

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BETON YOL KAPLAMALARIN SAYISAL TASARIMINDA BİLGİ SİSTEMLERİ  
VE YAPAY ZEKA YAKLAŞIMI**

**İnş.Yük.Müh. Erhan Burak PANCAR**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06.12.2011  
Tezin Savunma Tarihi : 16.01.2012**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. M. Vefa AKPINAR**

**Trabzon 2012**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**  
**İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında**  
**Erhan Burak PANCAR Tarafından Hazırlanan**

**BETON YOL KAPLAMALARIN SAYISAL TASARIMINDA BİLGİ SİSTEMLERİ**  
**VE YAPAY ZEKA YAKLAŞIMI**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 06 / 12 / 2011 gün ve 1432 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda

**DOKTORA TEZİ**  
olarak kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Fazıl ÇELİK** .....

**Üye : Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ** .....

**Üye : Prof. Dr. Mehmet ÇAKIROĞLU** .....

**Üye : Yrd.Doç.Dr. M. Vefa AKPINAR** .....

**Üye : Yrd.Doç.Dr.Hamdullah ÇUVALCI** .....

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**  
**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

“Beton Yol Kaplamaların Sayısal Tasarımında Bilgi Sistemleri ve Yapay Zeka Yaklaşımı” adlı Doktora tez çalışmamın her aşamasında hiçbir fedakarlıktan kaçınmayarak, akademisyenliği ile araştırmaya ışık tutan değerli hocam ve tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR’ a sonsuz şükran ve saygılarımı sunarım.

Tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Fazıl ÇELİK, Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ, Prof. Dr. Mehmet ÇAKIROĞLU ve Yrd. Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI’ ya, değerli vakitlerini harcayıp tezimi inceleme nezaketini gösterdikleri ve çalışmamı değerli fikirleri ile yönlendirdikleri için teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca bana yardımlarını esirgemeyen değerli büyüğüm İnş.Yük.Müh. Hasan KOÇ’ a, desteğini ve anlayışını benden esirgemeyen sevgili eşim Günseli Şefika PANCAR’ a ve biricik kızıma, benim bu günlere gelmemde sonsuz emeği olan canım anne ve babama minnettarlığımı sunar, bu çalışmanın ülkemizin yararına olmasını dilerim.

Erhan Burak PANCAR

Trabzon, 2012

## TEZ BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Beton Yol Kaplamaların Sayısal Tasarımında Bilgi Sistemleri ve Yapay Zeka Yaklaşımı” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR’ ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 16/01/2012

Erhan Burak PANCAR

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatür .....	3
1.3. Beton Yolların Günümüze Kadar Uzanan Tarihçesi.....	7
1.4. Beton Yolların Diğer Yapım Teknikleriyle Karşılaştırılması .....	8
1.5. Dünyada Beton Yollar .....	9
1.6. Türkiye’ de Beton Yollar.....	13
1.7. Örnek Beton Yol Yapımı.....	14
1.8. Derzli Donatısız Beton Yol .....	18
1.8.1. Temel.....	18
1.8.2. Dilatasyon Açma .....	23
1.8.3. Gerilmeler.....	23
1.8.3.1. Sıcaklık Değişimlerinden Kaynaklanan Gerilmeler.....	24
1.8.3.2. Trafik Yüklemesinden Oluşan Gerilmeler .....	31
1.8.3.3. Sürtünmeden Dolayı Oluşan Gerilme.....	38
1.8.4. Yorulma Analizi .....	39
1.8.5. Kayma Demir Tasarımı ve Enine Derzler .....	41
1.8.6. Bağlantı Demirleri ve Boyuna Derzler.....	48
1.9. Donatılı Beton Yol .....	52
1.10. Beton Yol Tasarımında Kullanılan Beton .....	55
1.11. Beton Yollarda Bozulmalara Karşı Önlemler .....	63
1.12. Bilgi İşleme ve Yapay Zeka .....	65
1.12.1. Yapay Zekanın Gelişim Süreci.....	67

1.12.2. Yapay Zekanın Amaçları.....	70
1.12.3. Yapay Zeka Uygulamaları.....	71
1.12.4. Yapay Sinir Ağları (YSA).....	71
1.12.4.1. Yapay Sinir Ağlarında Öğrenme ve Ağın Eğitilmesi.....	72
1.12.4.2. YSA Uygulamalarının Dezavantajları.....	75
1.12.5. Bulanık Mantık.....	76
1.12.6. YSA ile İlgili Yapılmış Çalışmalar .....	77
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	81
2.1. Çalışmanın Amacı .....	81
2.2. Çalışmada İzlenen Yol .....	82
2.2.1. Sayısal Çözümleme Yöntemi .....	84
2.2.2. Program Tasarımı .....	90
2.2.3. Doku Yaklaşımı ve Düzlem Yüzeysel Taşıyıcı Sistemlerin Çözümü.....	93
2.2.3.1. Plaklar İçin Uygulama.....	93
2.2.3.2. Bulunan Gerilme Değerlerinin ILLI-SLAB Değerleri ile Kontrolü.....	99
2.2.4. Bilgi Sistemlerinin Oluşturulması .....	101
2.2.5. Türkiye’deki Trafik .....	103
2.2.6. Çalışmadaki Kabuller .....	107
2.3. Yapay Zeka ile Plak Kalınlığının Tespiti .....	109
3. BULGULAR VE İRDELEME .....	116
3.1. Beton Kalınlığını Etkileyen Etmenler Üzerine Bulgular.....	116
3.2. Dingil Dönüşüm Katsayılarını Etkileyen Etmenler Üzerine Bulgular .....	122
3.3. Trafik Dağılımının Beton Kalınlığına Etkisi Üzerine Bulgular .....	125
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	128
5. KAYNAKLAR.....	130
ÖZGEÇMİŞ.....	143

Doktora Tezi

ÖZET

BETON YOL KAPLAMALARIN SAYISAL TASARIMINDA BİLGİ SİSTEMLERİ VE YAPAY  
ZEKA YAKLAŞIMI

Erhan Burak PANCAR

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Yrd.Doç. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR  
2012, 157 Sayfa

Beton yollarda, farklı ülkelerin farklı tasarımları bulunmaktadır. Bu tasarımlar, senelerin getirdiği deney ve gözlemlere dayalı abaklardan faydalanılarak oluşturulmuş olup, devam eden sayısal çözümleme çalışmaları ile optimum sonuçlara ulaşılması hedeflenmektedir. Ülkemizde bu konudaki çalışmalar eksiktir ve bu sebepten dolayı konunun detaylı olarak incelenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada sonlu farklar yönteminden yararlanılarak, 8 ton, 10 ton, 12 ton ağırlığında, çift tekerlekli tek dingille, beton plak üzerinde teorik dokusal tarama yapılmıştır. Söz konusu dingil ağırlıkları, dingil ağırlığının tekrar sayısı, beton elastisite modülü, beton kalınlığına bağlı beton plak üst ve alt yüzeyindeki sıcaklık farkları (sıcaklık gradyanı), yorulma analizleri de yapılarak ilişkilendirilmiş ve farklı değerler için ideal beton kalınlıkları tespit edilmiştir. Beton yolda, plak kalınlığının, beton sınıfının, sıcaklık gradyan değerinin değişmesi durumunda, tasarım hesaplarında dingil ağırlıklarının birbirlerine dönüşüm katsayıları değişmektedir. Çalışmada bu değerler bulunmuştur. Bu sayede, 12 ton veya 10 ton dingil ağırlığının yol güzergahından geçme sayısının, ne kadar 8 ton dingil ağırlığı geçiş sayısına karşılık geleceği belirlenebilmektedir. Bu çalışma neticesinde, beton plak kalınlığının belirlenmesinde, taşıtların hangi sıcaklık gradyanında beton plak üzerinden geçtiğinin önemli bir rol oynadığı tespit edilmiştir. Sıcaklık gradyan değerinin, plak kalınlığı arttıkça, yol güzergahından geçecek dingil tekrar sayısı üzerinde daha belirleyici olduğu ve kaplamada, C25 betonu yerine C30 betonu kullanılması durumunda plak kalınlığının 2-3 cm arasında azaldığı görülmüştür. Söz konusu tasarım hesabında geri yayımlı yapay sinir ağı kullanılmış ve C++ da yeni bir program yazılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Beton yol, Bilgi sistemleri, Yapay zeka, Sıcaklık gradyanı, Yol kalınlığı

PhD. Thesis

SUMMARY

INFORMATION SYSTEMS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPROACH IN  
NUMERICAL DESIGN STAGE OF CONCRETE ROAD PAVEMENT

Erhan Burak PANCAR

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Graduate Program  
Supervisor: Assist. Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR  
2012, 157 Pages

Different countries have different designs for concrete pavements. These designs are created with the help of many years brought abaks based on experiment and observation. It is aimed to achieve optimum results with the ongoing work of the numerical analysis. Studies in this field is missing in our country and because of that this subject needs to be investigated in detail.

In this study, theoretical textural scan is done on concrete slab by 8ton, 10ton, 12ton weight, dual wheel single axle by using finite difference method. These axle weights, number of axle weight repetitions, elastic modulus of concrete, temperature differences on upper and lower surface of concrete slab depending on the thickness of the concrete (temperature gradient) associated by fatigue analysis and ideal concrete thickness for different values have been identified. Conversion coefficients of axle weights change in case of change in plate thickness, concrete type, temperature gradient value at concrete roads. These coefficients are determined in this study. So, it can be determined the corresponding number of 12 ton and 10 ton axle weight repetitions to 8 ton axle weight repetition on the road route. As a result of this study, it is identified that temperature gradients at which vehicle passes through the concrete slab, plays an important role on determining the concrete slab thickness. It is determined that temperature gradient value is more decisive on the number of axle weight repetition on road route while slab thickness increases and slab thickness decreases between 2-3 cm in case of using C30 type concrete instead of C25 type concrete. Backpropagation neural network used in design calculation and a new program is written in C ++.

