

**T.C.**  
**İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**FARKLI BÖLGELERDEKİ PREKAST KİRİŞLİ KÖPRÜ**  
**DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

**Damla PALA**

Danışman

Prof.Dr. Mustafa KARAŞAHİN

İstanbul – 2023



## TEZ TANITIM FORMU

**Yazar Adı Soyadı** : Damla Pala

**Tezin Dili** : Türkçe

**Tezin Adı** : Farklı Bölgelerdeki Prekast Kirişli Köprü Davranışının İncelenmesi

**Enstitü** : İstanbul Gelişim Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü

**Anabilim Dalı** : İnşaat Mühendisliği

**Tezin Türü** : Yüksek Lisans

**Tezin Tarihi** : .../.../2023

**Sayfa Sayısı** : 88

**Tez** : Prof.Dr.Mustafa KARAŞAHİN

**Danışmanları**

**Dizin Terimleri** : Öngermeli Beton, Köprüler, Prekast I Kirişli Köprüler

**Türkçe Özet** : Bu tez çalışmasında köprülerin genel bir tanımı yapıldıktan ve sınıflandırmanın öneminden bahsedikten sonra; Bölüm 1’de, tezin amacı hakkında bilgi verilmiş olup daha sonra literatür özeti kısmında prekast I kirişli köprüler alanında literatür taramasına yer verilmiştir. Bölüm 2’de, karmaşık matematiksel modelleri çözmek için mühendislikte kullanılan sayısal yöntemlerden biri olan çalışmalardan “Sonlu Elemanlar Metodu ” bu başlık altında detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca bu bölümde “Öngermenin Tanımı ve Tarihçesi” başlığı altında öngermeli beton hakkında tanımlamalar yapıldıktan sonra çeşitli kullanım amaçları ve avantaj/dezavantajlarından bahsedilmiştir. Daha sonra dünyadaki prekast I kirişli köprüler alanından örnekler sunulmuştur. Bölüm 3’de, “Analiz ve Tasarım” başlığı altında köprülerin tasarım parametreleri sunulmuş olup köprü üst yapısının tanıtım aşamasına geçilmiştir. Daha sonra köprü üst yapısına etkiyen yük parametrelerinin köprü yapısına nasıl etki ettiği hakkında bilgiler verilmiştir. Bölüm 4’te, “Araştırma Bulguları ve Tartışma” başlığı altında farklı deprem bölgelerinde bulunan

tasarım köprüler üzerinde analiz sonuçları tablolar ve grafikler halinde sunulmuş olup bu bulgular altında karşılaştırmalar yapılmış ve bazı yorumlar yapılmıştır. Bölüm 5’de, ise “Sonuçlar ve Değerlendirme” başlığı altında yapılan çalışmalardan elde edilen bulgular değerlendirilmiş olup elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlar ışığında ortaya çıkan bazı değerlendirmeler sunulmuştur.

**Dağıtım Listesi** : 1. İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsüne  
2. YÖK Ulusal Tez Merkezine



*İmzası*

*Damla PALA*

**T.C.**  
**İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**FARKLI BÖLGELERDEKİ PREKAST KİRİŞLİ KÖPRÜ**  
**DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

**Damla PALA**

Danışman

Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN

**İstanbul – 2023**

## BEYAN

Bu tezin hazırlanmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğu, kullanılan verilerde herhangi tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez olarak sunulmadığını beyan ederim.

Damla Pala

.../.../2023



**T.C.**  
**İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE**

Damla PALA' nın “**Farklı Bölgelerdeki Prekast Kirişli Köprü Davranışının İncelenmesi**” adlı tez çalışması, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı İnşaat Mühendisliği Bilim Dalı YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan

*Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN*

(Danışman)

Üye

*Doç. Dr. Turgay COŞGUN*

Üye

*Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad NOORI*

**ONAY**

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylıyorum.

.... / .... / 2023

*Prof. Dr. İzzet GÜMÜŞ*

Enstitü Müdürü

## ÖZET

Bu çalışmada dünyada ve ülkemizde sıkça karşılaşılan prekast I tipi kirişler kullanılan köprülerden bahsedildiği için bu tip kirişlerin kullanıldığı köprüler genellikle kısa ve orta açıklıklı köprüler olarak nitelendirilir.15-50 m arasında olan orta açıklıklı köprüler olarak nitelendirilen köprülerde genel olarak prekast I tip kirişler ya da öngermeli kutu tipi olarak adlandırılan kesitler yaygın olarak kullanılmaktadır. Döşemeyi taşıyan prekast I kirişler her açıklıkta elastomer mesnetler üzerine serbestçe oturur ve yerinde döküm işlemi yapılan döşeme üzerinden araçlar ve yayalar için bir kullanım yüzeyi oluşturulur.

Bu tez çalışmasında köprülerin genel bir tanımı yapıldıktan ve sınıflandırmanın öneminden bahsedikten sonra ;

Bölüm 1’de, tezin amacı hakkında bilgi verilmiş olup daha sonra literatür özeti kısmında prekast I kirişli köprüler alanında literatür taramasına yer verilmiştir. Karmaşık matematiksel modelleri çözmek için mühendislikte kullanılan sayısal yöntemlerden biri olan çalışmalardan “Sonlu Elemanlar Metodu “ bu başlık altında detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca bu bölümde “Öngermenin Tanımı ve Tarihi” başlığı altında öngermeli beton hakkında tanımlamalar yapıldıktan sonra çeşitli kullanım amaçları ve avantaj/dezavantajlarından bahsedilmiştir. Daha sonra dünyadaki prekast I kirişli köprüler alanından örnekler sunulmuştur.

Bölüm 3’te, “Analiz ve Tasarım” başlığı altında köprülerin tasarım parametreleri sunulmuş olup köprü üst yapısının tanımlanmasına geçilmiştir. Daha sonra köprü üst yapısına etkileyen yük parametrelerinin köprü yapısına nasıl etki ettiği hakkında bilgiler verilmiştir. Bölüm 4’te, “Araştırma Bulguları ve Tartışma” başlığı altında farklı deprem bölgelerinde bulunan tasarım köprüleri üzerinde analiz sonuçları tablolar ve grafikler halinde sunulmuş olup bu bulgular altında karşılaştırmalar yapılmış ve bazı yorumlar yapılmıştır. Bölüm 5’te, ise “Sonuçlar ve Değerlendirme” başlığı altında yapılan çalışmalardan elde edilen bulgular değerlendirilmiş olup elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlar ışığında ortaya çıkan bazı değerlendirmeler sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Öngeme, Köprüler, Prekast I Kirişli Köprüler



## SUMMARY

In this study, the design of reinforced concrete bridges in different soil and earthquake zones is to examine the change of moment, shear force and deformation magnitudes that affect the dimensioning. While preparing the current model, loads were defined in accordance with AASHTO 2007 and modeling was done in Sap2000 V.21, a general purpose structural analysis program using the finite element method.

After establishing the edge and midfoot models for all three regions, the effects of the loads on the different earthquake regions on the midfoot under the influence of two different types of precast beams were examined in detail, and comparisons were made in a total of twelve different models for four different soil types in each region.

After preparing models of end , I., II. and III. Considering the same design bridge in the provinces of Konya, Ağrı and Istanbul, which are earthquake-degree earthquake zones, comparisons were made by using I-90 beams in Konya and Ağrı, and I-120 beams in Istanbul, and the design and analyzes were carried out accordingly. After these three models were established, seismic analyzes and comparisons were made.

# İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
SUMMARY .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
KISALTMALAR .....	vi
SEMBOLLER .....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xii
ÖNSÖZ.....	xiv
GİRİŞ .....	1

## BİRİNCİ BÖLÜM

### GENEL ESASLAR

1.1. Tezin Amacı .....	3
1.2. Literatür Özeti .....	3

## İKİNCİ BÖLÜM

### SONLU ELEMANLAR METODU

2.1. Sonlu Eleman Yönteminde Eleman Seçimi .....	11
2.1.1. Üç boyutlu kiriş eleman .....	11
2.1.2. İki boyutlu dörtgen eleman .....	12
2.1.3. Kabuk Elemanlar.....	13
2.1.3.1. Dört düğüm noktasına sahip ve dört kenarlı kabuk elemanlar.....	13
2.2. Yüklemeler.....	14
2.3. Sonlu Elemanlarda Dikkat Edilmesi Gerekenler .....	15
2.1. Öngermenin Tanımı ve Tarihçesi.....	16

2.2. Öngerme Tekniğinin Yapım Aşaması ve Elemanları .....	18
2.3. Öngermeli Beton Özellikleri .....	20
2.3. Öngermeli Beton Özellikleri .....	22

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### ANALİZ VE TASARIM

3.1. Analiz Aşaması .....	24
3.2. Tasarım Parametreleri .....	29
3.2.1. Malzeme bilgileri .....	29
3.3. Köprünün Geometrik Özellikleri .....	29
3.4. Yük Analizi .....	33
3.4.1. Zati yük hesabı .....	33
3.4.2. Hareketli yük hesabı.....	34
3.4.3. Yaya yükü .....	35
3.4.4. Rüzgâr yükü .....	35
3.4.4.1. Alt yapıya etkiyen rüzgâr yükü (WL) .....	36
3.4.5. Fren Kuvveti .....	37
3.4.6. Sıcaklık yüklemesi .....	38
3.4.7. Deprem yer hareketi hesabı.....	38
3.4.7.1. Yer hareketlerinin tanımlanması .....	39
3.4.8. Zemin etkisi.....	42
3.4.8.1. Şev stabilite kontrolü.....	42
3.4.8.2. Kayma modülü.....	43
3.4.8.3. Şevlerin kenar ayaktan gelen yük etkisinde güvenlik sayısı kontrolü .....	45
3.5. Elastomer Mesnetler.....	47
3.5.1. Elastomer mesnetlerin avantajları .....	49

3.5.2. Elastomer mesnetlerin dezavantajları .....	51
3.5.3. Elastomer mesnet hesabı .....	51
3.6. Yükleme Kombinasyonları .....	53

## **DÖRDÜNCÜ BÖLÜM**

### **ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA**

<b>SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>63</b>
<b>KAYNAKÇA .....</b>	<b>65</b>



## KISALTMALAR

AASHTO	:	Amerikan devlet otoyolları ve taşımacılığı birliği
TKDY	:	Türkiye Köprü ve Deprem Yönetmeliği
TBDY	:	Türkiye Bina ve Deprem Yönetmeliği
Sap2000	:	Yapısal analiz programı
ABD	:	Amerika Birleşik Devletleri
TS 3233	:	Ön gerilmeli Beton Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları
TS-500	:	Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları
SRSS	:	Kareleri Toplamının Karekökü
CQC	:	Tam Karesel Birleştirme

## SEMBOLLER

K	:Bilinen sabitler matrisi
d	: yer değiştirmelerin bilinmeyen vektörü
F	: düğüm yüklerinin vektörünü
E	:Elastisite modülü
G	:Kayma modülü
J	:Burulma sabiti
u	:x yönünde eleman deplasman bağıntısı
v	:y yönünde eleman deplasman bağıntısı
KÖS	:Köprü önem sınıfı
DD	:deprem düzeyi
$\gamma_c$	: beton birim hacim ağırlığı
$E_c$	:beton elastisite modülü
$\gamma_b$	:Betonarme yapı elemanlarında birim hacim ağırlık
$\gamma_k$	: Kaplama ve asfalt ağırlıklarında
H	: iki dingilli bir kamyonu ifade ederken iki dingilden gelen ağırlık
S	:ona bağlı bir yarım treyler olmak üzere tek dingilden gelen ağırlık
MPF	: Şerit azaltma katsayısı
IM	: Dinamik etki katsayısı
$\psi$	; dinamik etki katsayısı
L	: Kirişlerin ortalama mesnet açıklığı
WS	: Üst yapıya etkiyen rüzgar
WL	: Araç üzerine etkiyen rüzgar

$V_{DZ}$ ,	:tasarım rüzgâr hızı
$V_0$ ,	:10 m yükseklikteki şiddetli tasarım rüzgâr yükü
$V_{10}$ ,	:karakteristik yük olup 160 km/sa 'teki rüzgâr hızını,
$Z$ ,	:rüzgâr yüklerinin maruz kaldığı yapının yüksekliğini,
$Z_0$	:ise sürtünme uzunluğunu ifade etmektedir.
$P_D$	: tasarım rüzgar basıncı
$e_{I-90}$ ,	:90'lık kirişin ağırlık merkezinden araç eksenine olan uzaklık
$h_{Araç}$ ,	:araç yüksekliği
$h_{Kiriş_üst}$ ,	:kiriş ağırlık merkezinden üstüne olan uzaklık
$t_{Döşeme}$ ,	:döşeme kalınlığı
$t_{Asfalt}$ ,	:asfalt kalınlığı
$W_{Truck}$ ,	:iki dingile gelen toplam kamyon yükü
$n_{lane}$ ,	:şerit adedi
$Lane$ ,	:şerit yükü
$L_{span}$ ,	:kiriş net açıklığı
$P_{BR}$ ,	:fren kuvvetini
$L_{cap\_beam}$ ,	:başlık kirişi uzunluğu
$\Delta T$ ,	:sıcaklık değişimi
$\alpha$ ,	:termal genişleme katsayısı
$L$ ,	:genişleme uzunluğu
$T_{max.design}$ ,	:maksimum tasarım sıcaklığı
$T_{min.design}$ ,	:minimum tasarım sıcaklığı
$\alpha$	: ısı genleşme katsayısı
$S_s$ ,	:kısa periyot için spektral ivme katsayısı
$S_1$ ,	:1 saniye periyot için spektral ivme katsayısı

$F_s$ ,	:kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı
$F_1$ ,	:1 saniyelik periyot için yerel zemin etki katsayısı
$Z_A, Z_B, Z_C, Z_D$	:Zemin sınıfları
$W$	: Elastomer mesnet genişliği
$L$	: Elastomer mesnet uzunluğu
$h$	: Elastomer mesnet yüksekliği
$H_r$	: kauçuk katman kalınlığı
$h_s$	: çelik plaka kalınlığı,
$H$	: elastomer mesnet kalınlığı
$M$	: Üstyapı kütlesi
$k_{sub}$ ,	:ayak rijitliği
$k_{eff}$ ,	:elastomer mesnet rijitliği
$d_{sub}$ ,	:altyapı uç yer değiştirmesi
$d_i$ ,	:elastomer mesnet yer değiştirmesi,
$d$ ,	:sistemin toplam yer değiştirmesi
$n$	: elastomer mesnet sayısı
$a$	: Elastomer mesnet genişliği
$b$	: Elastomer mesnet boyu
$n_{dış}$	: Dış elastomer mesnet tabaka sayısı
$n_{iç}$	: İç elastomer mesnet tabaka sayısı
$t_{dış}$	: Dış elastomer mesnet tabaka kalınlığı
$t_{iç}$	: İç elastomer mesnet tabaka kalınlığı
$S_{dış}, S_{iç}$	: Şekil faktörü
$S_o$	: Ort. Şekil faktörü
$G$	: Kayma modülü
$E_{Elast}$	: Sıkışma Elastisite Modülü



$A_{Elast}$	: Bir elastomer mesnetin yüzey alanı
$\Upsilon$	: Yoğunluk
$g$	: Yerçekimi ivmesi
$m$	: Kütle yoğunluğu
$K_1$	: Elastomer mesnetin düşey rijitliği
$K_2 ve K_3$	: Elastomer Mesnetin Yatay Rijitlikleri
$K_{R1}$	: Elastomer Mesnetin Burulma Rijitliği
$K_{R2}$	: Elastomer Mesnetin Dönme Rijitlikleri



## TABLULAR LİSTESİ

<b>Tablo 1.</b> Yük altında deformasyon alt eleman şekilleri.....	9
<b>Tablo 2.</b> Köprü modeli periyotları ve kütle katılım oranları .....	28
<b>Tablo 3.</b> Beton sınıfları için kullanılan elastisite modülü değerleri .....	29
<b>Tablo 4.</b> Prekast kiriş özellikleri.....	32
<b>Tablo 5.</b> Kullanılan malzemelerin birim hacim ağırlıkları .....	33
<b>Tablo 6.</b> Yol genişliğine göre trafik şeridi adedi (Karayolları teknik şartnamesi)....	34
<b>Tablo 7.</b> Hareketli yüklerden doğan etki yüzdeleri (Karayolu teknik şartnamesi)....	35
<b>Tablo 8.</b> Şehirlerin merkezlerine göre $V_0$ ve $Z_0$ değerleri.....	36
<b>Tablo 9.</b> Seçilen illere göre enlem boylam ve deprem düzeyleri .....	39
<b>Tablo 10.</b> Seçilen illere göre deprem parametre değerleri .....	39
<b>Tablo 11.</b> Zemin profillerininin tabaka özellikleri .....	43
<b>Tablo 12.</b> Bölgelere göre tabakalar ve tabakaların zemin özellikleri.....	43
<b>Tablo 13.</b> Analiz sonuçları .....	47
<b>Tablo 14.</b> Elastomer mesnet rijitlik hesabı.....	51
<b>Tablo 15.</b> Yük gruplarının açıklamaları .....	53
<b>Tablo 16.</b> AASHTO 2007 yük kombinasyon katsayıları .....	54
<b>Tablo 17.</b> Kullanım yüküne göre yük kombinasyonları.....	54
<b>Tablo 18.</b> Dayanım, aşırı durum ve faktörlü yüke göre yük kombinasyonları.....	55
<b>Tablo 19.</b> Köprü modelleri taban kesme kuvvetleri .....	56
<b>Tablo 20.</b> Köprü modellerine ait kenar ayak link eleman deformasyon değerleri ....	58
<b>Tablo 21.</b> Köprü modellerine ait orta ayaktaki kolona gelen kesit tesir değerleri ....	60
<b>Tablo 22.</b> Köprü modellerine ait başlık kirişine gelen kesit tesir değerleri.....	62

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Sonlu eleman modellerinde ağ oluşturma.....	9
Şekil 2. Üçgen ve dikdörtgen elemanlara bölünmüş bir düzlemsel cisim .....	11
Şekil 3. Dört adet düğüm noktasına sahip dörtgen eleman.....	12
Şekil 4. Dört düğüm noktasına sahip dört kenarlı elastik kabuk eleman.....	14
Şekil 5. Betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi .....	16
Şekil 6. Bir kirişte oluşan gerilmeler .....	17
Şekil 7. Luzancy Köprüsü, 1941 .....	18
Şekil 8. Kirişe uygulanan öngerme işlemi .....	18
Şekil 9. Öngermeli halatın bölümleri.....	20
Şekil 10. Öngerme düzeneği ve kriko uçlar.....	20
Şekil 11. Öngermeli kirişe basınç ve çekmenin etkisi .....	22
Şekil 12. Köprünün üç boyutlu sonlu eleman .....	24
Şekil 13. Boyuna doğrultudaki 1.Titreşim modu ( $T_1=0,82s$ ).....	26
Şekil 14. Enine doğrultudaki 2.Titreşim modu ( $T_2=0,80s$ ).....	26
Şekil 15. Burulma 3.Titreşim modu ( $T_3=0,58s$ ).....	27
Şekil 16. Köprü boy kesit görünüşü.....	30
Şekil 17. Köprü enkesit görünüşü.....	30
Şekil 18. Orta ayak başlık kirişi yan kesit görünüşü.....	31
Şekil 19. Kenar ayak kesiti ve ölçüleri .....	31
Şekil 20. Prekast kiriş çubuk elemanı enkesiti .....	32
Şekil 21. H30-S24 standart yük kamyonu için yük yerleşimi .....	34
Şekil 22. İstanbul ili ZA zemini reponse spectrum grafiği .....	40
Şekil 23. Bağlantı plağı etkin kesit rijitliklerinin azaltılması .....	41

<b>Şekil 24.</b> Kolon etkin kesit rijitliklerinin azaltılması.....	41
<b>Şekil 25.</b> Kenar ayak altındaki tabakalar ve zemin profili.....	42
<b>Şekil 26.</b> Konya ili Batı şevi sistem kayma düzlemi .....	44
<b>Şekil 27.</b> Ağrı ili Batı şevi sistem kayma düzlemi.....	44
<b>Şekil 28.</b> İstanbul ili Batı şevi sistem kayma düzlemi .....	45
<b>Şekil 29.</b> Batı şevine etki eden kenar ayaktan gelen temsili yayılı yük.....	45
<b>Şekil 30.</b> Konya ili Batı şevindeki temsili yayılı yükten gelen sistem .....	46
efektif gerilmesi .....	46
<b>Şekil 31.</b> Ağrı ili Batı şevindeki temsili yayılı yükten gelen sistem .....	46
efektif gerilmesi .....	46
<b>Şekil 32.</b> İstanbul ili Batı şevindeki temsili yayılı yükten gelen sistem .....	47
efektif gerilmesi .....	47
<b>Şekil 33.</b> Elastomer mesnetlerin link eleman olarak tanımlanması .....	48
<b>Şekil 34.</b> Elastomer mesnet detayı W: Elastomer mesnet genişliği, L: Elastomer mesnet uzunluğu, H: Elastomer mesnet yüksekliği .....	49
<b>Şekil 35.</b> Elastomer mesnet katmanları hr: kauçuk katman kalınlığı, hs: çelik plaka kalınlığı, H: elastomer mesnet kalınlığı .....	49
<b>Şekil 36.</b> Elastomer mesnetli köprünün yer değiştirmesi .....	50
<b>Şekil 37.</b> Bölge ve zemin türlerine göre X yönü taban kesme kuvveti.....	56
<b>Şekil 38.</b> Bölge ve zemin türlerine göre Y yönü taban kesme kuvveti.....	57
<b>Şekil 39.</b> Bölge ve zemin türlerine göre F_(COMB 13) kombinasyonu altında boyuna doğrultuda (X) kenar ayak link eleman deformasyon değerleri.....	59
<b>Şekil 40.</b> Bölge ve zemin türlerine göre F_(COMB 13) kombinasyonu altında enine doğrultuda (Y) kenar ayak link eleman deformasyon değerleri.....	59
<b>Şekil 41.</b> Bölge ve zemin türlerine göre F_(COMB 13) kombinasyonu altında orta ayağa gelen kesme kuvveti kesit tesirleri değerleri.....	61
<b>Şekil 42.</b> Bölge ve zemin türlerine göre F_(COMB 13) kombinasyonu altında orta ayağa gelen moment değerleri kesit tesirleri değerleri .....	61

## ÖNSÖZ

Tez yazım sürecimde bana destek olup emeklerini esirgemeyen, tez konusu belirlememde yoğunluğuna rağmen bilgi ve deneyimleriyle beni aydınlatan değerli hocam Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN 'e saygılarımı ve şükranlarımı sunarım. Ayrıca bugünlere gelmemde desteklerini her zaman hissettiğim aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.



## GİRİŞ

Köprüler, bir engeli aşmak için tasarlanan ve karayolu trafiğinin ya da diğer hareketli yüklerin akışını sağlayan genellikle iki yakayı birbirine bağlayan betonarme, çelik, ahşap ve kagir yapılardır. Köprülerin üzerinden yaya, karayolu, demiryolu, kanal ya da bir boru hattının geçmesi mümkündür. Köprüler, iki yöndeki trafiği birbirine bağlayan hayati bir görevi görmektedirler. Bu yüzden köprü tasarımı oldukça farklı yüklere ve fonksiyonlara sahip olduğundan, çeşitli disiplinlerin beraber çalışmasını zorunlu kılmaktadır. Bu yüzden tasarım süreçlerinde standartların sağlanması ve yapısal güvenliğe uygunluğuna önem verilmelidir. Özetle, köprü hizmet ömrü boyunca herhangi bir yük altında ciddi bir şekilde deformasyon ve çökme olmayacak şekilde tasarlanmalıdır.

