

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÖNGERİLMELİ BETONDAN BOŞLUKLU VEREV PLAK
KÖPRÜLERİN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE ANALİZİ**

**Tezi Hazırlayan
Savaş BAYRAM**

**Tezi Yöneten
Yrd. Doç. Dr. Yaşar UĞUR**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Temmuz 2009
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÖNGERİLMELİ BETONDAN BOŞLUKLU VEREV PLAK
KÖPRÜLERİN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE ANALİZİ**

**Tezi Hazırlayan
Savaş BAYRAM**

**Tezi Yöneten
Yrd. Doç. Dr. Yaşar UĞUR**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Temmuz 2009
KAYSERİ**

Yrd. Doç. Dr. Yaşar UĞUR danışmanlığında **Savaş BAYRAM** tarafından hazırlanan “**Öngerilmeli Betondan Boşluklu Verv Plak Köprülerin Yapay Sinir Ağları ile Analizi**” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

22/07/2009

JÜRİ:

Başkan : Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ

Üye : Doç. Dr. Turgut ÖZTÜRK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Yaşar UĞUR

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun 28/07/2009 tarih ve 2009/24-08 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

28/07 / 2009

Prof. Dr. Nusret AYYILDIZ
Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Çalışmamı, babam merhum Cuma BAYRAM'a ithaf ediyorum.

Maddi ve manevi desteklerinden dolayı sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın gerçekleşmesinde bana yardımcı olan ve çalışmalarımı izleyen hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Yaşar UĞUR'a en içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Fedakârlıklarını esirgemeyen değerli arkadaşlarım Mehmet ÖZER, Eray DEMİREL, Aziz HÜNER ve İbrahim ÖZDEMİR'e minnettarım.

Çalışmamın bir yarıyılını geçirdiğim RWTH Aachen Üniversitesi'nde danışmanlığımı üstlenen İnşaat Mühendisliği Fakültesi Yapı Anabilim Dalı öğretim üyesi Dipl.-Ing. Sabine RAUSCHER'e teşekkürü borç bilirim.

ÖNGERİLMELİ BETONDAN BOŞLUKLU VEREV PLAK KÖPRÜLERİN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE ANALİZİ

Savaş BAYRAM

**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2009
Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Yaşar UĞUR**

ÖZET

Yüksek lisans tezi olarak gerçekleştirilen bu çalışmada; iki açıklıklı, hiperstatik, öngerilmeli betondan boşluklu vev plak köprülerin analizi gerçekleştirilmiştir.

Köprü modelinin ızgara analogisi, Microstran yazılımı ile analiz edilmiştir. Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) tabanlı SAP2000 yazılımı ile çok sayıda köprünün; öz ağırlığı, kalıcı ölü yükler ve hareketli taşıt yükleri altında eğilme momentlerinin analizi yapılarak tasarım eğilme momenti değerleri elde edilmiştir. Tasarım eğilme momenti değerleri kullanılarak üç farklı Yapay Sinir Ağları (YSA) uygulaması gerçekleştirilmiştir.

YSA uygulaması; Çok Katmanlı Algılayıcılı (MLP), Radyal Tabanlı Fonksiyon (RBF) ve Genelleştirilmiş Regresyon Ağı (GRN) ile modellenmiştir. Analiz sonuçlarına göre MLP'nin, eğilme momenti değerlerini ihmal edilebilecek hata oranları ile öğrendiği görülmüştür. YSA'nın, kullanıldığı diğer birçok alanın yanında, inşaat mühendisliğinde de geniş kullanım alanı vardır. Fakat, öngerilmeli betondan boşluklu vev plak köprülerin Yapay Sinir Ağları (YSA) ile analizine ilişkin herhangi bir çalışmaya literatürde şu ana kadar rastlanmamıştır.

Anahtar Kelimeler: Vev plak köprü, Izgara analogisi, Sonlu elemanlar metodu, Öngerilmeli beton, Yapay sinir ağları.

ANALYSIS OF VOIDED SKEWED SLAB BRIDGES DESIGNED WITH PRESTRESSED CONCRETE USING BY ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Savaş BAYRAM

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M.S. Thesis, July 2009

Thesis Supervisor: Assist. Prof. Dr. Yaşar UĞUR

ABSTRACT

In this Master of Science thesis; two spanned, statically indeterminate, voided skewed slab bridges designed with prestressed concrete are analyzed.

The Grillage Analogy of the bridge model is analyzed using by Microstran software. A number of bridges is analyzed under bridge's self-weight, permanent dead loads and live vehicle loads by using SAP2000 software based on Finite Element Method (FEM) and the values of design bending moments are obtained from analyzing results. By using the values of design bending moments, three different types of Artificial Neural Network (ANN) applications are performed.

The ANN application is modeled using by Multi Layer Perceptron (MLP), Radial Basis Function (RBF) and Generalized Regression Network (GRN). The analyzing results showed that MLP estimated the bending moment values with errors in a negligible ratio. Besides in other fields, the ANN has a wide area of usage in Civil Engineering, too. However, a study about the analysis of Voided Skewed Slab Bridges Designed With Prestressed Concrete Using by Artificial Neural Networks hasn't been recorded in the literature yet.

Keywords: Skewed slab bridge, Grillage analogy, Finite element method, Prestressed concrete, Artificial neural networks.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	i
TEŞEKKÜR	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
KISALTMALAR VE SİMGELER	viii
TABLolar LİSTESİ	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiv
 1. BÖLÜM	
GİRİŞ	1
1.1. Köprüler Hakkında Genel Bilgiler	1
1.2. Tezin Amacı, Yöntemi ve Düzeni	6
 2. BÖLÜM	
BOŞLUKLU VEREV PLAK KÖPRÜLER	9
2.1. Tanımlar ve Kabuller	9
2.2. Boşluklu Verve Plak Köprüler Hakkında Genel Bilgiler	11
2.3. Boşluklu ve Verve Plak Köprülerin Analizine İlişkin Önceki Çalışmalar	22
2.4. Analiz Yöntemleri	30
 3. BÖLÜM	
IZGARA ANALojİSİ YÖNTEMİ İLE BOŞLUKLU VEREV PLAK KÖPRÜLERİN ANALİZİ	33
3.1. Giriş	33
3.2. Ön Boyutlandırma	34
3.3. Yöntemin Temel İlkeleri	38
3.4. Yöntem	43
 4. BÖLÜM	
SONLU ELEMENLAR METODU (SEM) İLE BOŞLUKLU VEREV PLAK KÖPRÜLERİN ANALİZİ	53

4.1. Giriş	53
4.2. SEM ile Köprü Analizi	54
4.3. Boşluklu Verv Plak Köprülerin Sonlu Eleman Modellemesi	55
4.4. Boşluklu Verv Plak Köprülerin SAP2000 Yazılımı ile Analizi	60
4.4.1. Boşluklu Verv Plak Köprü'nün Modellenmesi	60
4.4.2. Boşluklu Verv Plak Köprü Modelinin Yüklenmesi	64
4.4.3. Boşluklu Verv Plak Köprü Modelinin Analiz Sonuçları ve Yorumlanması	68
4.5. Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	70
 5. BÖLÜM	
BOŞLUKLU VEREV PLAK KÖPRÜLERİN ÖNGERİLMELİ OLARAK TASARIMI	73
5.1. Giriş	73
5.2. Öngerilmeli Beton ile İlgili Genel Bilgiler	75
5.3. Öngerme Yöntemleri	77
5.4. Boşluklu Verv Plak Köprülerin Öngerilmeli Olarak Tasarımına İlişkin Temel İlkeler	79
5.5. Model Köprü İçin Öngerilme Hesabı	83
 6. BÖLÜM	
BOŞLUKLU VEREV PLAK KÖPRÜLERİN ANALİZİNE YAPAY SİNİR AĞLARI (YSA) UYGULAMASI.....	90
6.1. Giriş	90
6.1.1. YSA'nın Tanımı	90
6.1.2. Matematiksel Yapay Sinir Hücresi Modeli	91
6.1.3. YSA'nın Tarihçesi	92
6.2. Yapay Sinir Ağlarının Sınıflandırılması	94
6.2.1. Öğrenme Yaklaşımlarına Göre Sınıflandırma	95
6.2.1.1 Danışmanlı (Güdümlü) Öğrenme	95
6.2.1.2 Danışmansız (Güdümsüz) Öğrenme	95
6.2.1.3 Takviyeli Öğrenme	95
6.2.2. Ağ Yapılarına Göre Sınıflandırma	96
6.2.2.1 İleri Beslemeli (Feed Forward) Sinir Ağları	96

6.2.2.2 Geri Beslemeli (Recurrent) Ağlar	96
6.2.3. YSA Çeşitleri	98
6.2.3.1 Çok Katmanlı Algılayıcı (Multi Layer Perceptron-MLP)	98
6.2.3.2 Radyal Tabanlı Ağ (Radial Basis Network-RBF)	99
6.2.3.3 Genelleştirilmiş Regresyon Ağı (Generalized Regression Network-GRN)	101
6.3. Yapay Sinir Ağlarının İnşaat Mühendisliğindeki Uygulamaları	102
6.4. Boşluklu Verve Plak Köprülerin Analizine Yapay Sinir Ağları Uygulaması	103
6.4.1. Çok Katmanlı Algılayıcı ile (MLP) Modelleme	105
6.4.2. Radyal Tabanlı Fonksiyon ile (RBF) Modelleme	113
6.4.3. Genelleştirilmiş Regresyon Ağı ile (GRN) Modelleme	121
6.5. Yapay Sinir Ağları Modellerinden Elde Edilen Sonuçlar	127
 7. BÖLÜM	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	130
 KAYNAKLAR	133
EKLER	141
ÖZGEÇMİŞ	171

KISALTMALAR VE SİMGELER

μ_i	: Gauss fonksiyonunun ortalaması
2D	: İki boyutlu
2L	: Köprü toplam uzunluğu (m)
3D	: Üç boyutlu
A	: Kesit alanı (m^2)
a^*	: Kablo kesit alanı (mm^2)
AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerikan Karayolu Şartnamesi)
A_b	: Öngerilme bölgesi en kesit alanı (m^2)
AREMA	: The American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (Amerikan Demiryolu Mühendisliği ve Bakım Kurumu)
ART	: Adaptive Resonance Theory
B	: Köprü verev genişliği (m)
BÇ IVa	: Karakteristik akma dayanımı 500 kN/m^2 olan sıcakta haddelenmiş betonarme çeliği
BÇ	: Betonarme çeliği
BS	: British Standard (İngiliz Şartnamesi)
d	: Öngerilme kablosunun tabana uzaklığı (m)
D	: Plağın eğilme rijitliği
d_i	: Enine doğrultudaki iç ızgara elemanları arası mesafe (m)
DOT	: Department of Transportation (Ulaştırma Departmanı)
E	: Elastisite modülü (MPa)
e	: En kesitin ağırlık merkezi ile öngerilme kuvvetinin merkezinin arasındaki dikey mesafe, eksantrisite (m)
E_c	: Betonun elastisite modülü (MPa)
e_p	: Kablo eksantrisitesi (m)
E_s	: Çeliğin elastisite modülü (MPa)
$f(x)$	: Radyal tabanlı fonksiyonda çıktı katmanı
f_b	: Plağın alt bölgesindeki gerilme (kN/m^2)
f_c	: Beton basınç emniyet gerilmesi (kN/m^2)
f'_c	: Betonun karakteristik basınç dayanımı (kN/m^2)

FEM (SEM)	: Finite Element Method (Sonlu Eleman Metodu)
f_s'	: Karakteristik çelik kopma dayanımı (kN/m^2)
f_{yd}	: Çelik karakteristik dayanımı (kN/m^2)
f_{yk}	: Çeliğin karakteristik akma dayanımı (kN/m^2)
GA	: Genetik Algoritma
$G_i(x)$	: Gauss fonksiyonu
GRL	: Grillage Analogy (Izgara Analojisi)
GRN	: Generalized Regression Network
G_x	: Öngerilme uygulanacak kesitin ağırlık merkezinin x eksenine uzaklığı (m)
G_y	: Öngerilme uygulanacak kesitin ağırlık merkezinin y eksenine uzaklığı (m)
$H_{30}S_{24}$	: TCK köprüler teknik şartnamesinde tanımlı standart kamyon yükü
$h_i(x)$	: Radyal tabanlı fonksiyonda gizli katman ifadesi
$HSn-44$	: AASHTO köprüler teknik şartnamesinde tanımlı standart kamyon yükü
IRI	: International Roughness Index (Uluslararası Düzgünsüzlük İndeksi)
I_x	: x eksenini doğrultusundaki atalet momenti (m^4)
I_y	: y eksenini doğrultusundaki atalet momenti (m^4)
i	: Gauss fonksiyonunda gizli tabakada yer alan herhangi bir nöron
i_x	: Birim genişlik için boyuna doğrultuda atalet (m^4)
i_y	: Birim genişlik için enine doğrultuda atalet (m^4)
J	: St. Venant burulma ataleti (Torsiyonel sabit, m^4)
k	: Katman indisi
L	: Köprü statik açıklığı (m)
$L_{ÖNG}$	: Öngerilme uygulanacak kesitin uzunluğu (m)
LRFD	: Load and Resistance Factor Design (Amerikan Yük Tasarım Şartnamesi)
M	: Eğilme momenti (kNm)
M_D	: Ölü yükten kaynaklanan maksimum eğilme momenti (kNm)
M_{DS}	: Ölü ve hareketli yükten kaynaklanan maksimum eğilme momenti (kNm)
M_G'	: Öngerilme uygulanacak bölgenin taşıdığı moment (kNm)
M_L	: Hareketli yükten kaynaklanan maksimum eğilme momenti (kNm)
ML	: Moving load (Hareketli yük)

MLP	: Multi Layer Perceptron
M_{xy}	: Torsiyon (Burulma) Momenti (kNm)
n	: Kablo adedi
N	: Seçilen öngerme kablosu sayısı
N'	: Gerekli öngerme kablosu sayısı
n_k	: k. katmandaki yapay hücre sayısı
OHBDC	: Ontario Highway Bridge Design Code (Kanada Karayolu Şartnamesi)
OMGH	: Ortalama Mutlak Göreceli Hata
p	: Gauss fonksiyonunda bağımsız değişken sayısı
P_s	: Bir kablo için öngerme aşamasında müsaade edilen ilk öngerme kuvveti (kN)
P_{s1}	: Bir kablo için öngerme aşamasında izin verilen öngerme kuvveti (kN)
P_{se}	: Kayıplardan sonra etkili öngerme kuvveti (kN)
P_{se1}	: Bir kablo için bütün kayıplardan sonra izin verilen öngerme kuvveti (kN)
q	: Plak üzerine gelen yükün şiddeti (kN)
R	: Boşluk çapı (m)
r^2	: Dönme çapının karesi (m^2)
R^2	: Korelasyon (belirginlik) katsayısı
RBF	: Radial Basis Function
RO	: Reaksiyon oranı (%)
R_x	: Plagın x eksenine doğrultusundaki dönmesi (Rotasyonu)
R_y	: Plagın y eksenine doğrultusundaki dönmesi (Rotasyonu)
S_{bb}	: Yatay eksenin mukavemet momenti (Kesit modülü, m^3)
SOM	: Self Organizing Map
t	: Köprü plak kalınlığı (m)
T	: Torsiyon (kN)
t_a	: Plak boşluğunun altındaki kesitin derinliği (m)
t_h	: Tretuvar yüksekliği (m)
TS 3233	: Öngerilmeli beton elemanların hesap ve yapım kurallarını içeren Türk Standardı
t_u	: Plak boşluğunun üstündeki kesitin derinliği (m)
u	: Plagın x eksenine doğrultusundaki yer değiştirmesi

v	: Plağın y eksenı doğrultusundaki yer değıştirmesi
$v_{(k+1)i}$	: (k+1). katmanın i. yapay sınır hücresinin net toplamı
W_T	: $H_{30}S_{24}$ kamyon ağırlığı
W	: Köprü dik genişliği (m)
w	: Plağın yanal deformasyonu
w_c	: Beton birim ağırlığı (kN/m^2)
w_{ki}	: YSA giriş ağırlıkları
WSDOT	: Washington Department of Transportation
x	: Her bir sıradaki kablo adedinin, kabloların kesit tabanına uzaklığı ile çarpımının toplam kablo adedine oranı
x_i	: YSA giriş verileri
X_m	: Kütle merkezinin x koordinatı (m)
y	: En kesitin ağırlık merkezi ile giriş alt ve üst noktaları arasındaki dikey mesafe (m)
$y_{(k+1)i}$	: (k+1). katmanın i. yapay sınır hücresinin çıkış değeri
Y_{bb}	: Öngerilme uygulanacak kesitin ağırlık merkezinin tabana uzaklığı (m)
y_i	: YSA çıkış verileri
y_{kj}	: k. katmanın j. yapay sınır hücresinin çıkış değeri
Y_m	: Kütle merkezinin y koordinatı (m)
YOGT	: Yıllık Ortalama Günlük Trafik
YSA	: Yapay Sınır Ağı
YSH	: Yapay Sınır Hücresi
α_i	: Genelleştirilmiş regresyon ağında ağıın çıkışını elde etmek için kullanılan parametre
γ^*	: Öngerme kablosu tip faktörü
δ	: Sehim (mm)
ε	: Birim boy değışimi
ε_c	: Betonda birim boy değışimi
ε_s	: Donatı çeliğinde birim boy değışimi
θ	: Verevlik Açısı ($^\circ$)
σ	: Genelleştirilmiş regresyon ağında yumuşatma parametresi
Σ	: Toplama fonksiyonu
σ_g	: Kayıplardan sonra gerekli öngerme gerilmesi (kN/m^2)

σ_{ix}	: Gauss fonksiyonunun varyansı
σ_i	: İzin verilen çekme gerilmesi (kN/m^2)
σ_x	: Plak düzlemindeki x eksenı doğrultusundaki gerilme (kN/m^2)
σ_y	: Plak düzlemindeki y eksenı doğrultusundaki gerilme (kN/m^2)
σ_z	: Plak orta düzlemine (tarafsız eksenine) dik doğrultudaki normal gerilme (kN/m^2)
ψ	: Aktivasyon fonksiyonu
φ	: Tahmin edilen toplam öngerilme kaybı
ϕ	: Öngerme uygulama oranı

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1.	Farklı Üst Yapı Türleri İçin Uygun Açıklıklar	5
Tablo 1.2.	Farklı Açıklıklar İçin Köprü Türünün Seçimi	5
Tablo 2.1.	Northridge Depremi (1994) Sonucu Hasar Gören Köprüler ve Hasar Nedenleri	19
Tablo 2.2.	Analiz İçin Uygulanabilecek Çözüm Metodları	31
Tablo 3.1.	Izgara Analojisinden Elde Edilen Sonuç Momentler	52
Tablo 4.1.	Microstran ve SAP2000 Sonuçlarının Karşılaştırılması	71
Tablo 4.2.	Köprü Modellerinin Reaksiyon Oranları	72
Tablo 5.1.	Öngerilme Kablosu Sayısının Hesabı	86
Tablo 6.1.	YSA Modellerinin Test Aşamasındaki OMGH ve R^2 Değerleri	106
Tablo 6.2.	YSA Modellerinin Eğitim Aşamasındaki OMGH ve R^2 Değerleri	107
Tablo 6.3.	YSA Kombinezonlarının Test Aşamasındaki OMGH ve R^2 Değerleri	108
Tablo 6.4.	Radyal Tabanlı Modelde Kombinezon 1 İçin Test Aşamasındaki OMGH ve R^2 Değerleri	114
Tablo 6.5.	Radyal Tabanlı Modelde Kombinezon 2 İçin Test Aşamasındaki OMGH ve R^2 Değerleri	115
Tablo 6.6.	Radyal Tabanlı Modelde Kombinezon 3 İçin Test Aşamasındaki OMGH ve R^2 Değerleri	116
Tablo 6.7.	Radyal Tabanlı Modelde Kombinezon 4 İçin Test Aşamasındaki OMGH ve R^2 Değerleri	117
Tablo 6.8.	YSA Kombinezonlarının Test Aşamasındaki OMGH ve R^2 Değerleri	118
Tablo 6.9.	YSA Modellerinin Test Aşamasında Kombinezon 1 ve Kombinezon 2 İçin OMGH ve R^2 Değerleri	122
Tablo 6.10.	YSA Modellerinin Test Aşamasında Kombinezon 3 ve Kombinezon 4 İçin OMGH ve R^2 Değerleri	123
Tablo 6.11.	YSA Kombinezonlarının Test Aşamasındaki OMGH ve R^2 Değerleri	124
Tablo 6.12.	YSA Modellerinden Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması	128

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Çok Açıklıklı Basit Mesnetli Bir Köprüde Bir Orta Ayak Üzerindeki Mesnetlerin Düzenlenmesi	2
Şekil 1.2. Çok Açıklıklı Sürekli Kirişli Hiperstatik Bir Köprüde Orta Ayak Üzerindeki Mesnetlerin Düzenlenmesi	3
Şekil 1.3. Çok Açıklıklı İzostatik Gerber Kirişli Bir Köprüde Orta Ayak Üzerindeki Mesnetlerin ve Ara Gerber Mafsalının Düzenlenmesi	3
Şekil 1.4. Boşluklu Plak ya da Kutu Kesitli Köprülerin En Kesiti	4
Şekil 2.1. Döşeme Plaklarının Tipik En Kesitleri	12
Şekil 2.2. Döşeme Plakları	13
Şekil 2.3. Boşluklu Bir Köprü Plağının En Kesiti	14
Şekil 2.4. Verev Bir Plak	15
Şekil 2.5. Verev Köprü Yerine Düz Köprü Yapımı Uygun Görülen Bir Demiryolu Güzergahı	16
Şekil 2.6. Döşeme Elemanlarının Plan Geometrisi	17
Şekil 2.7. Verev Plaklarda Açıklık/Genişlik Oranları	18
Şekil 2.8. Verev Açıklıkta Yük Dağılımı	20
Şekil 2.9. Verev Döşeme Plaklarındaki Ana Moment Doğrultuları	20
Şekil 2.10. Düz ve Verev Köprüler İçin Hareketli Yük Dağılımı	21
Şekil 3.1. Hiperstatik Köprü Sistemi	34
Şekil 3.2. Köprünün İnşa Edileceği Profil	35
Şekil 3.3. Köprü Modelinin Boy Kesiti	35
Şekil 3.4. Köprünün Plandaki Görünüşü	35
Şekil 3.5. Köprü Modelinin En Kesiti	37
Şekil 3.6. Izgara Bir Eleman	39
Şekil 3.7. Bir Plağın Izgara Elemanlarına Ayrılması	40
Şekil 3.8. Kenar Izgara Elemanın Yerleştirilmesi	41
Şekil 3.9. Tekil Yükün Bitişik Düğüm Noktalarına Dağıtımı	41
Şekil 3.10. Köprüler İçin Tipik Izgara Modellemeleri	42
Şekil 3.11. Boşluklu Bir Plakta Boyuna Doğrultudaki Izgara Elemanları	43
Şekil 3.12. İki Açıklıklı Verev Plağın Plan Görünüşü	44
Şekil 3.13. Microstran Programında Global Koordinat Sistemi	45

Şekil 3.14. Microstran Programında Birimlerin Seçilmesi	45
Şekil 3.15. Microstran Programında Standart Olan Yapı Türleri	45
Şekil 3.16. Izgara Özelliklerinin Belirlenmesi	46
Şekil 3.17. (X) ve (Y) Eksenlerindeki Her Bir Panelin Uzunluğunun Programa Girilmesi	47
Şekil 3.18. Oluşturulan Izgara Sistemin Plan Görünüşü	47
Şekil 3.19. Boyuna Doğrultudaki Izgara Elemanlarının En Kesitte Yerleşimi	47
Şekil 3.20. Mesnet Şartlarının Tanımlanması	49
Şekil 3.21. (a) Elemanların Yüklenmesi, (b) Düğüm Noktalarına Yük veya Moment Girilmesi	50
Şekil 3.22. Alan Yükleme	51
Şekil 4.1. Sonlu Elemanlar Sistemi	53
Şekil 4.2. Her İki Doğrultudaki Eğilme ve Torsiyon ile Döşeme Plâğındaki Yük Dağılımı	56
Şekil 4.3. Plak Sonlu Eleman Modeli	57
Şekil 4.4. Diğer Sonlu Eleman Modelleri	58
Şekil 4.5. Dörtgensel Eleman Üzerindeki Düğüm Noktası Yer Değiştirmeleri	58
Şekil 4.6. Verve Köprüler İçin Sonlu Eleman Ağları	59
Şekil 4.7. Köprü Modelinin En Kesiti	62
Şekil 4.8. Köprünün Plandaki Görünüşü	63
Şekil 4.9. Solid Elemanlara Bölünmüş Köprü Plâğının Program Ana Penceresinde Görünümü	63
Şekil 4.10. Programda Seçilen Kamyon Sınıfının Özellikleri	65
Şekil 4.11. Seçilen Kamyon Sınıfının H ₃₀ S ₂₄ Kamyonu Olarak Modifiye Edilmesi	66
Şekil 4.12. H30-S24 Kamyon Yüğü	66
Şekil 4.13. Köprüye Etkiyecek Hareketli Yük Tanımı	67
Şekil 4.14. Analiz Sonrası Köprünün Deforme Olmuş Şeklinin Program Ana Penceresinde Gösterimi	68
Şekil 4.15. Analiz Sonrası Elde Edilen Ölü Yük Eğilme Momenti Diyagramı	69
Şekil 4.16. Analiz Sonrası Elde Edilen Hareketli Yük Eğilme Momenti Diyagramı	70
Şekil 4.17. Microstran ve SAP2000 Sonuçlarının Grafikselsel Olarak Gösterimi	71

Şekil 5.1. Plougastel Köprüsü	74
Şekil 5.2. Serbest Döşeme Elemanı Üzerindeki Öngerilme Kuvvetleri	76
Şekil 5.3. Öngerilmeden Dolayı Betonda Oluşan Kuvvetler	77
Şekil 5.4. Eksantrik Olarak Öngerilmeye Maruz Basit Dikdörtgensel Bir Kirişin Açıklıktaki Gerilme Dağılımı	80
Şekil 5.5. $\theta \leq 25^\circ$ Olduğu Durumda Donatı Yerleşimi	81
Şekil 5.6. $\theta > 25^\circ$ Olduğu Durumda Donatı Yerleşimi	81
Şekil 5.7. Verve Plakta Donatı Düzenlenmesi	82
Şekil 5.8. Boşluklu Bir Plak Kesitinin Donatı Detaylanması	83
Şekil 5.9. Köprü Modelinin En Kesiti	83
Şekil 5.10. Öngerilme Uygulanacak Bölgeler	85
Şekil 5.11. Öngerilme Uygulanacak Kesit	86
Şekil 5.12. Öngerilme Kablolarının Plak En Kesitindeki Yerleşimleri	88
Şekil 6.1. Yapay Sinir Ağlarının Temel Prensipleri	91
Şekil 6.2. Bir Yapay Sinir Hücresinin Matematiksel Modeli	92
Şekil 6.3. İleri beslemeli 3 Katmanlı Bir YSA Mimarisi	97
Şekil 6.4. Geri Beslemeli Bir Ağ Mimarisi	97
Şekil 6.5. 2-4-1 Düzenine Sahip bir MLP	98
Şekil 6.6. Radyal Tabanlı Bir YSA Mimarisi	100
Şekil 6.7. MLP Modelinin Eğitim Aşamasında Hatalara Bağlı İterasyon Değişimi	108
Şekil 6.8. YSA Modelinin Eğitim Aşamasındaki Doğru Grafiği	109
Şekil 6.9. YSA Modelinin Eğitim Aşamasındaki Gidiş Grafiği	109
Şekil 6.10. YSA Modelinin Test Aşamasındaki Doğru Grafiği	110
Şekil 6.11. YSA Modelinin Test Aşamasındaki Gidiş Grafiği	111
Şekil 6.12. YSA Modelinin Test Aşamasında, (T) ve (Y) Değerlerinin Doğru Grafiği	112
Şekil 6.13. YSA Modelinin Test Aşamasındaki Gidiş Grafiği	118
Şekil 6.14. YSA Modelinin Test Aşamasındaki Doğru Grafiği	119
Şekil 6.15. YSA Modelinin Test Aşamasında, (T) ve (Y) Değerlerinin Doğru Grafiği	120
Şekil 6.16. YSA Modelinin Test Aşamasındaki Gidiş Grafiği	124
Şekil 6.17. YSA Modelinin Test Aşamasındaki Doğru Grafiği	125

Şekil 6.18. YSA Modelinin Test Aşamasında, (T) ve (Y) Değerlerinin Doğru Grafiği	126
--	-----

1. BÖLÜM

GİRİŞ

En eski mühendislik yapılarından biri olan köprüler için birçok farklı ve kapsamlı tanım yapabilmek söz konusudur. Köprüleri; “İki ucundan kenar ayaklara ve varsa orta ayaklara oturan, üzerine gelen yükleri tabliye döşemesi, ana kirişler ya da enleme kirişleri ve başkaca elemanları yardımıyla taşıyan, karşısına çıkan akarsu, vadi, bir başka yol gibi engelleri geçebilmek amacıyla yapılan sanat yapılarına köprü denir” şeklinde tanımlayabilmek mümkündür [1 ve 2]. Köprüler; ahşap, kâgir, beton, betonarme, öngerilmeli beton ya da çelikten yapılabilir [1, 2 ve 3].

Köprüler, karayolu ağlarının anahtar elemanlarıdır. Günlük yaşam işlevlerimizi ve gereksinimlerimizi karşılamadaki öneminden dolayı, karayolu köprüleri “Yaşam çizgisi düzenekleri” olarak adlandırılabilir [4].

Hizmet edeceği unsurlar, taşıyacağı yük türü ve yükün büyüklüğüne göre köprülerin üst yapı tipi belirlenir. Bunun yanı sıra, köprü üst yapısı tipinin seçiminde diğer bazı kriterler de vardır. Bunların başlıcaları; köprünün kullanım amacı, köprünün yapılabilişliği ve yapım hızı, yapım ve bakım maliyeti, kullanılacak malzemenin temin edilebilirliği, çevresel etkiler ve estetik unsurlar olarak sayılabilir.

1.1. Köprüler Hakkında Genel Bilgiler

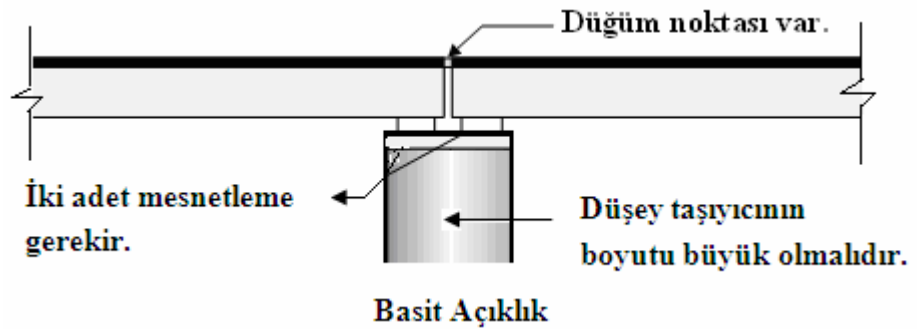
Köprüler; kullanım ve işlevlerine göre, statik sistemine göre, tasarım türüne göre, kullanılan malzemenin cinsine göre ya da yapısal formları ve döşeme tiplerine göre farklı birçok ölçüte göre sınıflandırılabilir [5].

Köprüler, kullanım ve işlevleri açısından; yaya köprüleri, karayolu köprüleri, demiryolu köprüleri ve su ya da tesisat köprüleri olmak üzere dört çeşittir.

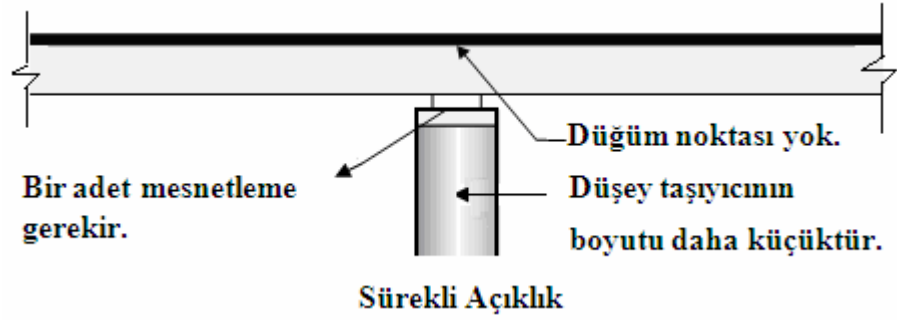
- Yaya Köprüleri: Sadece yayaların ulaşımına izin verilen, taşıt geçişi mümkün olmayan köprülerdir.
- Karayolu Köprüleri: Karayolu taşıtlarının ulaşımını sağlamak amacıyla gerekiyorsa yan taraflarında yaya kaldırımları tasarlanarak üzerinden yayaların da ulaşımının yapılabilirdiği köprülerdir.
- Demiryolu Köprüleri: Tren, hızlı tren, metro, tramvay, monoray gibi demiryolu taşıtlarının ulaşımında kullanılan köprülerdir.
- Tesisat ya da Su Köprüleri: Üzerinde elektrik enerjisi iletim kablolarını taşıyan borular, doğal gaz boruları, petrol boru hatları, su boruları gibi tesisatları ya da açık su kanallarını taşıyan köprülerdir.

Statik sistemine göre ise; basit mesnetli izostatik köprüler, çok açıklıklı sürekli kirişli hiperstatik köprüler ve çok açıklıklı izostatik gerber kirişli köprüler olmak üzere sınıflandırılır.

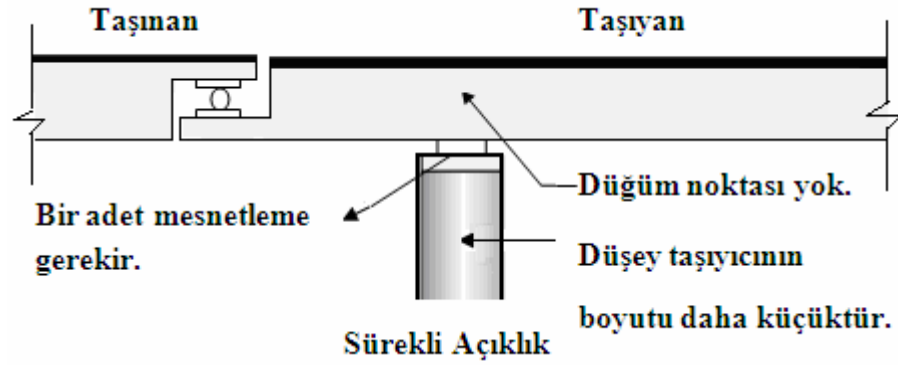
- Basit mesnetli izostatik köprüler: Tek açıklıklı veya çok açıklıklı olarak tasarlanabilen, her açıklıkta iki basit mesnet üzerine oturan ve her bir açıklığın farklı çalıştığı köprü türüdür.
- Çok açıklıklı sürekli kirişli hiperstatik köprüler: Çok açıklıklı olarak tasarlanan, tabliye döşemelerinin ya da kirişlerin ilk açıklığın başından ve son açıklığın sonuna kadar sürekli olarak devam ettiği köprü türüdür.
- Çok açıklıklı izostatik gerber kirişli köprüler: Çok açıklıklı olarak tasarlanan, tabliye döşemelerinin ya da kirişlerin belirli kurallara uyularak ara mafsallarla ayrılarak izostatik hale dönüştürülmüş köprülerdir.



Şekil 1.1. Çok Açıklıklı Basit Mesnetli Bir Köprüde Bir Orta Ayak Üzerindeki Mesnetlerin Düzenlenmesi.



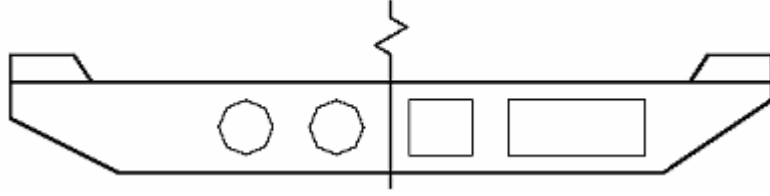
Şekil 1.2. Çok Açıklıklı Sürekli Kirişli Hiperstatik Bir Köprüde Orta Ayak Üzerindeki Mesnetlerin Düzenlenmesi.



Şekil 1.3. Çok Açıklıklı İzostatik Gerber Kirişli Bir Köprüde Orta Ayak Üzerindeki Mesnetlerin ve Ara Gerber Mafsalının Düzenlenmesi.

Açıklığın ne kadar olacağına karar vermede altyapı ve üstyapı maliyetlerinin arasındaki ekonomik denge büyük ölçüde etki eder. Özellikle 35 metreden büyük açıklıklar için üstyapının maliyeti altyapı maliyeti ile orantılı olarak artar. Bununla birlikte; betonarme yapılardaki fiyat dengesi, çelik yapılar için elbette aynı olmayacaktır. Tamamen betonarme bir tasarıma alternatif olarak kompozit bir tasarım düşünülüyorsa açıklıkların ne uzunlukta olacağı dikkatli bir şekilde gözden geçirilerek ele alınmalıdır [6].

Tasarım türüne göre ise köprüler yaklaşık dokuz farklı kategoride incelenebilir. Bunlar; kirişli köprüler, dolu gövdeli plak köprüler, boşluklu plak köprüler, kiriş ve plakların bir arada kullanıldığı karma sistemli köprüler, kutu kesitli kirişli köprüler, rijit çerçeveli köprüler, kafes kirişli izostatik ya da hiperstatik köprüler, kemer köprüler, kablolu taşıyıcı sistemli köprüler ve asma köprülerdir [1, 2, 5 ve 6]. Şekil 1.4’de boşluklu ya da kutu kesitli bir plak köprünün en kesiti verilmiştir [7].



Şekil 1.4. Boşluklu Plak ya da Kutu Kesitli Köprülerin En Kesiti.

Malzeme türüne göre ise; kargir, ahşap, beton, çelik, betonarme, öngerilmeli beton ve bunların bazılarının bir arada kullanılmasıyla yapılan kompozit malzemeli köprüler olmak üzere sınıflandırılır [1, 2, 5 ve 6].

Yapısal formları ve döşeme tiplerine göre de köprüleri sınıflayabilmek söz konusudur. Bu konuda ayrıntılı bilgilere çeşitli kaynaklardan ulaşılabilir [1, 2, 5 ve 6].

Köprü döşemesinin çözümü için uygulanacak analiz tekniğın seçimini üç ana parametre etkiler. Bunlar; yapım ve inşaat biçimi, plan geometrisi ve statik sistemi belirleyen mesnet koşullarıdır [2 ve 8].

Köprülerin; malzeme, yapım tekniğı ve döşeme türüne göre uygun (optimum) bir açıklık değerinin olduğunu belirten bazı çalışmalar yapılmıştır. Malzeme cinsine göre uygun açıklığı veren böyle bir çalışma Tablo 1.1’de verilmiştir [8]. Tablo 1.2’de ise farklı açıklıklar için köprü türünün seçimini veren diğerk bir çalışma görülebilir [7]. Tablolar karşılaştırıldığında, farklı köprü türleri için en uygun (optimum) açıklığın ne olması gerektiğine dair birliktelik sağlayan bir fikir olmadığı söylenebilir. Örneğın, Tablo 1.1’de betonarme bir plak köprü için açıklık üst sınırı 12 *m* iken, Tablo 1.2’de aynı tür köprü için bu üst sınır 20 *m* olarak verilmiştir.

Sözü edilen genel yaklaşımlar içerisinde, bu çalışmada ele alınacak köprü için; kullanım ve fonksiyon açısından bir karayolu köprüsü, açıklık ve mesnet koşullarına göre iki açıklıklı ve sürekli, en kesit tasarım türüne göre boşluklu plak, malzeme türüne göre öngerilmeli betondan ve plan geometrisine göre verev plak köprü olacak şekilde bir seçim yapılmıştır.

Tablo 1.1. Farklı Üst Yapı Türleri için Uygun Açıklıklar.

Yapım Türü	Malzeme	Açıklık Aralıkları
Plak	Betonarme	12 <i>m</i> 'ye kadar
Plak-Kiriş	Betonarme kiriş	12-215 <i>m</i> arası
	Çelik kiriş	30-260 <i>m</i> arası
Kablolu	Betonarme	244 <i>m</i> 'ye kadar
	Çelik	91-335 <i>m</i> arası
Kafes	Çelik	91-550 <i>m</i> arası
Kemer	Betonarme	91-305 <i>m</i> .arası
	Çelik kafes	244-518 <i>m</i> arası
	Çelik kiriş	122-366 <i>m</i> arası
Asma	Çelik	305-1372 <i>m</i> arası
Kutu kirişli	Betonarme	30-215 <i>m</i> arası
	Çelik	45-244 <i>m</i> arası

Tablo 1.2. Farklı Açıklıklar için Köprü Türünün Seçimi.

Açıklık	Döşeme Türü
20 <i>m</i> 'ye kadar	Yerinde dökme betonarme
	Öngerilmeli yerinde dökme ard germeli
	Öngerilmeli ön germeli yerinde dökme T kirişli
16-30 <i>m</i> arası	Yerinde dökme betonarme boşluklu plak
	Öngerilmeli yerinde dökme ard germeli boşluklu plak
	Öngerilmeli ön germeli yerinde dökme M ve I kirişli
	Öngerilmeli ön germeli yerinde dökme kutu kirişli
	Yerinde dökme plak ile öngerilmeli ard germeli kirişli
	Yerinde dökme plak ile çelik kirişli
30-40 <i>m</i> arası	Yerinde dökme plak ile öngerilmeli ön germeli SY kirişli
	Yerinde dökme plak ile öngerilmeli ön germeli kutu kirişli
	Yerinde dökme plak ile öngerilmeli ard germeli kirişli
30-250 <i>m</i> arası	Kutu kirişli
	Kafes
150-350 <i>m</i> arası	Kablolu
350 <i>m</i> 'den büyük	Asma

Verev plak köprü yapımı, kent içi trafik geçişlerinde özellikle civardaki yapılaşma nedeniyle oldukça zorunlu hale gelen bir durum oluşturmaktadır. Kısa açıklıkların geçilmesinde kirişli köprülerin yanı sıra plak köprülerin de kullanımı uygun olmuştur. Zamanla kısa açıklıklar için plak köprüler kirişli köprülerin yerini almıştır. Plak köprülerin başlıca dezavantajı yüksek ölü yük değeridir. Ancak bazı boyutlarla, plak kalınlığında uygun boşluklar bırakılarak ölü yük etkisi azaltılabilir. Boşluklu plak tipi

olan bu yapılar, ölü yük etkisini azalttığı için tasarım için kullanışlı bir çözümdür. Ancak zorunlu durumlarda kullanılabilen bir üst yapı geometrisinin, yani verevliğin, kullanışlı bir plak tipiyle birlikte düşünülmesi, ilgi çekici bir konu ortaya çıkarmıştır.

1.2. Tezin Amacı, Yöntemi ve Düzeni

Bu tez çalışmasında iki açıklıklı, sürekli, öngerilmeli betondan boşluklu verev plak köprülerin “Izgara Analojisi Metodu” ile analizi, “Sonlu Elemanlar Metodu” ile analizi ve ele alınan model köprüye ait eğilme momenti değerlerinin analizinin “Yapay Sinir Ağları (YSA)” uygulamasının yapılması amaçlanmıştır.

Çalışma, yöntem olarak teorik ve bilgisayar benzetimi şeklinde planlanmıştır. Konu ile ilgili kaynakça araştırması detaylı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Öncelikle köprüler ile ilgili genel bilgilerin yanı sıra analize konu olan köprü çeşidi hakkında teorik bilgiler verilerek çözüm için gerekli alt yapının oluşturulması hedeflenmiştir. Bilgisayar benzetimi için ise üç farklı yöntem kullanılmıştır. Önce Microstran bilgisayar yazılımı ile Izgara Analojisi Metoduna göre belirli sayıda köprünün analizi gerçekleştirilmiş ve sonuç eğilme momenti değerleri elde edilmiştir. Sonra aynı geometrik değerlerdeki köprüler için Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) tabanlı SAP2000 yazılımı ile analiz yapılarak model köprüye ait sonuç tasarım eğilme momentleri elde edilmiştir. Bu çalışma kapsamında hedeflenen “Öngerilmeli Betondan Boşluklu Verev Plak Köprülerin Yapay Sinir Ağları ile Analizi” için gerekli olan çok sayıdaki eğitime ve test verileri de bu yazılım ile elde edilmiştir. Izgara Analojisi ve Sonlu Elemanlar tabanlı SAP2000 yazılımı gibi iki farklı analiz yapılarak modellemenin doğruluk derecesini belirlenmesi hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçların uyumlu olduğu saptanmıştır. Bu yazılım sayesinde hızlı ve güvenilir sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu yazılım ile farklı geometrik özelliklere sahip çok sayıda köprünün analizi yapılmış ve sonuç eğilme momentleri elde edilmiştir.

Daha sonra model köprünün Yapay Sinir Ağları (YSA) uygulamasına geçilmiştir. Günümüzde birçok farklı probleme başarıyla uygulandığı kanıtlanmış olan üç farklı Yapay Sinir Ağları (YSA) yaklaşımından faydalanılarak, SEM ile bulunan sonuç eğilme momentleri modellenmiş ve bu çalışmada ele alınan problemin çözümü için en uygun YSA metodu belirlenmiştir.

Tezin düzeni řu sıralamayı izlemektedir.

Birinci bölümde; köprüler ve köprü türleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. Bu bölümde ayrıca çalışmanın amacı, yöntemi ve tezin düzeni anlatılmıştır.

İkinci bölümde; boşluklu verev plak köprüler ile ilgili teknik terimler, kabuller ve genel bilgiler verilerek yapılan önceki çalışmalar anlatılmış ve analiz yöntemleri üzerinde durulmuştur.

Üçüncü bölümde; Izgara Analojisi Metodu ile plak köprü analizi konusunda genel bilgiler verilmiştir. Belirli sayıda köprü modelinin bilgisayar yazılımı ile analizi gerçekleştirilerek sonuç eğilme momenti değerleri elde edilmiştir.

Dördüncü bölümde; sonlu elemanlar tabanlı SAP2000 bilgisayar yazılımı ile model köprüünün Sonlu Eleman analizi aşamalı olarak anlatılmış ve toplam 400 farklı köprü modeli için yapılan analizler sonucu her bir modelin sonuç eğilme momenti değerleri elde edilmiştir.

Beşinci bölümde; boşluklu verev plak köprülerin önerilmeli olarak tasarımına ilişkin genel bilgiler verilmiştir. Model köprü için önerilme hesabı ve donatı yerleştirilmesi ile ilgili ayrıntılı bilgiler sunulmuştur.

Altıncı bölümde; sistemin üç farklı Yapay Sinir Ağları (YSA) uygulamasının yapılabilirliği araştırılmış ve en uygun model belirlenerek problemin genelleştirilmesi amaçlanmıştır.

Yedinci bölümde ise bu çalışmanın sonuçları sunulmuş ve değerlendirmesi yapılmıştır.

Çalışma, kaynakça ve eklerin sunumu ile tamamlanmıştır.

Verev plak köprüler, günümüzde kent içi trafiğin geçişinde oldukça yaygın olarak kullanılmakta olduğu için güncel bir konudur ve analizin Yapay Sinir Ağları (YSA) uygulaması ile genelleştirilmesi proje yapımcılarına kolaylıklar sağlayabileceği için oldukça önemlidir.

Yapay Sinir Ağları (YSA), karmaşık mühendislik problemlerin çözümünde uygulanması nedeniyle son yıllarda mühendislik alanında yapılan araştırmalarda oldukça olan önemli bir yer tutmuştur. Boşluklu verev plak köprülerin analizinde YSA uygulaması çalışmaya alışılmış çözümlerin yanında özgün bir kimlik de kazandırabileceği düşünülebilir.

Literatürde “Öngerilmeli Betondan Boşluklu Verev Plak Köprülerin Yapay Sinir Ağları ile Analizi” konusunda herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Çalışmada yöntem olarak analitik yöntemler ile bilgisayar modellemesi ve simülasyonu yapılmıştır. Deneysel çalışma araştırmanın kapsamı dışında tutulduğu için yapılmamıştır.

2. BÖLÜM

BOŞLUKLU VEREV PLAK KÖPRÜLER

2.1. Tanımlar ve Kabuller

Bernoulli-Navier Hipotezi: Dış kuvvet etkisindeki bir çubuğun, şekil değiştirdiğinde çubuk malzemesinin elastisite sınırı aşılmadığı sürece, şekil değiştirmeden önce çubuk eksenine dik olan kesitlerin, şekil değiştirdikten sonra da çubuk ekseninin yeni konumuna dik ve eski boyutunda kaldığı varsayımına dayanan hipotezdir [9].

Birim Boy Değişimi (ϵ): Birim boyda meydana gelen uzama veya kısalma miktarıdır.

Deformasyon: Eksenel yer değiştirme, kesme yer değiştirmesi ve dönmeler de dâhil olmak üzere, kuvvetlerin etkisinden dolayı statik sistem geometrisinde meydana gelen değişikliklerdir.

Eğilme Momenti (M): Herhangi bir elemanın herhangi bir en kesitine atalet merkezinin dışında etkiyen bir kuvvet varsa, kuvvetin o cismin en kesitinde oluşturduğu çekme ve basınç etkilerinin tüm kesit boyunca ifadesidir.

Elastisite Modülü (E): Cisimlerin gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisini veren eğrinin gerilmeler ile şekil değiştirmelerin doğru orantılı olduğu bölgedeki kısmının eğimi, bir başka deyişle tanjantıdır. Çeliğin elastisite modülü (E_s) sabit iken betonun elastisite modülü (E_c) bir betondan diğerine büyük değişiklik gösterebilir [9].

İzotrop Plak: Fiziksel özellikleri yönlere ve doğrultulara bağlı olmayan, bir başka deyişle herhangi bir yönde ve doğrultuda aynı fiziksel özelliklere sahip olan plaktır.

Kirchoff-Love Hipotezi: Bir plağın orta düzlemine dik bir doğru üzerinde bulunan noktaların şekil değiştirmeden sonra da şekil değiştirmiş plağın orta düzlemine dik

kaldığı, bu nedenle plak düzlemindeki kuvvetlerin etkisi altında plak orta düzleminde (tarafsız düzlemde) deformasyon meydana gelmediği varsayımına dayanan hipotezdir.

Kompozit (Karma) Malzeme: Birbirinden farklı ve birbirine karışmayan, istenilen amaç için tek başına uygun olmayan iki ya da daha fazla katı malzemenin bir araya getirilmesi ile meydana gelen katı malzemedir.

Ortotrop Plak: Birbirine dik yönde, iki ya da daha çok doğrultuda farklı fiziksel özelliklere sahip olan plaktır.

Rijitlik: Bir bileşenin birim boyuna karşılık gelen birim deformasyon tarafından sebep olunan kuvvet etkisidir.

Saint Venant İlkesi: Bir cismin küçük bir bölgesine etki eden kuvvet yerine statikçe eş değer bir kuvvet sistemi konursa bu durumun, değişikliğin yapıldığı bölgelerden uzak noktaların deformasyonunda çok küçük bir farka neden olduğu varsayımına dayanan hipotezdir.

Sehim (δ): Plak düzleminde oluşan çökmedir.

Torsiyon (T): Yapılarda meydana gelen burulma etkisidir. Betonarme yapılarda, sistemin monolitik (tekdüze) olma karakterinden dolayı ortaya çıkar [9].

Torsiyon (Burulma) Momenti (M_T): Bir çubukta burulma meydana getiren kuvvet çiftidir.

Verevlik Açısı (θ): Bir mesnetin simetri eksenine ile yol simetri eksenine dik çizgi arasındaki açıdır.

Bu çalışmada aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- Plak kalınlığının orta noktalarının geometrik yerleri bir düzlem oluşturur ve plak geometrisi başlangıçta düz konumdadır.
- Plak kalınlığı, diğer boyutların yanında çok küçüktür.
- Plak üzerine gelen yükler plak orta düzlemine diktir.
- Sehimlerin yani plak düzleminde oluşacak olan çökmelerin plak kalınlığının yanında çok küçük kaldığı kabul edilmektedir.

- Malzeme; homojen, izotrop ve Hook yasasına uyan lineer-elastik bir malzemedir.
- Birinci mertebe teorisi ve süperpozisyon ilkesi geçerlidir.
- Saint Venant ilkesi geçerlidir. Buna göre ele alınan modelde statik değişiklikler dar bir bölge içerisinde kalmaktadır.
- Navier hipotezi geçerlidir. Düzlem kesitlerin, deformasyondan sonra da düzlem kalmaya devam edeceği ve elastik eğriye dikliğini koruduğu kabul edilecektir.
- Kirchhoff – Love Hipotezi geçerlidir. Buna göre Plak orta düzlemine dik bir doğru üzerinde bulunan noktalar şekil değiştirmeden sonra da deforme olmuş şeklin orta düzlemine dik kaldığı kabul edilir.
- Poisson oranı dikkate alınmıştır. Beton, betonarme ve öngerilmeli beton için $\mu = 0.20$ alınacaktır.
- Plak orta düzlemine (tarafsız eksenine) dik doğrultudaki σ_z normal gerilmeleri σ_x ve σ_y gerilmeleri yanında yok denebilecek kadar küçüktür. Bu sebeple $\sigma_z \approx 0$ alınabilir.
- Yukarıdaki varsayım gereğince $\varepsilon_z \approx 0$ alınabilir. Elastisite teorisine göre:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \times [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \text{ 'dir.}$$

Ayrıca $\sigma_z \approx 0$ ve $\mu \approx 0.20$ olduğundan $\varepsilon_z \approx 0$ alınabilir.

- Plak düzlemindeki kuvvetlerin etkisi altında plak orta düzleminde (tarafsız ekseninde) deformasyon olamadığı kabul edilir. Yani birim boy ve açı değişimleri yaklaşık sıfır kabul edilir [1, 2, 5 ve 10].

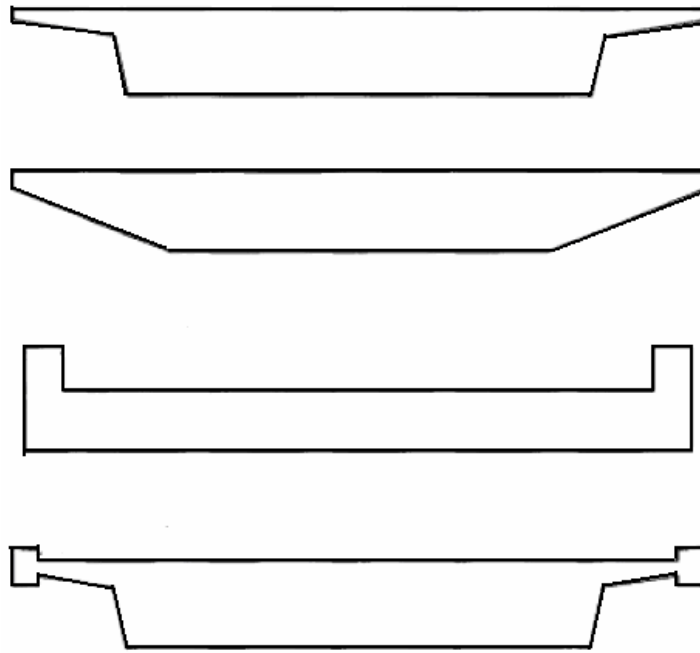
Bu çalışmada ele alınan verev plak köprüünün en kesitinde dört adet 0.65 m çapında simetrik dairesel boşlukların olduğu kabul edilecektir.

2.2. Boşluklu Verev Plak Köprüler Hakkında Genel Bilgiler

Plak döşemeler; üst yapısı sadece yük taşıyıcı plak elemandan oluşan, yüklerin plaklardan doğrudan mesnetlere aktarıldığı döşemelerdir. Özellikle kısa açıklıkların geçilmesinde kirişli köprülerin yanında plak köprülerin kullanımı zamanla artmış, betonarme ya da öngerilmeli betonarme olarak tasarlanabilen plak köprüler kirişli köprülerin yerini almıştır [11].

Betonarme plakların davranışını belirlemek için kullanılan ana parametreler; beton dayanımı (f_c'), betonun elastisite modülü (E_c), donatının dayanımı (f_y), agrega, çimento, çimento/su oranı gibi betonun kalitesini belirleyen etkenler ve çevresel koşullardır [12].

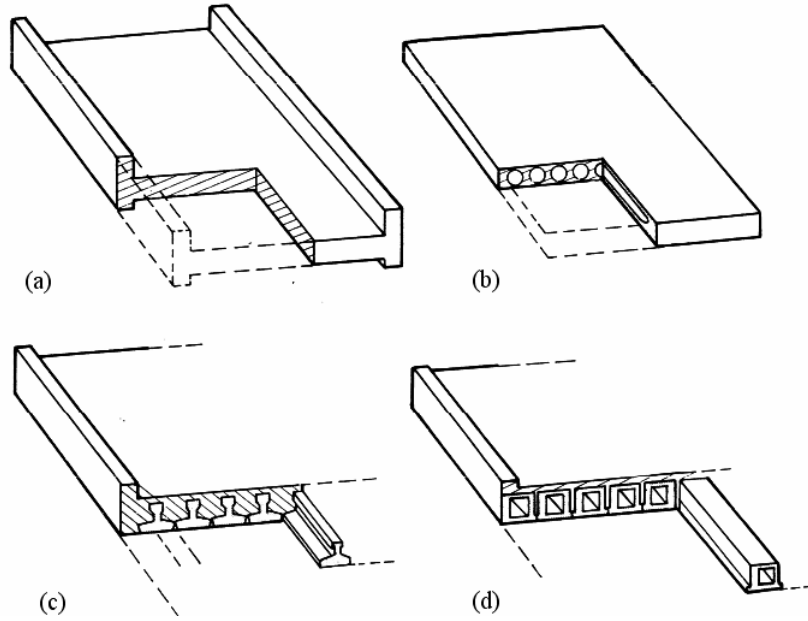
Plak köprüler; plak derinliğine, derinliğin sürekliliğine, plak genişliğine, başlık boyutlarına ve dikkate alınacak tretuvar genişliğine bağlı olarak farklı en kesitlerde tasarlanabilir. Şekil 2.1’de yaygın olarak kullanılan en kesit tipleri verilmiştir [13].



Şekil 2.1. Döşeme Plaklarının Tipik En Kesitleri.

Bunların dışında plak köprü en kesitleri dolu gövdeli, boşluklu, hücreli boşluklu vb olarak da tasarlanabilir [10].

Şekil 2.2a’daki gibi bir döşeme plağı, boyuna ve enine doğrultularda benzer rijitliklere sahip olabilir. Bu durumda plak, izotropik plak olarak adlandırılır. Şekil 2.2b’deki gibi bir döşeme plağı ise, iki farklı doğrultuda farklı rijitlik özelliklerine sahiptir. Bu tür bir plak da ortotropik plak olarak adlandırılır [10].



Şekil 2.2. Çeşitli Döşeme Plakları.

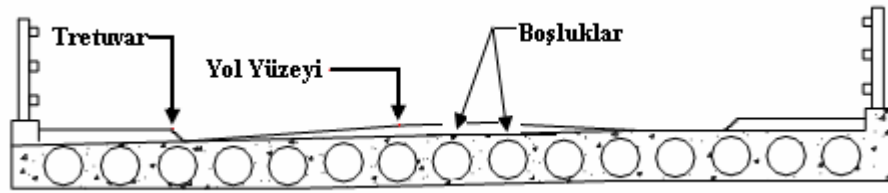
- (a) Dolu gövdeli, (b) Boşluklu,
(c) Kompozit dolu gövdeli,
(d) Kompozit Boşluklu.

Plak köprülerin optimum açıklıkları için farklı kaynaklarda farklı bilgiler mevcuttur. Genel olarak; tek açıklıklı, boşluklu veya dolu gövdeli betonarme plak köprüler için açıklık/derinlik oranı 12 ile 15 arasında seçilebilir. Eğer köprü çok açıklıklı ve sürekli ise, açıklık/derinlik oranı, 20 ile 25 arasında seçilebilir [14].

10 m'ye kadar olan açıklıklarda sabit derinlikli dolu gövdeli betonarme plak köprüler kullanılır [15 ve 16]. Dolu gövdeli plak köprülerde, açıklık arttıkça plak derinliği ve doğal olarak plak ölü ağırlığı da önemli derecede artmaktadır. Bu da köprü tasarımında istenmeyen bir durumdur. Köprü yapımında, uzun açıklıklar ve benzer şekilde daha kalın döşemeler geçilmesi gerektiğinde, döşeme içerisinde üst yapının ağırlığını azaltmak için boşluklar bırakılabilir. Böylece plağın ölü ağırlığı azaltılarak tasarım için büyük avantaj sağlanmış olur. 10-20 m açıklığa sahip boşluklu betonarme plaklarda 1.2 m derinlik uygundur. 15-30 m arası açıklıklı boşluklu önerilmeli plaklarda derinlik 1.5 m'ye kadar tasarlanabilir. Boşluklar açıklık boyunca yapılabildiği gibi, sadece açıklık ortası boyunca da yapılabilir [15 ve 16].

Öngerilmeli betondan yerinde dökme boşluklu plak köprülerin açıklık/derinlik oranı, yaklaşık 30 olarak seçilebilir. Öngerilmeli betondan prefabrike boşluklu plak köprülerin uzunluk/derinlik oranı, 25 ile 30 arasında seçilebilir [10 ve 17].

Boşluklu plak köprülerin tasarımının en büyük amacı, plağın eğilme dayanımına bir faydası olmayan ana eksen etrafındaki gereksiz malzemeyi çıkarmaktır. Özellikle, 15 m'den büyük açıklıklar için köprü ölü ağırlığının çok fazla olacağı aşikârdır. Ağırlığı azaltmak için, ana eksene yakın ve tarafsız eksene göre simetrik olan dairesel veya dikdörtgen boşluklar tasarlanabilir. Yapım sırasında, bu boşlukları bırakmak için ise polyester şekillendirici, parafinli karton rulolar vb birçok geçerli araç-gereç uygulanabilir [18]. Uygulamada en çok başvurulan yöntem ise, boşlukların genellikle ısı geçirmeyen bir tür plastik olan *polystyrene* malzemeden imal edilen, beton dökülmeden önce boşluk olacak kısımların kalıp şeklinde yerleştirilmesi ile tasarlanması şeklindedir.



Şekil 2.3. Boşluklu Bir Köprü Plağının En Kesiti [19].

Öngerilmeli prefabrike kirişli köprüler de köprü yapımında genellikle kullanılan türlerdir, ancak zorunlu geometrik ve rijitlik gereksinimlerinden dolayı bu tür köprüler birçok kent içi köprü yapımında köprü altında kalan gabariyi kısıtladığı için pek uygun olmamaktadır. Boşluklu veya kutu kesitli kesitler ise bu çevre için oldukça uygundur çünkü kapalı kesit, estetik olarak hoş görünmesinin yanında yüksek torsiyonel rijitliği nedeniyle uygun stabilite ve mükemmel yük dağılımı sağlamaktadır [20].

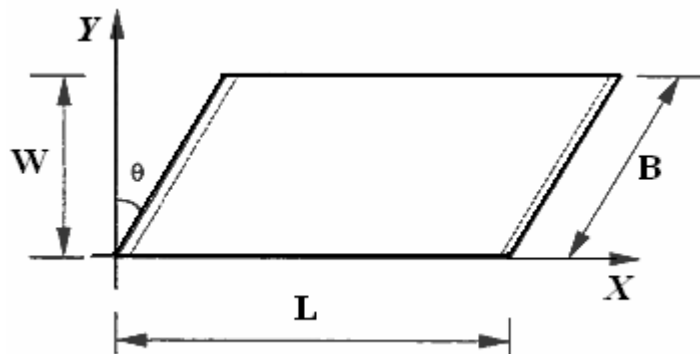
Boşluklu plak köprülerin boşluk boyutları ile ilgili olarak farklı standartlarda farklı tanımlar mevcuttur. Örneğin, BS 5400'de, boşluk boyutları şöyle tanımlanmıştır [21]. Dairesel boşluklar için boşluk çapının toplam plak kalınlığına oranı, en fazla 0.75 olabilir. Dikdörtgensel boşluklar için ise boşluk derinliğinin toplam plak kalınlığına oranı en fazla 0.67 olabilir. Bu değerler aşılsa, köprü plağı boşluklu plaktan ziyade

hücresel plak gibi davranacaktır. Eğer boşluğun derinliği ve genişliği, bütün yapının derinliğinin %60'ından küçükse, boşlukların rijitlik üzerindeki etkisi ihmal edilebilir ve plak, efektif bir plak gibi davranır [21]. Boşluk çapı, plak kalınlığının %60'ından az ise boşluklu plağı, dolu gövdeli plakta kullanılan metotlarla modellemek genel bir ilkedir. Boşluk çapı, plak kalınlığının %60'ından fazla ise plak davranışı hücresel kabul edilir. Bu çalışmada, boşluklu plak ile ilgili olarak genellikle, Ontario Highway Bridge Design Code (OHBDC) şartnamesinin tanımlamaları üzerinde durulmuştur [22].

Verev köprüler basit olarak; boyuna aksı mesnetle bir dar açı yapan köprülerdir. Yani, trafik akış doğrultusu ile mesnet eksenleri arasında geçerli bir verevlik açısı olan köprülerdir. Bu tür bir yapının ortaya çıkması; doğal veya insan yapımı engeller, karışık kesişimler, boşluk limitleri veya engebeli araziler sonucu olmuştur. Yani verev köprüler, doğa olaylarından dolayı düz ya da dik, bir başka deyişle verev olmayan köprü yapımına müsait olmayan durumlarda tercih edilebilir. Verev köprüler, tek açıklıklı veya çok açıklıklı olarak inşa edilebilir.

Tipik bir verev köprü şu unsurlardan oluşur.