**Key Words:** *Concrete Road, Information systems, Artificial intelligence, Temperature gradient, Road thickness*



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.1. Örnek beton yol.....	2
Şekil 1.2. Ohio’da hala kullanılan beton yoldan alınan numune.....	7
Şekil 1.3. Uygulamadaki beton kaplama tipleri [1].....	9
Şekil 1.4. Beton santrali.....	14
Şekil 1.5. Kamyonla taşıma.....	15
Şekil 1.6. Mikserle taşıma.....	15
Şekil 1.7. Finişer paletlerinin oturduğu yer.....	15
Şekil 1.8. Kılavuz teli.....	15
Şekil 1.9. Beton dökümü.....	16
Şekil 1.10. Derzlere kayma demiri yerleştirmesi.....	16
Şekil 1.11. Kayma demirli finişer.....	16
Şekil 1.12. Kayma demiri montajı.....	17
Şekil 1.13. Kayma demirleri üzerine beton dökümü.....	17
Şekil 1.14. Bağlantı demirleri.....	17
Şekil 1.15. CBR değeri ile altzemin yatak katsayısı (k) arasındaki ilişki [37].....	19
Şekil 1.16. Altzemin üzerindeki temel yatak katsayısının belirlenmesi [38].....	20
Şekil 1.17. Kıрма taş temel in gradasyon eğrisi [41].....	22
Şekil 1.18. Beton kaplamada gündüz ve gece sıcaklık gradyanlarının etkisi.....	24
Şekil 1.19. Beton plak hareketlerini engelleyen etmenlerden kaynaklanan, gündüz ve gece sıcaklık gradyanlarının beton kaplama üzerinde etkisi.....	25
Şekil 1.20. Pozitif sıcaklık gradyanı için plak mesafe fonksiyonu olarak plak merkezi boyunca dikey deformasyonlar ve eğilme gerilmeleri.....	29
Şekil 1.21. Alman metodunda pozitif sıcaklık gradyanına ( $\Delta t$ ) bağlı plak kenar ortasının altında eğilmede çekme gerilmesinin hesaplanmasında kullanılan eşitlikler.....	30
Şekil 1.22. Beton kaplama üzerindeki kritik dingil yüklemesi.....	31
Şekil 1.23. Packard ve Tayabji’ nin [13] kabulü.....	31
Şekil 1.24. Çift tekerlekli tek dingil için kabul edilen mesafeler.....	33
Şekil 1.25. Tekerlek-kaplama temas alanı genişlik ve uzunluğu.....	34
Şekil 1.26. Plakta Oluşan Sürtünme.....	38
Şekil 1.27. Beton kaplama üzerinde yükleme modelinin şematik gösterimi [76].....	39
Şekil 1.28. Kayma demir uygulaması.....	41

Şekil 1.29. Farklı beton kalınlıklarında enine derz aralıklarına göre plak çatlama oranları .....	42
Şekil 1.30. Zamana bağlı derzlerdeki bozulmayla kayma demir çapı ilişkisi .....	43
Şekil 1.31. Eliptik şeklinde kayma demirleri .....	45
Şekil 1.32. Kayma demirinin yükleme altında alacağı durum .....	45
Şekil 1.33. Kayma demirinde yükleme altında oluşan momentler .....	46
Şekil 1.34. Almanya’ da örnek beton yol kesiti .....	46
Şekil 1.35. İki şeritli endüstriyel yolda bağlantı ve kayma demirli örnek bir beton yol kesiti.....	47
Şekil 1.36. Almanya’ da kayma demirli enine büzülme derz kesiti .....	47
Şekil 1.37. Beton yolda bağlantı demirleri .....	48
Şekil 1.38. Almanya’ da bağlantı demirli enine büzülme derz kesiti.....	52
Şekil 1.39. Almanya’ da örnek donatılı beton kaplama kesiti.....	54
Şekil 1.40. Almanya’ da örnek donatılı beton kaplamada boyuna büzülme derz kesiti.....	55
Şekil 1.41. Farklı banket türleri için zamana bağlı plak kırılma oranı .....	64
Şekil 1.42. Plak kırılma oranı ile beton kırılma modülü arasındaki ilişki .....	64
Şekil 1.43. Plak kırılma oranı ile temel arasındaki ilişki.....	65
Şekil 1.44. İleri beslemeli ve geri beslemeli ağ yapıları [121].....	75
Şekil 1.45. Bulanık Mantıkta Üçgen ve Parabol Üyelik Fonksiyonları [117].....	77
Şekil 2.1. Bilgi tabanı yönetim sistemi.....	83
Şekil 2.2. Yayılı yükün (g) noktasal etkiye dönüştürülmesi .....	84
Şekil 2.3. Eksenel yükün (Pt) yayılı yüke (pt) dönüşümü ve plakta dokusal tarama yapılması.....	85
Şekil 2.4. Uzaysal bir noktanın çevresel ilişkileri .....	86
Şekil 2.5. Plak üzerindeki her bir i düğüm noktasına uygulanabilecek sonlu farklar molekülü .....	86
Şekil 2.6. Zemine oturan plakta sonlu farklar matrisi .....	88
Şekil 2.7. Plağın sonlu elemanlar ile modellenmesi .....	88
Şekil 2.8. Tasarım hesaplarında kullanılan örnek kesit davranış modülü .....	92
Şekil 2.9. Katsayılar matrisi işleyiş şeması .....	95
Şekil 2.10. Plak kenar momentleri.....	97
Şekil 2.11. Dingil ağırlığından kaynaklanan eğilmede çekme gerilmelerinin ILLI-SLAB programı ve tez çalışmasında bulunan değerleri .....	100

Şekil 2.12. Dingil ağırlığından plak eğilmesinden kaynaklanan toplam eğilmede çekme gerilmelerinin ILLI-SLAB programı ve tez çalışmasında bulunan değerleri .....	101
Şekil 2.13. Beton yol tasarımı sistem şeması .....	102
Şekil 2.14. Araç azami genişlik ve yüksekliği.....	103
Şekil 2.15. Araç azami ağırlıkları.....	103
Şekil 2.16. Beton yol kaplamasında farklı saatlerdeki sıcaklık değerleri.....	105
Şekil 2.17. Toplam trafik ve ağır taşıt trafiğinin gün içinde dağılımı 2009 [12].....	106
Şekil 2.18. Çift tekerlekli tek dingilin plak üzerinde tarama yapması .....	107
Şekil 2.19. Yayılı yük altında beton plağa etkiyen kuvvetler.....	108
Şekil 2.20. Beton plak kalınlığının tespitinde YSA işleyiş şeması .....	113
Şekil 2.21. Eğitim seti ve YSA sonuçlarının karşılaştırılması .....	115
Şekil 3.1. C30 Betonunda farklı sıcaklık gradyanları için 10 ton ağırlığındaki dingil geçiş sayısı .....	116
Şekil 3.2. C30 Betonunda farklı plak kalınlıkları için 10 ton ağırlığındaki dingil geçiş sayısı .....	118
Şekil 3.3. C30 Betonunda farklı sıcaklık gradyanları için 8 ton ağırlığındaki dingil geçiş sayısı .....	119
Şekil 3.4. C30 Betonunda farklı plak kalınlıkları için 8 ton ağırlığındaki dingil geçiş sayısı .....	120
Şekil 3.5. C25 Betonunda farklı sıcaklık gradyanları için 10 ton ağırlığındaki dingil geçiş sayısı .....	121

## TABLULAR DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 1.1. Beton yolların tarihçesi .....	8
Tablo 1.2. Trafik kategorilerine göre AASHTO tipi beton kaplama tabakaları.....	10
Tablo 1.3. Trafik kategorilerine göre Almanya tipi beton kaplama tabakaları .....	10
Tablo 1.4. Trafik kategorilerine göre Belçika tipi beton kaplama tabakaları.....	11
Tablo 1.5. Alt-zemin tiplerine göre yatak katsayı değerleri .....	18
Tablo 1.6. Çimentolu temel özellikleri.....	22
Tablo 1.7. Alman beton yol tasarım metodunda standart sıcaklık gradyan frekans dağılımı .....	26
Tablo 1.8. Beton yol tasarım metodlarında beton yorulması ile yol servis ömrü boyunca izin verilen yük tekrar sayısı ilişkisi .....	40
Tablo 1.9. Amerika eyaletlerinde kaplama kalınlığına göre kayma demiri çapları .....	44
Tablo 1.10. Farklı temel tiplerine göre bağlantı demirleri .....	49
Tablo 1.11. Florida DOT #4 (4/8 inç) demiri için maksimum bağlantı demir aralığı.....	50
Tablo 1.12. Florida DOT #5 (5/8 inç) demiri için maksimum bağlantı demir aralığı.....	51
Tablo 1.13. Avrupa ülkelerinin beton yollarında kullanılan beton özellikleri .....	56
Tablo 1.14. Beton kalitelerine göre basınç dayanım değerleri .....	58
Tablo 1.15. Beton kalitesine göre tasarımda kullanılan beton değerleri .....	62
Tablo 2.1. Türkiye karayollarında 2009 yılı etüt yerleri ve YOGT değerleri [12].....	104
Tablo 2.2. Çalışmada kullanılan eğitim seti .....	110
Tablo 3.1. C30 Betonu için farklı sıcaklık gradyanlarında ve plak kalınlıklarında dingil dönüşüm katsayıları.....	123
Tablo 3.2. C25 Betonu için farklı sıcaklık gradyanlarında ve plak kalınlıklarında dingil dönüşüm katsayıları.....	124
Tablo 3.3. Beton yolun 30 yıllık servis süresi için yorulma analizi (h=23 cm) .....	126
Tablo 3.4. Beton yolun 30 yıllık servis süresi için yorulma analizi (h=24 cm) .....	127