Köprüler basit kirişli köprülerden, kablolu ve asma köprülere dönüştükçe sınıflandırmanın önemi daha da artmıştır. Sınıflandırmanın amacına bağlı olarak köprüler çeşitli yollarla sınıflandırılabilirler, yönetmelik kapsamında yer alan köprülerin sınıflandırılması aşağıda verilmiştir;

-Standart Köprüler:

Kullanımlarına göre: Yol köprüleri, üst geçit ve alt geçit köprüleri

Tabliye tipine göre: Betonarme, öngermeli beton, çelik kirişli (prekast), sürekli (kutu kesitli veya plak) köprüler

Orta ayak tipine göre: Betonarme tek veya çok kolonlu köprüler, perdeli köprüler

Orta ayak – Tabliye birleşimine göre: Mesnetli veya mafsallı birleşimli köprüler, monolitik birleşimli köprüler

Temel sistemine göre: Yüzeysel, derin ve kazık temelli köprüler

-Özel Köprüler:

Asma köprüler, eğik askılı köprüler, kemer köprüler vb. gibi standart köprülerin dışında kalan köprüler olarak sınıflandırılmaktadır.

Bu çalışmada dünyada ve ülkemizde sıkça karşılaşılan prekast I tipi kirişler kullanılan köprülerden bahsedildiği için bu tip kirişlerin kullanıldığı köprüler genellikle kısa ve orta açıklıklı köprüler olarak nitelendirilir.15-50 m arasında olan orta açıklıklı köprüler olarak nitelendirilen köprülerde genel olarak prekast I tip kirişler ya da öngermeli kutu tipi olarak adlandırılan kesitler yaygın olarak kullanılmaktadır. Döşemeyi taşıyan prekast I kirişler her açıklıktıkta elastomer mesnetler üzerine serbestçe oturur ve yerinde döküm işlemi yapılan döşeme üzerinden araçlar ve yayalar için bir kullanım yüzeyi oluşturulur.

Bu tez çalışmasında köprülerin genel bir tanımı yapıldıktan ve sınıflandırmanın öneminden bahsedikten sonra ;

Bölüm 1’de, tezin amacı hakkında bilgi verilmiş olup daha sonra literatür özeti kısmında prekast I kirişli köprüler alanında literatür taramasına yer verilmiştir.

Bölüm 2’de, karmaşık matematiksel modelleri çözmek için mühendislikte kullanılan sayısal yöntemlerden biri olan çalışmalardan “Sonlu Elemanlar Metodu ‘’ bu başlık altında detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca bu bölümde “Öngermenin Tanımı ve Tarihçesi” başlığı altında öngermeli beton hakkında tanımlamalar yapıldıktan sonra çeşitli kullanım amaçları ve avantaj/dezavantajlarından bahsedilmiştir. Daha sonra dünyadaki prekast I kirişli köprüler alanından örnekler sunulmuştur.

Bölüm 3’de, “Analiz ve Tasarım” başlığı altında köprülerin tasarım parametreleri sunulmuş olup köprü üst yapısının tanıtım aşamasına geçilmiştir. Daha sonra köprü üst yapısına etkileyen yük parametrelerinin köprü yapısına nasıl etki ettiği hakkında bilgiler verilmiştir.

Bölüm 4’te, “Araştırma Bulguları ve Tartışma” başlığı altında farklı deprem bölgelerinde bulunan tasarım köprüleri üzerinde analiz sonuçları tablolar ve grafikler halinde sunulmuş olup bu bulgular altında karşılaştırmalar yapılmış ve bazı yorumlar yapılmıştır.

Bölüm 5’de, ise “Sonuçlar ve Değerlendirme” başlığı altında yapılan çalışmalardan elde edilen bulgular değerlendirilmiş olup elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlar ışığında ortaya çıkan bazı değerlendirmeler sunulmuştur.

# BİRİNCİ BÖLÜM

## GENEL ESASLAR

### 1.1. Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, farklı zemin ve deprem bölgelerinde betonarme köprü tasarımları yapılarak, boyutlandırmaya etki eden moment, kesme kuvveti ve deformasyon büyüklüklerinin değişimini incelemektir. Mevcut model hazırlanırken yükler AASHTO 2007 'ye uygun olarak tanımlanmış olup sonlu elemanlar yöntemini kullanan genel amaçlı bir yapısal analiz programı olan Sap2000 V.21 programında modelleme yapılmıştır. Üç bölge için de kenar ve orta ayak modeli kurulduktan sonra farklı deprem bölgelerine gelen yüklerin iki farklı tip prekast kiriş etkisi altında orta ayak üzerine gelen etkileri detaylı bir şekilde incelenmiş olup her bölgede 4 farklı zemin tipi için toplamda 12 farklı modelde karşılaştırmalar yapılmıştır. Her üç bölge için de sismik analizler yapılmış olup ortaya çıkan deformasyonlar X ve Y yönünde olmak üzere ayrı ayrı incelenerek bazı yorumlar yapılmıştır.

### 1.2. Literatür Özeti

Dicleli ve Bruneau (1995), çalışmasında çelik kirişli, tek açıklıklı, basit mesnetli, sürekli döşemeye sahip karayolu köprülerinin sismik performansını incelemiştir. Çeşitli yer ivmelerini modele etki ettirerek doğrusal ve doğrusal olmayan analizler yapıp karşılaştırmalar yapmıştır. Yüksek rijitliğe sahip mesnetlerin köprü genişliğine bağlı olarak üzerine gelen etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Mesnetlere yeterli kayma ve yer değiştirme genişliği sağlanmadığı takdirde desteklerinden düşüp ankrajlarından koptuğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak daha kısa açıklıklı daha geniş köprülerin oldukça şiddetli depremlere dayanabildiği saptanmıştır. 40 ve 50 m'ye kadar iki açıklığa sahip 2 ve 3 şeritli köprülerin mesnetlerinin hasar görmemesi halinde 0,4 g'lik depremlere kadar kolonlara zarar gelmeden dayanabilecekleri öngörülmüştür.

Alemdaroğlu (2003), çalışmasında ABD ve Japonların köprülerle ilgili sismik yönetmeliklerini inceledikten sonra mevcut bir köprünün üzerine gelen eşdeğer deprem yüklerini bulmak için AASHTO 2002'de geçen dört yöntemle çözümünü yaparak bu yönetmelikleri kendi içinde karşılaştırmıştır. Bu yöntemler



sırasıyla Düzgün Yayılı Yük Yöntemi, Tek Modlu Spektrum Çözüm Yöntemi, Düktilite Tasarım Yöntemi ve Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemidir. Sonuç olarak çözüm yapılan her yöntemde deprem etkisi altında köprünün davranışı yetersizdir. Bu sebeple kenar ayaklar mantolanarak orta ayak ise çelik plakalarla desteklenerek problem çözülmüştür.

Yüksel (2008), çalışmasında İstanbul-Edirne istikametinde mevcut bir viyadüğün deprem performansını değerlendirmiştir. Ayrıca köprünün kurpta olması ile düz olması arasındaki farklılıkları incelenmiştir. Performans değerlendirmesi yapılan viyadük büyük yarıçaplı bir kurpta yer almakta ve bu özelliği göz ardı edilip doğru eksenli modellendiğinde her iki durum için de birbirine çok yakın sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Doğrusal deprem analizi yapılan büyük yarıçaplı bir kurpta yer alan köprünün doğru eksenli olarak modellenmesinde bir sakınca bulunmadığı saptanmıştır. Viyadüğün doğrusal olmayan hesap yöntemleriyle de servis depremi ve en büyük deprem senaryoları altında şekil değiştirmeye göre analizleri de yapılmıştır. Kurpta kurulan viyadük modelinden elde edilen şekil değiştirme değerleri, beklenildiği gibi, doğru eksenli oluşturulan modelden daha olumsuz sonuçlar verdiği sonucuna varılmıştır.

Şahin (2010), çalışmasında İstanbul'da 4.Levent istikametinde tek yönlü bir karayolu köprüsünün deprem performansını değerlendirmiştir. Köprünün taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanları hakkında açıklamalar yapıldıktan sonra yapının matematiksel modeli kurulmuş ve sonlu elemanlar yöntemini kullanan sap2000 yazılımı ile doğrusal ve doğrusal olmayan analizi yapılmıştır. Köprünün performansının belirlenmesine doğrusal hesap ile başlanmıştır daha sonra deprem altında kuvvet kontrolü analizi yapılmıştır. Bu analizlerde çok modlu spektral analiz yöntemi seçilmiştir. Köprünün doğrusal olmayan yöntemle de şekil değiştirme kontrolü yapılmış olup bunu statik itme ve zaman tanım alanında hesap izlemiştir. Hesaplarda bu köprü için üretilmiş deprem spektrumları ve deprem kayıtları kullanılmıştır. Performans değerlendirmesinde DD-1 ve DD-3 aşılma olasılıklı deprem etkisi altında kontrollü hasar (KH) performans düzeyine karşı gelen şekil değiştirmeler ile karşılaştırılmıştır. Doğrusal elastik hesap ve doğrusal olmayan hesap sonuçları karşılaştırılarak mevcut köprü için performansa dayalı bir değerlendirme yapılmıştır.

Safai (2010), çalışmasında betonarme bir köprünün üç farklı açıklık

durumuna göre aynı tip standart prekast kirişler kullanılarak analizi ve ön tasarımı yapılmıştır. Hazırlanan modelde tanımlanan yükler ASSHTO 2007'ye uygun olup bu yükler altında, genel amaçlı bir yapısal analiz programı olan sap2000 programı kullanılmıştır. Özellikle üç modelde de aynı tip elastomer mesnet kullanılıp ‘‘Sismik Tasarım ‘‘ doğrultusunda ‘‘Çok Modlu Spektral Analiz Yöntemi ‘‘ uygulanarak deprem yükü etkisi altında düşey, yatay, burulma ve dönme rijitlikleri uygulandıktan sonra farklı modların etkisi modellerde incelenmiştir. Üç model için de kenar ayak ve orta ayak modeli yapıldıktan sonra farklı açıklıklardan gelen yüklerin kenar ayak ve orta ayak üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Her üç model için de sismik analiz yapıp deformasyonları X ve Y yönünde hesaplanmıştır. Farklı açıklıklar için sistemdeki etkiler irdelenerek açıklığa bağlı olarak bazı yorumlar yapılmıştır.

Edaan (2010), çalışmasında tek açıklıklı çelik kirişli köprüleri farklı mesafe ve elastomerik mesnetlere göre karşılaştırarak sismik tasarım kuvvetlerini farklı deprem spektrumları ve zaman tanım alanında analiz yaparak incelemiştir. İlk olarak 2m aralıklı yerleştirilmiş çelik kirişlerle bir bütün olarak inşa edilmiş 24 cm'lik betonarme döşemeye sahip olan çelik bir köprü incelenmiştir. Daha sonra betonarme döşeme kalınlığı değiştirilmeden köprünün platform genişliği 10 m artırılarak en son 60 m ye ulaşacak şekilde 5 köprü modeli farklı elastomer mesnetler ve farklı çelik kirişler arasına farklı boyutlarda çapraz bağlantılar atılarak modeller birbiri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar karşılaştırıldığında ise tek açıklıklı köprüler için basitleştirilmiş AASHTO Yöntemi, çok modlu analiz yöntemine göre farklı mesnet koşullarında çapraz çerçeve kuvvetlerine gelen kesme kuvvetlerinin daha az olduğu görülmüştür.

Yıldırım (2011), çalışmasında Elâzığ-Malatya yolu üzerinde bulunan Kömürhan Köprüsü'nün üzerinde analitik çalışmalar gerçekleştirmiştir. Köprünün proje verileri dikkate alınarak oluşturulan sonlu elemanlar modeli üzerinde lineer statik analizler yapılmıştır. Analizlerde sert, orta ve yumuşak zemin tipleri için analizler tekrarlanmış, analizler sonunda tabliye uzunluğu ve ayak yüksekliği boyunca elde edilen yer değiştirmeler ve gerilmeler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Daha sonra köprünün lineer olmayan davranışı, köprünün yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınması için belirlenmiştir. Analizler sonucunda statik analizlerle elde edilen kesit tesirleri karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

Çift (2018), çalışmasında dengeli konsol köprü tasarımında dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde analitik yöntemler kullanılarak gerçek bir köprü tasarımını iki farklı beton sınıfına göre (C40 ve C50) CSI Bridge programını kullanarak modellemiştir ve köprü kesit tesirleri, kesit boyutları, kesit ağırlıkları ve maliyetler en kritik yükleme durumuna göre karşılaştırılmıştır. Dengeli konsol köprü malzemelerini inceleyerek köprü yüklemelerinden dolayı oluşan kesit tesirlerinin açıklık boyunca değişimini irdelemiştir. Açıklık değiştiğinde kesit tesirlerinin miktarı değişirken oran ve çalışma prensibi açısından değerlerde bir farklılık gözükmediğini saptamıştır. Büyük açıklıklarda güvenilir, ekonomik ve hızlı gözükken bu yöntem küçük açıklıklarda aynı etkiyi göstermediği düşünülmektedir. Çünkü açıklık küçüldüğünde oluşan kesit tesirleri miktarları azalma gösterdiğinden daha büyük açıklıklarda farklı yöntemlerle köprü inşa etmek daha mantıklı bir hal alacağı sonucuna varılmıştır.

Bexultan (2021), çalışmasında köprülerde sıklıkla kullanılan elastomer esaslı sismik yalıtım mesnetlerinden biri olan kurşun çekirdekli elastomer mesnet tasarımını detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca farklı kolon yükseklikleri için köprü davranışları ankastre mesnetli köprü davranışları ile kıyaslanacaktır ve değişen elastomer mesnet özelliklerinin köprü deprem davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tasarım sonucu elde edilen mesnet özelliklerine sahip elastomer mesnet durumları için kolon yüksekliği değiştirilerek altyapı esnekliğinin köprü deprem tepkilerine etkisi CSI Bridge programından yararlanılarak incelenmiştir.

Karadağ (2021), çalışmasında sandık kesitli betonarme bir köprünün hareketli yük analizi için 16 farklı açıklık durumunda tek gözlü ve üç gözlü sandık modeli için taşıt yükü altındaki yapısal davranışını incelemiştir. Hareketli yük analizi yapılarak taşıt yükü etkisinde köprü yapısında meydana gelebilecek minimum ve maksimum etkiler görülmüştür. Şartnamelerde belirtilen üç farklı kamyon yükü için bu analizler gerçekleştirilmiştir. Zaman tanım alanında analizler yapılarak analiz süresi boyunca taşıt yükü etkisiyle, köprünün davranışları gözlemlenmiştir. Şartnamede tanımlanan H30-S24 kamyonu köprü üzerinden 5 farklı hızla, 5 farklı sayıda ve 5 farklı takip mesafesinde geçirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda köprü yapısında meydana gelen deformasyon, kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri incelenmiştir.

Anjumani (2021), çalışmasında kirişli köprülerin deprem etkisi altındaki

davranışını incelemiştir. Çalışmada çelik I kesitli, çelik U kesitli, prekast betonarme I kesitli ve U kesitli kiriş olmak üzere farklı üst yapı tipine sahip köprü modelleri mod birleştirme yöntemine göre analiz edilmiştir. Spektrum eğrileri AASHTO 2012 şartnamesine ve TBDY 2018 yönetmeliğine göre tanımlanmış, her bir köprü tipi için iki model olmak üzere toplamda 8 ayrı model oluşturulmuştur. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre AASHTO 2012 yönetmeliğine göre elde edilen değerler TBDY 2018 yönetmeliğine göre elde edilen değerlerden daha yüksek çıkmıştır. Her iki yönetmelik için yapılan değerlendirmeler I tipinin U tipine göre daha avantajlı olduğunu göstermiştir.



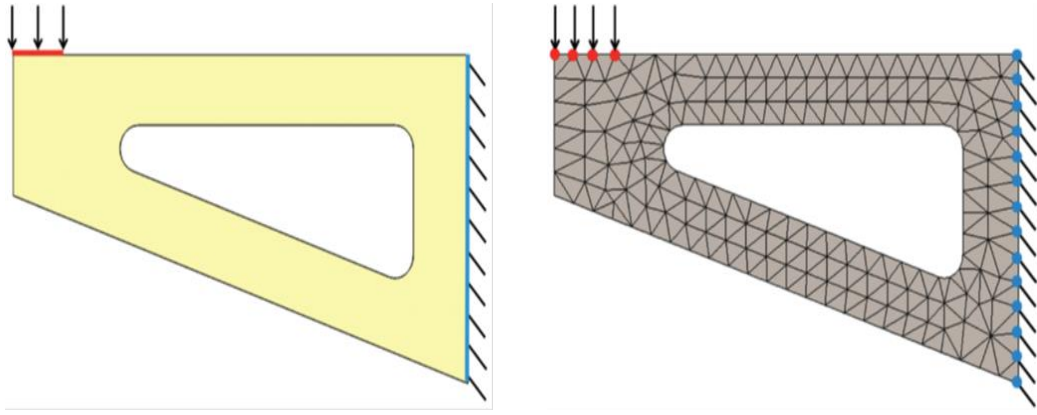
## İKİNCİ BÖLÜM

### SONLU ELEMANLAR METODU

Sonlu elemanlar metodu karmaşık matematiksel modelleri çözmek için mühendislikte kullanılan sayısal yöntemlerden biridir ve birçok bilgisayar destekli programlarda kullanılmaktadır. 1960'lı yıllarda ilk defa uçak gövdelerinin gerilme analizi için geliştirilmiş olan bu yöntem günümüzde mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılır hale gelmiştir. Birçok analiz programının içinde sayısal verimliliği ve her türlü analize uygunluğu nedeniyle sonlu elemanlar metodu dış etkilere maruz kalan yapı sistemlerinin verdiği tepkiye yaklaşık çözümler üreterek karmaşık mühendislik problemlerinin ve uygulamalarının hassas bir şekilde çözülmesinde etkin bir rol oynamaktadır.

Mühendislik alanında alışılmış analitik metotlarla çözümü zor fiziksel problemler karşımıza sıkça çıkmaktadır. Örneğin; bir dış kuvvet takımı etkisinde üç boyutlu elastik bir cisim düşünürsek, bu kuvvetlere karşı cisimin tepkisini hesaplamak için deformasyon cinsinden yazılmış denklemlerin bir çözümü aranmalıdır. Mühendislik ve diğer bilim dallarında da karşımıza sıkça çıkan kompleks geometrik şekillerin sayısal olarak çözümlerini elde etmek aşırı ölçüde zor hatta çoğunlukla imkansızdır. Başka metotlarla çözülemeyen problemlerin çözümünde kullanılan birçok metot olmasına rağmen bu metotlardan en elverişlisi sonlu elemanlar metodudur.

Sonlu elemanlar modelinde çözüm alanını basit şekilli alt alanlara bölmemiz gerekmektedir. Çünkü sonlu elemanlar yöntemi karmaşık bir problemi çözerken küçük ve üzerinde daha basit hesaplamaların yapılabildiği kontrol edilebilir parçalara ayırma fikrine dayanmaktadır. Bu işlem genel olarak ağ oluşturma işlemi olarak adlandırılır ve bu işlemin gerekli olmasının nedeni; tüm modeli tek parça halinde basit şekilli elemanlara ayırmadan oluşacak olan polinom fonksiyonlarını çözmek çok daha karmaşık olabildiği içindir. Elemanlar Şekil 2.1'deki gibi ağ oluşturarak çözüm alanı parçalara bölünerek alt alanlara ayrılır ve bu şekilde oldukça basit polinomlar oluşturan elemanlar veya alt alanlar sayesinde her bir elemandaki yer değiştirmeleri tahmin etmek mümkündür.



**Şekil 1.** Sonlu eleman modellerinde ağ oluşturma

**Kaynak:** (Kurowski,2017)

Şekil 2.1 'de gösterildiği gibi sürekli olan sınır koşulları ağ oluşturacak şekilde alt alanlara ayrılarak kısıtlamalar ile temsil edilmektedir ve bu sayede yükler elemanın düğüm noktaları adı verilen nodlarına uygulanır. Böylece düğüm noktalarının yerdeğişmeler kümesi bulunarak modelin uygulanan yükler altında denge durumu bulunabilir. Düğüm noktası yer değıştirmeleri bulunursa elemanın herhangi bir yerindeki yer değıştirmeler de hesaplanabilir. Şekil 2.2 'de görüldüğü gibi elemanlar yük altında deforme olup yeni bir şekil oluşturacaktır ve her bir düğüm noktası yeniden eskisine hareket edecektir.

**Tablo 1.** Yük altında deformasyon alt eleman şekilleri

	Deformasyondan önce	Deformasyondan sonra
Birinci derece		
İkinci derece		

**Kaynak:** (Kurowski,2017)

Elemanların ötelemeyi ve dönmeyi gerçekleştirme yeteneğine serbestlik

derecesi denildiği gibi düğüm başına 2 serbestlik derecesi vardır. Şekil 2.2 ‘deki 3 düğümlü ögenin 6 bağımsız değişkeni vardır ve bu değişkenler elemanın deforme olmamış halden deforme olmuş şeklini tanımlar. Yine şekildeki 6 düğümlü öge ise düğüm başına 2 serbestlik derecesine sahip olmak üzere toplamda 12 bağımsız değişkene sahiptir. Bu demek olur ki eleman üzerinde ne kadar çok düğüm noktası varsa o kadar çok polinom fonksiyonu üretilir ve doğru sonuca o kadar çok yaklaşımış olur.

En temel şekliyle sonlu elemanlar yönteminde sistem temel olarak matris formuna dönüştürülür. Düğüm noktalarının yer değiştirmeler kümesi bulunarak uygulanan yükler altında modelin denge durumu bulunur. Nodlardaki değerler için denklem takımları oluşturularak matris formuna dönüştürülür. Bu matris formunun gösterimi aşağıda gösterilmiştir;

$$[K]x[d]=[F]$$

Burada K: bilinen sabitler matrisini, d: yer değiştirmelerin bilinmeyen vektörünü, F: düğüm yüklerinin vektörünü temsil etmektedir. Gerilme analizinde K rijitlik matrisi olarak da bilinmektedir. Bu matris çeşitli sayısal çözümlerle lineer cebirsel yöntemlerle çözülür.

Tüm bu durumlar özetlenirse; verilen bir problemi sonlu elemanlar ile çözmek için sırası ile aşağıdaki işlemlerin uygulanması gerekmektedir:

-Cismi bir sonlu elemanlar sistemi halinde “Parçalama” (bölme) işlemi uygulanır

-Cismi temsil eden elemanların herbirinin sonlu elemanlar matrisindeki yerinin belirlenmesi ve diğer özellikleri çıkarılmalıdır

-Bilinen sabitler matrisi [K], ve yer değiştirmelerin bilinmeyen vektörü [d]’nin toplama işlemi ve düğüm yüklerinin vektörünü [F] belirlemek için matrisin çözümü yapılmalıdır.

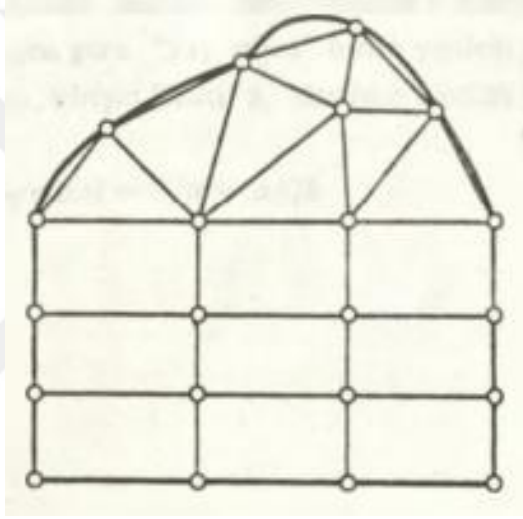
-Hesaplanan düğüm yer değiştirmelerinden [d] elemanların zorlanmaları ve gerilmeleri hesaplanabilmektedir.