- Kamyon yüklerini köprü genişliği üzerine dağıtan ve enine doğrultudaki esnek desteklerin üzerindeki sürekli kirişler gibi davranan bir betonarme döşeme,
- Boyuna doğrultuda, trafik akış yönünde, tüm yükleri mesnetlere ve destek çerçevelerine taşıyan öngerilmeli I kirişler.



Şekil 2.4. Verev Bir Plak.

Büyük verevliğe sahip köprüler, tasarım şartnameleri tarafından düzensiz köprüler olarak tanımlanmıştır. Verev köprüler, yalnızca boyuna doğrultularında değil aynı

zamanda enine doğrultularında da genişleyip büzülebilirler [23]. Sismik etkinlik sırasında oturma bozulmasını önlemek amacıyla döşeme deplasmanlarının kontrol edilmesi, özellikle verev köprüler için, çok önemlidir. Verev köprülerin, deprem sırasında oturma bozulmasından dolayı oluşan hasarlara maruz kalma ihtimali, düz köprülere göre daha yüksektir [24].

Amerikan Demiryolu Mühendisliği ve Bakım Kurumu (AREMA)'nın köprü mühendisliği el kitabına göre verev beton köprülerden mümkünse kaçınılması tavsiye edilmiştir [24]. Elbette, Şekil 2.5'de verilen fotoğrafta görüldüğü gibi bir kaçınmadan da söz edilmesi mümkün değildir. Şekil 2.5, verev köprülerin gerekliliği ile ilgili geçerli bir sebep sunmaktadır.



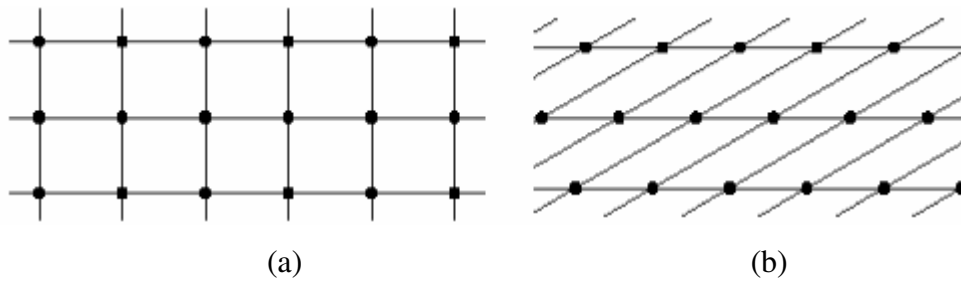
Şekil 2.5. Verev Köprü Yerine Düz Köprü Yapımı
Uygun Görülen Bir Demiryolu Güzergahı.

Verev köprüler şu şekilde sınıflandırılabilir;

- Standart Verev Köprü; trafik akış doğrultusu ile her iki mesnet eksenindeki açı aynı olan köprülerdir.
- Kısmi Verev Köprü; trafik akış doğrultusu ile mesnetlerinin birinin ekseninde normal açı olan, buna karşın trafik akış doğrultusu ile diğer mesnetin ekseninde farklı bir açıya sahip olan köprülerdir.

- Trapez Verv Köprü; trafik akış doğrultusu ile her iki mesnet eksenindeki arasındaki açılar birbirinden farklı olan köprülerdir.

Verv köprülerin vervlik açısı, köprü analizi için önemli bir parametredir. OHBDC'ye göre bir verv köprü, eğer vervlik açısı 20° 'den küçük ise basitleştirilmiş metotlar kullanılarak düz bir köprü gibi tasarlanabilir. Vervlik açısı 20° 'den büyük ise vervlik etkisi dikkate alınarak değiştirilmiş metotlar kullanılmalıdır [23].



Şekil 2.6. Döşeme Elemanlarının Plan Geometrisi [24]

(a) Düz Köprü'nün Döşeme Planı,

(b) Verv Köprü'nün (60°) Döşeme Planı.

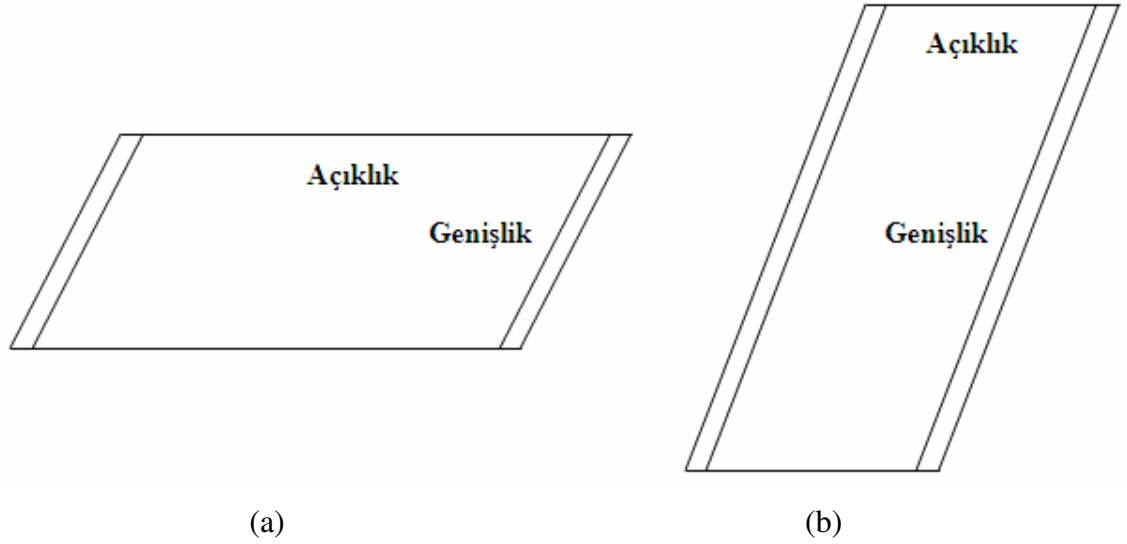
Köprü döşemelerindeki dikkate değer vervlik, mesnetler arasındaki reaksiyonların düzensiz dağılımına neden olur. Verv döşemelerdeki en büyük reaksiyonlar, geniş açılı köşelerde olma eğilimindedir ve en küçük reaksiyonlar keskin köşelerde meydana gelme eğilimindedir. Geniş açılı köşelerdeki büyük reaksiyonlar, tasarımı zorlaştırabilecek büyük kesme kuvvetlerine neden olur. Aynı zamanda, büyük torsiyonel momentlerle (M_{xy}) birlikte bulunan yüksek dereceli bir burulma (twisting), verv döşemelerle ilişkilendirilebilir [13].

Verv karayolu köprülerinin modellenmesi, normal veya düz köprülere göre daha karmaşıktır. Çünkü dinamik tepki, ötelenme (translasyonel) ve dönme (rotasyonel) hareketleri arasında bağlantı gerektirir [4, 10, 15 ve 16].

Farklı olarak şekillendirilmiş tabliyelerinden dolayı, verv köprüler deprem etkisine maruz kaldığında hem yanal hem de torsiyonel hareketlere maruz kalır. Bunun sonucu olarak da verv bir köprü'nün elemanlarının maruz kaldığı kuvvetler ve deformasyonlar, düz veya düzenli köprü elemanlarına göre daha farklı olmaktadır [4].

Verev köprüler, uzun yıllar yaklaşık yöntemler kullanılarak tasarlanmıştır. Bu metotların çoğu, verev yapı içerisindeki yüksek torsiyon (burulma) momentlerini hesaba katmaz. Daha kesin analiz metotları ise zaman alıcıdır [25].

Büyük verevlikler için en önemli faktör, açıklık/genişlik oranıdır.



Şekil 2.7. Verev Plaklarda Açıklık/Genişlik Oranları.

Şekil 2.7(a)'da; açıklık/genişlik oranı büyüktür. Açıklığın ortasında moment trajektuarları (yörüngeleri) ve asal momentler serbest kenarlara paralel ve dik bulunduğundan, verev açıklık ve dik genişlik esasına dayanan bir analiz yeterlidir [1].

Şekil 2.7(b)'de; açıklık/genişlik oranı küçüktür. Köprü, mesnetlere dik doğrultuda çalışmak eğilimindedir ve dolayısıyla köprünün ortasında, asal momentler yaklaşık olarak mesnet çizgisine paralel ve dik doğrultuda yer alacaktır. Bu durumda (a)'daki gibi bir analiz, moment dağılımını yeterli hassasiyette veremez [1].

Verevlik etkisinin varlığı birçok köprü detayının geometrisini etkiler, ayrıca kesme kuvvetleri ve momentler üzerinde etkileri vardır. Daha büyük verevlik açılarının aynı zamanda hareketli yük dağılımı üzerinde de bazı etkileri vardır [26]. Verev bir köprünün sismik yüklere karşı yapısal tepkisi, alt yapının verevlik açısı tarafından kayda değer bir şekilde değiştirilebilir.

Verev köprülerin, boyuna doğrultuları boyunca simetrik olmayan geometrisinden dolayı birçok dezavantajı vardır. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)'a göre, verev köprülerin deprem yükleri altında mesnetlerinde büyük yer değiştirmeler olabilir. Bu büyük yer değiştirmelere, alt yapının rijitliğinin merkezi boyunca üst yapının dönmesi sebep olur. Bu yüzden, verev açıklıkların, düz açıklıklara göre, maruz kaldıkları deprem yüklerinin sebep olduğu çökmelerden dolayı hasar almaları için yüksek oranda eğilimleri vardır [24].

Karayolu köprülerinin maruz kaldığı birçok doğal felaket arasında, özellikle depremler yıkıcı olmuştur. Bu durum, maalesef ülkemizde ve dünyada meydana gelen depremlerle kanıtlanmıştır. Amerika Birleşik Devletleri'nde 1994 yılında meydana gelen Northridge depremi sonucu bölgedeki hasar gören verev köprüler Tablo 2.1'de verilmiştir.

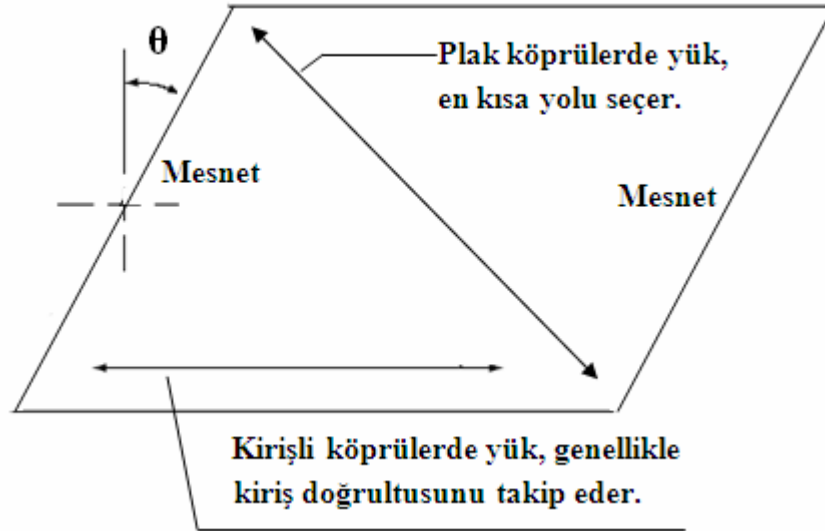
Tablo 2.1. Northridge Depremi (1994) Sonucu Hasar Gören Köprüler ve Hasar Nedenleri [4].

Köprü Adı	Yapım Tarihi	Ana Hasar Nedeni
La Cienega-Venice UC	1964	Kolon çökmesi
Gavin Canyon UC	1967	Mesnet oturması
Route 14/5 Separation & OH	1971/1974	Kolon çökmesi
North Connector	1975	Kolon çökmesi
Mission-Gothic UC	1976	Kolon çökmesi
Fairfax-Washington UC	1964	Kolon çökmesi
Bull Creek Canyon Channel Bridge	1976	Kolon çökmesi

Tablo 2.1'den görüleceği üzere, verev köprüler depremlere karşı dayanıklı değildir. Maalesef, bu duruma karşın mevcut AASHTO yönetmeliği, bu tür köprülerin tasarımı için kesin ve açık gereksinimleri içermemektedir [4].

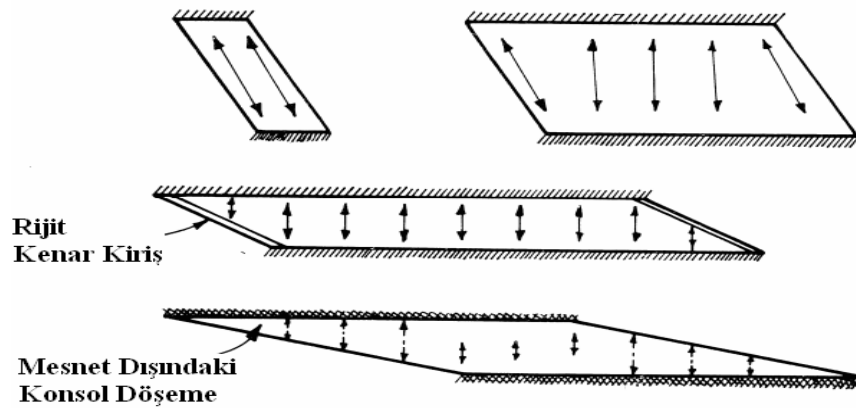
Kirişli köprülerde yük, destekleyici kirişlerin uzunluğu boyunca akma eğilimi gösterir ve verevliğin eğilme momenti üzerindeki etkisi minimize edilir. Boşluklu plak köprülerde ve diğer yüksek torsiyonel rijitliğe sahip köprülerde yük, açıklığın geniş açılı kenarları arasında kısa yol oluşturarak hareket etme eğilimi gösterir. Bu davranış, boyuna doğrultudaki eğilme momentlerini azaltır fakat geniş açılı kenarlardaki kesme

kuvvetini artırır. Aynı etki kirişli köprülerde de oluşur ancak bu etkinin daha azından söz edilebilir [27].



Şekil 2.8. Verve Açıklıkta Yük Dağılımı.

Verve köprü yapımında; tabliye dökümü sırasında verveğin yük dağılımı üzerine etkisi, eğilme momentleri ve yanal güçlendirme elemanları tarafından taşınan yükler konusu üzerine uzun süre çalışmalar yapılmıştır ve halen bu konuda çalışmalar devam etmektedir. Her bir çalışma, farklı tip verve köprülerin görünüşü ile ilgili etütleri içermektedir. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar, verve köprülerin ardındaki sır perdesinin aralanmasına yardımcı olmuştur [27].

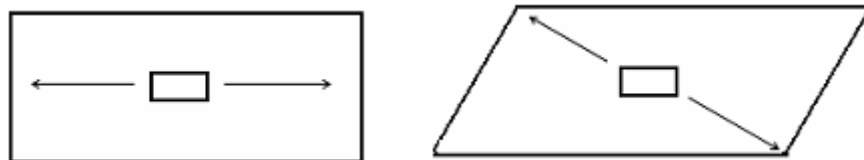


Şekil 2.9. Verve Döşeme Plaklarındaki Ana Moment Doğrultuları [28].

Geçmişte verev köprüler, düz köprüler gibi tasarlanmış ve alışılmış düzlem metoduna göre analiz edilmiştir. Aggour (1979), verevliğin gerçek etkileri üzerine çalışmak için sabit açıklıklı ve değişken verevliğe sahip dört adet basit mesnetli iki kirişli demiryolu köprüsünü dikkate alarak bazı çalışmalar yapmıştır [29]. Karşılaştırılan değişken verevlik açıları (63.4°) , (56.6°) , (45°) ve (26.6°) 'dir. Karşılaştırma kistası olarak kirişlerdeki maksimum eğilme momenti değerleri, güçlendirme elemanlarının kuvvetleri, köşe bölge reaksiyonları, alışılmış düzlem metoduna göre elde edilmiştir. Seçilen değerlerin değerlendirilmesinde ekonomik ve güvenilir tasarımlar için verev köprüler boşluklu yapılar gibi değerlendirilmelidir sonucu ortaya çıkabilir [27].

Toprak basıncı, mesnetlere dik yönde etki eder. Verev köprüler için her iki mesnet üzerindeki toprak basıncı kuvvetleri, planda köprünün twist (bükülme) yapmasına neden olan bir tork (dönme momenti) üretir. Verevlik açısını kısıtlamak bu etkiyi azaltır. Sürekli ve verev olan köprüler için twisting torku, orta mesnetlere etki eden ek kuvvetlere neden olur. Ek olarak, keskin verevliklerin, dönmelerden ve sıcaklık değişimlerinden dolayı bazı mesnet duvarlarında çatlamaya neden olduğu düşünülmektedir. Bu çatlama, verevlik kısıtlanarak azaltılabilir veya yok edilebilir. Verevliği kısıtlamak aynı zamanda tasarım belirsizliklerini, dolgu kompaksiyon zorluklarını, ek tasarım ve detayları azaltacak veya yok edecektir. Söylenilecek geçerli şey şudur ki; bileşik mesnetlere sahip köprüler için verevlik derecesi üzerine evrensel olarak kabul edilebilir limitler yoktur [25].

Köprünün geometrik biçiminin, köprü üzerindeki hareketli yüklerin dağılımı üzerinde etkili olduğu bir gerçektir. AASHTO LRFD (1998) köprü tasarım şartnamelerinde de verevlik açısı, hareketli yük dağıtım faktörleri için bir parametre olarak girilmiştir [37].



Şekil 2.10. Düz ve Verev Köprüler İçin Hareketli Yük Dağılımı.

Barr, birkaç faktörün dağıtım faktörleri üzerindeki etkileri konusunda çalışmıştır ve 20°'lik bir verevlik açısı için, verevliğin dağıtım faktörleri üzerinde küçük bir etkisi olduğu sonucuna varmıştır [20]. Verevlik açısı arttıkça bu faktörler azalmıştır. Analiz edilen tüm köprü modelleri için AASHTO LRFD (1998) sade sonuçlar vermiştir. Artan verevlik açısı ile dağıtım faktörlerinin azalması, AASHTO LRFD (1998) tarafından mantıklı bir yaklaşım olarak gözlemlenmiştir [24].

2.3. Boşluklu ve Verev Plak Köprülerin Analizine İlişkin Önceki Çalışmalar

Plaklar için elastisite teorisi Navier (1785-1836), G. R. Kirchhoff (1824-1887) ve M. Levy (1838-1910) tarafından geliştirilmiştir. S. P. Timoschenko (1953) ve Woinowsky-Krieger (1959) de bu konuda çalışmalar yapmıştır [30].

Newmark et al (1948), beş adet çeyrek ölçekli, basit mesnetli, verev plak ve kirişli köprü modellerini test etmiştir. Bu çalışma kapsam olarak sınırlı olmasına rağmen bazı tasarım önerileri sunmuştur [31].

Massonet (1950) ile Cusens ve Pama (1969), ortotropik plak teorisi ile ilgili olarak yaptıkları çalışmalarda; iki ortogonal doğrultuda farklı yapısal özellikler taşıyan sürekli ortama sahip bir yapı idealize etmiştir [15 ve 16]. Boşluklu plak köprülerde, yüklemenin köprü genişliğinin 2/3'ünü kaplaması durumunda ortotropik plak teorisi doğruluğu kabul edilebilir sonuçlar vermektedir [16].

Chen et al (1957), sonlu farklar metodu ile verev köprü analizi üzerine çalışmalar yapmıştır. Değişken rijitlik oranları için kirişler arasındaki aralıklar, açıklıkların uzunlukları, momentler ve dönmeler için etki katsayılarını hesaplamıştır. Verev köprüler için standart kamyon yüklerine dayandırılmış moment katsayıları bulmuş ve tasarım ilişkileri elde etmiştir [31].

Hendry ve Jaeger (1957), verev köprülerdeki yük dağılımını belirlemek için kendi metodları olan ızgara analizi metodunu kabul etmiştir. Izgara analizi metodunda döşeme ve kirişler, ızgara eleman olarak idealize edilmiştir. Döşeme ve kirişlerin özelliklerinin asıl yapıyı temsil edecek şekilde belirlenmesi gerektiği belirtilmiştir [31].

Gustafson (1966), verev-rijit plakların analizi için bir sonlu eleman matris metodu geliştirmiştir. Bu metod kullanılarak iki adet verev plak analiz edilmiştir [31].

Sawko ve Willcock (1967), değişken kesit özellikleri ve birkaç adet enleme içeren hücresel yapıları analiz etmek için, ortogonal olarak bağlanmış kirişleri birleştirerek ızgara idealizasyonunu kullanmıştır. Izgara analojisi sonuçları model sonuçları ile karşılaştırılmış ve birkaç adet enleme içeren hücresel yapıların enine hücre burulması hesaba katılmayarak ızgara analojisi yöntemi ile boşluklu plakların analiz edilebileceği ispatlanmıştır [15 ve 16].

Mehrain (1967), çeşitli verev kompozit plak ve kirişli köprülerin analizi için sonlu eleman bilgisayar programları geliştirmiş ve bunları test ederek sonuçları farklı olan sonlu eleman varsayımları ile birleştirmeye çalışmıştır [31].

Gustafson ve Wright (1968), verev plaklar ve eksantrik kiriş elemanları elde edilen bir sonlu eleman metodu sunmuştur. Çelik I kirişli iki adet tipik kompozit verev köprü analiz edilmiş, verevlik ve orta açıklığın etkilerinden kaynaklanan davranış gösterilmiştir. Verev plak elemanlar, malzeme sınırları içerisinde eğimin uyumluluk gereksinimlerini karşılayamamıştır. Araştırma, genel verev plak-kirişli yapılardaki yük dağılım analizini dikkate almamıştır [31].

Sikes (1968), karayolu köprülerinin geometrik çözümü üzerine çalışma yapmıştır. Çalışmada, Georgia Department of Transportation (Georgia DOT) tarafından hazırlanmış olan bir bilgisayar programı kullanılmıştır. Program, Basic Fortran IV programlama dili ile yazılmıştır ve karayolu köprülerinin tasarımı, detaylaması ve yapımı için gerekli geometrik gereksinimleri hesaplamaktadır. Verevlik açısı, program tarafından hesaplanmış ve çıkış verisi olarak gösterilmiştir.

Croce ve Beal (1973), hareketli yük dağıtım faktörlerini belirleyerek AASHTO tasarım değerleri ile karşılaştırmak amacıyla asimetrik iki açıklıklı, kompozit döşemeli ve kirişli bir çelik köprü üzerinde çalışmıştır. Köprü, 45° verevlik açısına sahip iki adet kirişten oluşmuştur ve mesnetler 16° verevlik açısına sahiptir. Bu deney, enine doğrultudaki elverişsiz hareketli yük yerleşiminin boyuna doğrultudaki gerilmenin büyüklüğünü ve dağılımını etkilediğini ortaya koymuştur. Çalışmadan çıkarılan ana sonuç ise, yükün her kirişe kısmen belirli bir oranda dağılımının verevlik açısından etkilenmediği

yönündedir. Maksimum momentin şiddeti, düz bir köprüye göre azalmıştır ve uzmanlar, tasarım amacı için %10'luk bir azalmayı doğrulamıştır [23].

Chen ve Penzien (1977), verev karayolu köprülerinin doğrusal olmayan zemin-yapı ilişkisinin etkisi üzerine araştırmalar yapmıştır [4].

Srinivasan ve Munaswamy (1978), hareketli yüklerden dolayı köprü davranışını belirlemek için sonlu şerit metodunu kullanarak verev köprü plaklarının dinamik davranışı üzerine çalışmalar yapmıştır [4].

Decastro et al (1979), öngerilmeli betondan basit mesnetli kiriş-plak sistemli köprüler için yük dağılım koşulları geliştirmiştir. Uzunlukları 10.4 m ile 39.0 m arasında, genişlikleri 7.3 m ile 21.9 m arasında değişen 120 adet I kirişli üst yapıyı analiz etmek için bir sonlu eleman yaklaşımı kullanmıştır. Verevlik düzeltme faktörlerinin iç kirişler için dağıtım faktörünü azalttığı ve dış kirişler için artırdığı sonucuna varılmıştır [31].

Kang ve Scordelis (1980), öngerilmeli betondan düzlem çerçevelerin doğrusal olmayan analizi için sonlu eleman formülasyonu temelinde nümerik bir ifade geliştirmiştir. Doğrusal olmayan analiz, artan yükleme ile yerine getirilmiştir ve bu nedenle, beton yapıların çökme davranışının öncesini ve sonrasını izlemek adına, değiştirme (modifikasyon) olmadan uygun değildir [32].

Bakht (1981), boşluklu plak köprülerin analizi için birçok metodu gözden geçirmiştir ve boşlukların boyutlarına dikkat etmeden, dolu gövdeli plakların çözümünde kullanılan teknikler kullanılarak, ancak elemanın özellikleri değiştirilerek bu tür plakların analizinin yapılmasını önermiştir. Boşluklu plağın torsiyonel rijitliği ile dolu gövdeli plağın torsiyonel rijitliği arasındaki ilişkiyi modellendirerek tablolar ortaya çıkarmıştır. Bununla birlikte Bakht, çoğu pratik durumda kenarlardaki boşlukların torsiyonel rijitliğinin azalmasının boşluklu plak köprünün genelde kenarlara doğru gittikçe incelendiği veya tatmin edici ve sağlam kenar kirişlere sahip olduğu garantisinin olmadığı sonucuna varmıştır [13].

Surana ve Humar (1983), 0° ile 30° arasında değişen verevlik açıları için kirişli bir köprünün ızgara analizini yapmıştır. Verev köprü için moment, sehim ve esnek dönmelerin eşdeğer bir düz köprüye göre daha az olduğu kanısına varılmıştır. Bununla

birlikte torsiyonel dönmeler ve torsiyonel momentler, verevlik açısının artması ile birlikte artmıştır. Mesnetlerdeki dönme ise torsiyonel dönmenin %50'si kadardır [23].

Wasti ve Scordelis (1984); düz, kurbda ve verev olmak üzere üç adet iki açıklıklı kutu kirişli köprünün davranışını karşılaştırmak amacı ile deneysel çalışma yapmıştır. Verevlik açısı 45° olarak alınmıştır. Verev köprü için; açıklıkların birinde yapılan tekil yüklemenin, köprünün geniş açılı kenarına doğru hareket ettirildikçe negatif uç momenti artırdığı sonucuna varılmıştır. Dar açılı kenar için de bunun tersi doğrudur. Orta mesnetteki negatif momentin yükleme pozisyonundan bağımsız olarak her zaman için daha az olduğu görülmüştür [23].

Marx et al (1986), beş adet öngermeli I kirişine sahip 108 adet tek açıklıklı köprünün analizinde sonlu elemanlar metodundan faydalanmıştır. Bu çalışmasının amacı; basit mesnetli verev köprüler için bir tasarım kriteri geliştirmektir. Bununla birlikte, bu araştırma sürekli verev köprülerin davranışına hitap etmemiştir [31].

Popov ve Malichenko (1987), tek hücreli kutu kirişlerin 0° ile 60° arasında değişen verevlik açılarında davranışını test etmek için Sonlu Eleman Metodunu kullanmıştır. Noktasal yükleme etkisi altındaki döşemenin efektif genişliğinin, özellikle kirişin verev uçları civarında en fazla azalan kısım olduğu sonucuna varılmıştır [23].

Maragakis ve Jennings (1987), verev köprülerin rijit kütle analizi için analitik modeller geliştirmiştir.

Bakht (1988), bazı verev köprülerin analizi için verev köprülerin düzenli köprü gibi modellendirilmelerini sağlayan bir yöntem geliştirmiştir [4].

Dilger et al (1988), değişken verevlik açılarının döşeme plağı enine momentleri üzerindeki etkisini gözlemlemek amacıyla bir çalışma yapmıştır. Çalışmada Izgara Analojisi ve Sonlu Elemanlar Metodu kullanılmıştır. Kirişler; enleme olmadan, verev uçlara paralel olan enlemelere sahip ve bağlantılara ortogonal olan enlemelere sahip olacak şekillerde analiz edilmiştir. Verevlik açısının artması ile enine doğrultu momentlerinin azaldığı gözlemlenmiştir [23].

Chan (1989), değişken verevlik açıları için Sonlu Elemanlar Metodu ile Izgara Analojisi sonuçlarını karşılaştırmaya yönelik çalışmıştır. Analize konu olan köprü; 24 m açıklıklı, 12 m genişlikli, U kirişlidir. Verevlik açısı, 15° hassasiyetlidir ve 0° ile 60° arasında değişmektedir. Bu çalışma, birçok durumda Izgara Analojisinden elde edilen maksimum reaksiyonların Sonlu Elemanlar Metodu çözümüne göre daha küçük sonuçlar verdiğini göstermiştir. Yaklaşık %12'lik bir oranla reaksiyondaki en fazla fark, 30°'lik verevlik açısı için görülmüştür. Bu farklılık, *reaksiyon oranı* olarak ifade edilmiştir ve ızgara reaksiyonunun sonlu elemanlar reaksiyonuna oranı olarak tanımlanmıştır [23].

Khaleel ve Itani (1990), öngerilmeli betondan iki açıklıklı ve sürekli verev köprülerin davranışı üzerine çalışmalar yapmıştır. Köprü açıklığı 24 ile 37 m, verevlik açısı 0° ile 60° arasında dikkate alınmıştır. Yanal hareketli yük dağıtım karakteristiklerini tespit etmek amacıyla rijit bir verev plak kullanılmıştır. Değişken olarak; kiriş boşluğunun kiriş açıklığına oranı, boyuna doğrultudaki eğilme rijitliğinin enine doğrultudaki eğilme rijitliğine oranı ve verevlik açısı kullanılmıştır. Gözlemler sonucu, verevlik açısının artması ile boyuna doğrultudaki eğilme momentlerinin azaldığı görülmüştür [23].

Khaleel ve Itani (1990); düz ve verev, öngerilmeli I kirişli sürekli köprülerde hareketli yüklerden doğan momentler üzerine yaptıkları çalışmada, Sonlu Elemanlar Metodunu kullanarak 112 adet analiz yapmıştır. Açıklıklar 24.4 m ile 36.6 m, kiriş aralıkları 1.8 m ile 2.7 m ve verevlik açısı 0° ile 60° aralığındadır. 60°'den fazla verevlik açılarının dikkate alınmayacağı, çünkü bu tür köprülerin nadiren inşa edildiğı belirtilmiştir [31]. 60° için, iç kirişteki en büyük momentin, normal köprüdekinin yaklaşık %71'i, dış kirişlerdeki en büyük momentin ise %80'i kadar olduğu belirtilmiştir.

Bishara ve Elmir (1990), ölü ve hareketli yüklerin kirişli verev köprülerdeki çerçeve kuvvetleri üzerindeki etkileri üzerine çalışmıştır. Verevlik açıları 0°, 20°, 40°, 60° olan toplam dört adet kirişli köprü Sonlu Elemanlar Metodu ile ele alınmıştır. Verev köprülerde, bütün çerçeve elemanlarında hem basınç hem çekme kuvvetleri oluşmuştur. Verev köprüler için maksimum gerilme kuvvetleri orta açıklıktadır. Dış kirişteki maksimum basınç kuvvetleri de geniş açılı köşededir. 20°'den küçük verevlik açıları için çerçeve kuvvetlerinin düz köprülerdeki ile yaklaşık aynı olduğu sonucuna varılmıştır [23].

Simpson (1992), farklı yüklemelerde verev trapez kutu kirişli köprülerin davranışını belirlemek için verevlik açıları 0° , 20° ve 45° olan tek kirişli, iki kirişli kompozit olmayan ve iki kirişli kompozit olan köprü modelleri kullanmıştır. Kompozit olan ve kompozit olmayan köprüler için destek kuvvetleri, verevlik açısı ile artmıştır. Verev kompozit köprüler, ölü ve hareketli yükler altında eğilme gerilmesinde ve sehimde, düz köprüler gibi azalma göstermiştir ancak kesme kuvvetleri ve mesnet reaksiyonları için tam tersi durum gözlenmiştir [23].

Sen ve Issa (1994), AASHTO'ya göre simetrik olarak yerleştirilmiş kamyon yüklemesinden doğan servis yükünün Sonlu Elemanlar Metodu ile elde edilmesi amacıyla iki açıklıklı, öngerilmeli betondan boşluklu plak köprü modeli üzerinde çalışmıştır. Köprü açıklığı 8 m, genişliği 2 m'dir. Köprü, ortotropik olarak idealize edilmiştir. Analizden elde edilen eğilmeler, reaksiyonlar ve gerilmeler karşılaştırılmıştır ve sonuçların kabul edilebilir olduğu görülmüştür [20].

Ebeido (1995), altı adet basit mesnetli ve üç adet sürekli verev kompozit köprüünün statik ve dinamik tepkilerini incelemiştir. Amaç, köprülerin nihai yük taşıma kapasitesinin tahminidir. Bu çalışmada; verevliğin iç ve dış kirişlerin yer değiştirmelerinde önemli azalmalara neden olduğu, verevlik açısı arttıkça geniş açılı köşeye yakın olan kirişlerin reaksiyonlarının arttığı, iki eşit açıklıklı sürekli kompozit bir köprüünün orta mesnetindeki reaksiyonların dağılımının verevlikten çok fazla etkilenmediği görülmüştür [33].

Tian (1999), basit mesnetli dolu gövdeli bir verev plak köprü üzerine çalışmıştır. Hareketli yük dağılımı üzerine hem analitik çalışma hem arazi çalışması yapmıştır. Parametrik çalışmalar için Sonlu Elemanlar Metodu ile 56 adet test durumu gerçekleştirilmiştir. Analitik çalışmaya ek olarak arazi testleri yapılmıştır ve basitleştirilmiş bir formül çıkarılmıştır [25]. Sonuç olarak; verevlik açısının ve açıklığın artması efektif genişliği artırdığı, kenar kirişi olmayan plak köprülerin kenar kirişi olan aynı özellikteki plak köprülere göre daha fazla maksimum momente sahip olduğu belirtilmiştir [25].

Huan Zeng (2000); Rayleigh-Ritz metodunu kullanarak ortogonal ve rijit verev plakların titreşimi üzerine çalışmıştır. Mevcut köprü olarak Walnut Creek köprüsü ele

alınmıştır. Köprü, dört açıklıklı olup beş adet 122 *m* uzunluğunda sürekli çelik kirişe sahiptir ve verevlik açısı 45°'dir. Farklı verevlik açıları, kenar oranları, plağın yükseklik/kalınlık oranları için nümerik sonuçlar sunulmuştur [34].

Meng (2000), verev köprülerin sismik davranışını teorik ve deneysel olarak incelemiştir. Verev karayolu köprülerinin doğrusal olmayan analizi, doğrusal olmayan tanım aralığı ve AASHTO yaklaşımı ile yapılmıştır ve geçerli AASHTO yaklaşımı kusurlu olarak tanımlanmıştır. Verevliğin köprünün dinamik davranışında önemli olduğu, orta bölgedeki kolonların yetersiz kesme dayanımı ile etkisiz en kesit boyutlarının bu kolonların göçmesinde ana etkenler olduğu belirtilmiştir [4].

Barr (2001), sürekliliğin köprünün boyuna doğrultudaki rijitliğini arttırdığını belirtmiştir. Verevliğe rağmen, Sonlu Elemanlar analizi, üç açıklıklı köprülerin dış kirişlerinin moment dağıtım faktörlerinin tek açıklıklı köprüdekine göre daha fazla olduğunu göstermiştir. 20°'lik verevlik açısı için verevliğin yük dağıtım faktörleri üzerinde önemsiz bir etkisi vardır. Bununla birlikte, büyük verevlik açıları için, verevlik açısının artmasıyla bu faktörler azalmıştır [20].

Iles (2001); dış açıklıkları 14 *m*, iç açıklıkları 20.3 *m* olan dört açıklıklı, 33° verev olan bir kirişli köprü analizi üzerinde durmuştur [6].

Khaloo ve Mirzabozorg (2003), beton malzemeli I kesitinden oluşan basit mesnetli verev köprüler üzerine parametrik çalışma yapmıştır. Çalışılan parametreler arasında, yük dağıtım faktörleri üzerinde en büyük etkiye verevlik açısının sahip olduğu görülmüştür. Verev köprülerde, düz köprülere oranla daha küçük dağıtım faktörleri her zaman için elde edilmiştir. Bu söylem, daha önce Barr (2001) tarafından yapılan çalışmalarla tutarlılık göstermektedir [35].

Wassef et al (2003), yaptığı çalışmada AASHTO-LRFD (2nd edition, 1998) köprü tasarım yönetmeliklerini kullanmıştır. Üst yapı, hareketli yük için sürekli olarak tasarlanmış basit açıklıkta öngerilmeli betondan kirişler üzerine oturmuş betonarme tabliye şeklindedir. Köprü, her biri 110 *ft* olan iki açıklıktan oluşmuştur. Verevlik açısı 20°'dir. Sunulan elle çözüm, Washington Ulaştırma Departmanı (Washington Department of Transportation - WSDOT) tarafından geliştirilmiş bir yük analiz

programı olan *QConBridge* bilgisayar tasarım programından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Örnek ile *QConBridge* programının sonuçları, kompozit olmayan ölü yük etkileri için farklılık göstermiştir [28].

Badwan (2005), verevlik etkisini incelemek amacıyla, tek açıklıklı köprü döşemesi için 74 inch genişliğinde altı, sekiz ve on adet dolu gövdeli bitişik prefabrik beton köprü modelleri geliştirmiştir. Kullanılan verevlik açısının aralığı 0° ile 45° arasında olup 15° aralıklıdır. Açıklık uzunluğu, döşeme genişliği ve prefabrik kirişlerin derinliği değiştirilerek farklı döşeme modelleri geliştirilmiştir. Parametreler tek tek değiştirilmiştir, böylece parametrelerin her biri için kendine mahsus etkileri üzerine bağımsız olarak çalışılmıştır [35].

Caferov (2005), önerilmeli betondan boşluklu düz plak köprülerin Yapay Sinir Ağları ile analizi konusunda çalışma yapmıştır. Çalışmada, konvansiyonel bir yöntem olan Guyon-Massonnet yöntemine ek olarak ANSYS bilgisayar yazılımı ile Sonlu Elemanlar analizi yapılarak yöntemlerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Farklı geometrik ölçülere sahip çok sayıda boşluklu plak köprü için Sonlu Elemanlar Metodu ile veri üretilmiş ve bu veriler YSA ile modellenmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak ise; YSA'nın boşluklu plak köprü statik analizlerini iyi düzeyde öğrendiği ve test aşamasında kabul edilebilir sonuçlar verdiği belirtilmiştir [14].

Sevgili (2007), 76 adet otoyol köprüsünü dikkate alarak yaptığı çalışmada, Türkiye'deki çok açıklıklı basit mesnetli verev köprülerin sismik davranışlarını incelemiştir. Ayrıca, betonarme bağlantı döşemelerinin sismik güçlendirme metodu olarak kullanılmaları ile bağlantı döşemelerinin ve farklı verev açılarının köprü performansı üzerindeki etkilerine de değinmiştir [24]. Köprüler; verevlik açıları, maksimum açıklıkları, açıklık sayıları, başlık kirişi atalet momentinin kolon atalet momentine oranı, kolonlar arası mesafenin kolon yüksekliğine oranı gibi özellikleri dikkate alınarak sınıflandırılmış ve 112 farklı köprü modeli oluşturulmuştur. Sonuç olarak; genleşme derzlerinin çıkarılıp, yerlerine bağlantı döşemelerinin eklenmesinin, kiriş kesitinin alt kısmında oluşan hareketli yük gerilmelerini %25'e kadar azalttığı gözlenmiştir. Açıklık sayısı ve verevlik açısı büyük olan köprülerde bu azalma daha fazla olmuştur. Ayrıca; verevlik açısı arttıkça kirişlerdeki hareketli yük gerilmelerinin azalabileceği ve kenar ayaklar arasında tümüyle

sürekli bir döşemeye sahip olmanın daha ekonomik bir tasarıma yol açacağı da belirtilmiştir [24].

2.4 Analiz Yöntemleri

Çelik ve beton malzemelerin imal tekniğindeki gelişmeler, öngerilme gibi yeni metodların ortaya çıkması, hareketli yük ağırlıklarının her geçen gün artması, verev ve kurb köprüler gibi plandaki durumları karışık ve geniş köprülerin gittikçe artan sayıdaki yapımı, son zamanlarda köprü hesaplarında büyük bir aşama meydana getirmiştir [36]. Aynı zamanda, 30 yılı aşkın bir zaman aralığı içinde köprü analiz metodlarında büyük değişiklikler olmuştur. Günümüzde dijital bilgisayarların yaygınlaşmasından sonra köprü mühendisleri, analiz metodları için artık güçlü analitik araçlara sahip olmuşlardır [25].

Köprü analizi için uygulanabilecek yöntemler genel olarak şu şekilde sınıflandırılabilir:

1. Değiştirilmiş Metodlar ve Genel Uygulamalar

- a. Yük dağıtma metodu
- b. Ortotropik plak teorisi metodu
- c. Uzak kafes metodu
- d. Sonlu şerit metodu
- e. Katlanmış plak metodu
- f. Sonlu farklar metodu
- g. Izgara analojisi metodu
- h. Sonlu elemanlar metodu

2. Spesifik Uygulamalar

3. Model analizi

Köprü analizi için genel olarak; kuvvet dengesi ve uygunluk prensiplerini sağlayan ve gerilme-deformasyon bağıntısını, kullanılmakta olan malzemeye göre değerlendiren herhangi bir analiz yöntemi kullanılabilir. Ancak her analiz türü her köprü için kullanılamaz. Geleneksel olarak döşeme plakları, yaklaşık metotlar kullanılarak analiz edilmiştir. Bu yaklaşık metotlar, momentleri plağın birim genişliği için hesaplama ve

donatıları bu momentlere göre tasarlama temeline dayanmaktadır. Bu yaklaşım, düz plakların analizi için de yıllarca başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Ancak; döşeme plaklarının alışılmamış geometriye sahip olması durumunda, örneğin keskin verevliğe sahip plaklarda yaklaşık metotlar doğru sonuç vermeyebilir. Köprüler için uygulanabilen analizlerin; döşeme türü, plan geometrisi ve mesnet koşullarına göre uygulanabilirliği Tablo 2.2’de gösterilmiştir [17].

Tablo 2.2. Analiz İçin Uygulanabilecek Çözüm Metodları.

	UYGULANABİLECEK ANALİZ YÖNTEMLERİ							
A. DÖŞEME TÜRÜ	Ortotropik Plak Teorisi	Ortotropik Plak Teorisi (Kurb)	Katlanmış Plak	Sonlu Elemanlar	Sonlu Şerit	Izgara Analogisi	Uzay Kafes	Sonlu Farklar
Plak	+	+		+	+	+		+
Yalancı Plak	+	+		+	+	+		+
Plak-Kiriş				+	+	+		
Hücrese			+	+	+	*	+	
Kompozit	+	+		+	+	+		+
Ortotropik	+	+		+	+	+		+
Kutu			+	+	+	*	+	
B. PLAN GEOMETRİSİ	Ortotropik Plak Teorisi	Ortotropik Plak Teorisi (Kurb)	Katlanmış Plak	Sonlu Elemanlar	Sonlu Şerit	Izgara Analogisi	Uzay Kafes	Sonlu Farklar
Düz	+	+	+	+	+	+	+	+
Verevlik açısı >20°				+		+	+	+
Kurbda	+			+	+	+	+	+
Keyfi				+		+	+	+
C. MESNET KOŞULLARI	Ortotropik Plak Teorisi	Ortotropik Plak Teorisi (Kurb)	Katlanmış Plak	Sonlu Elemanlar	Sonlu Şerit	Izgara Analogisi	Uzay Kafes	Sonlu Farklar
Basit Mesnetli	+	+	+	+	+	+	+	+
Orta Mesnetlere Sahip Basit Mesnetli	+		+	+	+	+	+	+
Keyfi				+		+	+	+

*: Çok sınırlı uygulanabilirlik

İzotropik ve ortotropik verev plaklar için geçerli analitik çözüm elde edilemediğinden, alternatif metotlar kullanmak gerekmektedir [1]. Bu tür plaklar, sonlu farklar metodu kullanılarak da çözülmeye çalışılmıştır. İzotropik verev plaklar için; Jensen, basitlik için normal Lagrange diferansiyel denklemini kullanarak dik koordinatlara dönüştürmüş ve sınır şartlarını sonlu farklar denklemine dahil etmiştir [1]. Sözü edilen sonlu farklar metodu iyi sonuçlar vermiş olsa dahi çözüm yorucudur ve genelleştirilemez. Sonlu farklar yaklaşımı, Naruoka ve Omura tarafından ortotropik plakların esas diferansiyel denklemine uygulanmış ve sınırlı sayıda tesir katsayıları tabloları verilmiştir. Ancak uygun bir enterpolasyon formülü elde edilememiştir [1].

Bunlardan başka; izotropik verev plakların hesabı için Robinson ve Rüsch tarafından verilen tablolar kullanılmaktadır. Robinson, herhangi bir düğüm noktasındaki tekil yükleri de göz önüne alarak sehim için tesir katsayılarını tablolar halinde vermiştir ve standart ağ düzenini, verev uzunluğu altı eşit, verev genişliği sekiz eşit parçaya bölerek elde etmiştir [1].

Bilgisayarların yaygın ve ekonomik olarak kullanılmaya başlaması, özellikle Sonlu Elemanlar Metodu gibi güçlü hesap metodlarını daha pratik hale getirmiştir. Günümüzde bütün ikincil (sekonder) etkileri hesaba katarak daha hassas ve daha geçerli gerilme analizi yapabilmek mümkündür [36].

Görüldüğü üzere, köprü analizi için çok sayıda farklı yöntem mevcuttur. Bahsedilen analiz metotları içinde en fazla kullanılanı ise, Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) olarak gösterilebilir [28]. Bu çalışmada ele alınan köprünün statik analizi için; Izgara Analojisi Metodu ve Sonlu Elemanlar Metodu kullanılacaktır. Izgara Analojisi Metodu hakkında üçüncü bölümde, Sonlu Elemanlar Metodu hakkında ise dördüncü bölümde detaylı olarak bilgi verilecektir. Yukarıda bahsedilen ve bu çalışmada kullanılmayacak olan diğer analiz yöntemlerinden ayrıntılı olarak söz edilmesi bu tez çalışmasının kapsamı dışında tutulmuştur.

3. BÖLÜM

IZGARA ANALOJİSİ YÖNTEMİ İLE BOŞLUKLU VEREV PLAK KÖPRÜLERİN ANALİZİ

3.1. Giriş

Boşluklu plak köprülerde, boşlukların boyutları ve yerleşimi, boşluklar arası uzaklıklar, başlıkların geometrik boyutları gibi unsurlar, doğru tasarım ve hesap açısından oldukça önemlidir. Boşluklu plak köprülerin tasarım detayları ile ilgili olarak farklı standartlarda farklı bilgiler mevcuttur. Örneğin; OHBDC (1983), boşluklu plak köprülerin yapımında dikkat edilmesi gereken konstrüktif kurallar ile ilgili bazı şartlar içermektedir. Bu hususlar aşağıda verilmiştir [22].

- Boşluk çapının plak derinliğinin %60'ı ile %80'i arasında olması uygundur.
- Boşluklar arası mesafe plak genişliğinin yaklaşık %12'si kadar olacaktır.
- Başlık uzunluğu plak genişliğinin %11'i kadar olacaktır.
- Başlık derinliği plak derinliğinin %38'i kadar olacaktır.
- Boşluk üstünde kalan kesit derinliğinin boşluk altında kalan kesit derinliğine oranı 1.385'dir.

AASHTO LRFD (2007)'de ise boşluklu plak köprüler için şu hususlar anlatılmıştır [37].

- Boşlukların merkezden merkeze uzaklıkları, plağın toplam kalınlığından az olmamalıdır.
- Boşluğun merkezinden dış yüzeye dik olarak alınan betonun minimum kalınlığı 140 mm olmalıdır.
- Boşluk en kesit alanı, toplam en kesit alanının %40'ını aşmamalıdır. Aşarsa, üst yapı hücresel yapı davranışı gösterecektir ve monolitik çok hücreli bir kutu

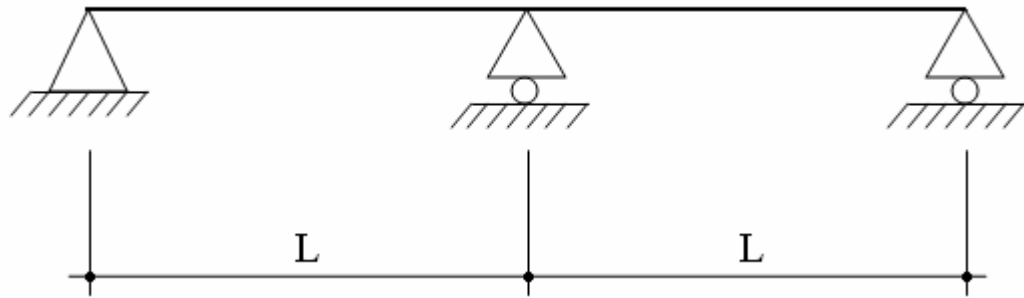
olarak, ortotropik bir plak olarak veya üç boyutlu bir sürekli ortam olarak analizi mümkündür.

- Açıklık sonları dolu gövdeli olarak tasarlanabilir ancak dolu gövdeli kesit uzunluğu en az 900 mm olmalıdır ve açıklığın %5'inden az olmamalıdır.

Bu çalışmada, köprünün ön boyutlandırması için genel olarak OHBDC (1983) ve AASHTO LRFD (2007) yönetmeliklerinde yer alan koşullara bağlı kalınmıştır [22 ve 37].

3.2. Ön Boyutlandırma

Çalışmada ele alınan boşluklu verev plak köprü, iki şeritli bir karayolu üzerine iki açıklıklı ve sürekli olarak tasarlanmıştır.



Şekil 3.1. Köprü Modelinin Statik Sistemi.

Köprü statik açıklığı; $L = 30 \text{ m}$

Köprü uzunluğu; $2L = 60 \text{ m}$

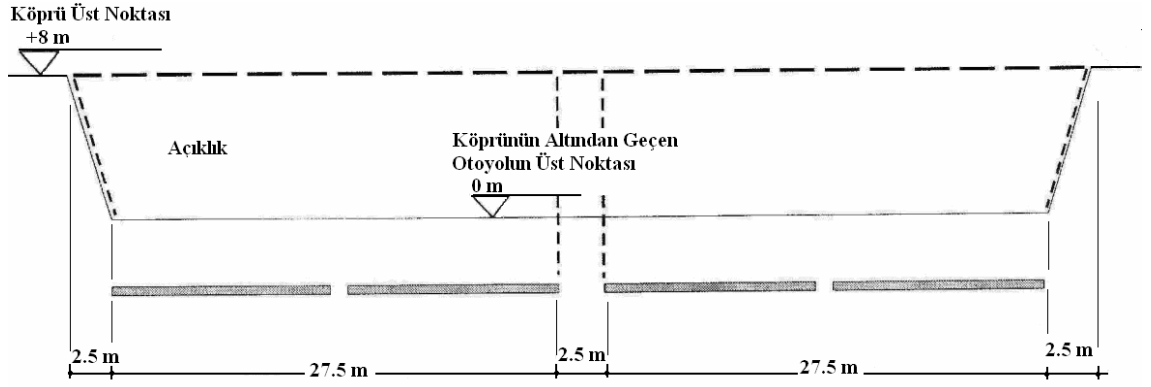
Verevlik açısı; $\theta = 45^\circ$

Malzeme:

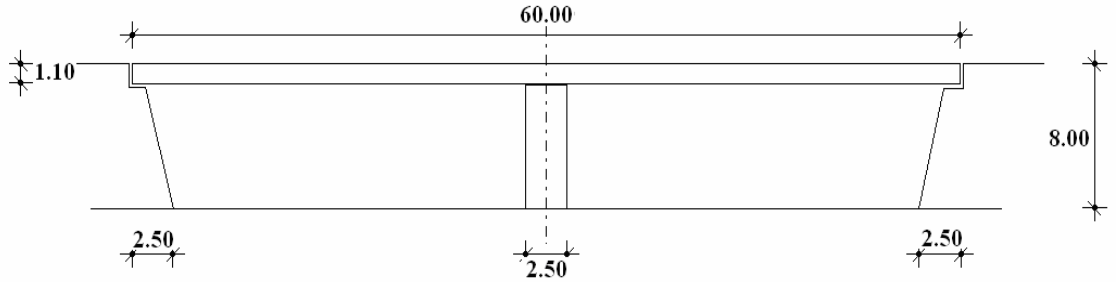
Beton; BS 45

Donatı çeliği; S500

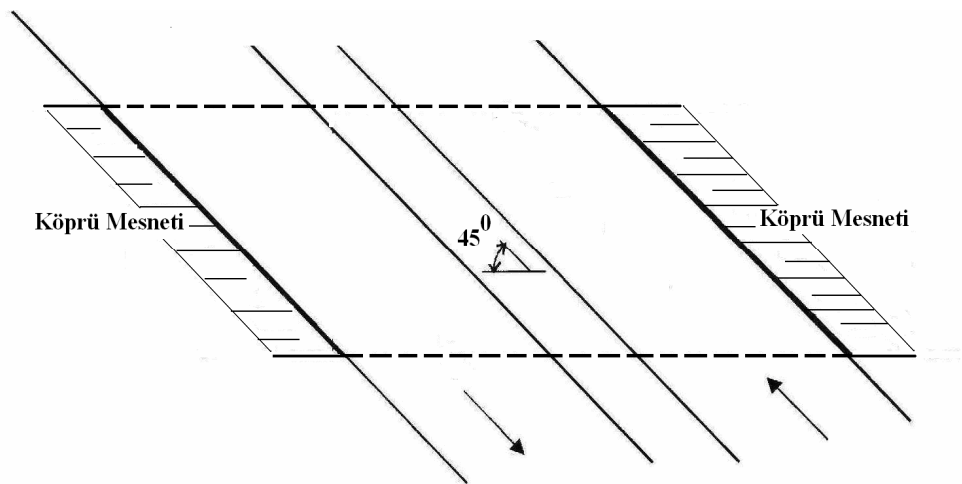
Model köprünün taslak figürleri, Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Köprünün İnşa Edileceği Profil.



Şekil 3.3. Köprü Modelinin Boy Kesiti.
* (Ölçüler metre cinsindendir).



Şekil 3.4. Köprünün Plandaki Görünüşü.
* (Model Köprü, Kesikli Çizgilerle Gösterilmiştir).

Köprünün genişliği için dikkate alınan mesafeler şu şekildedir;

- Şerit genişliği; gidiş-geliş şeritleri olmak üzere her birinin genişliği 3 m olan iki şerit tasarlanmıştır; $W_1 = 2 \times 3 = 6 \text{ m}$.
- Orta refüjün genişliği; $W_2 = 1 \text{ m}$.
- Tretuvarın genişliği; gidiş-geliş doğrultusunda her birinin genişliği 1.5 m olan iki tretuvar tasarlanmıştır; $W_3 = 2 \times 1.5 = 3 \text{ m}$.
- Şerit sınır çizgisi ile tretuvar arasındaki mesafe; her iki şerit için 0.5 m genişliğinde olmak üzere; $W_4 = 2 \times 0.5 = 1 \text{ m}$.
- Şerit sınır çizgisi ile orta refüj arasındaki mesafe; her iki şerit için 0.5 m genişliğinde olmak üzere; $W_5 = 2 \times 0.5 = 1 \text{ m}$.

Köprünün toplam dik genişliği; $W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 = 6 + 1 + 3 + 1 + 1 = 12 \text{ m}$.

Köprünün toplam verevine genişliği; $B = \frac{W}{\sin \theta} = \frac{12}{\sin 45} = \frac{12}{0.707} = 16.97 \text{ m}$.

Plak kalınlığının seçimi (t);

$$\frac{1}{30} \leq \frac{t}{L} \leq \frac{1}{25}$$

$$\frac{1}{30} \leq \frac{t}{30} \leq \frac{1}{25}$$

$$1.00 \text{ m} \leq t \leq 1.20 \text{ m}$$

$t = 1.10 \text{ m}$ seçilmiştir.

Tretuar yüksekliği; $t_h = 0.20 \text{ m}$ olarak seçilmiştir.

Boşluk çapı plak derinliğinin %40'ı ile %60'ı arasında tasarlanmıştır. Bu oran aşıldığı takdirde plağın hücresel davranış göstereceği literatürde belirtilmiştir.

$$0.40 \times t \leq R \leq 0.60 \times t$$

$$0.40 \times 1.10 \leq R \leq 0.60 \times 1.10$$

$$0.44 \leq R \leq 0.66$$

$R = 0.65 \text{ m}$ seçilmiştir.

Boşluklar arası mesafe [22]; $0.12 \times 12 = 1.44 \text{ m}$.

Boşluklar arası mesafe = 1.40 m alınmıştır.

Başlık uzunluğu [22]; $0.11 \times W = 0.11 \times 12 = 1.32 \text{ m}$.

Başlığın tamamı tretuvar olarak tasarlanacağından dolayı başlık uzunluğu 1.50 m olarak alınmıştır.

Başlık derinliği [22]; $0.38 \times t = 0.38 \times 1.10 = 0.42 \text{ m}$.

Başlık derinliği = 0.42 m olarak alınmıştır.

Boşluk üstünde kalan kesit derinliğinin boşluk altında kalan kesit derinliğine oranı (Üstteki kesit derinliği t_u , alttaki kesit derinliği t_a olmak üzere) [22];

$$\frac{t_u}{t_a} = 1.385$$

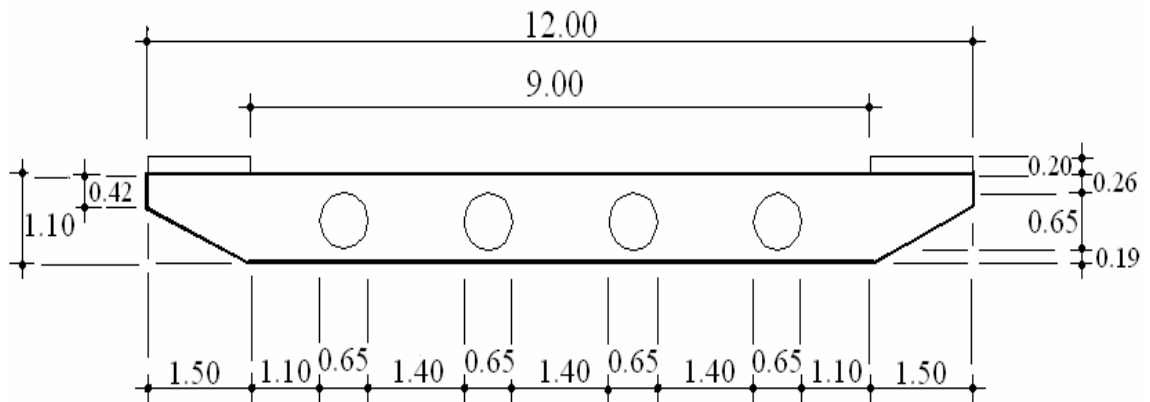
$$t_u + t_a + 0.65 = 1.10$$

$$t_u + t_a = 0.45 \text{ m.}$$

$$t_u = 0.45 - t_a$$

$$\frac{0.45 - t_a}{t_a} = 1.385$$

Buradan; $t_a = 0.19 \text{ m}$, $t_u = 0.26 \text{ m}$ olarak elde edilir.



Şekil 3.5. Köprü Modelinin En Kesiti.

* (Ölçüler metre cinsindendir).

Köprü modelinin en kesiti, Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, köprü en kesitinde tarafsız eksene göre simetrik olacak şekilde dört tane dairesel boşluk tasarlanmıştır.

AASHTO LRFD (2007)’de; boşlukların merkezden merkeze uzaklıkları, plağın toplam kalınlığından az olmamalıdır şartı mevcuttur [37]. Bir başka deyişle boşlukların merkezden merkeze uzaklıkları;

$1.40 + 0.65 = 2.05 \text{ m}$. olup plağın toplam kalınlığı ise 1.10 m ’dir. Dolayısıyla bu şart sağlanmaktadır.

Boşluk en kesit alanı, toplam en kesit alanının %40’ını aşmamalıdır. Aşarsa, üst yapı hücresel yapı davranışı gösterecektir [37].

$$\text{Boşluk en kesit alanı; } \frac{\pi \times R^2}{4} \times 4 = \frac{\pi \times 0.65^2}{4} \times 4 = 1.33 \text{ m}^2$$

Toplam en kesit alanı;

$$(12.00 \times 1.10) - \frac{0.68 \times 1.50}{2} \times 2 = 12.18 \text{ m}^2$$

$$\frac{1.33}{12.18} \times 100 = \%10.92 < \%40$$

Şart sağlanmaktadır, dolayısı ile üst yapı boşluklu davranış göstermektedir.

3.3. Yöntemin Temel İlkeleri

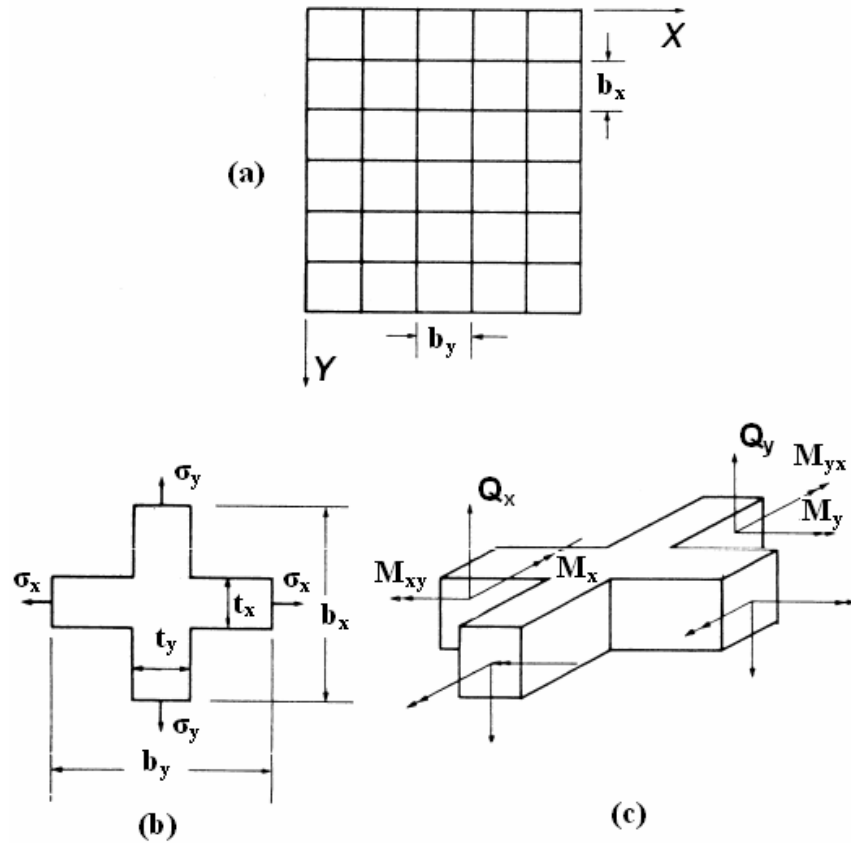
Rijit olarak birleştirilmiş çerçeveler, düzlemlerine ortogonal (dik) doğrultuda olan yük etkisi altında ise ızgara olarak tanımlanır [38]. Izgara Analojisi Metodunda, gerçekte bir bütün olan plak, ortogonal doğrultularda olan belli sayıda kiriş ile idealize edilir. Bu kirişlerin enine ve boyuna doğrultudaki rijitlikleri ile plağın yerel plak rijitliği yaklaşık olarak aynıdır. İki boyutlu (2D) bir düzlem plak çözümü ızgara analizi adını alırken, üç boyutlu (3D) bir yapı hesabı uzay eleman analizi adını almaktadır [10].

Sawko ve Willcock (1967), değişken kesit özelliklerine sahip hücresel yapıları analiz etmek için, ortogonal olarak bağlanmış kirişleri birleştirerek ızgara analojisi metodunun uygulamışlardır. Yapılan bu çalışmada, ızgara analojisi sonuçları model sonuçları ile

karşılaştırılmış ve bazı toleranslarla (Örneğin enine hücre burulması hesaba katılmayarak) Izgara Analojisi Metodu ile boşluklu plakların analiz edilebileceği ispatlanmıştır [39].

Izgara sistemler, yapıların değişik tasarımlarında kullanılabilir. Bunlardan bazıları; köprüler, gemi güverteleri, uçak döşemeleri, uçak kanatları vb'dir [38].

Verevlik açısı 20° 'den büyük olan basit mesnetli ve sürekli köprülerin analizi için Izgara Analojisi veya Sonlu Elemanlar Metodu tercih edilmektedir. Bir açık ızgara analojisi, bilgisayar yardımı ile programlanabilir ve bu tipte standart programlar mevcuttur. Bu çalışmada da ızgara analojisi için Microstran v8 (Öğrenci Sürümü) kullanılmıştır.

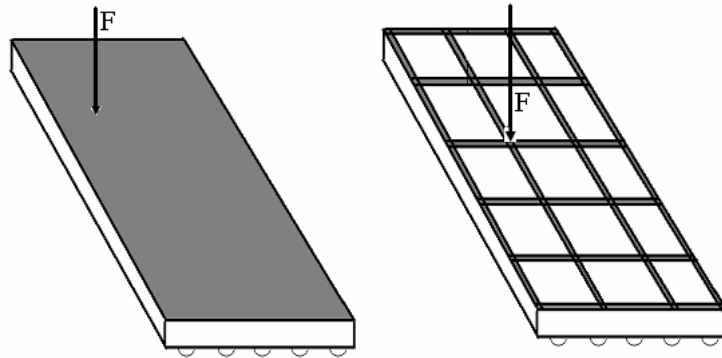


Şekil 3.6. Izgara Bir Elemanın; (a) Plan Gösterimi, (b) Gerilme Doğrultuları, (c) Serbest Cisim Diyagramı [17].