## SEMBOLLER DİZİNİ

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerikan Birliği Devlet Karayolu ve Ulaştırma Dairesi)
ASTM	: American Society for Testing Materials (Amerikan Malzeme Test Birliği)
CBR	: California Bearing Ratio (Kaliforniya Taşıma Oranı)
CRC	: Continously reinforced composite (Sürekli donatılı kompozit)
CRCP	: Continously reinforced concrete pavement (Sürekli donatılı beton kaplama)
CTB	: Çimento bağlı temel
C25	: Elastisite modülü 30.000 MPa olan yol betonu
C30	: Elastisite modülü 32.000 MPa olan yol betonu
DIN	: Deutsches Institut für Normung (Alman Enstitüsü Standardizasyonu)
GGBFS	: Yüksek fırın cürufu
JPCP	: Jointed plain concrete pavement (Derzli düz beton kaplama)
JRC	: Joint reinforced concrete (Derzli donatılı beton)
LTE	: Load transfer efficiency (Yük transfer verimliliği)
OPC	: Ordinary portland cement (Alışılmış portland çimentosu)
PCA	: Portland Cement Association (Portland Çimento Birliği)
PFA	: Pulverized fuel ash (Uçucu kül)
URC	: Unreinforced concrete (Derzli donatısız beton)
VNC	: Cement Industry Association (Çimento Endüstri Birliği)
YOGT	: Yıllık ortalama günlük trafik
YSA	: Yapay sinir ağı
T <sub>8.2</sub>	: 8.2 Ton Standart Dingil Yüğü
K	: Zemin yatak katsayısı
D	: Plağın burulma rijitliği
E <sub>0</sub>	: Dinamik Elastisite Modülü
E <sub>f</sub>	: Temel elastisite modülü
H <sub>f</sub>	: Temel kalınlığı
ΔL	: Dilatasyon açıklığı
α <sub>t</sub>	: Betonun sıcaklık genleşme katsayısı
ε	: Betonun kuruma rötre katsayısı

$\Delta T$	: Sıcaklık aralığı
$\Delta t$	: Sıcaklık gradyanı
$T_t$	: Beton yüzeyindeki sıcaklık
$T_b$	: Beton altındaki sıcaklık
$h$	: Beton plak kalınlığı
$l_{crit}$	: Kritik plak uzunluğu
$E$	: Betonun Elastisite modülü
$L$	: Plak uzunluğu
$W$	: Plak genişliği
$C$	: Destek uzunluğu
$L'$	: Plak mesafesi
$\sigma_t$	: Eğilmede çekme gerilmesi
$\nu$	: Betonun poisson oranı
$\gamma_c$	: Betonun birim ağırlığı
$f_a$	: Betonla zemin arasındaki ortalama sürtünme katsayısı
$A_t$	: Tekerlek temas alanı
$W_t$	: Tekerlek yükü
$T_p$	: Tekerlek basıncı
$\sigma_t$	: Sıcaklık gradyanı eğilme gerilmesi
$\sigma_v$	: Trafik yüklemesi eğilme gerilmesi
$f_{ct,fl,o}$	: Betonun 28 gün sonunda kısa süre yüklemesi sonunda oluşan eğilmede ortalama çekme dayanımı
$f_{cc,k,o}$	: Betonun 28 gün sonunda kısa süreli yüklemesi altında karakteristik küp basınç dayanımı

## **1. GENEL BİLGİLER**

Birinci bölümde dünyadaki beton yol uygulamaları, örnek bir beton yol yapımı, derzli donatısız beton yollar, sıcaklık değişimlerinden ve trafik yüklemesinden oluşan gerilmeler, yorulma analizleri, donatılı beton kaplama, beton yollarda kullanılan beton ve yapay zeka ile ilgili genel konular anlatılmıştır. İkinci bölümde çalışmada kullanılan sayısal çözümleme yöntemi, bilgi sistemleri kullanılarak hazırlanan program tasarımı, doku yaklaşımı ve plaklar için uygulaması konularında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde sayısal analizler sonucunda elde edilen veriler tablo ve grafikler halinde gösterilmiş, ditermenistik yaklaşımla elde edilen veriler, istatistiki yaklaşım olarak kabul edilebilecek yapay sinir ağı ile de modellenmiştir. Dördüncü bölümde ise elde edilen sonuçlar açıklanmış, ileriki safhalarda araştırılması faydalı olacak çalışmalar hakkında önerilerde bulunulmuştur.

### **1.1. Giriş**

Karayolları, üstleneceği trafiğın yoğunluğu, araç tipi dağılımı, sürüş güvenliği vb. unsurlarla, iklim koşullarına ve bölgenin gereksinimlerine uygunluğu göz önüne alınarak projelendirilip inşa edilmektedir. Üstyapı tipleri genel olarak, esnek üstyapılar (Asfalt Yollar) ve rijit üstyapılar (Beton Yollar) olmak üzere iki ana gruba ayrılmıştır. Günümüze kadar uzanan süreç içerisinde, birçok ilerlemeler kat eden beton yol tasarımları, her geçen gün yeni araştırmalar neticesinde kendini yenilemektedir. Şekil 1.1.' de örnek bir beton yol görülmektedir [1].



Şekil 1.1. Örnek beton yol

Beton yolların, zaman içinde birçok açıdan asfalt yollara göre iyi bir alternatif olduğu gözlemlenmiş, beton yol yüzeyinin iyi bir şekilde yapılandırılması ile asfalt yola göre avantajlarının daha da arttığı tespit edilmiştir [1,2,3,4,5]. Beton yolların hala ülkemizde ciddi bir şekilde uygulanmıyor olması ülkemiz için büyük bir eksiklik. Amerika’ da 100 yılı, Avrupa’ da ise 75 yılı aşkındır kullanılan beton yollar, ülkemizde az sayıdaki kent içi ve köy yolu çalışmalarında ve deneme amaçlı çok az sayılabilecek şehirler arası yolda kullanılmıştır. İhracatta Avrupa’ da birinci, dünyada ise ikinci sırada çimento ve klinker satışına sahip olan ülkemizin, karayolu ağında beton yol uygulamasının bu kadar eksik kalmış olması büyük bir handikap. Bunun yanında, beton yolların karayolları ağı içerisindeki oranı, Avrupa’ da yüzde 15, Amerika ve Kanada’ da yüzde 30 ve bazı ülkelerin oto yollarında ise yüzde 70 civarındadır.

Ülkemizde beton yol denildiği zaman, ne yazık ki akla sınırlı olanaklarla imalatı yapılmış olan kent içinde veya köy yollarındaki uygulamalar gelmektedir. Söz konusu uygulamalar, genel olarak üstünkörü yapıldığından dolayı, bu uygulamalarda istenilen sonuçlar alınmamış ve beton yollar hakkında ülkemizde bir önyargı oluşmuştur. Bu uygulamalarda beton, beton finişerleri ile değil elle dökülmüş ve vibrasyonda çok sağlıklı uygulamalar yapılamamıştır. Oysa birçok ülkenin anayollarında, beton yol uygulamaları 25 seneyi aşkın zamandır sorunsuz hizmet vermektedir. Beton yol tasarımı denildiği zaman,



ülkemizde genel olarak beton kalınlığına önem verilmekte, bu kalınlığı etkileyen ve beton yoldan istenilen sonuçların alınması için çok önemli olan diğer faktörler göz ardı edilmektedir. Beton yolda, öncelikle betonun tasarımı önemlidir. Ne yazıkki genel olarak ülkemizde, bina inşaatlarında kullanılan beton tasarımları ile yolda kullanılan beton tasarımı arasında pek bir fark yoktur. Aynı basınç dayanımını sağlaması, doğru beton kullanıldığı anlamına gelmemektedir. Beton yolda kullanılan betonun en büyük agrega çapı ve agrega gradasyonu, bina inşaatlarında kullanılan betondan farklıdır. Yol uygulamalarında kullanılan betonun çimentosunun içeriği ve miktarı da önemlidir. Örnek vermek gerekirse, çimentodaki sodyum oksit oranı %1.2 iken yol yüzeyinde oluşan ağsı çatlakların, oran %1 in altına düşürüldüğünde ortadan kalktığı görülmüştür. Kullanılacak katkı maddelerinin de belirli sınırlar içinde kalması gerekmektedir. Yüksek dayanımlı betonların kalınlığının, yol uygulamalarında gereğinden fazla olması da ani kırılmalara ve istenmeyen sonuçlar doğmasına sebebiyet vermektedir. Bunun anlamı, kütle betonlarında dayanımın yüksek tutulması veya kalınlığın artırılması her zaman doğru bir uygulama değildir. Beton ve çimento imalatı konusunda bu denli zengin olan ülkemizde, istenilen beton tasarımını oluşturmak sıkıntı olmayacaktır. Kullanılacak beton sınıfının yanında, dökülen betonun kür işleminin, beton yol altındaki temel, temeldeki gerilmeleri alması için yapılması gereken uygulamaların, betonda açılacak derzlerin, bağlantı ve kayma demirlerinin uygulanma şekillerinin, iklim şartlarının, yol güzergahından geçecek dingil ağırlıklarının ve sayısının, taşıtların gün içindeki geçiş zamanlarının da beton kalınlığının hesaplanmasında önemli etkileri vardır. Bu etkiler, ülkemiz şartları da göz önünde tutularak incelenmeli, ülkemizde eksikliği büyük oranda hissedilen beton yol uygulamalarının doğru bir şekilde yapılması için, beton yol tasarım çalışmalarına ağırlık verilmelidir. Çalışmada, beton elastisite modülü, dingil ağırlığı, dingil tekrar sayısı ve sıcaklık gradyanındaki değişimlere göre derzli donatısız beton yol kalınlığındaki değişimler incelenmiştir.