-Bilim ve mühendislik problemlerinin uygulamalarında genellikle büyük [K] matrisi oluşturulur ve bu yüzden Denklem 2.1’i çözmek için bilgisayar kullanımı kaçınılmaz hale gelir. Bilgisayar ortamında bu işlemler otomatik hale getirilir ve çok

zor hatta karmaşık fiziksel problemlerin hassas olarak çözümü sonlu elemanlar metodu etkin ve zarif bir araç oluşturur.

## 2.1. Sonlu Eleman Yönteminde Eleman Seçimi

Verilen bir cismin nasıl bölüneceğinin (alt elemanlara ayırma) belirlenmesinde cismin geometrisi, özellikle iç ve dış sınırların biçimi büyük ölçüde yol gösterici olacaktır. Örneğin; iki boyutlu cisimlerde, eğri ve düzgün olmayan sınırlarda üçgen ve dörtgen elemanlar, dikdörtgen elemanlardan daha elverişlidir. Üç boyutlu cisimlerde ise dörtyüzlü (üçgen prizma), dikdörtgen prizmadan daha elverişlidir. Cismin şekline bağlı olarak, uygulamada karmaşık bölme yapmak belirli bir eleman kullanmaktan daha elverişli olabilir.



**Şekil 2.** Üçgen ve dikdörtgen elemanlara bölünmüş bir düzlemsel cisim

**Kaynak:** (Nath,1993)

Aşağıda sonlu eleman seçiminde kullanılan bazı eleman tipleri ve karşılaşılan mühendislik problemleri hakkında bilgiler sunulmaktadır.

### 2.1.1. Üç boyutlu kiriş eleman

Üç boyutlu uzay kiriş eleman olarak adlandırılan bu eleman tipi genel amaçlı olarak kullanılan bir sonlu eleman tipi olup uzayda iki adet düğüm noktası ile tanımlanmaktadır. Bu iki adet düğüm noktası 12 adet serbestlik derecesine sahiptir ve her bir düğüm noktasının 3 adet öteleme ve 3 adet dönme serbestlik derecesi mevcuttur. Herhangi bir doğrultuda elemana gelen kuvvete ve herhangi bir eksen etrafında dönmeye maruz kalmasına karşı kiriş elemanlar mukavemet gösterir. Kiriş elemanı tanımlamak için düğüm noktalarındaki koordinatlara ve elastisite modülüne



(E), kayma modülüne (G), kesit alanı ve atalet momentine, burulma sabitine (J) ve kiriş eleman üzerindeki elemana dik olan deformasyonlara ihtiyaç vardır.

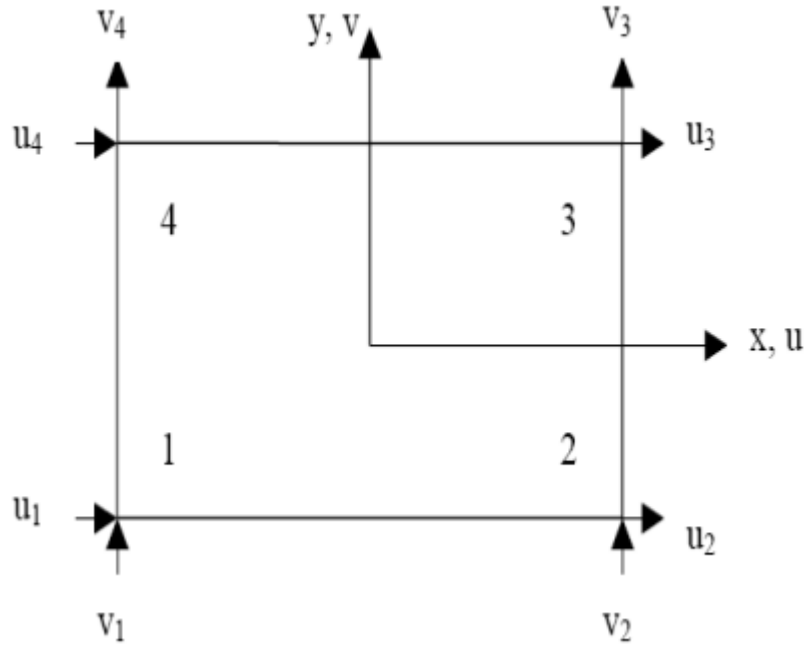
### 2.1.2. İki boyutlu dörtgen eleman

İki boyutlu dörtgen eleman tipinin köşelerinde dört adet düğüm noktası bulunan, sekiz adet serbestlik derecesine sahip olan ve iki boyutlu problemler için tercih edilen ve çifte lineer diye adlandırılan sonlu elemandır. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi dört adet düğüm noktasına sahip geometrik cisimin deformasyon faktörleri ve deplasmanı aşağıdaki denklemlerle ifade edilmektedir;

$$u = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy$$

$$v = a_5 + a_6x + a_7y + a_8xy$$

Yukarıda bahsedilen denklemlerde u ve v deplasman bağlantılarını temsil etmektedir. Bu iki lineer polinomun çarpılmasından elde edilen deplasmandan dolayı eleman çifte lineer dörtgen eleman olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 3. Dört adet düğüm noktasına sahip dörtgen eleman

Kaynak: (Ergin vd., 2000)

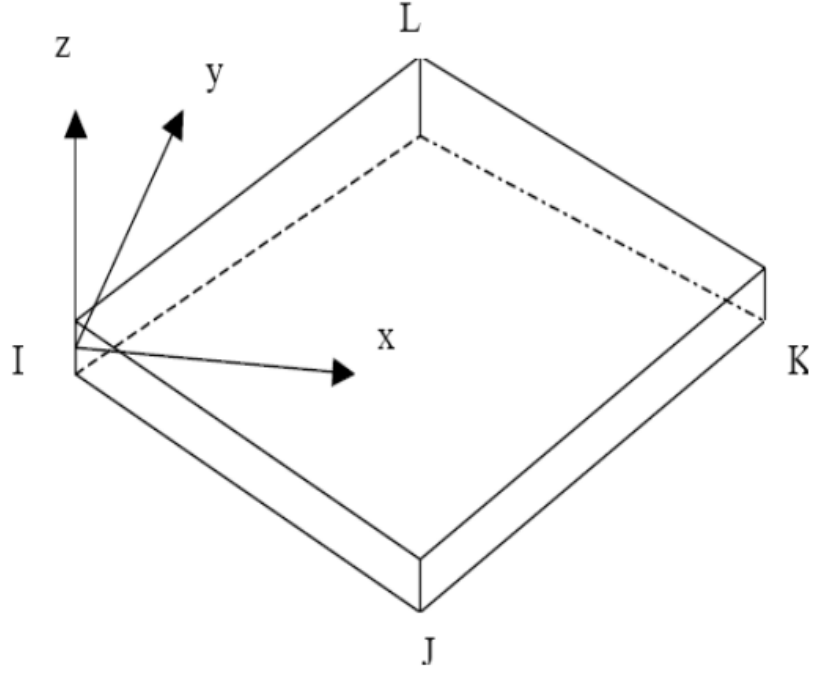
### 2.1.3. Kabuk Elemanlar

Genellikle membran ve eğilme etkilerini birlikte temsil edebilen kabuk elemanların üzerinde bulunan düğüm noktaları aynı düzlem üzerinde değildir ve bu da elemanda çarpımlara neden olabilir. Performans olarak değerlendirildiğinde bu eleman çarpışmaları olumsuzluk olarak değerlendirilir. Günümüzde sonlu eleman metodunu kullanan bilgisayar destekli paket programlar bir miktar eleman çarpışmalarına müsaade edebilmektedir. Bu programlarda genel olarak az sayıda karmaşık eleman tipleri kullanılması yerine daha çok sayıda basit eleman tipleri kullanılması öngörülmektedir. Örneğin; dört düğüm noktasına sahip basit bir dörtgen eleman kullanılması avantaj sağlayabilir.

Kabuk elemanlar teorisine göre eğrisel yüzeyli elemanlar düzlemsel elemanlardan kaynaklanan birçok sorunu ortadan kaldırmaktadır. Ancak bunun yanı sıra eğrisel elemanların tanımlanmasında çok daha fazla geometrik bilgiye sahip olmamız gerekmektedir. Çünkü kabuk elemanların matris formülasyonu düzlemsel elemanlarla karşılaştırılınca çok daha karmaşık olabilmektedir.

#### 2.1.3.1. Dört düğüm noktasına sahip ve dört kenarlı kabuk elemanlar

Düzgün eğrisel yüzeylerin ve plakların modellenmesinde kullanılan dört kenarlı kabuk elemanlar karmaşık olamayan bir formülasyona sahip olması nedeniyle diğer sonlu eleman tiplerine göre daha çok tercih edilir. Sonlu elemanlar metodunu kullanan çoğu ticari paket programda genellikle bu eleman tipinin tercih edilmesinin sebebi eleman düzlemine dik doğrultuda yüklemelerin yapılmasına olanak sağlamasıdır. Eleman üzerinde bulunan her bir düğüm noktası x, y ve z doğrultularında olmak üzere üç adet öteleme ve üç adet dönme olmak üzere toplamda 6 adet serbestlik derecesi vardır. Eğilme ve membran yüklerini taşıyabilme özelliğine sahip olan bu tip elemanlarda farklı kalınlıklarda çalışılmasına müsaade edilebilmektedir.



**Şekil 4.** Dört düğüm noktasına sahip dört kenarlı elastik kabuk eleman

**Kaynak:** (Ergin vd., 2000)

## 2.2. Yüklemeler

Elemanların düğüm noktalarına uygulanması öngörülen tekil yükleri, küçük alanlar üzerine dağıtılmış yayılı yükler olarak tanımlamak mümkündür. Öte yandan sonlu elemanlar ağının yapısı, tekil yüklerin düğüm noktalarına uygulanmasına olanak sağlayacak şekilde oluşturulmalıdır.

Bir noktaya tekil yük uygulandığı zaman tanımlanan malzemenin cinsine göre o bölgede akma oluşabilmektedir. Ancak klasik lineer teoriye göre o bölgedeki akma modellenemez. Yani bu yüzden yüksek yoğunluklu yayılı yükler küçük alanlar üzerine paylaştırılarak tekil bir şekilde düğüm noktalarına uygulanır. Tekil bir yükün düğüm noktasına uygulanması durumunda sonsuz sayıda deplasman ve gerilme değerleri hesaplanmaz. Tekil yükten dolayı oluşan tekil moment öteleme serbestlik derecesine sahip bir düğüm noktasına uygulanamadığından dolayı eşlenik kuvvetler olarak temsil edilirler.

Özetle, bir noktaya tekil yük uygulandığında o noktada oluşabilecek durumlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- Kiriş için sonlu bir deplasman ve gerilme değeri oluşur.
- Levha için sonlu deplasman, sonsuz gerilme değeri oluşur.
- İki veya üç boyutlu geometrik cisimler için ise sonsuz deplasman ve gerilme değeri oluşur.

### **2.3. Sonlu Elemanlarda Dikkat Edilmesi Gerekenler**

Bir geometrinin sonlu elemanlar metoduna göre çözümü için kaç adet eleman gereklidir ya da daha sık bir ağ oluşturduğumuzda modeli daha doğru mu modellemiş oluruz gibi sorular karşımıza çıkabilmektedir. Günümüzde kullanılan sonlu eleman ticari paket programları bu tip yanlışlar yüzünden hatalı sonuçlar verebilmekte ve yanlış modellemeler karşımıza çıkabilmektedir. Bu tip hatalardan kaçınılması için sonlu eleman ağı oluştururken dikkat edilmesi gereken koşullar aşağıda açıklanmıştır;

-Sonlu elemanlar ağı oluşturulurken elemanlar modele mümkün olduğu kadar düzgün bir şekilde üniform olarak dağıtılmalıdır. Yapı davranışının farklı olduğu ve yüklemelerde değişiklik olan bölgelerde daha sıkı bir ağ yapısına müsaade edilebilir.

-Genellikle dört kenarlı sonlu elemanların kullanıldığı geometriler üçgen elemanların kullanıldığı geometrilere göre daha avantajlıdır. Ancak yüklemeler bazen üçgen elemanların kullanılmasını gerektirebilir.

-Sık ağ yapısına deplasman analizi için gerek yokken aynı durum gerilme analizi için geçerli değildir.

-Daha sık bir ağ yapısına gerekli olduğu durumlar malzemede nonlineerliği hesaba katan analizler için ve titreşim modlarının hesabında gereklidir.

-Düğüm noktalarının numaralandırılması büyük deplasman yapan bölgelerden küçük deplasman yapan bölgelere doğru sıralanmalıdır. Ancak sonlu eleman programlarında sonuçlar numaralandırılmadan bağımsızdır.

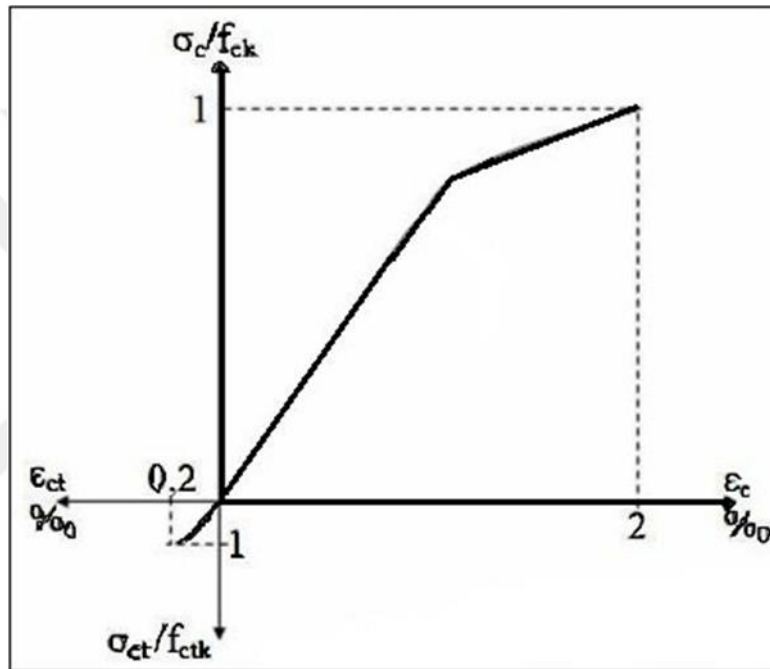
-Elemanların kenar uzunluk oranları eleman tipleri arasında farklılık gösterse de uzunluk oranı deplasman hesapları için 10'nun altında, gerilme hesapları için 5'in altında kalmalıdır.

-Yüksek uzunluk oranına sahip dörtgen elemanlar ve büyük açılı üçgen

elemanlardan mümkün olduğu kadar kaçınılmalıdır.

## 2.1. Öngermenin Tanımı ve Tarihçesi

Basınç dayanımı yüksek çekme dayanımı oldukça düşük olan beton, yapı elemanlarında çekme gerilmelerini karşılayabilmesi için betonarme çeliği kullanmak suretiyle kompozit bir malzeme olan betonarme adı verilen elemanlarla büyük açıklıkların geçilmesine olanak sağlamıştır. Standart bir betonun basınç dayanımı çekme dayanımının yüzde 10 ile yüzde 12 arasında olduğu kabul edilir.

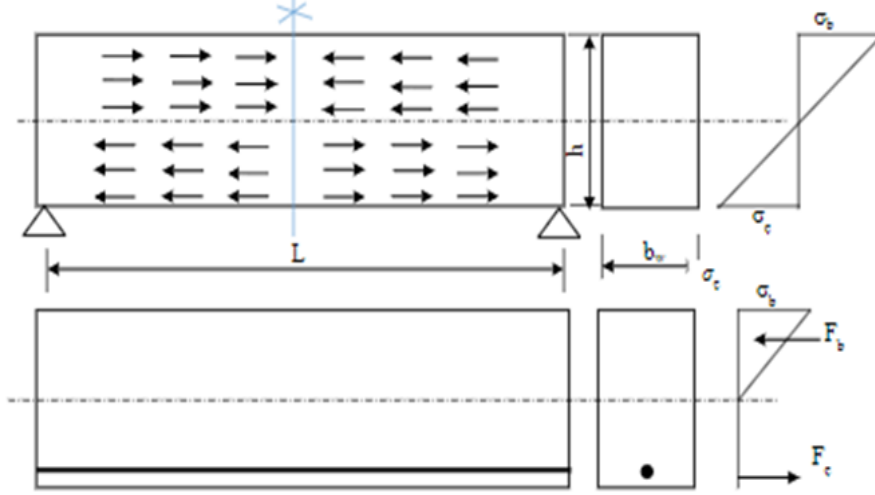


Şekil 5. Betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi

Betonarme yapılarda betonun çekme dayanımının düşük olmasından kaynaklanan bu eksiklik sebebiyle öngerme tekniği denilen yapı elemanlarının dayanım gücünü ve mukavemetini arttıran bir teknik kullanılır. Bu tekniğin normal betonarme elemanlardan farkı yüksek dayanımlı çelik şerit ve teller kullanılarak elemana önceden bir basınç gerilmesi verilmesidir. Yüksek dayanımlı bu malzemenin betonla birlikte kullanılması sayesinde büyük açıklıkların, yapı elemanlarının zati ağırlığının azalması ve masraflı olan iskele ve kalıp sistemlerinden kaçınılması suretiyle daha ekonomik bir şekilde geçilmesine olanak sağlar.

Günümüz teknolojisi ile birlikte gelişmiş olan yapı teknikleri ile beraber büyük açıklıkların geçilmesi gerekli olmaktadır. Ancak açıklıkların artması ile

beraber betonarme elemanlarda çekme gerilmeleri artmış olacağından ve bu nedenle oluşan çatlaklardan dolayı donatılarda korozyon gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Betonarme elemanlarda çekme gerilmeleri donatılar tarafından karşılanırsa dahi açıklık arttıkça kullanılan donatı miktarı da artar ve ağırlık da artar bu da büyük açıklıklı kirişlerde problem ortaya çıkarır.



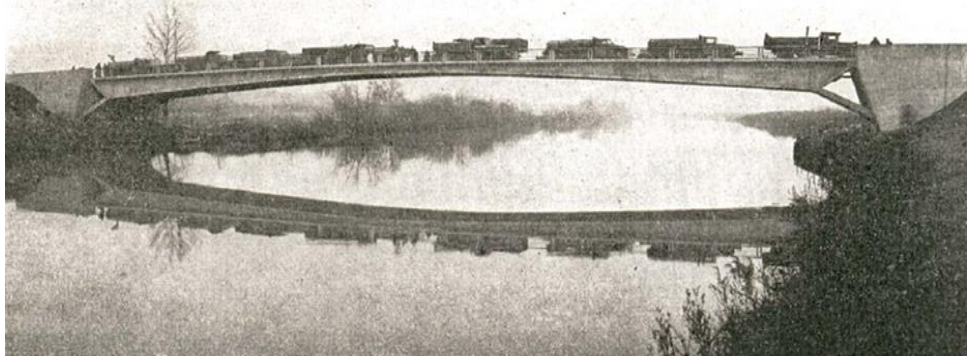
**Şekil 6.** Bir kirişte oluşan gerilmeler

**Kaynak:** (Hüsem, 2016)

Öngermelinin kullanıldığı bütün yapı elemanlarının içinde öngermeli prekast I kesitli köprü kirişleri bu yöntemin kullanımının en yaygın hale getiren prefabrike betonarme yapı elemanlarıdır. Beton kalitesinin yükseltilmesi bakımından, hızlı bir şekilde üretimi ve montajda sunduğu kolaylıklar açısından öngermeli köprü kirişleri günümüzde karayolu projelerinde sıklıkla karşılaşılan yapı elemanları haline gelmektedir. Öngermeli betonların tarihçesine bakıldığında kemer bir köprüde oluşan basınç gerilmeleri öngirme tekniğinin ilk çağlardan beri kullanıldığının kanıtıdır. Öngermiden önce büyük beton köprülerin hemen hemen hepsi kemer şeklinde oluştu tarihinde dikkat çekmektedir. Kemer köprülerde ortaya yerleştirilen kilit taşları, kemere gelen herhangi bir dış yük altında diğer taşlar arasında basınç gerilmesi oluşmasına sebep olmaktadır. Öngirme çeliğini tarihte ilk kez kullanan P.H. Jackson 1872 yılında patent alarak taşların içinden çelik çubuklar geçirip bunları gererek kemerlerden ilham alarak uygulamıştır.

Öngirme teknolojisinin günümüzde kullanıldığı şekliyle ilk uygulayan ve beton ile çeliği bir arada kullanarak yüksek kalitede bir malzeme elde eden Fransız mühendis Eugene Freyssinet 1941 yılında yapımı başlayan ilk büyük eserlerden olan

Marn nehri üzerinde olan portik köprüler Luzancy, Esbly, Annet, Trilbardou, Changis ve Ussy ile karakteristik eserler ortaya koymuştur.

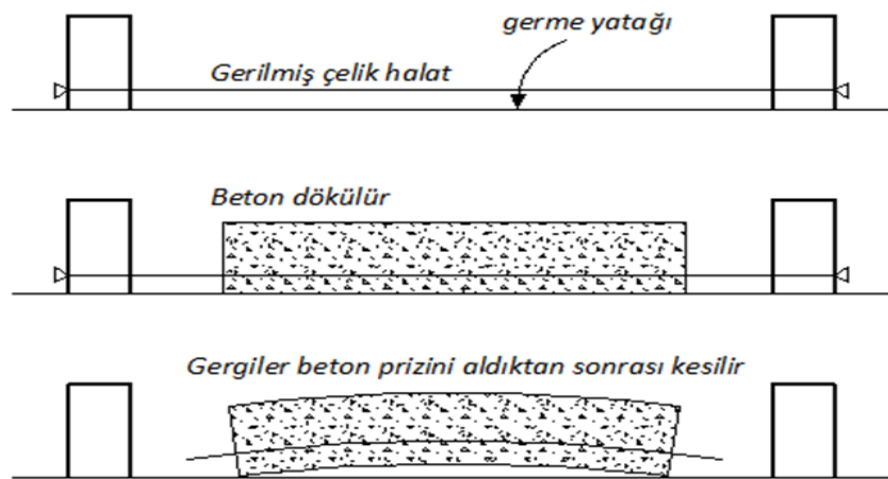


Şekil 7. Luzancy Köprüsü, 1941

Kaynak: (Celasun, 1973)

## 2.2. Öngerme Tekniğinin Yapım Aşaması ve Elemanları

Öngerme tekniğinde genellikle yüksek dayanımlı öngerme çeliğinin belirli bir kuvvetle çekilip bırakılması sonucu bu kuvvetin betona aktarılması sağlanır. Bu teknikte bir kalıp içerisinde yerleştirilen çelik şeritler bir payanda yardımıyla gerilir daha sonra beton dökümü gerçekleştirilir. Beton belirli bir mukavemete ulaştıktan sonra gerilen çelik şeritler öngerme kuvvetini betona aktarmak üzere payandalardan kesilir. Bu öngerme işlemi sayesinde betonun sahip olduğu yüksek basınç mukavemeti ortaya çıkartılır. Ayrıca verilen ters sehim sayesinde betonun zati ağırlığından gelen sehim dengelenmiş olur.



Şekil 8. Kirişe uygulanan öngerme işlemi

Kaynak: (Hüsem,2016)

Günümüzde betonun öngerilmesi için çeşitli tiplerde boyutlarda ve dayanımlarda fabrika ortamlarına özel olarak üretilmiş teller, demetler (toronlar) ve çubuklar mevcuttur. Bunların standartları TS 3233 'de tanımlandığı gibi ''Öngermeli Beton Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları' 'başlığı altında yönetmelikte verilmiştir. Aşağıda öngermeli beton hakkında bazı tanımlamalar yapılmıştır:

-Teller: 4 ile 10 mm çaplarında, çentikli ve çentiksiz olarak akma mukavemeti  $120-150 \text{ kg/mm}^2$ , kopma mukavemeti  $130-170 \text{ kg/mm}^2$  imal edilmiştir.