Izgara analojisi, genel olarak altı aşamada gerçekleştirilir;

- 1) Gerçek döşemenin eşdeğer ızgara elemanlarına dönüştürülmesi ve ızgaraların, dayanım çizgisi boyunca yerleştirilmesi (Kirişler, kenar kirişler vb),
- 2) Izgara elemanlarının eşdeğer elastik ataletlerinin değerlendirilmesi,
- 3) Yüklerin plak üzerine nasıl yayılacağıının belirlenmesi,
- 4) Yüklerin, ızgara elemanların değişik düğüm noktalarına uygulanması ve transferi,
- 5) Kuvvet tepkilerinin ve tasarım zarflarının belirlenmesi,
- 6) Sonuçların yorumlanması.

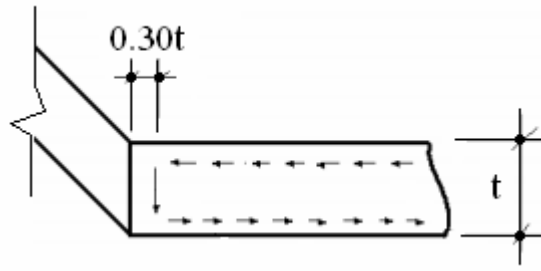
Düz bir plağın ızgara elemanlara ayrılmış hali, Şekil 3.7’de görülmektedir. Plak, boyuna doğrultuda dört adet, enine doğrultuda altı adet ızgara elemanına sahiptir ve bu şekilde 24 adet düğüm noktasına sahiptir. Plağı çevreleyen boyuna ve enine doğrultulardaki ızgaralar kenar eleman olarak, diğer ızgaralar ise iç eleman olarak adlandırılır.



Şekil 3.7. Bir Plağın Izgara Elemanlarına Ayrılması.

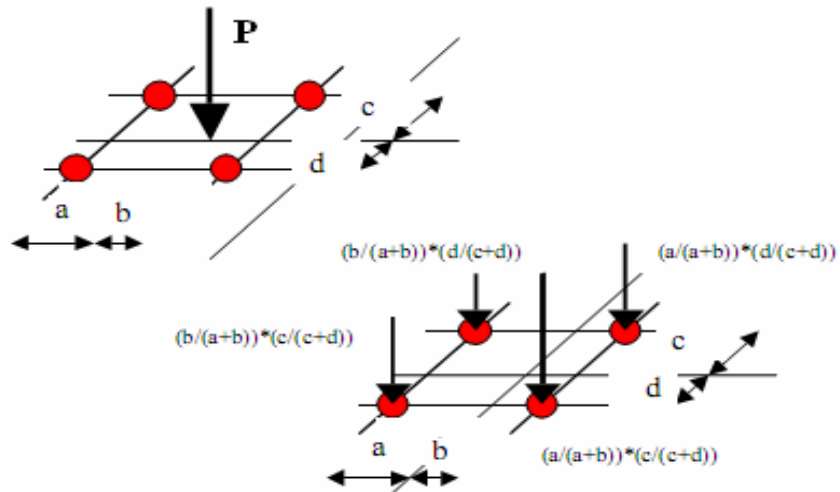
Bir plak elemanın ızgara analizi için dikkat edilmesi gereken püf noktalar şöylece sıralanabilir.

- Boyuna doğrultudaki ızgara aralıklarının enine doğrultudaki ızgara aralıklarına oranının iki ile üç arasında alınması uygundur.
- Kenar ızgara elemanının, plağın kenarındaki dikey kesme kuvveti akışının bileşkesine yakın olarak yerleştirilmesi uygundur. Örneğin, dolu gövdeli plak için kenar eleman, plak kalınlığının %30’u kadar mesafeye yerleştirilebilir.



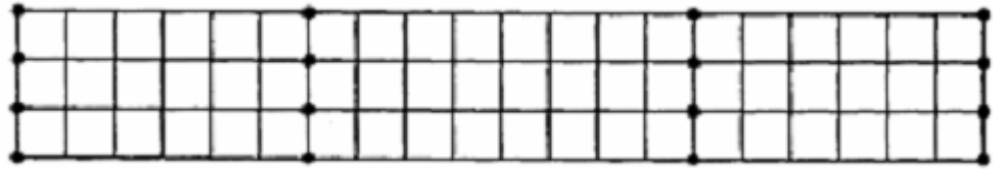
Şekil 3.8. Kenar ızgara Elemanın Yerleştirilmesi.

- Enine ve boyuna kirişler arasındaki boşluklar, yüklerin statik dağılımına izin verecek şekilde olmalıdır.
- Enine doğrultudaki ızgara elemanı aralıklarının, efektif açıklığın 1/9'u kadar olması uygundur. Kenar ızgara elemanları da dahil olmak üzere, en az yedi tane enine ızgara elemanı kullanılmalıdır.
- Yaya yoluna sahip köprülerde, trotuarın merkezi boyunca boyuna doğrultuda ızgara elemanı eklenebilir.
- Eğer bir düğüm noktasında; diğer doğrultuda gerçek kiriş yoksa ve ızgara kiriş elemanlar plağı temsil ediyorsa, düğüm noktasının her iki tarafındaki eğilme momentlerinin ortalaması alınmalıdır.
- Taşıt yükleri, düğüm noktalarına tekil yük olarak etki ettirilir. Tekil yükün düğüm noktalarına dağıtılması, Şekil 3.9'da gösterilmiştir.

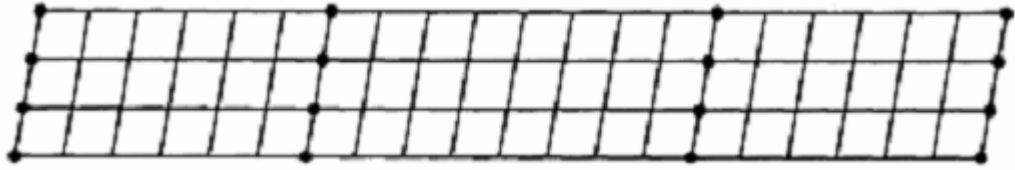


Şekil 3.9. Tekil Yükün Bitişik Düğüm Noktalarına Dağıtımı [12].

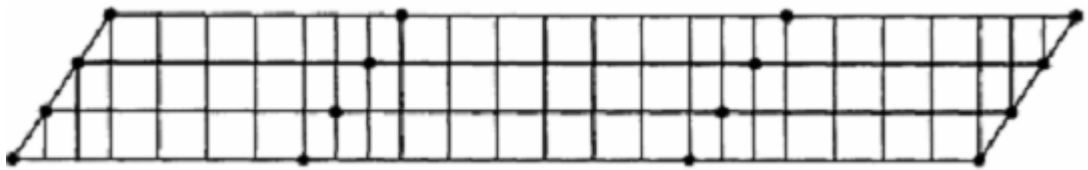
Çok açıklıklı düz köprülerde enine doğrultudaki ızgara elemanları, mesnetlere paralel olarak, bir başka deyişle boyuna doğrultudaki ızgara elemanlarına dik olacak şekilde yerleştirilir. Çok açıklıklı, sürekli ve verevlik açısı 20° 'den küçük köprülerde enine doğrultudaki ızgara elemanlarının, verev mesnetlere paralel yerleştirilmesi uygundur. Verevlik açısı 20° 'den büyük ise enine doğrultudaki ızgara elemanlarının, boyuna doğrultudaki elemanlarla doğru açıda olacak şekilde yerleştirilmesi uygundur [35]. Şekil 3.10'da bu ifadeler figüre edilmiştir.



a) Düz Köprü İçin Izgara Yerleşimi.



b) Verevlik Açısı 20° 'den Küçük Olan Köprü İçin Izgara Yerleşimi.

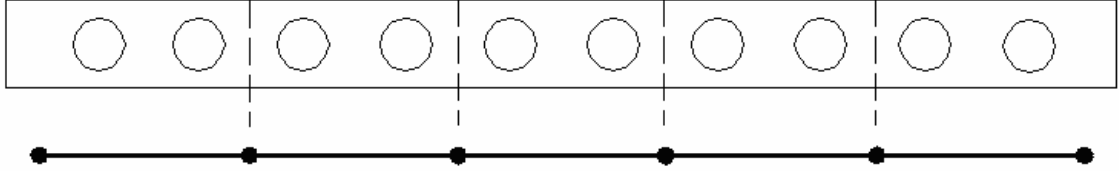


c) Verevlik Açısı 20° 'den Büyük Olan Köprü İçin Izgara Yerleşimi.

Şekil 3.10. Köprüler İçin Tipik Izgara Modellemeleri [6].

Boşluklu plakları analiz etmek için kullanılan boyuna ızgara elemanları, iki adet kenar eleman ve sayısı boşlukların sayısına ve yerleşimine göre değişebilecek iç elemanlardan oluşur. Kenar ızgara elemanları, plağın kenarındaki kesme kuvveti akışının bileşkesine yakın olarak yerleştirilir. İç ızgara elemanları ise, genel olarak belli sayıda boşluk

elemanını temsilen boşluklar arasındaki dolu gövdeli bölümlerin merkezine simetrik olarak yerleştirilir.



Şekil 3.11. Boşluklu Bir Plakta Boyuna Doğrultudaki Izgara Elemanları [10].

Şekil 3.11’de, boşluklu bir plak için boyuna doğrultudaki ızgara elemanlarının yerleşimi, örnek olarak gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere ızgara elemanlarının her biri, aralarında ikişer adet boşluk olacak şekilde simetrik olarak tasarlanmıştır.

3.4. Yöntem

Boşluklu plakların analizinin Izgara Analojisi Metodu ile gerçekleştirilebilmesi için kullanılan kriterler şöylece sıralanabilir.

- Boşluk derinliğinin, plak kalınlığının 0.7 katından fazla olması şartı,
- Boşluğun altında ve üstünde kalan dolu gövdeli kesit kalınlığının 150 mm ’den küçük olması şartı,
- Boşluklar arasındaki minimum mesafenin 225 mm ’den küçük olması şartı.

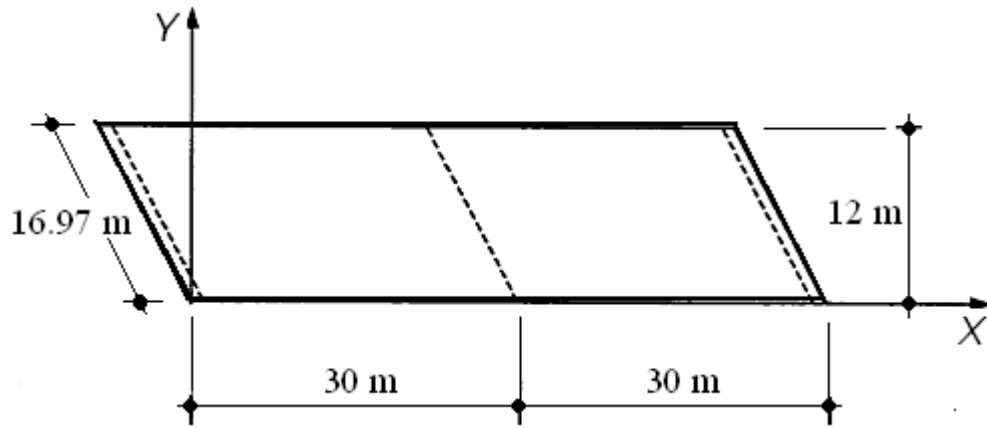
Yukarıdaki ölçütlerden biri sağlanıyorsa, kesme deformasyonları göz önüne alınmalıdır. Bu durumda plak, kutu kiriş (box girder) kategorisine gireceği için ızgara analojisi için uygun değildir. Bu ölçütler sağlanmıyorsa, ızgara analojisi için uygun bir model söz konusudur.

Bu çalışmada esas alınan model için;

- $R > 0.7 \times t$, $R > 0.7 \times 1.1$, $R > 0.77$, $0.65 > 0.77$, (Şart sağlanmıyor).
- $t_a < 0.15 \text{ m}$, $0.19 \text{ m} < 0.15 \text{ m}$
 $t_u < 0.15 \text{ m}$, $0.26 \text{ m} < 0.15 \text{ m}$, (Şartlar sağlanmıyor).
- $1.40 \text{ m} < 0.225 \text{ m}$, (Şart sağlanmıyor).

Belirtilen kriterler sağlanamadığı için kesme deformasyonları göz önüne alınmayacaktır. Bu tür bir plak, kutu kiriş kategorisine girmediğinden dolayı ızgara analojisi için uygundur. Ancak, verev elemanlarla ızgara analojisi yorumlamak zordur ve küçük verevlikler hariç birçoğunun kesin olmayan sonuçlar verebileceği unutulmamalıdır.

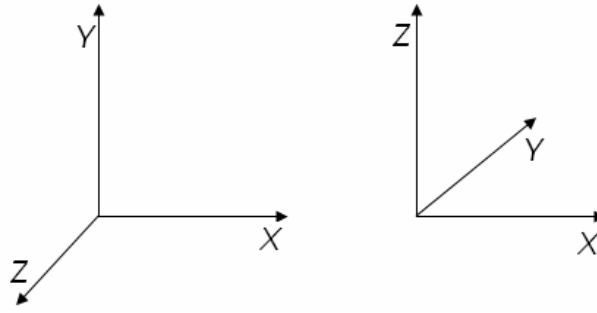
Izgara analojisi ile analiz edilecek olan verev plak, Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Dikdörtgen, paralelkenar gibi bir geometrik şekle sahip cisimlerde, kütle merkezinin (X) ve (Y) koordinatları (X_m ve Y_m) sıfır olur, yani kütle merkezi ile plan merkezi çakışmıştır.



Şekil 3.12. İki Açıklıklı Verev Plakın Plan Görünüşü.

Bu bölümde, açıklığı 30 m, dik genişliği 12 m, verevine genişliği 16.97 m, plak kalınlığı 1.10 m, boşluk çapı 0.65 m ve verevlik açısı 45° olan bir verev plak köprünün ızgara analojisinden aşamalı olarak bahsedilecektir.

Izgara analojisini yapmak için, Microstran v8 yazılımından yararlanılmıştır [40]. Microstran v8 yazılımında, global (XY) düzlemi üzerinde düz veya verev ızgara tasarlanabilir, (Z) eksenine ise bu düzleme diktir.



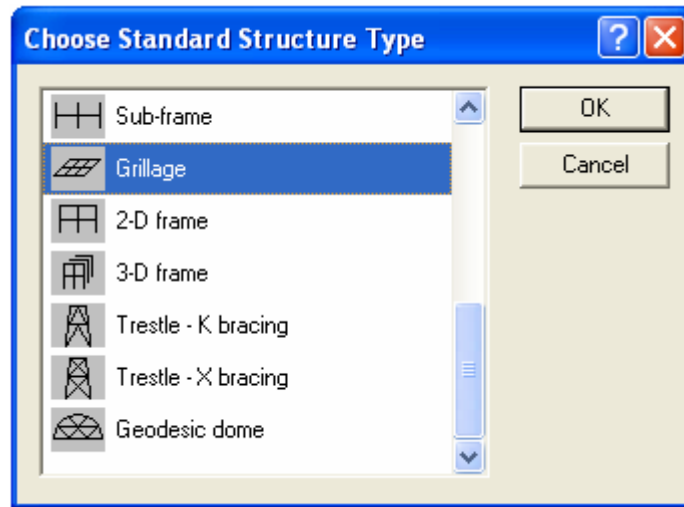
Şekil 3.13. Microstran Programında Global Koordinat Sistemi.

Structure-Units menüsü ile programda çalışılacak birimler ($kN-m$) seçilmektedir.



Şekil 3.14. Microstran Programında Birimlerin Seçilmesi.

Structure-Standard Structures menüsü ile de, analize konu olacak yapı türü belirlenmektedir. Microstran v8 yazılımında mevcut olan ızgara seçeneği, Şekil 3.15’de gösterilmiştir.

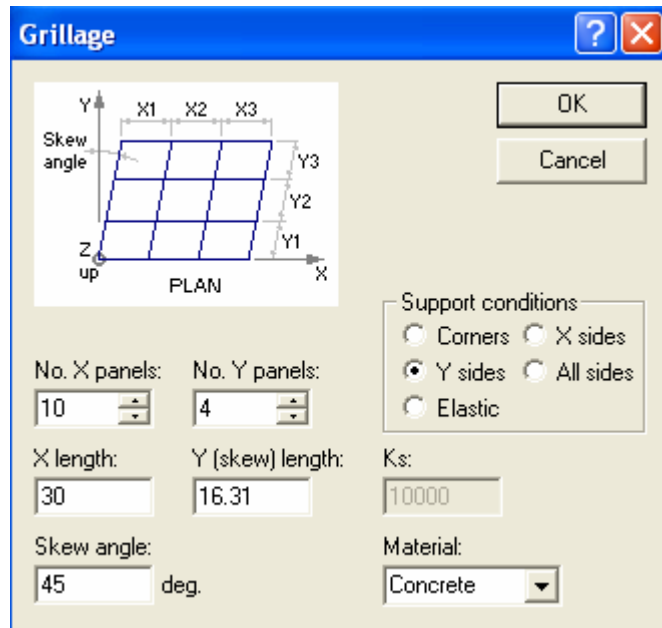


Şekil 3.15. Microstran Programında Standart Olan Yapı Türleri.

Izgaralar; her bir doğrultudaki ızgara paneli sayısı, bir verevlik açısı, mesnetlerin yerleşimi, her bir ızgara panelinin uzunluğu ve malzeme türü girilerek idealize edilebilmektedir. Bu çalışmada plak; (X) eksen doğrultusunda on, (Y) eksen, yani verev uzunluk doğrultusunda dört farklı panele ayrılmıştır. Bir başka deyişle plak; boyuna doğrultuda beş adet, enine doğrultuda 11 adet elemana sahiptir ve sistemde 55 adet düğüm noktası mevcuttur. Her bir doğrultudaki ikişer eleman, plak kenar elemanlarını temsil etmekle birlikte, boyuna doğrultudaki iç elemanlardan her biri de boşluklar arasındaki dolu gövdeli bölümlerin merkezine simetrik olarak yerleştirilmiştir. Verevlik açısı, (θ) ise, 45° olarak girilmiştir. Mesnetlerin verev uzunluklar üzerinde olduğu kabul edilmiştir. Malzeme olarak beton seçilmiştir. Her bir panelin uzunluğu da, bu işlemlerin yapılmasının ardından bir sonraki ekranda girilmiştir.

Mesnet bölgesinde, enine doğrultudaki ızgara elemanları arasındaki mesafe 1.5 m, boyuna doğrultudaki ızgara elemanları arasındaki mesafe 4 m olarak tasarlanmıştır. Bu uzunluklar, Şekil 3.17’de görülmektedir. Elde edilen ızgara sistemi de Şekil 3.18’de verilmiştir.

Eğer görüntülenmek istenen düzlem değiştirilmek istenirse, *Structure-Drawing Settings* menüsü yardımı ile istenen düzlem görüntülenebilir.



Şekil 3.16. Izgara Özelliklerinin Belirlenmesi.

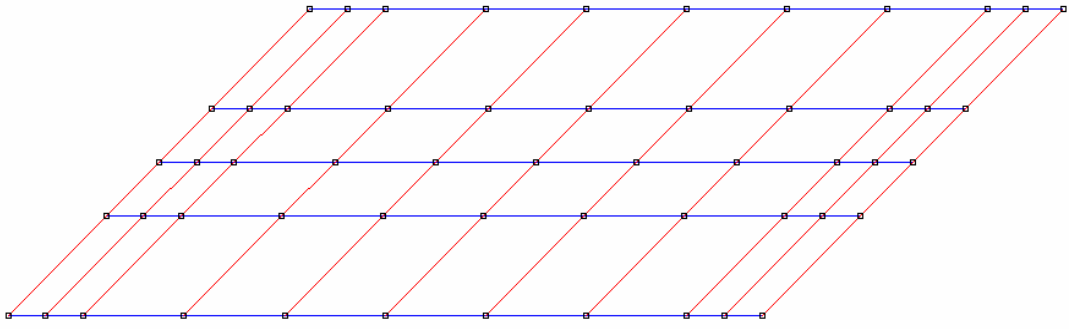
Grillage

No.	Panel X Length
1	1.5
2	1.5
3	4
4	4
5	4
6	4
7	4
8	4

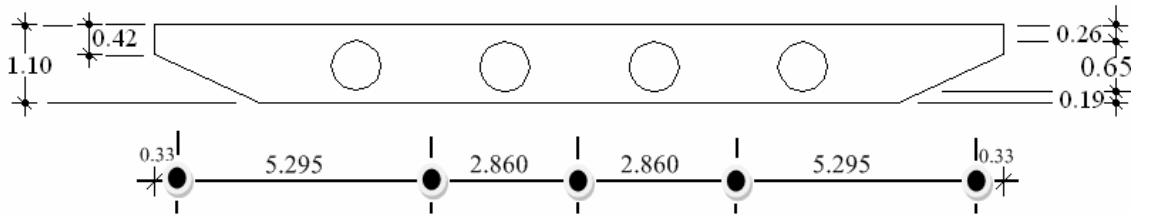
No.	Panel Y Length
1	5.295
2	2.860
3	2.860
4	5.295

OK Cancel

Şekil 3.17. (X) ve (Y) Eksenlerindeki Her Bir Panelin Uzunluğunun Programa Girilmesi.



Şekil 3.18. Oluşturulan Izgara Sistemin Plan Görünüşü.



Şekil 3.19. Boyuna Doğrultudaki Izgara Elemanlarının En Kesitte Yerleşimi.

* (Ölçüler metre cinsindendir).

Birim genişlik için boyuna doğrultuda atalet (I_x);

Plak en kesiti öncelikle tamamen dikdörtgen kesit olarak alınıp, dairesel boşluklar ile başlık kısımlarının altındaki üçgen alanlar bu kesitten düşülerek atalet elde edilmiştir.

$$I_x = \frac{bt^3}{12} - \frac{\pi R^4}{64} - \frac{lh^3}{36}$$

$$I_x = \frac{1 \times 1.1^3}{12} - \frac{\pi \times 0.65^4}{64} - \frac{1.50 \times 0.68^3}{36}$$

$$I_x = 0.11 - 0.009 - 0.013$$

$$I_x = 0.088 \, m^4$$

İzotropik plaklar ile boşluk çapı, plak kalınlığının %60'ından küçük olan boşluklu plaklarda, enine ataletin boyuna ataletle eşit olduğu düşünülürse, birim genişlik için enine doğrultuda atalet (I_y);

$$I_y = I_x = 0.088 \, m^4$$

$$J_x = J_y = 2 \times I_x = 2 \times 0.088 = 0.176 \, m^4$$

St. Venant burulma ataleti (Torsiyonel sabit, J) için, Hambly (1991) de şu ifadeyi önermiştir;

$$J^{izgara} = 2 \times \sqrt{i_x^{plak} \cdot i_y^{plak}}$$

Bu ifade, aynı zamanda *Huber Yaklaşımı* olarak da bilinmektedir.

Boyuna doğrultudaki iç elemanlar için;

$$I_x = 2.97 \times 0.088 = 0.2614 \, m^4$$

$$J_x = 2.97 \times 0.176 = 0.5228 \, m^4$$

Boyuna doğrultudaki kenar elemanlar için;

$$I_x = 5.51 \times 0.088 = 0.4849 \, m^4$$

$$J_x = (5.51 - 0.33) \times 0.176 = 0.9117 \, m^4$$

Torsiyon sabiti (J), sadece kenar bölgedeki kesme kuvvetlerinin içerisindeki genişlik için hesaplanır. Bir başka deyişle, burada kenar elemanı tutarlıdır.

Orta açıklığa yakın olan enine doğrultudaki iç elemanlar için;

$$I_y = 4.00 \times 0.088 = 0.352 \, m^4$$

$$J_y = 4.00 \times 0.176 = 0.704 \, m^4$$

Enine doğrultudaki kenar elemanlar için;

$$I_y = 1.50 \times 0.088 = 0.132 \, m^4$$

$$J_y = (1.50 - 0.33) \times 0.176 = 0.206 \, m^4$$

Plak kalınlığı; $t = 1.10 \, m$,

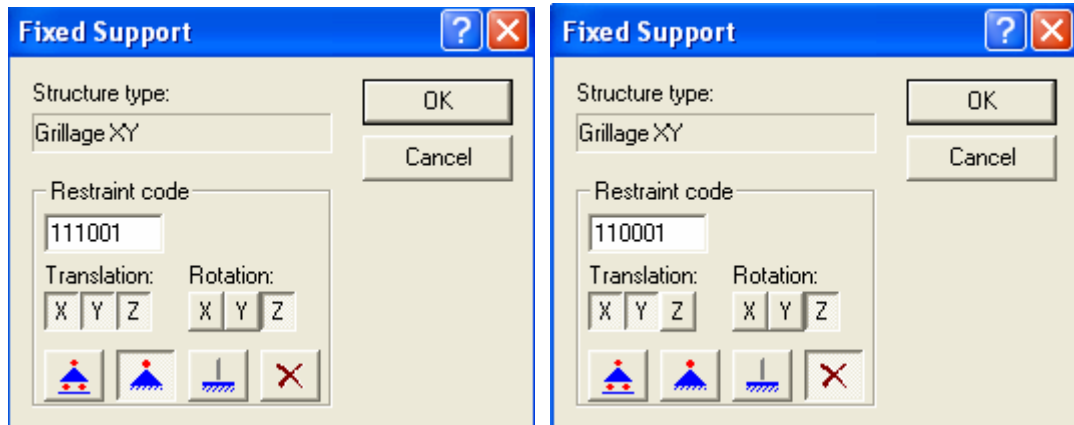
Enine doğrultudaki iç ızgara elemanları arası mesafe, $d = 4.00 \, m$

Alan; $A = t \times h_i = 1.10 \times 4.00 = 4.40 \, m^2$

$$I = \frac{t^3 \times d_i}{12} = \frac{1.10^3 \times 4.00}{12} = 0.444 \, m^4$$

$$J = \frac{t^3 \times d_i}{6} = \frac{1.10^3 \times 4.00}{6} = 0.888 \, m^4$$

Köprünün kenar mesnetlerinden biri sabit, diğeri hareketli olarak tanımlanmıştır. Programda farklı mesnet koşulları, farklı kodlar ile ifade edilmektedir. Bu analizde sabit mesnet için 111001, hareketli mesnet için 110001 kodu kullanılmıştır. *Structure-Attributes-Fixed Supports* menüsü ile mesnet şartları tanımlanır.



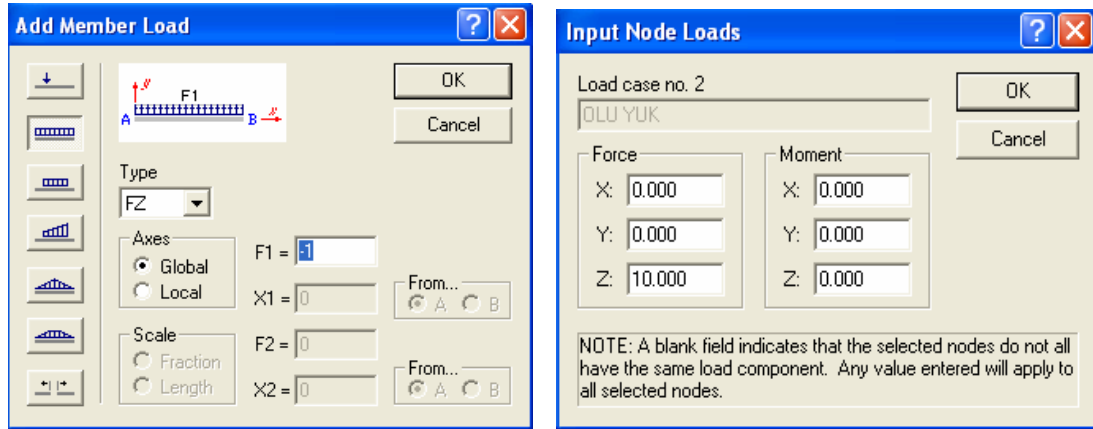
Şekil 3.20. Mesnet Şartlarının Tanımlanması.

En kesitin programa tanıtılması için, Microstran programının hazır en kesitler içeren kütüphanesi mevcuttur. Kütüphaneyi düzenlemek veya yeni kesitler tanımlamak için, *File-Configure-Section Library Manager* komutu kullanılır. Bu menüde, en kesit için farklı geometrik şekiller tanımlamak mümkündür. Burada kesite ait en kesit alanı (A), St. Venant torsiyon sabiti (J), (X) eksenini doğrultusundaki atalet momenti (I_x) gibi geometrik parametreler, *compute* seçeneği ile hesaplanmaktadır ve normal, sadece basınca veya sadece çekmeye çalışan, kablo veya boşluk elemanlar tanımlanabilir. Bunun için *Structure-Attributes-Member Type* komutu kullanılır.

Yapının öz ağırlığı, yerçekimi kuvveti, seçilen elemanlara ve alanlara düzgün veya trapez yayılı yük etkisi, programa manuel olarak girilebilmektedir.

Hareketli yükte ise, *Loads-Moving Loads-Beam* ve *Loads-Moving Loads-Grillage* menüleri ile kiriş ve ızgara için tanımlama yapılabilir. Ancak mevcut sürüm öğrenci versiyonu olduğundan dolayı bu versiyonda hareketli yük tanımlamasına program tarafından izin verilmemektedir.

Programda ayrıca şerit tanımlaması yapılabilmekte ve mevcut kamyon türleri hareketli yük olarak tanımlanabilmektedir.

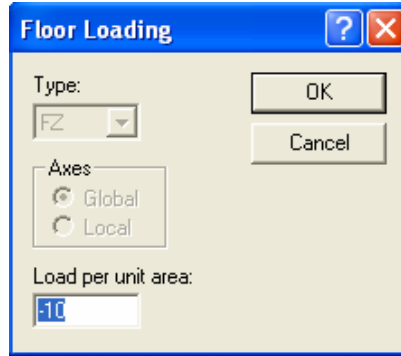


(a)

(b)

Şekil 3.21.(a) Elemanların Yüklenmesi,
(b) Düğüm Noktalarına Yük veya Moment Girilmesi.

Programda ayrıca belli bir bölge seçilerek o bölge için birim alan yüklemesi de yapılabilmektedir.



Şekil 3.22. Alan Yükleme.

Program; doğrusal elastik analiz, doğrusal olmayan analiz, dinamik analiz gibi analizleri gerçekleştirebilmektedir. Bu ızgara analojisi çalışmasında doğrusal analiz seçeneği kullanılmıştır.

Analiz sonrasında ise programdan detaylı rapor alınabilmektedir. Betonarme analizi için rapor otomatik olarak oluşturulurken, çelik analizinde manuel olarak alınabilmektedir ve her bir düğüm noktasında ve elemanlardaki deformasyonlar, yer değiştirmeler vb görülebilmektedir. Bunun için *File-List/Edit File* menüsü kullanılabilir. Diyagramları göstermek için ise; *View-Display Options* menüsü kullanılır.

Bu bölümde, geometrik özellikleri farklı dört adet köprünün ölü yük etkisi altındaki maksimum eğilme moment değerleri elde edilmiştir. Sonuçlar Tablo 3.1’de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, dördüncü bölümde ele alınan sonlu elemanlar analizi sonuçları ile kıyaslanacaktır.

Bu çalışmada Izgara Analojisi Metodunun kullanılmasının amacı ise Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ile gerçekleştirilen modellemenin uygunluğunu doğrulamaktır.

Tablo 3.1. Izgara Analojisinden Elde Edilen Sonuç Momentler.

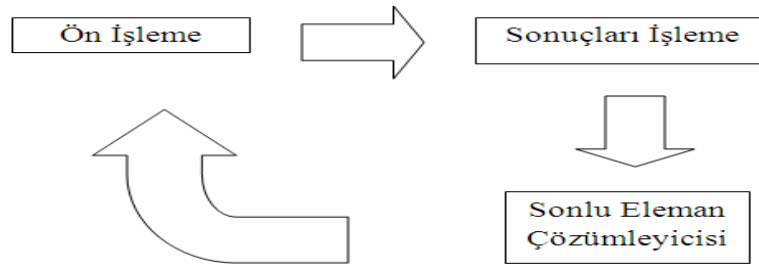
Verevlik Açısı (θ°)	Derinlik t (m)	Boşluk Çapı R (m)	Açıklık L (m)	Izgara Analojisinden Elde Edilen Ölü Yük Eğilme Momenti Değerleri (kNm)
15	0.60	0.40	15	2852.67
30	0.80	0.50	20	6374.55
60	1.00	0.60	25	11169.72
45	1.10	0.65	30	14643.62

4. BÖLÜM

SONLU ELEMENLAR METODU (SEM) İLE BOŞLUKLU VEREV PLAK KÖPRÜLERİN ANALİZİ

4.1. Giriş

Mühendislik uygulamalarında ortaya çıkan problemler genellikle doğrusal analizle çözülemez. Problem, daha küçük problemlere ayrılarak daha anlaşılır hale getirilmeye çalışılır. Problemin tam çözümü yerine kabul edilebilir seviyede bir yaklaşık çözümü yapılır. Bazı problemlerde yaklaşık çözüm tek yol olarak benimsenir. Örneğin; gerilme analizi üzerine çalışan mühendisler gerilme problemini basit kiriş, plak, silindir gibi geometrisi bilinen benzer şekillerle sınırlarlar. Bu çözümler çoğu kez gerçek problemin yaklaşık çözümüdür. Sonlu Elemanlar Metodu; nümerik bir metod olup, özellikle katı mekaniği problemlerinin bilgisayar yardımıyla çözümünde kullanılan çok gelişmiş bir tekniktir. Bu yöntemde sonlu modeller sonsuz sayıda elemanlara bölünür. Bu elemanlar belli noktalardan birbirleriyle bağlanır, buna düğüm (node) denir. Katı modellerde her bir elementteki yer değiştirmeler doğrudan düğüm noktalarındaki yer değiştirmelerle ilişkilidir. Düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler ise elementlerin gerilmeleriyle ilişkilidir. Sonlu Elemanlar Metodu bu düğümlerdeki yer değiştirmeleri, enerji değişim ilkeleri veya kuvvetlerin dengesi yöntemlerini kullanarak çözmeye çalışır [41].



Şekil 4.1. Sonlu Elemanlar Sistemi.

Sonlu Elemanlar Metodu, bir bileşeni daha küçük bileşenler grubuna, bir başka deyişle sonlu elemanlar grubuna ayırma temeline dayanır. Elemanın türüne bağlı olarak, ötelenme ve dönmeler her elemanın kenarında veya köşesinde değişkenlik gösterir. Bu yer değiştirmeler genel olarak “Serbestlik derecesi” ile tanımlanır. Analizin basit çıkışı (output), her bir düğüm noktasındaki yer değiştirmelerdir. Bu yer değiştirmeler, düğüm noktalarında daha sonra kuvvetlere dönüşür. Kuvvetler translasyonel (ötelenmeli) serbestlik derecesine tekabül ederken, rotasyonel (dönmeli) serbestlik derecesine tekabül eden kuvvet çıkışı ise, moment formatındadır.

Yakın geçmişe kadar ancak pahalı deneysel yöntemlerle incelenebilen bazı mühendislik problemlerinin analizi, Sonlu Elemanlar Metodunun gelişmesi ve bilgisayarların sanayiye girmesiyle birlikte günümüzde artık oldukça basit, kolay, süratli ve optimum olarak gerçekleştirebilmektedir [41].

4.2. SEM ile Köprü Analizi

Sonlu Elemanlar Metodunun üç temel niteliği vardır [42]:

- Geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi sonlu elemanlar olarak adlandırılan basit alt bölgelere ayrılır,
- Her elemandaki sürekli fonksiyonların, cebirsel polinomların lineer kombinasyonları olarak tanımlanabileceği kabul edilir,
- Her eleman içinde sürekli olarak tanım denklemlerinin düğüm noktalarındaki değerlerinin elde edilmesi, problemin çözümünde yeterlidir.

Sürekli ortamın alt bölgeleri de aynı karakteristik özellikleri gösteren bölgeler olduğundan, bu bölgelere ait denklem takımları birleştirildiğinde bütün sistemi ifade eden denklem takımı elde edilir. Denklem takımının çözümü ile sürekli ortamdaki alan değişkenleri sayısal olarak elde edilmiş olur [42].

Sonlu Elemanlar Metodunu diğer nümerik metotlardan üstün kılan başlıca unsurlar şöylece sıralanabilir:

- Kullanılan sonlu elemanların geometrik şekillerinin çok çeşitli ve değişken olması nedeniyle ele alınan bir cismin geometrisi tam olarak temsil edilebilir,

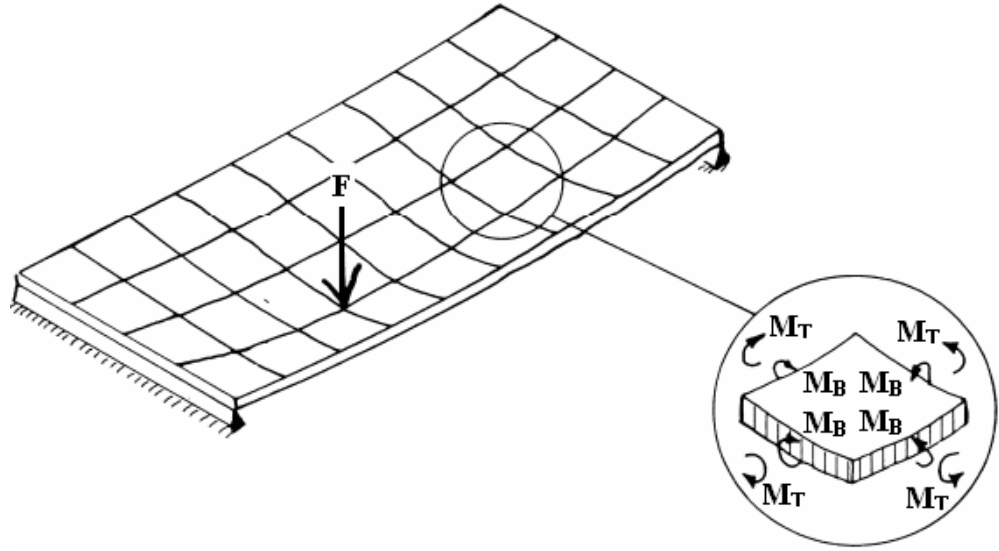
- Bir veya birden fazla boşluk veya köşeleri olan bölgeler ile değişik malzeme ve geometrik özelliklere sahip cisimler incelenebilir,
- Sebep sonuç ilişkisine ait problemlerin genelleştirilmiş kuvvetler ve yer değiştirmeler cinsinden formüle edilebilmesi problemin anlaşılmasını ve çözülmesini mümkün kılarak problemi basitleştirir,
- Sınır şartları kolayca uygulanabilir.

Sonlu Elemanlar Metodunda kullanılan elemanlar boyutlarına göre dörde ayrılabilir [43]:

- Tek boyutlu elemanlar: Tek boyutlu olarak ifade edilebilen problemlerin çözümünde kullanılır. Örneğin noktasal elemanlar gibi.
- İki boyutlu elemanlar: İki boyutlu problemlerin çözümünde kullanılır. Bu grubun temel elemanı üç düğüm noktalı üçgen elemandır. İki üçgen elemanın birleşmesiyle meydana gelen dörtgen eleman, problemin geometrisine uyum sağladığı ölçüde kullanışlılığı olan bir elemandır [41]. Bu tür elemanlara plaklar ve kabuklar örnek verilebilir.
- Dönel elemanlar: Eksenel simetrik özellik gösteren problemlerin çözümünde kullanılır. Bu elemanlar bir veya iki boyutlu elemanların simetri eksenini etrafında bir tam dönme yapmasıyla oluşurlar ve esasen üç boyutlu olup, eksenel simetrik problemleri iki boyutlu problem gibi çözme imkânı sağladıklarından dolayı kullanışlı elemanlardır.
- Üç boyutlu elemanlar: Bu grupta en temel eleman üçgen piramittir. Bunun dışında dikdörtgenler prizması ve daha genel olarak altı yüzlü elemanlar da üç boyutlu problemlerin çözümünde kullanılan eleman türlerine örnek olarak verilebilir [41]. Dolu gövdeli elemanlar da bu gruba girer.

4.3. Boşluklu Verev Plak Köprülerin Sonlu Eleman Modellemesi

Plak köprülerin fiziksel davranışı Şekil 4.2’de görüldüğü şekildedir.



Şekil 4.2. Her İki Doğrultudaki Eğilme ve Torsiyon ile Döşeme Plağındaki Yük Dağılımı.

Plakların çözümü için Sonlu Elemanlar Metodunun kullanımı ile ilgili olarak günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır (Bell, 1969; Irons, 1969), [44]. Bu çalışmaların büyük bir çoğunluğu, şekil değiştirmeden önce plak orta düzlemine dik olan kesitlerin şekil değiştirmeden sonra da plak orta düzlemine dik kaldığı varsayımına dayanan; bir başka deyişle Bernoulli-Navier hipotezinin geçerli olduğu kabulüne dayanan; ince plaklar teorisine, yani Kirchhoff plağı kabulüne dayanmaktadır [44].

Plakların iki boyutlu analizi, S.D. Poisson (1781–1840) ve sınır şartlarını dikkate alarak bu çalışmayı modifiye eden G.R. Kirchhoff (1824–1887) tarafından ortaya konan yüklü bir plağın eğilmesini ifade eden;

$$D\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right) = q \dots\dots\dots(4.1)$$

diferansiyel denklemin çözümü esasına dayanır.

Burada;

w = Plağın yanal deformasyonu,

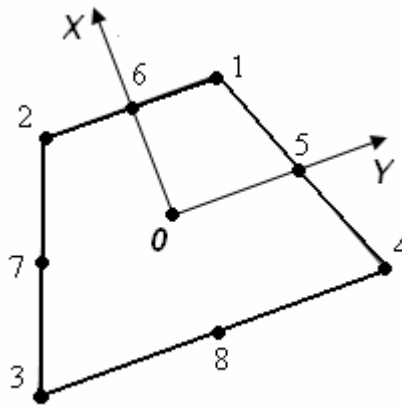
q = Yükün şiddeti ve

D = Plağın eğilme rijitliğidir.

Plak, kendi düzlemi içerisindeki bütün doğrultularında rijitliği aynı ise izotropik plak olarak anılır. Rijitlikleri arasında dik açı bulunup iki doğrultu boyunca rijitlikleri farklı ise ortotropik plak olarak anılır [2 ve 17]. Bir boşluklu vev plak köprü, ortotropik plaktır. Köprü tipine, plan geometrisine ve mesnet koşullarına göre uygulanabilecek çok çeşitli analiz yöntemleri vardır. İki boyutlu analiz yöntemlerinde köprü döşemesi, bir düzlem plak veya birbirine bağlanmış kirişlerin açık ızgarası olarak idealize edilir [2]. Sonraki yıllarda bilgisayarların yaygınlaşmasıyla bilgisayar destekli üç boyutlu analizlere başvurulmuştur [17].

Sonlu elemanlar yönteminde plak bir yapı aşağıdaki elemanlar kullanılarak modellenir.

Plak Elemanlar: Plak elemanlar; plak bileşeninin kalınlığı, diğer iki boyutuna göre küçük kabul edilerek geliştirilmiştir. Plak, orta düzlemine göre modellenmiştir. Genel plak teorisine göre, plak elemanların her bir düğüm noktasında üç adet yer değiştirmeye izin verdiği varsayılır. Bunlar; plağa dik yönde dönme ve plak düzlemi içerisindeki iki adet dikey ekseninde meydana gelen dönmelerdir. Tipik bir plak çıktısı, genellikle elemanların orta düzlemindeki birim genişlikteki moment ve kesme kuvveti şeklindedir. Bu kesit etkileri boyutlamada doğrudan kullanılabilir [28].

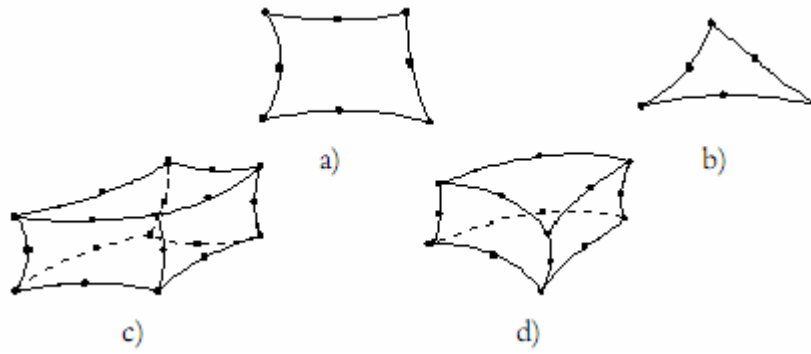


Şekil 4.3. Plak Sonlu Eleman Modeli.

Kabuk Elemanlar: Kabuk elemanlar; bileşeninin kalınlığı, diğer iki boyutuna göre küçük kabul edilerek plak elemanlar gibi orta yüzeylerine göre geliştirilmiştir. Kabuk elemanların her bir düğüm noktasında altı adet serbestlik derecesi, yani üç adet

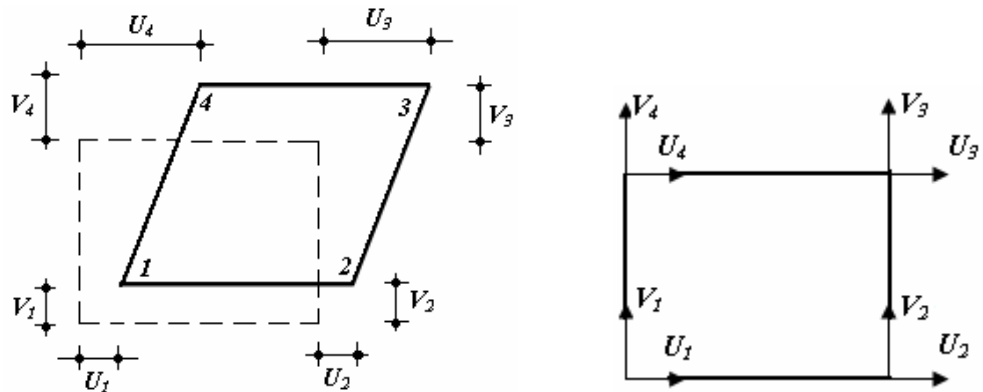
ötelenme, üç adet dönme etkisi olduğu kabul edilmiştir ve kabuk elemanlar bu özellikleri ile plak elemanlardan ayrılır [28].

Dolu Gövdeli Elemanlar: Dolu gövdeli elemanlar, hem ince hem de kalın bileşenlere sahip modellerde kullanılabilir. Bileşenin kalınlığı birkaç tabakaya bölünebilir veya döşemelerde olduğu gibi ince bileşenler için tek tabaka kullanılarak modellenebilir [28].



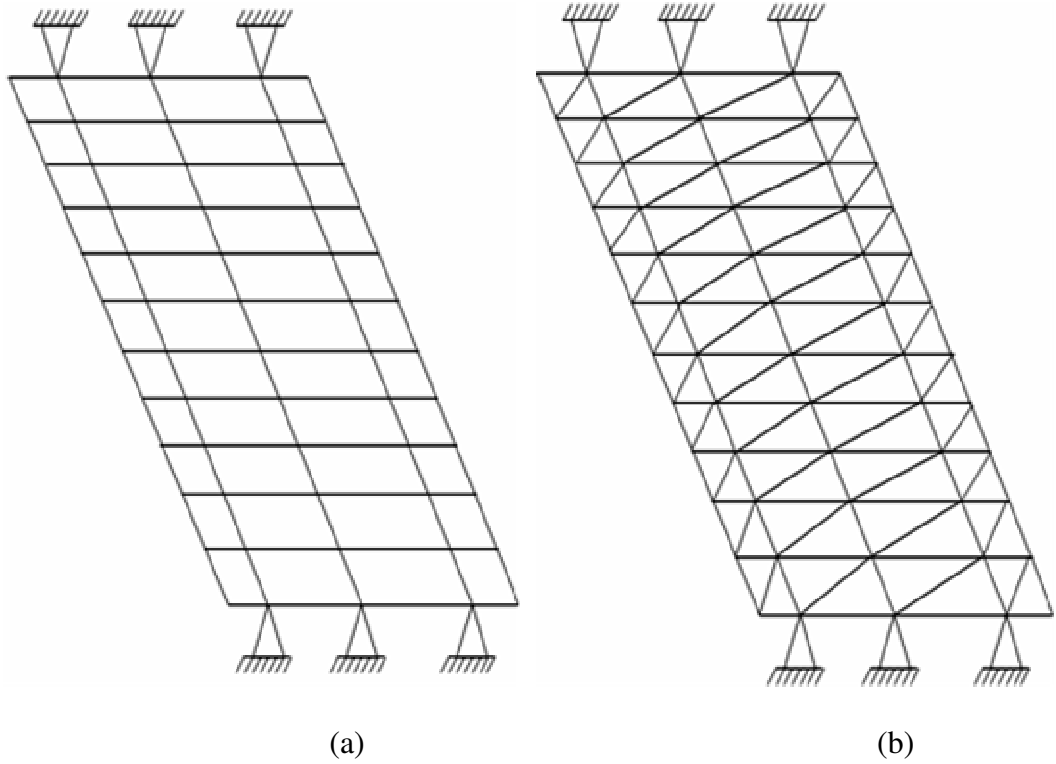
Şekil 4.4. Diğer Sonlu Eleman Modelleri; (a) 8 düğüm noktalı kabuk eleman, (b) 6 düğüm noktalı kabuk eleman, (c) 20 düğüm noktalı dolu gövdeli eleman, (d) 15 düğüm noktalı dolu gövdeli eleman [30].

İki boyutlu elemanlarda her düğüm noktası dört adet serbestlik derecesine sahiptir. Bunların ikisi yer değiştirmeleri (u ve v), ikisi ise dönmeleri (R_x ve R_y) ifade eder. Üç boyutlu elemanlarda ise her düğüm noktası altı adet serbestlik derecesine sahiptir. Yer değiştirmeler u, v ve w ; dönmeler R_x, R_y ve R_z 'dir.



Şekil 4.5. Dörtgensel Eleman Üzerindeki Düğüm Noktası Yer Değiştirmeleri [10].

Verev döşemelerin Sonlu Elemanlar Metoduna göre modellenmesi de, verev olmayan döşeme sistemleri için yapılan önerilere göre yapılır. Genellikle elemanlar iki boyutlu olarak kabul edildiği için ve dolayısı ile iki boyutlu davranış modelleneceği için kuvvet ve gerilme yönleri için özel bir hususa gerek duyulmaz. Zira verev köprülerin karmaşık yapısından dolayı kuvvet yönlerinin değişkenlik göstermesi söz konusu değildir. Bu durum, özellikle az deneyimli kullanıcıların uygun ızgara modeli formüle etmekte zorlandığı durumlarda Sonlu Elemanlar Metodunun Izgara Analojisine olan üstünlüğüdür [13].



Şekil 4.6. Verev Köprüler İçin Sonlu Eleman Ağları; a) Verev dörtgensel sonlu elemanlar, b) Alternatif üçgensel sonlu elemanlar [13].

Verev dörtgen elemanlar, dikdörtgen elemanlar kadar doğru sonuçlar verebilmektedir ve bunların uygulaması çok kolaydır. Bununla birlikte, büyük verevliğe sahip dörtgen elemanlar, küçük açıları kapsayan hesaplamalardan dolayı yuvarlanmış hatalarla sonuç verebilir. Bazı durumlarda, üçgen elemanlar daha etkin olabilir [13].

Büyük verevlik açlarına sahip plakların analizi yapılırken, doğru bir analiz yapmak için, ağ düzenlemesi gereklidir. Ek olarak, daha karmaşık sapma şekilleri, yaklaşık

doğru davranışı bulma adına daha fazla eleman gerektirir. Verevlik biçimleri tamamen paralelkenar ya da yamuk gibi verev elemanlardan oluşur [31].

4.4. Boşluklu Verev Plak Köprülerin SAP2000 Yazılımı ile Analizi

Bu çalışmada ele alınan model köprünün sonlu elemanlar analizi SAP2000 yazılımı v11 sürümü ile yapılmıştır [45].

Köprülere etkiyen yükler; taşıyıcı elemanların kendi ağırlığı, kalıcı sabit yükler, taşıt ve yaya yükleri gibi hareketli yükler, sıcaklık, rüzgâr, deprem, frenleme, demeraj (ilk hareket), merkezkaç ve çarpışma sonucu ortaya çıkan ani yükler olarak sıralanabilir [1 ve 2]. Ülkemizde köprü tasarımı dikkate alınacak yükleri, TCK Şartnamesi olarak anılan “*Karayolları Genel Müdürlüğü, Yol Köprüleri için Teknik Şartnamesi*” düzenler [46]. Kanada Şartnamesi olarak bilinen *OHBDC (Ontario Highway Bridge Design Code)* ve Amerikan Şartnamesi olarak bilinen *AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)* şartnameleri ise dünyaca kabul görmüş diğer önemli şartnamelerdir. Bu çalışma kapsamında, adı geçen bu şartnamelerden de yararlanılmıştır [21 ve 47].

Bu çalışmada, SAP2000 v11 yazılımı ile model köprüye kendi ağırlığı, kalıcı ölü yükler ve taşıt tekerlek yüklerinden etki eden hareketli yükler etki ettirilerek ölü ve hareketli yüklerden doğan eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri elde edilmiştir. Birim sistemi olarak SI uluslararası birimler sistemi kullanılmıştır. Buna göre; birim genişlikteki eğilme momentleri için kNm/m ve kesme kuvvetleri için kN/m kullanılmıştır.

4.4.1. Boşluklu Verev Plak Köprünün Modellenmesi

Ele alınan köprü modelinin SAP2000 v11 yazılımı ile analizinde kullanılan geometrik parametreler aşağıda verildiği şekildedir.

Köprü Açıklığı (L): Mesnetler arası temiz açıklıktır. Bu modelde L, 30.00 m olarak alınmıştır. Çalışmanın genelinde ise 15 m ile 35 m arasında yer alan köprü açıklıkları 2.5 m’lik adımlarla (15 m, 17.5 m, 20 m, 22.5 m, 25 m, 27.5 m, 30 m, 32.5 m, 35 m gibi)

artırılarak farklı sayıda köprü çözümü gerçekleştirilmiştir. Bu çözümlerden elde edilen veriler, ileriki bölümlerde Yapay Sinir Ağları (YSA) uygulamasında kullanılacaktır.

Köprü Dik Genişliği (W): Solid eleman olarak modellenen köprü üst yapısının trafik akışına dik doğrultuda uzanan birimidir. Bu çalışmada ele alınan modelde köprü dik genişliği olarak 12 *m* alınmıştır.

Köprü Verevine Genişliği (B): Solid eleman olarak modellenen köprü üst yapısının trafik akışı ile 45°'lik açı yapan genişliğidir. Bu çalışmada ele alınan modelde köprü verevine genişliği 16.97 *m*'dir.

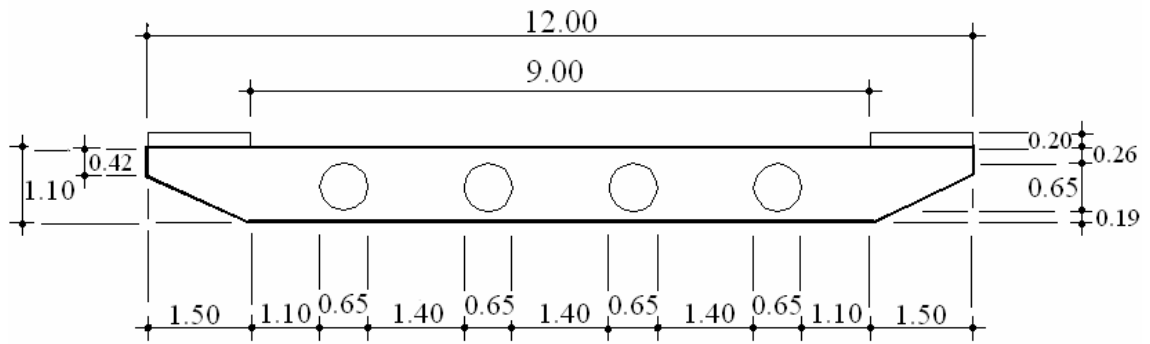
Verevlik Açısı (θ): Köprü mesnetlerinin simetri eksenine ile yolun simetri eksenine dik çizgi arasındaki açıdır. Bu modellemede verevlik açısı 45° olarak alınmıştır. Çalışmanın genelinde ise 15°, 30°, 45° ve 60° olmak üzere dört farklı verevlik açısı kullanılarak veri üretilmiştir.

Plak Kalınlığı (t): Solid eleman olarak modellenen köprü üst yapısını oluşturan döşeme plağının derinliğini ifade etmektedir. Bu modellemede plak kalınlığı olarak 1.10 *m* alınmıştır. Çalışmanın genelinde ise plak kalınlıkları, köprü açıklığına bağlı olarak 0.40 *m* ile 1.40 *m* arasında değişmektedir.

Boşluk Çapı (R): Plak ölü ağırlığını azaltmak için plak en kesitinde tasarlanan ve köprü boyunca devam eden dairesel boşlukların çapıdır. Boşluk çapı, plak kalınlığına bağlı seçilmelidir ancak boşluk çapının plak kalınlığına oranı ile ilgili, farklı kaynaklarda farklı bilgiler mevcuttur. Bazı kaynaklara göre; (R/t) oranı 0.60 ile 0.80 arasında olmalıdır, bazılarına göre ise 0.40 ile 0.60 arasında olmalıdır. Eğer belirtilen oranlar aşılsa; köprü plağı boşluklu plaktan ziyade hücresel plak gibi davranacaktır. Bu modelleme ve çalışmanın geneli için boşluk çapının plak kalınlığına oranının 0.40 ile 0.60 arasında olmasına özen gösterilmiştir. Bu modellemede boşluk çapı 0.65 *m* olarak alınmıştır. Çalışmanın genelinde ise boşluk çapı plak kalınlığına bağlı olarak 0.25 *m* ile 0.80 *m* arasında değişmektedir.

Program çalıştırıldığında açılan diyalog penceresinde önce birimler sistemi seçilir ve köprünün yerleştirileceği yerleşim çizgisi tanımlanır. Sonra kullanılacak malzeme belirlenerek beton ve çelik sınıfları tanımlanır. SAP2000 v11 yazılımında istenen beton

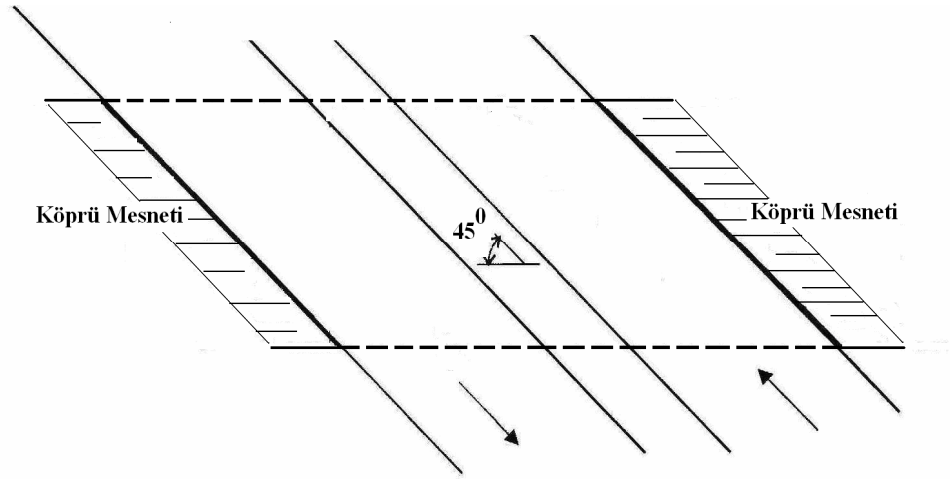
ve çelik sınıfları doğrudan mevcut olmadığından bu sınıflar, mevcut en yakın sınıflar seçilerek oluşturulmuştur. Beton (concrete) için öncelikle Normalweight Chinese C40 (Normal ağırlıklı Çin Halk Cumhuriyeti Standardı C40) betonu seçilmiş ve bu beton sınıfı, C45 olarak modifiye edilmiştir. Karakteristik basınç dayanımı (f'_c) 45000 kN/m^2 olarak girilmiştir. Çelik için ise; öncelikle Chinese Q345 (Çin Halk Cumhuriyeti Standardı Q345) çeliği seçilmiş ve bu çelik de S500 olarak modifiye edilmiştir. Minimum akma gerilmesi (f_y) 500000 kN/m^2 olarak girilmiştir.



Şekil 4.7. Köprü Modelinin En Kesiti.

*(Ölçüler metre cinsindendir).

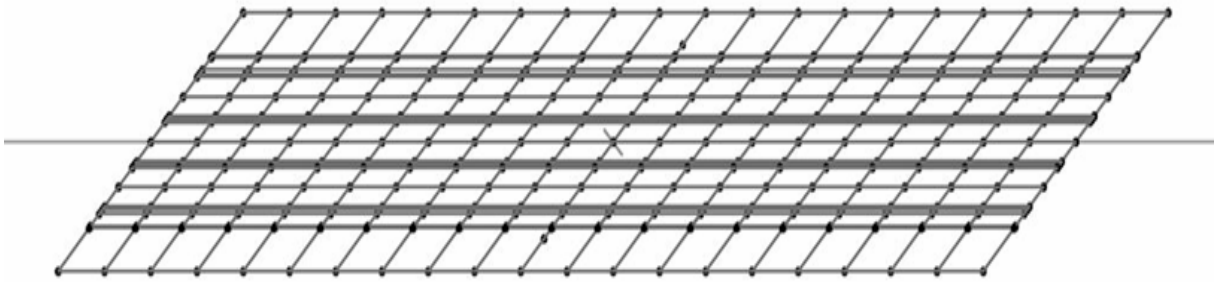
Köprü dik genişliği (12 m), plak kalınlığı (1.10 m) programa tanıtılmıştır. Boşluk çapı 0.65 m olduğundan dolayı en kesitin boşluklu bir kesitindeki dolu gövdeli kısmın yüksekliği 0.45 m olacaktır. OHBDC şartnamesine göre; boşluk üst kısmının uzunluğunun alt kısmının uzunluğuna oranı 1.385'dir [22]. Bu koşula bağlı kalınarak boşluk üst kısmı 0.26 m, boşluk alt kısmı 0.19 m olarak girilmiştir. Kenarlardaki boşluklar ile başlık başlangıç noktası arası mesafe 1.00 m olarak belirlenmiştir. Boşluklar arası yatay mesafe ise; OHBDC şartnamesine göre (0.12B) olmalıdır [22]. Bu koşula bağlı kalınarak bu mesafe 1.40 m olarak girilmiştir. Başlık uzunluğu ise OHBDC şartnamesine göre (0.15B), yani 1.80 m olmalıdır ancak bu uzunluk boşluklar ile başlık arası mesafeyi arttırmak amacı ile 1.50 m'de tutulmuştur [22]. Başlık uzunluğu aynı zamanda tretuvar uzunluğu olarak kabul edilmiştir. Başlık kalınlığı ise OHBDC şartnamesine göre (0.38t) olmalıdır ve buna bağlı kalınarak başlık kalınlığı 0.42 m olarak belirlenmiştir [22]. Bu durumda başlığın altındaki kısmın yüksekliği de 0.68 m olacaktır.



Şekil 4.8. Köprünün Plandaki Görünüşü.

*(Model Köprü, kesikli çizgilerle gösterilmiştir).

Model köprü iki açıklıklı, açıklıkları birbirine eşit, hiperstatik bir köprüdür. Buna göre kenar mesnetlerden biri sabit, diğer kenar mesnet ile orta ayak hareketli olarak tanımlanmıştır. Sabit mesnet için yer değiştirmeler (U_1, U_2, U_3) sabitlenip dönmeler (R_1, R_2, R_3) serbest tanımlanmıştır. Hareketli mesnetler için ise U_1 ile U_3 sabitlenmiş, U_2 ile dönmeler (R_1, R_2, R_3) serbest bırakılmıştır. Kenar mesnetler ve orta ayak, 45° döndürülerek vevlik elde edilmiştir.



Şekil 4.9. Solid Elemanlara Bölünmüş Köprü Plağının Program Ana Penceresinde Görünümü [45].

Köprü modeli solid olarak seçilmiş ve tercih edilen maksimum ağ boyutu 3 m olarak girilmiştir. Ağ boyutunun azaltılması, daha geçerli sonuç verebileceği gibi, işlem yükünü artıracığından modelin çözümü daha fazla zaman alacaktır. Köprü plağının plan

görünüşü yukarıdaki Şekil 4.9'da verilmiştir. Köprü boyuna doğrultusunda yoğun olarak görülen kısımlar plak en kesitindeki boşlukları ifade etmektedir.

4.4.2. Boşluklu Verev Plak Köprü Modelinin Yüklenmesi

Köprünün geometrik olarak modellenmesinin ardından köprü üzerindeki şeritler, köprü boyunca tanımlanmıştır. Köprü en kesit merkezinden şerit orta noktasına olan mesafe (şerit eksantrisitesi) birinci şerit için 2.5 m olarak alınmıştır. Koordinat eksenini düşünüldüğünde bu şerit, en kesite göre sağ tarafta kalan gidiş yönüdür. İkinci şerit için ise, şerit eksantrisitesi -2.5 m'dir. Şerit genişliği ise 3 m olarak girilmiştir. Bu kabul, TCK ve AASHTO 1996 yönetmeliklerine göre yapılmıştır [46 ve 47]. Ancak; oldukça yeni olan AASHTO-LRFD 2007 yönetmeliğinde tasarım şerit genişliğinin 3.60 m olarak kabul edildiği unutulmamalıdır [37]. Kamyon yükleri ve şerit genişlikleri ile ilgili değerler; Ek-1'de (TCK Köprüler Teknik Şartnamesi Standart Kamyonlara ait Geometrik Değerler ve Yükler), Ek-2'de (AASHTO-2002, Standart Kamyonlara ait Geometrik Değerler ve Yükler) ve Ek-3'de (AASHTO-LRFD 2007 Standart Kamyonlara ait Geometrik Değerler ve Yükler) olarak verilmiştir.