## 1.2. Literatür

Beton plak yüzeylerinde oluşan sıcaklık değişimlerinin etkileri üzerine yapılan çalışmalar günümüze kadar gelmektedir. Yapılan çalışmalarda, beton yol performansının, tekerlek yük tekrarı kadar sıcaklık değişimlerinden de önemli derecede etkilendiği

belirtilmektedir [6, 7]. Beton plak üst ve alt yüzeyi arasında oluşan sıcaklık farkları, plağın eğilmesine sebep olmaktadır. Gündüz vakti pozitif sıcaklık gradyanlarından kaynaklı, plak eğilmesi yukarı yönde olurken, gece vakti ise negatif sıcaklık gradyanlarından dolayı bu eğilme aşağı yönde olmaktadır. Söz konusu eğilmeler, plakta oluşan gerilmeleri tetiklemekte ve betonun erken yaşta çatlamasına neden olmaktadır. Siddique vd. [8], saha üzerinde 30.5 cm kalınlığındaki plak için yaptıkları ölçümlerde, pozitif sıcaklık gradyanlarının sebep olduğu plak eğilmelerinin, negatif sıcaklık gradyanlarından kaynaklı eğilmelere oranla daha büyük olduğunu belirlemişlerdir. Belshe vd. [9], beton plak üzerine asfalt uygulandığı zaman, plak alt ve üst yüzeyindeki sıcaklık değişimlerinin daha azaldığını tespit etmişlerdir. Masad vd. [7], eğilmelerden dolayı oluşan maksimum çekme gerilmesinin 6-28.5% arasında beton kırılma modülüne (betonun eğilmede çekme dayanımı) karşılık geldiğini belirlemişlerdir. Eğilmeden oluşan gerilmelerin sadece uzun plaklarda değil, 30 cm kalınlığındaki kısa plaklarda da olduğunu ve bu gözlemin sadece çimento katkılı temeller için doğru olduğunu belirtmişlerdir. Bunun yanında yazarlar çalışmalarında, pozitif sıcaklık gradyanlarının oluşturduğu eğilmede çekme gerilme değerlerinin, aynı değerdeki negatif sıcaklık gradyanlarından kaynaklı gerilme değerlerinin 85-90% ı kadar olduğunu ve plak kalınlığı arttıkça, eğilme gerilmelerinin arttığını belirlemişlerdir. Sıcaklık gradyan değerinin 0.024°C/mm olması durumunda, plakta trafik etkisinden kaynaklı oluşan yorulmaların, sıcaklık gradyan değerinin sıfır olması durumundaki yorulmanın 10 katı olduğunu belirtmişlerdir. Choubane ve Tia [6], Belshe vd. [9], beton plak içindeki sıcaklık dağılımının lineer olmadığını, Masad vd. [7] de, lineer olmayan sıcaklık dağılımının oluşturduğu çekme gerilmelerinin, sıcaklık dağılımının lineer kabul edilmesi durumuna göre daha büyük olduğunu belirtmektedir ve bu iki dağılım sonucunda oluşan çekme gerilmeleri arasındaki farkın, betonun eğilmede çekme dayanımının 3-13% ü olduğunu belirlemişlerdir. Mahboub vd. [10], ANSYS programı kullanarak yaptıkları bir çalışmada, beton kaplamada sıcaklık etkilerinin, trafik etkilerinden daha önemli olduğunu ve bunun çalışmalarının en önemli sonucu olduğunu belirtmişlerdir. Belshe vd. [9], beton plak yüzeyleri arasındaki sıcaklık farklarının doğurduğu plak eğilmelerine karşı koyan plak ağırlığını göstermiş, çalışmalarında bu eğilmeler sırasında plak üzerinden geçen dingil ağırlıklarının oluşturacağı zıt yöndeki çekme gerilmeleri hesaba katılmamıştır. Huang [11], genel olarak ağır araç trafiğinin gündüz vakti az olduğunu ve bu sebepten dolayı beton yol tasarımında kullanılan yorulma analizlerinde, pozitif sıcaklık gradyanının sebep olduğu yukarı yönlü plak eğilmelerinden

oluşan gerilme hesaplamalarına, söz konusu zamanda geçen dingil etkilerinin katılmasının gereksiz olduğunu belirtmektedir. Türkiye’ de trafik dağılımına bakılacak olursa, ülkemizde ağır araç trafiği gündüz vakti artış göstermektedir [12]. Bu sebepten dolayı beton yol tasarım hesaplamalarında, dingil yüklerinin geçtiği sıcaklık gradyan değerlerinin hesaba katılması faydalı olacaktır. Packard ve Tayabji [13], oluşan trafiğin sadece 6% sının trafik şeridinin kenar alanından geçtiğini kabul etmişlerdir. Kenar alanı, boyuna derzden veya plak kenarından 600 mm uzaklıkta, enine derz yönünde tanımlanmıştır. Lennie ve Bunker [14], Queensland eyaletindeki trafik ölçümlerinde, kenar alanından geçen trafik hacminin yukarıda bahsedilen kabulden daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir.

Beton yol tasarımında genel olarak, sonlu elemanlar modellemesi kullanılarak oluşturulmuş KENSLABS, ILLI-SLAB, JSLAB, ANSYS vb. programlar kullanılmaktadır. Bu programlarda, plak kalınlığı ve tasarım için gerekli parametreler girilip, çökme ve gerilmeler belirlenmekte ve daha sonra girilen plak kalınlığının yeterliliğine bakılmaktadır. Derzli donatısız beton kaplama tasarımı için söz konusu programların dışında, araştırmacılar farklı programlar üzerinde de çalışmaktadır. Lee ve Carpenter [15], derzli donatısız beton yol tasarımı için PCAWIN adında yeni bir program geliştirmişlerdir. Yazarlar, ülkemiz karayollarında kabul gören AASHTO [16] kaplama tasarımının, önceleri sadece ampirik yaklaşım olduğunu, zaman içerisinde yapılan yenilemelerle mekanistik-ampirik yaklaşıma doğru değiştiğini, fakat yeterli olmadığını belirtmektedirler. Bunun yanında araştırmacılar, Portland Çimento Birliği’ nin (PCA) kalınlık tasarımının daha mekanistik prensiplere dayandığını ve daha fazla kabul gören bir kaplama tasarımı olduğunu söylemektedir [15]. PCA metodu, PCAPAV bilgisayar programına işlenmiş tasarım tablo ve grafiklerini kullanmakta, J-SLAB [17] sonlu elemanlar analizlerindeki sonuçlara bağlı minimum plak kalınlığını belirlemektedir. PCA kalınlık tasarım yönteminde, kullanıcı plak kalınlığını deneyerek seçmektedir ve yorulma analizlerinde, taşıtların sıcaklık gradyanına göre dağılım oranlarına bağlı oluşan gerilmeler hesaba katılmamaktadır [11]. Beton yol tasarımlarında, eğilmede çekme gerilmeleri ele alınmaktadır ve tasarım programlarında kırılma modülünün yani eğilmede çekme dayanımının, girdi bilgilerine girilmesi istenmektedir [15]. Söz konusu dayanım değeri, tasarım hesaplamalarında, kullanıcı tarafından plak kalınlığına bağlı olmaksızın sadece beton tipine bağlı bir değermiş gibi düşünülebilmektedir. Ancak, NEN 6720 [18] ve

Eurocode 2' ye [19] göre, eğilmede çekme dayanımı beton plak kalınlığı ile değişmekte olup, plak kalınlığı arttıkça bu değer azalmaktadır.

Tasarım hesaplamalarının uzun zaman alması sebebiyle, araştırmacılar daha kısa sürede sonuç alabilmek amacıyla, yapay sinir ağı metodundan faydalanma yoluna da gidebilmektedir. Söz konusu yaklaşımda, daha önceden bilinen girdi ve çıktı bilgileri kendi aralarında ilişkilendirilmekte ve farklı girdi bilgilerine göre yeni çıktılar elde edilmektedir. Khazanovich vd. [20], sürekli donatılı beton kaplamaların yüzeylerindeki çekme gerilmelerini hızlı bir şekilde tespit etmek amacıyla yaptıkları çalışmalarında, sonlu elemanlar analizi ile yapay sinir ağı çözümünü birlikte uygulamışlar ve sonlu elemanlar modeli ile gerilmeleri bulmak için ISLAB2000 programını kullanmışlardır. Yazarlar, uyguladıkları yöntemle sürekli donatılı beton kaplamalarda hızlı bir gerilme tayini yapabildiklerini belirtmişlerdir.