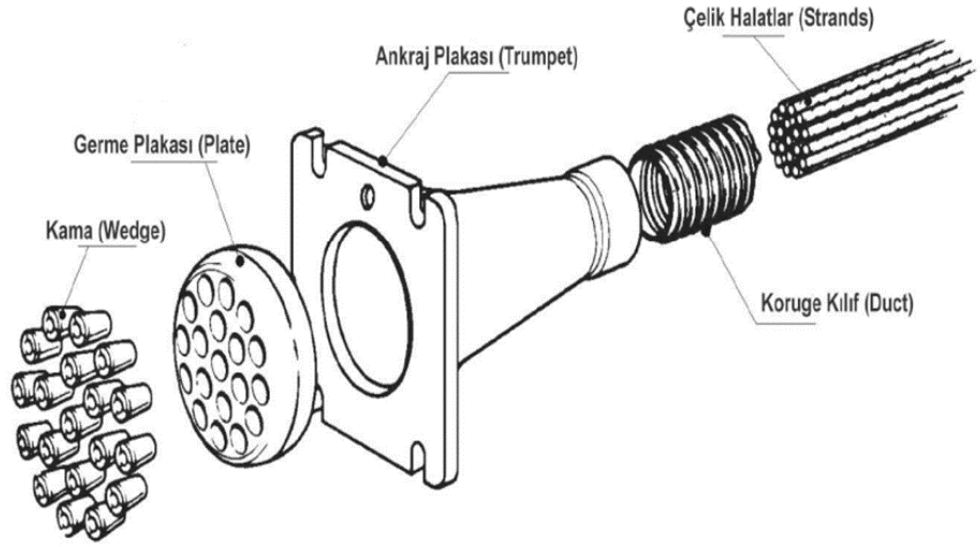
-Demetler: 2, 3 ve 7 telli olup, genellikle 6-18 mm çaplarında çentikli ve çentiksiz olarak özel kullanım amaçları için sıkıştırılmış tipte akma mukavemeti  $160-170 \text{ kg/mm}^2$ , kopma mukavemeti  $170-190 \text{ kg/mm}^2$  olarak imal edilmiştir.

-Çubuklar: 20 ile 50 mm çaplarında, çentikli ve çentiksiz olarak akma mukavemeti  $80-110 \text{ kg/mm}^2$ , kopma mukavemeti  $105-125 \text{ kg/mm}^2$  olarak imal edilmiştir.

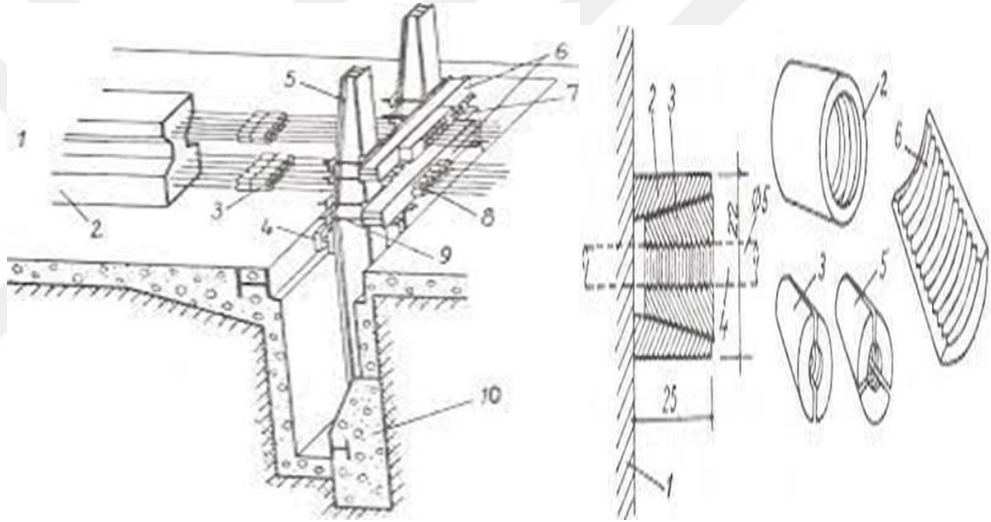
Standart bir öngerme halatı üç ana bölümden meydana gelmektedir. Bunlar çelik teller, çelik halatlar ve öngerme halatıdır. En küçük parça olan çelik teller 10 mm kalınlığında kullanılmaktadır. Birkaç çelik telin bir araya getirilmesi ile çelik halatlar oluşmaktadır. Genellikle 7 adet çelik tel kullanılır ve beton iyi bir bağlantı kurması amacıyla 1 telin etrafına diğer 6 tel örgü şeklinde çevrilir. En büyük parça olan öngerme halatı ise bir veya birkaç adet çelik halatın bir araya getirilmesi ile oluşur.

-Ankraj malzemeleri: Öngerme işleminde aktif ve pasif ankrajlar kullanılmak üzere krikolu uçtaki germe işleminin uygulanmasına göre bir uçta aktif bir uçta pasif ankraj bulunmaktadır. Ucuz ve güvenli ankraj sistemlerinden olan pasif uçlarda öngerme donatısını çelik bir levhaya ankre ederek demet biçiminde yayılmasıdır. Son yıllarda yaygın olarak kullanılması azalsa da halen en güvenilir yöntem Freyssinet ankraj silindiri ve konisidir. Öngerme yapılırken aktif ve pasif ankrajlarda gerilme kaybının olması istenmez. Bu nedenle ankrajlama yapılırken izlenecek yöntemler iyi seçilmeli gerekirse önceden deneyler yapılmalıdır.





Şekil 9. Öngermeli halatın bölümleri



Şekil 10. Öngerme düzeneği ve kriko uçlar

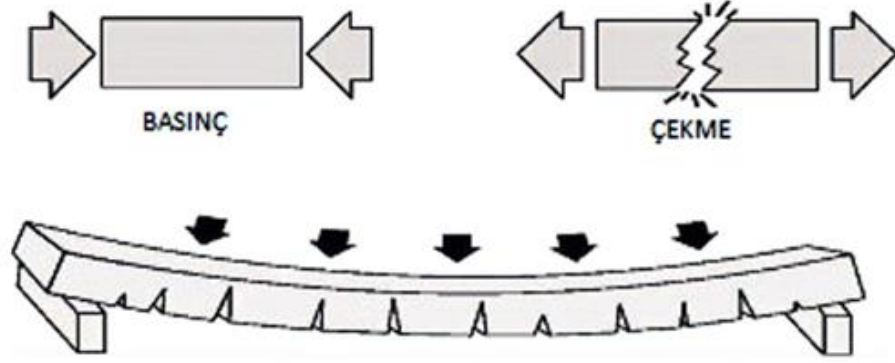
### 2.3. Öngermeli Beton Özellikleri

Beton standartlara göre tanımlandığında normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı olarak sınıflandırılabilir. TS-500 'de bahsedildiği üzere C16-C50 dayanım sınıfı arasında bulunan betonlar normal sınıflı betonlar, C50 ve üstü beton sınıfına sahip betonlar ise yüksek dayanım sınıfına sahip betonlar olarak geçmektedir. Öngermede uygulanacak beton sınıfları ise yönetmelikte C35'in üzerinde olması önerilir. Öngermede hazırlanan beton karışımı normal dayanımlı beton standartlarına nazaran çok daha yüksek kalitede hazırlanmalıdır. Çünkü öngerme betonu daha prizini almışken gerilmelere maruz bırakılacaktır.

Öngermeli beton hazırlanırken genellikle Portland çimentosu kullanılır. Çimento hamuru başlangıçta betona plastiklik kazandıran zamanla sertleşerek agrega tanelerini bağlayan ve betona mukavemet kazandıran bir unsurdur. Çimentonun özellikleri de betonun özelliğini belirleyen en önemli unsurdur. Ayrıca kullanılacak agreganın maksimum dane çapı, kalıp enkesit boyutlarına, donatılar arasındaki mesafeye bağlı olarak değişmekle birlikte 20-25 mm'yi asla geçmemelidir. Tercihen maksimum dane çapı 16 mm çaplı agrega tercih edilmeli ve düzgün bir geometriye sahip olmalı, ayrışmamalıdır. Mineral katkılarda da alkali-agrega reaksiyonunun oluşmasına dikkat edilmeli ve öngerme çeliği ile kimyasal bir reaksiyon gösteren kimyasal katkılardan kaçınılmalıdır.

Öngermeli betonun fabrikada imalatı sırasında beton dökülürken kılıf delikleri iyice kapatılmalı beton şerbeti kılıf ve ankrajların arasından geçmesine izin verilmemelidir. Kabloların gerilme işlemi sırasında beton ile aderans sağlanmasına özen gösterilmelidir. Dökülen beton homojen olarak kalıbın her noktasına ulaşmalı akıcılık sağlanması adına fazla su kullanılmamalı aksi takdirde donatı korozyonları problemleri ile karşılaşılabilir. Betonun yerleşimini sağlamak için süperakışkanlaştırıcılar kullanılabilir. Böylece betonun işlenebilirliğini arttırmak ile su/çimento oranını düşürerek beton mukavemetini iyileştirebilmekte sünme ve rötre üzerinde olumlu etkiler yaratmaktadır.

Öngermeli betonda sünme ve büzülme gibi faktörler çok önemli bir yer tutmaktadır. Betonun zamana bağlı hacimsel değişimlerinin sebep olduğu sünme ve büzülme öngerilme kayıplarına sebep olmaktadır. Öngerilme kayıplarına ayrıca ankraj kayması, sürtünme gibi sebeplerle kesitten kesite değiştiği gibi öngerilme donatısının gevşemesi gibi nedenler de sebep olabilmektedir. Bu tür kayıpların imalat aşamasından önce TS-500 başta olmak üzere yönetmeliklerde verilen katsayılar dikkate alınarak tasarım aşamasında hesaplanması büyük önem arz etmektedir.



Şekil 11. Öngermeli kirişe basınç ve çekmenin etkisi

### 2.3. Öngermeli Beton Özellikleri

Köprü inşaatları öngerme endüstrisinin başlamasında önemli bir rol oynamıştır. Öngermeli beton eski çağlardan bu yana kısa ve orta açıklıklı köprülerde üstünlüğünü kanıtlamıştır. Bu yapı malzemesi ve metodu; ekonomi, hız, uzun ömürlülük, yangına dayanıklılık, enerji tasarrufu ve mimari esneklik gibi sebeplerden dolayı kullanım alanı olarak oldukça geniş bir yelpaze sunar. Öngermeli betonun kullanım alanları ağır sanayi tesislerinden geniş açıklıklı köprülere kadar çok büyük ve küçük her türlü binanın yapısal ve mimari ihtiyaçlarını karşılayabilmektedir.

Avantajları;

- Betona uygulanan öngerilme sayesinde kesit büyük yükler altında bile elastik davranış gösterebilmektedir. Öngerilmeli elemanların moment ve kesme kuvveti taşıma kapasiteleri daha fazla olabilmektedir.
- Uygulanan ters sehim sayesinde elemana uygulanan dış yük yardımıyla sehim dengelenebilmektedir.
- Yüksek dayanımlı beton ve buna ek olarak çelik kullanımı yapının ağırlığını azalttığı gibi büyük açıklıklarda daha ekonomik çözümler sunmaktadır.
- Öngermeli beton üretimi bir fabrika ortamında olduğu için imalat sırasında karşılaşılabilecek sorunlara anında müdahale edilebilir ayrıca işçilikten ve zamandan tasarruf sağlar.
- Öngerilmeli elemanda kullanım yükleri altında çatlak oluşumu önlenir seviyede tutulabilir ve sonradan oluşabilecek iç kuvvetler engellenebilir.

### Dezavantajları;

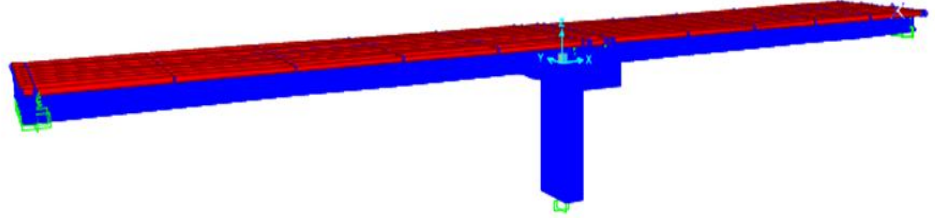
- Fabrika ve şantiye arası mesafelerin uzunluğu sebebiyle nakliye maaliyetlerinin artması
- Deprem gibi dinamik yükler altında sistemsel sıkıntıların ortaya çıkabilir.
- Standart kalıp üretimleri sebebiyle mimari tasarım yaratıcılığında kısıtlamalar ve buna bağlı binalarda aynı tip ve benzer planlar kullanılması
- Fabrikalarda üretim için çok büyük hacim alanlarına gerek duyulması ve fabrika kurulum maaliyetlerinin yüksek olması.



## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### ANALİZ VE TASARIM

Bu çalışmada yapılacak olan prekast kirişli köprü üç farklı deprem bölgesi durumuna göre farklı zemin tiplerinde olmak üzere iki farklı tip prekast kiriş kullanılarak iki farklı tip model kurulmuştur. Tasarım köprü 58 m açıklıklı ve 8 m genişliğinde olup köprü üst yapısında model 1’de 90 cm yüksekliğinde, model 2’de 120 cm yüksekliğinde iki farklı tip prekast I kirişe sahip olan köprüler karşılaştırılmıştır. Köprü üst yapısını taşıyan öngermeli kirişler 300x200x63 mm boyutlarındaki elastomer mesnetler üzerine oturtulmuş olup kirişlerin üzerinde 22 cm kalınlığında betonarme döşeme bulunmaktadır. Modellere etki ettirilecek yükler AASHTO’ ya uygun olarak alınmış olup genel amaçlı yapısal bir analiz programı olan sap2000 V.21 programında analiz edilmiştir.



**Şekil 12.** Köprünün üç boyutlu sonlu eleman

#### **3.1. Analiz Aşaması**

Tasarım köprünün sap2000 programında yapılan modal analiz uygulamaları günümüzde yapısal sistemlerin durum tespitinde ve hasar tanımlamaları amacıyla sıkça karşımıza çıkmaktadır. Bu sayede yapısal sistemlerin dinamik özellikleri (frekans, sönüm oranları ve modal şekilleri) tahmin edilebilmektedir. Yapıların tanımlanması açısından modal analize bakılması önemlidir. Sistemin dinamik

değişkenleri olan doğal frekanslar ve bu frekanslara karşılık gelen modal şekiller ve sönüm oranları tahmin edilebilir. Sistemin dinamik değişkenleri sistemdeki kütle, miktar ve dağılımı modal analiz sayesinde ortaya çıkar. (Dönmez ve Karakan, 2009)

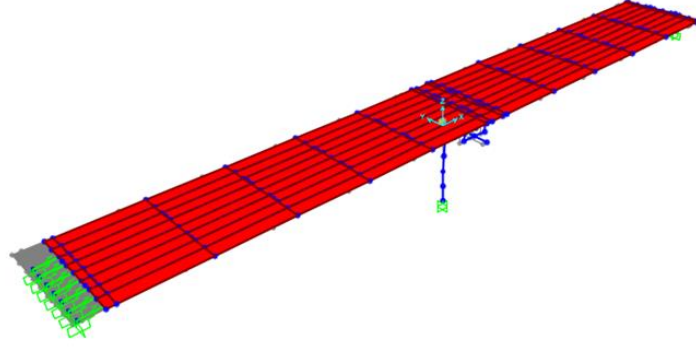
Mod şekli denilen kavram yapının deformasyonlarının gösterilmesidir. Her bir periyot için yapının mod şekillerinden bahsedilebilir. Aşağıdaki şekillerde köprünün eksenlerinin izdüşümlerinin alındığı davranış şekilleri gösterilmiştir. Toplam kütle katılım oranları denilen kavram ise yapının ne kadarlık kütlelerinin x ve y yönünde harekete geçtiğidir. Modal analizde deprem hesabı yapının mod şekillerinde oluşan deplasmanlara göre hesap edilir.

Bu tez kapsamında KÖS=3 basit köprülerin DD-3 deprem seviyesi için “Mod Birleştirme Yöntemine” göre hesap yapılmıştır. Bu yöntemde toplam deprem kuvvetlerinin dağıtılmasında mod şekilleri dikkate alınır ve çok serbestlik dereceli sistemlerin davranışını veren denklemlerin her mod şeklinin ayrı ayrı değerlendirilmesiyle toplam denklem kuvvetinin belirlenmesinde titreşim modu sayısı kütle katılım oranına bağlıdır ve çok sayıda mod davranışı etkiler.

Mod birleştirme yöntemine göre yapılan analizlerde spektrum eğrileri TBDY 2018 yönetmeliğine göre tanımlanmıştır. Bu yöntemde yapıda meydana gelen deplasmanların her biri oluşan maksimum katkıların istatikselsel olarak birleştirilerek doğrusal bir analiz yaptığı düşünülür. Mevcut deprem yönetmelikleri ve şartnamelere göre ivme spektrumları, deprem ve zemin sınıflarına göre farklılıklar gösterir. Yapının herhangi bir kuvvet karşısında gösterdiği deplasmanlar her bir titreşim periyodu için en büyük değerlerin birleştirilmesi ile ortaya çıkar. Oluşan maksimum tepkiler Kareleri Toplamının Karekökü (SRSS) ve Tam Karesel Birleştirme (CQC) gibi yöntemlere uygun bir birleştirme yöntemleri ile hesaplanır.

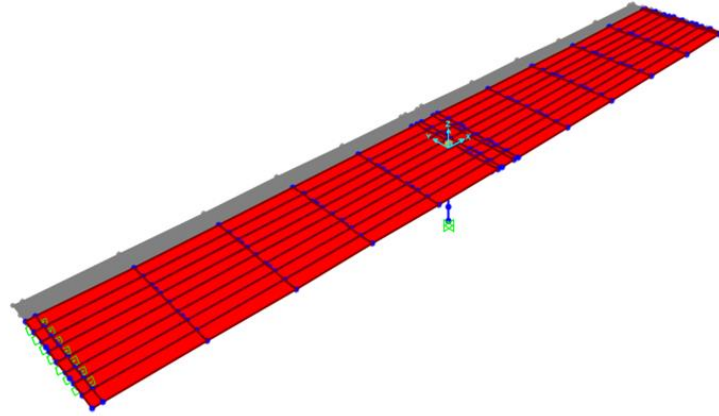
Aşağıdaki şekillerde farklı modların modele etkisi gösterilmiştir;

Deformed Shape (MODAL) - Mode 1; T = 0,81974; f = 1,2199

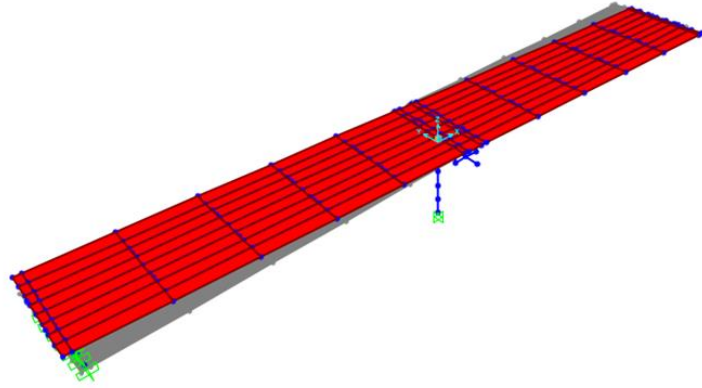


Şekil 13. Boyuna doğrultudaki 1.Titreşim modu ( $T_1=0,82s$ )

Deformed Shape (MODAL) - Mode 2; T = 0,80491; f = 1,24238



Şekil 14. Enine doğrultudaki 2.Titreşim modu ( $T_2=0,80s$ )



**Şekil 15.** Burulma 3.Titreşim modu ( $T_3=0,58s$ )

Aşağıda tasarım köprünün sap2000 programıyla yapılan modal analiz sonuçlarından yararlanılarak oluşturulan periyot, frekans ve kütle katılım oranları Tablo 3.1. 'de gösterilmiştir.



**Tablo 2.** Köprü modeli periyotları ve kütle katılım oranları

Yapı Peiyotları ve Modal Kütle Katılım Oranları						
Mode	Period	UX	UY	UZ	ToplamUX	ToplamUY
	Sec	%	%	%	%	%
1	0,820	0,890	0,000	0,00	0,890	0,000
2	0,805	0,000	0,834	0,00	0,890	0,834
3	0,579	0,000	0,002	0,00	0,890	0,836
4	0,438	0,000	0,000	0,00	0,890	0,836
5	0,394	0,000	0,000	0,59	0,890	0,836
6	0,273	0,087	0,000	0,00	0,977	0,836
7	0,223	0,000	0,007	0,00	0,977	0,842
8	0,202	0,000	0,000	0,00	0,977	0,842
9	0,159	0,000	0,000	0,00	0,977	0,843
10	0,142	0,000	0,064	0,00	0,977	0,907
11	0,121	0,000	0,000	0,00	0,977	0,907
12	0,114	0,000	0,000	0,00	0,977	0,907
13	0,114	0,000	0,000	0,00	0,977	0,907
14	0,108	0,000	0,000	0,00	0,977	0,907
15	0,108	0,000	0,000	0,00	0,977	0,907
16	0,091	0,000	0,000	0,00	0,977	0,907
17	0,089	0,000	0,023	0,00	0,977	0,930
18	0,070	0,000	0,000	0,00	0,977	0,930
19	0,070	0,000	0,000	0,00	0,977	0,930
20	0,068	0,000	0,000	0,00	0,977	0,930
21	0,065	0,000	0,000	0,00	0,977	0,930
22	0,064	0,000	0,000	0,03	0,977	0,930
23	0,063	0,000	0,014	0,00	0,977	0,944
24	0,061	0,000	0,000	0,00	0,977	0,944
25	0,052	0,000	0,008	0,00	0,977	0,952
26	0,052	0,000	0,000	0,00	0,977	0,952
27	0,052	0,000	0,000	0,00	0,977	0,952
28	0,052	0,000	0,000	0,00	0,977	0,952
29	0,051	0,000	0,000	0,00	0,977	0,952
30	0,051	0,000	0,000	0,00	0,977	0,952
31	0,049	0,000	0,000	0,00	0,977	0,952
32	0,048	0,000	0,000	0,01	0,977	0,952
33	0,048	0,000	0,026	0,00	0,977	0,978
34	0,045	0,000	0,000	0,00	0,977	0,978
35	0,044	0,000	0,004	0,00	0,977	0,981
36	0,043	0,000	0,000	0,00	0,977	0,982
37	0,041	0,000	0,000	0,04	0,977	0,982
38	0,037	0,000	0,000	0,00	0,977	0,982
39	0,037	0,000	0,000	0,00	0,977	0,982
40	0,037	0,000	0,001	0,00	0,977	0,982
41	0,036	0,000	0,000	0,03	0,977	0,982
42	0,033	0,000	0,000	0,13	0,977	0,982
43	0,032	0,000	0,000	0,00	0,977	0,982
44	0,032	0,000	0,000	0,00	0,977	0,982
45	0,030	0,000	0,000	0,00	0,977	0,982

## 3.2. Tasarım Parametreleri

### 3.2.1. Malzeme bilgileri

Hesaplarda kullanılacak olan beton sınıfları için kullanılan karakteristik özellikler AASHTO 2007 'de geçen 5.4.2.2'deki formüle göre hesaplanmıştır;

-Beton birim hacim ağırlıkları  $\gamma_c=25 \text{ kN/m}^3$  olarak alınacaktır.