Şeritlerin tanımlanmasından sonra, köprüye etki ettirilecek araç türü ile özellikleri belirlenir. Bu çalışmada köprü verev olarak modellendiği için, köprünün yapılacağı bölgenin zorlu arazi koşullarına sahip olduğu düşünülebilir. Çünkü verev köprüler, genellikle doğa olaylarından dolayı düz köprü yapımına müsait olmayan durumlarda tercih edilir. Bu durumda model köprünün şehirlerarası bir karayolu üzerine inşa edileceği düşünülebilir. Şehirlerarası otoyollar da ağır araçların geçişine uygun olduğu için bu çalışmada hareketli yük olarak ağır kamyon sınıfında yer alan, TCK Köprüler Teknik Şartnamesindeki $H_{30}S_{24}$ kamyon yükü etki ettirilecektir [46]. Ancak; SAP2000 yazılımının veritabanında bu kamyon türü doğrudan bulunmadığı için öncelikli olarak veritabanında bulunan 3 dingilli HSn-44 tipi kamyon seçilerek modifiye edilmiştir.

General Vehicle Data

Vehicle Name HSn-44-1

Floating Axle Loads

	Value	Width Type	Axle Width
For Lane Moments	0.	One Point	
For Other Responses	0.	One Point	

☐ Double the Lane Moment Load when Calculating Negative Span Moments

Usage

☒ Lane Negative Moments at Supports
☒ Interior Vertical Support Forces
☒ All other Responses

Min Dist Allowed From Axle Load

Lane Exterior Edge 0.3048
Lane Interior Edge 0.6096

Miscellaneous Parameters

☐ Use BD 37/01 (2002) for Uniform Load Length Effects
☐ Vehicle Applies To Straddle (Adjacent) Lanes Only
Straddle Reduction Factor

Loads

Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Uniform Width Type	Uniform Width	Axle Load	Axle Width Type	Axle Width
Leading Load	Infinite		0.	Fixed Width	3.048	35.5858	Two Points	1.8288
Leading Load	Infinite		0.	Fixed Width	3.048	35.5858	Two Points	1.8288
Fixed Length	4.2672		0.	Fixed Width	3.048	142.3431	Two Points	1.8288
Variable Length	4.2672	9.144	0.	Fixed Width	3.048	142.3431	Two Points	1.8288

Add Insert Modify Delete

☐ Vehicle Remains Fully In Lane (In Lane Longitudinal Direction)

Units KN, m, C

OK Cancel

Şekil 4.10. Programda Seçilen Kamyon Sınıfının Özellikleri [45].

Yazılımda yer alan AASHTO taşıt yüklerinden başka farklı taşıt hareketli yükleri “tip (type)” olarak tanımlanabilir. SAP2000 yazılımı içerisinde yer alan ve Tip Hn-44 ve Tip HSn-44 isimleri ise AASHTO Şartnamesinin standart H ve HS Kamyon yüklemelerini temsil eden standart taşıt tipinin modifiye edilmesi sonucu tanımlanmıştır [18].

Taşıtların ağırlıkları, yükün dingillerden tekerleklerle aktarılmasıyla tekil yük olarak köprüye etki ettirilir.

General Vehicle Data

Vehicle Name H30S24

Floating Axle Loads

	Value	Width Type	Axle Width
For Lane Moments	0.	One Point	
For Other Responses	0.	One Point	

☐ Double the Lane Moment Load when Calculating Negative Span Moments

Usage

☒ Lane Negative Moments at Supports
☒ Interior Vertical Support Forces
☒ All other Responses

Min Dist Allowed From Axle Load

Lane Exterior Edge 0.3048
Lane Interior Edge 0.6096

Miscellaneous Parameters

☐ Use BD 37/01 (2002) for Uniform Load Length Effects
☐ Vehicle Applies To Straddle (Adjacent) Lanes Only
Straddle Reduction Factor

Loads

Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Uniform Width Type	Uniform Width	Axle Load	Axle Width Type	Axle Width
Leading Load	Infinite		0.	Fixed Width	3.048	60.	Two Points	1.8288
Leading Load	Infinite		0.	Fixed Width	3.048	60.	Two Points	1.8288
Fixed Length	4.2672		0.	Fixed Width	3.048	240.	Two Points	1.8288
Variable Length	4.2672	9.144	0.	Fixed Width	3.048	240.	Two Points	1.8288

Add Insert Modify Delete

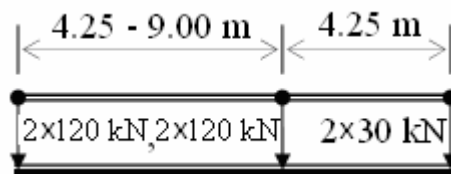
☐ Vehicle Remains Fully In Lane (In Lane Longitudinal Direction)

Units KN, m, C

OK Cancel

Şekil 4.11. Seçilen Kamyon Sınıfının H₃₀S₂₄ Kamyonu Olarak Modifiye Edilmesi [45].

HSn-44 tipi kamyonun dingil yükleri yerine, Ek-1’de yer alan “TCK Köprüler Teknik Şartnamesi Standart Kamyonlara Ait Geometrik Değerler ve Yükler” tablosunda tanımlı olan H₃₀S₂₄ kamyonu dingil yükleri yazılıma girilmiştir [46]. Buna göre kamyon ağırlığı (W) 300 kN’dir. Ön iki tekerlek (0.1W) ve (0.1W) olmak üzere toplam ön dingil yükü (0.2W = 60 kN), arkadaki 4 tekerleğin her biri (0.4W) olmak üzere arkadaki iki dingilin yükleri (0.8W = 240 kN) ile (0.8W = 240 kN) olacaktır. Bu yükleme durumu aşağıdaki Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12. H₃₀-S₂₄ Kamyon Yüğü [46].

Etki ettirilen toplam yükün (1.8W) olduğu düşünülürse, kamyon esas ağırlığının %80 fazlası, toplam kamyon yükü olarak hesaplara katılmaktadır. Bunun da emniyetli bir hesap için yeterli olduğu düşünülebilir. TCK şartnamesinde, taşıt ön ve arka tekerlekler arası uzaklık 4.25 m, arka tekerlekler ve römork tekerlekleri arasındaki uzaklık 4.25 m ile 9.00 m olarak verilmiştir [46]. Kamyonun kasa genişliği 3.00 m, tekerlek aks mesafesi 1.80 m olarak alınır. Taşıtlar arası uzaklık, yani bir taşıt tekerleği ile yanındaki taşıtın tekerleği arasındaki uzaklık ise 1.20 m' dir [14]. Böylece H_{30S24} kamyonu için araç sınıfı (vehicle class) belirlenir.

Analysis Case Data - Moving Load

Analysis Case Name: ML [Set Def Name]

Notes: [Modify/Show...]

Analysis Case Type: Moving Load

Stiffness to Use:

- ☒ Zero Initial Conditions - Unstressed State
- ☐ Stiffness at End of Nonlinear Case

 Important Note: Loads from the Nonlinear Case are NOT included in the current case

MultiLane Scale Factors:

Number of Lanes Loaded	Reduction Scale Factor
1	1
2	1

[Modify]

Loads Applied:

Assign Number	Vehicle Class	Scale Factor	Min Loaded Lanes	Max Loaded Lanes	Lanes Loaded
1	VECL1	1	1	2	All

[Add] [Modify] [Delete]

Lanes Loaded for Assignment 1:

List of Defined Lanes: [Empty Box]

Selected Lanes: LANE1, LANE2

[Add ->] [<- Remove]

[OK] [Cancel]

Şekil 4.13. Köprüye Etkiyecek Hareketli Yük Tanımı [45].

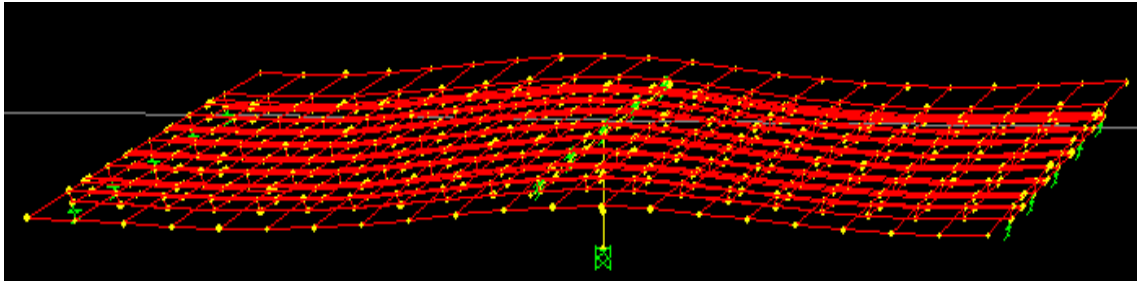
Taşıt hareketli yüklerinin tanımlanmasındaki son aşama ise taşıt sınıflarının trafik şeritleri üzerine etki ettirilmesi durumudur. Bu ise birbirinden bağımsız hareketli yük analiz durumlarının oluşturulması ile mümkündür [18].

Analiz türü Moving Load (Hareketli yük) olarak seçilmiş ve analiz durumuna da ML adı verilmiştir. Daha sonra yüklü şerit sayıları tanımlanmıştır. Yüklenecek minimum şerit sayısı “bir” alınmıştır. Yüklenecek maksimum şerit sayısı da toplam iki şerit tanımlandığından “iki” olarak alınmıştır.

Oran Faktörü (Scale Factor) ise taşıt sınıfının etkisini değiştiren hareketli yük büyütme katsayısıdır [18]. Bu örnek için “bir” olarak alınmıştır. Daha önce tanımlanmış olan şeritler de yüklenecek şeritler olarak eklenmiştir.

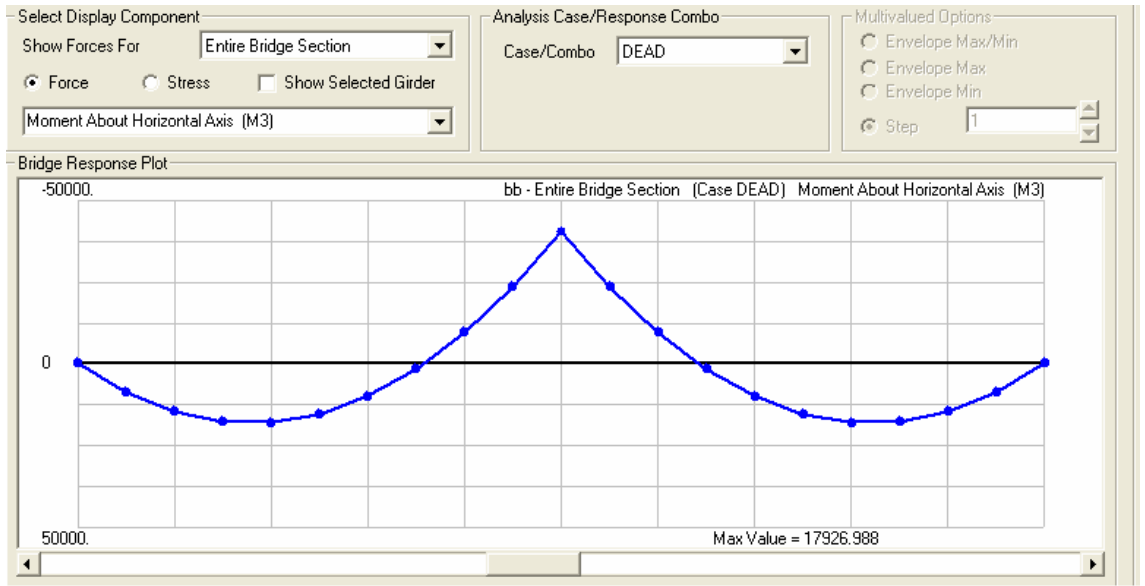
4.4.3. Boşluklu Verve Plak Köprü Modelinin Analiz Sonuçları ve Yorumlanması

Analiz aşamasında; ölü yük ve hareketli yük dikkate alınmıştır. Bu iki yük türü ile analiz yapılmıştır. Analizin tamamlanmasından sonra SAP2000 ana penceresine dönülür. Ekranda, köprünün deforme olmuş hali görülecektir. Bu durum, Şekil 4.14’de verilmiştir.



Şekil 4.14. Analiz Sonrası Köprünün Deforme Olmuş Şeklinin Program Ana Penceresinde Gösterimi [45].

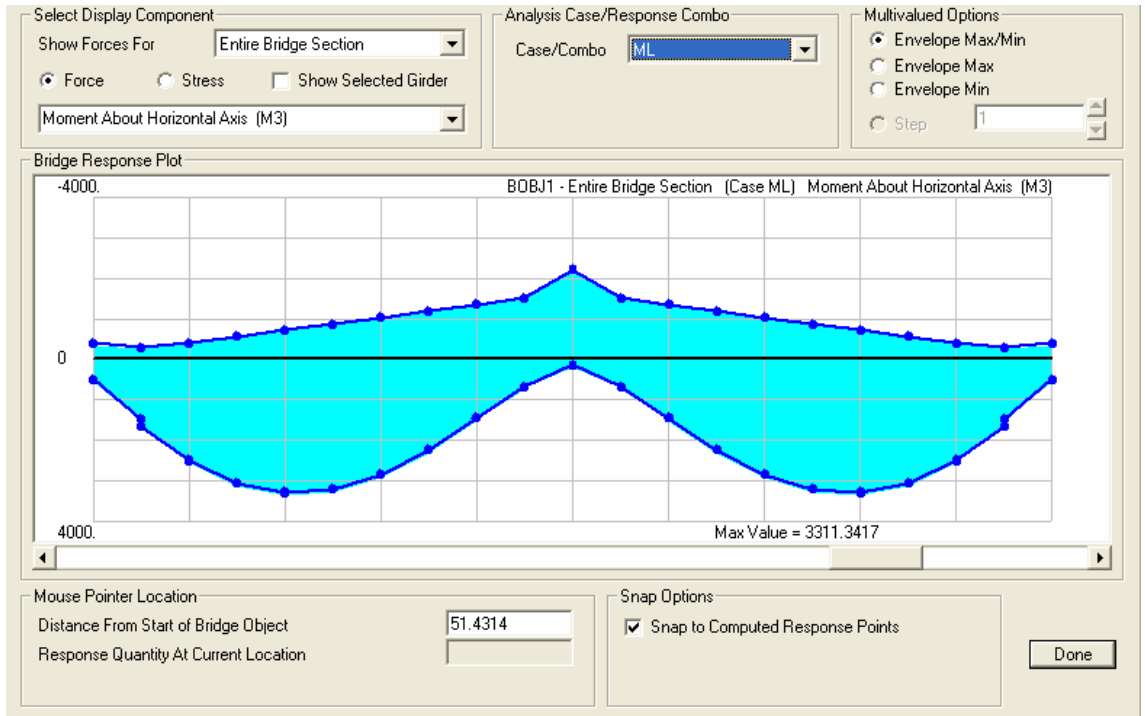
Display-Show Undeformed Shape (Deforme olmamış şekli göster) komutu ile köprünün deforme olmamış hali tekrar gösterilebilir. Display-Show Deformed Shape (Deforme olmuş şekli göster) komutu ile istenirse tekrar deforme olmuş şekle dönülebilir.



Şekil 4.15. Analiz Sonrası Elde Edilen Ölü Yük Eğilme Momenti Diyagramı [45].

Analiz sonrası köprüde oluşan eğilme momentleri, kesme kuvvetleri ve gerilmeler elde edilebilir. Yukarıdaki Şekil 4.15’de ölü yükten dolayı köprü boyunca oluşan eğilme momentleri diyagramı görülmektedir. Aynı ekranda, eğilme momentinin maksimum değeri de verilmiştir. Bir başka deyişle, köprüdeki maksimum ölü yük eğilme moment değeri, açıklıkta 17926.988 kNm olarak görülmektedir.

Hareketli yükten dolayı köprü boyunca oluşan eğilme momentleri diyagramı, Şekil 4.16’da verilmiştir. Diyagramın alt kısmı esas hareketli yük diyagramıdır. Diyagramın üst kısmı, yani negatif momentlerin meydana geldiği kısım ise dingillerin özel durumları dolayısıyla oluşmuştur. Örneğin; bir $H_{30}S_{24}$ kamyonu köprüden geçerken, iki dingilinin orta ayağın sağ ve sol taraflarında kaldığı düşünülürse bu durum, dingillerin bastığı bölgede basınca neden olacağından, aynı zamanda dingillerin arasında kalan orta ayak bölgesinde çekmeye, yani negatif etkiye de neden olacaktır. Negatif eğilme momentinin maksimum değerinin de orta ayak üzerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.16. Analiz Sonrası Elde Edilen Hareketli Yük Eğilme Momenti Diyagramı [45].

Taşıt yüklerinin kenar mesnet bölgelerine yaklaşması durumunda yine belirli bir eğilme momentinin oluşması kaçınılmazdır. Köprüdeki hareketli yük eğilme momentinin en büyük değeri, açıklıkta 3311.3417 kNm olarak görülmektedir.

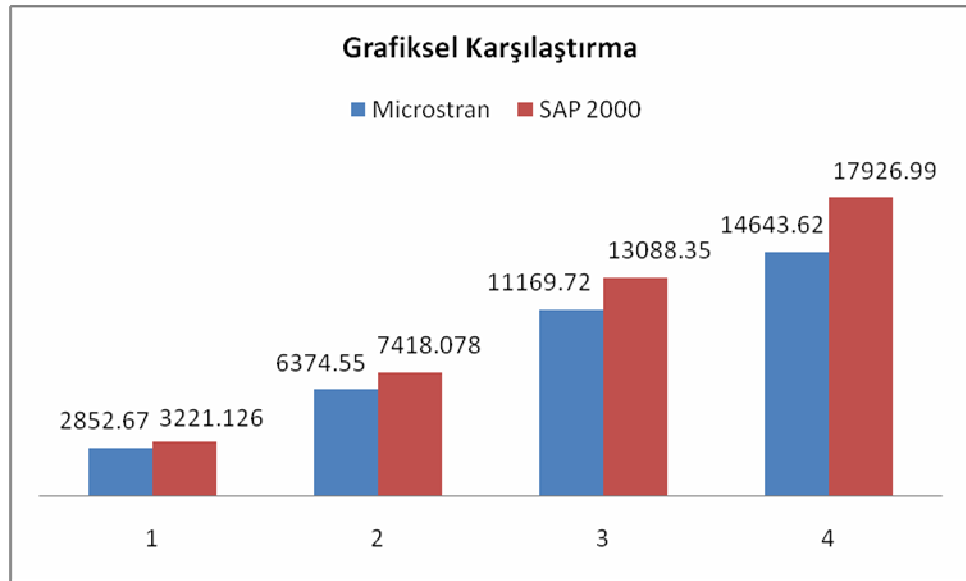
Bu bölümde; Yapay Sinir Ağları (YSA) uygulaması için eğitim ve test verileri elde etmek amacıyla Sonlu Elemanlar Metodu tabanlı SAP2000 yazılımı ile toplam 400 adet farklı köprü çözümü gerçekleştirilmiştir. Analizden elde edilen sonuçlar Ek-4’de verilmiştir.

4.5. Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Üçüncü bölümde ızgara analogisi ile analizi yapılan ve geometrik özellikleri farklı olan dört adet köprünün Sonlu Elemanlar Metodu ile çözümü gerçekleştirilmiş ve sonuçları Ek-4’de verilmiştir. Her iki yöneme göre yapılan analizlerden elde edilen karşılaştırılmalı sonuçlar ise Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Microstran ve SAP2000 Sonuçlarının Karşılaştırılması.

Verevlik Açısı (θ°)	Derinlik t (m)	Boşluk Çapı R (m)	Açıklık L (m)	Microstran'dan Elde Edilen Ölü Yük Eğilme Momenti Değerleri (kNm)	SAP2000'den Elde Edilen Ölü Yük Eğilme Momenti Değerleri (kNm)
15	0.60	0.40	15	2852.67	3221.126
30	0.80	0.50	20	6374.55	7418.078
60	1.00	0.60	25	11169.72	13088.35
45	1.10	0.65	30	14643.62	17926.99



Şekil 4.17. Microstran ve SAP2000 Sonuçlarının Grafiksel Olarak Gösterimi.

Chan (1989), artan verevlik açısının bir fonksiyonu olarak Sonlu Elemanlar Metodu ile Izgara Analojisinin doğruluğunu kalibre etmek amacıyla bir araştırma yapmıştır [23]. Çalışmada; açıklığı 24 m, dik genişliği 12 m ve ana kiriş sayısı altı olan bir köprü analizi yapılmıştır. Verevlik açısı, 15° hassasiyetlidir ve 0° ile 60° arasında değişmektedir. Bu çalışma, birçok durumda ızgara analojisinden elde edilen maksimum reaksiyonların Sonlu Elemanlar Metodu çözümüne göre daha küçük sonuçlar verdiğini göstermiştir. Reaksiyondaki en fazla farklılık ise, 30°'lik verevlik açısında görülmüştür ve yaklaşık %12'dir. Bu farklılık *Reaksiyon oranı* olarak ifade edilmiştir ve ızgara reaksiyonunun sonlu elemanlar reaksiyonuna oranı olarak tanımlanmıştır [23]. Gerçekleştirilen bu çalışmadan elde edilen sonuçlar da, Chan (1989)'ın çalışmasını doğrular niteliktedir.

çünkü ızgara analojisinden elde edilen sonuçlar, SEM'den elde edilen sonuçlara göre daha düşüktür.

Bu çalışmada; ızgara analojisinden elde edilen ölü yük eğilme momenti değerleri GRL ile, SAP2000'den elde edilen ölü yük eğilme momenti değerleri SEM ile indisenirse reaksiyon oranı;

$$RO = \frac{SEM - GRL}{SEM} \times 100 \dots\dots\dots(4.2)$$

şeklinde ifade edilebilir. Karşılaştırmada ele alınan köprüler için reaksiyon oranları, Tablo 4.2'de gösterilmiştir. Burada, verevlik açısından çok köprü açıklığının reaksiyon oranı ile ilişkisinden söz etmek mümkün olabilir. Çünkü açıklık arttıkça reaksiyon oranının da arttığı görülmektedir. Bunun nedeni ise, Microstran v8 programının öğrenci sürümünde ızgara elemanlarının düğüm noktası sayısının kısıtlı tutulması olarak gösterilebilir [40]. Izgara analojisinde, daha fazla düğüm noktası ile daha hassas bir analiz yapılabileceği açıktır.

Tablo 4.2. Köprü Modellerinin Reaksiyon Oranları.

Verevlik Açısı (θ°)	Derinlik t (m)	Boşluk Çapı R (m)	Açıklık L (m)	Reaksiyon Oranı RO (%)
15	0.60	0.40	15	11.44
30	0.80	0.50	20	14.07
60	1.00	0.60	25	14.66
45	1.10	0.65	30	18.32

5. BÖLÜM

BOŞLUKLU VEREV PLAK KÖPRÜLERİN ÖNGERİLMELİ OLARAK TASARIMI

5.1. Giriş

Öngerilme, genel olarak bir yapı ya da sistemde, performans artırımı için kalıcı iç kuvvetlerin oluşturulması anlamına gelir. Bu kuvvetlerin uygulanmasındaki amaç ise dış yüklerin neden olduğu iç kuvvetleri azaltmak olarak gösterilebilir [48].

Öngerilmeli beton; beton yapı elemanlarının içerisine uygun şekilde yerleştirilmiş yüksek dayanımlı çelik donatının, dışarıdan özel aygıtlarla çekilerek gerilmesi olarak tanımlanabilir [49].

Öngerilmeli beton, yapı elemanına gelecek yüklerin etkilerinin, çeliğin gerilmesi ile istenilen şekilde dengelendiği, bir başka deyişle eğilmeye zıt yönde eğilme sağlayabilen betondur [50].

TS 3233, “Öngerilmeli Beton Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları (1979)” standardında ise öngerilmeli beton şu şekilde tanımlanmıştır; “Öngerilmeli beton, elemana gelecek yüklerin etkilerinin, çeliğin gerilmesi ile istenen şekilde dengelendiği betondur”, [51].

Betonun çekme gerilmesi, basınç gerilmesinin yaklaşık %10’u kadar olduğu için, bir başka deyişle betonun çekme gerilmesi oldukça zayıf olduğu için betonu öngerilme tekniğine uygun bir malzeme olarak düşünebilmek mümkündür [49]. Önceden gerilmiş yüksek dayanımlı çelik çubuklar veya demet şeklindeki yüksek dayanımlı bükülebilir çelik kabloların gerilmesi yoluyla öngerilme uygulanacak malzemeye basınç gerilmesi verebilmek mümkündür [49].

İlk öngerilmeli beton uygulamasının P.H. Jackson (1886) tarafından Kaliforniya’da yapıldığı bilinmektedir [48]. Öngerilmeli beton köprülerin mucidi ise Eugene Freyssinet (1879-1962) olarak kabul edilir. Freyssinet’in bilinen en meşhur köprüsü ise, 1925-1930 yılları arasında Fransa’da inşa edilen *Plougastel köprüsü*dür. Köprünün yapım aşamasından bir kesit Şekil 5.1’den görülebilir [7].



Şekil 5.1. Plougastel Köprüsü (Brown 1993, sayfa 122’den alınmıştır) [7].

Brown (1993), Plougastel köprüsünün öngerilme ile ilgili önemine dikkat çekmiştir. Zira Freyssinet bu köprünün yapımı sırasında, betondaki sünmenin öngerilme hesaplarında ve teknolojisinde dikkate alınması gerektiğini saptamıştır [7].

1928 yılında Freysinnet’nin yüksek çekme dayanımlı çelik kullanmasıyla gelişimi hızlanan öngerilmeli beton teknolojisi, sadece kirişler ya da döşemeler gibi bilinen bina yapı elemanlarında kullanılmayıp bunun yanı sıra beton borular, su tankları, silolar ve köprüler gibi yapılarda da kullanılmaktadır [52].

1941 ve 1949 yılları arasında, Fransa’daki Marne nehrinde Freyssinet’in tasarımından sonra, altı adet öngerilmeli beton köprü inşa edilmiştir. Bunların beş tanesi birbirinin benzeri olup her biri 74 m açıklığındadır (Menn 1990), [7].

Enright ve Frangopol’un ABD’nin Michigan Eyaleti’nde öngerilmeli beton elemanların kullanıldığı köprülerin mevcut durumu üzerine yaptıkları bir çalışma, bu özellikteki köprülerin çoğunun iyi durumda olduğunu ortaya koymuştur. Ancak 1960’lı yıllarda inşa edilen öngerilmeli beton köprü kirişlerinin mesnet bölgelerinde tahribat oluşumuna

rastlanmıştır. 1980'lerden sonra inşa edilen köprülerde ise bu tahribatın azaldığı gözlenmiş ve bunun temel nedeninin kiriş mesnet bölgelerinde birleşim detaylarının yapımı sırasında gösterilen özen olduğu ifade edilmiştir [53]. 1960'lı yıllarda inşa edilen köprülerde karşılaşılan sorunlar *öngerme çelik tellerinde meydana gelen korozyon* ile *betondaki yüksek klor konsantrasyonu* olarak iki temel grupta toplanmaktadır. Enright ve Frangopol'un çalışmasında; köprünün bulunduğu yerin iklim koşulları, trafik hacmi, yük sınırları ve buz çözücü tuz kullanımı gibi unsurlar tahribat düzeyini etkileyen unsurlar olarak dikkate alınmıştır [53 ve 54].

5.2. Öngerilmeli Beton ile İlgili Genel Bilgiler

Betonarme ve öngerilmeli beton arasındaki ana fark şu şekilde ifade edilebilir. Betonarmede beton, elemana gelen basınç gerilmelerini karşılarken birlikte kullanıldığı çelik çekme gerilmelerini karşılar. Böylece iki malzeme birbirinin zayıf yönlerini telafi ederken üstün yönlerinin yararlarını da birleştirerek kullanır. Öngerilmede yüksek dayanımlı çelik gerilerek yüksek dayanımlı betona basınç verilir. Başlangıçta sünek kabloda çekme, gevrek betonda basınç gerilmeleri oluşur. Kullanım yükleri altında çatlama ve yer değiştirmeler kontrol edildiği gibi böylece yüksek dayanımlı malzemenin kullanım üstünlüklerinden de yararlanılmış olur [55].

Öngerilmeli elemanlarda kullanılan betonun yüksek dayanımlı olması zorunludur. Çünkü beton malzemesi, öngerilme kablolarından kaynaklanan basınç gerilmelerini taşıyabilecek kalitede olmalıdır. Öngerilmeli elemanlarda kullanılacak beton sınıfları; TS 3233'de küp için en az 300 kgf/cm^2 (30 N/mm^2) basınç dayanımlı (C30), silindir için en az 250 kgf/cm^2 (25 N/mm^2) basınç dayanımlı (C25) olacak şekilde belirlenmiştir [55]. Basınç dayanımı değerleri, ülkelerin ilgili standartlarında farklılıklar gösterebilir. Örneğin BS 8110'da küp için en az 25 N/mm^2 'lik bir basınç dayanımı belirlenmiştir.

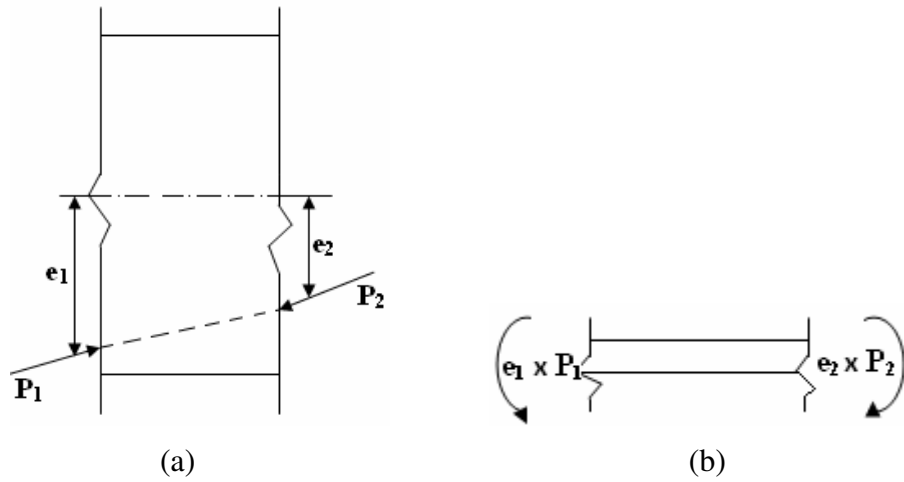
Öngerilme donatısı da yüksek kaliteli çelikten imal edilmiş olmalıdır. Öngerilme donatısı; tel, toron, çubuk ve bunların her birinden oluşturulan grupların meydana getirdiği kablo şeklinde olabilir [55].

- Öngerme teli; yüksek dayanımlı, çeşitli çaplarda düz ve kıvrık çelik tellerdir [49]. Çapı çok küçük olan tellerin dışındaki teller yan yüzleri nervürlü veya

profilli olarak imal edilir. Çapları 1.5 ile 7 mm aralığında olan öngerilme telleri kaplamasız tellerdir. Öngerilme tellerinin çapları büyüdükçe minimum kopma dayanımları 1800 N/mm^2 den 1500 N/mm^2 mertebesine düşebilmektedir [55].

- Öngerme halatı (toronu); bir telin etrafında iki veya daha fazla telin üst üste olacak şekilde birbirlerine sarılmalarından elde edilmiş örgüdür [49]. İmalinde aynı tip ve soğukta işlem görmüş teller kullanılır. Genelde yedi telli olmakla birlikte, tellerden biri ortada, diğerleri ortadaki telin çevresinde sıkıca döndürülmüş şekilde bulunmaktadır. Minimum kopma dayanımları ise 1600 N/mm^2 'dir [55].
- Öngerme çubuğu; farklı çaplarda üretilmiş özel alaşımlı ve yüksek dayanımlı çelik çubuktur.
- Öngerme kablosu; öngerme teli, toronu veya çubuklarının toplu olarak kullanılabildiği biçimdir. Kablo içindeki elemanın adedi ve özellikleri, gerekli olan öngerilme kuvvetinin büyüklüğüne göre belirlenir [55].

Şekil 5.2, bir döşemenin kesitini göstermektedir. Öngerilme kabloları, kesitin iki yüzünden (P_1) ve (P_2) öngerilme kuvvetleri ile geçmektedir. Tarafsız eksen ile kuvvetlerin olduğu noktalar arasındaki uzaklık, eksantrisiteyi ifade etmektedir. Bu ifade, şekilde (e_1) ve (e_2) olarak verilmiştir.



Şekil 5.2. Serbest Döşeme Elemanı Üzerindeki Öngerilme Kuvvetleri;
a) Kuvvetler, b) Eşdeğer momentler [10].

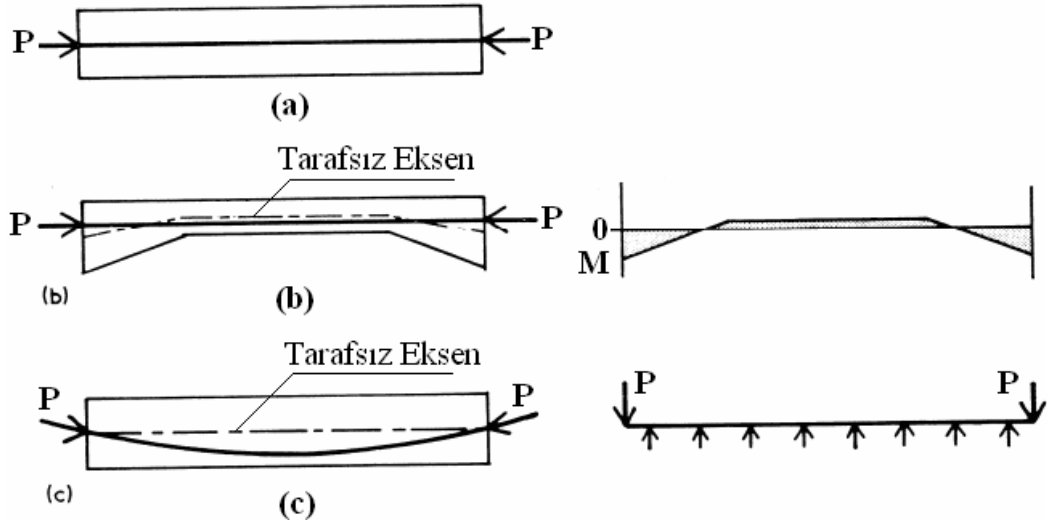
Döşemenin herhangi bir kesitinde, betona basınç kuvveti olarak gelen (P_1) ve (P_2) kuvvetlerinin doğrultuları çakışır ve bu kuvvetlerin yönü, kablunun çekme kuvvetine zıt yöndedir. (1) ve (2) noktalarında oluşacak serbest moment ise;

$$M = e \times P \dots\dots\dots(5.1)$$

olarak ifade edilebilir [10].

Beton köprü döşemesindeki bir öngerilme kablosu, betona üç farklı sistem yüklemesi ile etki eder.

- Betona uygulanan basınç kuvvetinden dolayı ankraj kabloları veya sürtünme kuvvetlerinden doğan beton içerisindeki aksenal basınç (a),
- Beton kesitin tarafsız eksenindeki sonuç basınç kuvvetinin eksantrisitesinden doğan momentler (b),
- Eğik kablunun reaksiyonundan kaynaklanan, beton üzerindeki düşey yükler (c).



Şekil 5.3. Öngerilmeden Dolayı Betonda Oluşan Kuvvetler; (a) Aksenal Basınç, (b) Basınç Eksantrisitesinden Kaynaklanan Momentler, (c) Kablo Eğiminden Kaynaklanan Dikey (veya Yatay) Kuvvetler [10, 56 ve 57].

5.3. Öngerme Yöntemleri

Öngerilmenin esas amacı, sistemde oluşan ve normal betonun karşılayamayacağı çekme gerilmelerini yüksek dayanımlı çelikler ile karşılamaktır. Gerilmeleri karşılama amacına göre öngerilme yöntemleri iki ana gruba ayrılabilir.

- Tam Öngerilme; tasarım için normal servis yükleri altındaki elemanlarda çekme gerilmelerinin tamamıyla ortadan kaldırılmasını amaçlayan yöntemdir [55]. Bu yöntem ile servis yükleri altındaki elemanlarda çatlaklar tamamıyla ortadan kaldırılabilmesine rağmen, servis yüklerinden daha az değere sahip yüklerde büyük kablo eğimi veya büyük negatif yer değiştirmeli, bir başka deyişle ters sehimli elemanlar oluşabilmesi, bu yöntemin dezavantajı olarak yorumlanabilir [55].
- Sınırlı Öngerilme; servis yükleri altında betonda çekme gerilmelerine ve bazı kırılma çatlaklarına izin veren bir yöntemdir [55]. Öngerilmeli beton inşaatlarının artmasıyla kazanılan deneyimler, tam öngerilmeli beton ile normal donatılı beton arasında oluşturulacak ara bir çözümün bazı üstünlükleri beraberinde getirebileceğini göstermiştir ve sınırlı öngerilme fikri bu noktada ortaya çıkmıştır. Örneğin sınırlı öngerilmeli kirişlere bütün servis yükleri uygulandığında çatlaklar oluşacak ancak çatlaklar kılcal düzeyde kalacaktır. Bir başka deyişle çok küçük kalacak ve yük azaldıkça tümüyle kapanacaktır [55].

Sınırlı öngerilmeli kesitlerde, tam öngerilmeli kesitlere göre daha az öngerilme kablosu kullanılması ve daha basit en kesit biçimine izin verilmesi, bu tür sistemlerin ekonomik açıdan daha uygun olduğunu göstermektedir. Ancak sınırlı öngerilmede de elemanların kırılmalarına karşı güvenliğinin sağlanması zorunludur. Bu durum da çekme bölgesi içerisinde normal çekme donatısı bulundurulmasını gerektirir [55].

Sınırlı öngerilmenin tam öngerilmeye göre üstünlüklerinden biri de göçmede daha fazla enerji yutması nedeniyle sünek yapı oluşturmasıdır. Süneklik üstünlüğü nedeniyle deprem bölgelerinde sınırlı öngerilmeli sistemlerin kullanılması daha uygundur [55].

Öngerilmeli beton, öngerilme donatılarını germe yöntemine göre iki ana sınıfa ayrılabilir:

- Öncekme Yöntemi: Bu yöntem ile önceden hazırlanmış kalıplar içerisine yerleştirilen öngerilme donatıları beton dökülmeden önce hesaplanan gerilme mertebesine kadar gerilir ve daha sonra beton dökülerek gerili haldeki kablolar ile beton arasında aderans sağlanır. Bu yöntem genellikle prefabrike yapı elemanlarının üretiminde kullanılır.

- Ardçekme Yöntemi; bu yöntemde ise beton, hazırlanan kalıplara dökülmeden önce öngerilme donatılarının daha önceden belirlenmiş olan yörüngelerine uygun şekilde, ince cidarlı metal ya da plastik özel kılıflar yerleştirilir. Donatılar, germe aygıtları yardımıyla, her iki uçtan veya bir uç sabit tutularak diğer uçtan gerekli seviyeye kadar gerilerek her iki uçta da mutlaka bulunması gereken ankraj plakalarına kilitlenir. Germe aygıtlarına *jak* da denir. Kitleme işleminden sonra germe aygıtı gevşetilir. Donatı kesilmeden önce donatı ile kılıf arasına enjeksiyon betonu gönderilir. Enjeksiyona diğer uçtan ve havalıklardan beton taşıncaya kadar devam edilir ve daha sonra donatıların dışarıda kalan uçları kesilir. Böylece donatılardaki çekme kuvveti betona aktarılmış olur. Bu yöntem, genellikle şantiye imalatı için uygundur [49 ve 50].

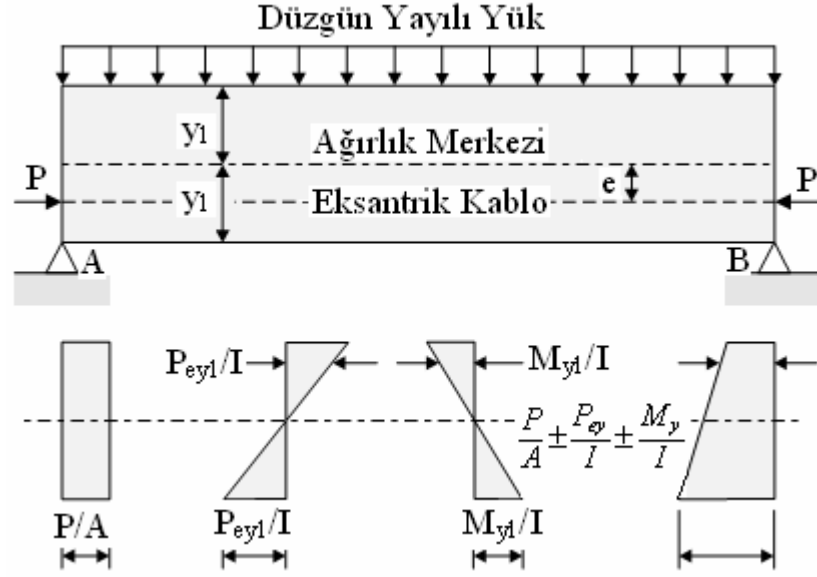
Ardçekme yöntemi, günümüzde çok katlı yapılara da uygulanmaktadır ve yapıların kolon-kiriş ve kolon-kolon birleşimleri bu yöntemle oluşturulmaktadır. Ardçekme yöntemiyle oluşturulan bağlantıların monolitik davranışa eşdeğer dayanım gösterdiği, yüksek sünekliliğe sahip olduğu, yapılan deneylerle saptanmıştır [58].

Germe yöntemine göre sınıflamanın dışında, uygulama yöntemine göre patentli öngerilme sistemleri de vardır. Bu sistemler genellikle firma adları ile anılır. Patentli öngerilme sistemlerinden bazıları; Freyssinet, BBRV, Dividag, Macalloy, CCL, Losinger, PSC, SCD, Stronghold ve Preload olarak sayılabilir [49].

5.4. Boşluklu Verev Plak Köprülerin Öngerilmeli Olarak Tasarımına İlişkin Temel İlkeler

Bu çalışmada dikkate alınan köprü modelinin trafik akış doğrultusuna paralel uzanan kenarları boştaki kenarlardır. Diğer iki kenarı da, yani trafik akış doğrultusu ile 45°'lik açı yapan verev kenarları da mesnetlidir. Karşılıklı iki kenarı mesnetli, diğer iki kenarı boşta olan döşemelere tek doğrultulu plak döşemeler adı verilmektedir [17]. Tek doğrultulu öngerilmeli plak döşemelerin eğilme açısından tasarımları ise basit mesnetli kirişlerin tasarımına benzer özellikte teşkil edilmektedir.

Öngerilmeye maruz basit bir kirişin gerilme diyagramları, Şekil 5.4'de gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Eksantrik Olarak Öngerilmeye Maruz Basit Dikdörtgensel Bir Kirişin Açıklık Ortasındaki Gerilme Dağılımı;
 (a) Öngerilmenin Yük Etkisinden Kaynaklanan Gerilme,
 (b) Öngerilme Eksantrisitesinden Kaynaklanan Gerilme,
 (c) Dış Momentten Kaynaklanan Gerilme,
 (d) Eksantrik Öngerilme ve Momentten Kaynaklanan Gerilme [5].

Eksantrik (Dış merkezli) yüklü bir kiriş üzerine etki eden gerilmelerin hesabında üç geometrik değişkenin bilinmesi çok önemlidir. Bunlardan ilki eksantrisite (e)'dir. (e), en kesitin ağırlık merkezi ile öngerilme kuvvetinin merkezinin arasındaki düşey mesafedir. İkinci değişken olan (y) uzaklığı, en kesitin ağırlık merkezi ile kiriş alt ve üst noktaları arasındaki düşey mesafedir. Üçüncü değişken ise kesitin dönme çapıdır. Statikten bilindiği üzere, dönme çapının karesi yani (r^2), en kesitin atalet momentinin en kesit alanına oranıdır.

Konstantrik (eş merkezli) öngerilmeli kiriş ile kıyaslandığında, eksantrik yükleme, daha ekonomik kesitler verir [5].

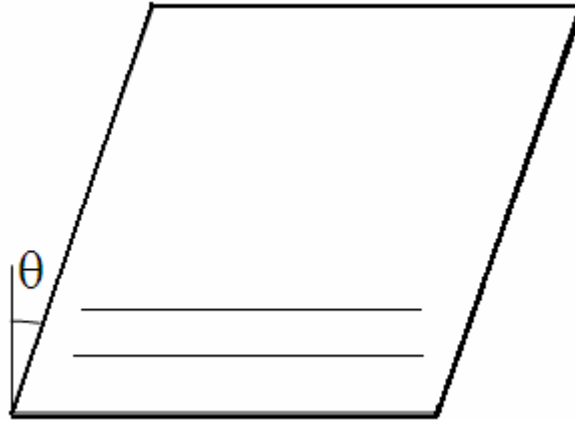
Tasarım açıklığının 1/20'sinden daha az kalınlığa sahip plaklarda teorik olarak açıklık doğrultusunda çatlamları engellemek için öngerilme dikkate alınmalıdır [37].

Model köprüünün açıklığı 30.00 m, plak kalınlığı 1.10 m olduğuna göre;

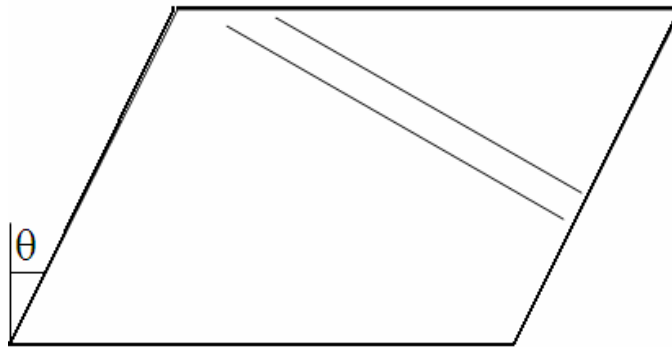
$$\frac{1.10}{30.00} \times 100 = \%3.667 < \%5.000$$

Verev köprülerde donatı yerleşimi ile ilgili olarak verevlik açısı büyük önem taşımaktadır. On dereceden daha küçük verevlik açıları için döşeme donatısı verevliğe paralel olarak yer alır. Bu durumda ana rijitliğin verevlik doğrultusundaki ortogonal yerel momentleri ciddi ölçüde etkilemeyeceği düşünülebilir. Yirmi dereceyi aşan verevlik açılarında enine doğrultudaki döşeme donatısı, plak eksen doğrultusunda yerleştirilir ve döşemenin keskin kenarlarında daha küçük donatılar kullanılır. Bunun dışında, (10°) ile (20°) arasındaki verevlik açıları için döşeme donatısının uyumu ile ilgili uygulama değişir.

Verev köprülerde, verevlik açısı 25° 'yi geçmediği takdirde, ana donatılar serbest kenarlara paralel olarak yerleştirilebilir. Eğer verevlik açısı 25° 'den fazla ise ana donatılar, ana mesnet bileşenlerine dik olarak yerleştirilmelidir [37].

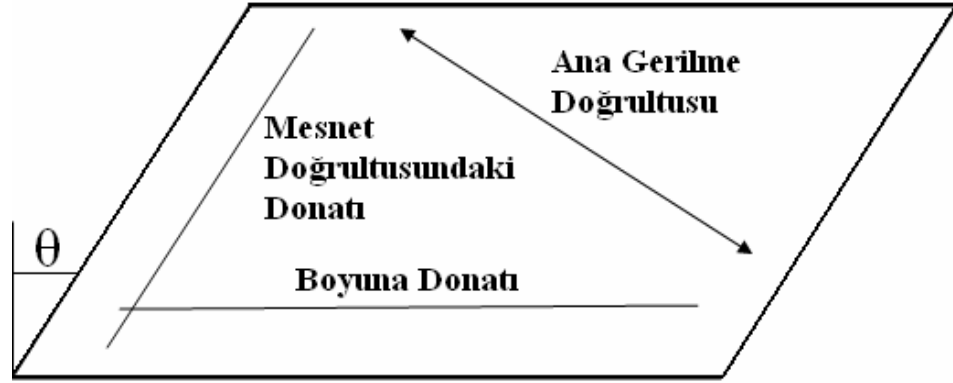


Şekil 5.5. $\theta \leq 25^\circ$ Olduğu Durumda Donatı Yerleşimi.



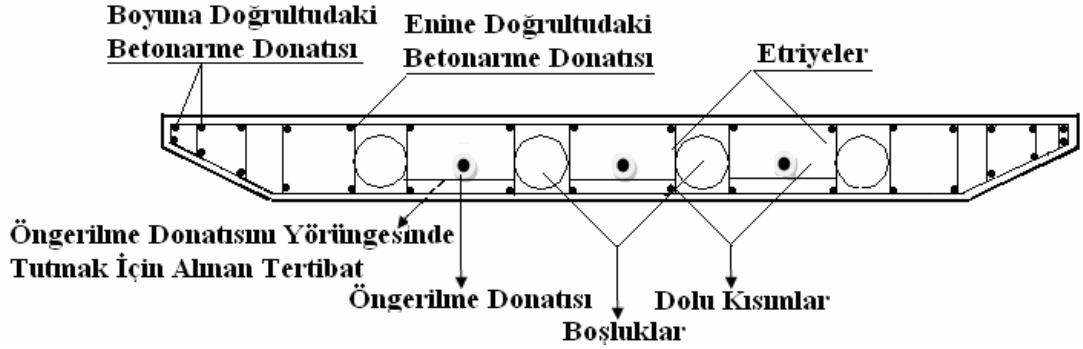
Şekil 5.6. $\theta > 25^\circ$ Olduğu Durumda Donatı Yerleşimi.

AASHTO LRFD yönetmeliğinde (2007); Şekil 5.7’de de görüldüğü gibi ana gerilme doğrultusundaki donatıların yokluğu sonucu döşemde meydana gelebilecek büyük çatlamları engellemek, bir amaç olarak belirtilmiştir [37].



Şekil 5.7. Verev Plakta Donatı Düzenlenmesi.

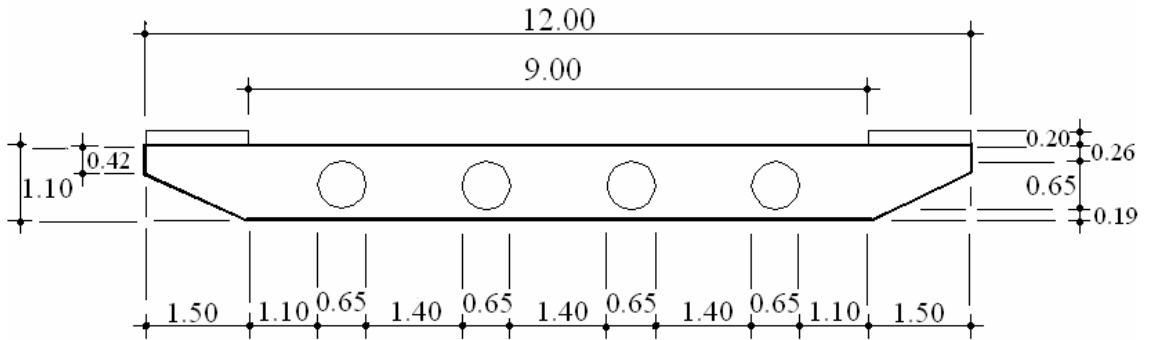
Boşluklu plak köprülere öngerilme donatısının yerleştirilmesi, boşlukların varlığından dolayı diğer köprü türlerine göre daha sınırlıdır. Örneğin; boşlukların alt kısımlarına yerleştirilecek öngerilme donatısı, boşluk nedeniyle zaten daha küçük bir kesite sahip olan beton üzerinde ek basınç etkisi doğacaktır. Böylece o bölgedeki betonda büyük zorlanmalar oluşacaktır. Bu nedenle bu tür bir yerleşimin sağlıklı olabileceğini söylemek zordur. Bu çalışmada; öngerilme donatısının yerleşimi için, plak yüksekliği boyunca dolu gövdeli olan, bir başka deyişle boşluklar arasında kalan bölgeler öngerilme bölgeleri olarak belirlenmiştir. Köprüde oluşan sonuç eğilme momenti, öngerilme bölgelerinin genişlikleri ile doğru orantılı olacak şekilde dağıtılarak öngerilme bölgelerine etki eden eğilme momenti değerleri elde edilir. Bu konu ile ilgili ayrıntılı bilgi Bölüm 5.5’de verilmiştir. Şekil 5.8’de ise boşluklu bir plak kesitinde donatı yerleşimi görülmektedir.



Şekil 5.8. Boşluklu Bir Plak Kesitinin Donatı Detaylanması [59].

5.5. Model Köprü İçin Öngerilme Hesabı

Bu bölümde, dördüncü bölümde SAP2000 v11 yazılımı ile analizi ayrıntılı olarak anlatılan model köprüünün öngerilme hesabı aşamalı olarak anlatılmıştır. Model köprüde, köprü öz ağırlığından ve kalıcı ölü yüklerden açıklıkta 1 m genişlik için oluşan eğilme momenti; $M_D = 17926.988 \text{ kNm/m}$, taşıt hareketli yükünden oluşan birim genişlikteki eğilme momenti; $M_L = 3311.3417 \text{ kNm/m}$ ve sonuç eğilme momenti $M_{DS} = 21238.3297 \text{ kNm/m}$ 'dir.



Şekil 5.9. Köprü Modelinin En Kesiti.
*(Ölçüler metre cinsindendir).

Veriler:

Köprü Kesit Özellikleri;

Açıklık: $L = 30 \text{ m}$,

Uzunluk: $2L = 60 \text{ m}$,

Dik Genişlik: $W = 12 \text{ m}$,

Verevine Genişlik: $B = 16.97 \text{ m}$,

Plak kalınlığı: $t = 1.10 \text{ m}$,

Boşluk Çapı: $R = 0.65 \text{ m}$

Öngerilme Uygulanacak Betonun Özellikleri;

Beton sınıfı: BS 45

Betonun 28 günlük karakteristik silindirik basınç dayanımı: $f_{ck} (f_c') = 45000 \text{ kN/m}^2$

Birim ağırlık: $w_c = 25 \text{ N/mm}^2 = 25000 \text{ kN/m}^2$

Betonun 28 günlük elastisite modülü: $E_c = 36000 \text{ N/mm}^2 = 36 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$

Beton basınç emniyet gerilmesi: $f_c = 18 \text{ N/mm}^2 = 18000 \text{ kN/m}^2$

Betonarme çeliği;

Çelik sınıfı: S500a (BÇ IVa)-Sıcakta haddelenmiş.

Karakteristik çelik akma dayanımı: $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2 = 500000 \text{ kN/m}^2$

Çelik karakteristik dayanımı: $f_{yd} = f_{yk} / 1.15 = 434782.61 \text{ kN/m}^2$

Çeliğin elastisite modülü: $E_s = 2 \times 10^5 \text{ N/mm}^2 = 2 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$

Öngerme Çeliği Özellikleri;

Halat tipi; 0.6 inch 270K düşük gevşemeli ASTM A416-80

Karakteristik çelik kopma dayanımı: $f_s' = 1862 \text{ MPa}$

Öngerme uygulama oranı: $\Phi = 0.75$

Hesaplarda kullanılacak çelik dayanımı;

$$f_s = f_s' \times \phi = 1862 \times 0.75 = 1396.50 \text{ MPa}$$

Kablo kesit alanı; $a^* = 139 \text{ mm}^2$

Tek bir kablo için öngerme aşamasında izin verilen ilk öngerme kuvveti; $P_s = 194.66 \text{ kN}$

Elastisite modülü; $E_s = 193000 \text{ MPa}$

Öngerme kablosu tip faktörü; $\gamma^* = 0.28$

A_b : Öngerilme bölgesi en kesit alanı (m^2)

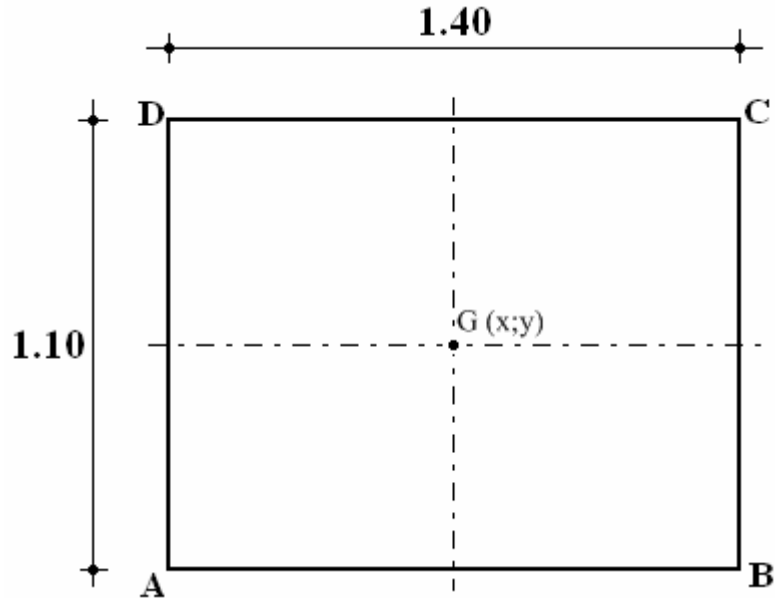
$$A_b = L_{\text{ÖNG}} \times t = 1.40 \times 1.10 = 1.54 m^2$$

Tablo 5.1. Öngerilme Kablosu Sayısının Hesabı.

Kablo Sıra No	Kablo Adedi [n]	Kablonun Tabana Uzaklığı [d] (m)	[n]x[d] (m)
3	18	0.33	5.94
2	18	0.22	3.96
1	18	0.11	1.98
TOPLAM	54		11.88

$$x = \frac{\Sigma[n.d]}{\Sigma n} = \frac{11.88}{54} = 0.22$$

Y_{bb} : Öngerilme uygulanacak kesitin ağırlık merkezinin tabana uzaklığı (m)



Şekil 5.11. Öngerilme Uygulanacak Kesit.
*(Ölçüler metre cinsindendir).

$$G_x = \frac{1.40}{2} = 0.70m, \quad G_y = \frac{1.10}{2} = 0.55m$$

$$Y_{bb} = G_y = 0.55 \text{ m}$$

e_p : Kablo eksantrisitesi (m)

$$e_p = Y_{bb} - x = 0.55 - 0.22 = 0.33 \text{ m}$$

P_{se1} : Bir kablo için bütün kayıplardan sonra izin verilen öngerme kuvveti (kN)

P_{s1} : Bir kablo için öngerme aşamasında izin verilen öngerme kuvveti (kN)

$$P_{s1} = 194.66 \text{ kN}$$

φ : Tahmin edilen toplam öngerilme kaybı

$$\varphi = 0.278$$

$$P_{se1} = P_{s1} \times (1 - \varphi) = 194.66 \times (1 - 0.278) = 140.54 \text{ kN}$$

P_{se} : Kayıplardan sonra etkili öngerme kuvveti (kN)

$$\sigma_g = \frac{P_{se}}{A_b} + \frac{P_{se} \times e_p}{S_{bb}}$$

$$P_{se} = \frac{\sigma_g \times (A_b \times S_{bb})}{(S_{bb} + A_b \times e_p)} = \frac{13116.24 \times (1.54 \times 0.2823)}{(0.2823 + 1.54 \times 0.33)} = 7213.38 \text{ kN}$$

N' : Gerekli öngerme kablosu sayısı

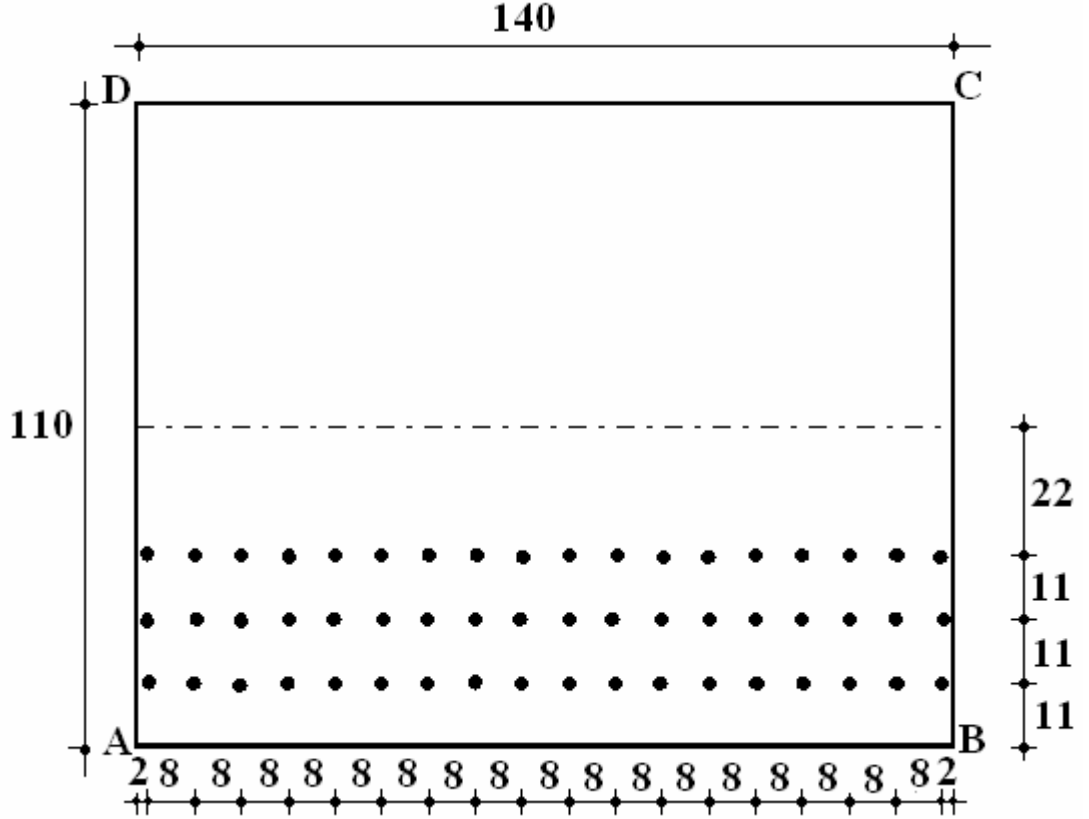
$$N' = \frac{P_{se}}{P_{se1}} = \frac{7213.38}{140.54} = 51.33$$

$\Sigma n > N'$ olmalıdır.

$$54 > 51.33$$

N : Seçilen öngerme kablosu sayısı, $N = 54$ seçilmiştir.

Toplam 54 adet ASTM A416-80 türü öngerme kablosu üç sıra halinde tertip edilmiştir. Bir başka deyişle; her bir sırada yatay olarak 0.08 *m* aralıklı, düşey olarak 0.11 *m* aralıklı 18 adet kablo düzenlenmiştir. Kabloların öngerme bölgesindeki yerleşimi Şekil 5.12’de verilmiştir.



Şekil 5.12. Öngerilme Kablolarının Plak En Kesitindeki Yerleşimleri.
*(Ölçüler santimetre cinsindendir).

Bu bölümde, SAP2000 v11 yazılımı ile analizi yapılmış olan toplam 400 adet boşluklu verev plak köprüden bir tanesi model köprü olarak seçilmiş ve bu köprüünün öngerilmeli olarak tasarımı, öngerilme kablosu sayısının elde edilmesi ve kabloların yerleştirilmesi ayrıntılı olarak anlatılmıştır. SAP2000 v11 yazılımı ile analizi yapılan, geometrik ölçüleri farklı toplam 400 adet köprüünün öngerilmeli olarak tasarımı için MS Excel ile bir bilgisayar yazılımı hazırlanmış ve bütün köprüler için gerekli olan öngerilme kabloları ve seçilen öngerilme kablosu sayısı tablo olarak Ek-5’de verilmiştir. Bütün verilerde kablolar üç sıra halinde tasarlanmıştır.

0.40 *m* ile 0.65 *m* plak kalınlığı aralığı için kablolar arası düşey mesafe 0.06 *m* olarak verilmiştir. Yani öngerme bölgesinin tabanından itibaren birinci sıra 0.06 *m* yükseklikte, ikinci sıra 0.12 *m* yükseklikte, üçüncü sıra 0.18 *m* yükseklikte.

0.70 *m* ile 1.40 *m* plak kalınlığı aralığı için ise; kablolar arası düşey mesafe 0.11 *m* olarak verilmiştir. Yani öngerme bölgesinin tabanından itibaren birinci sıra 0.11 *m* yükseklikte, ikinci sıra 0.22 *m* yükseklikte, üçüncü sıra 0.33 *m* yükseklikte olacaktır.

6. BÖLÜM

BOŞLUKLU VEREV PLAK KÖPRÜLERİN ANALİZİNE YAPAY SİNİR AĞLARI (YSA) UYGULAMASI

6.1. Giriş

Teknolojik gelişmelerin hızla ilerlediği günümüzde, insanoğlunun kendisini tanımaya ve keşfetmeye yönelik çalışmaları da önemli bir ilerleme kaydetmiştir. Yapay zekâ (artificial intelligence) kavramının ortaya çıkmasıyla birlikte insanoğlunun en önemli özelliklerinin başında gelen düşünebilme ve öğrenebilme yetenekleri başlıca araştırma konularının başında gelmeye başlamıştır. Özellikle son yıllarda bilgisayar kullanımının hızla artması ve yaygınlaşması sonucunda yapay zekâ çalışmaları da büyük bir ivme kazanmıştır [60].