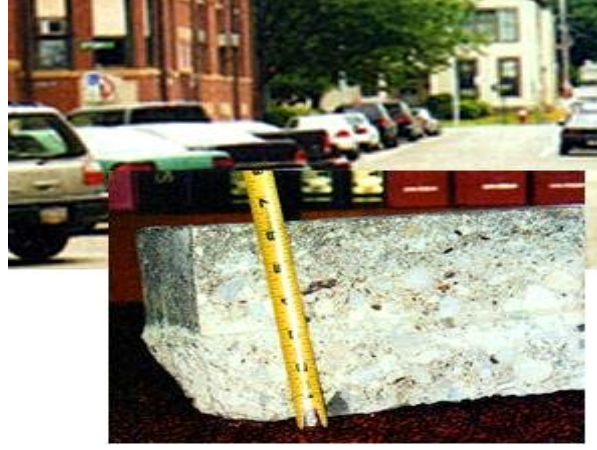
Bayrak ve Ceylan [21], Portland çimentolu beton kaplama tasarımında geri yayımlı yapay sinir ağı kullanarak rijit üstyapı katman modülünü (beton elastisite modülü ve zemin yatak katsayısı) yüksek duyarlılıkta bulduklarını belirtmişlerdir. Bu çalışmada değişik kaplama kalınlıkları dikkate alınarak, rijit kaplama sistem tepkilerini çözmek ve bilgi veri tabanını oluşturmak için ISLAB2000 sonlu elemanlar programı ve düşen ağırlık deflektometresi verileri kullanılmıştır.

Anastasios vd. nin [22] yaptıkları bir çalışmada, beton kaplama derzlerindeki dönme ve gerilmelerin hesabı, düşen ağırlık deflektometresi verileri girilerek geri yayımlı yapay sinir ağı algoritması kullanılarak yapılmıştır. Kasthurirangan vd. [23], yeni nesil uçak yüklerine maruz kalan esnek havaalanı kaplamalarının lineer olmayan katman modüllerini belirlemede, ağır yüklü deflektometre testi verilerine dayalı yapay sinir ağı kullanmışlardır.

Ceylan vd. [24] yaptıkları çalışmada, farklı yükleme bölgeleri için değişik kalınlıklardaki beton kaplamalardaki gerilmeleri, çökmeleri belirlemede yapay sinir ağlarından faydalanmışlardır. Bu çalışmada da diğerleri gibi sonlu eleman analizini kullanmışlardır. Konu üzerinde yapay sinir ağı kullanılarak farklı çalışmalar da yapılmıştır [25,26,27,28,29].

### 1.3. Beton Yolların Günümüze Kadar Uzanan Tarihçesi

Romalılar'ın M.Ö. I.y.y.'da puzolanik bağlayıcılarla bir araya getirilmiş taşlardan yaptıkları yollar, bugünkü beton yolların tarihte ilk örnekleri sayılabilirse de, bugünkü anlamıyla beton yollar konusundaki ilk denemelere 19.y.y. sonlarında, ABD'de rastlanmaktadır. 1891 yılında Ohio' da yapılan bir sokak, bilinen en eski beton yoldur. Şekil 1.2.' de Ohio' daki yol ve bu yoldan alınan örnek karot numunesi görülmektedir [2]. Bu beton yol, Chicago Uluslararası Fuarı tarafından 1893 yılında yol kaplama malzemelerinde en iyi mühendislik teknolojisi seçilmiş ve bu yeni tekniğin önünü açmıştır.



Şekil 1.2. Ohio'da hala kullanılan beton yoldan alınan numune

Zaman içerisinde beton üretim, taşıma ve yerleştirme teknolojisinin ilerlemesi (beton santralleri, transmikserler, beton pompaları, katkılar), deforme olmayan kalıpların bulunması vb. gelişmeler sayesinde beton uygulamalarında kalite artmış ve buna paralel olarak beton yol yapımı hız kazanmıştır. ABD'de yalnız 1960 ve 1970'lerde 70.000 km'lik beton yol ağı tamamlanmıştır. ABD'deki bu gelişmeleri Almanya, Belçika ve Japonya'daki projeler izlemiştir. Tablo 1.1.' de beton yolların tarihçesi gösterilmektedir [2].

Tablo 1.1. Beton yolların tarihçesi

BETON YOLLARIN TARİHÇESİ	
M.Ö. I. y.y.	Romalılar'ın çimento benzeri puzolanik bağlayıcılar kullanarak yaptıkları yollar
1865	İskoçya'da ilk beton yol denemeleri
1880	Avustralya'da ilk beton yolların yapılmaya başlaması
1891	Ohio'da Amerika'nın, bugün de kullanılmakta olan ilk beton yolunun yapılması
1913	Arkansas'ta Amerika'nın ilk beton otoyolunun yapılması
1914	Amerika'da 3.500 km beton yol yapımının tamamlanması; yol yapımında "Silindire Sıkıştırılan Beton" (Roller Compacting Concrete) kullanılmasına başlanması
1924	Fransa'da beton yol yapımı programının başlatılması
1930	Almanya'da 4.000 km uzunluğunda beton otoyol yapımına başlanması, İsviçre, Belçika başta olmak üzere, diğer Avrupa ülkelerinde de beton yol yapımının başlaması
1950	Kayar kalıp kullanımıyla beton yol yapımında hız ve kalitenin artması
1960 – 70	ABD ve Kanada'da beton yol yapımının yoğunlaşması; ABD'de 70.000 km beton yol yapılması.
1990	Beton teknolojisindeki ilerlemelerle beton yol yapımında yeni gelişmelerin kaydedilmesi : Betonda lif kullanımı, öngerme teknolojisi, akıcı-kuru kıvamlı beton üretimi vb.

#### 1.4. Beton Yolların Diğer Yapım Teknikleriyle Karşılaştırılması

Beton yol yapımı, ilk bakışta zahmetli ve maliyetli bir iş gibi görülse de, bu konu üzerine yapılan araştırmalar ve elde edilen veriler neticesinde bu önyargının yanlış olduğu, beton yolların asfalt yollarla kıyaslandığında önemli avantajları olduğu görülmüştür [1,3,4,5].

Bu avantajlar kısaca sıralanacak olursa:

a) Taşıma Gücü

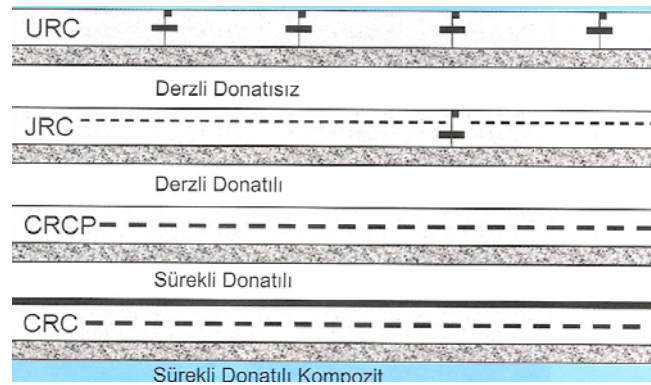
- b) Uygulama Koşulu (Beton yol uygulaması, asfaltın aksine ıslak zemin de dahil olmak üzere, hemen hemen her iklim koşulunda gerçekleştirilebilmektedir.)
- c) Yapısal Ömrü (Beton yolu ömrü yaklaşık 20-25 yıl kadardır)
- d) Akaryakıt Tasarrufu
- e) Çevre Dostu Olması
- f) Kimyasal Maddelere Karşı Dayanıklılığı
- g) Durma Mesafesi
- h) Gece Görüşü
- i) Sürüş Konforu – Sürüş Gürültüsü
- i) Ağır Trafikteki Maliyeti

Bunun yanında en önemli dezavantajı

- Yapım aşamasındaki bekleme süresi ve uygulamada çok titizlik gerektirmesidir. Bunun yanında kent yollarında altyapı çalışmalarında zorluk çıkmasına sebebiyet vermektedir [1,3,4,5].

### 1.5. Dünyada Beton Yollar

Rijit kaplamalarda değişik tasarımlar mümkün olmakla birlikte, Şekil 1.3.' de mevcut uygulanmakta olan dört değişik kaplama tipi gösterilmektedir [1].



Şekil 1.3. Uygulamadaki beton kaplama tipleri [1]

Amerika Birleşik Devletleri'nde uygulanan AASHTO tipi tasarım yöntemine göre, kaplama sadece bir beton kaplama ve alt temelden oluşmaktadır. Tablo 1.2.'de farklı trafik kategorilerine göre AASHTO tipi beton kaplama tabakaları görülmektedir [1].

Tablo 1.2. Trafik kategorilerine göre AASHTO tipi beton kaplama tabakaları

<b>Beton Kaplama (AASHTO)</b>									
Üstyapı Tabakaları (cm)	Trafik Kategorileri ( $T_{8.2}$ : 8.2 tonluk eşdeğer standart dingil yükü tekrar sayısı-Yolun hizmet ömrü boyunca)								
	3-10 Milyon	10-20 Milyon	20-30 Milyon	30-40 Milyon	40-50 Milyon	50-65 Milyon	65-80 Milyon	80-100 Milyon	100-160 Milyon
Beton Kaplama	23	26	28	30	31	32	33	35	36
Kırmataş Alt Temel	15	15	15	15	20	20	20	20	20

Almanya standartlarına göre ise beton kaplamanın altında zayıf beton bir temel tabakası ve onun altında da kum-çakıl bir alt temel tabakası kullanılmıştır. Tablo 1.3.'de farklı trafik kategorilerine göre Almanya tipi beton kaplama tabakaları görülmektedir [1].