-Elastisite modülleri;

$E_c = 0.043 * K_1 * \gamma_c * \sqrt[1.5]{f_{ck}}$  formülüne göre C30 ve C45 beton sınıfları için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

**Tablo 3.** Beton sınıfları için kullanılan elastisite modülü değerleri

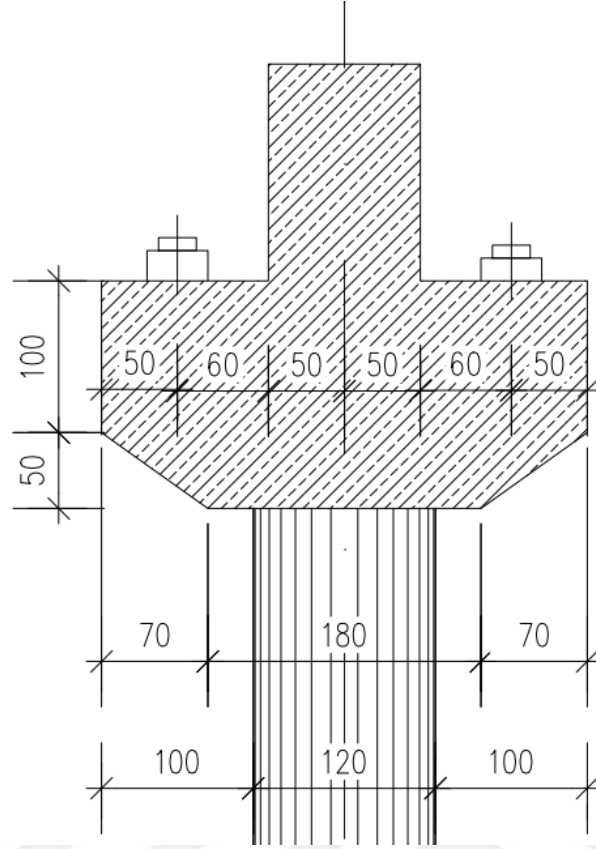
Köprü Bileşenleri	Beton Sınıfı	Elastisite Modülü $E_c$ (Mpa)
Döşeme, Başlık Kirişi, Kolon	C30	36056,5
Prekast I kirişler	C45	29440,1

### 3.3. Köprünün Geometrik Özellikleri

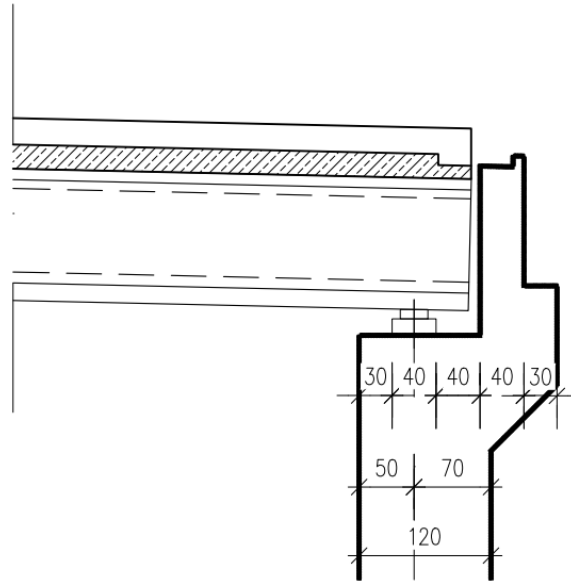
Köprünün hesaplarda kullanılacak genel özellikleri;

- Köprü açıklık adedi:2
- Hesap açıklığı:58,00 m
- Platform genişliği:800 cm
- Sağ ve Sol konsol uzunluğu:50 cm
- Prekast kiriş aralığı:97 cm
- Tip en kesitte toplam kiriş adedi:7 adet
- Kiriş Tipleri: I-90 ve I-120
- Döşeme kalınlığı: 22 cm
- Taşıt yolu genişliği:600cm
- Bordür:100 cm

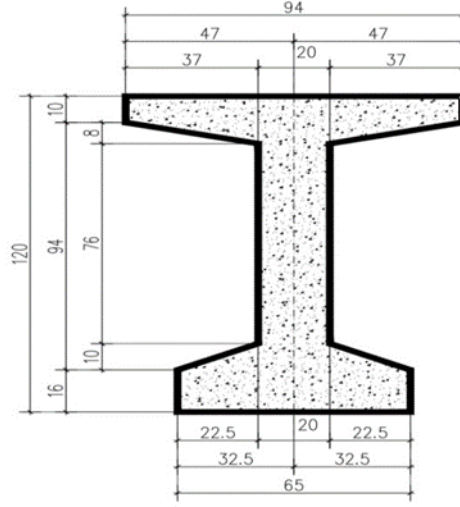




Şekil 18. Orta ayak başlık kirişi yan kesit görünüşü



Şekil 19. Kenar ayak kesiti ve ölçüleri



## PREFABRİK ÖNÇEKİM ANA KİRİŞ KESİTİ 1/20

L=2890 cm.....14 ADET

**Şekil 20.** Prekast kiriş çubuk elemanı enkesiti

Prekast kiriş çubuk elemanı enkesiti atalet moment değerleri Autocad programı massproperties komutu yardımıyla bulunmuştur. Bu değerler Tablo 3.2 'de gösterilmiştir;

**Tablo 4.** Prekast kiriş özellikleri

Özellikler	I-90	I-120
Prekast kiriş alanı	0,2896m <sup>2</sup>	0,4381 m <sup>2</sup>
X eksenli atalet momenti değeri	0,0301 m <sup>4</sup>	0,0811 m <sup>4</sup>
Y eksenli atalet momenti değeri	0,0072 m <sup>4</sup>	0,0137 m <sup>4</sup>
Ağırlık merkezinin kesit altına olan mesafesi	0,4873 m	0,6185 m
Ağırlık merkezinin kesit üstüne olan mesafesi	0,4127 m	0,5815 m

### 3.4. Yük Analizi

#### 3.4.1. Zati yük hesabı

Aşağıdaki Tablo 3.3'te verilen alan yüklerinin hesaplanmasında kullanılan birim hacim ağırlıkları verilmiştir. Bu ağırlıklar kullanılan malzemenin özellikleri programa girildikten sonra yapıya etki ettirilmektedir.

**Tablo 5.** Kullanılan malzemelerin birim hacim ağırlıkları

Betonarme yapı elemanlarında	$\gamma_b = 25.0 \text{ kN/m}^3$
Kaplama ve asfalt ağırlıklarında	$\gamma_k = 22.0 \text{ kN/m}^3$

Zati Ağırlıkların Hesabı:

-Kiriş zati ağırlığı:

$$0,2896 \text{ m}^2 \times 25 \text{ kN/m}^3 \times 14 = 101.36 \text{ kN/m (I-90)}$$

$$0,4381 \text{ m}^2 \times 25 \text{ kN/m}^3 \times 14 = 153.335 \text{ kN/m (I-120)}$$

Döşeme zati ağırlığı:

$$0,22 \text{ m} \times 0,8 \text{ m} \times 25 \text{ kN/m}^3 = 44.00 \text{ kN/m}$$

Asfalt kaplama ağırlığı:

$$6.00 \text{ m} \times 0,05 \text{ m} \times 22 \text{ kN/m}^3 = 6.6 \text{ kN/m}$$

Bordür ağırlığı:

$$2.00 \text{ m} \times 0,26 \text{ m} \times 25 \text{ kN/m}^3 = 13.00 \text{ kN/m}$$

Korkuluk ağırlığı:

$$2 \text{ adet} \times 1.5 \text{ kN/m} = 3 \text{ kN/m}$$

Prekast panel ağırlığı:

$$0.80 \text{ m} \times 0,10 \text{ m} \times 25 \text{ kN/m}^3 \times 2 \text{ adet} = 4.00 \text{ kN/m}$$

Model 1, I-90'lık kiriş için bir açıklığın ağırlığı:

$$171,96 \text{ kN/m} \times 27,90 \text{ m} = 4797,68 \text{ kN}$$

Model 2, I-120'lik kiriş için bir açıklığın ağırlığı:

$$223,94 \text{ kN/m} \times 27,90 \text{ m} = 6247,80 \text{ kN}$$

### 3.4.2. Hareketli yük hesabı

Köprü üzerinden geçmesi öngörülen ve ülkemizde de hareketli yük sınıfı olarak en yaygın ve en ağır araç yüklerinden biri olan H30-S24 kamyonu kullanılmıştır. H30-S24 kamyonunun açılımında ise H: iki dingilli bir kamyonu ifade ederken iki dingilden gelen ağırlık  $W=30$  tondur ve S: ona bağlı bir yarım treyler olmak üzere tek dingilden gelen ağırlık  $W=24$  ton olarak hesaplanır ve toplam ağırlık 54 tondur.

STANDARD KAMYON		YÜK SINIFI	H <sub>30</sub> -S <sub>24</sub>
		W AĞIRLIĞI	300 KN
		P (KN/m)	15
		EGİLME ETKİSİ İÇİN (x)	135
		KESME ETKİSİ İÇİN (x)	195
s (cm)	75		
SERİT YÜKÜ			

Şekil 21. H30-S24 standart yük kamyonu için yük yerleşimi

Hareketli yük Şekil 3.10.'da belirtildiği yükler etki ettirilerek muadil şerit yüklerine göre hesap yapılmıştır. Yapılan hesaplara göre etki ettirilen yüklerden alt yapıya gelen maksimum yükler bulunarak diğer etkiyen yüklerle birleştirilerek en olumsuz durum dikkate alınmıştır.

Tablo 6. Yol genişliğine göre trafik şeridi adedi (Karayolları teknik şartnamesi)

Yol Genişliği (Ortada bir refüj varsa bunun genişliği hariç olmak üzere)	Trafik Şeridi Adedi
6.00 m ile 9.00 m arasında	2
9.01 m ile 13.00 m arasında	3
13.01 m ile 16.50 m arasında	4

**Tablo 7.** Hareketli yüklerden doğan etki yüzdeleri (Karayolu teknik şartnamesi)

Şerit Sayısı	Azaltma Katsayısı (MPF)
Bir veya iki şerit için	1.00
Üç şerit için	0.90
Dört veya daha fazla şerit için	0.75

Tüm şeritlerin tam dolu olma ihtimali düşük olduğu için hareketli yükten doğan etkilerin yüzdesi alınmalıdır. Taşıtların dinamik etkisini hesaba katmak amacı ile kamyon ve şerit yüklerinden elde edilen gerilmeler dinamik etki katsayısı ile çarpılır. (Yol köprüleri için teknik şartname)

Dinamik etki katsayısı aşağıdaki formülle hesaplanır;

$$IM=\psi=1+\frac{15}{L+37} \quad (3.1)$$

Bu formülde  $\psi$ ; dinamik etki katsayısı (azami değer 1,30), L; hesap uzunluğu m olarak ifade edilmektedir.

### 3.4.3. Yaya yükü

Yaya yükü olarak bordür boyunca  $3.00 \text{ kN/m}^2$  alınmıştır. [AASHTO,2007]

### 3.4.4. Rüzgâr yükü

Rüzgâr yükleri üst yapıya etkileyen rüzgâr (WS) ve araç üzerine etkileyen rüzgâr (WL) olmak üzere ikiye ayrılır. [AASHTO,2007, 3.8.]

#### 3.4.4.1. Üst Yapıya Etkiyen Rüzgâr Yükü (WS)

Üst yapıya etkileyen rüzgâr yükü kiriş ve döşemeye etki ettirilecek şekilde yatay bir kuvvet olarak üniform dağıldığı varsayılacaktır. Buna göre 10 m'den büyük köprüler için tasarım rüzgâr yükü olan  $V_{DZ}$  aşağıdaki formüle göre hesaplanmalıdır.

$$V_{DZ} = 2.5 V_0 \left( \frac{V_{10}}{V_B} \right) \ln \left( \frac{Z}{Z_0} \right)$$

Bu formülde  $V_{DZ}$ , tasarım rüzgâr hızını,  $V_0$ , 10 m yükseklikteki şiddetli tasarım rüzgâr yükünü,  $V_{10}$ , karakteristik yük olup 160 km/sa 'teki rüzgâr hızını, Z,



rüzgâr yüklerinin maruz kaldığı yapının yüksekliğini,  $Z_0$  ise sürtünme uzunluğunu ifade etmektedir.

**Tablo 8.** Şehirlerin merkezlerine göre  $V_0$  ve  $Z_0$  değerleri

Condition	Open Country	Suburban	City
$V_0$ (km/hr)	13,2	17,6	19,3
$Z_0$ (mm)	70	1000	2500

**Kaynak:** (AASHTO, 2007)

Denklem 3.2'ye ve Tablo 3.7'ye göre hesaplanan  $V_{DZ}$  değeri rüzgâr yönünün yatay olduğu varsayılarak tasarım rüzgâr basıncı olan  $P_D$  ise aşağıda bahsedilen formül 3.3'e göre hesaplanır.

$$P_D = P_B \left( \frac{V_{DZ}}{V_B} \right)^2 = P_B \frac{V_{DZ}^2}{25\ 600}$$

Yukarıda verilen formüllerden yararlanarak üst yapıya gelen rüzgâr yükleri I-90 ve I-120'lik kirişler ile oluşturulan köprü modellerimiz için ayrı ayrı hesap edilmiştir;

$$WS = P_D \times H_{\text{Üst Yapı}} = P_D \times (H_{\text{Kiriş}} + t_{\text{Döşeme}})$$

$$WS_{I-90} = 2,3 \text{ kN/m}^2 \times (0,90 \text{ m} + 0,22 \text{ m}) = 2,6 \text{ kN/m} / \text{Mesnet}$$

$$WS_{I-120} = 2,3 \text{ kN/m}^2 \times (1,2 \text{ m} + 0,22 \text{ m}) = 3,3 \text{ kN/m} / \text{Mesnet}$$

#### 3.4.4.1. Alt yapıya etkiyen rüzgâr yükü (WL)

Tasarım rüzgâr basıncı hem yapıya hem araca uygulanacaktır. Tabliyenin ortasından 1,8 m yukarıya etkiyen bir yüklemedir. Ayrıca araca 1,46 kN/m 'lik bir kuvvet etki etmektedir. Buna ilave olarak hesaplanan  $H_{\text{Araç}}$  boyu kadar da ilave bir moment getirmektedir. (AASHTO, 2007)

$$e_{I-90} = H_{\text{Araç}} = h_{\text{Araç}} + h_{\text{Kiriş}_{\text{üst}}} + t_{\text{Döşeme}} + t_{\text{Asfalt}} =$$

$$e_{I-90} = H_{\text{Araç}} = 1,80 \text{ m} + 0,4127 \text{ m} + 0,22 \text{ m} + 0,05 \text{ m} = 2,48 \text{ m}$$

$$WL_{\text{moment } I-90} = WL \times H_{\text{Araç}} = 1,46 \text{ kN/m} \times 2,48 \text{ m} = 3,62 \frac{\text{kN.m}}{\text{m}}$$

Mesnet

$$e_{I-120} = H_{Araç} = h_{Araç} + h_{Kiriş_üst} + t_{Döşeme} + t_{Asfalt} =$$

$$e_{I-120} = H_{Araç} = 1,80 \text{ m} + 0,5815 \text{ m} + 0,22 \text{ m} + 0,05 \text{ m} = 2,65 \text{ m}$$

$$WL_{moment I-120} = WL \times H_{Araç} = 1,46 \text{ kN/m} \times 2,65 \text{ m} = 3,8 \frac{\text{kN.m}}{\text{m}}$$

Mesnet

Burada  $e_{I-90}$ , 90'lık kirişin ağırlık merkezinden araç eksenine olan uzaklığı,  $h_{Araç}$ , araç yüksekliğini,  $h_{Kiriş_üst}$ , kiriş ağırlık merkezinden üstüne olan uzaklığı,  $t_{Döşeme}$ , döşeme kalınlığını,  $t_{Asfalt}$ , asfalt kalınlığını temsil etmektedir.

### 3.4.5. Fren Kuvveti

AASHTO 2007 3.6.4'te belirtildiği gibi hareketli yükün 1/20'sinin yatay olarak yol yüzeyinden 1.80 m yükseklikte etki ettiği kabul edilerek fren kuvveti hesaplanmıştır. Tasarım kamyonunun dingil ağırlıklarının yüzde 25'i ve şerit yüklerinin de yüzde 5'i alınıp aşağıdaki işlem adımları izlenerek maksimum kuvvet bulunur. Fren yükü üst yapıdan başlık kirişine aktarılır.

$$P_{BR\_1\_Truck} = W_{Truck} \times n_{lane} \times MPF \times 0,25 = 540 \text{ kN} \times 2 \times 1 \times 0,25 = 270 \text{ kN}$$

$$P_{BR\_2\_Truck} = (0,05 \cdot W_{Truck} + 0,05 \cdot Lane \cdot L_{span}) \times n_{lane} \times MPF = (0,05 \cdot 540 \text{ kN} + 0,05 \cdot 15 \text{ kN/m} \cdot 27,90 \text{ m}) \times 2 \times 1 = 96 \text{ kN}$$

$$P_{BR} = \max(P_{BR\_1\_Truck}, P_{BR\_2\_Truck}) = 270 \text{ kN}$$

$$P_{BR\_per\_length} = \frac{P_{BR}}{L_{cap\_beam}} = \frac{270 \text{ kN}}{8,26 \text{ m}} = 32,70 \text{ kN/m}$$

$$P_{BR\_moment} = P_{BR} \times e_{I-90} = 270 \text{ kN} \times 2,48 \text{ m} = 670 \text{ kN.m}$$

$$P_{BR\_moment\_per\_length} = \frac{P_{BR\_moment}}{L_{cap\_beam}} = \frac{670 \text{ kN.m}}{8,26 \text{ m}} = 81,11 \frac{\text{kN.m}}{\text{m}}$$

$$P_{BR\_moment} = P_{BR} \times e_{I-120} = 270 \text{ kN} \times 2,65 \text{ m} = 715,5 \text{ kN.m}$$

$$P_{BR\_moment\_per\_length} = \frac{P_{BR\_moment}}{L_{cap\_beam}} = \frac{715,5 \text{ kN.m}}{8,26 \text{ m}} = 86,2 \frac{\text{kN.m}}{\text{m}}$$

Burada yapılan işlemlerde H30-S24 kamyonu için başlık kirişine gelen fren yükü hesaplanmıştır.  $W_{Truck}$ , iki dingile gelen toplam kamyon yükü,  $n_{lane}$ , şerit adedi,  $MPF$ , azaltma katsayısı,  $Lane$ , şerit yükü,  $L_{span}$ , kiriş net açıklığı,  $P_{BR}$ , fren kuvvetini,  $L_{cap\_beam}$ , başlık kirişi uzunluğunu temsil etmektedir.

### 3.4.6. Sıcaklık yüklemesi

Yol köprüleri için teknik şartnamesine göre sıcaklık farklarından dolayı oluşan etkiler Türkiye içinde seçilen üç deprem bölgesine göre  $T_{max} = +50^{\circ}C$  ve  $T_{min} = -30^{\circ}C$  arasında seçilip sap2000 programının içinde mevcut olan Temperature menüsü üzerinden etki ettirilmiştir.

$$\Delta T = \alpha \cdot L \cdot (T_{max.design} - T_{min.design}) \quad (3.4.)$$

AASHTO 2007'de geçen bu formülde  $\Delta T$ , sıcaklık değişimini,  $\alpha$ , termal genişleme katsayısı,  $L$ , genişleme uzunluğu,  $T_{max.design}$ , maksimum tasarım sıcaklığı,  $T_{min.design}$ , minimum tasarım sıcaklığıdır. Formülde betonun ısıl genişleme katsayısı  $\alpha = 1.08E-5/^{\circ}C$  olarak alınmıştır.

### 3.4.7. Deprem yer hareketi hesabı

Aktif bir deprem kuşağı üzerinde olan Türkiye, güneyde bulunan Afrika ve Arap plakaları ile kuzeyde bulunan Avrasya plakaları arasında yer almakta olup bu plakaların sıkıştırması sonucu batıya doğru kaçmaya zorlanan Anadolu plakasının hareketi neticesinde Ege plakasını durdurmaya çalışan ve bu oluşan gerilmelerin etkisi altında kalmaktadır. Ülkemizde de gittikçe sayısı artmakta olan köprü ve baraj gibi mühendislik yapılarının aşırı bir hasar olmaksızın belirli bir yer hareketi seviyesine dayanacak bir şekilde üretilmelidir.

Standart karayolu köprüleri sınıflandırılması içinde yer alan köprülerin kullanımı depremde ve deprem sonrasında kendilerinden beklenen davranışa göre önem dereceleri bakımından sınıflara ayrılmaktadır. Bu sınıflar KÖS=1, KÖS=2 ve KÖS=3 olmak üzere üç sınıftır. Bu tez kapsamında uzunluk, açıklık ve ayak yüksekliği bakımından standart köprü sınıfına giren KÖS=3 olan ve Basit Köprüler olarak adlandırılan köprülerden bahsedilmiştir.

Deprem etkisi altındaki köprülerin servis ömrü boyunca maruz kalma olasılığı yüksek olan sık oluşumlu küçük depremlerde köprünün taşıyıcı elemanlarında meydana gelecek şekil değiştirmelerin doğrusal elastik sınırın aşılmasına izin verilmez. Bu durumdaki köprülerde deprem sonrasındaki trafik akışının olumsuz etkilenmesi söz konusu değildir. Özetle KÖS=3 olan tasarım köprümüzde Deprem Yer Hareketi Düzeyi DD-3 olarak adlandırılan 50 yılda spektral büyüklüğün aşılma olasılığı yüzde 50 ve tekrarlanma periyodu 72 yıl olan Sık

Deprem adı verilen yer hareketi düzeyine göre işlem yapılmıştır.

#### 3.4.7.1. Yer hareketlerinin tanımlanması

Tasarım köprüde köprüye etki edeceği düşünülen deprem bölgeleri olarak üç bölge seçilmiştir. Bu üç bölgenin de Deprem Yer Hareketi Düzeyleri DD-3 seçilmiş olup 4 farklı zemin türünde kendi içinde karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu bölgeler deprem 2019 tarihinde yürürlüğe giren “Türkiye Deprem Tehlike Haritası”na göre sırasıyla I. Derece, II. Derece ve III. Derece deprem bölgeleri olan İstanbul, Ağrı ve Konya illeri seçilerek oluşturulmuştur. Bu tez kapsamında AASHTO 2007 ve TBDY 2018 olmak üzere iki farklı fonksiyon tipi “Response Speckrum” eğrileri tanımlanmıştır. Bu illere göre enlem ve boylam bilgileri aşağıda tablolaştırılmıştır.