6.1.1. YSA'nın Tanımı

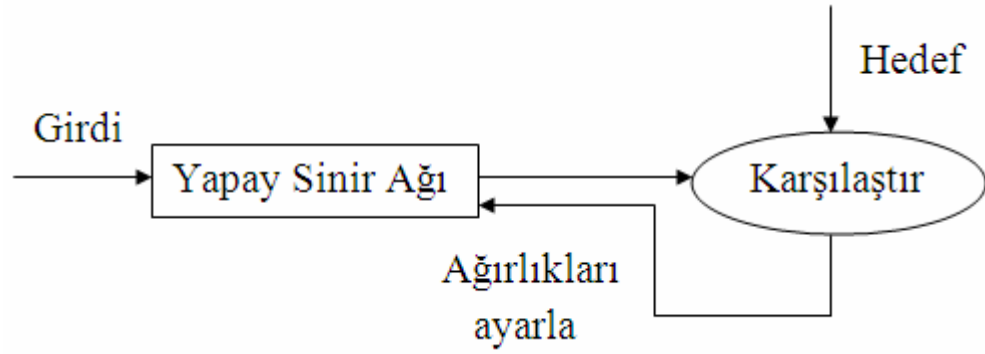
İnsan beyninin düşünme, hatırlama ve problem çözme özelliğinin bilim adamlarınca bilgisayar ortamında modellenmeye çalışılması Yapay Sinir Ağlarının ortaya çıkmasına neden olmuştur [61]. Bir başka deyişle Yapay Sinir Ağları insan beyninin çalışma prensibini kendisine model edinmiş yapay zeka sistemlerinden bir tanesidir.

Yapay Sinir Ağları (YSA), farklı ağırlıklarla birbirine bağlanmış çok sayıda işlem elemanlarından oluşmuş yoğun paralel sistemler olarak tanımlanabilir [62]. YSA, yapay sinir hücrelerinin birbirleri ile değişken şekillerde bağlanması ile oluşur ve genellikle katmanlar şeklinde düzenlenir.

YSA, insanoğlunun düşünme ve gözlem yapmaya yönelik doğal yeteneklerini gerektiren problemlerin çözümünde, çözüm üretmeye yarayan bir sistem olarak da tanımlanabilir. İnsanoğlunun, düşünme ve gözlem yapma yeteneğini gerektiren problemlere çözüm üretebiliyor olmasının temel nedeni, insan beyninin sahip olduğu ve

kullanabildiği yaşayarak veya deneyerek öğrenme yeteneğidir [60]. Bu özellikler bilgisayar ortamında modellenerek YSA'ya da kazandırılmıştır. Böylece YSA'ya kazandırılan öğrenebilme ve doğrusal olsun ya da olmasın olayların mekanizmasındaki girdi ve çıktılar arasındaki ilişkiyi kurabilme yeteneği, onun daha önce görmediği olaylara çözümler üretebilmesini sağlamıştır. Böylece daha önce hiç görmediği olaylara çözümler üretebiliyor olması, bir başka deyişle tahmin edebilme kapasitesi, YSA'nın kullanışlılığının temelini oluşturur.

YSA günümüzde birçok mühendislik problemine çözüm üretebilecek yeteneğe ve kapasiteye sahiptir [62]. YSA'nın temel çalışma ilkesi Şekil 6.1'den görülebilir [63].



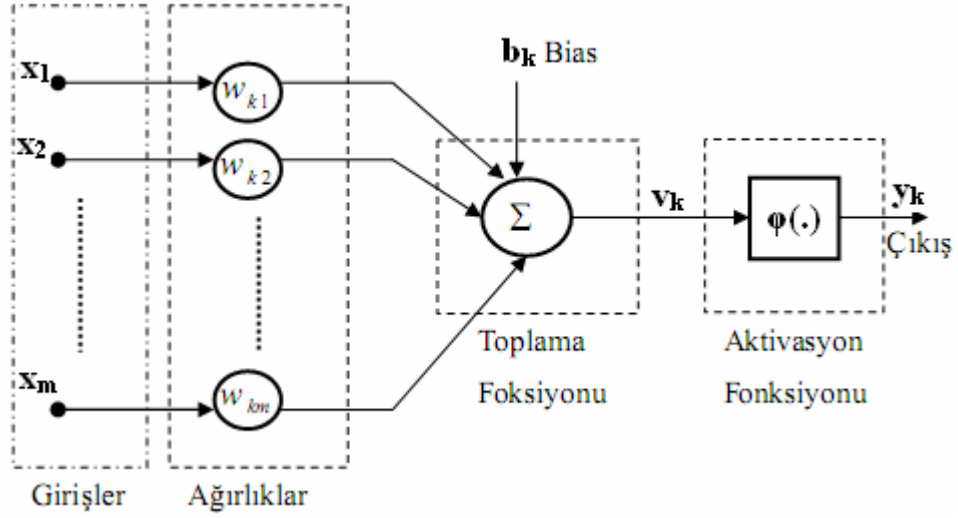
Şekil 6.1. Yapay Sinir Ağlarının Temel Prensipleri.

Herhangi bir YSA tahmin modeli için gereksinim duyulan temel bilgiler;

- Bir veri tabanı,
- Bozulmayı etkileyen tüm önemli değişkenlerin belirlenmesi,
- Gerçek yol koşullarını kapsayacak şekilde dikkatli bir model seçimi,
- Kriterlerin belirlenmesidir [64].

6.1.2. Matematiksel Yapay Sinir Hücresi Modeli

Şekil 6.2'de bir yapay sinir hücresi görülmektedir. YSA'yı oluşturan yapay sinir hücreleri (YSH), tek başlarına ele alındıklarında oldukça basit işlevleri olan işlemci elemanlardır.



Şekil 6.2. Bir Yapay Sinir Hücresinin Matematiksel Modeli [65].

Şekilden de görüldüğü üzere temel prensip olarak, giriş verilerine uygun ağırlıklar atanarak bu ağırlıklar toplama fonksiyonuna, oradan da aktivasyon fonksiyonuna gönderilir.

6.1.3. YSA'nın Tarihçesi

İnsan beyninin nasıl çalıştığı ve fonksiyonları uzun yıllar boyunca bilim adamları için araştırma konusu olmuştur. Beynin üstün özellikleri, bilim adamları için daima ilgi çekici bir konu olmuş ve beynin sinirsel yapısı baz alınarak matematiksel modeli çıkarılmaya çalışılmıştır. 1980 yılında beynin fonksiyonları hakkında bilgi içeren ilk eser yayımlanmıştır. Beynin davranışlarını tamamiyle modelleyebilmek amacıyla fiziksel bileşenlerinin doğru olarak modellenmesi gerektiği tezinden yola çıkılarak çeşitli yapay hücre ve ağ modelleri geliştirilmiştir ve günümüzdeki YSA'nın temelleri oluşturulmuştur [63 ve 66]. Bugünkü YSA ise, birçok YSH'nin belirli ölçütlerde bir araya getirilip bir işlevin yürütülmesini sağlayan bir bilim dalı haline gelmiştir [63].

Warren McCulloch ve Walter Pitts (1943), *Sinir Aktivitesindeki Düşüncelere Ait Bir Mantıksal Hesap* adlı bir çalışma yapmıştır ve bu çalışmanın, ilk dijital bilgisayarlara öncülük ettiği kabul edilir.

Düzenlenmiş olan ilk yapay zeka konferansında (1956), öğrenmenin ve zekanın herhangi bir özelliğinin simülasyonu yapılmış ve bilgisayarların aktif olarak nasıl kullanılabileceği tartışılmıştır.

Widrow (1959), *Adaptif Lineer Elemanı (Adaptive Linear Neuron - Adaline)* geliştirmiştir. Widrow aynı zamanda telefon hatları üzerindeki ekoları elimine etmeye yarayan adaptif filtreleri geliştirmek için adaline algoritmasını kullanmıştır ve bu çalışma ile birlikte YSA'nın ilk defa gerçek bir probleme uygulandığı kabul edilmiştir.

YSA için en ilginç gelişmelerden biri ise Minsky ve Papert (1969)'in *Perceptrons (Algılayıcılar)* adlı kitabıdır. Bu kitapta tek katmanlı YSA algılayıcılarının temel olarak bazı problemler için yeterli olmadığı belirtilmiştir. Bu iddianın ardından birçok araştırmacı YSA konusunda çalışmaktan vazgeçmiştir. Bu da doğal olarak YSA konusundaki çalışmaların bir süre durma noktasına gelmesine sebebiyet vermiştir [67].

Kohonen (1972), adaptif öğrenme ve birleşik hafızalar üzerine çalışmalar yapmış ve *Self Organizing Map (SOM)* adı verilen öğrenme kuralını geliştirmiştir. Bu öğrenme kuralı (1982), danışmansız öğrenme metodlarının geliştirilmesine öncülük etmiştir.

Grossberg (1978), *Adaptif Rezonans Teorisi (Adaptive Resonance Theory - ART)* adlı bir öğrenme kuralı geliştirmiştir. Geliştirilen bu kural da danışmansız öğrenme metodu konusunda, zamanının en karmaşık YSA türü olarak gösterilmiştir [67].

Rummelhart et al. (1982), *Çok Katmanlı Algılayıcı (Multi Layer Perceptron - MLP)* modelini geliştirmiştir. Bu model, YSA'nın gelişimi açısından bir dönüm noktası olmuştur ve YSA'nın tekrar ilgi çekici bir konu haline gelmesine neden olmuştur. Çünkü bu model ile tek katmanlı algılayıcıların çözemediği problemler de çözülebilir hale gelmiş ve YSA'nın başarısız bir metod olduğunu iddia eden bütün ifadeler boşa çıkarılmıştır [67].

Hopfield (1982), moleküller biyolojiden beyin kuramcılığına geçiş yapan bir model geliştirmiştir. Oluşturulan bu model, günümüzde de *Hopfield Ağı* olarak bilinmektedir. Bu çalışmanın, geleneksel bilgisayar programlamanın aksine daha zor problemlere de çözüm üretebilecek kapasiteye sahip olduğu belirtilmiştir [67].

Broomhead ve Lowe (1988), çok katmanlı ağ yapılarına alternatif olarak *Radyal Tabanlı Fonksiyonu (Radial Basis Function - RBF)* geliştirmiştir.

Specht (1991), Broomhead ve Lowe (1988)'un çalışmasını daha da geliştirerek *Genelleştirilmiş Regresyon Ağı (Generalized Regression Network - GRN)* adı altında bir yöntem elde etmiştir.

Bu gelişim sürecinin ardından İnşaat ve Köprü Mühendisliği alanında da YSA ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Ancak bu çalışmaların tamamından burada söz etmek söz konusu olamayacağından dolayı sadece üst yapı analizi ile ilgili yapılmış birkaç çalışmadan aşağıda söz edilecektir.

Roberts ve Attoh-Okine (1998); tekerlek izi, enine çatlak, blok kırılma ve eşdeğer dingil yükü verileri ile International Roughness Index (Uluslararası Düzgünsüzlük İndeksi, IRI) tahmini yapan iki farklı YSA modeli üzerine çalışmıştır.

Attoh-Okine (2001); yıllık ortalama günlük trafik (YOGT), eşdeğer dingil yükü, yaş, kenar çatlağı, çevre faktörleri, üstyapı kalınlığı, oyuk, tekerlek izi ve yama verileri ile IRI tahmini yapan bir YSA modeli kurmuştur.

Madanat et al (2002), AASHTO tarafından geliştirilen üstyapı verilerini kullanarak çeşitli regresyon modelleri geliştirmiştir.

Ülkemizde ise YSA ile köprü statik ve dinamik verilerinden moment elde etme konusunda; Uğur yönetimindeki; Bahar (2004), Caferov (2005) ve Gülhan (2005)'ın tez çalışmaları mevcuttur [18, 14 ve 68]. Ayrıca YSA'nın su kaynaklarında sıkça karşılaşılan değişik problemlere uygulanması ile ilgili çok sayıda çalışma da bulunmaktadır.

6.2. Yapay Sinir Ağlarının Sınıflandırılması

YSA'nın çok sayıda farklı türü vardır. Bu farklılıkların kaynağı; öğrenme yöntemi, ağın mimarisi, bağlantı yapısı olabilmektedir. Genel olarak, YSA'yı üç ana kritere göre sınıflandırmak mümkündür.

6.2.1. Öğrenme Yaklaşımlarına Göre Sınıflandırma

YSA'yı, öğrenme yaklaşımlarına göre danışmanlı (Güdümlü, yönlendirmeli), danışmansız (Güdümsüz, yönlendirmesiz) ve takviyeli olmak üzere üçe ayırmak mümkündür. Her yöntemin kullandığı öğrenme kuralı değişebilmekle birlikte, YSA, bu üç algoritmaya göre sınıflandırılır [60].

6.2.1.1 Danışmanlı (Güdümlü) Öğrenme

Bu öğrenme şeklinde, eğitim sırasında sisteme bir girdi ve hedef çıktı vektörü çifti verilir. Giriş bilgisinden üretilen çıktı değeri ile hedef çıktı değeri kıyaslanarak ağırlıkların değiştirilmesi için gerekli bilgi hesaplanır. Bu kıyaslamadan elde edilen fark, hata olarak belirlenen değerden küçük oluncaya kadar eğitim devam eder. Hata değeri istenen değer altına düştüğünde ağırlık değerleri sabitlenir ve eğitim sona erer [69]. Bu noktada, yani hatanın istenen değer altına olup olmadığı hususunda danışmana ihtiyaç duyulur. Bu tür öğrenmeye örnek olarak *MLP* verilebilir.

6.2.1.2 Danışmansız (Güdümsüz) Öğrenme

Bu öğrenme şeklinde, kullanılan giriş vektörlerinin hangi sınıfa ait olduğu verilmez ve sistem, girişleri birbirleriyle karşılaştırarak sınıflama işlemini yerine getirir. Bir başka deyişle, bir grup girdi vektörü sisteme verilir, ancak hedef çıktılar belirtilmez. Girdiler içerisinde birbirine en çok benzeyenler gruplanır, her bir grup için farklı bir örüntü (pattern) tanımlanır ve ağ, kendi ağırlıklarını değiştirerek ayarlar [69]. Bu tür öğrenmeye örnek olarak *ART* ve *SOM* verilebilir.

6.2.1.3 Takviyeli Öğrenme

Bu öğrenme şeklinde, ağ yapısına her bir giriş değeri için bir çıkış değeri sunulmaz. Ancak, ağdan elde edilen çıkış verilerinin giriş verilerine uygunluğunu belirlemek amacıyla ağa danışman yerine kriter konur. Konulan bu kritere göre de analiz sonuçlarının kabul edilebilir veya edilemez olduğu yönünde bir sonuca varılır. Bu tür öğrenmeye örnek olarak *Genetik Algoritma (GA)* verilebilir.

6.2.2. Ağ Yapılarına Göre Sınıflandırma

İkinci sınıflandırma kriteri ise ağın mimari yapısıdır. Bazı ağlar ileri besleme şeklinde yapılandırılırken, bazı ağlar ise geri besleme şeklinde yapılandırılır [60].

6.2.2.1 İleri Beslemeli (Feed Forward) Sinir Ağları

Bu tür bir YSA'da; giriş katmanı, dış ortamdan aldığı bilgileri hiçbir değişikliğe uğratmadan orta (gizli) katmandaki hücrelere iletir. Ağa sunulan giriş, orta katmanda ve çıkış katmanında işlenerek ağ çıkışı belirlenmiş olur. Bu yapısı ile ileri beslemeli ağlar, doğrusal olmayan statik bir işlevi gerçekleştirir. En çok bilinen geriye yayma öğrenme (Backpropagation) algoritması, bu tip YSA'ların eğitiminde etkin olarak kullanılmakta ve bazen bu ağlara geriye yayılma ağları da denilmektedir. Bu tür ağlara örnek olarak MLP ve LVQ verilebilir. Şekil 6.3'de giriş, orta ve çıkış katmanı olmak üzere üç katmanlı ileri beslemeli bir YSA yapısı verilmiştir [65].

6.2.2.2 Geri Beslemeli (Recurrent) Ağlar

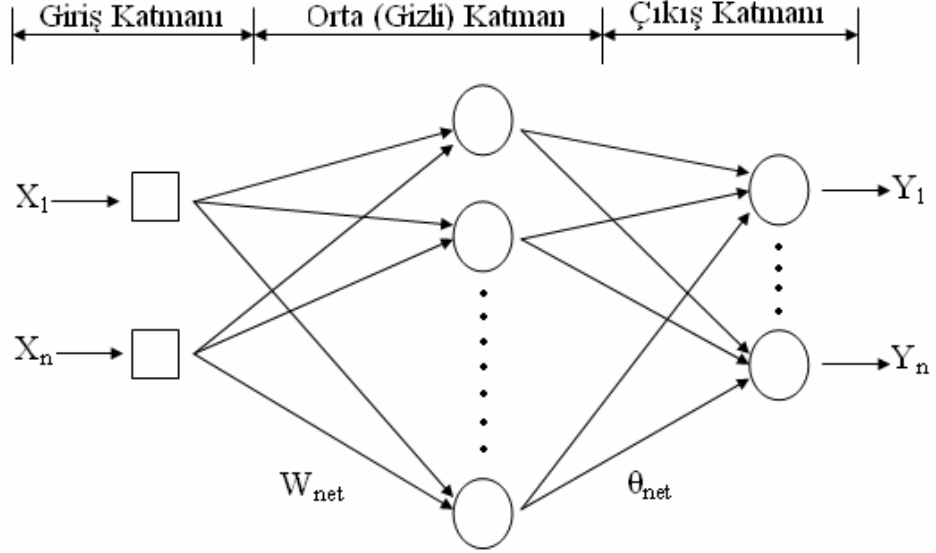
Bu ağın eğitim algoritmasının temeli ilk olarak bir doktora tezinde ileri sürülmüş (Werbos, 1974), daha sonra teknik bir raporda ele alınmış (Parker, 1985) ve Rumelhart et al (1989) tarafından geliştirilerek uygulanabilir hale dönüştürülmüştür [65].

Geri beslemeli öğrenme algoritması, anlaşılması kolay ve matematiksel olarak ispatlanabilir olmasından dolayı tercih sebebi olmuştur [63]. Bu algoritma, hataları geriye doğru çıkıştan girişe azaltmaya çalışmasından dolayı geri yayılım ismi ile anılmaktadır.

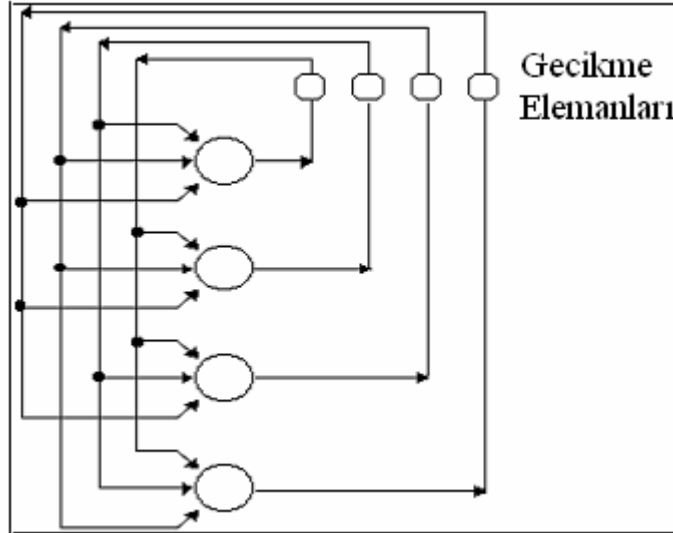
Tipik çok katlı geri yayılım ağı, daima; bir giriş tabakası, bir çıkış tabakası ve en az bir gizli tabakaya sahiptir. Gizli tabakaların sayısında teorik olarak bir sınırlama yoktur. Fakat genel olarak bir veya iki tane gizli tabaka bulunduğu belirtilmektedir [60].

Geri beslemeli ağların ileri beslemeli ağlardan farkı, bu ağlarda en az bir tane geri besleme döngüsünün bulunmasıdır [69]. Geri beslemeli ağlarda, bağlantılar döngü içerir ve hatta her seferinde yeni veri kullanır. Bu ağlar, döngü sebebiyle girdinin karşılığını yavaş bir şekilde oluşturur. Bu yüzden, bu tür ağların eğitme süreci daha uzun olur [60].

Ayrıca, hem ileri besleme hem de geri yayılma olarak tanımlanabilecek ağ yapılarının olduğu da bilinmektedir [60]. Bu tür ağlara örnek olarak Elman ve Jordan ağları verilebilir. Şekil 6.4’de, geri beslemeli bir YSA yapısı verilmiştir [69].



Şekil 6.3. İleri beslemeli 3 Katmanlı Bir YSA Mimarisi [65].



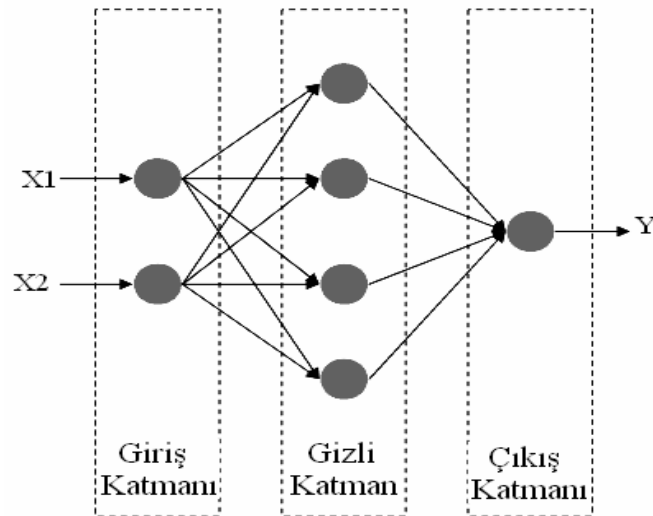
Şekil 6.4. Geri Beslemeli Bir Ağ Mimarisi [69].

6.2.3. YSA Çeşitleri

Danışmanlı, danışmansız, takviyeli, ileri beslemeli, geri beslemeli, ileri beslemeli ve geri yayılmalı vb gibi çok geniş ve çeşitli olan YSA yapıları vardır. YSA yelpazesinde en çok bilinen ve kullanılan ağlar; Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP), Radyal Tabanlı Fonksiyon (RBF), Hopfield, Elman ve Jordan ile Kohonen olarak sıralanabilir [60]. Çok fazla çeşit ve yoğun bir literatür olması nedeniyle, burada tüm ağ çeşitleri hakkında bilgi verilmemiştir. Bunun yerine sadece, bu çalışmada kullanılan ileri beslemeli ağ çeşitleri hakkında bilgi sunulmuştur.

6.2.3.1 Çok Katmanlı Algılayıcı (Multi Layer Perceptron - MLP)

Bu ağ modeli özellikle mühendislik uygulamalarında en çok kullanılan sinir ağı modeli olmuştur [63]. Birçok öğretim algoritmasının bu ağı eğitmede kullanıyor olması, bu modelin yaygın kullanılmasının nedeni olarak düşünülebilir. Bir MLP modeli; bir giriş, bir veya daha fazla ara katman ve bir de çıkış katmanından oluşur. Bir katmandaki bütün işlem elemanları bir üst katmandaki bütün işlem elemanlarına bağlıdır. Giriş katmanında herhangi bir bilgi işleme yapılmaz. Giriş katmanı, giriş vektörünü gizli katmana ulaştırmakla yükümlüdür [65]. Buradaki işlem elemanı sayısı tamamen uygulanan probleme giriş sayısına bağlıdır. Ara katman sayısı ve ara katmanlardaki işlem elemanı sayısı ise, deneme - yanılma yolu ile bulunur. Çıkış katmanındaki eleman sayısı ise yine uygulanan probleme dayanılarak belirlenir.



Şekil 6.5. 2-4-1 Düzenine Sahip bir MLP [65].

Şekil 6.5’de bir MLP ağ yapısı görülmektedir. Ağ üzerindeki katmanların (k) indisiyle sıralandığı ve (L) adet gizli katman olduğu varsayılırsa; Şekil 6.5’deki ağ için $L=1$ olur. $k=0$ giriş katmanına, $k=1$ gizli katmana ve $k=(L+1)$ çıkış katmanına karşılık gelir. Eğer (k+1)’inci katmanın (i)’inci yapay sinir hücresi, (k)’inci katmanın (j)’inci yapay sinir hücresi çıkışı (y_{kj}) ile gösterilirse, (k+1)’inci katmandaki (i)’inci sinir hücresinin net toplamı $[v_{(k+1)i}]$ ve çıkış değeri $[y_{(k+1)i}]$ şöylece hesaplanır [60];

$$v_{(k+1)i} = \sum_{j=1}^{n_k} w_{(k+1)ij} y_{kj} \dots\dots\dots(6.1)$$

$$y_{(k+1)i} = \phi(v_{(k+1)i}) \dots\dots\dots(6.2)$$

Denklemlerde görülen (n_k) değişkeni, (k)’inci katmandaki yapay hücre sayısını simgelemektedir.

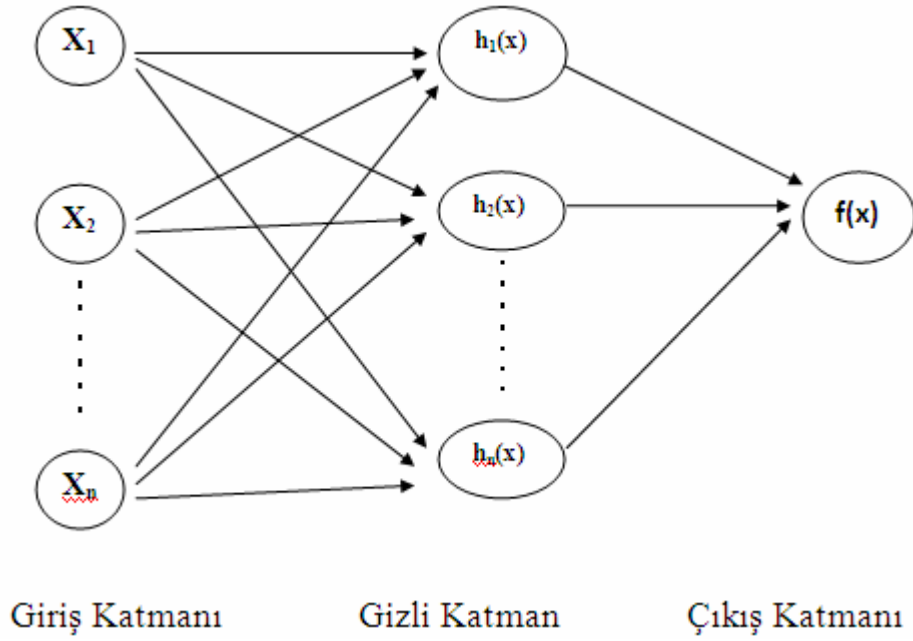
6.2.3.2 Radyal Tabanlı Ağ (Radial Basis Network - RBF)

Radyal tabanlı yapay sinir ağı, doğrusal olmayan bir fonksiyonun doğrusal bir fonksiyon ile kombinasyonudur. Radyal tabanlı YSA’da temel fikir, bir grup radyal tabanlı işlevi istenen işleve yaklaşıp yaklaşacak şekilde ağırlık atayarak toplamaktır [70].

RBF, MLP’ye alternatif olarak geliştirilen ileri beslemeli bir YSA algoritmasıdır ve çok boyutlu problemler için en uyumlu sonucu veren YSA tekniklerinden biridir [71]. RBF, ileri beslemeli YSA yapılarına benzer şekilde giriş tabakası, gizli tabaka ve çıkış tabakasından oluşur. Ancak giriş tabakasından gizli tabakaya geçişteki dönüşüm, radyal tabanlı aktivasyon fonksiyonlarını kullanan doğrusal olmayan bir dönüşümdür. Başka bir deyişle; RBF’de aktivasyon fonksiyonu sigmoid değildir. Bu fonksiyon, örneğin Gaussian olabilir [63].

Radyal tabanlı YSA modelinin yineleme (iterasyon) yapabilme özelliği yoktur. Bir başka deyişle, bu yöntem, eğitme verilerinin oluşturduğu eğrinin dışına çıkamamaktadır. RBF mimarisinde, giriş katmanından gizli katmana (radyal tabanlı katman) doğrusal olmayan ve gizli katmandan çıkış katmanına doğrusal olan bir dönüşüm uygulanır. İnterpolasyon özelliğinin çok iyi olması nedeniyle RBF, eğitim için kullanılan verilerin arasında ve yakın civarında arama yapmak için uygundur. Bu nedenle en iyileme (optimizasyon) çalışmalarında genellikle tercih edilmektedir [72].

RBF, öğrenme sürecinde danışmansız danışmanlı öğrenme olmak üzere karma strateji kullanır ve böylece öğrenme süreci iki aşamaya ayrılır. Danışmansız öğrenme stratejisi ile gerçekleştirilen ilk aşama, girdi verilerine gizli tabakada radyal tabanlı fonksiyon uygulanması sürecidir. Danışmanlı öğrenme stratejisi ile gerçekleştirilen ikinci aşama ise, gizli tabakadan elde edilen çıktılara doğrusal dönüşüm uygulanarak ağ çıktıları ile gözlenen çıktılar arasındaki hatayı en küçük yapan ağırlıkların belirlenmesi sürecidir.



Şekil 6.6. Radyal Tabanlı Bir YSA Mimarisi [72].

RBF’ de gizli tabakadaki her bir nöron, ortalaması μ_i , varyansı σ_i olan ve;

$$G_{i(x)} = \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_i^2} \sum_{k=1}^p (x_k - \mu_{ik})^2\right] \dots\dots\dots(6.3)$$

Eşitliği ile gösterilen çok değişkenli Gauss fonksiyonunu kullanır. Burada (p), bağımsız değişken sayısı ve (i), gizli tabakada yer alan herhangi bir nöronu gösterir. Bu fonksiyonlar radyal tabanlı fonksiyonlar olarak adlandırılır. Sonuç olarak, çıktı tabakasında doğrusal dönüşüm uygulanarak elde edilen ağ çıktıları;

$$f(x) = \sum_{i=1}^n w_{ji} [G_i(x)] \dots\dots\dots(6.4)$$

eşitliği ile elde edilir.

6.2.3.3 Genelleştirilmiş Regresyon Ağı (Generalized Regression Network - GRN)

Genelleştirilmiş regresyon ağları (Generalized Regression Network - GRN), radyal tabanlı işlev ağlarının özel bir durumudur. Ağ yapısı bir radyal tabanlı katman ile özel bir doğrusal katmandan oluşmaktadır. Bu tip ağlar, eğitim için yinelemeli (iteratif) bir eğitim prosedürü gerektirmemektedir [70]. Bir başka deyişle, probleme çok daha hızlı yanıt verebilmektedir. Ancak, geriye yayılım algoritması ilk koşullara ve eğitim parametrelerine çok duyarlı olduğu için, genelleştirilmiş regresyon, her probleme tutarlı sonuç vermeyebilir. Bu tür bir ağda sigma (σ), yani yumuşatma parametresi için denemeler yapılarak en uygun sonuç, bir başka deyişle en düşük hatalar ve en yüksek korelasyon katsayısı elde edilmeye çalışılır.

GRN'de; birinci katman, normal bir radyal tabanlı YSA gibi işler. Her nöronun ağırlıklı girişi, giriş vektörü ile bu girişin ağırlık vektörü arasındaki uzaklıktır. Her nöronun net girişi, o nöronun ağırlıklı girişi ile biasının (sabit terim) çarpımıyla belirlenir. Her nöronun çıkışı, o nöronun net girişinin radyal tabanlı katmandan geçirilmesiyle hesaplanır [70].

Genelleştirilmiş regresyon ağlarında bir (x_j) girişi, ağdaki Gauss çekirdeklerinden birinin merkezi olarak atanır. Herhangi bir giriş vektörü (x) için (i)'inci radyal tabanlı biriminin çıkışı;

$$\beta_i = \exp\left[-\frac{(x - x_i)^T (x - x_i)}{2\sigma^2}\right] \dots\dots\dots(6.5)$$

şeklinde hesaplanır. Burada (σ), kullanıcının belirlediği yumuşatma parametresidir.

Herhangi bir x girişi için ağın çıkışı;

$$y = \sum_{i=1}^K \alpha_i y_i \dots\dots\dots(6.6)$$

şeklindedir.

α katsayıları ise şu şekilde hesaplanır.

$$\alpha_i = \frac{\beta_i}{\sum_{i=1}^K \beta_i} \dots\dots\dots(6.7)$$

Eğer giriş vektörü (x), herhangi bir (x_i) eğitim vektörüne yakın ise (x_i)'ye ilişkin (α_i) en büyük olacak ve istenen çıkış (y), (x_i)'ye ilişkin (y_i) çıkışına yaklaşacaktır [70].

6.3. Yapay Sinir Ağlarının İnşaat Mühendisliğindeki Uygulamaları

YSA başlıca;

- Elektrik makineleri, uçaklar, entegre devreleri gibi cihazların arıza tespitinde,
- Tıpta protez tasarımında, transplantasyon zamanlarının optimizasyonunda,
- Savunma sanayinde silahların otomasyonunda, hedef izleme ve algılayıcı tasarımında,
- Haberleşme alanında, görüntü ve veri işlemede, otomatik bilgi servislerinde,
- Üretim alanında, ürün analizi ve tasarımında, kalite analizi ve kontrolünde,
- Otomasyon ve kontrolde, otomatik pilot sistemi ve robot sistemlerin kontrolü gibi mühendislik problemlerinde uygulama alanı bulmuştur.

YSA, bununla birlikte birçok önemli mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılmıştır. Bu problemler çeşitli mühendislik alanları için sınıflandırılırsa;

- İnşaat ve yapı mühendisliğinde; konstrüksiyon projelerinde kaynak seviyelerinin belirlenmesi, nehirlerin akışının tahmin edilmesi, SEM temelli yapısal analiz işleminin modellenmesi, yapı malzemelerinin iç yapılarındaki çatlakların tespit edilmesi, depreme maruz betonarme çerçevelerde emniyetli yatay taşıyıcı tahmini,
- Kimya mühendisliğinde; kimyasal reaktör seçimi, dinamik işlemlerde hata belirlenmesi, endüstriyel mayalama işleminin modellenmesi, biyokimyasal işlemlerde mikrobik konsantrasyonların tahmini,
- İmalat ve makine mühendisliğinde; metal kesme tezgâhının kontrolü, hareket eden nesneler için engelsiz yol planlaması, makine parametrelerinin

optimizasyonu, makine arızalarının sınıflandırılması, malzemelerin ısı transferinin belirlenmesi,

- Sistem ve kontrol mühendisliğinde; esnek kollu robot kontrolü, model bir helikopterin havada kontrolü, bir robot için optimum yolun bulunması, banyo suyu sıcaklığının kontrolü, endüstriyel robot kontrolü, sistem kimliklendirme,
- Elektrik ve elektronik mühendisliğinde; hastaların alarmla kontrolü, görüntülerin işlenmesi ve sıkıştırılması, güç sistemi harmoniklerinin tahmini, gezgin haberleşme sisteminde kanal dağıtımı olarak sayılabilir.

Literatürdeki YSA çalışmalarında çoğunlukla ileri beslemeli geriye yayımlı yöntem (İBGY) kullanılmıştır. Cıgızoğlu'nun (2003) ifade ettiğine göre, bu yöntemin hızlı bir şekilde programlanabilmesi gibi olumlu bir özelliği bulunmakla birlikte, algoritmanın yerel minimuma takılması ve negatif tahminler üretilebilmesi gibi olumsuz yönleri de bulunmaktadır [73]. Bu nedenle son zamanlarda inşaat mühendisliği alanındaki YSA uygulamaları için de alternatif YSA yöntemleri uygulanmaya başlamıştır. Örneğin; Genelleştirilmiş Regresyon Ağı (GRN) yöntemi ile yapılan çalışmalar oldukça iyi sonuçlar vermiş ve ileri beslemeli geriye yayımlı yöntemin kullanımı sırasında gözlenen sorunların yaşanmadığı tespit edilmiştir [73].

Bu çalışmada da bir boşluklu verev plak köprü modelinin bazı geometrik ölçüleri değiştirilerek her bir model için farklı kesit tesiri değerleri elde edilmiş, böylece çok sayıda veri üretilmiştir. Üretilen bu veriler, oluşturulan üç farklı YSA modelinin uygulamasında kullanılmıştır.

6.4. Boşluklu Verev Plak Köprülerin Analizine Yapay Sinir Ağları Uygulaması

YSA; ağ yapısına uygulanan herhangi bir problemin giriş verileri ile çıkış verileri arasındaki ilişkiyi öğrenerek probleme ait giriş verilerine karşılık kendi çıkış değerlerini üretebilme yeteneğine sahiptir [74]. Bu nedenle öncelikle problemimizin ne olduğu ve bu problemin ağ yapısına nasıl uygulanacağına karar verilir. Yapılan bu çalışmada, farklı geometrik özelliklere sahip toplam 400 adet boşluklu verev plak köprünün analizinin; köprünün öz ağırlığı, kalıcı ölü yükler ve hareketli taşıt yükleri altında YSA uygulaması ile gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

Bir problemin YSA ile çözümünde; problemin ne olduğuna karar vermek son derece önemlidir. Hedeflenen çıkış değerine ulaşabilmek için probleme ait olan parametrelerden hangilerinin giriş verisi ve hangilerinin çıkış verisi olacağına karar vermek de en az bu kadar önemlidir [74].

Bu çalışmada; SAP2000 sonlu elemanlar yazılımından elde edilen 400 adet veri kullanılmıştır [45]. Oluşturulmuş olan bu veri setindeki 400 verinin 300 tanesi eğitime amaçlı, 100 tanesi ise test amaçlı olarak kullanılmıştır. Eğitime ve test amaçlı olarak ayrılmış olan veri setleri de kendi içerisinde giriş veri seti ve çıkış veri seti olarak düzenlenmiştir. Böylelikle eğitime giriş veri seti, eğitime çıkış veri seti, test giriş seti ve test çıkış seti olmak üzere dört farklı veri seti elde edilmiştir [74].

Bu çalışmada ele alınan veriler, YSA ağ yapısına tanıtılırken, dört parametre giriş ve bir parametre çıkış verisi olarak kullanılmıştır.

Giriş parametreleri olarak ağ yapısına verevlik açısı (θ), plak boşluk çapı (R), plak kalınlığı (t) ve köprü açıklığı (L) sunulmuştur. Ağ yapısından, çıkış parametresi olarak; ölü yükten doğan eğilme momenti (M_D) ile hareketli yükten doğan eğilme momentinin (M_L) kombinasyonu olan hesap eğilme momenti (M_{DS}) değerlerini üretmesi istenmiştir. Bu verilerle dört adet farklı kombinezon oluşturulmuştur. Bunlar sıralanırsa;

- Kombinezon 1: Verevlik açısı (θ),
- Kombinezon 2: Verevlik açısı (θ) ve plak boşluk çapı (R),
- Kombinezon 3: Verevlik açısı (θ), plak boşluk çapı (R) ve plak kalınlığı (t),
- Kombinezon 4: Verevlik açısı (θ), plak boşluk çapı (R), plak kalınlığı (t) v

köprü açıklığı (L) şeklindedir.

Bütün kombinezonlarda, çıkış verisi olarak eğilme momenti değeri (M_{DS}) kullanılmıştır.

Elde edilen dört kombinezonun modellenmesinde üç farklı YSA türü kullanılmıştır;

- Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP),
- Radyal Tabanlı Fonksiyon (RBF),
- Genelleştirilmiş Regresyon Ağı (GRN).

Her üç yöntemde de, dörder farklı kombinezon oluşturulmuş ve gözlenen değerlerle YSA modeli sonuçlarını karşılaştırma kriteri olarak ortalama mutlak göreceli hata (OMGH) ve korelasyon (belirginlik) katsayısı (R^2) kullanılmıştır.

$$OMGH = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{T_{i_{gözlenen}} - Y_{i_{tahmin}}}{T_{i_{gözlenen}}} \right) \times 100 \dots\dots\dots (6.8)$$

Her üç yöntem için MATLAB 7.1 benzetim (simülasyon) yazılımı kullanılmıştır [75].

6.4.1. Çok Katmanlı Algılayıcı ile (MLP) Modelleme

Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) ile modellemede; dört farklı kombinezon için ara tabaka hücre sayısı ve iterasyon sayısı değiştirilerek en uygun Ortalama Mutlak Göreceli Hata (OMGH) değeri elde edilmeye çalışılmıştır. Her bir kombinezon için farklı iterasyon sayısı ve ara tabaka hücre sayısı ile elde edilen (OMGH) ve (R^2) değerleri Tablo 6.1 ve Tablo 6.2’de verilmiştir. Tablodaki koyu renkli satırlar, her bir kombinezon için en uygun (optimum) sonucu veren değerlerdir.

Analize küçük ara tabaka hücre sayısı ve iterasyonlarla başlanmıştır. Öncelikle iterasyonlar artırılarak hata değerlerinin değişimi gözlenmiştir. Daha sonra ara tabaka hücre sayıları değiştirilerek bu durumun (OMGH) ve (R^2) üzerindeki etkisine bakılmıştır. Bu değerlerin kombinasyonları denenmiştir ve en uygun sonucu veren, bir başka deyişle düşük (OMGH) ve yüksek (R^2) kombinezonu ile ara tabaka hücre sayısı ve iterasyon sayısı elde edilmeye çalışılmıştır. Eğitim ve test verilerinin her biri için 38 adet farklı durum dikkate alınmıştır. Yani toplamda 76 farklı durum ele alınarak en uygun sonuç elde edilmeye çalışılmıştır.

Tablo 6.1. YSA Modellerinin Test Aşamasındaki (OMGH) ve (R^2) Değerleri.

TEST	Ara Tabaka Hücre Sayısı	İterasyon Sayısı	OMGH	R^2
Kombinezon 1	1	10	20.1066	1.7684e-030
	1	20	20.1066	1.7684e-030
	3	10	20.1066	1.7684e-030
	10	50	20.1066	1.7684e-030
	20	50	20.1066	1.7684e-030
Kombinezon 2	3	10	32.4094	0.0900
	3	20	32.3477	0.0895
	5	20	31.9142	0.1227
	7	40	33.4877	0.1259
	7	45	33.5436	0.1251
	9	40	33.2177	0.1271
	9	35	33.2501	0.1260
	9	50	33.1864	0.1280
	10	50	32.9549	0.1262
	15	50	31.9138	0.1331
	12	50	33.1634	0.1294
	20	50	33.2075	0.1133
Kombinezon 3	4	30	16.3457	0.7103
	4	40	16.0905	0.7138
	4	50	15.9169	0.7155
	3	50	14.9711	0.6280
	2	50	15.6873	0.7124
	7	50	17.0507	0.6266
	9	50	16.0357	0.6768
	10	50	16.0573	0.6744
	3	40	14.9838	0.6282
Kombinezon 4	2	20	4.0912	0.9609
	2	30	3.9471	0.9611
	4	30	3.6116	0.9755
	7	30	5.2080	0.9540
	4	40	3.6116	0.9755
	4	50	3.6116	0.9755
	4	45	3.6116	0.9755
	7	45	5.2080	0.9540
	9	45	7.2174	0.8305
	3	30	5.3125	0.9689
	7	50	5.2080	0.9540
	9	50	7.2174	0.8305

Tablo 6.2. YSA Modellerinin Eğitim Aşamasındaki (OMGH) ve (R^2) Değerleri.

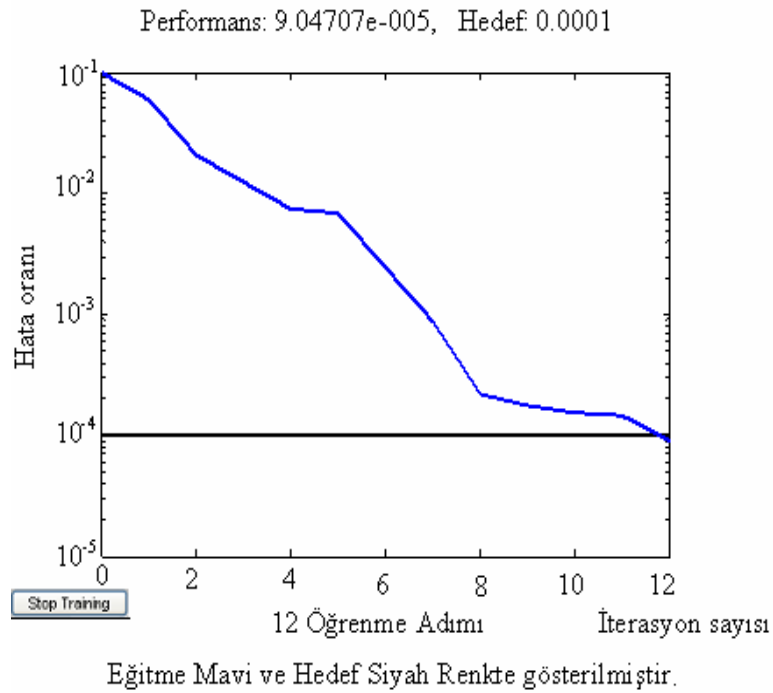
EĞİTME	Ara Tabaka Hücre Sayısı	İterasyon Sayısı	OMGH	R^2
Kombinezon 1	1	10	301.9290	1.5019e-030
	1	20	301.9290	1.5019e-030
	3	35	301.9290	1.5019e-030
	10	50	301.9290	1.5019e-030
	20	50	301.9290	1.5019e-030
Kombinezon 2	3	10	25.3098	0.7192
	3	20	25.3214	0.7194
	5	20	25.3252	0.7239
	7	40	25.0804	0.7264
	7	45	25.0703	0.7265
	9	40	25.2679	0.7262
	9	35	25.2770	0.7262
	9	50	25.2485	0.7263
	10	50	25.2121	0.7228
	15	50	24.9424	0.7270
	12	50	24.9795	0.7265
	20	50	24.9545	0.7271
Kombinezon 3	4	30	12.8294	0.9188
	4	40	12.7863	0.9189
	4	50	12.7709	0.9190
	3	50	11.8842	0.9263
	2	50	12.5781	0.9177
	7	50	12.0706	0.9263
	9	50	12.0073	0.9298
	10	50	11.4424	0.9326
	3	40	11.8985	0.9263
Kombinezon 4	2	20	3.5338	0.9949
	2	30	3.5338	0.9949
	4	30	3.2429	0.9972
	7	30	2.5950	0.9975
	4	40	3.2429	0.9972
	4	50	3.2429	0.9972
	4	45	3.2429	0.9972
	7	45	2.5950	0.9975
	9	45	3.4277	0.9979
	3	30	2.9905	0.9972
	7	50	2.5950	0.9975
	9	50	3.4277	0.9979

Kombinezonlardan elde edilen en iyi sonuçlar Tablo 6.3’de gösterilmiştir.

Tablo 6.3. YSA Kombinezonlarının Test Aşamasındaki (OMGH) ve (R^2) Değerleri.

Kombinezon No	Ara Tabaka Sayısı	İterasyon Sayısı	OMGH	R^2
1	1	10	20.1066	1.7684e-030
2	15	50	31.9138	0.1331
3	3	50	14.9711	0.6280
4	4	50	3.6116	0.9755

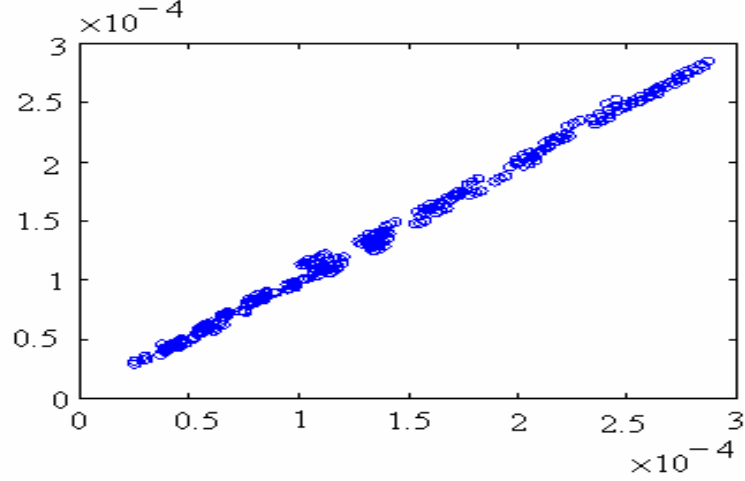
Tablolardan görüldüğü üzere, en küçük (OMGH) değeri, dördüncü kombinezondaki 4 adet ara tabaka hücreğine ve 50 adet iterasyona sahip modelden elde edilmiştir. Yani, en uygun modelleme bu şekilde elde edilmiştir. Belirlenen modelden elde edilen grafikler ise aşağıda verilmiştir.



Şekil 6.7. MLP Modelinin Eğitim Aşamasında Hatalara Bağlı İterasyon Değişimi.

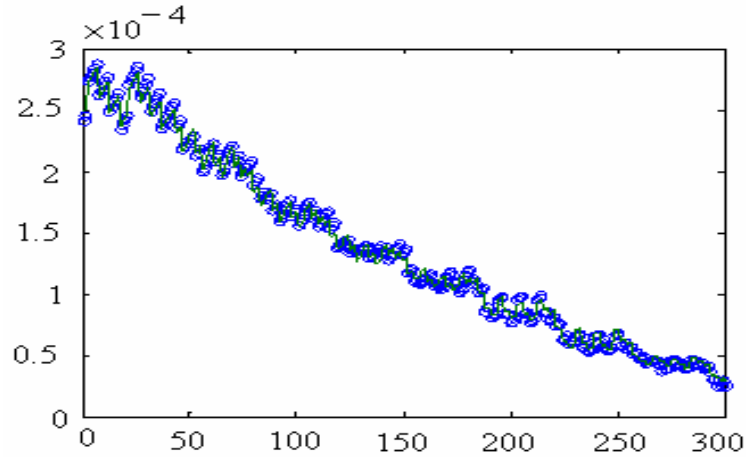
Şekil 6.7’de yatay eksen iterasyon sayısını, dikey eksen hata oranını göstermektedir. Modellemede, hedeflenen hata 0.0001 olarak MATLAB 7.1 benzetim (simülasyon) yazılımına girilmiştir. Grafikteki siyah renkli doğru, hedeflenen hata ifadesidir. Mavi

renkli eğri ise, iterasyon sayısına göre hatanın değişimini göstermektedir. 12. iterasyonda hedeflenen hataya ulaşılmıştır. Hatadaki en büyük düşüş ise 4-8 iterasyon arasında meydana gelmiştir. Bu aralıkta hata, yaklaşık 100 kat gerilemiştir.



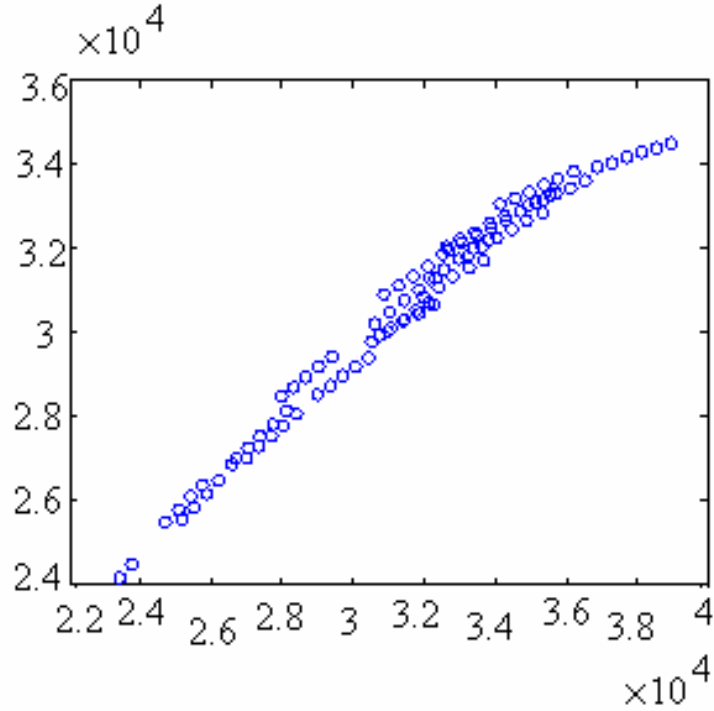
Şekil 6.8. YSA Modelinin Eğitim Aşamasındaki Doğru Grafiği.

Şekil 6.8’de, modelin eğitim aşamasındaki gerçek veriler, bir başka deyişle SAP2000 sonlu elemanlar yazılımından elde edilen veriler (T1) ile hedeflenen verilerin (Y1) grafiği verilmiştir. Grafikte yatay eksen (T1)’i, dikey eksen (Y1)’i ifade etmektedir. Mavi renkli her bir dairesel nokta, birer eğitim verisini temsil etmektedir. Grafikte en iyi sonucun (T1 = Y1) doğrusu olacağı düşünülürse, verilerin yatay eksen ile 45°’lik açı yapan bir doğruya yakın olması, eğitim aşamasının başarılı olduğu anlamına gelecektir.



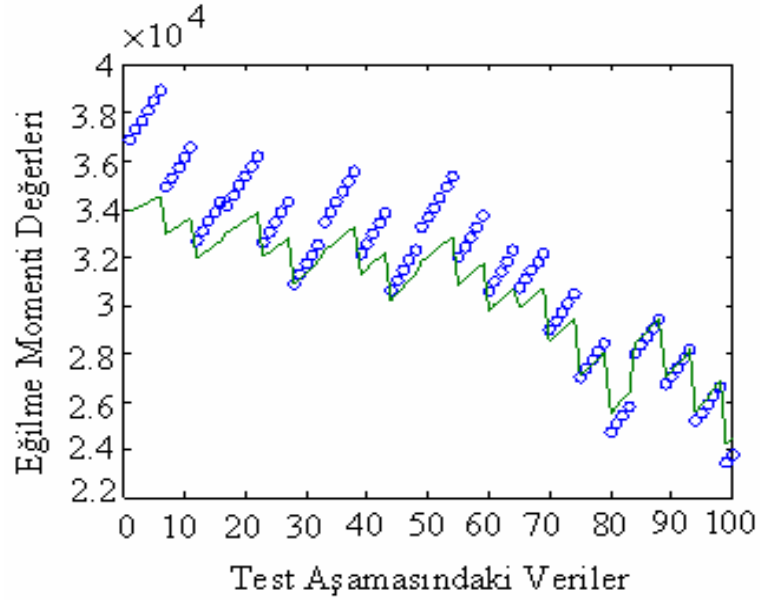
Şekil 6.9. YSA Modelinin Eğitim Aşamasındaki Gidiş Grafiği.

Şekil 6.9’da, eğitme aşaması için oluşturulan veriler ile elde edilen sonuçların grafiği verilmiştir. Yatay eksen, eğitme aşamasındaki toplam 300 veriyi, programa giriş sırasına göre ifade ederken, dikey eksen çıkış datasını yani eğilme momenti değerini ifade etmektedir. Dairesel ve mavi renkli noktalar, SAP2000 yazılımından elde edilen eğilme momenti değerlerini temsil ederken çizgisel ve yeşil renkli eğriler ise YSA’dan elde edilen verilerdir. Doğal olarak, bu simgeler birbirine ne kadar yakın olursa eğitme işlemi de o kadar başarılı olmuş demektir.



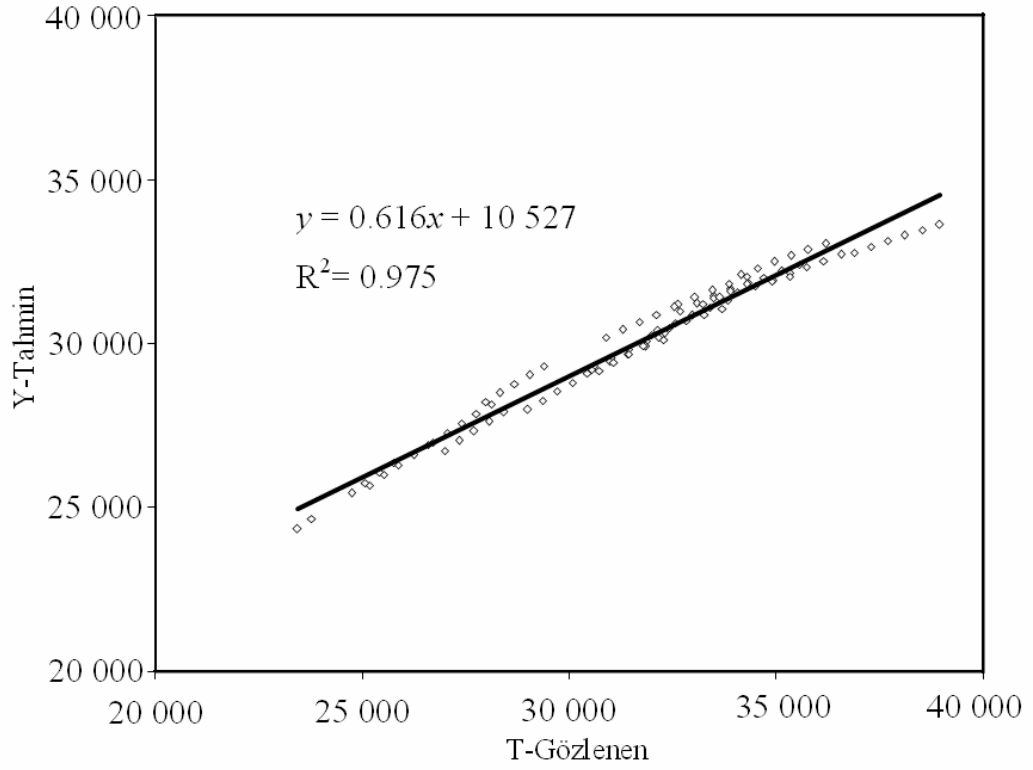
Şekil 6.10. YSA Modelinin Test Aşamasındaki Doğru Grafiği.

Şekil 6.10’da; SAP2000 yazılımından elde edilen veriler (T2) ile YSA’dan elde edilen verilerin (Y2) grafiği verilmiştir. Şekil 6.8’de olduğu gibi; mavi renkli her bir dairesel nokta, birer test verisini temsil etmektedir. Grafikte yatay eksen (T2)’yi, dikey eksen (Y2)’yi ifade etmektedir. Grafikte en iyi sonucun (T2 = Y2) doğrusu olacağı düşünülürse, verilerin yatay eksen ile 45°’lik açı yapan bir doğruya yakın olması, test aşamasının başarılı olduğu anlamına gelecektir.



Şekil 6.11. YSA Modelinin Test Aşamasındaki Gidiş Grafiği.

Şekil 6.11’de, test aşaması için oluşturulan veriler ile elde edilen sonuçların grafiği verilmiştir. Şekil 6.9’daki gibi; yatay eksen, test aşamasındaki toplam 100 veriyi, programa giriş sırasına göre ifade ederken, dikey eksen eğilme momenti değerini ifade etmektedir. Dairesel ve mavi renkli noktalar, SAP2000 sonlu elemanlar yazılımından elde edilen moment değerlerini temsil ederken çizgisel ve yeşil renkli eğriler ise YSA’nın test ettiği verilerdir. Doğal olarak, bu simgeler birbirine ne kadar yakın olursa test işlemi de o kadar başarılı olmuş demektir. Bu noktada; YSA’nın verileri kabul edilebilir ölçütlerde modelleyebilme yeteneği kadar hangi verilerin eğitime, hangi verilerin test verisi olarak seçilmesine karar verilmesi ile eğitime ve test verilerinin sıralamasının da çok önemli olduğu görülmektedir.



Şekil 6.12. YSA Modelinin Test Aşamasında, (T) ve (Y) Değerlerinin Doğru Grafiği.

Şekil 6.8 ve Şekil 6.10 MATLAB benzetim (simülasyon) yazılımından elde edilmiş iken Şekil 6.12 MS Excel programından elde edilmiştir. Şekilde yatay eksen gözlenen, bir başka deyişle programa sunulan değerleri (T), dikey eksen ise YSA'dan elde edilen tahmin (Y) değerlerini göstermektedir. Noktasal olarak gösterilen ifadeler her bir test verisini göstermektedir. Çizgisel doğru ise test verilerine en uygun şekilde çizilmiş doğrudur. Tahmini veri yoğunluğu ($T = Y$) doğrusuna ne kadar yakın ise, modelleme o kadar başarılı olmuş demektir. MS Excel programından ayrıca korelasyon katsayısı (R^2) değeri ile tahmin değerinin (Y) gözlenen değere (T) bağlı denklemini de elde edilerek MATLAB yazılımından elde edilen sonuçla karşılaştırıldığında her iki sonucun birbiri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir.

6.4.2. Radyal Tabanlı Fonksiyon ile (RBF) Modelleme

Radyal Tabanlı Fonksiyon ile (RBF) modellemede; dört farklı kombinezon için ara tabaka hücre sayısı ve spread (yayılım) sayısı değiştirilerek en uygun ortalama mutlak göreceli hata (OMGH) değeri elde edilmeye çalışılmıştır. Her bir kombinezon için farklı spread sayısı ve ara tabaka hücre sayısı ile elde edilen (OMGH) ve (R^2) değer tabloları aşağıda gösterilmiştir. Yazılımda, standart olarak hata ifadesi 0, gösterim sayısı ise 30 olarak alınmıştır.

Her bir kombinezonda, analiz için spread sayısı (0.2) ile (2.0) aralığında (0.1) değeri istisnai olmak üzere (0.2) artırılarak, ara tabaka hücre sayısı ise (2) ile (20) aralığında (1) değeri istisnai olmak üzere (2) artırılarak elde edilmiştir.

Bu değerlerin birbirleriyle olan bütün kombinasyonları denenmiştir ve en uygun sonucu veren, yani düşük Ortalama Mutlak Göreceli Hata (OMGH) ve yüksek korelasyon katsayısı, (R^2)'ye sahip kombinezon ile ara tabaka hücre sayısı ve spread sayısı elde edilmeye çalışılmıştır. Her bir kombinezon için; $11 \times 11 = 121$ adet farklı durumun dikkate alındığı düşünülürse, RBF yöntemi ile modelleme için toplamda; $4 \times 121 = 484$ farklı durum dikkate alınmıştır.

Tablo 6.4. Radyal Tabanlı Modelde Kombinezon (1) için Test Aşamasındaki OMGH ve R^2 Değerleri.

Kombinezon 1			YAYILIM (SPREAD) SAYISI										
			0.10	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80	2.00
ARA TABAKA HÜCRE SAYISI	1	OMGH	90.2696	95.8319	100.3747	103.0847	104.4124	105.1114	105.5205	79.9901	79.7531	79.5862	79.4652
		R^2	6.1296e-032	4.1439e-032	3.5681e-032	3.5681e-032	5.0223e-032	3.5681e-032	4.1439e-032	4.1439e-032	4.1439e-032	6.1296e-032	3.5681e-032
	2	OMGH	89.5803	95.8319	100.3747	95.8249	96.1327	105.1114	96.1119	96.1457	96.0805	96.0364	95.9866
		R^2	6.1296e-032	4.1439e-032	3.5681e-032	5.3274e-032	3.5681e-032	3.5681e-032	3.5681e-032	5.3274e-032	3.5681e-032	5.3274e-032	5.0223e-032
	4	OMGH	100.0518	89.7712	94.1291	97.7013	96.7741	96.4241	96.2481	96.1457	96.0805	96.0364	96.0050
		R^2	5.0223e-032	3.5681e-032	3.5681e-032	5.0223e-032	5.3274e-032	3.5681e-032	4.1439e-032	5.3274e-032	3.5681e-032	5.3274e-032	4.1439e-032
	6	OMGH	100.0518	89.7712	94.1291	97.7013	96.7741	96.4241	96.2481	96.1457	96.0805	96.0364	96.0050
		R^2	5.0223e-032	3.5681e-032	3.5681e-032	5.0223e-032	5.3274e-032	3.5681e-032	4.1439e-032	5.3274e-032	3.5681e-032	5.3274e-032	4.1439e-032
	8	OMGH	100.0518	89.7712	94.1291	97.7013	96.7741	96.4241	96.2481	96.1457	96.0805	96.0364	96.0050
		R^2	5.0223e-032	3.5681e-032	3.5681e-032	5.0223e-032	5.3274e-032	3.5681e-032	4.1439e-032	5.3274e-032	3.5681e-032	5.3274e-032	4.1439e-032
	10	OMGH	100.0518	89.7712	94.1291	97.7013	96.7741	96.4241	96.2481	96.1457	96.0805	96.0364	96.0050
		R^2	5.0223e-032	3.5681e-032	3.5681e-032	5.0223e-032	5.3274e-032	3.5681e-032	4.1439e-032	5.3274e-032	3.5681e-032	5.3274e-032	4.1439e-032
	12	OMGH	100.0518	89.7712	94.1291	97.7013	96.7741	96.4241	96.2481	96.1457	96.0805	96.0364	96.0050
		R^2	5.0223e-032	3.5681e-032	3.5681e-032	5.0223e-032	5.3274e-032	3.5681e-032	4.1439e-032	5.3274e-032	3.5681e-032	5.3274e-032	4.1439e-032
	14	OMGH	100.0518	89.7712	94.1291	97.7013	96.7741	96.4241	96.2481	96.1457	96.0805	96.0364	96.0050
		R^2	5.0223e-032	3.5681e-032	3.5681e-032	5.0223e-032	5.3274e-032	3.5681e-032	4.1439e-032	5.3274e-032	3.5681e-032	5.3274e-032	4.1439e-032
	16	OMGH	100.0518	89.7712	94.1291	97.7013	96.7741	96.4241	96.2481	96.1457	96.0805	96.0364	96.0050
		R^2	5.0223e-032	3.5681e-032	3.5681e-032	5.0223e-032	5.3274e-032	3.5681e-032	4.1439e-032	5.3274e-032	3.5681e-032	5.3274e-032	4.1439e-032
	18	OMGH	100.0518	89.7712	94.1291	97.7013	96.7741	96.4241	96.2481	96.1457	96.0805	96.0364	96.0050
		R^2	5.0223e-032	3.5681e-032	3.5681e-032	5.0223e-032	5.3274e-032	3.5681e-032	4.1439e-032	5.3274e-032	3.5681e-032	5.3274e-032	4.1439e-032
	20	OMGH	100.0518	89.7712	94.1291	97.7013	96.7741	96.4241	96.2481	96.1457	96.0805	96.0364	96.0050
		R^2	5.0223e-032	3.5681e-032	3.5681e-032	5.0223e-032	5.3274e-032	3.5681e-032	4.1439e-032	5.3274e-032	3.5681e-032	5.3274e-032	4.1439e-032

Tablo 6.5. Radyal Tabanlı Modelde Kombinezon (2) için Test Aşamasındaki OMGH ve R^2 Değerleri.