Tablo 1.3. Trafik kategorilerine göre Almanya tipi beton kaplama tabakaları

<b>Beton Kaplama (Almanya)</b>									
Üstyapı Tabakaları (cm)	Trafik Kategorileri ( $T_{8.2}$ : 8.2 tonluk eşdeğer standart dingil yükü tekrar sayısı-Yolun hizmet ömrü boyunca)								
	3-10 Milyon	10-20 Milyon	20-30 Milyon	30-40 Milyon	40-50 Milyon	50-65 Milyon	65-80 Milyon	80-100 Milyon	100-160 Milyon
Beton Kaplama	23	24	24	25	25	25	25	27	27
Zayıf Beton Temel	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Kum-Çakıl Alt Temel	38	39	39	40	40	40	40	42	42

Belçika tasarım yöntemine göre ise, kaplama üst yapı tipi beton kaplamanın altında bitümlü bir ara yüzey tabakası, zayıf beton bir temel tabakası veya plentmiks bir temel tabakası, onun altında da kırma taş alt temel tabakası ele alınmıştır. Tablo 1.4.'de farklı trafik kategorilerine göre Belçika tipi beton kaplama tabakaları görülmektedir [1].



Tablo 1.4. Trafik kategorilerine göre Belçika tipi beton kaplama tabakaları

<b>Beton Kaplama (Belçika)</b>									
Üstyapı Tabakaları (cm)	Trafik Kategorileri (T <sub>8.2</sub> : 8.2 tonluk eşdeğer standart dingil yükü tekrar sayısı-Yolun hizmet ömrü boyunca)								
	3-10 Milyon	10-20 Milyon	20-30 Milyon	30-40 Milyon	40-50 Milyon	50-65 Milyon	65-80 Milyon	80-100 Milyon	100-160 Milyon
Beton Kaplama	20	20	20	20	21	21	21	23	23
Bitümlü Arayüzey	0	6	6	6	6	6	6	6	6
Plent-Miks Temel	30	20	0	0	0	0	0	0	0
Zayıf Beton Temel	0	0	20	20	20	20	20	20	20
Kırmataş Alt Temel	15	15	15	15	15	15	15	15	15

Farklı gelişmiş ülkelerin rijit kaplama katalogları ve buralardaki farklı uygulamalar incelendiğinde, çoğunlukla derzli donatısız beton kaplamalar hakkında bilgilere ulaşılmıştır.

Donatılandırılmamış beton kaplamaların minimum kalınlığının 15 cm ve maksimum kalınlığının ise 30 cm olması gerektiği belirtilmiştir. Eğer hesaplamalar maksimum değerden fazla çıkarsa, donatılı beton kullanılması tavsiye edilmektedir. Derzli donatısız beton kaplamalarda genellikle yol boyunca enine 3.5 metreden 4.5 metreye kadar, boyuna ise 4 metreden 6 metreye kadar derzler kesilmektedir [30].

Sıcaklık ve nem miktarındaki değişimler, betonun genişip büzülmesine sebep olmaktadır. Beton plak, serbestçe hareket edecek biçimde yapılmazsa, bu hareketler nedeniyle çatlayabilir. Ancak, uygun aralıklarla derzler yapılması halinde, geniş çatlak oluşumunun bir şekilde önlenmesi ve çatlakların belli yerlerde oluşmasının sağlanması olasılığı vardır. Bu sürüş konforunu azaltıcı bir olgu olarak görülmektedir; fakat iyi derz dolgu malzemeleri ve özenli yapım veya ağır ve orta trafik yükleri için sürekli betonarme yol tekniği ile bu handikap aşılabilmektedir.

1993 yılında, Amerika Ulaştırma Dairesi beton kaplama teknolojisinde, Almanya, Avusturya, Fransa, Belçika, Güney Afrika ve Avustralya gibi ülkelerin gerisinde kaldığının farkına varmıştır [31]. Bunun üzerine, bu ülkelere teknik geziler düzenlenmiş ve söz konusu ülkelerdeki yenilikler ve bu ülkelerin deneyimleri konusunda farklı teknik raporlar yayınlanmıştır [32,33]. Almanya turundan sonra yazılan teknik rapor, bazı ilgi çekici uygulamaları açığa çıkarmıştır. Öncelikle, Almanlar rijit kaplama tasarımı ve yapımı için iyi tanımlanmış ve kapsamlı tasarım kataloğu kullanmaktadır. Almanya’ da, artırılmış dayanıklılığa ve yüksek basınç dayanımına sahip yüksek kalitede betonlar kullanılmaktadır. Bu da, Almanya’ daki yol kaplamalarının 25 seneyi aşkın süredir kullanılmasını doğuran sebeplerdendir [32].

Almanya’ da derzli donatısız beton kaplamalar için izin verilen maksimum kalınlık, 35-65 MPa aralığındaki basınç dayanımına sahip betonlar için 26 cm olarak belirtilmiştir. Ardışık enine derzler arası mesafenin en fazla 5 m olmasına izin verilmektedir. Uçucu kül kullanılmasına izin verilmemekte ve diğer mineral karışımlar desteklenmemektedir. Su azaltıcı ve hava sürükleyici karışımlar dışında fazla kimyasal karışımlara izin verilmemektedir. En büyük farklardan birisi, beton yerleştirilmesindeki kullanılan tekniktir. Kaplamalar, üç tabakası genellikle 7 cm olan iki tabakadan oluşmaktadır. İnce kısımla çalışmak, daha iyi sıkışma ve daha az çatlak oluşturmakta, fakat yapım süresini uzatmaktadır [32].

Benzer sonuçlar, Güney Afrika turundan sonra yazılan raporlarda da görülmektedir. Güney Afrika’ da önemli karayolu projelerinden birinde 23 cm kalınlığında beton kaplama kullanılmıştır [33]. Bu projede, derzli donatısız beton kaplama kullanılmıştır. Derzli donatısız beton kaplamalar için katalogta maksimum kalınlık bulunmamaktadır. Yine de, en önemli karayollarından birinde 23 cm kalınlık kullanıldığı hesaba katılırsa, maksimum kullanılabilir plak kalınlığının 25 cm olması önerilebilir. Söz konusu projede, kaplama altında 15 cm kalınlığında çimentolu kırma taş temel tabakası kullanılmıştır [33].

Derzli donatısız beton kaplamalar gibi, donatılı beton kaplamalarda da izin verilen maksimum kalınlık bulunmaktadır. Bu değer, her ülkede farklı olsa da, yaklaşık olarak 22.5 cm civarındadır [30,31,32,33].

## 1.6. Türkiye’ de Beton Yollar

Türkiye’ de beton yol uygulaması ilk defa İstanbul’ un işlek bir yeri olan Mahmutbey’ de yapılmıştır. Bu deneme yolu, uzunluğu yaklaşık olarak 0.5 km olan ve Türkiye Hazır Beton Birliği ve Karayolları Genel Müdürlüğü’ nün ortaklaşa uyguladığı küçük bir projeydi.

Mahmutbey’ den sonra, Afyon-Emirdağ arasında uzunluğu 2 km olan bir deneme yolu yapılmıştır. Yolun kaplama kalınlığı 27 cm olarak tasarlanmış ve derzli donatısız beton yol olarak yapılmıştır. Gözenekliliği azaltmak için, su-çimento oranı (W/C oranı) 0.45 olarak tasarlanmıştır. Slump değeri, diğer birçok beton kaplamalarda olduğu gibi 4 cm alınmıştır. Hava sürükleyici katkıları 0.2 kg/m<sup>3</sup> oranında kullanılmıştır. Afyon’ da, yazın ölçülen en büyük sıcaklık 37.8 °C, kışın ölçülen en az sıcaklık ise -27.2 °C dir. Bu veriler, bölgede çok büyük sıcaklık değişimlerinin olduğunu göstermektedir [34]. Projede, beton basınç dayanımını artırmak için silis dumanı kullanılmıştır. 375 kg/m<sup>3</sup> olan çimentoya 17.5 kg/m<sup>3</sup> silis dumanı eklenmiştir. Bu oran, yaklaşık olarak %5 oranında silis dumanına karşılık gelmektedir ve fazla bir oran olarak kabul edilebilmektedir. Kullanılan betonun 28 günlük basınç dayanımı, 50 MPa olarak ölçülmüştür. Yol, trafiğe 2004 yılının Eylül ayında açılmıştır [34]. Projede uygulanan yol, 3 şeritten oluşmaktadır ve 12 m genişliğindedir. Her bir dikdörtgen plak 4 metre genişliğinde ve 5 m uzunluğunda yapılmıştır [5].

Afyon’ daki deneme yolundan sonra, Karayolları Genel Müdürlüğü’ nün ve Türkiye Çimento Üreticileri Birliği’ nin birlikte gerçekleştirdiği, 3.5 km uzunluğundaki İstanbul’ un Hasdal bölgesinde ve bunun devamında, ülkemizin farklı bölgelerinde az sayıda kabul edilebilecek beton yol uygulamaları yapılmıştır.

Yol yapımında yapılan tasarım hesaplarında aranan en önemli özellikler başlıca; tasarımın mümkün olduğunca düşük maliyette, uzun ömürlü, yapım kolaylığı olan, güvenli ve çevreci olmasıdır. Günümüz dünyasında çok küçük ekonomik faydalar için büyük araştırma külfetlerine katlanılmaktadır. Teknolojik gelişmeler çok büyük olmayan faydalar için bile büyük rekabet ortamları meydana getirmektedir. Bu sebepten dolayı yapı sistemlerinin daha duyarlı çözümleri çok önemlidir.