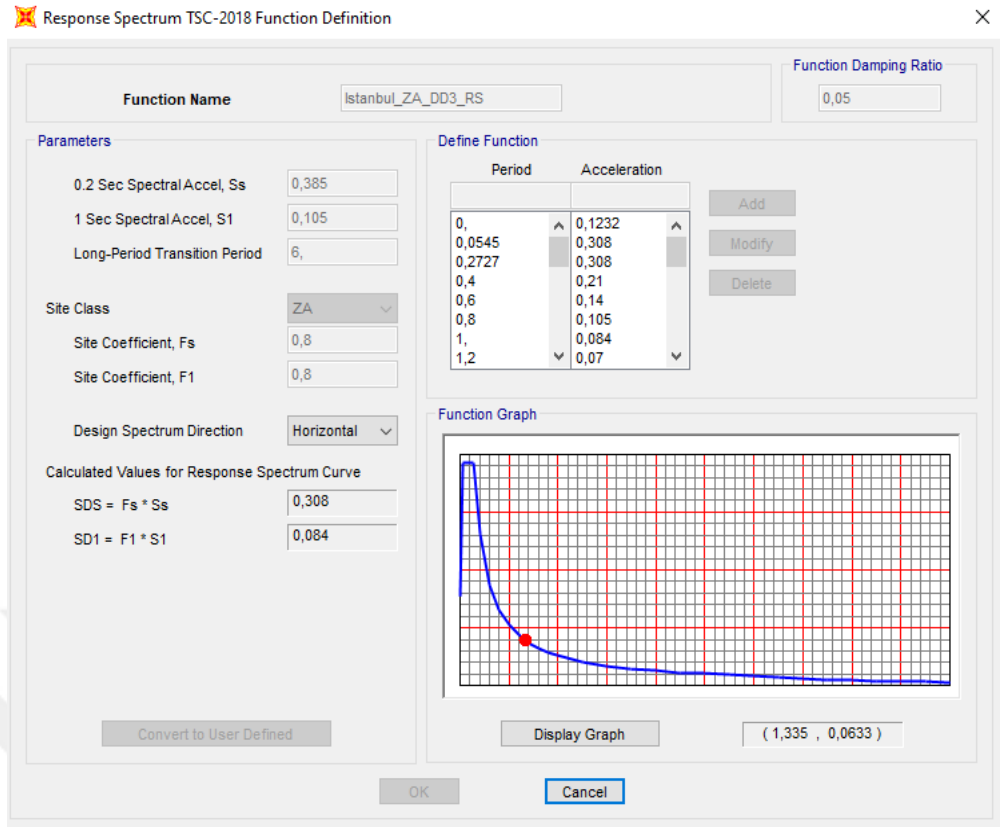
**Tablo 9.** Seçilen illere göre enlem boylam ve deprem düzeyleri

	Konya	Ağrı	İstanbul
Enlem Derecesi	37,87	39,62	41,00
Boylam Derecesi	32,48	43,02	28,97
Deprem Düzeyi	DD-3	DD-3	DD-3

**Tablo 10.** Seçilen illere göre deprem parametre değerleri

Zemin Türü	Konya				Ağrı				İstanbul			
	ZA	ZB	ZC	ZD	ZA	ZB	ZC	ZD	ZA	ZB	ZC	ZD
S <sub>s</sub>	0,101	0,101	0,101	0,101	0,217	0,217	0,217	0,217	0,385	0,385	0,385	0,385
S <sub>1</sub>	0,028	0,028	0,028	0,028	0,068	0,068	0,068	0,068	0,105	0,105	0,105	0,105
F <sub>s</sub>	0,800	0,900	1,300	1,600	0,900	0,900	1,300	1,600	0,800	0,900	1,300	1,492
F <sub>1</sub>	0,800	0,800	1,500	2,400	0,800	0,800	1,500	2,400	0,800	0,800	1,500	2,390

Bu tabloda  $S_s$ , kısa periyot için spektral ivme katsayısını,  $S_1$ , 1 saniye periyot için spektral ivme katsayısını,  $F_s$ , kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısını,  $F_1$ , 1 saniyelik periyot için yerel zemin etki katsayısını göstermektedir.



**Şekil 22.** İstanbul ili ZA zemini reponse spectrum grafiği

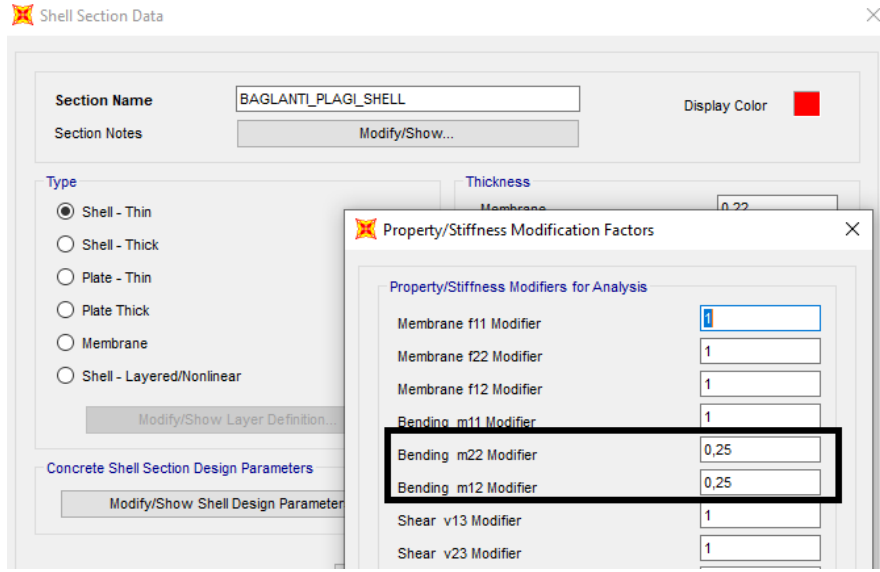
Deprem etkisi altında standart köprülerin birinci aşama hesabına ilişkin köprü taşıyıcı sistemlerine ilişkin bazı kurallar vardır. Bunlar;

-Birbirine dik iki yatay doğrultudaki deprem etkileri göz önünde bulundurulmuştur. Sönüm oranı yüzde 5 olarak alınmıştır.

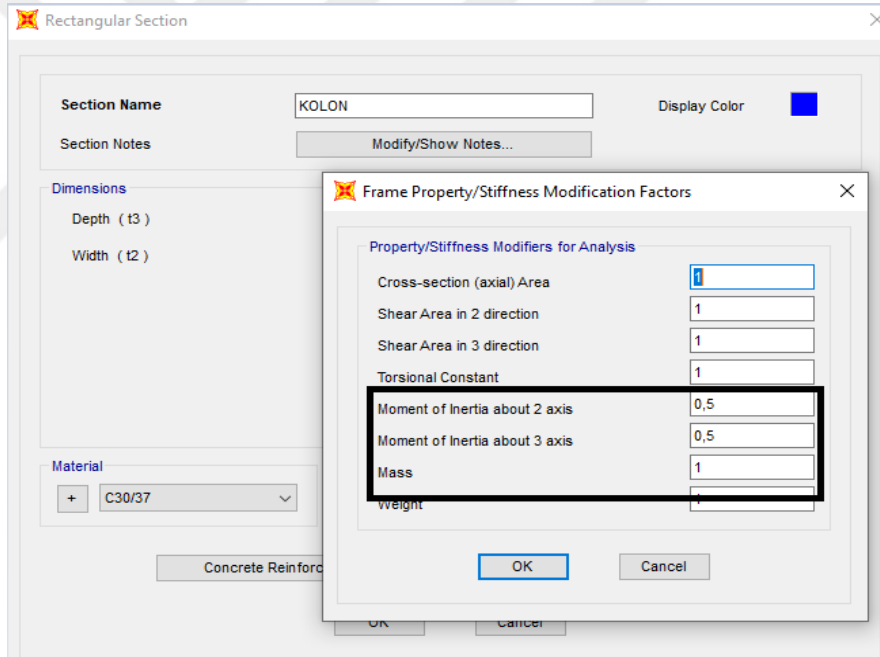
-Tabliye, başlık kirişi ve orta ayak kesitleri için etkin kesit rijitlikleri eğilme davranışına gelen brüt kesit rijitliklerinin yüzde 50'si oranında azaltılmıştır. Kesme ve eksenel davranış için azaltma yapılmamıştır.

-Prekast basit kirişler ve bağlantı plaklarının eğilme davranışı için etkin kesit rijitliği brüt kesit rijitliğinin yüzde 25'i oranında azaltılmıştır.

-Çubuk sonlu elemanlar ile modellenen ayak kolonları en az 5 adet olmak üzere sonlu elemanlara bölünmelidir.



Şekil 23. Bağlantı plağı etkin kesit rijitliklerinin azaltılması

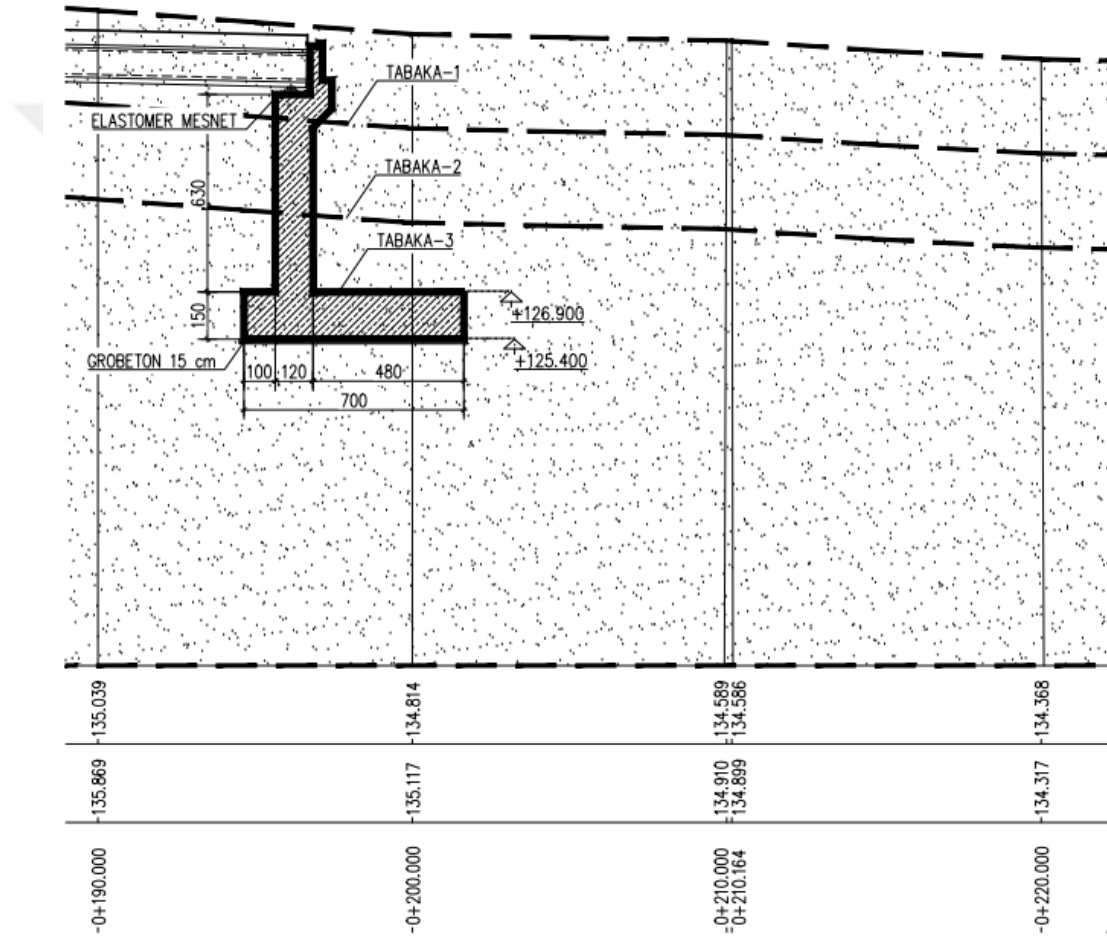


Şekil 24. Kolon etkin kesit rijitliklerinin azaltılması

### 3.4.8. Zemin etkisi

#### 3.4.8.1. Şev stabilite kontrolü

Konya, Ağrı ve İstanbul illerinde bulunan köprülerimizin geçtiği zemin profillerinin özellikleri aşağıdaki tablo ve şekillerde belirtilmektedir. Bu zemin profillerinin üzerinde bulunan köprümüzün geçtiği kısımlardaki şev stabilite kontrolleri Plaxis 2D programı kullanılarak yapılmıştır. Köprülerin ayaklarının oturduğu kısımlarda temsili bir yayılı yük etki ettirilerek bu yükler altındaki



davranışı incelenmiştir.

Şekil 25. Kenar ayak altındaki tabakalar ve zemin profili

Şev stabilite analizinde zemin profillerinin tabakalarının hangi tür malzemeler içerdiği ve bu malzemelerin zemin özellikleri aşağıdaki tabloda özetlenmiştir. Bu zemin tabakalarının kalınlıkları gerçeğe yakın olarak kotlardan

ıkarılmıştır ve programa tanıtılmıştır.

**Tablo 11.** Zemin profillerinin tabaka zellikleri

	Konya	Ağrı	İstanbul
Tabaka-1	Kil	Kil	Kum
Tabaka-2	Kum	Kil	Kil
Tabaka-3	Kum Taşı	Kil Taşı	Kum Taşı

**Tablo 12.** Bölgelere göre tabakalar ve tabakaların zemin özellikleri

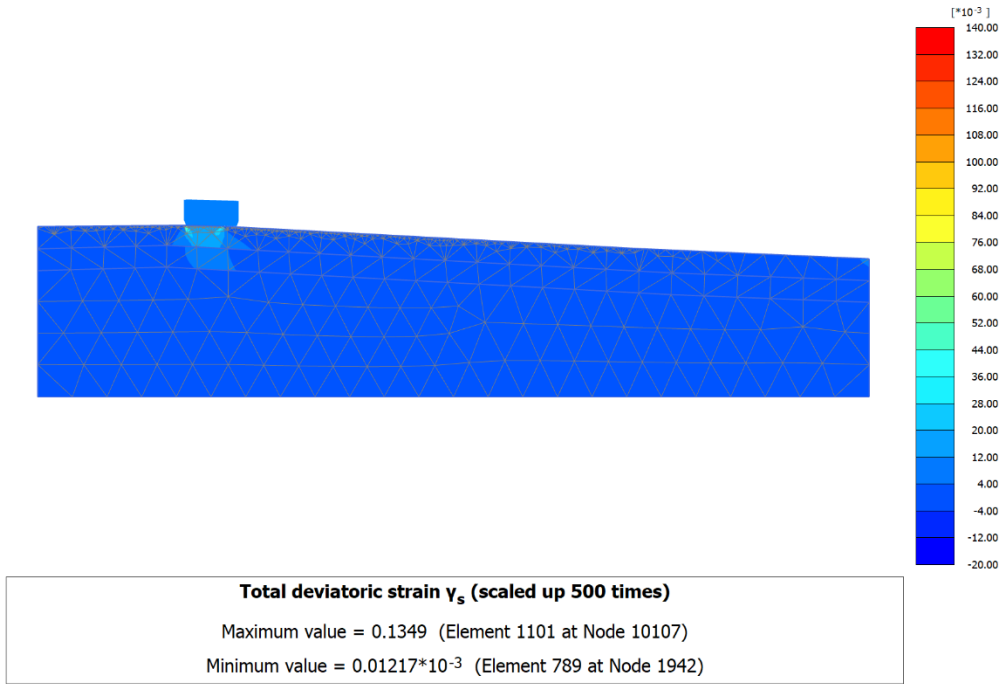
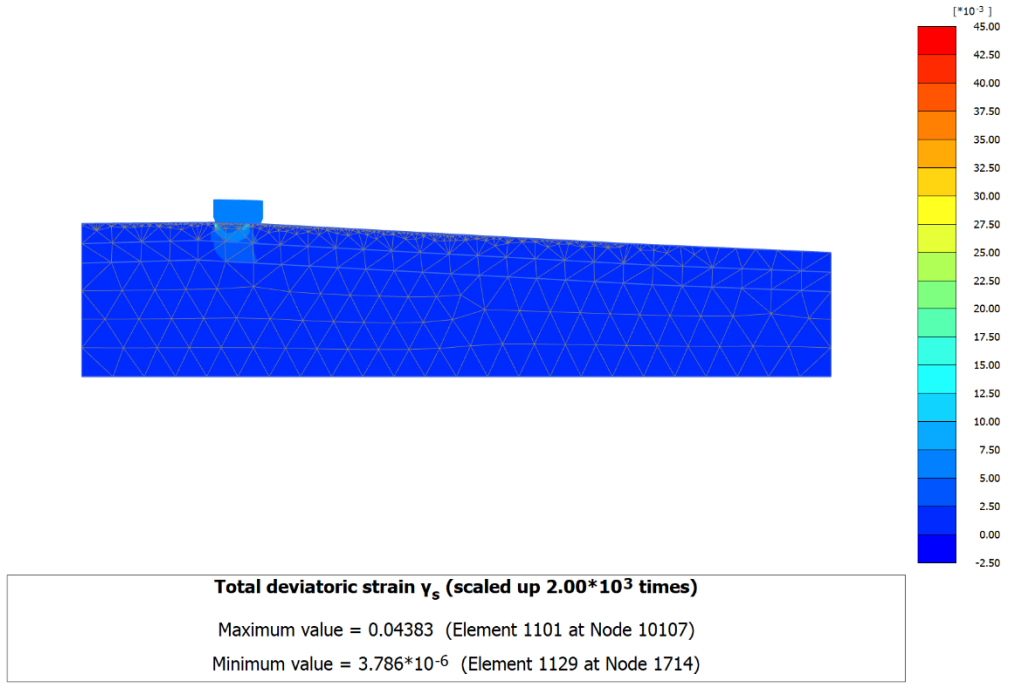
	KONYA			AĞRI			İSTANBUL		
Tabakalar	Kil	Kum	Kumtaşı	Kil	Kil	Kiltaşı	Kum	Kil	Kumtaşı
$\gamma$ ( $kN/m^3$ )	18	19	22	18	19	20	19	18	22
$c'$ (kPa)	15	10	100	15	20	50	10	15	100
$\emptyset_{eff}$	25	32	40	25	25	35	32	25	40
E (Pa)	20.000	75.000	200.000	20.000	50.000	100.000	75.000	20.000	200.000
$\gamma'$	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15

#### 3.4.8.2. Kayma modülü

Batı şevi köprü kotunun biraz üstünde olup 138.00 m'den ve Doğu şevi ise 134.00 m'den başlayarak inen şevler olup katman özellikleri ve zemin parametreleri yukarıda sıralandığı gibidir. Zemin profilleri modele 3 katmanlı olarak tanıtılmıştır ve zemin tabakalarının kalınlıkları gerçeğe yakın değerler girilmiştir. Batı şevi modelleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

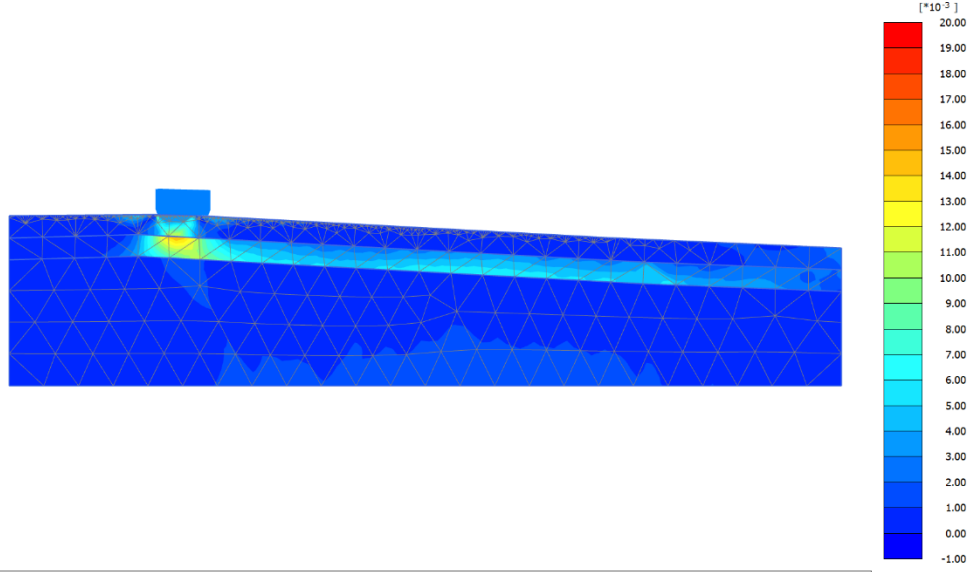
şekil : Konya ili Batı şevi sistem kayma düzlemi





**Şekil 26.** Konya ili Batı şevi sistem kayma düzlemi

**Şekil 27.** Ağrı ili Batı şevi sistem kayma düzlemi



**Total deviatoric strain  $\gamma_s$  (scaled up  $5.00 \cdot 10^3$  times)**

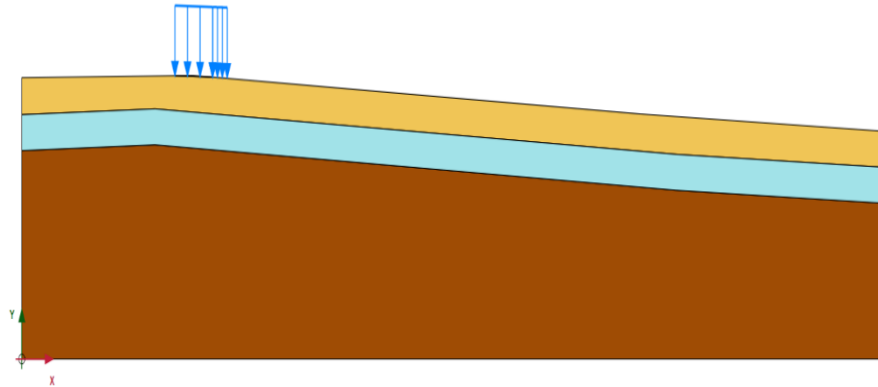
Maximum value = 0.01994 (Element 1101 at Node 10107)

Minimum value =  $1.388 \cdot 10^{-6}$  (Element 673 at Node 1677)

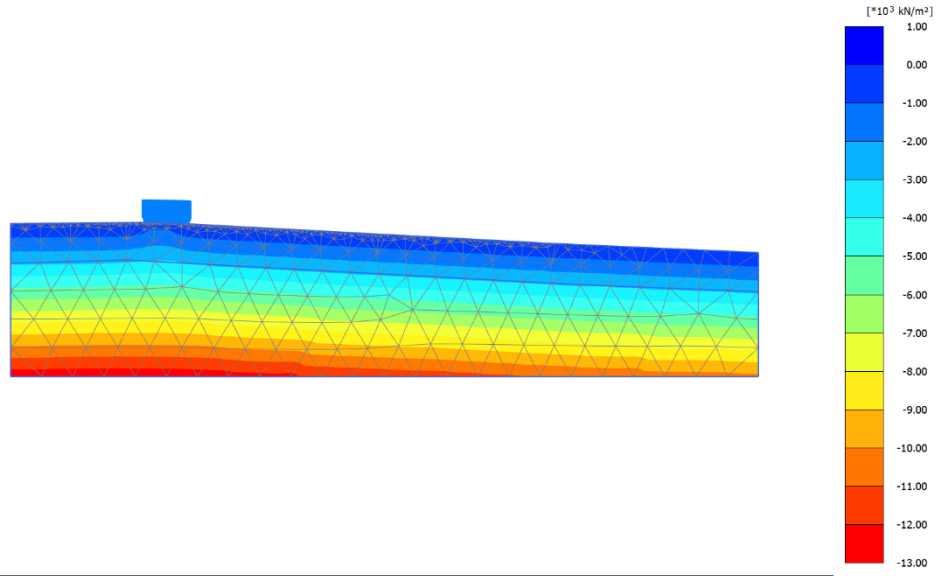
**Şekil 28.** İstanbul ili Batı şevi sistem kayma düzlemi

3.4.8.3. Şevlerin kenar ayaktan gelen yük etkisinde güvenlik sayısı kontrolü

Batı şevi üzerinde bulunan kenar ayaklardan gelen temsili yük  $490 \text{ kN/m}^2$  olup yayılı yük olarak etki ettirilmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen bulgular aşağıda verilmektedir.