Kombinezon 2			YAYILIM (SPREAD) SAYISI										
			0.10	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80	2.00
ARA TABAKA HÜCRE SAYISI	1	OMGH	83.5084	73.6886	69.7117	124.2356	149.1405	161.9246	169.2313	89.8505	93.4068	95.9149	97.7446
		R^2	5.0223e-032	0.6400	0.6824	0.6658	0.6560	0.6507	0.6477	0.6458	0.6445	0.6436	0.6430
	2	OMGH	83.5084	61.1451	80.5337	51.1221	46.3268	43.9840	42.9215	29.3490	29.0802	29.3089	29.6664
		R^2	5.0223e-032	0.6400	0.6824	0.6726	0.6759	0.6762	0.6760	0.6765	0.6762	0.6760	0.6759
	4	OMGH	58.5728	80.0348	45.1829	32.9541	38.0926	40.0102	34.1853	39.9453	39.6295	39.5668	39.0583
		R^2	0.4197	0.5089	0.6826	0.6786	0.6756	0.6777	0.6759	0.6766	0.6763	0.6760	0.6759
	6	OMGH	68.6242	78.7019	48.0612	30.9287	37.6125	40.5772	40.7955	39.5504	38.8717	39.7798	39.1741
		R^2	0.5096	0.5125	0.6830	0.6824	0.6784	0.6778	0.6771	0.6766	0.6874	0.6761	0.6759
	8	OMGH	113.8969	74.7525	48.4708	32.6768	37.5497	123.2021	40.3864	33.6633	38.6280	38.5052	91.3287
		R^2	0.5704	0.5114	0.6836	0.6864	0.6867	0.6486	0.6871	0.6764	0.6918	0.6904	0.6793
	10	OMGH	90.1274	49.0300	48.4585	32.5213	37.1213	58.2992	30.8591	31.3325	38.6275	38.6281	34.4889
		R^2	0.5511	0.6859	0.6838	0.6873	0.6910	0.6837	0.6845	0.6902	0.6917	0.6916	0.6904
	12	OMGH	57.9645	49.4098	34.8352	32.4864	37.1254	48.1057	29.4334	31.0751	38.6270	38.6282	34.3520
		R^2	0.6662	0.6852	0.6847	0.6876	0.6922	0.6888	0.6918	0.6915	0.6917	0.6916	0.6916
	14	OMGH	62.3198	49.4461	48.9785	32.4106	37.1318	48.4653	29.8061	31.0736	38.6268	38.6282	34.3542
		R^2	0.6877	0.6852	0.6882	0.6879	0.6922	0.6907	0.6927	0.6915	0.6917	0.6916	0.6916
	16	OMGH	59.1860	131.7174	54.2028	32.4114	37.1318	48.4642	29.8045	31.4531	38.6268	38.6282	34.3542
		R^2	0.6892	0.6897	0.6920	0.6879	0.6922	0.6907	0.6927	0.6925	0.6917	0.6916	0.6916
	18	OMGH	90.6408	384.1795	54.0954	32.4114	37.1318	48.4641	29.8027	31.4484	45.6264	38.6282	34.3542
		R^2	0.6929	0.6933	0.6925	0.6879	0.6922	0.6907	0.6927	0.6925	0.6898	0.6916	0.6916
	20	OMGH	91.8985	372.7811	54.1258	52.0766	39.3314	48.4641	29.8027	30.5821	30.1695	38.6282	34.3542
		R^2	0.6929	0.6933	0.6927	0.6865	0.6899	0.6907	0.6927	0.6921	0.6909	0.6916	0.6916

Tablo 6.6. Radyal Tabanlı Modelde Kombinezon (3) için Test Aşamasındaki OMGH ve R^2 Değerleri.

Kombinezon 3			YAYILIM (SPREAD) SAYISI										
			0.10	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80	2.00
ARA TABAKA HÜCRE SAYISI	1	OMGH	32.2934	32.7488	24.1370	16.2007	15.7535	16.0345	22.9992	23.0091	23.0177	23.0247	23.0303
		R^2	0.0306	0.0156	0.0606	0.1811	0.1940	0.1940	0.2384	0.2375	0.2369	0.2365	0.2362
	2	OMGH	33.9273	33.3700	20.8975	16.3294	17.2840	17.8275	18.0952	17.8452	17.7155	17.6308	17.5781
		R^2	0.0734	0.0194	9.2371e-005	0.1418	0.2258	0.3002	0.3352	0.3274	0.3210	0.3161	0.3123
	4	OMGH	33.9273	31.8960	17.7822	17.3258	17.6150	16.1554	16.2718	16.4930	16.0428	16.0150	16.0031
		R^2	0.0734	0.0218	0.0398	0.1498	0.3556	0.3399	0.3908	0.3570	0.3624	0.3524	0.3459
	6	OMGH	35.2019	20.9243	15.8713	18.8475	17.6233	16.1798	16.6149	16.2842	16.1305	16.2852	16.4111
		R^2	0.0349	0.0101	0.0467	0.3387	0.3835	0.3410	0.3686	0.3895	0.3541	0.3855	0.3598
	8	OMGH	57.0348	32.8715	19.5192	18.1053	15.1634	14.3041	15.2157	15.5205	14.6997	14.8727	13.9132
		R^2	0.0967	0.0047	0.5012	0.5920	0.7287	0.6991	0.7249	0.6996	0.7651	0.7521	0.6830
	10	OMGH	56.8908	32.5897	19.0021	16.9636	16.8764	17.0663	14.2126	13.7128	15.9918	14.9017	14.1788
		R^2	0.0264	0.0015	0.5352	0.7137	0.6222	0.6946	0.7077	0.7286	0.6548	0.6873	0.7156
	12	OMGH	50.0998	30.8281	19.2530	16.4521	15.3140	15.0397	15.8294	14.4414	15.8580	15.8826	15.8938
		R^2	0.1498	0.0222	0.5186	0.6653	0.6724	0.6723	0.6975	0.6992	0.6910	0.7229	0.7235
	14	OMGH	46.9724	28.8699	18.7863	17.3012	14.7464	15.7580	16.5122	14.6206	15.8174	15.8374	15.8395
		R^2	0.1015	0.0244	0.5341	0.6744	0.7191	0.6611	0.7077	0.6996	0.7222	0.7214	0.7162
	16	OMGH	41.1798	28.6619	18.4275	16.5714	15.5562	15.1962	16.2838	14.9471	15.7606	15.4505	15.5240
		R^2	0.0661	0.0349	0.4213	0.7172	0.7012	0.6530	0.7084	0.7050	0.7316	0.7388	0.7185
	18	OMGH	39.5611	26.5333	16.9658	16.9549	15.1708	15.2177	15.9077	16.9091	15.6754	15.4616	14.6496
		R^2	0.0499	0.0834	0.5159	0.7252	0.7295	0.6643	0.7406	0.5851	0.6313	0.6516	0.6517
	20	OMGH	38.3630	25.7964	17.5193	17.4126	16.9405	15.8214	15.9753	16.4273	15.6021	15.9523	14.7678
		R^2	0.0347	0.0542	0.5004	0.6640	0.6218	0.6885	0.7323	0.6193	0.5392	0.4775	0.5278

Tablo 6.7. Radyal Tabanlı Modelde Kombinezon (4) için Test Aşamasındaki OMGH ve R^2 Değerleri.

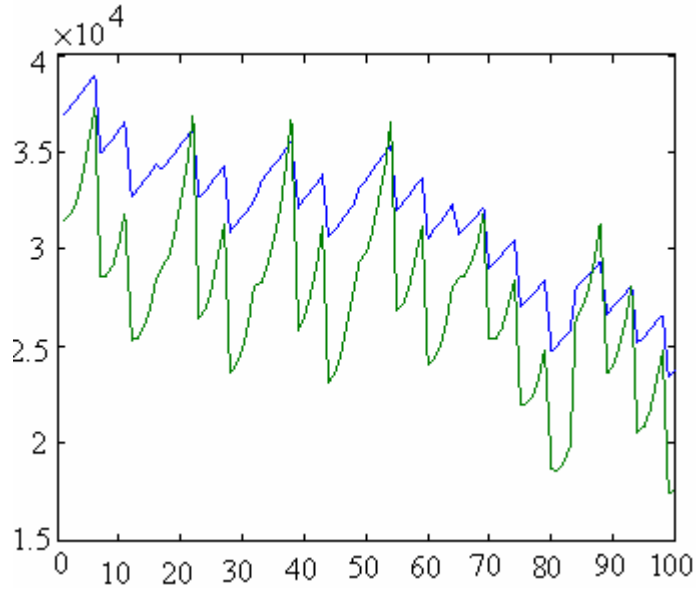
Kombinezon 4			YAYILIM (SPREAD) SAYISI										
			0.10	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80	2.00
ARA TABAKA HÜCRE SAYISI	1	OMGH	1.4848e+006	1.5510e+006	1.8188e+006	2.2991e+006	2.4021e+006	2.3749e+006	2.3584e+006	2.1130e+006	2.1110e+006	2.1094e+006	2.1083e+006
		R^2	0.0227	0.0902	0.1051	1.2681e-005	0.0196	0.0201	0.0203	0.0236	0.0234	0.0233	0.0232
	2	OMGH	1.4893e+006	1.4602e+006	1.9205e+006	2.6548e+006	2.8064e+006	3.2077e+006	3.2433e+006	3.1516e+006	3.1548e+006	3.1557e+006	3.1556e+006
		R^2	0.0031	0.2149	0.0743	8.1091e-004	0.1413	0.4964	0.5573	0.5377	0.5646	0.5810	0.5913
	4	OMGH	1.3917e+006	1.6569e+006	2.9461e+006	2.9484e+006	2.8834e+006	3.3408e+006	3.3621e+006	3.3200e+006	3.3405e+006	3.3582e+006	3.3665e+006
		R^2	0.0092	0.0024	0.0709	0.1326	0.2215	0.6718	0.7510	0.7042	0.7722	0.7794	0.8291
	6	OMGH	1.3395e+006	2.0353e+006	2.9782e+006	3.0755e+006	3.0716e+006	3.5513e+006	3.3509e+006	3.4044e+006	3.3856e+006	3.4155e+006	3.4076e+006
		R^2	0.0103	0.0380	0.0288	0.1697	0.2898	0.9150	0.9353	0.9374	0.9410	0.9040	0.9336
	8	OMGH	1.4066e+006	2.1300e+006	3.0858e+006	3.3302e+006	3.4222e+006	3.5010e+006	3.4944e+006	3.5356e+006	3.5201e+006	3.5980e+006	3.4694e+006
		R^2	6.7376e-005	0.1549	0.0368	0.5613	0.8512	0.9416	0.9617	0.9663	0.9662	0.9679	0.9168
	10	OMGH	1.4828e+006	2.2659e+006	3.0816e+006	3.4160e+006	3.5556e+006	3.5819e+006	3.5996e+006	3.5449e+006	3.5283e+006	3.6055e+006	3.4917e+006
		R^2	3.5777e-006	0.2487	0.1537	0.8210	0.9557	0.9395	0.9365	0.9779	0.9444	0.9590	0.9829
	12	OMGH	1.4956e+006	2.2842e+006	3.1571e+006	3.4503e+006	3.6609e+006	3.6370e+006	3.6052e+006	3.5835e+006	3.5633e+006	3.6235e+006	3.5685e+006
		R^2	0.0107	0.2372	0.2900	0.8685	0.9553	0.9779	0.9550	0.9733	0.9799	0.9773	0.9888
	14	OMGH	1.6235e+006	2.3896e+006	3.1564e+006	3.4463e+006	3.7049e+006	3.6140e+006	3.6307e+006	3.6245e+006	3.6008e+006	3.6544e+006	3.6015e+006
		R^2	0.0646	0.1120	0.3327	0.8562	0.9563	0.9860	0.9754	0.9666	0.9878	0.9747	0.9896
	16	OMGH	1.7704e+006	2.4592e+006	3.2709e+006	3.5320e+006	3.7071e+006	3.7334e+006	3.6561e+006	3.6255e+006	3.6586e+006	3.7026e+006	3.6376e+006
		R^2	0.1819	0.1224	0.5230	0.8295	0.9394	0.9575	0.9757	0.9715	0.9913	0.9786	0.9793
	18	OMGH	1.7409e+006	2.4678e+006	3.2644e+006	3.5555e+006	3.7178e+006	3.7421e+006	3.6932e+006	3.6184e+006	3.7103e+006	3.7173e+006	3.6391e+006
		R^2	0.1692	0.1113	0.4274	0.8141	0.9529	0.9614	0.9820	0.9796	0.9762	0.9861	0.9870
	20	OMGH	1.8317e+006	2.5016e+006	3.2731e+006	3.5255e+006	3.6492e+006	3.7293e+006	3.7592e+006	3.6724e+006	3.7172e+006	3.7282e+006	3.6904e+006
		R^2	0.1572	0.0990	0.4239	0.8159	0.9795	0.9620	0.9859	0.9715	0.9700	0.9796	0.9892

Her bir kombinezondan elde edilen en uygun sonuçlar Tablo 6.8’de gösterilmiştir.

Tablo 6.8. YSA Kombinezonlarının Test Aşamasındaki OMGH ve R^2 Değerleri.

Kombinezon No	Ara Tabaka Sayısı	Yayılım (Spread) Sayısı	OMGH	R^2
1	1	2.00	79.4652	3.5681e-032
2	2	1.60	29.0802	0.6762
3	10	1.40	13.7128	0.7286
4	6	0.10	1.3395e+006	0.0103

Tablolardan görüldüğü üzere, en küçük Ortalama Mutlak Göreceli Hata (OMGH) değeri, üçüncü kombinezondaki on adet ara tabaka hücre sayısı ve 1.40 spread sayısı değerine sahip modelden elde edilmiştir. En uygun modelleme bu şekilde elde edilmiş olup belirlenen modelden elde edilen grafikler ise aşağıda verilmiştir.

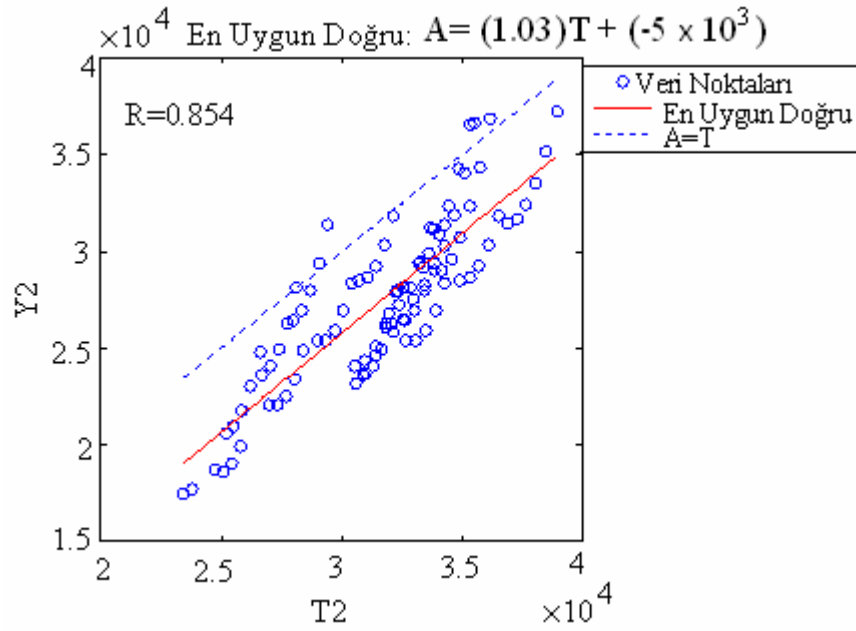


Şekil 6.13. YSA Modelinin Test Aşamasındaki Gidiş Grafiği.

Şekil 6.13’de; SAP2000 yazılımından elde edilen eğilme momenti değerleri mavi renkli olarak, Radyal tabanlı YSA’dan elde edilen eğilme momenti değerleri ise yeşil

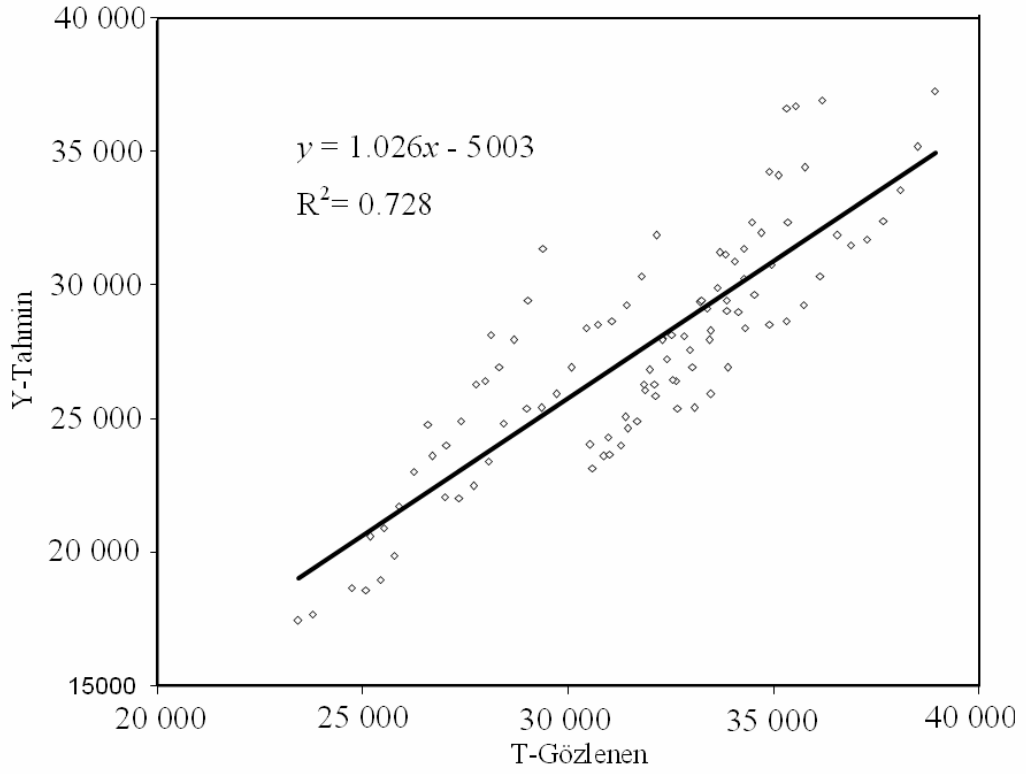
renkli olarak gösterilmiştir. Yatay eksen, test aşamasındaki verilerin sıralamasını, başka bir deyişle veri sayısını, dikey eksen ise YSA modeline çıkış olarak tanıtılan eğilme momenti değerlerini göstermektedir.

Yeşil ve mavi renkli eğriler birbirine ne kadar yakın ise, Radyal Tabanlı Fonksiyon (RBF) modeli, verileri o kadar iyi test etmiş demektir.



Şekil 6.14. YSA Modelinin Test Aşamasındaki Doğru Grafiği.

Şekil 6.14'de yatay eksen, test aşamasındaki SAP2000 yazılımı ile bulunan sonuç eğilme momenti değerlerini, dikey eksen ise Radyal Tabanlı Fonksiyon (RBF) modeli ile bulunan sonuç eğilme momenti değerlerini göstermektedir. Kesikli çizgi olarak mavi renkte gösterilen doğru, ($Y2 = T2$) doğrusudur, yani grafik için yatayla 45°'lik açı yapan doğrudur. Dairesel olarak mavi renkte gösterilen ifadeler, her bir test verisinin gerçek ($T2$) ve tahmin ($Y2$) değerleri koordinatlarıdır. Kırmızı renkli çizgi ile gösterilen doğru ise, YSA'dan elde edilen modelleme için en uygun doğrudur. Yani; modellemeden elde edilen kırmızı renkli çizgi ile gösterilen en uygun doğru, mavi renkli ve kesikli olarak gösterilen ($T2 = Y2$) doğrusuna ne kadar yakın ise, modelleme o kadar başarılı olmuş demektir.



Şekil 6.15. YSA Modelinin Test Aşamasında, (T) ve (Y) Değerlerinin Doğru Grafiği.

Şekil 6.14, MATLAB 7.1 yazılımından elde edilmiş iken Şekil 6.15 MS Excel programından elde edilmiştir. Şekilde yatay eksen gözlenen (T), yani programa sunulan değerleri, dikey eksen ise YSA'dan elde edilen tahmin (Y) değerlerini göstermektedir. Noktasal olarak gösterilen ifadeler her bir test verisidir. Çizgisel doğru ise test verilerine en uygun şekilde çizilmiş doğrudur. Tahmini veri yoğunluğu ($T = Y$) doğrusuna ne kadar yakın ise, modelleme o kadar başarılıdır. Ayrıca korelasyon katsayısı (R^2) değeri ile tahmin değerinin (Y) gözlenen değere (T) bağlı denklemini de MS Excel programından elde edilmiş ve MATLAB yazılımından elde edilen sonuçla karşılaştırıldığında her iki sonucun birbiri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir.

6.4.3. Genelleştirilmiş Regresyon Ağı ile (GRN) Modelleme

Genelleştirilmiş Regresyon Ağı (GRN) yönteminde; eğitim için yinelemeli (iteratif) yöntem kullanmak mümkün olmadığından, bias değeri ile nöronun ağırlıklı girişi çarpılarak her nöronun net girişi belirlenmeye çalışılır. Her nöronun net çıkışı da o nöronun net girişinin radyal tabanlı katmandan geçirilmesiyle elde edilir.

Genelleştirilmiş Regresyon Ağı (GRN) ile modellemede; dört farklı kombinezon için sigma (σ) yumuşatma parametresi değeri değiştirilerek en uygun ortalama mutlak göreceli hata (OMGH) değeri elde edilmeye çalışılmıştır. Her bir kombinezon için farklı (σ) değeri ile elde edilen ortalama mutlak göreceli hata (OMGH) ve korelasyon katsayısı (R^2) değerleri, Tablo 6.9 ve Tablo 6.10'da verilmiştir.

Her bir kombinezonda, analiz için yumuşatma parametresi (σ) değeri (0.01) ile (0.10) aralığında (0.01) artırılarak, (0.10) ile (1.00) aralığında (0.10) artırılarak, (1.00) ile (2.00) aralığında ise (1.00) artırılarak elde edilmiştir. Böylece her bir kombinezon için 20 adet farklı durumun dikkate alındığı düşünülürse, Genelleştirilmiş Regresyon Ağı (GRN) yöntemi ile modelleme için toplamda; $4 \times 20 = 80$ farklı durum dikkate alınmıştır.

Tablo 6.9. YSA Modellerinin Test Aşamasında Kombinasyon (1) ve Kombinasyon (2) için OMGH ve R^2 Değerleri.

TEST	$Sigma (\sigma)$	OMGH	R^2
Kombinasyon 1	0.01	58.4085	0.0948
	0.02	58.4085	0.0948
	0.03	58.4085	0.0948
	0.04	58.4085	0.0948
	0.05	58.4085	0.0948
	0.06	58.4072	0.0948
	0.07	58.3988	0.0944
	0.08	58.3729	0.0933
	0.09	58.3246	0.0909
	0.10	58.2594	0.0871
	0.20	57.7226	0.0371
	0.30	57.2818	0.0237
	0.40	56.9810	0.0205
	0.50	56.8059	0.0196
	0.60	56.7023	0.0193
	0.70	56.6375	0.0191
	0.80	56.5947	0.0191
	0.90	56.5650	0.0191
	1.00	56.5437	0.0191
	2.00	56.4750	0.0191
Kombinasyon 2	0.01	33.6883	0.1318
	0.02	33.7265	0.1322
	0.03	34.2369	0.1360
	0.04	34.9046	0.1404
	0.05	35.5896	0.1440
	0.06	36.3523	0.1469
	0.07	37.1627	0.1489
	0.08	37.9833	0.1494
	0.09	38.7953	0.1480
	0.10	39.6016	0.1447
	0.20	47.1239	0.1011
	0.30	51.3461	0.0878
	0.40	53.3544	0.0849
	0.50	54.3981	0.0845
	0.60	54.9978	0.0846
	0.70	55.3711	0.0848
	0.80	55.6181	0.0849
	0.90	55.7897	0.0851
	1.00	55.9135	0.0852
	2.00	56.3158	0.0856

Tablo 6.10. YSA Modellerinin Test Aşamasında Kombinasyon (3) ve Kombinasyon (4) için OMGH ve R^2 Değerleri.

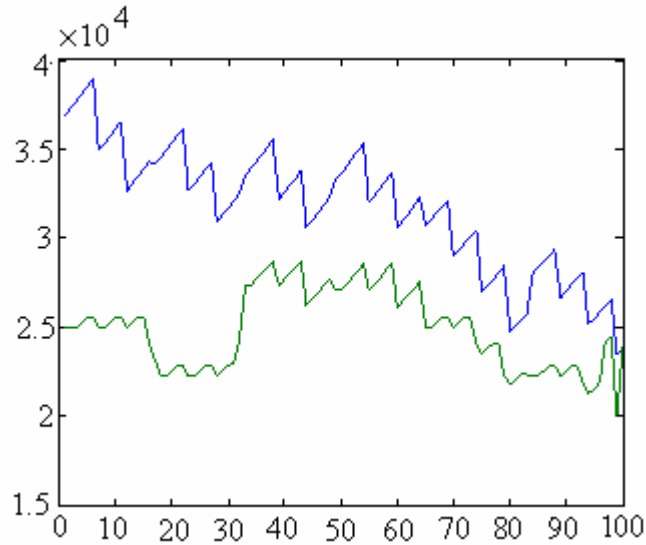
TEST	Σ	OMGH	R^2
Kombinasyon 3	0.01	23.1539	0.4199
	0.02	23.2402	0.4240
	0.03	23.6200	0.4486
	0.04	24.2276	0.4841
	0.05	24.9172	0.5097
	0.06	25.6991	0.5250
	0.07	26.5216	0.5348
	0.08	27.3227	0.5420
	0.09	28.0886	0.5458
	0.10	28.8402	0.5443
	0.20	36.6209	0.4171
	0.30	43.0652	0.3818
	0.40	47.4858	0.3752
	0.50	50.2429	0.3747
	0.60	51.9638	0.3757
	0.70	53.0789	0.3768
	0.80	53.8331	0.3778
	0.90	54.3636	0.3786
	1.00	54.7495	0.3792
	2.00	56.0181	0.3816
Kombinasyon 4	0.01	20.8700	0.2495
	0.02	20.8478	0.2554
	0.03	20.8546	0.2648
	0.04	20.9317	0.2805
	0.05	21.0270	0.3065
	0.06	21.1918	0.3461
	0.07	21.4485	0.3955
	0.08	21.7931	0.4425
	0.09	22.2272	0.4768
	0.10	22.7516	0.4945
	0.20	29.5736	0.4232
	0.30	35.7304	0.4441
	0.40	41.0376	0.4708
	0.50	45.0965	0.4851
	0.60	47.9603	0.4930
	0.70	49.9463	0.4981
	0.80	51.3426	0.5015
	0.90	52.3479	0.5040
	1.00	53.0901	0.5059
	2.00	55.5839	0.5124

Her bir kombinezondan elde edilen en uygun sonuçlar Tablo 6.11’de verilmiştir.

Tablo 6.11. YSA Kombinezonlarının Test Aşamasındaki OMGH ve R^2 Değerleri.

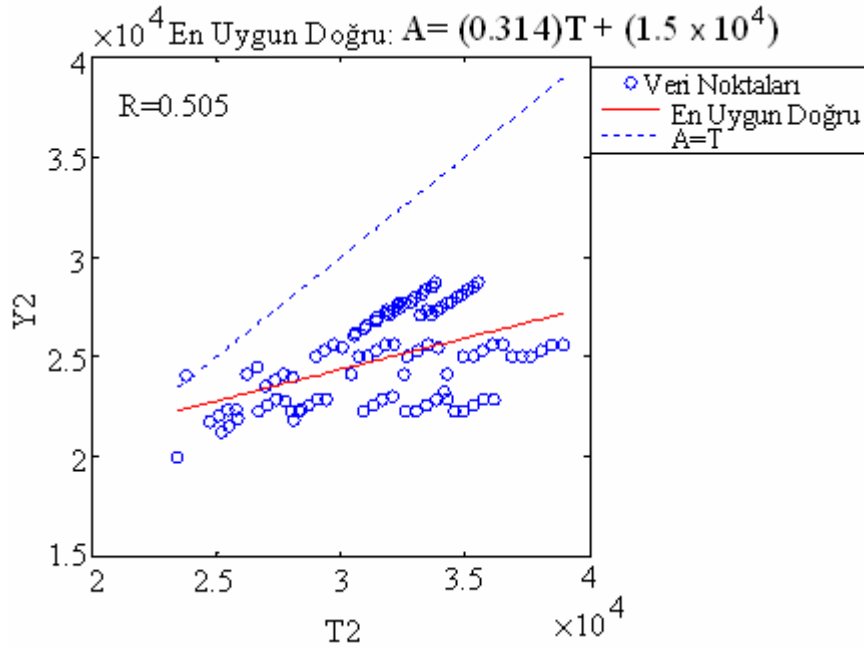
Kombinezon No	Yumuşatma Parametresi (σ)	OMGH	R^2
1	2.00	56.4750	0.0191
2	0.01	33.6883	0.1318
3	0.01	23.1539	0.4199
4	0.02	20.8478	0.2554

Tablolardan görüldüğü üzere, en küçük Ortalama Mutlak Göreceli Hata (OMGH) değeri, dördüncü kombinezonda, (σ)’nın (0.02) bias (sabit) değerine sahip modelden elde edilmiştir. En uygun modelleme bu şekilde elde edilmiş olup belirlenen modelden elde edilen grafikler ise aşağıda verilmiştir. Bu çalışmada öncelikli olarak (OMGH) değeri göz önüne alındığı için dördüncü kombinezondaki ($R^2 = 0.2554$) değeri üçüncü kombinezondaki ($R^2 = 0.4199$) değerinden düşük olsa da dördüncü kombinezonun hata değerinin daha düşük olmasından dolayı bu kombinezonun daha uygun olduğu görülmüştür.



Şekil 6.16. YSA Modelinin Test Aşamasındaki Gidiş Grafiği.

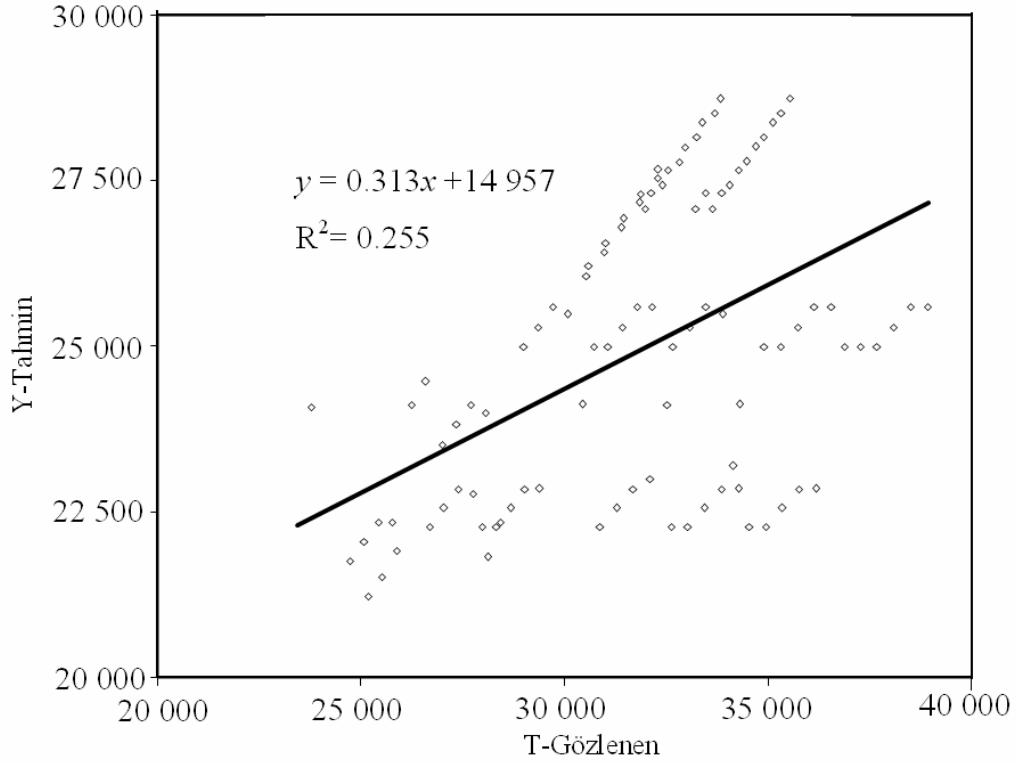
Şekil 6.16’da; SAP2000 yazılımından elde edilen eğilme momenti değerleri mavi renkli olarak, Genelleştirilmiş Regresyon Ağından elde edilen eğilme momenti değerleri ise yeşil renkli olarak gösterilmiştir. Yatay eksen, test aşamasındaki verilerin sıralamasını, bir başka deyişle veri sayısını, dikey eksen ise YSA modeline çıkış olarak tanıtılan eğilme momenti değerlerini göstermektedir. Yeşil ve mavi renkli eğriler birbirine ne kadar yakın ise, Genelleştirilmiş Regresyon Ağı (GRN) modeli, verileri o kadar iyi test etmiş demektir. Tablodan da görüleceği gibi, test aşamasının son verileri, özellikle 90. veriden sonraki veriler, önceki verilere göre daha iyi test edilmiş ve gerçek sonuçlara yakın sonuçlar ortaya çıkmıştır.



Şekil 6.17. YSA Modelinin Test Aşamasındaki Doğru Grafiği.

Şekil 6.17’de yatay eksen, SAP2000 yazılımı ile elde edilen sonuç eğilme momenti değerlerini, dikey eksen ise Genelleştirilmiş Regresyon Ağı (GRN) modeli ile bulunan sonuç eğilme momenti değerlerini göstermektedir. Kesikli çizgi olarak mavi renkte gösterilen doğru, ($Y2 = T2$) doğrusudur, yani grafik için yatayla 45°’lik açı yapan doğrudur. Dairesel olarak mavi renkte gösterilen ifadeler, her bir test verisinin gerçek ($T2$) ve tahmin ($Y2$) değerleri koordinatlarıdır. Çizgisel olarak kırmızı renkte gösterilen doğru ise, YSA’dan elde edilen modelleme için en uygun doğrudur. Yani; modellemeden elde edilen kırmızı renkli çizgi ile gösterilen en uygun doğru, kesikli

mavi renkli çizgi ile gösterilen ($T_2 = Y_2$) doğrusuna ne kadar yakın ise, modelleme o kadar başarılı olmuş demektir. Şekil 6.17’den de görüleceği üzere, GRN yönteminin, mevcut veriler ile kabul edilebilir bir modelleme yapabildiğini söylemek zordur.



Şekil 6.18. YSA Modelinin Test Aşamasında, (T) ve (Y) Değerlerinin Doğru Grafiği.

Şekil 6.17 MATLAB 7.1 yazılımından elde edilmiş iken Şekil 6.18 MS Excel programından elde edilmiştir. Şekilde yatay eksen gözlenen (T), yani programa sunulan değerleri, dikey eksen ise YSA’dan elde edilen tahmin (Y) değerlerini göstermektedir. Noktasal olarak gösterilen ifadeler her bir test verisidir. Çizgisel doğru ise test verilerine en uygun şekilde çizilmiş doğrudur. Tahmini veri yoğunluğu ($T = Y$) doğrusuna ne kadar yakın ise, modelleme o kadar başarılıdır. Ayrıca korelasyon katsayısı (R^2) değeri ile tahmin değerinin (Y) gözlenen değere (T) bağlı denklemi de MS Excel programından elde edilmiş ve MATLAB yazılımından elde edilen sonuçla karşılaştırıldığında her iki sonucun birbiri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir.

6.5. Yapay Sinir Ağları Modellerinden Elde Edilen Sonuçlar

Yapılan bu çalışma sonucunda, farklı geometrik ölçülere sahip toplam 400 adet boşluklu verev plak köprü, SAP2000 v11 yazılımıyla analiz edilerek köprünün öz ağırlığı, kalıcı ölü yükler ve hareketli taşıt yüklerinden kaynaklanan eğilme momenti değerleri elde edilmiştir. Daha sonra bu değerlerin üç farklı YSA yöntemi ile; yani çok katmanlı algılayıcı (MLP), radyal tabanlı fonksiyon (RBF) ve genelleştirilmiş regresyon ağı (GRN) ile analizi yapılmıştır. Üretilmiş olan 400 veri ise; 300 tanesi eğitime, 100 tanesi test verisi olacak şekilde ayrıştırılmıştır. Her bir yöntem için dört giriş, bir çıkış parametresi belirlenmiştir.

Her bir yöntemde, giriş parametreleri olarak verevlik açısı (θ), plak boşluk çapı (R), plak kalınlığı (t) ve köprü açıklığı (L) alınmış, çıkış parametresi olarak köprünün öz ağırlığı ve kalıcı ölü yüklerden doğan eğilme momenti (M_D) ile hareketli taşıt yükünden doğan eğilme momentinin (M_L) toplamı olan sonuç eğilme momenti (M_{DS}) değeri istenmiştir. Bu verilerle dört adet farklı kombinezon oluşturulmuştur.

- Kombinezon 1: Verevlik açısı (θ),
- Kombinezon 2: Verevlik açısı (θ) ve plak boşluk çapı (R),
- Kombinezon 3: Verevlik açısı (θ), plak boşluk çapı (R) ve plak kalınlığı (t),
- Kombinezon 4: Verevlik açısı (θ), plak boşluk çapı (R), plak kalınlığı (t) ve

köprü açıklığı (L) şeklindedir.

Bütün kombinezonlarda, çıkış verisi olarak eğilme momenti değeri (M_{DS}) kullanılmıştır.

Her üç yöntemde de gözlenen değerlerle YSA modeli sonuçlarını karşılaştırma kriteri olarak ortalama mutlak göreceli hata (OMGH) ve korelasyon (belirginlik) katsayısı (R^2) kullanılmıştır.

Modelleme için kullanılan üç farklı yöntemden (MLP, RBF ve GRN) elde edilen sonuçlar Tablo 6.12’de gösterilmiştir.

Tablo 6.12. YSA Modellerinden Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması.

YSA MODELİ	KOMBİNEZON NO	OMGH	R ²
MLP	4	3.6116	0.9755
RBF	3	13.7128	0.7286
GRN	4	20.8478	0.2554

Tablo 6.12’deki sonuçlar karşılaştırılırsa en uygun sonucun MLP yöntemi ile yapılan analiz sonucu elde edildiği görülür. Genel olarak; Korelasyon Katsayısı, (R²)’nin değeri (0.90)’ın üzerinde ise ve Ortalama Mutlak Göreceli Hata, (OMGH)’nin değeri (5.0)’in altındaysa modellemenin güvenilir olabileceği varsayılırsa, en uygun sonuçların MLP yöntemi ile elde edildiği görülür. Bir başka deyişle; MLP yöntemi ile en başarılı tahmin yapılmış olup en küçük (OMGH) değeri ile en yüksek (R²) değeri elde edilmiştir. Hata değerinin (OMGH) sıfır değerine en yakın olduğu, korelasyon (belirginlik) katsayısı değerinin (R²) bir değerine en yakın olduğu modellemeler en uygun modellemelerdir.

Çok katmanlı algılayıcı (MLP) YSA türünün, günlük hayatta en fazla uygulama alanı bulunan ve en yaygın olarak kullanılan YSA türü olduğu bilinir. Bu ağların, özellikle mühendislik problemlerinin %95’ine çözüm üretebilecek nitelikte olduğu ifade edilmiştir [63]. Bu çalışmada da Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) YSA uygulaması, diğer iki YSA uygulamasına göre daha kabul edilebilir sonuçlar vermiştir.

Bu çalışmada üç farklı YSA yöntemi kullanılmıştır. Yöntemlerin seçiminde ise genelden özele doğru bir yol izlenmiştir.

Modellemeye öncelikle, en yaygın kullanım alanına sahip olan Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) uygulaması ile başlanmış, bir sonraki aşamada MLP’ye alternatif olarak geliştirilen ve iterasyon yapabilme özelliği olmayan, bir başka deyişle eğitme verilerinin oluşturduğu eğrinin dışına çıkamayan Radyal Tabanlı Fonksiyon (RBF) ile modelleme yapılmıştır [71]. Son aşamada ise, Radyal Tabanlı Fonksiyon (RBF) yönteminin özel bir durumu olan, iteratif yöntemler kullanmadığı için sonuca hızlı şekilde ulaşabileceği düşünülen Genelleştirilmiş Regresyon Ağı (GRN) yöntemi ile modelleme yapılmıştır.

Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP), Radyal Tabanlı Fonksiyon (RBF) ve Genelleştirilmiş Regresyon Ağı (GRN) yöntemleriyle yapılan YSA analizlerinin sonuçları, SAP2000 yazılımından elde edilen sonuçlar ile birlikte Ek-4’de verilmiştir.

Daha ayrıntılı ve geçerli bir modelleme yapılması amacıyla, YSA için oluşturulan kombinezonların giriş parametrelerinin yerleri değiştirilerek ya da eğitme ve test verilerinin sıralaması değiştirilerek yeni modellemeler yapıp sonuçlar karşılaştırılabilir.

7. BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında önerilmeli betondan boşluklu verev plak köprülerin YSA ile modellemesi gerçekleştirilmiştir.

Birinci bölümde; köprüler ve köprü türleri hakkında genel bilgiler verilmiş, genel türlerden özel türlere doğru açıklama yolu izlenerek gerekli teorik alt yapı sunulmuştur. Ayrıca çalışmanın amacı, yöntemi ve tezin düzeni anlatılmıştır.

İkinci bölümde; boşluklu verev plak köprüler ile ilgili teknik terimler, kabuller ve genel bilgiler verilmiş olup yapılan önceki çalışmalar ve genel analiz yöntemleri üzerinde durulmuştur.

Üçüncü bölümde; Izgara Analojisi Metodu ile plak köprü analizi konusunda genel bilgiler verilmiş olup ele alınan dört farklı köprü modelinin Microstran v8 Educational bilgisayar yazılımı ile analizi gerçekleştirilerek köprünün öz ağırlığı ve kalıcı ölü yüklerden doğan elverişsiz eğilme momenti değerleri tespit edilmeye çalışılmıştır.

Dördüncü bölümde; Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) tabanlı SAP2000 v11 yazılımı kullanılarak model bir köprünün analizi aşamalı olarak anlatılmış, üçüncü bölümde ele alınan dört farklı köprü modeli ile birlikte toplam 400 farklı köprü modeli için bilgisayar analizi yapılarak modellere etkiyen en elverişsiz eğilme momentleri tespit edilmiştir. Bütün analizlerden elde edilen sonuçlar, Ek-4’de tablo olarak verilmiştir. Bu sonuçlar, üçüncü bölümde ızgara analojisi yöntemi ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılıp SAP2000 v11 sonlu elemanlar yazılımında gerçekleştirilen modellemenin uygunluğu doğrulanmıştır.

Beşinci bölümde; model köprünün önerilme hesabı ve donatı yerleştirilmesi ile ilgili ayrıntılı bilgi sunulmuştur. Dördüncü bölümde analizi yapılan diğer köprü modelleri

için de *MS Excel* yazılımı ile hazırlanan program ile her bir model için gerekli olan öngerilme donatıları hesaplanmış ve tablo halinde Ek-5’de verilmiştir.

Altıncı bölümde; sistemin Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP), Radyal Tabanlı Fonksiyon (RBF) ve Genelleştirilmiş Regresyon Ağı (GRN) olmak üzere üç farklı Yapay Sinir Ağları (YSA) uygulaması ile çözümünün fizibilitesi araştırılmış ve en uygun modelin belirlenerek problemin genelleştirilmesi amaçlanmıştır. En iyi sonuçların, bir başka deyişle en düşük hatanın (OMGH) ve en yüksek korelasyon katsayısının (R^2), Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) modelde elde edildiği görülmüştür. Her üç yöntemden elde edilen sonuçlar, Ek-4’de SAP2000 v11 yazılımından elde edilen verilerle birlikte tablo halinde verilmiştir.

Yedinci bölümde ise bu çalışmanın sonuçları sunulmuş ve değerlendirmesi yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar şöyle özetlenebilir:

- Boşluklu verev plak köprülerin Izgara Analojisi, Sonlu Elemanlar Metoduna göre daha düşük eğilme momenti değerleri vermektedir. Bu durumun, ızgara analojisinde kullanılan Microstran v8 programının kısıtlamasından kaynaklandığı kanısına varılsa da her iki yöntemin karşılaştırılması sonucu, sonuçlar arasındaki farkın kabul edilebilir düzeyde olduğu sonucuna varılmıştır.
- SAP2000 v11 yazılımı ile yapılan ve Ek-4’de verilen analizler sonucu, yapılan bu çalışma için sabit açıklık, dik genişlik, plak kalınlığı ve plak boşluk çapları için; genellikle verevlik açısı (θ) = 60° ’de ölü yükten kaynaklanan eğilme momenti değerlerinin (M_D) maksimum değere sahip olduğu görülmüştür.
- Verevlik açısı arttıkça taşıt hareketli yükünden doğan eğilme momenti değerinin de arttığı görülmüştür. Bu iki veri arasında doğrusal ilişki kurmak mümkün olabilir.
- Aynı açıklık, dik genişlik, plak kalınlığı ve verevlik açısına sahip köprülerde, boşluk çapının artması ile ölü yükten kaynaklanan eğilme momenti değerlerinin azaldığı görülmüştür.

- Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) YSA, boşluklu verev plak köprü statik analizlerini iyi düzeyde öğrenebilmiş ve test aşamasında iyi düzeyde sonuçlar vermiştir. Radyal Tabanlı Fonksiyon (RBF) ve Genelleştirilmiş Regresyon Ağı (GRN) türlerinin ise nispeten daha başarısız sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) ile yapılan modellemede elde edilen test sonuçlarındaki hata değeri ile korelasyon katsayısının kabul edilebilecek düzeyde olduğu görülmüştür.

Bu çalışma; üç veya daha fazla açıklıklı, sürekli veya basit mesnetli boşluklu verev plak köprülerden elde edilecek daha fazla sayıda veri ile YSA analizi, daha fazla sayıda YSA uygulamasının denenmesi, öngerilme kablolarının optimum yerleşiminin ve sayısının belirlenmesi ya da öngerilme hesabının da YSA ile analizi şeklinde geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Celasun, H., Betonarme Köprüler ve Hesap Metodları, Çağlayan Basım Evi, Birinci Baskı, İstanbul, 1974.
2. Taly, N., Design of Modern Highway Bridges, Mc Graw-Hill, 1998.
3. Hasol, D., Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü, YEM Yayınları, 8. Baskı, İstanbul, 2002.
4. Meng, J., Seismic Analysis and Evaluation of Skew Highway Bridges, the Degree of Doctor of Philosophy, Civil Engineering in the Graduate School of Syracuse University, May 2000.
5. Bridge Engineering, Part 3: Design of Superstructure Elements, Digital Engineering Library @ McGraw-Hill Companies, 2006.
6. Iles, D.C., Design Guide For Composite Highway Bridges, The Steel Construction Institute, London&New York, 2001.
7. Wajdee, W.I., Kamal, W.A., Comparision of Bridge Design in Malaysia Between American Codes and British Codes, Degree of Master of Engineering (Structure), Universiti Teknologi Malaysia, Mac 2005.
8. Cheung, M.M.S., Bridge Engineering Course Notes, Hong Kong.
9. Aka, İ., et al., Betonarme, Birsen Yayınevi, 2001.
10. Hambly, E.C., Bridge Deck Behaviour, John Wiley & Sons Inc., New York, 1976.

11. Uğur, Y., Caferov, O., Koçak, A., Boşluklu Betonarme Plak Köprülerin ANSYS Yazılımı ile Analizi, 1. Köprü ve Viyadükler Sempozyumu, Antalya, 29-30 Kasım, 2007.
12. Nowak, A.S., Szerszen, M.M., Kwasniewsk, L.J., Development of the Procedure for Efficient Evaluation of Bridge Decks, Michigan Department of Transportation Construction and Technology Division, Michigan, 2000.
13. O'Brien, E.J., Keogh, D.L., Bridge Deck Analysis, London & New York, 1999.
14. Caferov, O., Öngerilmeli Betondan Boşluklu Plak Köprülerin Yapay Sinir Ağları ile Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2005.
15. Bakht, B., et al., The State of Art in Analysis of Cellular and Voided Slab Bridges, Can. J. Civ. Eng., 8, 376-391, 1981.
16. Bakht, B., et al., Cellular and Voided Slab Bridges, Journal of Structural Division, 117, 1797-1813, 1981A.
17. Cusens, A.R., Pama, R.P., Bridge Deck Analysis, John Wiley & Sons, 1975.
18. Bahar, V., Öngerilmeli Betonarme Plak Köprülerin Yapay Sinir Ağları ile Hesabı, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2004.
19. Permadi, K.I., Load Distribution In Edge-Stiffening Beam of a Simply Supported Bridge Deck, Degree of Master of Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, 2005.
20. Sen, R., Issa, M., Finite Element Modeling of Continuous Posttensioned Voided Slab Bridges, Journal of Structural Engineering, 120, 2, pp 651-667, 1994.

- 21.** BS 5400, British Standard for Steel, Concrete and Composite Bridges, London, 1988.
- 22.** OHBDC, Ontario Highway Bridge Design Code 2nd Edition, Ministry of Transportation and Communications, Downsview, Ontario, Canada, 1983.
- 23.** Simpson, M.D., Analysis of Skew Trapezoidal Skew Box Girder Bridges Using the Finite Element Method, Degree of Master of Applied Science, University of Toronto, 1992.
- 24.** Sevgili, G., Seismic Performance of Multisimple-Span Skew Bridges Retrofitted with Link Slabs, The Degree of Master of Science In Civil Engineering, Middle East Technical University, 2007.
- 25.** Tian, X., Load Distribution Analyses of Skew Highway Concrete Bridges, the Degree of Master of Science, Florida Atlantic University, 1999.
- 26.** PCI Bridge Manual, Chapter 12: Curved and Skewed Bridges, September, 2001.
- 27.** Winterling, J., Monitoring Dead Load and Construction Stresses of a Heavily Skewed HPS Bridge, the Degree of Master of Civil Engineering, the University of Delaware, 2007.
- 28.** Wagdy, G., et al., Comprehensive Design Example for Prestressed Concrete (PSC) Girder Superstructure Bridge with Commentary (Task Order Dtfh61-02-T-63032), Modjeski and Masters, Inc., November 2003.
- 29.** Aggour, M.S., Load Distribution in Skewed Bridges Treated in Space, Journal of Civil Engineering Design, 1 (2), 185-206, 1979.
- 30.** Enochsson, O., Dufvenberg, P., Concrete Slabs Designed with FEM-Modelling Parameters, Master of Science Programme, Lulea University of Technology, October 2001.

31. Khaleel, M.A., Itani, R.Y., Live-Load Moments for Continuous Skew Bridges, Journal of Structural Engineering, 116, 9, pp 2361-2373, 1990.
32. Wong, K.W., Warner, R.F., Collapse Load Analysis of Prestressed Concrete Structures, Research Report No. R 162, the University of Adelaide, July, 1998.
33. Ebeido, T.I., Static and Dynamic Responses of Simply Supported and Continuous Skew Composite Bridges, the Degree of Doctor of Philosophy, University of Windsor, Ontario, Canada, 1995.
34. Zeng, H., Vibration of Discretely Stiffened Skew Plates and Bridge/Vehicle Interaction Analysis, the Degree of Doctor of Philosophy, the School of Aerospace and Mechanical Engineering, Norman, Oklahoma, 2000.
35. Badwan, I., Integrated Numerical and Field Approaches to Improve Bridge Designs, the Degree Doctor of Philosophy, the University Akron, August, 2005.
36. Celasun, H., Köprü Hesaplarında Modern Metodlar, Türkiye İnşaat Mühendisliği 6. Teknik Kongresi, Konu no:4, Tebliğ no:5.
37. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, SI Units, American Association of State Highway and Transportation Officials, 4th Edition, Washington, DC, 2007.
38. Erdal, F., Optimum Design of Grillage Systems Using Harmony Search Algorithm, The Degree of Master of Science In Engineering Sciences, Middle East Technical University, January, 2007.
39. Sawko, F., Willcock, B.K., Computer Analysis of Bridges Having Varying Section Properties, The Structural Engineer, 45 (11), 395,399, 1967.
40. Microstran v8 Student Copy, [http:// www.microstran.com.au/microstran.htm](http://www.microstran.com.au/microstran.htm)

41. Gazi Üniversitesi, Otomotiv Bilim ve Teknoloji Topluluğu, Malzeme Bilgisi Notları, Ankara.
42. Topcu, M., Taşgetiren, S., Mühendisler için Sonlu Elemanlar Metodu, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Ders Kitapları Yayın No: 007, Denizli, 1998.
43. Gürer, C., Akbulut, H., Çetin, S., Tek Açıklıklı Kemer Sistemli Rize Köprülerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi, 1. Köprü ve Viyadükler Sempozyumu, Antalya, 29-30 Kasım 2007.
44. Darılmaz, K., Kumbasar, N., Plakların Hesabı için Gerilme Seçimli Hibrid Bir Sonlu Eleman, İTÜ Dergisi/d, Mühendislik, Cilt:3, Sayı:2-3-4-5, 37-44, Ekim 2004.
45. SAP2000 V11 Educational, Computers and Structures, Inc. Berkeley, Cal, USA.
[http:// www.csiberkeley.com](http://www.csiberkeley.com)
46. Yol Köprüleri İçin Teknik Şartname, Karayolları Genel Müdürlüğü, No:207, Ankara, 1982.
47. AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials, Standard Specifications and Highway Bridges, Sixteenth edition, Washington, 1996.
48. Aydın, Z., Öngerilmeli Beton Kirişli Köprü Üstyapılarının Genetik Algoritma ile Optimum Tasarımı, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 2006.
49. Uğur, Y., Öngerilmeli Beton Ders Notları, Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri, 2002.

50. Aksoy, U. T., Prefabrik Kalıpsız Döşeme Sistemlerinden Öngerilmeli İçi Boşluklu Döşeme Elemanlarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 1996.
51. TS 3233, Öngerilmeli Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1979.
52. Karaesmen, E., Ardgerilmeli Beton ve Yeni Çözümler, Freysaş-Freysinnet Yapı Sistemleri San. A.Ş., İstanbul, 2002.
53. Enright, M.P., Frangopol, D.M., Survey and Evaluation of Damaged Concrete Bridges, J. Bridge Engineering, Feb, 31-38. 2000.
54. Birgül, R., Yaman, İ.Ö., Aktan, M.H., ABD Michigan Eyaleti Öngerilmeli Beton Köprülerin Performans Değerlendirmesi, 1. Köprü ve Viyadükler Sempozyumu, Antalya, 29-30 Kasım 2007.
55. Evirgen, A., Sınırlı Öngermeli Kirişlerde Betonun Değişik Çekme Modellerinin Yerdeğiştirmelere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2007.
56. Libby, J.R., Modern Prestressed Concrete: Design Principles and Construction Methods, Van Nostrand Reinhold, New York, 1971.
57. Haris, J.D., Smith I.C., Basic Design and Construction in Prestressed Concrete, Chatto and Windus, London, 1963.
58. Sayan, A.F., Doyranlı B., Ard-Germeli Çok Katlı Bina Yapım Teknolojisi: Ala-Sawa Sistemi ve Bir Uygulama Örneği: Ikea-Bayrampaşa Projesi, Prefabrikasyonda Yenilikler ve Eğitim Sempozyumu, İstanbul, Kasım 2007.
59. Sen, R., Hodge, D.S., Analytical and Experimental Evaluation of Stiffness Parameters of Voided Concrete Slab Bridges-Volume 2: Strength Design of

Longitudinally and Transversely Post-Tensioned Slab Bridges, Civil Engineering and Mechanics Department, University of South Florida, 1989.

- 60.** Yurtoğlu, H., Yapay Sinir Ağları Metodolojisi ile Öngörü Modellemesi: Bazı Makroekonomik Değişkenler için Türkiye Örneği, Uzmanlık Tezi, Devlet Planlama Teşkilatı (DPT), Ekonomik Modeller ve Stratejik Araştırmalar Genel Müdürlüğü, Şubat, 2005.
- 61.** Uğur, Y., Öngerilmeli Silindirik Su Depolarının Yapay Sinir Ağları ile Analizi, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 1999.
- 62.** Kişi, Ö., Kızılırmak Nehri Seviye-Akış İlişkilerinin Çok Katmanlı Yapay Sinir Ağları ile Belirlenmesi, II. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu, Gümüş, İzmir, 21-24 Eylül, 2005.
- 63.** Öztemel, E., Yapay Sinir Ağları, Papatya Yayıncılık, İstanbul, 2003.
- 64.** Haas, R., Hudson, W.R., Zaniewski, J., Modern Pavement Management Systems, Krieger Publishing Company, USA, 1994.
- 65.** Çavuşlu, M.A., FPGA ile Yapay Sinir Ağı Eğitiminin Donanımsal Gerçeklenmesi, Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Haziran, 2006.
- 66.** Haykin, S., Neural Networks a Comprehensive Foundation, 2nd Edition, Prentice Hall Publishing, Vol. 1, pp 6-7, 1999.
- 67.** Elbistanlı, G., HVAC Sisteminin MLP Tipi Yapay Sinir Ağları (YSA) Kullanarak Denetlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, Şubat, 2007.
- 68.** Gülhan, İ.E., Öngerilmeli Betondan Sandık Kesitli Köprülerin Yapay Sinir Ağları ile Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2005.

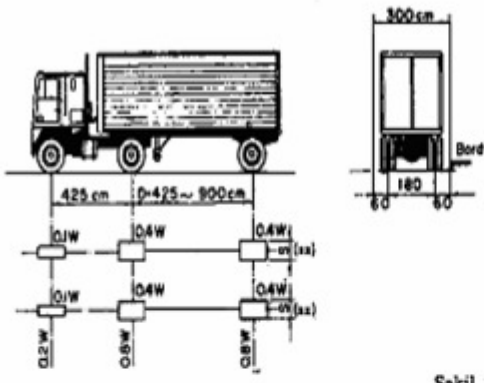
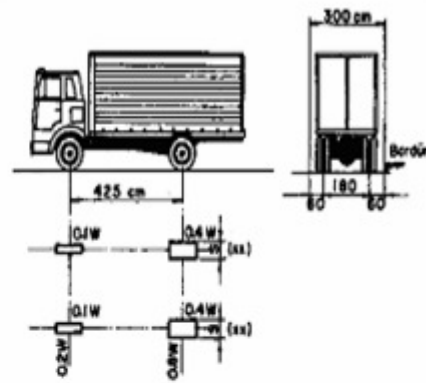
69. Aydın, Ö., Yapay Sinir Ağlarını Kullanarak Bir Ses Tanıma Sistemi Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Edirne, 2005.
70. Bolat., S., Kalenderli, Ö., Önal, E., Yapay Sinir Ağı ile Gaz Karışımında Elektrot Açıklığına ve Karışım Yüzdelerine Bağlı Olarak Delinme Gerilimlerinin Belirlenmesi, Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları Sempozyumu (ASYU-INISTA), Yıldız Teknik Üniversitesi, 2004.
71. Hacıoglu, A., A Novel Usage of Neural Network in Optimization and Implementation to the Internal Flow Systems, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 77 (5): 369-376, 2005.
72. Hacıoğlu, A., Hızlı Evrimsel Eniyileme için Yapay Sinir Ağı Kullanılması, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, Cilt 2, Sayı 3, 01-08, Ocak, 2006.
73. Alp, M., Cıgızoğlu, H.K., Farklı Yapay Sinir Ağı Metodları ile Yağış-Akış İlişkisinin Modellenmesi, İTÜ Mühendislik Dergisi, Cilt 3, Sayı 1, 80-88, Şubat, 2004.
74. Uncuoğlu, E., Kaba Daneli Zeminlerde Sükunetteki Toprak Basıncı Katsayısının Yapay Sinir Ağları ile Bulunması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, 2003.
75. MATLAB, Version 7.1, The MathWorks Inc., Massachusetts, USA.
http:// www.mathworks.com

EKLER

Ek-1.

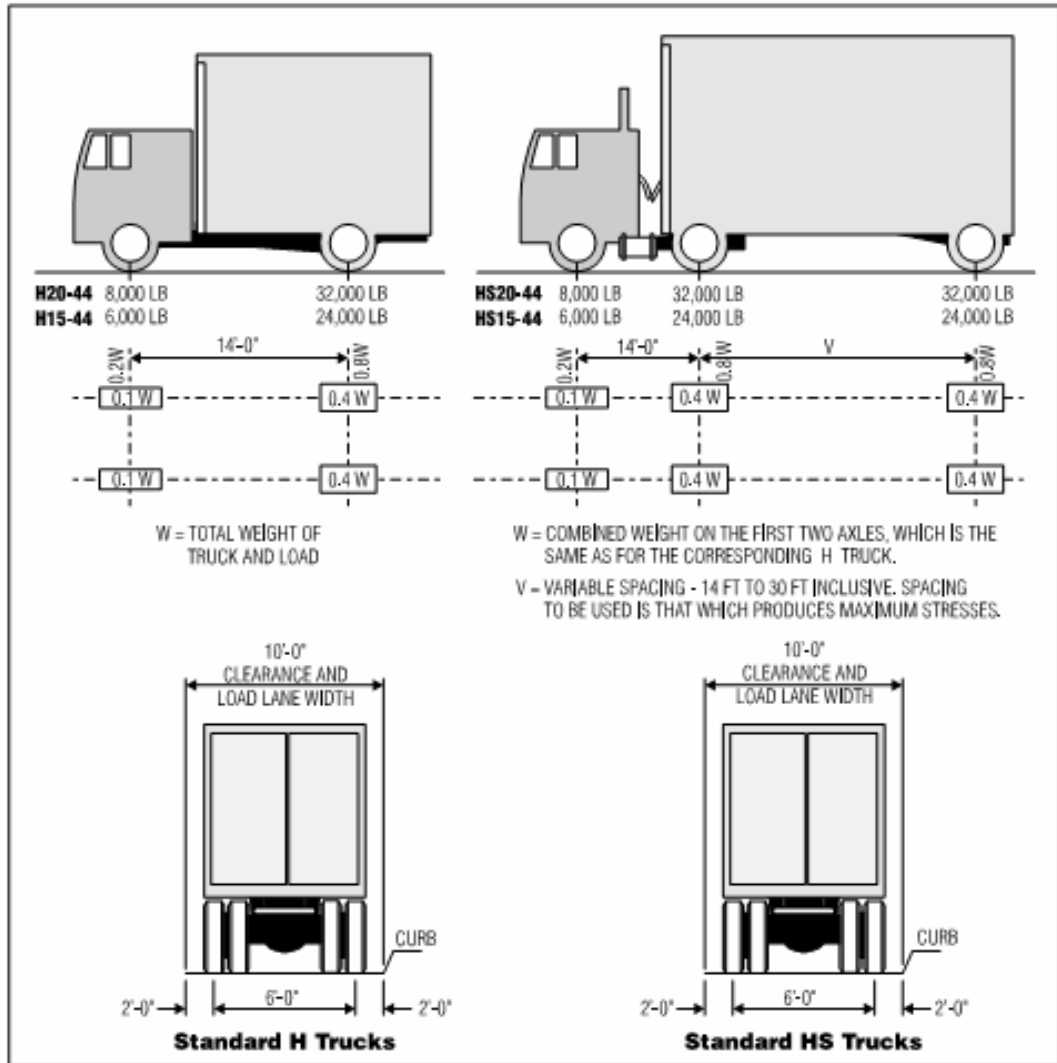
TCK Köprüler Teknik Şartnamesi

Standart Kamyonlara ait Geometrik Değerler ve Yükler

STANDART KAMYON				
	Şekil 13			
Şerit Yüğü				
	Şekil 14			
Yük Sınıfı	$H_{30} - S_{30}$	$H_{20} - S_{20}$	$H_{15} - S_{15}$	H_{10}
w Ağırlığı (kN)	300	200	150	100
P Eğilme Etkisi İçin (kN)	135	90	67.5	90
P Kesme Etkisi İçin (kN)	195	135	97.5	130
P (kN/m)	15	10	7.5	5
s (cm)	75	50	38	25

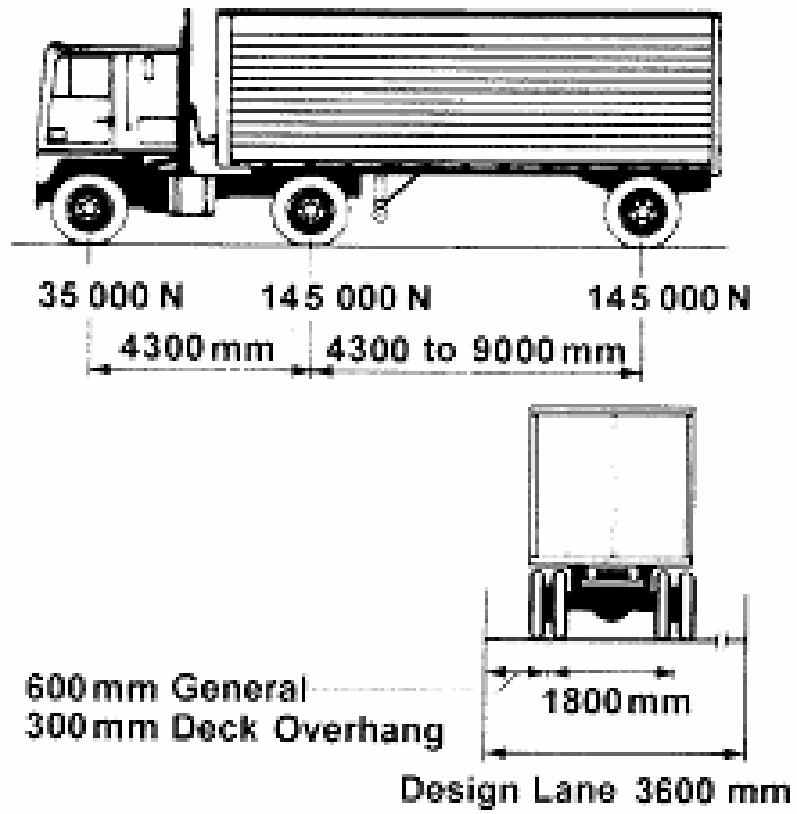
Ek-2.