Görüldüğü üzere, yol kaplamalarında, farklı ülkelerin farklı tasarımları bulunmaktadır. Bu tasarımlar, senelerin getirdiği deney ve gözlemlere dayalı abaklardan faydalanılarak oluşturulmuş olup, devam eden sayısal çözümleme çalışmaları ile optimum sonuçlara ulaşılması hedeflenmektedir. Türkiye’ de Karayolu Teknik Şartnamesi (2006) Kısım 450’ de [35], beton yollarda uygulanacak malzemelerin nasıl olması gerektiği, kalite kontrol deneyleri, yapım şekli hakkında yüzeysel bilgiler verilse de beton kalınlığı konusunda detaylı bir bilgi verilmemektedir. Farklı ülkelerin beton yol tasarımında kullandıkları beton ve beton kalınlık tasarımları da incelenerek ülkemiz için ideal beton yol teknik şartnamesinin oluşturulması için çalışmalar yapılmasına ihtiyaç bulunmaktadır.

### 1.7. Örnek Beton Yol Yapımı

Beton yol yapımında öncelikle yol betonunun yüksek kalitede olması gerekmektedir. Bunun için yeterli kapasitede ve yeterli yükleme ekipmanına sahip iyi bir tesise ihtiyaç duyulmaktadır (Şekil 1.4.) [1].



Şekil 1.4. Beton santrali

İmalattan sonra, beton şantiyeye kamyon veya transmikserle taşınmaktadır (Şekil 1.5.-1.6.) [1].



Şekil 1.5. Kamyonla taşıma



Şekil 1.6. Mikserle taşıma

Beton yol yapımının büyük bölümü “Slip Form Paver” (kayar kalıp kaplayıcı, finişer) ile yapılmaktadır. Yolun iki yanında, aracın palet ve tekerleklerinin geçeceği alan yeterli genişlikte, temiz, düz ve sağlam olmalıdır (Şekil 1.7.) [1]. Kılavuz telini taşıyacak çubuklar yere ayarlanabilir ve sağlam bir şekilde tutturulmalı, araları 7 metreyi geçmemelidir. Kılavuz çubuklarından geçen ve finişere yön veren telin gerginliğinin ve sıcaklığın sürekli kontrolü gerekmektedir (Şekil 1.8.) [1].



Şekil 1.7. Finişer paletlerinin oturduğu yer



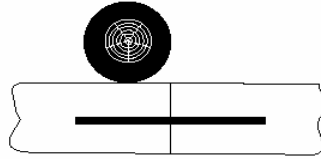
Şekil 1.8. Kılavuz teli

Finişer betonu yol genişliğince yaymakta, sıkıştırmakta ve düzlemektedir. Şantiyede daima bir aydınlatma ekipmanı bulunmalı, vibratör, hafif destek ve kalıp elemanları temin edilmelidir. Yapım için, önce ekskavatörle beton dökülmekte, sonra yayılmaktadır. Gerekliği taktirde yan besleyici kullanılabilir (Şekil 1.9) [1].



Şekil 1.9. Beton dökümü

Beton yol üzerinde açılacak olan derzlerin bulunduğu bölgeye, kayma demirleri yerleştirilmektedir (Şekil 1.10.) [1]. Bu sayede, iki plak arasında seviye farkı oluşması önlenmektedir.



Şekil 1.10. Derzlere kayma demiri yerleştirilmesi

Günümüzde finişerlerin bazılarında kayma demirlerini yerleştiren donanım bulunmakta, çubuklar doğrudan taze betona yerleştirilmektedir (Şekil 1.11.) [1]. Çubukların bu şekilde yerleştirilmesi sayesinde kamyonların yaklaşmasında sorun yaşanmamakta, aksi halde önceden şerit tabanındaki destekler üzerine yerleştirilen çubuklar kamyonların yaklaşmasında engel teşkil etmektedirler.



Şekil 1.11. Kayma demirli finişer

Finişerde, kayma demiri yerleştirici donanım olmadığı zaman, çubuklar yol tabanındaki metal desteklere yerleştirilmektedir. Çubukların üzerlerine beton döküldüğünde, yerlerinden oynamamaları için desteklerin tabana iyice yerleştirilmesi çok önem taşımaktadır (Şekil 1.12.- 1.13.) [1].



Şekil 1.12. Kayma demiri montajı Şekil 1.13. Kayma demirleri üzerine beton dökümü

Betonun birden fazla şeritte dökülmesi durumunda, Şekil 1.14.' de görüldüğü gibi, bitişik şerit dökülmeden önce bağlantı demirleri deliklere yerleştirilmektedir [1].



Şekil 1.14. Bağlantı demirleri

Beton yollarda en yaygın olan derzli donatısız beton kaplama olduğundan ve ülkemizde de sınırlı sayıda kabul edilecek beton yolların bu şekilde yapıldığından dolayı, ağırlıklı olarak derzli donatısız beton yol tasarımı üzerinde durulacaktır. Bu konu üzerinde teorik ve pratik bir çok çalışma yapılmış olup, bu çalışmalar ışığında, beton yol yapımında nelere dikkat edilmesi gerektiği, tasarım hesaplarında önemli olan unsurların neler olduğu konusunda bilgi verilecektir. Çalışmada, yapay zeka tekniğinden faydalandığından dolayı, yapay zekanın günümüze kadar olan gelişimi, bu yaklaşım ile çözümlerin nasıl yapıldığı üzerinde durulacaktır.

## 1.8. Derzli Donatısız Beton Yol

Çalışmada ele alınacak asıl konu derzli donatısız beton yol tasarımı olduğundan dolayı, bu bölümde öncelikli olarak bu konu hakkında detaylı bilgi verilecektir.

### 1.8.1. Temel

Betonun eğilmede çekme gerilmesini ve çökmesini etkileyen parametrelerden birisi de, zemin tepki modülü veya zemin yatak katsayısı,  $k$ , olarak adlandırılan parametredir. Zemin yatak katsayısını tespit etmek için 760 mm çapında veya 300 mm çapında plakalar kullanılmaktadır. Söz konusu plakalar ile bulunan yatak katsayı değerlerinin birbirine dönüşümü (1.1) Eşitliği ile gösterilmektedir.

$$k_{760} = 0.4 k_{300} \quad (1.1)$$

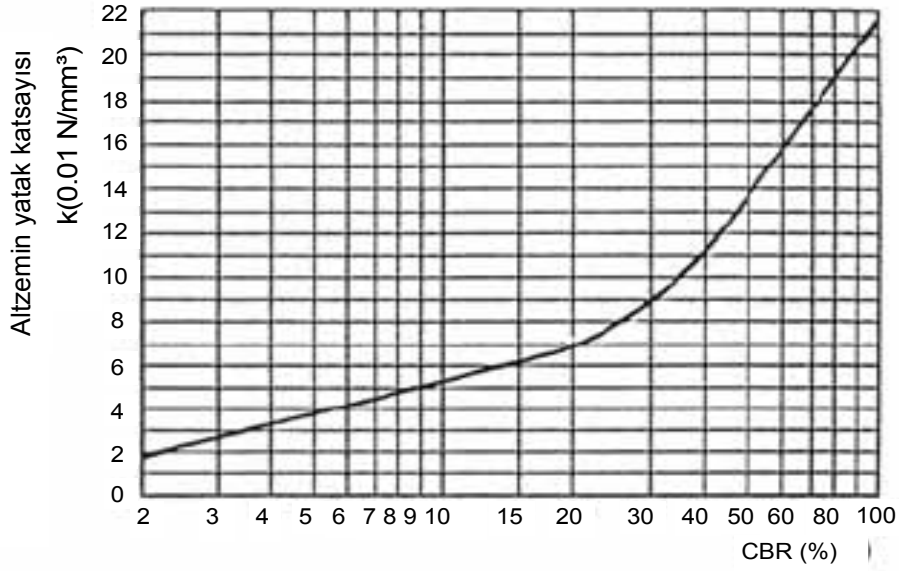
Bu testlerin arazide yapılması ve zemin yatak katsayısının tespit edilmesi gerekirken, genelde maliyeti ve zahmeti düşünülerek belirli alt zemin sınıfları için önceden bulunmuş ampirik değerler kullanılmaktadır. Alman tasarım metodunda kullanılmakta olan bu değerler, Tablo 1.5. de gösterilmektedir [36].

Tablo 1.5. Alt-zemin tiplerine göre yatak katsayı değerleri

Alt zemin	CBR değeri (%)	Dinamik Elastisite Modülü $E_0$ (MPa)	Zemin yatak katsayısı, $k$ (N/mm <sup>3</sup> )
Bataklık	1-2	25	0.016
Kil	3-8	40	0.023
Verimli toprak	5-10	75	0.036
Kum	8-18	100	0.045
Çakıl-kum	15-40	150	0.061

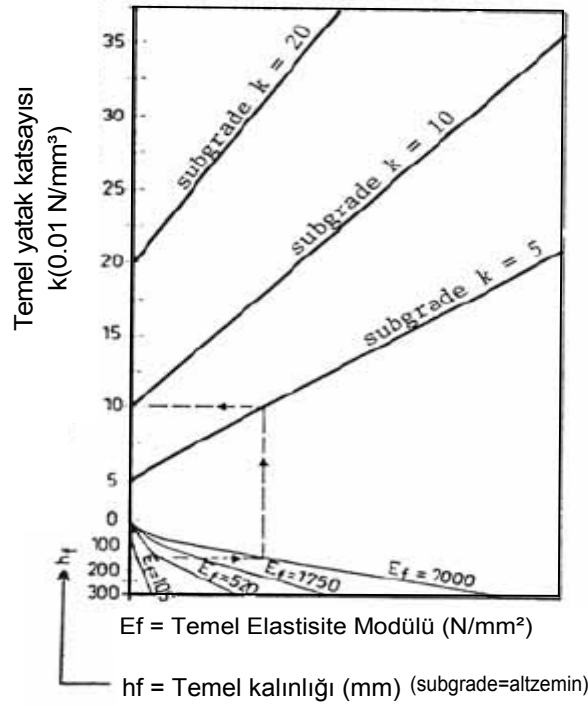


Alt zemin yatak katsayısı ile CBR değeri arasındaki ilişki, Şekil 1.15. de gösterilmektedir. Bu değerlerden bir tanesinin bilinmesi durumunda, grafik yardımıyla diğer değer de bulunabilmektedir [37].