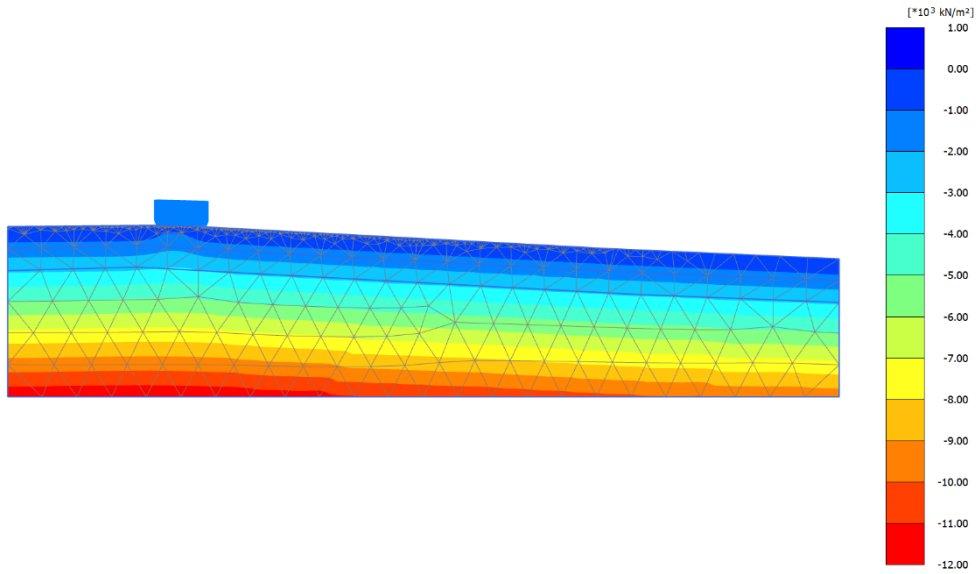


**Şekil 29.** Batı şevine etki eden kenar ayaktan gelen temsili yayılı yük



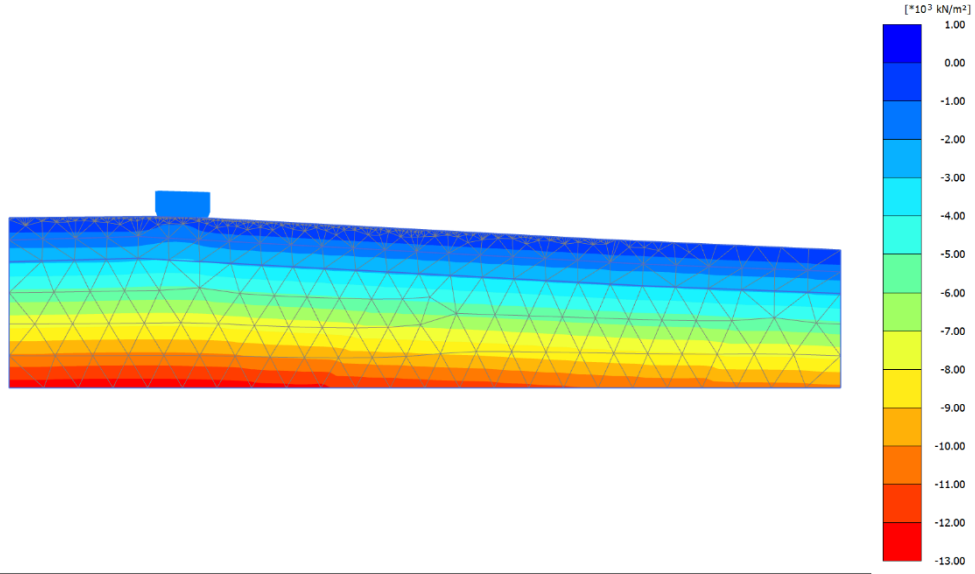
**Principal effective stress  $\sigma'_1$  (scaled up  $5.00 \cdot 10^{-3}$  times)**  
 Maximum value = 2.140 kN/m<sup>2</sup> (Element 983 at Node 9260)  
 Minimum value =  $-12.71 \cdot 10^3$  kN/m<sup>2</sup> (Element 1269 at Node 9861)

Şekil 30. Konya ili Batı şevindeki temsili yayılı yükten gelen sistem efektif gerilmesi



**Principal effective stress  $\sigma'_1$  (scaled up  $5.00 \cdot 10^{-3}$  times)**  
 Maximum value = 1.331 kN/m<sup>2</sup> (Element 983 at Node 9260)  
 Minimum value =  $-11.80 \cdot 10^3$  kN/m<sup>2</sup> (Element 1269 at Node 9482)

Şekil 31. Ağrı ili Batı şevindeki temsili yayılı yükten gelen sistem efektif gerilmesi



Principal effective stress  $\sigma'_1$  (scaled up  $5.00 \cdot 10^{-3}$  times)

Maximum value = 1.293 kN/m<sup>2</sup> (Element 903 at Node 10736)

Minimum value =  $-12.70 \cdot 10^3$  kN/m<sup>2</sup> (Element 1269 at Node 9482)

**Şekil 32.** İstanbul ili Batı şevindeki temsili yayılı yükten gelen sistem efektif gerilmesi

Plaxis 2D’de yapılan analizler sonucunda istenilen güvenlik sayısı  $G_s$  yükleme sırasında 1.05 seçilmiştir. Yapılan analizler sonucunda sistem efektif gerilmesi aşağıdaki tablodan da anlaşılacağı üzere bu değerin üzerinde çıkmaktadır. Batı şevinde  $G_s$ ’ye göre güvenli tarafta kaldığı analizler sonucunda saptanmıştır. Ayrıca analiz sonuçlarından köprü ayak temeli bu bölgelere inşa edilmeye uygun olduğu görülmektedir.

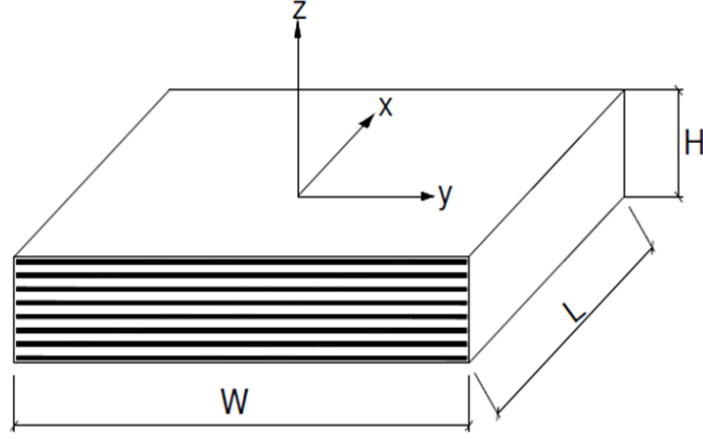
**Tablo 13.** Analiz sonuçları

	Konya	Ağrı	İstanbul
Kayma Düzlemi ( $\gamma_s$ )	0,044	0,135	0,02
Efektif Gerilme ( $\sigma_s$ )	2,140	1.331	1.293

### 3.5. Elastomer Mesnetler

Günümüz teknolojisinde bile önlem almaya zorlandığımız doğal afet türlerinden biri olan deprem karşısında yapıların davranışlarını tahmin etmek oldukça güçtür. Gittikçe sayıları artan ve yurdun her tarafında yapılan köprü yapılarının depreme dayanıklı inşası için projelendirilme safhasında deprem kuvvetlerinin sismik yalıtıma etkisinin de incelenmesi gerekmektedir.

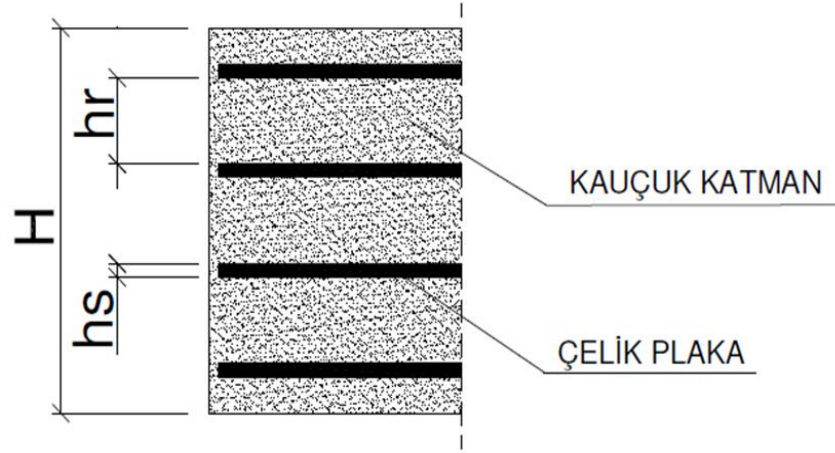




**ELASTOMER MESNET DETAYI**

x: Köprü boyuna eksen  
y: Köprü enine eksen  
z: Düşey eksen

**Şekil 34.** Elastomer mesnet detayı W: Elastomer mesnet genişliği, L: Elastomer mesnet uzunluğu, H: Elastomer mesnet yüksekliği



**Şekil 35.** Elastomer mesnet katmanları hr: kauçuk katman kalınlığı, hs: çelik plaka kalınlığı, H: elastomer mesnet kalınlığı

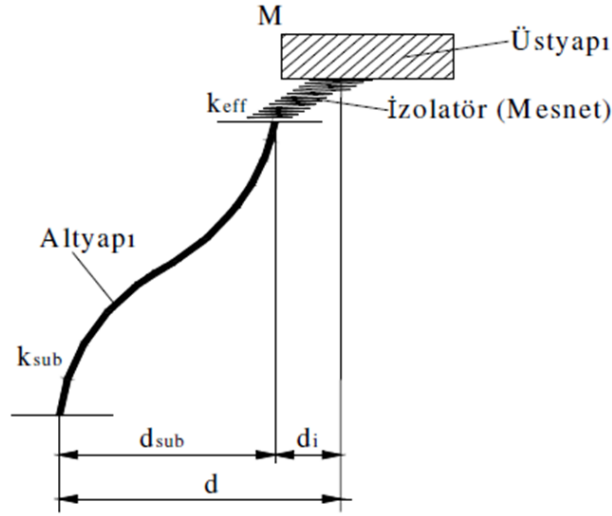
### 3.5.1. Elastomer mesnetlerin avantajları

Ülkemiz ve dünyada inşasına çok sıkça rastladığımız prekast kirişli köprüler üzerine uluslararası kaynaklar ve şartnamelerde bahsedilen hesaplar sayesinde elastomer mesnet tasarımları yapılmaktadır. Elastomer mesnetler köprü inşasında kullanılan en ekonomik çözümlerden biridir. Çelik plakalar ile güçlendirilmiş elastomer mesnetler hareket kabiliyeti sayesinde yatay doğrultularda köprüye

esneklik sağlamaktadır.

Çelik plakalar ile güçlendirilmiş elastomer mesnetler sayesinde köprüler yüksek iç kuvvetler altında direnç gösterebilmektedirler. Bu mesnetler yardımıyla üstyapıdan altyapıya aktarılan kuvvetler doğrultusunda meydana gelen deplasmanlar sonucu oluşan köprü enine doğrultusunda oluşan yerdeğiştirmeler şekilde de görüldüğü gibi deprem takozları denilen yapı elemanları sayesinde sönümlenir. Tüm bu özellikleri sağlayan elastomer mesnetler üretim sırasında birçok testten geçmektedirler. Elastomer mesnetlerin esnek yatay davranışlarının istenilen düzeyde kalması için rijitlikleri, kauçuk kalınlıkları ve boyutları değiştirilebilir.

Elastomer mesnetlerin diğer mesnet türlerine göre karşılaştırıldığında en büyük avantaj sağladığı nokta herhangi bir deprem durumunda kolonlara gelen yüklerin üstyapıya aktarılmamasıdır. Ayrıca üstyapı ve altyapının bu şekilde birbirinden esnek mesnetlerle ayrılması yapı periyodunun uzamasına sebebiyet verir. Altyapının tekil kolon olarak seçilmesi sistemin yatay ve düşey doğrultuda bir konsol gibi çalışmasını sağlamıştır.



**Şekil 36.** Elastomer mesnetli köprünün yer değiştirmesi

M: Üstyapı kütlesi,  $k_{sub}$ , ayak rijitliği,  $k_{eff}$ , elastomer mesnet rijitliği,  $d_{sub}$ , altyapı uç yer değiştirmesi,  $d_i$ , elastomer mesnet yer değiştirmesi,  $d$ , sistemin toplam yer değiştirmesini temsil etmektedir.

### 3.5.2. Elastomer mesnetlerin dezavantajları

Köprü üstyapısı deprem kuvveti sonucu oluşan deplasmanlara karşı diğer köprülere oranla daha hassastır. Yapıda oluşan maksimum yer değiştirmeler önemli ölçüde rijitlik kaybına yol açar. Bu sebeple altyapıyı üstyapıdan ayıran sistem davranışı tasarım kriterlerinden daha büyük bir deprem etkisi karşısında köprünün hasar ve göçmeye karşı daha elverişsiz hale getirir.

Zayıf zeminlerde deprem etkisi altında oluşan spektral ivme değeri uzun periyotlarda oluşmaktadır. Bu durumda monolitik tasarımlardan ivme değerleri elastomer mesnetlere oranla daha düşük olabilmektedir.

Temellere etkileyen deprem momentlerin azaltılması amacıyla kolon alt uçlarında oluşturulan mafsal detayları bu sınıftaki yapılarda tercih edilememektedir.

Yukarıda da bahsedildiği gibi elastomer mesnetler sayesinde yapıya kazandırılan esneklik karşısında görelî periyot uzamakta ancak görelî yer değiştirmeler artmaktadır.

### 3.5.3. Elastomer mesnet hesabı

**Tablo 14.** Elastomer mesnet rijitlik hesabı

Elastomer mesnet sayısı	$n$	1
Elastomer mesnet genişliği	$a$	300 <i>mm</i>
Elastomer mesnet boyu	$b$	200 <i>mm</i>
Dış elastomer mesnet tabaka sayısı	$n_{dış}$	2
İç elastomer mesnet tabaka sayısı	$n_{iç}$	5
Dış elastomer mesnet tabaka kalınlığı	$t_{dış}$	2,5 <i>mm</i>
İç elastomer mesnet tabaka kalınlığı	$t_{iç}$	8 <i>mm</i>



Elastomer tabakaların toplam kalınlığı	$t_r = n_{iç} * t_{iç} + n_{dış} * t_{dış}$	45 mm
Şekil faktörü	$s_{dış} = \frac{a * b}{2t_{dış}(a + b)}$	24
	$s_{iç} = \frac{a * b}{2t_{iç}(a + b)}$	7,5
Ort. Şekil faktörü	$s_o = \frac{n_{dış} * s_{dış} + n_{iç} * s_{iç}}{n_{dış} * n_{iç}}$	12,21
Kayma Modülü	G	1000 kN/m <sup>2</sup>
Sıkışma Elastisite Modülü	$E_{Elast} = 6GS_0^2$	894504,6 kN/m <sup>2</sup>
Bir elastomer mesnetin yüzey alanı	$A_{Elast} = a * b$	0,06 m <sup>2</sup>
Efektif mesnet atalet momentleri	$I_{2-2} = \frac{ab^3}{12}$	4,5x10 <sup>-4</sup> m <sup>4</sup>
	$I_{3-3} = \frac{ba^3}{12}$	2x10 <sup>-4</sup> m <sup>4</sup>
	$I_{1-1} = \frac{ab(a^2 + b^2)}{12}$	6,5x10 <sup>-4</sup> m <sup>4</sup>
Yoğunluk	γ	30 kN/m <sup>3</sup>
Yerçekimi İvmesi	g	9,81 m/s <sup>2</sup>
Ağırlık	a*b*t <sub>r</sub> * γ	0.081 kN
Kütle yoğunluğu	$m = \frac{w}{g}$	8,3x 10 <sup>-3</sup> kN.s <sup>2</sup> /m
Elastomer Mesnetin Düşey	$K_1 = \frac{E_{Elast} * A_{Elast}}{t_r}$	1192673 kN/m

Rijitliği		
Elastomer Mesnetin Yatay Rijitlikleri	$K_2 ve K_3 = \frac{GxA_{Elast}}{t_r}$	1333,3 kN/m
Elastomer Mesnetin Burulma Rijitliği	$K_{R1} = \frac{GxI_{1-1}}{t_r}$	14,44 kN/ m
Elastomer Mesnetin Dönme Rijitlikleri	$K_{R2} = \frac{E_{Elast}xI_{2-2}}{t_r}$	8945,05 kNm
	$K_{R3} = \frac{E_{Elast}xI_{3-3}}{t_r}$	3975,6 kNm

### 3.6. Yükleme Kombinasyonları

Hesaplarda incelenen yük grubu ve katsayıları aşağıdaki tabloda özetlenmiştir. Bu kombinasyonlar programa tanıtılarak ve içindeki en büyük yük kombinasyonu yapıya uygulanarak sonuçlar irdelenmiştir.

**Tablo 15.** Yük gruplarının açıklamaları

DC	Ölü yükler
DW	Asfalt, kaplama yükleri
LL	Hareketli yükler
BR	Fren yükü
TU	Sıcaklık yükü
WS	Köprü boş halde rüzgâr yükü
WL	Köprü dolu halde rüzgâr yükü
EQx	Köprü boyuna yönde deprem yükü
EQy	Köprü enine yönde deprem yükü

**Tablo 16.**  
AASHTO  
2007  
yük  
kombinasyon  
katsayıları

Kombinasyon		DC	DW	LL+IM	WS	WL	LS	PL	EH	EV	Deprem
Dayanım-I	Maks.	1.25	1.50	1.75	-	-	1.75	1.75	1.50	1.35	-
	Min.	0.90	0.65	1.75	-	-	1.75	1.75	0.90	1.00	-
Dayanım-III	Maks.	1.25	1.50	-	1.40	-	-	-	1.50	1.35	-
	Min.	0.90	0.65	-	1.40	-	-	-	0.90	1.00	-
Dayanım-IV	Maks.	1.50	1.50	-	-	-	-	-	1.50	1.50	-
	Min.	1.50	1.50	-	-	-	-	-	1.50	1.50	-
Dayanım-V	Maks.	1.25	1.50	1.35	0.40	1.00	1.35	1.35	1.50	1.35	-
	Min.	0.90	0.65	1.35	0.40	1.00	1.35	1.35	0.90	1.00	-
Aşırı Durum	Maks.	1.25	1.50	-	-	-	-	-	1.50	1.35	EQX + 0.30 EQY 0.30 EQX + EQY
	Min.	0.90	0.65	-	-	-	-	-	0.90	1.00	EQX + 0.30 EQY 0.30 EQX + EQY
Servis-I	-	1.00	1.00	1.00	0.30	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
Servis-Ia	-	0.50	0.50	1.00	-	-	-	1.00	-	-	
Servis-Ib	-	1.00	1.00	1.00	-	-	-	-	-	-	
Servis-II	-	1.00	1.00	1.30	-	1.00	1.30	1.30	1.00	1.00	
Servis-III	-	1.00	1.00	0.80	-	1.00	0.80	0.80	1.00	1.00	

AASHTO 2007 şartnamesine göre belirlenen yük kombinasyonları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

-Kullanım yüküne göre yük kombinasyonları;

**Tablo 17.** Kullanım yüküne göre yük kombinasyonları

$F_{COMB 1}$	1.0 DC+1.0 DW+1.0 LL
$F_{COMB 2}$	1.0 DC+1.0 DW+0,3 WS
$F_{COMB 3}$	1.0 DC+1.0 DW+1.0 LL+0.3 WS+1.0 WL+1.0 BR
$F_{COMB 4}$	1.0 DC+1.0 DW+1.0 LL+1.0 TU+1.0 PL
$F_{COMB 5}$	1.0 DC+1.0 DW+1.0 WL+1.0 TU+1.0 PL
$F_{COMB 6}$	1.0 DC+1.0 DW+0,3 WS+1,0 WL+1.0 BR+ 1.0 TU

-Dayanım-I, Dayanım-III, Dayanım-V, Aşırı Durum ve Faktörlü yüke göre yükleme kombinasyonları;

**Tablo 18.** Dayanım, aşırı durum ve faktörlü yüke göre yük kombinasyonları

$F_{COMB 7}$	1.25 DC+1.50 DW+1.75 LL
$F_{COMB 8}$	1.25 DC+1.50 DW+1.75 BR+1.75 PL
$F_{COMB 9}$	1.25 DC+1.50 DW+1.40 WS
$F_{COMB 10}$	1.25 DC+1.50 DW+1.35 LL+0.40 WS+ 1.0 WL+1.35 BR+1.35 PL
$F_{COMB 11}$	1.30 DC+1.30 DW+1.0 LL+0.30 WS+1.0 WL+1.0 BR
$F_{COMB 12}$	1.30 DC+1.30 DW+1.30 LL+1.0 TU
$F_{COMB 13}$	1.25 DC+1.50 DW+1.0 EQ <sub>x</sub> +0.3EQ <sub>y</sub>
$F_{COMB 14}$	1.25 DC+1.50 DW+0.3 EQ <sub>x</sub> +1.0 EQ <sub>y</sub>

## DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

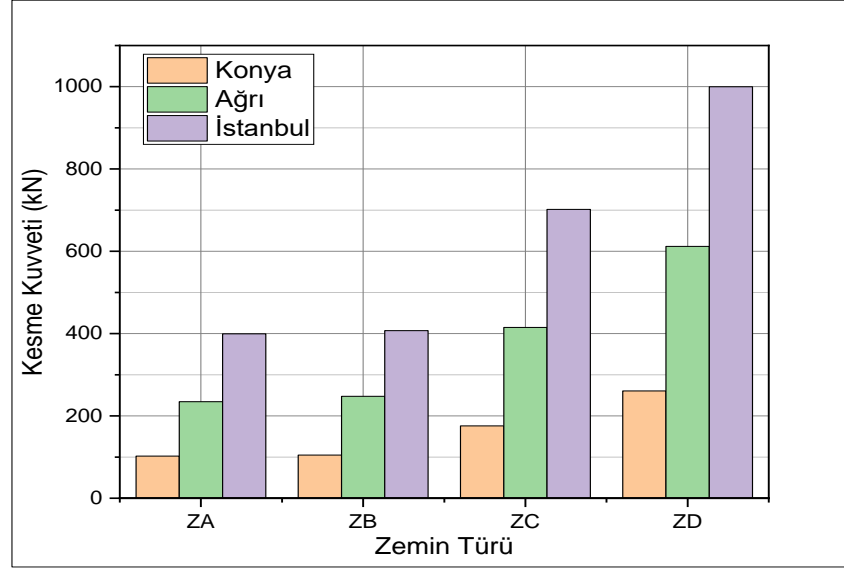
### ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada sırasıyla I., II. ve III. Derece deprem bölgeleri olan Konya, Ağrı ve İstanbul illerinde aynı tasarım köprü dikkate alınarak Konya ve Ağrı illerinde I-90'lık kiriş, İstanbul ilinde ise I-120'lik kiriş kullanılarak karşılaştırmalar yapılmış olup tasarım ve analizler buna göre gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde TBDY 2018 ve AASHTO 2007 yönetmelikleri dikkate alınmış olup I-90 ve I-120'lik köprü modellerine ait elde edilen bulgular grafik ve tablolar halinde sunulmuştur.