AASHTO Köprü Tasarım Şartnamesine (Washington, DC, 2002)
Göre Standart Kamyonlara ait Geometrik Değerler ve Yükler



Ek-3.

**AASHTO LRFD Köprü Tasarım Şartnamesine (Washington, DC, 2007)
Göre Standart Kamyonlara ait Geometrik Değerler**



Ek-4.

Farklı Köprü Boyutları İçin SAP 2000 v11 Programı ile Yapılan Analizlerden Elde Edilen Sonuç Momentler ve YSA Modellerinden Elde Edilen Sonuçlar

YSA EĞİTME AŞAMASINDAN ELDE EDİLEN SONUÇLAR							
Verevlik Açısı (θ°)	Boşluk Çapı (m)	Plak Kalınlığı (m)	Köprü Açıklığı (m)	SAP 2000 Eğilme Momenti	MLP YSA (Eğitme) Eğilme Momenti	RBF YSA (Eğitme) Eğilme Momenti	GRN YSA (Eğitme) Eğilme Momenti
45	0.5	1	32.5	24121.527	24840.477	18429.8097	24123.3469
45	0.45	1	32.5	24475.531	25219.8279	19661.7453	24473.4999
30	0.75	1.3	32.5	27322.497	27338.86	25845.9274	27324.4249
30	0.7	1.3	32.5	27659.296	27598.536	26470.4257	27658.7546
30	0.65	1.3	32.5	28015.169	27877.9928	27568.0707	28014.549
30	0.6	1.3	32.5	28377.045	28176.9946	29134.9294	28376.4219
30	0.55	1.3	32.5	28744.243	28493.18	31163.1879	28741.4823
30	0.7	1.2	32.5	26210.641	26011.7198	23154.3521	26213.0801
30	0.65	1.2	32.5	26568.451	26317.1027	23656.1347	26568.1189
30	0.6	1.2	32.5	26932.218	26642.86	24635.5417	26931.8743
30	0.55	1.2	32.5	27301.279	26984.7771	26088.4552	27301.1965
30	0.5	1.2	32.5	27674.978	27336.3615	28006.8438	27672.0806
30	0.65	1.1	32.5	24898.849	24766.6441	20251.7131	24901.4476
30	0.6	1.1	32.5	25262.77	25113.6982	20642.4704	25262.4691
30	0.55	1.1	32.5	25631.903	25473.9453	21517.3142	25631.5891
30	0.5	1.1	32.5	26005.607	25839.0926	22871.8299	26005.5297
30	0.45	1.1	32.5	26383.274	26200.4488	24697.6446	26380.2641
30	0.6	1	32.5	23392.386	23629.6297	17193.2112	23395.1234
30	0.55	1	32.5	23759.541	23999.4528	17492.6857	23760.1919
30	0.5	1	32.5	24131.174	24368.0544	18284.3829	24131.8202
30	0.45	1	32.5	24506.692	24726.5265	19563.4218	24505.3851
15	0.75	1.3	32.5	27076.556	26729.8914	26826.4545	27078.5848
15	0.7	1.3	32.5	27430.788	27063.4408	27234.1771	27430.2119
15	0.65	1.3	32.5	27791.692	27395.0303	28103.0806	27791.1089
15	0.6	1.3	32.5	28158.594	27716.4126	29430.609	28158.009
15	0.55	1.3	32.5	28530.806	28021.011	31210.4516	28528.0555
15	0.7	1.2	32.5	26062.366	25596.8833	24035.07	26064.8049
15	0.65	1.2	32.5	26426.773	25941.1326	24315.9165	26426.4432
15	0.6	1.2	32.5	26797.191	26269.9575	25063.5231	26796.8495
15	0.55	1.2	32.5	27172.962	26577.6394	26275.2278	27172.8841
15	0.5	1.2	32.5	27553.408	26861.5533	27944.5682	27550.5158
15	0.65	1.1	32.5	24847.977	24506.2952	21033.7797	24850.5803
15	0.6	1.1	32.5	25220.743	24831.9859	21200.9694	25220.441
15	0.55	1.1	32.5	25598.841	25133.1436	21842.5452	25598.5272
15	0.5	1.1	32.5	25981.627	25408.6984	22955.6114	25981.556
15	0.45	1.1	32.5	26368.453	25660.1251	24533.4125	26365.4412
15	0.6	1	32.5	23452.851	23433.7561	17879.2186	23455.6049
15	0.55	1	32.5	23832.109	23720.1894	17954.0247	23832.707
15	0.5	1	32.5	24216.014	23980.4434	18512.5591	24216.6061
15	0.45	1	32.5	24603.949	24217.071	19551.5063	24602.521
60	0.7	1.2	30	24996.451	24602.6196	25379.7807	24998.1533
60	0.65	1.2	30	25294.035	24846.2953	25411.9535	25293.2687
60	0.6	1.2	30	25596.796	25081.8753	25925.3434	25594.2548
60	0.65	1.1	30	23521.701	23096.9622	22073.299	23524.0408
60	0.6	1.1	30	23822.983	23349.7824	22031.7639	23822.679
60	0.55	1.1	30	24127.509	23597.0397	22480.3183	24124.6323

Verevlik Açısı (θ°)	Boşluk Çapı (m)	Plak Kalınlığı (m)	Köprü Açıklığı (m)	SAP 2000 Eğilme Momenti	MLP YSA (Eğitme) Eğilme Momenti	RBF YSA (Eğitme) Eğilme Momenti	GRN YSA (Eğitme) Eğilme Momenti
60	0.6	1	30	21755.292	21632.0468	18676.5854	21757.7804
60	0.55	1	30	22054.098	21892.3498	18584.1605	22054.8692
60	0.5	1	30	22354.072	22151.0994	18991.8376	22352.1882
45	0.7	1.2	30	22278.818	22924.045	23601.5213	22280.4465
45	0.65	1.2	30	22563.295	23181.2774	24016.6792	22562.7338
45	0.6	1.2	30	22854.492	23456.2106	24914.4471	22852.2197
45	0.65	1.1	30	21228.111	21492.062	20592.9595	21230.2248
45	0.6	1.1	30	21527.388	21757.2405	20910.82	21527.0424
45	0.55	1.1	30	21822.31	22046.8044	21718.1884	21819.6915
45	0.6	1	30	19950.518	20160.3712	17450.2327	19952.7067
45	0.55	1	30	20239.559	20438.9952	17691.0803	20240.112
45	0.5	1	30	20533.684	20749.5024	18429.8097	20532.0197
30	0.7	1.2	30	21651.321	21735.9615	23154.3521	21653.2547
30	0.65	1.2	30	21942.488	22001.8928	23656.1347	21942.2555
30	0.6	1.2	30	22238.76	22297.2257	24635.5417	22236.8011
30	0.65	1.1	30	20757.692	20524.8428	20251.7131	20759.9787
30	0.6	1.1	30	21057.83	20824.6569	20642.4704	21057.8076
30	0.55	1.1	30	21363.877	21157.0254	21517.3142	21361.533
30	0.6	1	30	19682.198	19478.6222	17193.2112	19684.596
30	0.55	1	30	19987.504	19814.3217	17492.6857	19988.1749
30	0.5	1	30	20297.995	20178.1832	18284.3829	20296.2429
15	0.7	1.2	30	21467.281	21251.381	24035.07	21469.2461
15	0.65	1.2	30	21763.58	21607.229	24315.9165	21763.3673
15	0.6	1.2	30	22065.052	21975.8291	25063.5231	22063.0836
15	0.65	1.1	30	20616.147	20337.6954	21033.7797	20618.4639
15	0.6	1.1	30	20923.807	20704.1122	21200.9694	20923.8111
15	0.55	1.1	30	21237.317	21066.0716	21842.5452	21234.9773
15	0.6	1	30	19639.18	19541.9662	17879.2186	19641.5978
15	0.55	1	30	19954.751	19886.7749	17954.0247	19955.3818
15	0.5	1	30	20275.455	20211.5217	18512.5591	20273.6465
60	0.65	1.1	27.5	20306.353	19581.08	22073.299	20308.0173
60	0.6	1.1	27.5	20564.484	19795.9079	22031.7639	20563.9674
60	0.55	1.1	27.5	20826.045	20001.279	22480.3183	20824.0027
60	0.6	1	27.5	18945.37	18318.1942	18676.5854	18947.603
60	0.55	1	27.5	19205.603	18530.8672	18584.1605	19205.7031
60	0.5	1	27.5	19467.062	18735.7859	18991.8376	19464.9315
60	0.55	0.9	27.5	17771.917	17113.8593	15266.286	17773.999
60	0.5	0.9	27.5	18046.305	17324.0863	15151.9211	18046.786
60	0.45	0.9	27.5	18318.457	17529.4068	15548.3422	18316.7531
45	0.65	1.1	27.5	17720.312	18062.2849	20592.9595	17721.872
45	0.6	1.1	27.5	17957.104	18298.442	20910.82	17956.8239
45	0.55	1.1	27.5	18199.979	18551.5274	21718.1884	18198.2673
45	0.6	1	27.5	16791.006	16922.7477	17450.2327	16792.9255
45	0.55	1	27.5	17029.883	17155.3769	17691.0803	17029.9682
45	0.5	1	27.5	17274.054	17410.9619	18429.8097	17272.1796
45	0.55	0.9	27.5	15931.09	15878.2055	14247.2154	15932.817
45	0.5	0.9	27.5	16171.544	16112.9969	14438.1968	16171.9181
45	0.45	0.9	27.5	16417.769	16377.79	15136.4601	16416.2035

Verevlik Açısı (θ°)	Boşluk Çapı (m)	Plak Kalınlığı (m)	Köprü Açıklığı (m)	SAP 2000 Eğilme Momenti	MLP YSA (Eğitme) Eğilme Momenti	RBF YSA (Eğitme) Eğilme Momenti	GRN YSA (Eğitme) Eğilme Momenti
30	0.65	1.1	27.5	17147.082	17044.7585	20251.7131	17148.6901
30	0.6	1.1	27.5	17391.041	17265.7996	20642.4704	17390.8217
30	0.55	1.1	27.5	17639.579	17518.7934	21517.3142	17637.9078
30	0.6	1	27.5	16366.929	16143.0825	17193.2112	16368.8572
30	0.55	1	27.5	16617.753	16388.3085	17492.6857	16617.8094
30	0.5	1	27.5	16873.915	16670.2318	18284.3829	16871.9971
30	0.55	0.9	27.5	15565.214	15383.5067	14051.9197	15566.9833
30	0.5	0.9	27.5	15817.479	15660.1553	14287.0847	15817.8311
30	0.45	0.9	27.5	16076.042	15972.9794	15023.8327	16074.4002
15	0.65	1.1	27.5	16984.206	16776.1874	21033.7797	16985.8472
15	0.6	1.1	27.5	17233.651	17087.6084	21200.9694	17233.4558
15	0.55	1.1	27.5	17487.733	17423.8691	21842.5452	17486.0553
15	0.6	1	27.5	16259.86	16188.5139	17879.2186	16261.8157
15	0.55	1	27.5	16519.214	16520.3852	17954.0247	16519.2348
15	0.5	1	27.5	16783.777	16861.0012	18512.5591	16781.813
15	0.55	0.9	27.5	15466.648	15715.6746	14645.7512	15468.4737
15	0.5	0.9	27.5	15729.134	16038.8612	14656.651	15729.4806
15	0.45	0.9	27.5	15997.519	16351.4977	15161.8675	15995.8186
60	0.6	1	25	16277.145	15693.0379	18676.5854	16278.6557
60	0.55	1	25	16513.867	15848.8743	18584.1605	16513.4883
60	0.5	1	25	16749.549	15994.5039	18991.8376	16747.8241
60	0.55	0.9	25	15332.276	14673.8345	15266.286	15334.2351
60	0.5	0.9	25	15577.965	14822.3696	15151.9211	15577.6639
60	0.45	0.9	25	15820.671	14961.4384	15548.3422	15818.4459
60	0.5	0.8	25	13734.162	13639.2198	11932.1207	13736.0633
60	0.45	0.8	25	13940.489	13779.7595	11829.7324	13941.1461
60	0.4	0.8	25	14139.511	13912.4519	12248.9196	14138.2259
45	0.6	1	25	14025.388	14499.9426	17450.2327	14026.682
45	0.55	1	25	14223.143	14694.4687	17691.0803	14222.9382
45	0.5	1	25	14425.137	14900.7522	18429.8097	14423.7452
45	0.55	0.9	25	13347.522	13601.3244	14247.2154	13349.055
45	0.5	0.9	25	13543.731	13787.3267	14438.1968	13544.0667
45	0.45	0.9	25	13745.389	13990.4137	15136.4601	13744.1464
45	0.5	0.8	25	13317.072	12716.8753	11072.3868	13318.2474
45	0.45	0.8	25	13525.006	12897.7761	11246.3608	13524.9489
45	0.4	0.8	25	13731.223	13102.1519	11937.4831	13729.8924
30	0.6	1	25	13524.758	13694.924	17193.2112	13527.2408
30	0.55	1	25	13929.035	13862.5668	17492.6857	13926.4805
30	0.5	1	25	13937.951	14060.2447	18284.3829	13937.6961
30	0.55	0.9	25	12907.794	13013.0503	14051.9197	12909.4341
30	0.5	0.9	25	13111.828	13196.4138	14287.0847	13112.4027
30	0.45	0.9	25	13321.753	13415.1169	15023.8327	13320.7319
30	0.5	0.8	25	13475.344	12388.5485	10916.2291	13476.3688
30	0.45	0.8	25	13703.839	12596.075	11120.1329	13703.5141
30	0.4	0.8	25	13931.186	12841.4677	11835.6364	13929.7318
15	0.6	1	25	13375.141	13599.1623	17879.2186	13376.5168
15	0.55	1	25	13585.868	13845.4307	17954.0247	13585.7006
15	0.5	1	25	13801.159	14122.6363	18512.5591	13799.728

Verevlik Açısı (θ°)	Boşluk Çapı (m)	Plak Kalınlığı (m)	Köprü Açıklığı (m)	SAP 2000 Eğilme Momenti	MLP YSA (Eğitme) Eğilme Momenti	RBF YSA (Eğitme) Eğilme Momenti	GRN YSA (Eğitme) Eğilme Momenti
15	0.55	0.9	25	12771.844	13211.4207	14645.7512	12773.44
15	0.5	0.9	25	12984.773	13486.8258	14656.651	12985.4539
15	0.45	0.9	25	13203.079	13781.7141	15161.8675	13202.1265
15	0.5	0.8	25	13608.534	12885.3625	11422.8878	13609.5104
15	0.45	0.8	25	13849.261	13167.0203	11404.3804	13848.8172
15	0.4	0.8	25	14088.689	13449.3355	11891.4373	14087.1653
60	0.55	0.9	22.5	13207.876	12732.8537	15266.286	13209.209
60	0.5	0.9	22.5	13419.452	12823.6254	15151.9211	13418.8019
60	0.45	0.9	22.5	13630.236	12904.1906	15548.3422	13628.3562
60	0.5	0.8	22.5	11701.767	11740.9964	11932.1207	11702.9631
60	0.45	0.8	22.5	11870.741	11820.012	11829.7324	11762.031
60	0.4	0.8	22.5	12032.864	11888.9719	12248.9196	11921.0292
60	0.45	0.75	22.5	11005.483	11243.4933	10217.1134	11116.9462
60	0.4	0.75	22.5	11167.309	11311.5602	10398.4609	11274.2917
60	0.35	0.75	22.5	10827.254	11370.7006	11104.2819	10830.1937
45	0.55	0.9	22.5	10951.83	11893.7389	14247.2154	10952.8513
45	0.5	0.9	22.5	11105.465	12040.6335	14438.1968	11105.7223
45	0.45	0.9	22.5	11266.135	12192.4995	15136.4601	11265.44
45	0.5	0.8	22.5	11270.192	11016.2606	11072.3868	11270.6181
45	0.45	0.8	22.5	11444.2	11150.4685	11246.3608	11344.2569
45	0.4	0.8	22.5	11615.887	11294.2669	11937.4831	11513.427
45	0.45	0.75	22.5	10654.089	10609.0229	9550.45149	10755.9756
45	0.4	0.75	22.5	10822.466	10743.75	9991.30548	10921.7672
45	0.35	0.75	22.5	10782.885	10889.9424	10951.1653	10783.7875
30	0.55	0.9	22.5	10358.365	11280.36	14051.9197	10359.4221
30	0.5	0.9	22.5	10516.271	11400.156	14287.0847	10516.8761
30	0.45	0.9	22.5	10681.345	11546.5102	15023.8327	10680.9813
30	0.5	0.8	22.5	11432.332	10603.4485	10916.2291	11432.537
30	0.45	0.8	22.5	11623.099	10728.6227	11120.1329	11526.1021
30	0.4	0.8	22.5	11812.599	10885.3706	11835.6364	11713.3998
30	0.45	0.75	22.5	10858.561	10309.2387	9417.72529	10957.2679
30	0.4	0.75	22.5	11045.562	10456.4155	9878.85116	11141.4165
30	0.35	0.75	22.5	11006.639	10639.835	10853.6163	11007.5139
15	0.55	0.9	22.5	10134.681	11307.2199	14645.7512	10135.7906
15	0.5	0.9	22.5	10300.637	11487.4736	14656.651	10301.398
15	0.45	0.9	22.5	10472.912	11699.9293	15161.8675	10472.6714
15	0.5	0.8	22.5	11563.095	10904.507	11422.8878	11563.2242
15	0.45	0.8	22.5	11765.102	11114.3061	11404.3804	11669.8925
15	0.4	0.8	22.5	11965.836	11350.317	11891.4373	11868.3544
15	0.45	0.75	22.5	11015.738	10804.5399	9773.26626	11112.5647
15	0.4	0.75	22.5	11215.023	11035.2748	10010.5191	11306.7949
15	0.35	0.75	22.5	10782.885	11281.363	10756.7829	10786.33
60	0.5	0.8	20	10173.353	10053.5244	11932.1207	10174.311
60	0.45	0.8	20	10325.558	10080.5779	11829.7324	10324.825
60	0.4	0.8	20	10471.032	10098.4602	12248.9196	10469.5873
60	0.45	0.7	20	8563.8397	8909.45878	8773.62051	8566.2162
60	0.4	0.7	20	8915.9353	8926.62205	8720.6889	8811.15641
60	0.35	0.7	20	8942.8033	8934.95972	9199.59308	8853.5215

Verevlik Açısı (θ°)	Boşluk Çapı (m)	Plak Kalınlığı (m)	Köprü Açıklığı (m)	SAP 2000 Eğilme Momenti	MLP YSA (Eğitme) Eğilme Momenti	RBF YSA (Eğitme) Eğilme Momenti	GRN YSA (Eğitme) Eğilme Momenti
60	0.4	0.65	20	8095.6456	8318.09514	7219.01746	8201.05337
60	0.35	0.65	20	8246.188	8328.31302	7474.48879	8334.3088
60	0.3	0.65	20	8386.855	8331.03208	8263.35111	8386.49839
45	0.5	0.8	20	9537.6954	9569.84992	11072.3868	9538.6072
45	0.45	0.8	20	9679.5803	9663.08891	11246.3608	9679.07745
45	0.4	0.8	20	9818.8305	9755.01434	11937.4831	9817.49652
45	0.45	0.7	20	8345.7589	8516.30442	8025.54914	8345.94602
45	0.4	0.7	20	8390.1065	8597.10911	8219.67118	8295.78861
45	0.35	0.7	20	8409.2873	8680.71041	8940.6322	8327.79346
45	0.4	0.65	20	7641.277	7994.92656	6626.19542	7737.66757
45	0.35	0.65	20	7773.3278	8074.53104	7111.74076	7853.8014
45	0.3	0.65	20	7901.9046	8158.39626	8124.91412	7901.57461
30	0.5	0.8	20	9515.4815	9148.52505	10916.2291	9516.46573
30	0.45	0.8	20	9668.092	9223.02875	11120.1329	9667.63089
30	0.4	0.8	20	9819.1008	9320.08352	11835.6364	9817.73316
30	0.45	0.7	20	8385.2433	8270.05016	7886.545	8385.4585
30	0.4	0.7	20	8435.1447	8341.90814	8096.87662	8343.6619
30	0.35	0.7	20	8461.2808	8440.75135	8828.82648	8383.2561
30	0.4	0.65	20	7708.7534	7834.27118	6493.35005	7802.33392
30	0.35	0.65	20	7852.7269	7922.92654	6986.02552	7929.73613
30	0.3	0.65	20	7995.5973	8043.17764	8001.42436	7995.15003
15	0.5	0.8	20	9554.3822	9285.81524	11422.8878	9555.42405
15	0.45	0.8	20	9716.0901	9399.94209	11404.3804	9715.64662
15	0.4	0.8	20	9876.2145	9544.33151	11891.4373	9874.81115
15	0.45	0.7	20	8457.9434	8651.40903	8311.96146	8458.19767
15	0.4	0.7	20	8514.2037	8789.72676	8303.11021	8423.96105
15	0.35	0.7	20	8546.4218	8956.92423	8811.05612	8470.25944
15	0.4	0.65	20	7797.6225	8380.29391	6772.6879	7890.0036
15	0.35	0.65	20	7952.6872	8543.10741	7045.97057	8027.81507
15	0.3	0.65	20	8106.5705	8728.59199	7838.54346	8106.0384
60	0.45	0.7	17.5	7373.2379	7315.92461	8773.62051	7373.94506
60	0.4	0.7	17.5	7484.9034	7301.45776	8720.6889	7484.42846
60	0.35	0.7	17.5	7593.801	7280.42379	9199.59308	7592.70413
60	0.4	0.6	17.5	6264.902	6212.63382	5896.35669	6265.71998
60	0.35	0.6	17.5	6367.0857	6203.4639	5932.35137	6314.14867
60	0.3	0.6	17.5	6619.8053	6188.23816	6509.24217	6546.9127
60	0.35	0.55	17.5	5938.8804	5706.90376	4576.03174	5994.28991
60	0.3	0.55	17.5	6060.3908	5699.99673	4944.73197	6130.83738
60	0.25	0.55	17.5	6158.392	5688.12273	5854.07431	6158.12609
45	0.45	0.7	17.5	6563.7354	7104.93467	8025.54914	6564.37577
45	0.4	0.7	17.5	6657.6603	7152.81564	8219.67118	6657.31333
45	0.35	0.7	17.5	6753.0287	7195.70436	8940.6322	6752.10903
45	0.4	0.6	17.5	5622.7542	6007.87403	5213.98098	5623.37312
45	0.35	0.6	17.5	5699.3687	6057.19323	5468.09162	5652.94006
45	0.3	0.6	17.5	5892.9556	6105.097	6257.86653	5830.63277
45	0.35	0.55	17.5	5324.5577	5522.28877	4012.7444	5372.95881
45	0.3	0.55	17.5	5413.7493	5575.90446	4582.94555	5474.13278
45	0.25	0.55	17.5	5492.9129	5629.33465	5688.04627	5492.7117

Verevlik Açısı (θ°)	Boşluk Çapı (m)	Plak Kalınlığı (m)	Köprü Açıklığı (m)	SAP 2000 Eğilme Momenti	MLP YSA (Eğitme) Eğilme Momenti	RBF YSA (Eğitme) Eğilme Momenti	GRN YSA (Eğitme) Eğilme Momenti
30	0.45	0.7	17.5	6511.2188	6838.54317	7886.545	6511.94702
30	0.4	0.7	17.5	6619.4853	6877.97887	8096.87662	6619.18553
30	0.35	0.7	17.5	6730.142	6936.06244	8828.82648	6729.17639
30	0.4	0.6	17.5	5664.7447	5831.40045	5071.39517	5665.40921
30	0.35	0.6	17.5	5756.8613	5873.80553	5328.84321	5707.817
30	0.3	0.6	17.5	5921.8246	5938.80603	6117.2206	5863.27013
30	0.35	0.55	17.5	5363.3011	5377.80681	3860.36675	5414.15667
30	0.3	0.55	17.5	5470.9508	5438.7198	4425.62192	5527.79904
30	0.25	0.55	17.5	5570.8259	5526.06912	5521.47398	5570.45904
15	0.45	0.7	17.5	6577.9682	7048.37997	8311.96146	6578.74559
15	0.4	0.7	17.5	6694.7337	7103.92222	8303.11021	6694.44605
15	0.35	0.7	17.5	6814.055	7186.311	8811.05612	6813.05095
15	0.4	0.6	17.5	5764.057	6196.69374	5422.22195	5764.75187
15	0.35	0.6	17.5	5865.1573	6278.38745	5464.9921	5814.06762
15	0.3	0.6	17.5	6013.8251	6388.65248	6035.05073	5956.8046
15	0.35	0.55	17.5	5456.4892	5839.17389	4071.05073	5509.30527
15	0.3	0.55	17.5	5574.3268	5951.04019	4422.59536	5629.75384
15	0.25	0.55	17.5	5686.8364	6089.54191	5302.44869	5686.37188
60	0.4	0.6	15	5160.6951	5019.36531	5896.35669	5160.52854
60	0.35	0.6	15	5192.2968	5003.53981	5932.35137	5125.93672
60	0.3	0.6	15	5220.5708	4983.69723	6509.24217	5162.86401
60	0.35	0.55	15	4667.2261	4631.59185	4576.03174	4734.68905
60	0.3	0.55	15	4772.4138	4620.29122	4944.73197	4774.13987
60	0.25	0.55	15	4871.9074	4605.5599	5854.07431	4816.35393
60	0.3	0.5	15	4338.8663	4297.23557	3572.55322	4395.11084
60	0.25	0.5	15	4438.6169	4290.87545	4285.34849	4493.40375
60	0.2	0.5	15	4534.2643	4281.67037	5535.84015	4533.99848
45	0.4	0.6	15	4630.7639	4889.11972	5213.98098	4630.51021
45	0.35	0.6	15	4643.8872	4924.12387	5468.09162	4583.22906
45	0.3	0.6	15	4637.1419	4952.97054	6257.86653	4523.58429
45	0.35	0.55	15	4167.5779	4499.53321	4012.7444	4226.17381
45	0.3	0.55	15	3744.7015	4538.53909	4582.94555	3863.58233
45	0.25	0.55	15	4322.4052	4572.09736	5688.04627	4271.1918
45	0.3	0.5	15	3869.4823	4162.99979	3103.10562	3854.89396
45	0.25	0.5	15	3941.9815	4207.41817	4000.92404	3989.75208
45	0.2	0.5	15	4015.731	4247.40451	5430.36719	4015.56475
30	0.4	0.6	15	4599.3311	4637.23632	5071.39517	4599.10355
30	0.35	0.6	15	4614.9406	4673.41555	5328.84321	4555.42748
30	0.3	0.6	15	4598.2017	4724.49299	6117.2206	4550.26074
30	0.35	0.55	15	4145.2486	4248.84153	3860.36675	4205.51862
30	0.3	0.55	15	4224.1852	4298.25782	4425.62192	4226.7279
30	0.25	0.55	15	4304.7841	4364.54804	5521.47398	4258.87098
30	0.3	0.5	15	3871.674	3918.32887	2929.61594	3917.36615
30	0.25	0.5	15	3946.4764	3984.64972	3814.90708	3991.81354
30	0.2	0.5	15	4023.6646	4070.43351	5228.03368	4023.45731
15	0.4	0.6	15	4613.8143	4778.95631	5422.22195	4613.6304
15	0.35	0.6	15	4634.9598	4809.31916	5464.9921	4575.77881
15	0.3	0.6	15	4617.0131	4863.00506	6035.05073	4570.46289

Verevlik Açısı (θ°)	Boşluk Çapı (m)	Plak Kalınlığı (m)	Köprü Açıklığı (m)	SAP 2000 Eğilme Momenti	MLP YSA (Eğitme) Eğilme Momenti	RBF YSA (Eğitme) Eğilme Momenti	GRN YSA (Eğitme) Eğilme Momenti
15	0.35	0.55	15	4168.0774	4421.82003	4071.05073	4228.03353
15	0.3	0.55	15	4253.7271	4479.32503	4422.59536	4256.22018
15	0.25	0.55	15	4341.4698	4563.71883	5302.44869	4296.93645
15	0.3	0.5	15	3911.4033	4136.21834	3004.00523	3955.82374
15	0.25	0.5	15	3994.3068	4225.47772	3677.77455	4038.22935
15	0.2	0.5	15	4079.8711	4343.31314	4878.41558	4079.59952
60	0.3	0.5	12.5	3665.6556	3650.35466	3572.55322	3665.7032
60	0.25	0.4	12.5	3058.2618	3309.68208	1745.15155	3058.26342
45	0.3	0.5	12.5	3034.166	3544.55024	3103.10562	3034.22001
45	0.25	0.4	12.5	2525.0519	3157.0164	1233.27557	2525.05327
30	0.3	0.5	12.5	2970.3455	3237.53213	2929.61594	2970.40813
30	0.25	0.4	12.5	2499.5553	2837.72817	1010.29623	2499.55657
15	0.3	0.5	12.5	2962.3975	3198.7882	3004.00523	2962.46333
15	0.25	0.4	12.5	2520.0465	2857.20543	1031.42417	2520.04769

YSA TEST AŞAMASINDAN ELDE EDİLEN SONUÇLAR							
Verevlik Açısı (θ°)	Boşluk Çapı (m)	Plak Kalınlığı (m)	Köprü Açıklığı (m)	SAP 2000 Eğilme Momenti	MLP YSA (Test) Eğilme Momenti	RBF YSA (Test) Eğilme Momenti	GRN YSA (Test) Eğilme Momenti
60	0.8	1.4	35	36875.1685	33898.1941	31495.6814	24996.4509
60	0.75	1.4	35	37275.9535	34021.6413	31715.1773	24996.451
60	0.7	1.4	35	37682.9649	34141.6649	32402.8256	24998.1572
60	0.65	1.4	35	38095.8799	34257.65	33558.1071	25294.0644
60	0.6	1.4	35	38510.5286	34369.4748	35176.6017	25595.0603
60	0.55	1.4	35	38934.2592	34477.512	37250.0045	25596.7961
60	0.75	1.3	35	34909.9142	32991.0389	28535.0624	24996.451
60	0.7	1.3	35	35314.5455	33142.1701	28656.7587	24998.1572
60	0.65	1.3	35	35723.9176	33291.1889	29252.2885	25294.0644
60	0.6	1.3	35	36137.8528	33437.2886	30320.7636	25595.0603
60	0.55	1.3	35	36556.0873	33580.2154	31857.3454	25596.7961
60	0.7	1.2	35	32667.6852	31935.8416	25379.7807	24998.1533
60	0.65	1.2	35	33071.3814	32118.2037	25411.9535	25293.2689
60	0.6	1.2	35	33478.1321	32301.1253	25925.3434	25594.2549
60	0.55	1.2	35	33887.9935	32483.6545	26918.604	25489.2863
60	0.5	1.2	35	34300.9276	32665.3198	28386.3799	24128.1319
45	0.8	1.4	35	34147.6995	33028.9368	29008.2191	23198.3538
45	0.75	1.4	35	34544.5146	33171.0345	29647.5908	22278.8558
45	0.7	1.4	35	34948.0558	33319.1474	30761.325	22280.4494
45	0.65	1.4	35	35357.7276	33473.7527	32346.3182	22563.3333
45	0.6	1.4	35	35768.4423	33634.8068	34395.5429	22852.8225
45	0.55	1.4	35	36189.2378	33801.5575	36898.0903	22854.5358
45	0.75	1.3	35	32625.2768	32010.8653	26419.2117	22278.8182
45	0.7	1.3	35	33028.5761	32186.1391	26944.26	22280.4492
45	0.65	1.3	35	33437.7395	32371.2001	27946.8135	22563.3331
45	0.6	1.3	35	33852.2117	32566.5044	29423.5196	22852.8223
45	0.55	1.3	35	34271.4577	32771.4712	31367.0777	22854.4918
45	0.7	1.2	35	30870.3887	30884.2365	23601.5213	22280.4465
45	0.65	1.2	35	31276.8007	31100.1575	24016.6792	22562.734
45	0.6	1.2	35	31688.1709	31329.8911	24914.4471	22852.2199
45	0.55	1.2	35	32103.9927	31572.8384	26291.1667	22997.004
45	0.5	1.2	35	32523.8037	31826.6015	28139.1944	24123.5282
30	0.8	1.4	35	33465.2752	32289.3178	28290.8029	27322.4968
30	0.75	1.4	35	33869.1386	32471.6782	29041.2071	27324.4278
30	0.7	1.4	35	34279.8144	32662.1073	30262.4204	27659.4047
30	0.65	1.4	35	34696.7056	32858.9506	31950.6476	28015.2029
30	0.6	1.4	35	35114.1994	33059.355	34098.2292	28377.0749
30	0.55	1.4	35	35542.4538	33259.5885	36693.6916	28742.1371
30	0.75	1.3	35	32133.6088	31273.6994	25845.9274	27324.4249
30	0.7	1.3	35	32546.6061	31502.3193	26470.4257	27658.7547
30	0.65	1.3	35	32965.7263	31736.9956	27568.0707	28014.5492

Verevlik Açısı (θ°)	Boşluk Çapı (m)	Plak Kalınlığı (m)	Köprü Açıklığı (m)	SAP 2000 Eğilme Momenti	MLP YSA (Test) Eğilme Momenti	RBF YSA (Test) Eğilme Momenti	GRN YSA (Test) Eğilme Momenti
30	0.6	1.3	35	33390.389	31973.3968	29134.9294	28376.422
30	0.55	1.3	35	33820.0159	32206.5927	31163.1879	28741.4823
30	0.7	1.2	35	30593.3522	30209.7008	23154.3521	26213.3465
30	0.65	1.2	35	31013.2741	30480.9074	23656.1347	26568.3891
30	0.6	1.2	35	31438.5919	30750.8049	24635.5417	26932.147
30	0.55	1.2	35	31868.7562	31013.4446	26088.4552	27301.1983
30	0.5	1.2	35	32303.2245	31263.978	28006.8438	27672.0806
15	0.8	1.4	35	33227.6096	31797.7897	29370.7542	27076.5565
15	0.75	1.4	35	33636.1475	32026.3024	29910.0415	27078.5875
15	0.7	1.4	35	34051.5511	32245.1892	30907.1521	27430.8259
15	0.65	1.4	35	34473.2064	32450.6062	32359.5739	27791.7258
15	0.6	1.4	35	34895.1937	32640.4181	34261.0691	28158.6244
15	0.55	1.4	35	35328.3237	32814.2304	36601.7097	28528.6716
15	0.75	1.3	35	31980.159	30827.4731	26826.4545	27078.5848
15	0.7	1.3	35	32399.2225	31073.1356	27234.1771	27430.212
15	0.65	1.3	35	32824.5212	31301.4538	28103.0806	27791.109
15	0.6	1.3	35	33255.4721	31511.0389	29430.609	28158.0092
15	0.55	1.3	35	33691.4773	31702.357	31210.4516	28528.0555
15	0.7	1.2	35	30536.1249	29780.5471	24035.07	26065.0734
15	0.65	1.2	35	30964.0411	30025.4942	24315.9165	26426.7157
15	0.6	1.2	35	31397.5574	30249.3185	25063.5231	26797.1245
15	0.55	1.2	35	31836.1106	30453.4195	26275.2278	27172.886
15	0.5	1.2	35	32279.1223	30640.2552	27944.5682	27550.5158
60	0.75	1.3	32.5	30720.3102	29895.9407	28535.0624	24996.451
60	0.7	1.3	32.5	31070.0827	30103.1347	28656.7587	24998.1572
60	0.65	1.3	32.5	31425.7358	30304.1902	29252.2885	25294.0644
60	0.6	1.3	32.5	31786.9818	30498.3971	30320.7636	25595.0603
60	0.55	1.3	32.5	32153.4506	30685.9987	31857.3454	25596.7961
60	0.7	1.2	32.5	28994.1959	28493.1426	25379.7807	24998.1533
60	0.65	1.2	32.5	29347.84	28725.4017	25411.9535	25293.2689
60	0.6	1.2	32.5	29705.5631	28953.9072	25925.3434	25594.2549
60	0.55	1.2	32.5	30067.4601	29177.6801	26918.604	25489.2863
60	0.5	1.2	32.5	30433.3287	29396.8758	28386.3799	24128.1319
60	0.65	1.1	32.5	26990.0196	27016.4935	22073.299	23524.2287
60	0.6	1.1	32.5	27342.0142	27272.7622	22031.7639	23822.8694
60	0.55	1.1	32.5	27696.2873	27529.3896	22480.3183	24124.8252
60	0.5	1.1	32.5	28053.1388	27785.2852	23417.015	23997.7724
60	0.45	1.1	32.5	28412.6135	28040.5412	24835.8318	22354.8243
60	0.6	1	32.5	24729.6527	25508.2837	18676.5854	21757.9446
60	0.55	1	32.5	25073.0188	25788.7189	18584.1605	22055.0358
60	0.5	1	32.5	25416.6661	26075.6638	18991.8376	22352.357
60	0.45	1	32.5	25761.4161	26368.0235	19896.8783	22354.0723
45	0.75	1.3	32.5	27980.7548	28457.1512	26419.2117	22278.8182

Verevlik Açısı (θ°)	Boşluk Çapı (m)	Plak Kalınlığı (m)	Köprü Açıklığı (m)	SAP 2000 Eğilme Momenti	MLP YSA (Test) Eğilme Momenti	RBF YSA (Test) Eğilme Momenti	GRN YSA (Test) Eğilme Momenti
45	0.7	1.3	32.5	28322.699	28682.1519	26944.26	22280.4492
45	0.65	1.3	32.5	28671.3259	28919.7953	27946.8135	22563.3331
45	0.6	1.3	32.5	29025.9616	29170.547	29423.5196	22852.8223
45	0.55	1.3	32.5	29385.9428	29434.129	31367.0777	22854.4918
45	0.7	1.2	32.5	26690.4377	27010.7439	23601.5213	22280.4465
45	0.65	1.2	32.5	27038.0645	27261.9455	24016.6792	22562.734
45	0.6	1.2	32.5	27391.4962	27532.0244	24914.4471	22852.2199
45	0.55	1.2	32.5	27750.0973	27822.0923	26291.1667	22778.9317
45	0.5	1.2	32.5	28113.2596	28131.9051	28139.1944	21823.3815
45	0.65	1.1	32.5	25166.0042	25563.1726	20592.9595	21230.4298
45	0.6	1.1	32.5	25515.3666	25845.5481	20910.82	21527.251
45	0.55	1.1	32.5	25869.6888	26153.6593	21718.1884	21917.6025
45	0.5	1.1	32.5	26228.3734	26488.2478	23010.9834	24121.6425
45	0.45	1.1	32.5	26590.8893	26847.5772	24781.0912	24473.4999
45	0.6	1	32.5	23425.0187	24170.3811	17450.2327	19952.9698
45	0.55	1	32.5	23771.179	24490.0748	17691.0803	24082.1227

Ek-5.

**SAP 2000 v11 Programı ile Analizi Yapılan Köprülerin
Öngerilme Hesabı ve Kablo Sayılarının Tespiti**

θ (°)	R (m)	B (m)	d (m)	L (m)	Toplam Moment (kNm)	1.40 m'ye Gelen Moment (kNm)	S_{bb} (m ³)	f_b (kN/m ²)	A_b (m ²)	δ_g (kN/m ²)	P_{se} (kN)	P_{se1} (kN)	e_p (m)	Y_{bb} (m)	x (m)	n_1	n_2	n_3	d_1 (m)	d_2 (m)	d_3 (m)	N'	N
60	0.8	12	1.4	35	36875.168	8066.4431	0.4573	17639.281	1.96	14298.281	9166.486	140.54	0.48	0.7	0.22	22	22	22	0.11	0.22	0.33	65.2	66
60	0.75	12	1.4	35	37275.953	8154.1148	0.4573	17830.997	1.96	14489.997	9246.185	140.54	0.483	0.7	0.217	23	22	21	0.11	0.22	0.33	65.7	66
60	0.7	12	1.4	35	37682.964	8243.1486	0.4573	18025.691	1.96	14684.691	9392.591	140.54	0.482	0.7	0.218	23	22	22	0.11	0.22	0.33	66.8	67
60	0.65	12	1.4	35	38095.879	8333.4737	0.4573	18223.21	1.96	14882.21	9519.249	140.54	0.482	0.7	0.218	23	23	22	0.11	0.22	0.33	67.7	68
60	0.6	12	1.4	35	38510.528	8424.1781	0.4573	18421.557	1.96	15080.557	9667.995	140.54	0.48	0.7	0.22	23	23	23	0.11	0.22	0.33	68.7	69
60	0.55	12	1.4	35	38934.259	8516.8692	0.4573	18624.249	1.96	15283.249	9776.402	140.54	0.482	0.7	0.218	24	23	23	0.11	0.22	0.33	69.5	70
60	0.75	12	1.3	35	34909.914	7636.5437	0.3943	19367.344	1.82	16026.344	9748.526	140.54	0.432	0.65	0.218	24	23	23	0.11	0.22	0.33	69.3	70
60	0.7	12	1.3	35	35314.545	7725.0568	0.3943	19591.826	1.82	16250.826	9885.412	140.54	0.432	0.65	0.218	24	24	23	0.11	0.22	0.33	70.3	71
60	0.65	12	1.3	35	35723.917	7814.607	0.3943	19818.937	1.82	16477.937	10047.58	140.54	0.43	0.65	0.22	24	24	24	0.11	0.22	0.33	71.4	72
60	0.6	12	1.3	35	36137.852	7905.1553	0.3943	20048.581	1.82	16707.581	10163.92	140.54	0.432	0.65	0.218	25	24	24	0.11	0.22	0.33	72.3	73
60	0.55	12	1.3	35	36556.087	7996.6441	0.3943	20280.609	1.82	16939.609	10305.4	140.54	0.431	0.65	0.219	25	25	24	0.11	0.22	0.33	73.3	74
60	0.7	12	1.2	35	32667.685	7146.0561	0.336	21268.024	1.68	17927.024	10358.76	140.54	0.381	0.6	0.219	25	25	24	0.11	0.22	0.33	73.7	74
60	0.65	12	1.2	35	33071.381	7234.3647	0.336	21530.847	1.68	18189.847	10537.57	140.54	0.38	0.6	0.22	25	25	25	0.11	0.22	0.33	74.9	75
60	0.6	12	1.2	35	33478.132	7323.3414	0.336	21795.659	1.68	18454.659	10664.36	140.54	0.381	0.6	0.219	26	25	25	0.11	0.22	0.33	75.8	76
60	0.55	12	1.2	35	33887.993	7412.9986	0.336	22062.496	1.68	18721.496	10845.56	140.54	0.38	0.6	0.22	26	26	26	0.11	0.22	0.33	77.1	78
60	0.5	12	1.2	35	34300.927	7503.3279	0.336	22331.333	1.68	18990.333	10974.95	140.54	0.381	0.6	0.219	27	26	26	0.11	0.22	0.33	78.0	79
45	0.8	12	1.4	35	34147.995	7469.8093	0.4573	16334.593	1.96	12993.593	8330.063	140.54	0.48	0.7	0.22	20	20	20	0.11	0.22	0.33	59.2	60
45	0.75	12	1.4	35	34544.514	7556.6126	0.4573	16524.41	1.96	13183.41	8430.44	140.54	0.482	0.7	0.218	21	20	20	0.11	0.22	0.33	59.9	61
45	0.7	12	1.4	35	34948.055	7644.8872	0.4573	16717.444	1.96	13376.444	8553.881	140.54	0.482	0.7	0.218	21	20	20	0.11	0.22	0.33	60.8	61
45	0.65	12	1.4	35	35357.727	7734.5029	0.4573	16913.411	1.96	13572.411	8679.55	140.54	0.482	0.7	0.218	21	21	20	0.11	0.22	0.33	61.7	62
45	0.6	12	1.4	35	35768.442	7824.3468	0.4573	17109.877	1.96	13768.877	8827.09	140.54	0.48	0.7	0.22	21	21	21	0.11	0.22	0.33	62.8	63
45	0.55	12	1.4	35	36189.237	7916.3958	0.4573	17311.165	1.96	13970.165	8934.606	140.54	0.482	0.7	0.218	22	21	21	0.11	0.22	0.33	63.5	64
45	0.75	12	1.3	35	32625.276	7136.7793	0.3943	18099.871	1.82	14758.871	8975.506	140.54	0.432	0.65	0.218	22	21	21	0.11	0.22	0.33	63.8	64
45	0.7	12	1.3	35	33028.576	7225.001	0.3943	18323.614	1.82	14982.614	9135.792	140.54	0.43	0.65	0.22	22	22	22	0.11	0.22	0.33	65	66
45	0.65	12	1.3	35	33437.739	7314.5055	0.3943	18550.61	1.82	15209.61	9274.205	140.54	0.43	0.65	0.22	22	22	22	0.11	0.22	0.33	65.9	66
45	0.6	12	1.3	35	33852.211	7405.1713	0.3943	18780.551	1.82	15439.551	9390.572	140.54	0.432	0.65	0.218	23	22	22	0.11	0.22	0.33	66.8	67
45	0.55	12	1.3	35	34271.457	7496.8814	0.3943	19013.141	1.82	15672.141	9532.391	140.54	0.432	0.65	0.218	23	23	22	0.11	0.22	0.33	67.8	68

θ (°)	R (m)	B (m)	d (m)	L (m)	Toplam Moment (kNm)	1.40 m'ye Gelen Moment (kNm)	S_{bb} (m ³)	f_b (kN/m ²)	A_b (m ²)	δ_g (kN/m ²)	P_{se} (kN)	P_{se1} (kN)	e_p (m)	Y_{bb} (m)	x (m)	n_1	n_2	n_3	d_1 (m)	d_2 (m)	d_3 (m)	N'	N
45	0.7	12	1.2	35	30870.388	6752.8975	0.336	20097.909	1.68	16756.909	9681.221	140.54	0.382	0.6	0.218	24	23	23	0.11	0.22	0.33	68.8	70
45	0.65	12	1.2	35	31276.800	6841.8002	0.336	20362.5	1.68	17021.5	9834.087	140.54	0.382	0.6	0.218	24	23	23	0.11	0.22	0.33	69.9	70
45	0.6	12	1.2	35	31688.170	6931.7874	0.336	20630.32	1.68	17289.32	10015.88	140.54	0.38	0.6	0.22	24	24	24	0.11	0.22	0.33	71.2	72
45	0.55	12	1.2	35	32103.992	7022.7484	0.336	20901.037	1.68	17560.037	10146.35	140.54	0.382	0.6	0.218	25	24	24	0.11	0.22	0.33	72.2	73
45	0.5	12	1.2	35	32523.803	7114.5821	0.336	21174.351	1.68	17833.351	10304.64	140.54	0.381	0.6	0.219	25	25	24	0.11	0.22	0.33	73.3	74
30	0.8	12	1.4	35	33465.275	7320.529	0.4573	16008.154	1.96	12667.154	8099.252	140.54	0.482	0.7	0.218	20	19	19	0.11	0.22	0.33	57.6	58
30	0.75	12	1.4	35	33869.138	7408.8741	0.4573	16201.343	1.96	12860.343	8223.145	140.54	0.482	0.7	0.218	20	20	19	0.11	0.22	0.33	58.5	59
30	0.7	12	1.4	35	34279.814	7498.7094	0.4573	16397.79	1.96	13056.79	8370.578	140.54	0.48	0.7	0.22	20	20	20	0.11	0.22	0.33	59.5	60
30	0.65	12	1.4	35	34696.705	7589.9044	0.4573	16597.21	1.96	13256.21	8476.995	140.54	0.482	0.7	0.218	21	20	20	0.11	0.22	0.33	60.3	61
30	0.6	12	1.4	35	35114.199	7681.2311	0.4573	16796.919	1.96	13455.919	8605.053	140.54	0.482	0.7	0.218	21	21	20	0.11	0.22	0.33	61.2	62
30	0.55	12	1.4	35	35542.453	7774.9118	0.4573	17001.775	1.96	13660.775	8757.787	140.54	0.48	0.7	0.22	21	21	21	0.11	0.22	0.33	62.3	63
30	0.75	12	1.3	35	32133.608	7029.2269	0.3943	17827.104	1.82	14486.104	8833.04	140.54	0.43	0.65	0.22	21	21	21	0.11	0.22	0.33	62.8	63
30	0.7	12	1.3	35	32546.606	7119.5701	0.3943	18056.226	1.82	14715.226	8948.964	140.54	0.432	0.65	0.218	22	21	21	0.11	0.22	0.33	63.6	64
30	0.65	12	1.3	35	32965.726	7211.2526	0.3943	18288.746	1.82	14947.746	9090.74	140.54	0.432	0.65	0.218	22	22	21	0.11	0.22	0.33	64.6	65
30	0.6	12	1.3	35	33390.389	7304.1476	0.3943	18524.341	1.82	15183.341	9258.187	140.54	0.43	0.65	0.22	22	22	22	0.11	0.22	0.33	65.8	66
30	0.55	12	1.3	35	33820.015	7398.1285	0.3943	18762.69	1.82	15421.69	9379.708	140.54	0.432	0.65	0.218	23	22	22	0.11	0.22	0.33	66.7	67
30	0.7	12	1.2	35	30593.352	6692.2958	0.336	19917.547	1.68	16576.547	9602.965	140.54	0.38	0.6	0.22	23	23	23	0.11	0.22	0.33	68.3	69
30	0.65	12	1.2	35	31013.274	6784.1537	0.336	20190.934	1.68	16849.934	9734.965	140.54	0.382	0.6	0.218	24	23	23	0.11	0.22	0.33	69.2	70
30	0.6	12	1.2	35	31438.591	6877.192	0.336	20467.833	1.68	17126.833	9895.319	140.54	0.382	0.6	0.218	24	24	23	0.11	0.22	0.33	70.4	71
30	0.55	12	1.2	35	31868.756	6971.2904	0.336	20747.888	1.68	17406.888	10083.99	140.54	0.38	0.6	0.22	24	24	24	0.11	0.22	0.33	71.7	72
30	0.5	12	1.2	35	32303.224	7066.3304	0.336	21030.745	1.68	17689.745	10221.3	140.54	0.382	0.6	0.218	25	24	24	0.11	0.22	0.33	72.7	73
15	0.8	12	1.4	35	33227.609	7268.5396	0.4573	15894.467	1.96	12553.467	8026.562	140.54	0.482	0.7	0.218	20	19	19	0.11	0.22	0.33	57.1	58
15	0.75	12	1.4	35	33636.147	7357.9073	0.4573	16089.891	1.96	12748.891	8151.881	140.54	0.482	0.7	0.218	20	20	19	0.11	0.22	0.33	58	59
15	0.7	12	1.4	35	34051.551	7448.7768	0.4573	16288.6	1.96	12947.6	8300.578	140.54	0.48	0.7	0.22	20	20	20	0.11	0.22	0.33	59.0	60
15	0.65	12	1.4	35	34473.206	7541.0139	0.4573	16490.299	1.96	13149.299	8429.885	140.54	0.48	0.7	0.22	20	20	20	0.11	0.22	0.33	59.9	60
15	0.6	12	1.4	35	34895.193	7633.3236	0.4573	16692.157	1.96	13351.157	8537.711	140.54	0.482	0.7	0.218	21	20	20	0.11	0.22	0.33	60.7	61
15	0.55	12	1.4	35	35328.323	7728.0708	0.4573	16899.346	1.96	13558.346	8670.555	140.54	0.482	0.7	0.218	21	21	20	0.11	0.22	0.33	61.6	62
15	0.75	12	1.3	35	31980.159	6995.6598	0.3943	17741.973	1.82	14400.973	8781.13	140.54	0.43	0.65	0.22	21	21	21	0.11	0.22	0.33	62.4	63

θ (°)	R (m)	B (m)	d (m)	L (m)	Toplam Moment (kNm)	1.40 m'ye Gelen Moment (kNm)	S_{bb} (m ³)	f_b (kN/m ²)	A_b (m ²)	δ_g (kN/m ²)	P_{se} (kN)	P_{se1} (kN)	e_p (m)	Y_{bb} (m)	x (m)	n_1	n_2	n_3	d_1 (m)	d_2 (m)	d_3 (m)	N'	N
15	0.7	12	1.3	35	32399.222	7087.3299	0.3943	17974.461	1.82	14633.461	8899.239	140.54	0.432	0.65	0.218	22	21	21	0.11	0.22	0.33	63.3	64
15	0.65	12	1.3	35	32824.521	7180.364	0.3943	18210.408	1.82	14869.408	9043.097	140.54	0.432	0.65	0.218	22	22	21	0.11	0.22	0.33	64.3	65
15	0.6	12	1.3	35	33255.472	7274.6345	0.3943	18449.492	1.82	15108.492	9212.547	140.54	0.43	0.65	0.22	22	22	22	0.11	0.22	0.33	65.5	66
15	0.55	12	1.3	35	33691.477	7370.0107	0.3943	18691.379	1.82	15350.379	9336.336	140.54	0.432	0.65	0.218	23	22	22	0.11	0.22	0.33	66.4	67
15	0.7	12	1.2	35	30536.124	6679.7773	0.336	19880.29	1.68	16539.29	9581.382	140.54	0.38	0.6	0.22	23	23	23	0.11	0.22	0.33	68.1	69
15	0.65	12	1.2	35	30964.041	6773.384	0.336	20158.881	1.68	16817.881	9716.447	140.54	0.382	0.6	0.218	24	23	23	0.11	0.22	0.33	69.1	70
15	0.6	12	1.2	35	31397.557	6868.2157	0.336	20441.118	1.68	17100.118	9879.884	140.54	0.382	0.6	0.218	24	24	23	0.11	0.22	0.33	70.3	71
15	0.55	12	1.2	35	31836.110	6964.1492	0.336	20726.635	1.68	17385.635	10071.68	140.54	0.38	0.6	0.22	24	24	24	0.11	0.22	0.33	71.6	72
15	0.5	12	1.2	35	32279.122	7061.058	0.336	21015.054	1.68	17674.054	10212.23	140.54	0.382	0.6	0.218	25	24	24	0.11	0.22	0.33	72.6	73
60	0.75	12	1.3	32.5	30720.310	6720.0679	0.3943	17043.033	1.82	13702.033	8354.945	140.54	0.43	0.65	0.22	20	20	20	0.11	0.22	0.33	59.4	60
60	0.7	12	1.3	32.5	31070.082	6796.5806	0.3943	17237.08	1.82	13896.08	8449.704	140.54	0.432	0.65	0.218	21	20	20	0.11	0.22	0.33	60.1	61
60	0.65	12	1.3	32.5	31425.735	6874.3797	0.3943	17434.389	1.82	14093.389	8569.681	140.54	0.432	0.65	0.218	21	20	20	0.11	0.22	0.33	60.9	61
60	0.6	12	1.3	32.5	31786.981	6953.4023	0.3943	17634.802	1.82	14293.802	8715.782	140.54	0.43	0.65	0.22	21	21	21	0.11	0.22	0.33	62.0	63
60	0.55	12	1.3	32.5	32153.450	7033.5673	0.3943	17838.111	1.82	14497.111	8839.752	140.54	0.43	0.65	0.22	21	21	21	0.11	0.22	0.33	62.9	63
60	0.7	12	1.2	32.5	28994.195	6342.4804	0.336	18876.43	1.68	15535.43	8973.244	140.54	0.382	0.6	0.218	22	21	21	0.11	0.22	0.33	63.8	64
60	0.65	12	1.2	32.5	29347.84	6419.84	0.336	19106.667	1.68	15765.667	9106.643	140.54	0.382	0.6	0.218	22	22	21	0.11	0.22	0.33	64.8	65
60	0.6	12	1.2	32.5	29705.563	6498.0919	0.336	19339.559	1.68	15998.559	9268.131	140.54	0.38	0.6	0.22	22	22	22	0.11	0.22	0.33	65.9	66
60	0.55	12	1.2	32.5	30067.460	6577.2569	0.336	19575.169	1.68	16234.169	9378.076	140.54	0.382	0.6	0.218	23	22	22	0.11	0.22	0.33	66.7	67
60	0.5	12	1.2	32.5	30433.328	6657.2907	0.336	19813.365	1.68	16472.365	9516.071	140.54	0.382	0.6	0.218	23	23	22	0.11	0.22	0.33	67.7	68
60	0.65	12	1.1	32.5	26990.019	5904.0668	0.2823	20914.158	1.54	17573.158	9664.503	140.54	0.33	0.55	0.22	23	23	23	0.11	0.22	0.33	68.7	69
60	0.6	12	1.1	32.5	27342.014	5981.0656	0.2823	21186.913	1.54	17845.913	9784.553	140.54	0.332	0.55	0.218	24	23	23	0.11	0.22	0.33	69.6	70
60	0.55	12	1.1	32.5	27696.287	6058.5628	0.2823	21461.434	1.54	18120.434	9935.495	140.54	0.332	0.55	0.218	24	24	23	0.11	0.22	0.33	70.7	71
60	0.5	12	1.1	32.5	28053.138	6136.6241	0.2823	21737.953	1.54	18396.953	10117.56	140.54	0.33	0.55	0.22	24	24	24	0.11	0.22	0.33	71.9	72
60	0.45	12	1.1	32.5	28412.613	6215.2592	0.2823	22016.504	1.54	18675.504	10240.69	140.54	0.332	0.55	0.218	25	24	24	0.11	0.22	0.33	72.8	73
60	0.6	12	1	32.5	24729.652	5409.6115	0.2333	23187.362	1.4	19846.362	10332.19	140.54	0.281	0.5	0.219	25	25	24	0.11	0.22	0.33	73.5	74
60	0.55	12	1	32.5	25073.018	5484.7229	0.2333	23509.314	1.4	20168.314	10534.74	140.54	0.28	0.5	0.22	25	25	25	0.11	0.22	0.33	74.9	75
60	0.5	12	1	32.5	25416.666	5559.8957	0.2333	23831.529	1.4	20490.529	10668.48	140.54	0.281	0.5	0.219	26	25	25	0.11	0.22	0.33	75.9	76
60	0.45	12	1	32.5	25761.416	5635.3098	0.2333	24154.778	1.4	20813.778	10871.9	140.54	0.28	0.5	0.22	26	26	26	0.11	0.22	0.33	77.3	78

θ (°)	R (m)	B (m)	d (m)	L (m)	Toplam Moment (kNm)	1.40 m'ye Gelen Moment (kNm)	S_{bb} (m ³)	f_b (kN/m ²)	A_b (m ²)	δ_g (kN/m ²)	P_{se} (kN)	P_{se1} (kN)	e_p (m)	Y_{bb} (m)	x (m)	n_1	n_2	n_3	d_1 (m)	d_2 (m)	d_3 (m)	N'	N
45	0.75	12	1.3	32.5	27980.754	6120.7901	0.3943	15523.181	1.82	12182.181	7404.436	140.54	0.432	0.65	0.218	18	18	17	0.11	0.22	0.33	52.6	53
45	0.7	12	1.3	32.5	28322.699	6195.5904	0.3943	15712.885	1.82	12371.885	7543.875	140.54	0.43	0.65	0.22	18	18	18	0.11	0.22	0.33	53.6	54
45	0.65	12	1.3	32.5	28671.325	6271.8525	0.3943	15906.296	1.82	12565.296	7638.185	140.54	0.432	0.65	0.218	19	18	18	0.11	0.22	0.33	54.3	55
45	0.6	12	1.3	32.5	29025.961	6349.4291	0.3943	16103.041	1.82	12762.041	7758.21	140.54	0.432	0.65	0.218	19	19	18	0.11	0.22	0.33	55.2	56
45	0.55	12	1.3	32.5	29385.942	6428.175	0.3943	16302.752	1.82	12961.752	7903.552	140.54	0.43	0.65	0.22	19	19	19	0.11	0.22	0.33	56.2	57
45	0.7	12	1.2	32.5	26690.437	5838.5332	0.336	17376.587	1.68	14035.587	8104.46	140.54	0.382	0.6	0.218	20	19	19	0.11	0.22	0.33	57.6	58
45	0.65	12	1.2	32.5	27038.064	5914.5766	0.336	17602.907	1.68	14261.907	8235.597	140.54	0.382	0.6	0.218	20	20	19	0.11	0.22	0.33	58.6	59
45	0.6	12	1.2	32.5	27391.496	5991.8898	0.336	17833.005	1.68	14492.005	8395.369	140.54	0.38	0.6	0.22	20	20	20	0.11	0.22	0.33	59.7	60
45	0.55	12	1.2	32.5	27750.097	6070.3338	0.336	18066.47	1.68	14725.47	8504.177	140.54	0.382	0.6	0.218	21	20	20	0.11	0.22	0.33	60.5	61
45	0.5	12	1.2	32.5	28113.259	6149.7755	0.336	18302.903	1.68	14961.903	8641.153	140.54	0.382	0.6	0.218	21	21	20	0.11	0.22	0.33	61.4	62
45	0.65	12	1.1	32.5	25166.004	5505.0634	0.2823	19500.756	1.54	16159.756	8857.533	140.54	0.332	0.55	0.218	22	21	21	0.11	0.22	0.33	63.0	64
45	0.6	12	1.1	32.5	25515.366	5581.4864	0.2823	19771.472	1.54	16430.472	9006.381	140.54	0.332	0.55	0.218	22	22	21	0.11	0.22	0.33	64.0	65
45	0.55	12	1.1	32.5	25869.688	5658.9944	0.2823	20046.031	1.54	16705.031	9187.069	140.54	0.33	0.55	0.22	22	22	22	0.11	0.22	0.33	65.3	66
45	0.5	12	1.1	32.5	26228.373	5737.4567	0.2823	20323.97	1.54	16982.97	9310.147	140.54	0.332	0.55	0.218	23	22	22	0.11	0.22	0.33	66.2	67
45	0.45	12	1.1	32.5	26590.889	5816.757	0.2823	20604.878	1.54	17263.878	9464.586	140.54	0.332	0.55	0.218	23	23	22	0.11	0.22	0.33	67.3	68
45	0.6	12	1	32.5	23425.018	5124.2228	0.2333	21964.093	1.4	18623.093	9658.661	140.54	0.283	0.5	0.217	24	23	22	0.11	0.22	0.33	68.7	69
45	0.55	12	1	32.5	23771.179	5199.9454	0.2333	22288.664	1.4	18947.664	9862.935	140.54	0.282	0.5	0.218	24	24	23	0.11	0.22	0.33	70.1	71
45	0.5	12	1	32.5	24121.527	5276.584	0.2333	22617.163	1.4	19276.163	10068.74	140.54	0.28	0.5	0.22	24	24	24	0.11	0.22	0.33	71.6	72
45	0.45	12	1	32.5	24475.531	5354.0224	0.2333	22949.089	1.4	19608.089	10207.68	140.54	0.282	0.5	0.218	25	24	24	0.11	0.22	0.33	72.6	73
30	0.75	12	1.3	32.5	27322.496	5976.7962	0.3943	15157.992	1.82	11816.992	7182.029	140.54	0.432	0.65	0.218	18	17	17	0.11	0.22	0.33	51.1	52
30	0.7	12	1.3	32.5	27659.296	6050.471	0.3943	15344.841	1.82	12003.841	7295.591	140.54	0.432	0.65	0.218	18	17	17	0.11	0.22	0.33	51.9	52
30	0.65	12	1.3	32.5	28015.168	6128.3182	0.3943	15542.273	1.82	12201.273	7416.04	140.54	0.432	0.65	0.218	18	18	17	0.11	0.22	0.33	52.7	53
30	0.6	12	1.3	32.5	28377.044	6207.4785	0.3943	15743.035	1.82	12402.035	7562.259	140.54	0.43	0.65	0.22	18	18	18	0.11	0.22	0.33	53.8	54
30	0.55	12	1.3	32.5	28744.242	6287.803	0.3943	15946.749	1.82	12605.749	7662.776	140.54	0.432	0.65	0.218	19	18	18	0.11	0.22	0.33	54.5	55
30	0.7	12	1.2	32.5	26210.640	5733.5777	0.336	17064.219	1.68	13723.219	7950.003	140.54	0.38	0.6	0.22	19	19	19	0.11	0.22	0.33	56.5	57
30	0.65	12	1.2	32.5	26568.450	5811.8486	0.336	17297.168	1.68	13956.168	8058.602	140.54	0.382	0.6	0.218	20	19	19	0.11	0.22	0.33	57.3	58
30	0.6	12	1.2	32.5	26932.218	5891.4228	0.336	17533.996	1.68	14192.996	8195.804	140.54	0.382	0.6	0.218	20	20	19	0.11	0.22	0.33	58.3	59
30	0.55	12	1.2	32.5	27301.278	5972.1547	0.336	17774.27	1.68	14433.27	8361.343	140.54	0.38	0.6	0.22	20	20	20	0.11	0.22	0.33	59.4	60

