylere ait fotoğraflar incelendiğinde görülmektedir ki, geleneksel yöntemlerle detaylandırılan TS numunesinde kolon-kiriş bütünlüğü sağlanamamış ve birleşim bölgesinde göçme gerçekleşmiştir. Ancak STM numunesinde hem birleşim bölgesi tasarımı ile sistemin rijitliğine yüksek oranda katkıda bulunulmuş ve hem de kiriş içerisindeki donatıların yeni yerleşimi sayesinde sünek bir davranış ve göçme hali elde edilmiştir. Buna ilaveten göçme sonrasında yüklemeye devam edildiğinde TS numunesi kolonundaki boyuna donatıların birleşim bölgesi hizasında koptuğu görülmüştür. Ortaya çıkan geniş çatlaklara rağmen STM numunesi kolonunda ise cid-

di bir donatı hasarı gelişmemiştir. Her iki deney numunesi için konsol kirişin yük-yer değiştirme grafiği Şekil 12’de sunulurken; enerji tüketme kapasitesi, ötelenme ve eğilme rijitlikleri ile ötelenme ve eğrilik sünekliği katsayıları Çizelge 1’de verilmiştir.

Enerji tüketme kapasitesi yönünden altı kata yakın bir fark ortaya çıkarken ötelenme ve eğilme rijitliği değerleri de yine STM numunesinin üstünlüğünü ortaya koymaktadır.

Ötelenme ve eğrilik sünekliği katsayılarına göre ise sistemin genel davranışına bakıldığında STM numunesinde üç katı aşkın bir ötelenme sünekliği artışı gerçekleşmiştir. Kolon ucunda eğrilik sünekliği değeri nispeten artarken kiriş ucundaki süneklik değerindeki düşme ise kolon-kiriş birleşim bölgesindeki davranışın iyileştirilmesine bağlı olarak görülmüştür.



Şekil 12. TS ve STM konsol kirişleri için yük-yer değiştirme grafiği

Çizelge 1. TS ve STM numunelerinin yapısal davranış verileri

	Enerji Tüketme Kapasitesi (kN-mm)	Ötelenme Rijitliği (kN/mm)	Eğilme Rijitliği (kN-mm <sup>2</sup> )		Ötelenme Sünekliği	Eğrilik Sünekliği	
		Kiriş Serbest Uç Bölgesi	Kiriş Uç Bölgesi	Kolon Uç Bölgesi	Kiriş Serbest Uç Bölgesi	Kiriş Uç Bölgesi	Kolon Uç Bölgesi
TS	331,31	3,18	3008,49	1320,69	1,67	2,10	1,13
STM	1919,01	3,59	4451,30	1793,64	5,07	1,43	1,50

## SONUÇ

Gerçekleştirilen bu çalışmada, betonarme yapı elemanlarında donatı detayının belirlenmesi üzerine yeni bir tasarım yaklaşımında bulunulmuştur. Önerilen yöntemle donatı detaylandırma aşaması daha hızlı ve daha kolay bir şekilde tamamlanırken, özellikle mevcut standartlarda detaylı yönergeler bulunmayan sıra dışı elemanlar için çözüm üretme kapasitesi bu yöntemin kabul edilebilirliğini güçlendirmektedir. Yapı davranışı yönünden irdeleme yapıldığında ise geleneksel yöntemle detaylandırılan numunede daha gevrek bir kırılma ortaya çıkarken, önerilen yöntemle detaylandırılan numunede ise hem kırılma sünek biçimde gerçekleşmiş; bunun yanında dayanım, enerji tüketme kapasitesi ve rijitlik değerleri yönünden yapı davranışında önemli derecede iyileştirmeler sağlanmıştır.

Elde edilecek kazanımlar dikkate alındığında topoloji eniyilemesi ve çubuk benzeşimi yöntemlerinin bir-

likte kullanılması halinde betonarme yapı elemanlarının tasarımı için mevcut yönetmeliklere nazaran daha başarılı sonuçlara ulaşılmaktadır. Yapı elemanlarında yüklem altında oluşan gerilme yörüngelerinden hareketle kafes sistemlerin en uygun biçimde tasarımı üzerine belirli seviyede tecrübe gerektiğinden çubuk benzeşimi yönteminin kullanımı esasen basit görünmemektedir. Ancak bu çalışma kapsamında iyileştirilen topoloji eniyilemesi yöntemi ile desteklenerek tümleşik bir tasarım yöntemi kullanıldığında tasarımcılar için büyük bir kolaylık elde edilmekte ve bununla da kalmayıp önemli derecede verimlilik artışı sağlanabilmektedir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir (Proje Numarası: BAP-2009/61).

## KAYNAKLAR

- Ersoy U, Özcebe G, 2001. Betonarme. Evrim Yayınevi, İstanbul, 816 s.
- Jang IG, Kwak BM, 2005. Evolutionary topology optimization for large-scale problems using design space adjustment and refinement. 6th World Congresses of Structural and Multidisciplinary Optimization, Rio de Janeiro.
- Matraji M, 1997. Design of reinforced concrete members by the strut-and-tie method. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi, Ankara.
- Özkal FM, 2012. Topoloji eniyilemesi ve çubuk benzeşimi yöntemleri kullanılarak betonarme yapı elemanlarında en uygun donatı düzeninin belirlenmesi ve deneysel gerçekleştirilmesi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Erzurum.
- Özkal FM, Uysal H, 2016. A computational and experimental study for the optimum reinforcement layout design of an RC frame. Engineering Computations, 33(2): 507–527.
- Querin OM, Steven GP, Xie YM, 2000. Evolutionary structural optimisation using an additive algorithm. Finite Elements in Analysis and Design, 34(3–4): 291–308.
- Schlaich J, Schaefer K, Jennewein M, 1987. Toward a consistent design of structural concrete. PCI Journal, 32(3): 74–150.
- Tang W, Tong L, Gu Y, 2005. Improved genetic algorithm for design optimization of truss structures with sizing, shape and topology variables. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 62(13): 1737–1762.
- Tanskanen P, 2002. The evolutionary structural optimization method: Theoretical aspects. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 191(47–48): 5485–5498.
- Xie YM, Steven GP, 1993. A simple evolutionary procedure for structural optimization. Computers and Structures, 49(5): 885–896.
- Yavuz G, 1999. Betonarme kısa konsolların davranışlarının deneysel olarak ve kafes sistem - strut and tie modellemesiyle incelenmesi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi, Konya.