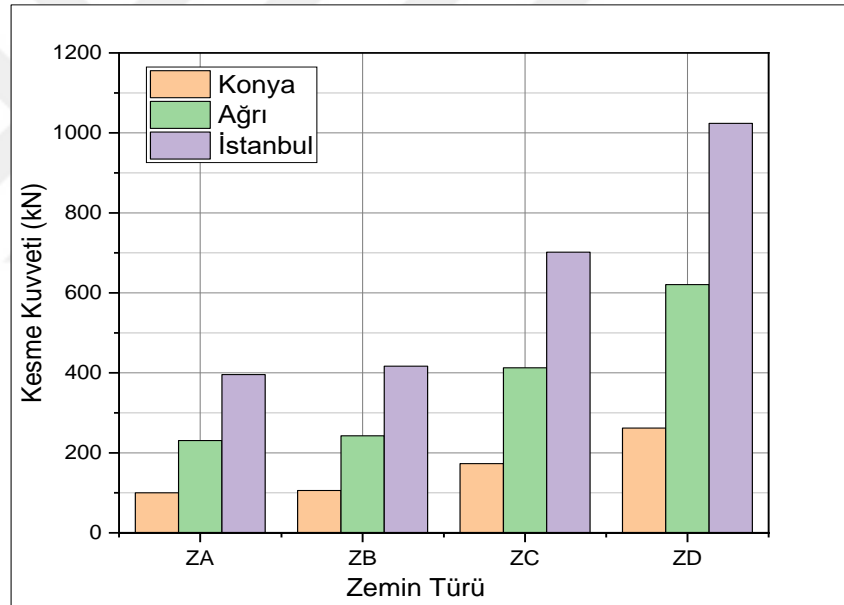
Köprü modellerine ait uygulanan deprem yükü altında oluşan x ve y yönüne ait taban kesme kuvvetleri tablo 4.1'de verilmiştir. Yapılan analizler sonucunda en düşük değer Konya bölgesinde elde edilmiştir. Tüm bölgelerde zemin parametreleri kendi içinde karşılaştırıldığında ZA zemin türünden ZB zemin türüne geçildiğinde yüzde 68,2, ZC zemin türünden ZD zemin türüne geçildiğinde yüzde 48'lik bir artış söz konusudur. ZD zemin türüne göre İstanbul bölgesi kendi içinde karşılaştırıldığında ise Konya bölgesi için yüzde 74,42'lük ve Ağrı bölgesi için yüzde 39'luk bir azalma olduğu görülmüştür.

**Tablo 19.** Köprü modelleri taban kesme kuvvetleri

Bölge	Taban Kesme Kuvveti(kN)	Zemin Türü			
		ZA	ZB	ZC	ZD
Konya	V <sub>x</sub>	102,23	104,87	175,77	260,81
	V <sub>y</sub>	100,08	105,89	172,95	262,07
Ağrı	V <sub>x</sub>	234,45	247,67	415	611,89
	V <sub>y</sub>	230,91	242,52	412,7	620,57
İstanbul	V <sub>x</sub>	399,28	407,08	701,92	999,98
	V <sub>y</sub>	395,58	416,87	701,66	1024



**Şekil 37.** Bölge ve zemin türlerine göre X yönü taban kesme kuvveti



**Şekil 38.** Bölge ve zemin türlerine göre Y yönü taban kesme kuvveti

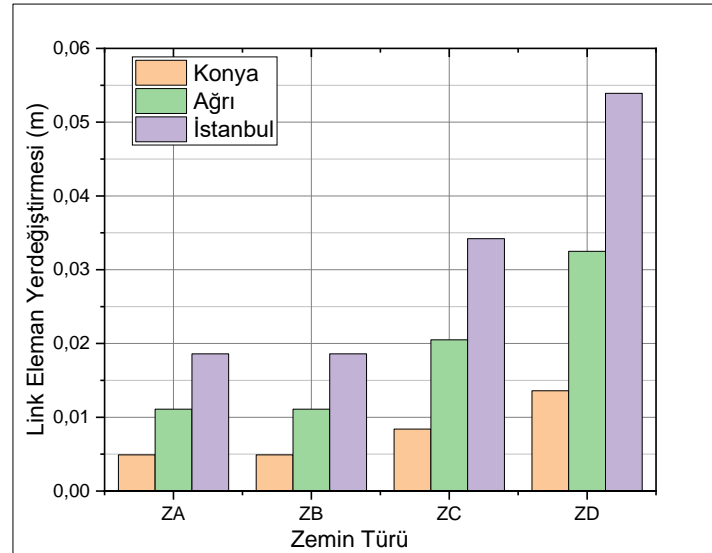
Köprü modellerine ait kenar ayak link eleman deformasyon değerleri  $F_{COMB 13}$  kombinasyonu altında tablo 4.2’de gösterilmiştir. Bu kombinasyon altında boyuna doğrultu (X) yönünde oluşan deformasyon değerleri enine doğrultu (Y) yönüne göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Tüm bölgelerde zemin türleri kendi içinde karşılaştırıldığında ZB zemin türünden ZC zemin türüne geçildiğinde boyuna yönde yüzde 82’lik bir artış söz konusu iken ZC zemin türünden ZD zemin türüne geçildiğinde yüzde 60’lık bir artış gözlemlenmiştir. ZD zemin türünde bölgeler kendi

içinde İstanbul'a göre karşılaştırıldığında ise Konya ilinde yüzde 75'lik bir azalma söz konusu iken Konya'da yüzde 40'lık bir azalma olduğu gözlemlenmiştir.

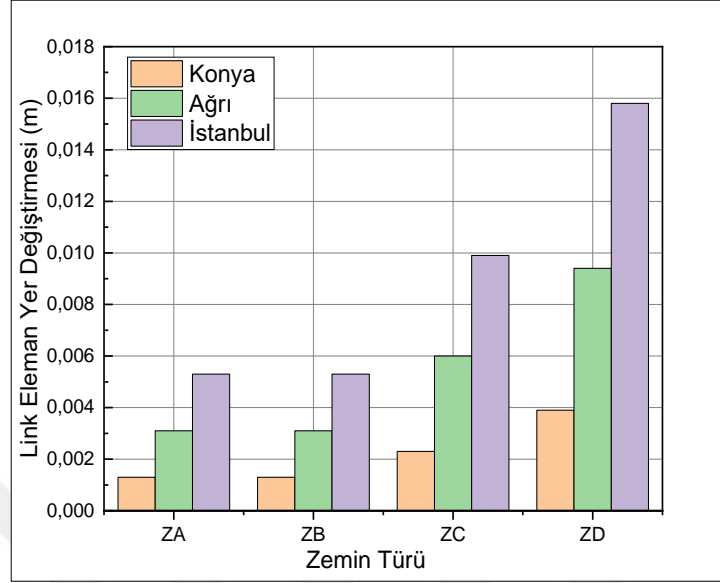
**Tablo 20.** Köprü modellerine ait kenar ayak link eleman deformasyon değerleri

Bölge	Link Eleman Yer Değiştirmesi(m)	Zemin Türü			
		ZA	ZB	ZC	ZD
Konya	Boyuna (X)	0,005	0,005	0,0084	0,014
	Enine(Y)	0,0013	0,0013	0,0023	0,004
Ağrı	Boyuna (X)	0,011	0,011	0,02	0,033
	Enine(Y)	0,003	0,003	0,006	0,009
İstanbul	Boyuna (X)	0,02	0,02	0,034	0,054
	Enine(Y)	0,005	0,005	0,0099	0,016

Aşağıdaki grafiklerde  $F_{COMB 13}$  kombinasyonu altında boyuna ve enine yönde köprü modellerine ait kenar ayak link eleman deformasyon değerleri gösterilmiştir.  $F_{COMB 14}$  kombinasyonu altında boyuna ve enine doğrultuda olan değerler yer değiştirmiş olup Envelop durumunda Konya ve Ağrı'da boyuna doğrultuda yer değiştirme değeri 0,009 m mertebesinde iken İstanbul 0,0066 m mertebesinde olduğu gözlemlenmiştir.



**Şekil 39.** Bölge ve zemin türlerine göre  $F_{(COMB 13)}$  kombinasyonu altında boyuna doğrultuda (X) kenar ayak link eleman deformasyon değerleri



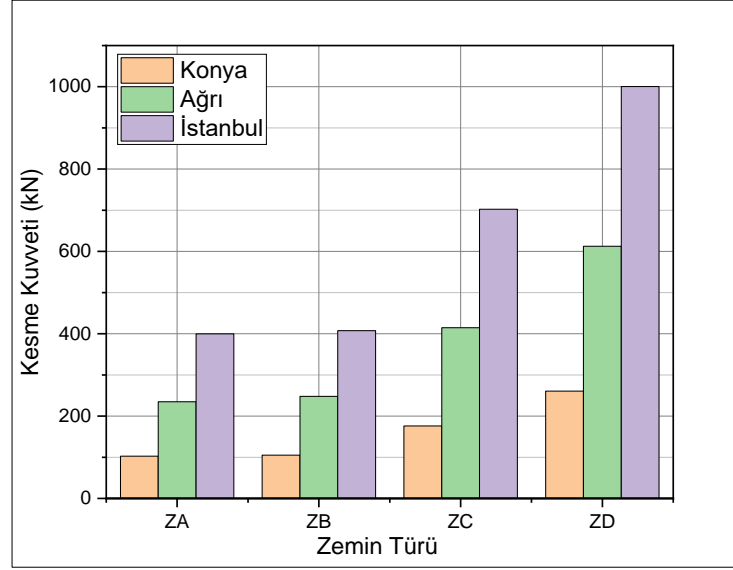
**Şekil 40.** Bölge ve zemin türlerine göre  $F_{(COMB 13)}$  kombinasyonu altında enine doğrultuda (Y) kenar ayak link eleman deformasyon değerleri

Köprü modellerine ait orta ayaktaki kolona gelen kesit tesirleri  $F_{COMB 13}$  kombinasyonu altında Tablo 4.3'te gösterilmiştir. Eksenel yük (P, kN) zemin cinsleri arasında çok fazla bir artış olmamakla birlikte en yüksek İstanbul ilinde olmakla birlikte en düşük zemin sınıfına göre yüzde 10'luk bir artış diğer illere göre olduğu gözlemlenmiştir. Kesme kuvvetlerindeki (V, kN/m) değişiklik ise tüm illerde ortalama yüzde 69'luk bir artış ZB zemin türünden ZC türüne, yüzde 46'lık bir artış ise ZC zemin türünden ZD zemin türüne geçerken gözlemlenmiştir. En kötü zemin cinsine göre İstanbul'a oranla yüzde 74'lük bir azalma Konya'da, yüzde 39'luk bir azalma Ağrı'da olduğu gözlemlenmiştir. Momentlerdeki (M, kN.m) durumda kesme kuvvetlerindeki değerlere oranla benzerdir.

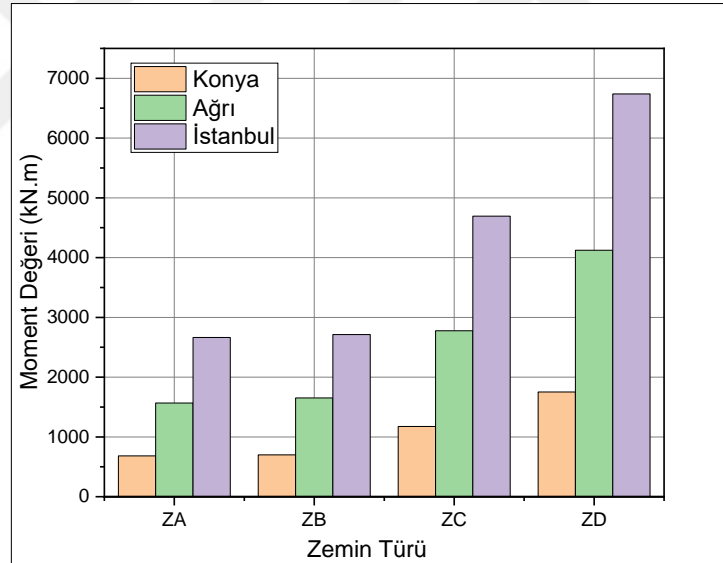


**Tablo 21.** Köprü modellerine ait orta ayaktaki kolona gelen kesit tesir değerleri

Bölge	Kesit Tesirleri	Zemin Türü			
		ZA	ZB	ZC	ZD
Konya	P, kN	6050,8	6050,8	6051,2	6052,3
	V, kN/m	102,51	105,16	176,08	261,06
	M, kN.m	682,5	699,38	1175,3	1753,4
Ağrı	P, kN	6051,4	6051,4	6051,9	6052,6
	V, kN/m	234,8	248,02	415,83	612,44
	M, kN.m	1567,7	1651,6	2785,1	4122,5
İstanbul	P, kN	6728,7	6728,6	6729,2	6729,7
	V, kN/m	399,61	407,41	702,36	1000,5
	M, kN.m	2664	2713,5	4697,8	6737,7



**Şekil 41.** Bölge ve zemin türlerine göre  $F_{(COMB 13)}$  kombinasyonu altında orta ayağa gelen kesme kuvveti kesit tesirleri değerleri



**Şekil 42.** Bölge ve zemin türlerine göre  $F_{(COMB 13)}$  kombinasyonu altında orta ayağa gelen moment değerleri kesit tesirleri değerleri

Envelop durumunda üç bölge içinde ortalama eksenel yük değerleri 9268,3 kN olmakla birlikte kesme kuvvetlerinin 386,03 kN/m ve moment değerlerinin 2628,2 kN.m mertebelerinde olduğu gözlemlenmiştir.

Köprü modeline ait başlık kirişi kesit tesir değerleri  $F_{COMB 14}$  kombinasyonu altında Tablo 4.4'te gösterilmiştir. Bu kombinasyon altında başlık kirişine gelen kesme ve moment değerleri en yüksek İstanbul ilinde çıkmakla beraber tüm

bölgelerde zemin türleri kendi içinde karşılaştırıldığında ZB zemin türünden ZC zeminine geçildiğinde ortalama yüzde 2,48, ZC zemininden ZD zeminine geçildiğinde yüzde 2,82’lik bir artış moment değerlerinde gözlemlenirken en kötü olan ZD zemin cinsine göre İstanbul’dan Ağrı’ya yüzde 14’lük, Konya’ya ise yüzde 19 ‘luk bir azalış gözlemlenmektedir.

**Tablo 22.** Köprü modellerine ait başlık kirişine gelen kesit tesir değerleri

Bölge	Kesit Tesirleri	Zemin Türü			
		ZA	ZB	ZC	ZD
Konya	V, kN/m	2294,2	2299,4	2315,9	2326
	M, kN.m	4130,5	4142,1	4190,5	4232,7
Ağrı	V, kN/m	2334,4	2345,5	2381,3	2408,4
	M, kN.m	4240,7	4265,4	4379,1	4487,8
İstanbul	V, kN/m	2661,7	2679,4	2741	2770,4
	M, kN.m	4863,8	4903	5091,8	5240,9

Enveloplu durumda ise üç bölgede ve dört zemin türünde ortalama kesme kuvveti değeri 3504,87 kN/m ve moment değerinin 6261 kN.m olduğu gözlemlenmiştir.

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında 58 m açıklıklı prekast I-90 ve prekast I-120 kirişli betonarme bir köprünün üç farklı deprem bölgesi olan Konya, Ağrı ve İstanbul bölgelerinde AASHTO 2007, TKDY 2020 ve TBDY 2018 şartnamelerine uygun olarak bilgisayar destekli analiz ve tasarım programı olan sap2000 V.21 programında ön tasarımı ve analizi yapılmıştır. Köprü 2 şeritli ve 8 m genişliğe sahiptir. Her modelde elastomer mesnet rijitlikleri düşey, yatay, burulma ve dönme rijitlikleri hesaplandıktan sonra aynı tip elastomer mesnet kullanılmış olup modellerde kolonların temele bağlatışı ankastre olarak tanımlanmıştır ve her bir köprü modeline bölge ve yönetmelikler kapsamında tanımlanan spektrum eğrileri ile modeller X ve Y yönünde deprem yüküne maruz bırakılmış ve 4 zemin türüne göre 12 farklı modelde analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda deformasyon ve kesit tesirleri elde edilmiş bulgular tablo ve grafiklerle sunulmuştur.

Bu çalışmada zati (ölü) yükler, hareketli yükler, köprü boş ve dolu halde etkileyen rüzgâr yükleri, fren yükleri, sıcaklık yükleri ve bölgelere göre etkileyen deprem yükleri tasarım köprüye etki ettirilerek 14 farklı kombinasyon oluşturulmuş ve en olumsuz duruma göre analizler değerlendirilmiştir.

Her üç modelde yapılan analizler sonucunda mod şekillerinin uyum içerisinde olduğu saptanmış ilk üç modun eğilme ve burulma yönünde olduğu gözlemlenmiştir. Her üç bölge içinde kurulan modellerin kenar ayak ve orta ayaklardan gelen etkisi detaylı bir şekilde incelenerek farklı bölgelerdeki modeller irdelenerek zemin türü, bölge ve prekast kiriş tipine göre bazı yorumlamalar yapılmıştır.

Her üç bölgede X ve Y yönünde etki ettirilen deprem yüklerinde orta ayak üzerine gelen kesme kuvvetlerinde en düşük değer Konya bölgesinde tespit edilmiştir. Bu da kullanılan prekast kiriş farklılıklarından dolayı ve bölgenin deprem derecesinin en düşük olduğu modelde kesme kuvvetlerinin anlamlı bir oranda düşmesine sebebiyet vermiştir. Tüm bölgelerde zemin parametreleri kendi içinde incelendiğinde ise en kötü zemin cinsine göre İstanbul ili diğer iller ile karşılaştırıldığında Konya ili için yüzde 74,4'lük bir ve Ağrı ili için yüzde 39'lük bir azalma olduğu gözlemlenmiştir.

Zemin türleri kendi içinde karşılaştırıldığında ise ZA zemin türünden ZB

zemin türüne geçildiğinde yüzde 68,2'lik bir artış, ZC zemin türünden ZD zemin türüne geçildiğinde ise yüzde 48'lik bir artış söz konudur.

Deprem yükünden oluşan maksimum kesit tesirleri orta ayaklarda  $F_{COMB 13}$  kombinasyonu altında aksenal yükün değeri (P,kN), zemin türleri arasındaki değişimde çok fazla bir artış olmamıştır ve en yüksek İstanbul ilinde olduğu saptanmıştır. Kesme kuvvetlerindeki (V,kN) değişiklik ise tüm illerde ortalama yüzde 69'luk bir artış ZB zemin türünden ZC zemin türüne geçerken, yüzde 46'lık bir artış ise ZC zemin türünden ZD zemin türüne geçerken gözlemlenmiştir. En kötü zemin cinsine göre ise İstanbul'a oranla yüzde 74'lük bir azalma Konya'da, yüzde 39'luk bir azalma Ağrı'da olduğu sonucuna varılmıştır. Momentlerdeki (kN.m) değişimlerde kesme kuvvetlerindeki değişimlere paralel olduğu görülmüştür.

Deprem yükünden oluşan kenar ayak link eleman deformasyon değerleri  $F_{COMB 13}$  kombinasyonu altında boyuna doğrultu (X) yönünde oluşan deformasyon değerleri enine doğrultu (Y) yönündekinden daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır. En kötü zemin türüne göre (ZD) bölgeler kendi içinde karşılaştırıldığında İstanbul'a göre Konya'da yüzde 75'lik bir azalma söz konusu iken Konya bölgesinde yüzde 40'lık bir azalma olduğu sonucuna varılmıştır.

Başlık kirişi kesit tesirleri  $F_{COMB 14}$  kombinasyonu altında incelendiğinde ise kesme kuvveti ve moment değerleri en yüksek İstanbul'da çıkmakla beraber en kötü zemin türüne (ZD) göre İstanbul'dan Ağrı'ya yüzde 14'lük Konya'da ise yüzde 19'luk bir azalış olduğu saptanmıştır. Diğer kombinasyonlar içinde en elverişsiz durum olan enveloplu durumda ise üç bölgede ve dört zemin türün göre kesme kuvveti 3504,8 kN/m ve moment değerinin 6261kN.m olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak deprem bölgeleri dereceleri bakımından ve farklı zemin türleri açısından karşılaştırılan modellerde prekast kiriş kesiti azaltılması öngörülmüştür. Daha az önem derecesine sahip bölgelerde I-120'lik kiriş yerine I-90'lık kiriş kullanılması açısından kesitlerde donatı ve beton tasarrufu sağlanmış, maliyet ve yapı ağırlığı azaltılması yoluna gidilmiştir. Zemin türleri de kendi içinde deprem bölgelerine göre karşılaştırılarak zemin cinsinin uygunluğu kendi içinde değerlendirilmiştir.

## KAYNAKÇA

- [1] B. Nath, Mühendisler için sonlu elemanlar metodunun temelleri, Sakarya üniversitesi, Adapazarı (1993)
- [2] Paul Kurowski, Finite Element for Design Engineers, Second Edition, (2017)
- Sonlu elemanlar metodu ve gemi inşaatı sektöründeki uygulamaları
- [3] Prof.Dr. Metin Hüsem, Öngermeli Beton Hakkında Genel Bilgiler Ktü İnşaat Mühendisliği Bölümü
- [4] Yıldız Teknik Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, Okan Özkara (1989), Öngermeli prekast köprü kirişlerinin proje ve uygulama aşamasında karşılaşılan zorluklar
- [5] Ünal O, Kürklü G, (2007). Öngermeli Beton Teknolojisi Teknik Not, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim fakültesi, Afyonkarahisar
- [6] Tetik O, Betonarme prefabrike endüstri binalarında mimari tasarımı etkileyen faktörler ve uygulama problemleri (1997) İTÜ, Yüksek Lisans Tezi
- [7] Ayazoğlu,İ (2003). Prefabrike panel sistemlerle konut üretiminde mimari tasarım sorunları, Yüksek Lisans Tezi ,İTÜ
- [8] Cemalettin Dönmez, Eyyüb Karakan (2009), Köprülerde Deneysel Modal Analiz Uygulamaları, İmo Teknik Dergi Yazı 318
- [9] Noorullrahman Anjumani, Budur (2021), Kirişli köprülerin Deprem Etkisi Altındaki Davranışı Yüksek Lisans Tezi ,Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi
- [10] Can AKOĞUL, (2007) Prekast Kirişli Betonarme Köprülerin AASHTO'ya göre Depreme Dayanıklı Tasarımı
- [11] Doç.Dr.Hüseyin Celasun , Öngermeli Beton Kirişli ve Plak Köprüler, Çağlayan Kitabevi (1973)
- [12] Yapım aşamaları ve farklı zemin durumlarının betonarme köprülerin yapısal davranışlarına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Erdal Yıldırım (2011)
- [13] Mevcut bir köprünün deprem performansının değerlendirilmesi, İTÜ yüksek lisans Tezi ,Kaşif Hakan Şahin (2010)

- [14] TKDY, (2020), Deprem Etkisi Altında Karayolu ve Demiryolu Köprü ve Viyadükleri Tasarımı için Esaslar
- [15] Türkiye Bina ve Deprem Yönetmeliği,(2018)
- [15] AASHTO LRFD ,1998 Bridge Design Specifications Amerikan Association of state Highway and transportation officials,Washington DC.
- [16] KTS,2013 , Karayolları Teknik Şartnamesi Yol Alt yapısı ,Sanat Yapıları, Köprü ve Tüneller ,Üstyapı ve Çeşitli İşler
- [17] Sap200, Structural Analysis Program, Computer and Structures Inc.Berkeley, California
- [18] PCI (2014),Precast and Prestressed Concrete Design Handbook,Prestressed Concrete Institute, Chicago
- [19] Dicleli ve Brumeau ,(1995) seismic performance of single span simply supported and continuous slab on girder steel highway bridges
- [20] Alemdaroğlu (2003),Betonarme köprülerin deprem tasarımı ve mevcut köprülerin değerlendirilmesi ,İTÜ, yüksek lisans tezi
- [21] Mevcut bir viyadüğün deprem performansının doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlerle belirlenmesi,Emre Serdar Yüksel (2008), Yüksek Lisans Tezi
- [22] Faraz SAFAİ,Betonarme Köprü Modellemesi üzerine bir çalışma,Gazi Üniversitesi,(2010),Ankara
- [23] Esraa Mubder Edaan (2010), Seismic design of single span steel girder bridges and brdiges in seismic performance category A
- [24] Erdal yıldırım (2010), KTÜ,Yapım aşaması ve farklı zemin durumlarının betonarme köprülerin yapısal davranışına etkisi
- [25] Ömer Faruk Çift ,(2018) Dengeli konsol köprü analizi ve performans değerlendirmesi
- [26] Köprülerde kurşun çekirdekli elastomer mesnet tasarımı ve köprü deprem davranışı üzerindeki etkilerin incelenmesi, Bexsultan (2021)