θ (°)	R (m)	B (m)	d (m)	L (m)	Toplam Moment (kNm)	1.40 m'ye Gelen Moment (kNm)	S_{bb} (m ³)	f_b (kN/m ²)	A_b (m ²)	δ_g (kN/m ²)	P_{se} (kN)	P_{se1} (kN)	e_p (m)	Y_{bb} (m)	x (m)	n_1	n_2	n_3	d_1 (m)	d_2 (m)	d_3 (m)	N'	N
30	0.5	12	1.2	32.5	27674.978	6053.9015	0.336	18017.564	1.68	14676.564	8475.933	140.54	0.382	0.6	0.218	21	20	20	0.11	0.22	0.33	60.3	61
30	0.65	12	1.1	32.5	24898.849	5446.6232	0.2823	19293.742	1.54	15952.742	8773.342	140.54	0.33	0.55	0.22	21	21	21	0.11	0.22	0.33	62.4	63
30	0.6	12	1.1	32.5	25262.770	5526.231	0.2823	19575.739	1.54	16234.739	8898.633	140.54	0.332	0.55	0.218	22	21	21	0.11	0.22	0.33	63.3	64
30	0.55	12	1.1	32.5	25631.902	5606.9787	0.2823	19861.774	1.54	16520.774	9055.88	140.54	0.332	0.55	0.218	22	22	21	0.11	0.22	0.33	64.4	65
30	0.5	12	1.1	32.5	26005.606	5688.7265	0.2823	20151.351	1.54	16810.351	9244.991	140.54	0.33	0.55	0.22	22	22	22	0.11	0.22	0.33	65.7	66
30	0.45	12	1.1	32.5	26383.274	5771.3412	0.2823	20444	1.54	17103	9375.948	140.54	0.332	0.55	0.218	23	22	22	0.11	0.22	0.33	66.7	67
30	0.6	12	1	32.5	23392.386	5117.0844	0.2333	21933.495	1.4	18592.495	9642.792	140.54	0.283	0.5	0.217	24	23	22	0.11	0.22	0.33	68.6	69
30	0.55	12	1	32.5	23759.540	5197.3995	0.2333	22277.752	1.4	18936.752	9857.255	140.54	0.282	0.5	0.218	24	24	23	0.11	0.22	0.33	70.1	71
30	0.5	12	1	32.5	24131.173	5278.6943	0.2333	22626.208	1.4	19285.208	10073.46	140.54	0.28	0.5	0.22	24	24	24	0.11	0.22	0.33	71.6	72
30	0.45	12	1	32.5	24506.691	5360.8388	0.2333	22978.306	1.4	19637.306	10222.89	140.54	0.282	0.5	0.218	25	24	24	0.11	0.22	0.33	72.7	73
15	0.75	12	1.3	32.5	27076.556	5922.9967	0.3943	15021.549	1.82	11680.549	7122.326	140.54	0.43	0.65	0.22	17	17	17	0.11	0.22	0.33	50.6	51
15	0.7	12	1.3	32.5	27430.787	6000.4849	0.3943	15218.07	1.82	11877.07	7218.542	140.54	0.432	0.65	0.218	18	17	17	0.11	0.22	0.33	51.3	52
15	0.65	12	1.3	32.5	27791.691	6079.4325	0.3943	15418.292	1.82	12077.292	7340.683	140.54	0.432	0.65	0.218	18	18	17	0.11	0.22	0.33	52.2	53
15	0.6	12	1.3	32.5	28158.594	6159.6925	0.3943	15621.842	1.82	12280.842	7488.361	140.54	0.43	0.65	0.22	18	18	18	0.11	0.22	0.33	53.2	54
15	0.55	12	1.3	32.5	28530.805	6241.1138	0.3943	15828.338	1.82	12487.338	7590.796	140.54	0.432	0.65	0.218	19	18	18	0.11	0.22	0.33	54.0	55
15	0.7	12	1.2	32.5	26062.366	5701.1426	0.336	16967.686	1.68	13626.686	7867.436	140.54	0.382	0.6	0.218	19	19	18	0.11	0.22	0.33	55.9	56
15	0.65	12	1.2	32.5	26426.773	5780.8566	0.336	17204.93	1.68	13863.93	7978.425	140.54	0.384	0.6	0.216	20	19	18	0.11	0.22	0.33	56.7	57
15	0.6	12	1.2	32.5	26797.191	5861.8856	0.336	17446.088	1.68	14105.088	8144.591	140.54	0.382	0.6	0.218	20	19	19	0.11	0.22	0.33	57.9	58
15	0.55	12	1.2	32.5	27172.961	5944.0853	0.336	17690.73	1.68	14349.73	8312.947	140.54	0.38	0.6	0.22	20	20	20	0.11	0.22	0.33	59.1	60
15	0.5	12	1.2	32.5	27553.408	6027.308	0.336	17938.417	1.68	14597.417	8403.31	140.54	0.384	0.6	0.216	21	20	19	0.11	0.22	0.33	59.7	60
15	0.65	12	1.1	32.5	24847.977	5435.4951	0.2823	19254.322	1.54	15913.322	8751.663	140.54	0.33	0.55	0.22	21	21	21	0.11	0.22	0.33	62.2	63
15	0.6	12	1.1	32.5	25220.742	5517.0375	0.2823	19543.172	1.54	16202.172	8880.782	140.54	0.332	0.55	0.218	22	21	21	0.11	0.22	0.33	63.1	64
15	0.55	12	1.1	32.5	25598.840	5599.7464	0.2823	19836.155	1.54	16495.155	9041.837	140.54	0.332	0.55	0.218	22	22	21	0.11	0.22	0.33	64.3	65
15	0.5	12	1.1	32.5	25981.627	5683.481	0.2823	20132.77	1.54	16791.77	9234.773	140.54	0.33	0.55	0.22	22	22	22	0.11	0.22	0.33	65.7	66
15	0.45	12	1.1	32.5	26368.453	5768.0992	0.2823	20432.516	1.54	17091.516	9369.652	140.54	0.332	0.55	0.218	23	22	22	0.11	0.22	0.33	66.6	67
15	0.6	12	1	32.5	23452.850	5130.3111	0.2333	21990.189	1.4	18649.189	9707.089	140.54	0.282	0.5	0.218	24	23	23	0.11	0.22	0.33	69.0	70
15	0.55	12	1	32.5	23832.108	5213.2738	0.2333	22345.794	1.4	19004.794	9892.673	140.54	0.282	0.5	0.218	24	24	23	0.11	0.22	0.33	70.3	71
15	0.5	12	1	32.5	24216.014	5297.2531	0.2333	22705.757	1.4	19364.757	10115.01	140.54	0.28	0.5	0.22	24	24	24	0.11	0.22	0.33	71.9	72

θ (°)	R (m)	B (m)	d (m)	L (m)	Toplam Moment (kNm)	1.40 m'ye Gelen Moment (kNm)	S_{bb} (m ³)	f_b (kN/m ²)	A_b (m ²)	δ_g (kN/m ²)	P_{se} (kN)	P_{se1} (kN)	e_p (m)	Y_{bb} (m)	x (m)	n_1	n_2	n_3	d_1 (m)	d_2 (m)	d_3 (m)	N'	N
15	0.45	12	1	32.5	24603.949	5382.1139	0.2333	23069.498	1.4	19728.498	10270.83	140.54	0.281	0.5	0.219	25	25	24	0.11	0.22	0.33	73.0	74
60	0.7	12	1.2	30	24996.450	5467.9736	0.336	16273.731	1.68	12932.731	7492.065	140.54	0.38	0.6	0.22	18	18	18	0.11	0.22	0.33	53.3	54
60	0.65	12	1.2	30	25294.034	5533.0701	0.336	16467.471	1.68	13126.471	7551.258	140.54	0.384	0.6	0.216	19	18	17	0.11	0.22	0.33	53.7	54
60	0.6	12	1.2	30	25596.796	5599.2992	0.336	16664.581	1.68	13323.581	7691.964	140.54	0.382	0.6	0.218	19	18	18	0.11	0.22	0.33	54.7	55
60	0.65	12	1.1	30	23521.701	5145.3721	0.2823	18226.61	1.54	14885.61	8156.838	140.54	0.332	0.55	0.218	20	20	19	0.11	0.22	0.33	58.0	59
60	0.6	12	1.1	30	23822.982	5211.2775	0.2823	18460.069	1.54	15119.069	8314.857	140.54	0.33	0.55	0.22	20	20	20	0.11	0.22	0.33	59.1	60
60	0.55	12	1.1	30	24127.509	5277.8926	0.2823	18696.042	1.54	15355.042	8384.738	140.54	0.334	0.55	0.216	21	20	19	0.11	0.22	0.33	59.6	60
60	0.6	12	1	30	21755.292	4758.9702	0.2333	20398.501	1.4	17057.501	8875.682	140.54	0.282	0.5	0.218	22	21	21	0.11	0.22	0.33	63.1	64
60	0.55	12	1	30	22054.098	4824.334	0.2333	20678.671	1.4	17337.671	9021.997	140.54	0.282	0.5	0.218	22	22	21	0.11	0.22	0.33	64.2	65
60	0.5	12	1	30	22354.072	4889.9533	0.2333	20959.937	1.4	17618.937	9203.098	140.54	0.28	0.5	0.22	22	22	22	0.11	0.22	0.33	65.4	66
45	0.7	12	1.2	30	22278.818	4873.4915	0.336	14504.439	1.68	11163.439	6440.542	140.54	0.382	0.6	0.218	16	15	15	0.11	0.22	0.33	45.8	46
45	0.65	12	1.2	30	22563.294	4935.7207	0.336	14689.645	1.68	11348.645	6547.965	140.54	0.382	0.6	0.218	16	16	15	0.11	0.22	0.33	46.5	47
45	0.6	12	1.2	30	22854.491	4999.4201	0.336	14879.226	1.68	11538.226	6684.214	140.54	0.38	0.6	0.22	16	16	16	0.11	0.22	0.33	47.5	48
45	0.65	12	1.1	30	21238.329	4645.8846	0.2823	16457.26	1.54	13116.26	7213.396	140.54	0.33	0.55	0.22	18	18	18	0.11	0.22	0.33	51.3	54
45	0.6	12	1.1	30	21527.388	4709.1161	0.2823	16681.247	1.54	13340.247	7306.469	140.54	0.332	0.55	0.218	18	17	17	0.11	0.22	0.33	51.9	52
45	0.55	12	1.1	30	21822.31	4773.6303	0.2823	16909.778	1.54	13568.778	7462.261	140.54	0.33	0.55	0.22	18	18	18	0.11	0.22	0.33	53.1	54
45	0.6	12	1	30	19950.518	4364.1759	0.2333	18706.283	1.4	15365.283	7957.16	140.54	0.284	0.5	0.216	20	19	18	0.11	0.22	0.33	56.6	57
45	0.55	12	1	30	20239.559	4427.4036	0.2333	18977.298	1.4	15636.298	8132.949	140.54	0.282	0.5	0.218	20	19	19	0.11	0.22	0.33	57.8	58
45	0.5	12	1	30	20533.683	4491.7433	0.2333	19253.079	1.4	15912.079	8311.536	140.54	0.28	0.5	0.22	20	20	20	0.11	0.22	0.33	59.1	60
30	0.7	12	1.2	30	21651.320	4736.2264	0.336	14095.912	1.68	10754.912	6230.432	140.54	0.38	0.6	0.22	15	15	15	0.11	0.22	0.33	44.3	45
30	0.65	12	1.2	30	21942.487	4799.9192	0.336	14285.474	1.68	10944.474	6287.251	140.54	0.385	0.6	0.215	16	15	14	0.11	0.22	0.33	44.7	45
30	0.6	12	1.2	30	22238.759	4864.7287	0.336	14478.359	1.68	11137.359	6425.496	140.54	0.382	0.6	0.218	16	15	15	0.11	0.22	0.33	45.7	46
30	0.65	12	1.1	30	20757.691	4540.7451	0.2823	16084.821	1.54	12743.821	6978.66	140.54	0.332	0.55	0.218	17	17	16	0.11	0.22	0.33	49.6	50
30	0.6	12	1.1	30	21057.829	4606.4003	0.2823	16317.394	1.54	12976.394	7136.475	140.54	0.33	0.55	0.22	17	17	17	0.11	0.22	0.33	50.7	51
30	0.55	12	1.1	30	21363.876	4673.348	0.2823	16554.545	1.54	13213.545	7237.074	140.54	0.332	0.55	0.218	18	17	17	0.11	0.22	0.33	51.4	52
30	0.6	12	1	30	19682.198	4305.4808	0.2333	18454.697	1.4	15113.697	7859.941	140.54	0.282	0.5	0.218	19	19	18	0.11	0.22	0.33	55.9	56
30	0.55	12	1	30	19987.504	4372.2666	0.2333	18740.963	1.4	15399.963	7975.119	140.54	0.284	0.5	0.216	20	19	18	0.11	0.22	0.33	56.7	57
30	0.5	12	1	30	20297.995	4440.1864	0.2333	19032.089	1.4	15691.089	8162.033	140.54	0.282	0.5	0.218	20	20	19	0.11	0.22	0.33	58.0	59

θ (°)	R (m)	B (m)	d (m)	L (m)	Toplam Moment (kNm)	1.40 m'ye Gelen Moment (kNm)	S_{bb} (m ³)	f_b (kN/m ²)	A_b (m ²)	δ_g (kN/m ²)	P_{se} (kN)	P_{se1} (kN)	e_p (m)	Y_{bb} (m)	x (m)	n_1	n_2	n_3	d_1 (m)	d_2 (m)	d_3 (m)	N'	N
15	0.7	12	1.2	30	21467.280	4695.9677	0.336	13976.094	1.68	10635.094	6134.578	140.54	0.383	0.6	0.218	15	15	14	0.11	0.22	0.33	43.6	44
15	0.65	12	1.2	30	21763.58	4760.7831	0.336	14168.997	1.68	10827.997	6272.771	140.54	0.38	0.6	0.22	15	15	15	0.11	0.22	0.33	44.6	45
15	0.6	12	1.2	30	22065.051	4826.7301	0.336	14365.268	1.68	11024.268	6360.25	140.54	0.382	0.6	0.218	16	15	15	0.11	0.22	0.33	45.2	46
15	0.65	12	1.1	30	20616.146	4509.7821	0.2823	15975.14	1.54	12634.14	6918.597	140.54	0.332	0.55	0.218	17	17	16	0.11	0.22	0.33	49.2	50
15	0.6	12	1.1	30	20923.806	4577.0827	0.2823	16213.541	1.54	12872.541	7079.36	140.54	0.33	0.55	0.22	17	17	17	0.11	0.22	0.33	50.3	51
15	0.55	12	1.1	30	21237.317	4645.6632	0.2823	16456.476	1.54	13115.476	7183.361	140.54	0.332	0.55	0.218	18	17	17	0.11	0.22	0.33	51.1	52
15	0.6	12	1	30	19639.18	4296.0706	0.2333	18414.362	1.4	15073.362	7838.964	140.54	0.282	0.5	0.218	19	19	18	0.11	0.22	0.33	55.7	56
15	0.55	12	1	30	19954.751	4365.1019	0.2333	18710.252	1.4	15369.252	7959.216	140.54	0.284	0.5	0.216	20	19	18	0.11	0.22	0.33	56.6	57
15	0.5	12	1	30	20275.455	4435.2558	0.2333	19010.955	1.4	15669.955	8150.456	140.54	0.282	0.5	0.218	20	19	19	0.11	0.22	0.33	57.9	58
60	0.65	12	1.1	27.5	20306.352	4442.0147	0.2823	15735.086	1.54	12394.086	6786.55	140.54	0.332	0.55	0.218	17	16	16	0.11	0.22	0.33	48.2	49
60	0.6	12	1.1	27.5	20564.484	4498.4809	0.2823	15935.108	1.54	12594.108	6896.675	140.54	0.332	0.55	0.218	17	17	16	0.11	0.22	0.33	49.0	50
60	0.55	12	1.1	27.5	20826.045	4555.6974	0.2823	16137.788	1.54	12796.788	7007.665	140.54	0.332	0.55	0.218	17	17	16	0.11	0.22	0.33	49.8	50
60	0.6	12	1	27.5	18945.370	4144.2998	0.2333	17763.822	1.4	14422.822	7533.635	140.54	0.28	0.5	0.22	18	18	18	0.11	0.22	0.33	53.6	54
60	0.55	12	1	27.5	19205.603	4201.2257	0.2333	18007.825	1.4	14666.825	7626.936	140.54	0.282	0.5	0.218	19	18	18	0.11	0.22	0.33	54.2	55
60	0.5	12	1	27.5	19467.062	4258.4199	0.2333	18252.978	1.4	14911.978	7755.036	140.54	0.282	0.5	0.218	19	19	18	0.11	0.22	0.33	55.1	56
60	0.55	12	0.9	27.5	17771.917	3887.6069	0.189	20569.349	1.26	17228.349	8528.366	140.54	0.232	0.45	0.218	21	20	20	0.11	0.22	0.33	60.6	61
60	0.5	12	0.9	27.5	18046.305	3947.6293	0.189	20886.927	1.26	17545.927	8726.79	140.54	0.23	0.45	0.22	21	21	21	0.11	0.22	0.33	62.0	63
60	0.45	12	0.9	27.5	18318.456	4007.1624	0.189	21201.917	1.26	17860.917	8802.564	140.54	0.233	0.45	0.217	22	21	20	0.11	0.22	0.33	62.6	63
45	0.65	12	1.1	27.5	17720.311	3876.3182	0.2823	13731.201	1.54	10390.201	5684.466	140.54	0.333	0.55	0.217	14	14	13	0.11	0.22	0.33	40.4	41
45	0.6	12	1.1	27.5	17957.103	3928.1165	0.2823	13914.688	1.54	10573.688	5815.087	140.54	0.33	0.55	0.22	14	14	14	0.11	0.22	0.33	41.3	42
45	0.55	12	1.1	27.5	18199.979	3981.2455	0.2823	14102.889	1.54	10761.889	5858.803	140.54	0.335	0.55	0.215	15	14	13	0.11	0.22	0.33	41.6	42
45	0.6	12	1	27.5	16791.005	3673.0325	0.2333	15743.817	1.4	12402.817	6444.002	140.54	0.282	0.5	0.218	16	15	15	0.11	0.22	0.33	45.8	46
45	0.55	12	1	27.5	17029.882	3725.2868	0.2333	15967.796	1.4	12626.796	6561.116	140.54	0.282	0.5	0.218	16	16	15	0.11	0.22	0.33	46.6	47
45	0.5	12	1	27.5	17274.053	3778.6992	0.2333	16196.739	1.4	12855.739	6715.083	140.54	0.28	0.5	0.22	16	16	16	0.11	0.22	0.33	47.7	48
45	0.55	12	0.9	27.5	15931.090	3484.926	0.189	18438.762	1.26	15097.762	7509.15	140.54	0.23	0.45	0.22	18	18	18	0.11	0.22	0.33	53.4	54
45	0.5	12	0.9	27.5	16171.544	3537.5253	0.189	18717.065	1.26	15376.065	7607.529	140.54	0.232	0.45	0.218	19	18	18	0.11	0.22	0.33	54.1	55
45	0.45	12	0.9	27.5	16417.769	3591.387	0.189	19002.048	1.26	15661.048	7749.253	140.54	0.232	0.45	0.218	19	19	18	0.11	0.22	0.33	55.1	56
30	0.65	12	1.1	27.5	17147.082	3750.9242	0.2823	13287.015	1.54	9946.0146	5469.893	140.54	0.33	0.55	0.22	13	13	13	0.11	0.22	0.33	38.9	39

θ (°)	R (m)	B (m)	d (m)	L (m)	Toplam Moment (kNm)	1.40 m'ye Gelen Moment (kNm)	S_{bb} (m ³)	f_b (kN/m ²)	A_b (m ²)	δ_g (kN/m ²)	P_{se} (kN)	P_{se1} (kN)	e_p (m)	Y_{bb} (m)	x (m)	n_1	n_2	n_3	d_1 (m)	d_2 (m)	d_3 (m)	N'	N
30	0.6	12	1.1	27.5	17391.040	3804.2902	0.2823	13476.054	1.54	10135.054	5544.155	140.54	0.333	0.55	0.217	14	13	13	0.11	0.22	0.33	39.4	40
30	0.55	12	1.1	27.5	17639.579	3858.6579	0.2823	13668.643	1.54	10327.643	5650.24	140.54	0.333	0.55	0.217	14	14	13	0.11	0.22	0.33	40.2	41
30	0.6	12	1	27.5	16366.928	3580.2656	0.2333	15346.188	1.4	12005.188	6270.805	140.54	0.28	0.5	0.22	15	15	15	0.11	0.22	0.33	44.6	45
30	0.55	12	1	27.5	16617.753	3635.1335	0.2333	15581.369	1.4	12240.369	6359.601	140.54	0.282	0.5	0.218	16	15	15	0.11	0.22	0.33	45.2	46
30	0.5	12	1	27.5	16873.914	3691.1689	0.2333	15821.555	1.4	12480.555	6485.127	140.54	0.282	0.5	0.218	16	16	15	0.11	0.22	0.33	46.1	47
30	0.55	12	0.9	27.5	15565.214	3404.8907	0.189	18015.294	1.26	14674.294	7258.126	140.54	0.232	0.45	0.218	18	17	17	0.11	0.22	0.33	51.6	52
30	0.5	12	0.9	27.5	15817.479	3460.0736	0.189	18307.268	1.26	14966.268	7403.314	140.54	0.232	0.45	0.218	18	18	17	0.11	0.22	0.33	52.6	53
30	0.45	12	0.9	27.5	16076.041	3516.6341	0.189	18606.53	1.26	15265.53	7512.054	140.54	0.234	0.45	0.216	19	18	17	0.11	0.22	0.33	53.4	54
15	0.65	12	1.1	27.5	16984.206	3715.2952	0.2823	13160.805	1.54	9819.8046	5400.483	140.54	0.33	0.55	0.22	13	13	13	0.11	0.22	0.33	38.4	39
15	0.6	12	1.1	27.5	17233.650	3769.861	0.2823	13354.095	1.54	10013.095	5446.925	140.54	0.336	0.55	0.214	14	13	12	0.11	0.22	0.33	38.7	39
15	0.55	12	1.1	27.5	17487.732	3825.4415	0.2823	13550.979	1.54	10209.979	5585.141	140.54	0.333	0.55	0.217	14	13	13	0.11	0.22	0.33	39.7	40
15	0.6	12	1	27.5	16259.859	3556.8443	0.2333	15245.797	1.4	11904.797	6218.367	140.54	0.28	0.5	0.22	15	15	15	0.11	0.22	0.33	44.2	45
15	0.55	12	1	27.5	16519.213	3613.578	0.2333	15488.975	1.4	12147.975	6276.685	140.54	0.285	0.5	0.215	16	15	14	0.11	0.22	0.33	44.6	45
15	0.5	12	1	27.5	16783.777	3671.4512	0.2333	15737.039	1.4	12396.039	6440.481	140.54	0.282	0.5	0.218	16	15	15	0.11	0.22	0.33	45.8	46
15	0.55	12	0.9	27.5	15466.648	3383.3293	0.189	17901.213	1.26	14560.213	7201.7	140.54	0.232	0.45	0.218	18	17	17	0.11	0.22	0.33	51.2	52
15	0.5	12	0.9	27.5	15729.134	3440.7481	0.189	18205.016	1.26	14864.016	7352.733	140.54	0.232	0.45	0.218	18	18	17	0.11	0.22	0.33	52.3	53
15	0.45	12	0.9	27.5	15997.518	3499.4572	0.189	18515.647	1.26	15174.647	7547.39	140.54	0.23	0.45	0.22	18	18	18	0.11	0.22	0.33	53.7	54
60	0.6	12	1	25	16277.144	3560.6254	0.2333	15262.004	1.4	11921.004	6226.832	140.54	0.28	0.5	0.22	15	15	15	0.11	0.22	0.33	44.3	45
60	0.55	12	1	25	16513.867	3612.4085	0.2333	15483.962	1.4	12142.962	6274.095	140.54	0.285	0.5	0.215	16	15	14	0.11	0.22	0.33	44.6	45
60	0.5	12	1	25	16749.548	3663.9638	0.2333	15704.945	1.4	12363.945	6423.806	140.54	0.282	0.5	0.218	16	15	15	0.11	0.22	0.33	45.7	46
60	0.55	12	0.9	25	15332.275	3353.9353	0.189	17745.689	1.26	14404.689	7164.438	140.54	0.23	0.45	0.22	17	17	17	0.11	0.22	0.33	50.9	51
60	0.5	12	0.9	25	15577.964	3407.6798	0.189	18030.052	1.26	14689.052	7265.425	140.54	0.232	0.45	0.218	18	17	17	0.11	0.22	0.33	51.7	52
60	0.45	12	0.9	25	15820.671	3460.7718	0.189	18310.962	1.26	14969.962	7405.141	140.54	0.232	0.45	0.218	18	18	17	0.11	0.22	0.33	52.6	53
60	0.5	12	0.8	25	13734.161	3004.3479	0.1493	20122.893	1.12	16781.893	7997.153	140.54	0.18	0.4	0.22	19	19	19	0.11	0.22	0.33	56.9	57
60	0.45	12	0.8	25	13940.489	3049.482	0.1493	20425.198	1.12	17084.198	8092.226	140.54	0.182	0.4	0.218	20	19	19	0.11	0.22	0.33	57.5	58
60	0.4	12	0.8	25	14139.511	3093.0181	0.1493	20716.799	1.12	17375.799	8231.188	140.54	0.182	0.4	0.218	20	20	19	0.11	0.22	0.33	58.5	59
45	0.6	12	1	25	14025.388	3068.0536	0.2333	13150.68	1.4	9809.68	5090.12	140.54	0.283	0.5	0.217	13	12	12	0.11	0.22	0.33	36.2	37
45	0.55	12	1	25	14223.142	3111.3125	0.2333	13336.102	1.4	9995.1016	5186.333	140.54	0.283	0.5	0.217	13	12	12	0.11	0.22	0.33	36.9	37

θ (°)	R (m)	B (m)	d (m)	L (m)	Toplam Moment (kNm)	1.40 m'ye Gelen Moment (kNm)	S_{bb} (m ³)	f_b (kN/m ²)	A_b (m ²)	δ_g (kN/m ²)	P_{se} (kN)	P_{se1} (kN)	e_p (m)	Y_{bb} (m)	x (m)	n_1	n_2	n_3	d_1 (m)	d_2 (m)	d_3 (m)	N'	N
45	0.5	12	1	25	14425.137	3155.4987	0.2333	13525.498	1.4	10184.498	5285.528	140.54	0.283	0.5	0.217	13	13	12	0.11	0.22	0.33	37.6	38
45	0.55	12	0.9	25	13347.521	2919.7704	0.189	15448.52	1.26	12107.52	5981.63	140.54	0.233	0.45	0.217	15	14	14	0.11	0.22	0.33	42.5	43
45	0.5	12	0.9	25	13543.730	2962.691	0.189	15675.614	1.26	12334.614	6094.75	140.54	0.233	0.45	0.218	15	15	14	0.11	0.22	0.33	43.3	44
45	0.45	12	0.9	25	13745.389	3006.8039	0.189	15909.015	1.26	12568.015	6250.934	140.54	0.23	0.45	0.22	15	15	15	0.11	0.22	0.33	44.4	45
45	0.5	12	0.8	25	13317.072	2913.1096	0.1493	19511.786	1.12	16170.786	7657.06	140.54	0.182	0.4	0.218	19	18	18	0.11	0.22	0.33	54.4	55
45	0.45	12	0.8	25	13525.006	2958.5951	0.1493	19816.444	1.12	16475.444	7802.203	140.54	0.182	0.4	0.218	19	19	18	0.11	0.22	0.33	55.5	56
45	0.4	12	0.8	25	13731.223	3003.7051	0.1493	20118.587	1.12	16777.587	7995.101	140.54	0.18	0.4	0.22	19	19	19	0.11	0.22	0.33	56.8	57
30	0.6	12	1	25	13524.758	2958.5409	0.2333	12681.272	1.4	9340.2724	4844.719	140.54	0.283	0.5	0.217	12	12	11	0.11	0.22	0.33	34.4	35
30	0.55	12	1	25	13929.034	3046.9763	0.2333	13060.336	1.4	9719.3356	5008.285	140.54	0.286	0.5	0.214	13	12	11	0.11	0.22	0.33	35.6	36
30	0.5	12	1	25	13937.951	3048.9268	0.2333	13068.696	1.4	9727.6962	5012.593	140.54	0.286	0.5	0.214	13	12	11	0.11	0.22	0.33	35.6	36
30	0.55	12	0.9	25	12907.793	2823.5799	0.189	14939.576	1.26	11598.576	5768.766	140.54	0.23	0.45	0.22	14	14	14	0.11	0.22	0.33	41.0	42
30	0.5	12	0.9	25	13111.827	2868.2124	0.189	15175.727	1.26	11834.727	5886.219	140.54	0.23	0.45	0.22	14	14	14	0.11	0.22	0.33	41.8	42
30	0.45	12	0.9	25	13321.753	2914.1335	0.189	15418.696	1.26	12077.696	5966.896	140.54	0.233	0.45	0.217	15	14	14	0.11	0.22	0.33	42.4	43
30	0.5	12	0.8	25	13475.344	2947.7315	0.1493	19743.681	1.12	16402.681	7767.745	140.54	0.182	0.4	0.218	19	19	18	0.11	0.22	0.33	55.2	56
30	0.45	12	0.8	25	13703.838	2997.7147	0.1493	20078.464	1.12	16737.464	7975.981	140.54	0.18	0.4	0.22	19	19	19	0.11	0.22	0.33	56.7	57
30	0.4	12	0.8	25	13931.185	3047.4468	0.1493	20411.566	1.12	17070.566	8085.769	140.54	0.182	0.4	0.218	20	19	19	0.11	0.22	0.33	57.5	58
15	0.6	12	1	25	13375.141	2925.8122	0.2333	12540.987	1.4	9199.9866	4770.974	140.54	0.283	0.5	0.217	12	11	11	0.11	0.22	0.33	33.9	34
15	0.55	12	1	25	13585.868	2971.9087	0.2333	12738.571	1.4	9397.5714	4874.44	140.54	0.283	0.5	0.217	12	12	11	0.11	0.22	0.33	34.6	35
15	0.5	12	1	25	13801.158	3019.0035	0.2333	12940.435	1.4	9599.4349	5014.181	140.54	0.28	0.5	0.22	12	12	12	0.11	0.22	0.33	35.6	36
15	0.55	12	0.9	25	12771.844	2793.8409	0.189	14782.227	1.26	11441.227	5650.61	140.54	0.233	0.45	0.217	14	14	13	0.11	0.22	0.33	40.2	41
15	0.5	12	0.9	25	12984.772	2840.4191	0.189	15028.672	1.26	11687.672	5813.079	140.54	0.23	0.45	0.22	14	14	14	0.11	0.22	0.33	41.3	42
15	0.45	12	0.9	25	13203.078	2888.1735	0.189	15281.341	1.26	11940.341	5857.999	140.54	0.235	0.45	0.215	15	14	13	0.11	0.22	0.33	41.6	42
15	0.5	12	0.8	25	13608.533	2976.8668	0.1493	19938.826	1.12	16597.826	7909.439	140.54	0.18	0.4	0.22	19	19	19	0.11	0.22	0.33	56.2	57
15	0.45	12	0.8	25	13849.261	3029.5259	0.1493	20291.533	1.12	16950.533	8028.914	140.54	0.182	0.4	0.218	20	19	19	0.11	0.22	0.33	57.1	58
15	0.4	12	0.8	25	14088.689	3081.9007	0.1493	20642.336	1.12	17301.336	8195.913	140.54	0.182	0.4	0.218	20	20	19	0.11	0.22	0.33	58.3	59
60	0.55	12	0.9	22.5	13207.875	2889.2228	0.189	15286.893	1.26	11945.893	5860.723	140.54	0.235	0.45	0.215	15	14	13	0.11	0.22	0.33	41.7	42
60	0.5	12	0.9	22.5	13419.451	2935.505	0.189	15531.773	1.26	12190.773	6022.76	140.54	0.233	0.45	0.217	15	14	14	0.11	0.22	0.33	42.8	43
60	0.45	12	0.9	22.5	13630.236	2981.6141	0.189	15775.736	1.26	12434.736	6144.223	140.54	0.233	0.45	0.218	15	15	14	0.11	0.22	0.33	43.7	44

θ (°)	R (m)	B (m)	d (m)	L (m)	Toplam Moment (kNm)	1.40 m'ye Gelen Moment (kNm)	S_{bb} (m ³)	f_b (kN/m ²)	A_b (m ²)	δ_g (kN/m ²)	P_{se} (kN)	P_{sel} (kN)	e_p (m)	Y_{bb} (m)	x (m)	n_1	n_2	n_3	d_1 (m)	d_2 (m)	d_3 (m)	N'	N
60	0.5	12	0.8	22.5	11701.767	2559.7616	0.1493	17145.088	1.12	13804.088	6529.351	140.54	0.182	0.4	0.218	16	16	15	0.11	0.22	0.33	46.4	47
60	0.45	12	0.8	22.5	11870.741	2596.7246	0.1493	17392.663	1.12	14051.663	6696.104	140.54	0.18	0.4	0.22	16	16	16	0.11	0.22	0.33	47.6	48
60	0.4	12	0.8	22.5	12032.863	2632.189	0.1493	17630.201	1.12	14289.201	6760.856	140.54	0.182	0.4	0.218	17	16	16	0.11	0.22	0.33	48.1	49
60	0.45	12	0.75	22.5	11005.482	2407.4493	0.1313	18335.486	1.05	14994.486	7030.147	140.54	0.155	0.37	0.22	17	17	17	0.11	0.22	0.33	50.0	51
60	0.4	12	0.75	22.5	11167.309	2442.8488	0.1313	18605.094	1.05	15264.094	7156.553	140.54	0.155	0.37	0.22	17	17	17	0.11	0.22	0.33	50.9	51
60	0.35	12	0.75	22.5	10827.254	2368.4619	0.1313	18038.552	1.05	14697.552	6836.131	140.54	0.157	0.37	0.218	17	16	16	0.11	0.22	0.33	48.6	49
45	0.55	12	0.9	22.5	10951.829	2395.7127	0.189	12675.729	1.26	9334.7286	4562.751	140.54	0.237	0.45	0.213	12	11	10	0.11	0.22	0.33	32.4	33
45	0.5	12	0.9	22.5	11105.465	2429.3205	0.189	12853.548	1.26	9512.5477	4691.299	140.54	0.233	0.45	0.217	12	11	11	0.11	0.22	0.33	33.3	34
45	0.45	12	0.9	22.5	11266.135	2464.4671	0.189	13039.508	1.26	9698.5082	4784.163	140.54	0.233	0.45	0.217	12	12	11	0.11	0.22	0.33	34.0	35
45	0.5	12	0.8	22.5	11270.192	2465.3546	0.1493	16512.757	1.12	13171.757	6276.798	140.54	0.18	0.4	0.22	15	15	15	0.11	0.22	0.33	44.6	45
45	0.45	12	0.8	22.5	11444.199	2503.4186	0.1493	16767.707	1.12	13426.707	6349.825	140.54	0.182	0.4	0.218	16	15	15	0.11	0.22	0.33	45.1	46
45	0.4	12	0.8	22.5	11615.886	2540.9752	0.1493	17019.258	1.12	13678.258	6469.833	140.54	0.182	0.4	0.218	16	16	15	0.11	0.22	0.33	46.0	47
45	0.45	12	0.75	22.5	10654.088	2330.5819	0.1313	17750.052	1.05	14409.052	6646.883	140.54	0.16	0.37	0.215	17	16	15	0.11	0.22	0.33	47.3	48
45	0.4	12	0.75	22.5	10822.466	2367.4144	0.1313	18030.575	1.05	14689.575	6832.42	140.54	0.157	0.37	0.218	17	16	16	0.11	0.22	0.33	48.6	49
45	0.35	12	0.75	22.5	10782.885	2358.7561	0.1313	17964.631	1.05	14623.631	6801.749	140.54	0.157	0.37	0.218	17	16	16	0.11	0.22	0.33	48.4	49
30	0.55	12	0.9	22.5	10358.364	2265.8923	0.189	11988.848	1.26	8647.8481	4261.374	140.54	0.234	0.45	0.216	11	10	10	0.11	0.22	0.33	30.3	31
30	0.5	12	0.9	22.5	10516.271	2300.4344	0.189	12171.61	1.26	8830.6104	4351.434	140.54	0.234	0.45	0.216	11	10	10	0.11	0.22	0.33	30.9	31
30	0.45	12	0.9	22.5	10681.345	2336.5442	0.189	12362.668	1.26	9021.6679	4446.866	140.54	0.233	0.45	0.217	11	11	10	0.11	0.22	0.33	31.6	32
30	0.5	12	0.8	22.5	11432.332	2500.8226	0.1493	16750.319	1.12	13409.319	6341.602	140.54	0.182	0.4	0.218	16	15	15	0.11	0.22	0.33	45.1	46
30	0.45	12	0.8	22.5	11623.098	2542.5529	0.1493	17029.825	1.12	13688.825	6474.831	140.54	0.182	0.4	0.218	16	16	15	0.11	0.22	0.33	46.0	47
30	0.4	12	0.8	22.5	11812.599	2584.0061	0.1493	17307.475	1.12	13966.475	6655.509	140.54	0.18	0.4	0.22	16	16	16	0.11	0.22	0.33	47.3	48
30	0.45	12	0.75	22.5	10858.560	2375.3101	0.1313	18090.709	1.05	14749.709	6860.39	140.54	0.157	0.37	0.218	17	16	16	0.11	0.22	0.33	48.8	49
30	0.4	12	0.75	22.5	11045.561	2416.2166	0.1313	18402.259	1.05	15061.259	7006.413	140.54	0.157	0.37	0.218	17	17	16	0.11	0.22	0.33	49.8	50
30	0.35	12	0.75	22.5	11006.639	2407.7023	0.1313	18337.413	1.05	14996.413	6976.247	140.54	0.157	0.37	0.218	17	17	16	0.11	0.22	0.33	49.6	50
15	0.55	12	0.9	22.5	10134.681	2216.9615	0.189	11729.955	1.26	8388.955	4172.401	140.54	0.23	0.45	0.22	10	10	10	0.11	0.22	0.33	29.6	30
15	0.5	12	0.9	22.5	10300.637	2253.2644	0.189	11922.034	1.26	8581.0339	4228.451	140.54	0.234	0.45	0.216	11	10	10	0.11	0.22	0.33	30.0	31
15	0.45	12	0.9	22.5	10472.911	2290.9495	0.189	12121.426	1.26	8780.4258	4326.704	140.54	0.234	0.45	0.216	11	10	10	0.11	0.22	0.33	30.7	31
15	0.5	12	0.8	22.5	11563.095	2529.4271	0.1493	16941.91	1.12	13600.91	6432.21	140.54	0.182	0.4	0.218	16	15	15	0.11	0.22	0.33	45.7	46

θ (°)	R (m)	B (m)	d (m)	L (m)	Toplam Moment (kNm)	1.40 m'ye Gelen Moment (kNm)	S_{bb} (m ³)	f_b (kN/m ²)	A_b (m ²)	δ_g (kN/m ²)	P_{se} (kN)	P_{sel} (kN)	e_p (m)	Y_{bb} (m)	x (m)	n_1	n_2	n_3	d_1 (m)	d_2 (m)	d_3 (m)	N'	N
15	0.45	12	0.8	22.5	11765.101	2573.616	0.1493	17237.884	1.12	13896.884	6573.243	140.54	0.182	0.4	0.218	16	16	15	0.11	0.22	0.33	46.7	47
15	0.4	12	0.8	22.5	11965.836	2617.5267	0.1493	17531.994	1.12	14190.994	6664.997	140.54	0.185	0.4	0.215	17	16	15	0.11	0.22	0.33	47.4	48
15	0.45	12	0.75	22.5	11015.738	2409.6928	0.1313	18352.572	1.05	15011.572	7038.158	140.54	0.155	0.37	0.22	17	17	17	0.11	0.22	0.33	50.0	51
15	0.4	12	0.75	22.5	11215.023	2453.2863	0.1313	18684.587	1.05	15343.587	7084.694	140.54	0.159	0.37	0.216	18	17	16	0.11	0.22	0.33	50.4	51
15	0.35	12	0.75	22.5	10782.885	2358.7561	0.1313	17964.631	1.05	14623.631	6801.749	140.54	0.157	0.37	0.218	17	16	16	0.11	0.22	0.33	48.4	49
60	0.5	12	0.8	20	10173.353	2225.421	0.1493	14905.7	1.12	11564.7	5413.51	140.54	0.186	0.4	0.214	14	13	12	0.11	0.22	0.33	38.5	39
60	0.45	12	0.8	20	10325.557	2258.7158	0.1493	15128.706	1.12	11787.706	5568.374	140.54	0.183	0.4	0.217	14	13	13	0.11	0.22	0.33	39.6	40
60	0.4	12	0.8	20	10471.031	2290.5381	0.1493	15341.85	1.12	12000.85	5670.264	140.54	0.183	0.4	0.217	14	14	13	0.11	0.22	0.33	40.3	41
60	0.45	12	0.7	20	8563.8397	1873.3399	0.1143	16389.676	0.98	13048.676	5985.228	140.54	0.133	0.35	0.217	15	14	14	0.11	0.22	0.33	42.5	43
60	0.4	12	0.7	20	8915.9353	1950.3608	0.1143	17063.524	0.98	13722.524	6235.985	140.54	0.135	0.35	0.215	16	15	14	0.11	0.22	0.33	44.3	45
60	0.35	12	0.7	20	8942.8033	1956.2382	0.1143	17114.945	0.98	13773.945	6259.352	140.54	0.135	0.35	0.215	16	15	14	0.11	0.22	0.33	44.5	45
60	0.4	12	0.65	20	8095.6456	1770.9225	0.0986	17960.674	0.91	14619.674	4600.263	140.54	0.205	0.32	0.12	11	11	11	0.06	0.12	0.18	32.7	33
60	0.35	12	0.65	20	8246.188	1803.8536	0.0986	18294.662	0.91	14953.662	4679.005	140.54	0.207	0.32	0.118	12	11	11	0.06	0.12	0.18	33.2	34
60	0.3	12	0.65	20	8386.855	1834.6245	0.0986	18606.74	0.91	15265.74	4776.654	140.54	0.207	0.32	0.118	12	11	11	0.06	0.12	0.18	33.9	34
45	0.5	12	0.8	20	9537.6954	2086.3709	0.1493	13974.353	1.12	10633.353	4970.215	140.54	0.186	0.4	0.214	13	12	11	0.11	0.22	0.33	35.3	36
45	0.45	12	0.8	20	9679.5803	2117.4082	0.1493	14182.238	1.12	10841.238	5117.663	140.54	0.183	0.4	0.217	13	12	12	0.11	0.22	0.33	36.4	37
45	0.4	12	0.8	20	9818.8305	2147.8692	0.1493	14386.264	1.12	11045.264	5215.265	140.54	0.183	0.4	0.217	13	13	12	0.11	0.22	0.33	37.1	38
45	0.45	12	0.7	20	8345.7589	1825.6348	0.1143	15972.308	0.98	12631.308	5853.882	140.54	0.13	0.35	0.22	14	14	14	0.11	0.22	0.33	41.6	42
45	0.4	12	0.7	20	8390.1065	1835.3358	0.1143	16057.181	0.98	12716.181	5893.216	140.54	0.13	0.35	0.22	14	14	14	0.11	0.22	0.33	41.9	42
45	0.35	12	0.7	20	8409.2873	1839.5316	0.1143	16093.89	0.98	12752.89	5787.315	140.54	0.135	0.35	0.215	15	14	13	0.11	0.22	0.33	41.1	42
45	0.4	12	0.65	20	7641.277	1671.5293	0.0986	16952.63	0.91	13611.63	4256.776	140.54	0.207	0.32	0.118	11	10	10	0.06	0.12	0.18	30.2	31
45	0.35	12	0.65	20	7773.3278	1700.4155	0.0986	17245.593	0.91	13904.593	4348.395	140.54	0.207	0.32	0.118	11	10	10	0.06	0.12	0.18	30.9	31
45	0.3	12	0.65	20	7901.9046	1728.5416	0.0986	17530.848	0.91	14189.848	4412.21	140.54	0.209	0.32	0.116	12	10	10	0.06	0.12	0.18	31.3	32
30	0.5	12	0.8	20	9515.4815	2081.5116	0.1493	13941.806	1.12	10600.806	5051.651	140.54	0.18	0.4	0.22	12	12	12	0.11	0.22	0.33	35.9	36
30	0.45	12	0.8	20	9668.092	2114.8951	0.1493	14165.406	1.12	10824.406	5109.718	140.54	0.183	0.4	0.217	13	12	12	0.11	0.22	0.33	36.3	37
30	0.4	12	0.8	20	9819.1008	2147.9283	0.1493	14386.66	1.12	11045.66	5215.452	140.54	0.183	0.4	0.217	13	13	12	0.11	0.22	0.33	37.1	38
30	0.45	12	0.7	20	8385.2433	1834.272	0.1143	16047.874	0.98	12706.874	5888.903	140.54	0.13	0.35	0.22	14	14	14	0.11	0.22	0.33	41.9	42
30	0.4	12	0.7	20	8435.1447	1845.1879	0.1143	16143.376	0.98	12802.376	5809.772	140.54	0.135	0.35	0.215	15	14	13	0.11	0.22	0.33	41.3	42

θ (°)	R (m)	B (m)	d (m)	L (m)	Toplam Moment (kNm)	1.40 m'ye Gelen Moment (kNm)	S_{bb} (m ³)	f_b (kN/m ²)	A_b (m ²)	δ_g (kN/m ²)	P_{se} (kN)	P_{se1} (kN)	e_p (m)	Y_{bb} (m)	x (m)	n_1	n_2	n_3	d_1 (m)	d_2 (m)	d_3 (m)	N'	N
30	0.35	12	0.7	20	8461.2808	1850.9052	0.1143	16193.396	0.98	12852.396	5832.471	140.54	0.135	0.35	0.215	15	14	13	0.11	0.22	0.33	41.5	42
30	0.4	12	0.65	20	7708.7534	1686.2898	0.0986	17102.331	0.91	13761.331	4303.592	140.54	0.207	0.32	0.118	11	10	10	0.06	0.12	0.18	30.6	31
30	0.35	12	0.65	20	7852.7269	1717.784	0.0986	17421.745	0.91	14080.745	4404.328	140.54	0.207	0.32	0.118	11	11	10	0.06	0.12	0.18	31.3	32
30	0.3	12	0.65	20	7995.5973	1749.0369	0.0986	17738.711	0.91	14397.711	4530.419	140.54	0.205	0.32	0.12	11	11	11	0.06	0.12	0.18	32.2	33
15	0.5	12	0.8	20	9554.3822	2090.0211	0.1493	13998.802	1.12	10657.802	4981.643	140.54	0.186	0.4	0.214	13	12	11	0.11	0.22	0.33	35.4	36
15	0.45	12	0.8	20	9716.0901	2125.3947	0.1493	14235.731	1.12	10894.731	5142.915	140.54	0.183	0.4	0.217	13	12	12	0.11	0.22	0.33	36.5	37
15	0.4	12	0.8	20	9876.2145	2160.4219	0.1493	14470.341	1.12	11129.341	5254.964	140.54	0.183	0.4	0.217	13	13	12	0.11	0.22	0.33	37.3	38
15	0.45	12	0.7	20	8457.9434	1850.1751	0.1143	16187.009	0.98	12846.009	5829.573	140.54	0.135	0.35	0.215	15	14	13	0.11	0.22	0.33	41.4	42
15	0.4	12	0.7	20	8514.2037	1862.4821	0.1143	16294.681	0.98	12953.681	5941.655	140.54	0.133	0.35	0.217	15	14	14	0.11	0.22	0.33	42.2	43
15	0.35	12	0.7	20	8546.4218	1869.5298	0.1143	16356.341	0.98	13015.341	5969.938	140.54	0.133	0.35	0.217	15	14	14	0.11	0.22	0.33	42.4	43
15	0.4	12	0.65	20	7797.6225	1705.7299	0.0986	17299.492	0.91	13958.492	4366.088	140.54	0.207	0.32	0.118	11	11	10	0.06	0.12	0.18	31.0	32
15	0.35	12	0.65	20	7952.6872	1739.6503	0.0986	17643.512	0.91	14302.512	4500.464	140.54	0.205	0.32	0.12	11	11	11	0.06	0.12	0.18	32.0	33
15	0.3	12	0.65	20	8106.5705	1773.3123	0.0986	17984.912	0.91	14643.912	4607.889	140.54	0.205	0.32	0.12	11	11	11	0.06	0.12	0.18	32.7	33
60	0.45	12	0.7	17.5	7373.2379	1612.8958	0.1143	14111.074	0.98	10770.074	4991.308	140.54	0.13	0.35	0.22	12	12	12	0.11	0.22	0.33	35.5	36
60	0.4	12	0.7	17.5	7484.9034	1637.3226	0.1143	14324.782	0.98	10983.782	4967.269	140.54	0.136	0.35	0.214	13	12	11	0.11	0.22	0.33	35.3	36
60	0.35	12	0.7	17.5	7593.801	1661.144	0.1143	14533.193	0.98	11192.193	5125.156	140.54	0.133	0.35	0.217	13	12	12	0.11	0.22	0.33	36.4	37
60	0.4	12	0.6	17.5	6264.902	1370.4473	0.084	16314.849	0.84	12973.849	3862.594	140.54	0.182	0.3	0.118	10	9	9	0.06	0.12	0.18	27.4	28
60	0.35	12	0.6	17.5	6367.0857	1392.8	0.084	16580.952	0.84	13239.952	3942.851	140.54	0.182	0.3	0.118	10	10	9	0.06	0.12	0.18	28.0	29
60	0.3	12	0.6	17.5	6619.8053	1448.0824	0.084	17239.076	0.84	13898.076	4169.423	140.54	0.18	0.3	0.12	10	10	10	0.06	0.12	0.18	29.6	30
60	0.35	12	0.55	17.5	5938.8804	1299.1301	0.0706	18401.276	0.77	15060.276	4276.564	140.54	0.157	0.27	0.118	11	10	10	0.06	0.12	0.18	30.4	31
60	0.3	12	0.55	17.5	6060.3908	1325.7105	0.0706	18777.769	0.77	15436.769	4384.54	140.54	0.157	0.27	0.118	11	11	10	0.06	0.12	0.18	31.2	32
60	0.25	12	0.55	17.5	6158.392	1347.1483	0.0706	19081.42	0.77	15740.42	4504.768	140.54	0.155	0.27	0.12	11	11	11	0.06	0.12	0.18	32.0	33
45	0.45	12	0.7	17.5	6563.7354	1435.8171	0.1143	12561.83	0.98	9220.8296	4149.929	140.54	0.137	0.35	0.213	11	10	9	0.11	0.22	0.33	29.5	30
45	0.4	12	0.7	17.5	6657.6603	1456.3632	0.1143	12741.585	0.98	9400.5852	4294.837	140.54	0.134	0.35	0.216	11	10	10	0.11	0.22	0.33	30.5	31
45	0.35	12	0.7	17.5	6753.0287	1477.225	0.1143	12924.103	0.98	9583.1035	4380.166	140.54	0.133	0.35	0.217	11	11	10	0.11	0.22	0.33	31.1	32
45	0.4	12	0.6	17.5	5622.7542	1229.9775	0.084	14642.589	0.84	11301.589	3330.995	140.54	0.185	0.3	0.115	9	8	7	0.06	0.12	0.18	23.7	24
45	0.35	12	0.6	17.5	5699.3687	1246.7369	0.084	14842.106	0.84	11501.106	3421.009	140.54	0.182	0.3	0.118	9	8	8	0.06	0.12	0.18	24.3	25
45	0.3	12	0.6	17.5	5892.9556	1289.084	0.084	15346.239	0.84	12005.239	3572.131	140.54	0.182	0.3	0.118	9	9	8	0.06	0.12	0.18	25.4	26

θ (°)	R (m)	B (m)	d (m)	L (m)	Toplam Moment (kNm)	1.40 m'ye Gelen Moment (kNm)	S_{bb} (m ³)	f_b (kN/m ²)	A_b (m ²)	δ_g (kN/m ²)	P_{se} (kN)	P_{se1} (kN)	e_p (m)	Y_{bb} (m)	x (m)	n_1	n_2	n_3	d_1 (m)	d_2 (m)	d_3 (m)	N'	N
45	0.35	12	0.55	17.5	5324.5577	1164.747	0.0706	16497.833	0.77	13156.833	3765.368	140.54	0.155	0.27	0.12	9	9	9	0.06	0.12	0.18	26.7	27
45	0.3	12	0.55	17.5	5413.7493	1184.2577	0.0706	16774.188	0.77	13433.188	3811.352	140.54	0.157	0.27	0.118	10	9	9	0.06	0.12	0.18	27.1	28
45	0.25	12	0.55	17.5	5492.9129	1201.5747	0.0706	17019.472	0.77	13678.472	3880.945	140.54	0.157	0.27	0.118	10	9	9	0.06	0.12	0.18	27.6	28
30	0.45	12	0.7	17.5	6511.2188	1424.3291	0.1143	12461.322	0.98	9120.3221	4104.695	140.54	0.137	0.35	0.213	11	10	9	0.11	0.22	0.33	29.2	30
30	0.4	12	0.7	17.5	6619.4853	1448.0124	0.1143	12668.525	0.98	9327.525	4197.948	140.54	0.137	0.35	0.213	11	10	9	0.11	0.22	0.33	29.8	30
30	0.35	12	0.7	17.5	6730.142	1472.2186	0.1143	12880.302	0.98	9539.3024	4360.146	140.54	0.133	0.35	0.217	11	11	10	0.11	0.22	0.33	31.0	32
30	0.4	12	0.6	17.5	5664.7447	1239.1629	0.084	14751.939	0.84	11410.939	3394.189	140.54	0.182	0.3	0.118	9	8	8	0.06	0.12	0.18	24.1	25
30	0.35	12	0.6	17.5	5756.8613	1259.3134	0.084	14991.826	0.84	11650.826	3465.543	140.54	0.182	0.3	0.118	9	8	8	0.06	0.12	0.18	24.6	25
30	0.3	12	0.6	17.5	5921.8246	1295.3991	0.084	15421.418	0.84	12080.418	3594.5	140.54	0.182	0.3	0.118	9	9	8	0.06	0.12	0.18	25.5	26
30	0.35	12	0.55	17.5	5363.3011	1173.2221	0.0706	16617.877	0.77	13276.877	3732.478	140.54	0.159	0.27	0.116	10	9	8	0.06	0.12	0.18	26.5	27
30	0.3	12	0.55	17.5	5470.9508	1196.7705	0.0706	16951.423	0.77	13610.423	3861.638	140.54	0.157	0.27	0.118	10	9	9	0.06	0.12	0.18	27.4	28
30	0.25	12	0.55	17.5	5570.8259	1218.6182	0.0706	17260.881	0.77	13919.881	3950.612	140.54	0.157	0.27	0.118	10	10	9	0.06	0.12	0.18	28.1	29
15	0.45	12	0.7	17.5	6577.9682	1438.9305	0.1143	12589.069	0.98	9248.0686	4225.157	140.54	0.134	0.35	0.216	11	10	10	0.11	0.22	0.33	30.0	31
15	0.4	12	0.7	17.5	6694.7337	1464.473	0.1143	12812.537	0.98	9471.5372	4327.253	140.54	0.134	0.35	0.216	11	10	10	0.11	0.22	0.33	30.7	31
15	0.35	12	0.7	17.5	6814.055	1490.5745	0.1143	13040.897	0.98	9699.897	4433.549	140.54	0.133	0.35	0.217	11	11	10	0.11	0.22	0.33	31.5	32
15	0.4	12	0.6	17.5	5764.057	1260.8875	0.084	15010.565	0.84	11669.565	3471.117	140.54	0.182	0.3	0.118	9	8	8	0.06	0.12	0.18	24.7	25
15	0.35	12	0.6	17.5	5865.1573	1283.0032	0.084	15273.847	0.84	11932.847	3550.591	140.54	0.182	0.3	0.118	9	9	8	0.06	0.12	0.18	25.2	26
15	0.3	12	0.6	17.5	6013.8251	1315.5242	0.084	15661.003	0.84	12320.003	3696.001	140.54	0.18	0.3	0.12	9	9	9	0.06	0.12	0.18	26.3	27
15	0.35	12	0.55	17.5	5456.4892	1193.607	0.0706	16906.615	0.77	13565.615	3848.925	140.54	0.157	0.27	0.118	10	9	9	0.06	0.12	0.18	27.3	28
15	0.3	12	0.55	17.5	5574.3268	1219.384	0.0706	17271.728	0.77	13930.728	3953.691	140.54	0.157	0.27	0.118	10	10	9	0.06	0.12	0.18	28.1	29
15	0.25	12	0.55	17.5	5686.8364	1243.9955	0.0706	17620.332	0.77	14279.332	4052.629	140.54	0.157	0.27	0.118	10	10	9	0.06	0.12	0.18	28.8	29
60	0.4	12	0.6	15	5160.6951	1128.9021	0.084	13439.31	0.84	10098.31	3000.27	140.54	0.183	0.3	0.117	8	7	7	0.06	0.12	0.18	21.3	22
60	0.35	12	0.6	15	5192.2968	1135.8149	0.084	13521.606	0.84	10180.606	3024.72	140.54	0.183	0.3	0.117	8	7	7	0.06	0.12	0.18	21.5	22
60	0.3	12	0.6	15	5220.5708	1141.9999	0.084	13595.236	0.84	10254.236	3046.596	140.54	0.183	0.3	0.117	8	7	7	0.06	0.12	0.18	21.6	22
60	0.35	12	0.55	15	4667.2261	1020.9557	0.0706	14461.129	0.77	11120.129	3149.18	140.54	0.158	0.27	0.117	8	8	7	0.06	0.12	0.18	22.4	23
60	0.3	12	0.55	15	4772.4138	1043.9655	0.0706	14787.047	0.77	11446.047	3275.757	140.54	0.155	0.27	0.12	8	8	8	0.06	0.12	0.18	23.3	24
60	0.25	12	0.55	15	4871.9074	1065.7297	0.0706	15095.322	0.77	11754.322	3363.982	140.54	0.155	0.27	0.12	8	8	8	0.06	0.12	0.18	23.9	24
60	0.3	12	0.5	15	4338.8663	949.127	0.0583	16280.052	0.7	12939.052	3497.435	140.54	0.132	0.25	0.118	9	8	8	0.06	0.12	0.18	24.8	25

θ (°)	R (m)	B (m)	d (m)	L (m)	Toplam Moment (kNm)	1.40 m'ye Gelen Moment (kNm)	S_{bb} (m ³)	f_b (kN/m ²)	A_b (m ²)	δ_g (kN/m ²)	P_{se} (kN)	P_{se1} (kN)	e_p (m)	Y_{bb} (m)	x (m)	n_1	n_2	n_3	d_1 (m)	d_2 (m)	d_3 (m)	N'	N
60	0.25	12	0.5	15	4438.6169	970.94745	0.0583	16654.33	0.7	13313.33	3600.143	140.54	0.132	0.25	0.118	9	9	8	0.06	0.12	0.18	25.6	26
60	0.2	12	0.5	15	4534.2643	991.87032	0.0583	17013.213	0.7	13672.213	3737.194	140.54	0.13	0.25	0.12	9	9	9	0.06	0.12	0.18	26.5	27
45	0.4	12	0.6	15	4630.7639	1012.9796	0.084	12059.281	0.84	8718.281	2586.315	140.54	0.183	0.3	0.117	7	6	6	0.06	0.12	0.18	18.4	19
45	0.35	12	0.6	15	4643.8872	1015.8503	0.084	12093.456	0.84	8752.4563	2596.454	140.54	0.183	0.3	0.117	7	6	6	0.06	0.12	0.18	18.4	19
45	0.3	12	0.6	15	4637.1419	1014.3748	0.084	12075.89	0.84	8734.8904	2591.243	140.54	0.183	0.3	0.117	7	6	6	0.06	0.12	0.18	18.4	19
45	0.35	12	0.55	15	4167.5779	911.65767	0.0706	12912.998	0.77	9571.9981	2706.507	140.54	0.158	0.27	0.117	7	7	6	0.06	0.12	0.18	19.2	20
45	0.3	12	0.55	15	3744.7015	819.15345	0.0706	11602.74	0.77	8261.7401	2331.085	140.54	0.159	0.27	0.116	6	6	5	0.06	0.12	0.18	16.5	17
45	0.25	12	0.55	15	4322.4052	945.52614	0.0706	13392.721	0.77	10051.721	2876.713	140.54	0.155	0.27	0.12	7	7	7	0.06	0.12	0.18	20.4	21
45	0.3	12	0.5	15	3869.4823	846.44925	0.0583	14518.855	0.7	11177.855	3016.805	140.54	0.133	0.25	0.117	8	7	7	0.06	0.12	0.18	21.4	22
45	0.25	12	0.5	15	3941.9815	862.30845	0.0583	14790.883	0.7	11449.883	3091.92	140.54	0.133	0.25	0.117	8	8	7	0.06	0.12	0.18	22	23
45	0.2	12	0.5	15	4015.731	878.44116	0.0583	15067.601	0.7	11726.601	3166.645	140.54	0.133	0.25	0.117	8	8	7	0.06	0.12	0.18	22.5	23
30	0.4	12	0.6	15	4599.3311	1006.1037	0.084	11977.425	0.84	8636.4247	2562.032	140.54	0.183	0.3	0.117	7	6	6	0.06	0.12	0.18	18.2	19
30	0.35	12	0.6	15	4614.9406	1009.5183	0.084	12018.074	0.84	8677.0745	2574.091	140.54	0.183	0.3	0.117	7	6	6	0.06	0.12	0.18	18.3	19
30	0.3	12	0.6	15	4598.2017	1005.8566	0.084	11974.484	0.84	8633.4836	2561.16	140.54	0.183	0.3	0.117	7	6	6	0.06	0.12	0.18	18.2	19
30	0.35	12	0.55	15	4145.2486	906.77313	0.0706	12843.812	0.77	9502.8121	2686.944	140.54	0.158	0.27	0.117	7	7	6	0.06	0.12	0.18	19.1	20
30	0.3	12	0.55	15	4224.1852	924.04051	0.0706	13088.393	0.77	9747.3925	2756.1	140.54	0.158	0.27	0.117	7	7	6	0.06	0.12	0.18	19.6	20
30	0.25	12	0.55	15	4304.7841	941.67152	0.0706	13338.124	0.77	9997.1235	2861.088	140.54	0.155	0.27	0.12	7	7	7	0.06	0.12	0.18	20.3	21
30	0.3	12	0.5	15	3871.674	846.92869	0.0583	14527.079	0.7	11186.079	3019.024	140.54	0.133	0.25	0.117	8	7	7	0.06	0.12	0.18	21.4	22
30	0.25	12	0.5	15	3946.4764	863.29171	0.0583	14807.748	0.7	11466.748	3096.474	140.54	0.133	0.25	0.117	8	8	7	0.06	0.12	0.18	22.0	23
30	0.2	12	0.5	15	4023.6646	880.17663	0.0583	15097.369	0.7	11756.369	3174.683	140.54	0.133	0.25	0.117	8	8	7	0.06	0.12	0.18	22.5	23
15	0.4	12	0.6	15	4613.8143	1009.2719	0.084	12015.141	0.84	8674.1414	2573.221	140.54	0.183	0.3	0.117	7	6	6	0.06	0.12	0.18	18.3	19
15	0.35	12	0.6	15	4634.9598	1013.8975	0.084	12070.208	0.84	8729.2078	2589.557	140.54	0.183	0.3	0.117	7	6	6	0.06	0.12	0.18	18.4	19
15	0.3	12	0.6	15	4617.0131	1009.9716	0.084	12023.472	0.84	8682.4716	2575.692	140.54	0.183	0.3	0.117	7	6	6	0.06	0.12	0.18	18.3	19
15	0.35	12	0.55	15	4168.0774	911.76693	0.0706	12914.546	0.77	9573.5458	2706.944	140.54	0.158	0.27	0.117	7	7	6	0.06	0.12	0.18	19.6	20
15	0.3	12	0.55	15	4253.7271	930.5028	0.0706	13179.926	0.77	9838.9264	2815.813	140.54	0.155	0.27	0.12	7	7	7	0.06	0.12	0.18	20.0	21
15	0.25	12	0.55	15	4341.4698	949.69652	0.0706	13451.792	0.77	10110.792	2893.619	140.54	0.155	0.27	0.12	7	7	7	0.06	0.12	0.18	20.5	21
15	0.3	12	0.5	15	3911.4033	855.61947	0.0583	14676.149	0.7	11335.149	3059.257	140.54	0.133	0.25	0.117	8	7	7	0.06	0.12	0.18	21.7	22
15	0.25	12	0.5	15	3994.3068	873.75461	0.0583	14987.215	0.7	11646.215	3144.937	140.54	0.133	0.25	0.117	8	8	7	0.06	0.12	0.18	22.3	23

[illegible]

ÖZGEÇMİŞ

22 Şubat 1984'de Kayseri'de doğdu. 1995'de Şehit Üsteğmen Mustafa Şimşek İlköğretim Okulu'ndan, 1999'da Sema Yazar Anadolu Lisesi'nden, 2002'de Yozgat Şehitler Fen Lisesi'nden, 2006 yılında Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Yine 2006 yılında Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans yapmaya hak kazandı. Aynı yılın Kasım ayında, Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi kadrosunda Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaya başladı. Ekim 2007 ile Mart 2008 dönemleri arasında ERASMUS değişim programı aracılığıyla RWTH Aachen Üniversitesi'nde çalışma yaptı. Halen Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'ndeki görevini sürdürmektedir.

Sürekli Adres : Ziya Gökalp Mah. Kanlıca Cad. Meral Sk. Kurtuluş
Apt. 4/14 38080 Kocasinan/KAYSERİ

Telefon : 0532 617 72 92

İş Adresi : Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü 38039 Talas/KAYSERİ

İş Telefonu : 0352 437 49 37 / 323 85

E-posta : sbayram@erciyes.edu.tr