Şekil 1.15. CBR değeri ile altzemin yatak katsayısı (k) arasındaki ilişki [37]

Alt temel malzemesi veya temel malzemesi, alt zemin üzerine konulmaktadır. Alt zemin malzemesi çok zayıf olduğunda, alt temel ve alt zemin arasına hafif ağırlıklı dolgu malzemesi konulmaktadır. Bu malzemelerin içeriği ve özellikleri VENCON 2.0' da [36] ayrıntılı bir şekilde bulunmaktadır. Beton altındaki katmanlar için hesaba katılacak en son "k" değerini bulmak için, Şekil 1.16. kullanılmaktadır [38].



Şekil 1.16. Altezmin üzerindeki temel yatak katsayısının belirlenmesi [38]

Otoyollar için beton yolların tasarımında Alman Karayolları, “k” değerini 0.105 N/mm<sup>3</sup> olarak almaktadır. Bu değer, 150 mm kalınlığında,  $E_f = 6000$  N/mm<sup>2</sup> lik Elastisite modülüne sahip, kum alt temel ve kum alt zemin üzerindeki grobeton temel (lean concrete base) için kullanılmaktadır. Beton yollarda temel tabakasının yapılma nedenleri ve temelde dikkate alınacak hususlar aşağıda sıralanmıştır:

- Beton kaplama altında, ince malzemelerin çatlaklardan ve derzlerden pompolanmasını engellemek ve beton kaplamaya iyi bir destek sağlamak için erezyona dayanıklı bir temel yapılmalıdır.
- Özellikle uzun dönem için, trafik yükleri altında beton kaplamada oluşabilecek olan sapmaları engellemek için temel yapılmalıdır.
- Beton yol yapımı sırasındaki araç yükleri ve finişerin rahat çalışması gibi hususlar göz önüne alındığında, yeterli bir yatak katsayısına sahip olduğundan dolayı temel yapılmalıdır.

- Yolun her iki tarafında da temel, beton kaplamadan en az 50 cm daha geniş olmalıdır. Beton kaplamanın her yerde eşit yapılabilmesi için, temel yüzeyi düz olmalıdır (3 metre için en fazla sapma 15 mm) [39].

- Soğuk iklimlerde beton kaplamadaki temel, don penetrasyon derinliği içinde olduğundan dolayı dona karşı dirençli olmalıdır.

Temelde, bağımsız malzemeler (kırmataş agrega vb.) veya çimento bağlı malzemeler kullanılmaktadır. Bağımsız temeller genelde hafif trafik yük altındaki yollarda kullanılmaktadır. Fakat Amerika' da, ağır trafik yükü altında yüksek kaliteli, geçirgen bağımsız temel de kullanılmaktadır. Bağımsız temel 20-30 cm arasında değişmektedir. Birçok ülkede, ağır trafik yükü altındaki beton yollarda çimento bağlı temeller (CTB) kullanılmaktadır. CTB' nin kalınlığı 15-25 cm arasında değişmektedir [39].

Su girişi, çimento bağlı temelin erozyona uğramasına sebebiyet verebilmektedir. Bundan kaçınmak için, çimento bağlı temelin basınç dayanımının 15 N/mm<sup>2</sup> olması gerektiği belirtilmektedir [40]. Bu durum, temelde yüksek çekme gerilmesini içermektedir ve bunun sonucunda geniş çatlaklar oluşabilmektedir. Çimentolu temelde oluşacak olan bu çatlaklar, temel üzerindeki betonda, alttan yukarıya doğru çatlaklar oluşmasına sebebiyet verebilmektedir. Bu tür yansıma çatlaklarını engellemek için;

- Yapım aşamasındaki trafik yüklerinin, çimentolu temelde küçük çatlaklar oluşturması yansıma çatlaklarını engellemektedir. Tabiki, yapım aşamasındaki bu yüklerin temelde küçük çatlaklar oluşturması istenirken, temele de zarar vermemesine dikkat edilmesi gerekmektedir.

- Beton plakta açılacak olan derzlerin altında, çimentolu temelde çentikler atılarak bu bölgelerde temel zayıflatılmaktadır.

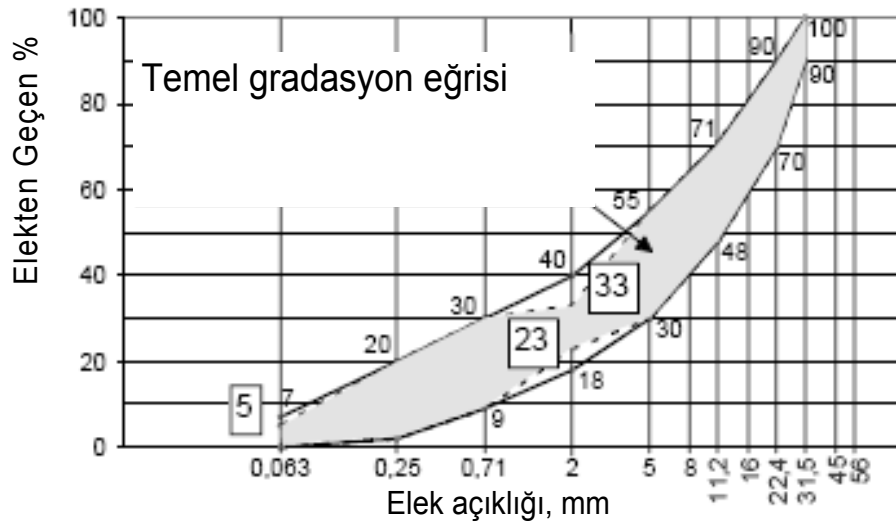
- Hollanda' da donatılı beton yollarda, temel ile beton arasına asfalt bir tabaka atılmaktadır. Bu asfalt tabaka yansıma çatlaklarını engellemektedir ve erozyona karşı iyi bir dirence sahiptir. Tablo 1.6. da çimentolu temel özellikleri görülmektedir [39]. Temelde, granüler

malzemenin sadece kumdan oluşması veya kum ve çakıldan oluşması durumunda, granüler malzeme ve karışıma eklenecek çimento oranlarına göre temel yoğunluğu değişmektedir.

Tablo 1.6. Çimentolu temel özellikleri

Özellik	Kumçimento	Grobeton
Çimento miktarı $\text{kg/m}^3$	120-200	75-125
% ağırlıkça	7-12	3-5
Granüler malzeme (% ağırlıkça)	Kum: %100	Kum:% 25-45 Çakıl:%75-55
Yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ )	1800-1900	2200-2400

Bir diğer alternatif de, en az 30 cm kalınlığındaki kırma agrega temel üzerine 27 cm kalınlığında beton dökülmesidir. Temel, o kadar su geçirgendir ki, derzlerden girecek olan su pompalama etkisi yaratmamaktadır. Şekil 2.17. de, kırma taş temelin gradasyon eğrisi verilmektedir [41].



Şekil 1.17. Kırma taş temelin gradasyon eğrisi [41]

Almanya’ da, beton yollar ağır trafik altındaki (dingil ağırlığı 11.5 tondan 13 tona kadar) otobanlarda çok iyi sonuçlar vermektedir. Yol yüzeyleri çok iyi kayma direnci

vermektedir ve oluşan ses seviyesi çok azdır. Servis süresi 20 yıldan 40 yıla kadar değişmektedir. Her 4.5 veya 5 metrede bir enine derzler kesilmektedir. Aşırı trafik yüklemesi altında, beton yol çimento bazlı temel üzerindeyse, 260 mm kalınlığındaki beton plak çok iyi sonuçlar vermektedir. Eğer beton yol, kırma agregalı temel üzerindeyse, yol kalınlığınının 300 mm olması önerilmektedir [39].

### 1.8.2. Dilatasyon Açma

Derzli donatısız beton yollarda, beton plakta dilatasyon aralığı, betonda oluşan gerilmelere değil, betonun büzülme karakteristiğine bağlıdır. Uzun dilatasyon aralıkları dilatasyonun genişlemesine yol açar ve yük transferini azaltır. Darter ve Berenberg' e [42] göre, dilatasyon açıklığı yaklaşık olarak (1.2) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta L = CL(\alpha_t \Delta T + \varepsilon) \quad (1.2)$$

Burada,

$\Delta L$  = dilatasyon açıklığı,

$\alpha_t$  = betonun sıcaklık genleşme katsayısı ( $9 - 10.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  arasında değişmektedir),

$\varepsilon$  = betonun kuruma rötre katsayısı (yaklaşık 0.5 den  $2.5 \times 10^{-4}$  e kadar değişir),

$L$  = derz aralığı,

$\Delta T$  = sıcaklık aralığı (beton dökümü sırasındaki sıcaklıkla aylık en düşük ortalama sıcaklık arasındaki fark)

$C$  = plak ve temel arasındaki sürtünmeye bağlı düzeltme katsayısı (stabilize zeminlerde 0.65, granüler zeminlerde 0.8 alınmaktadır).

### 1.8.3. Gerilmeler

Beton yollarda oluşan gerilmeler;

- Betonun sertleşme sürecindeki kırılmalardan
- Sıcaklık değişimlerinden
- Beton içindeki nem miktarındaki değişimden

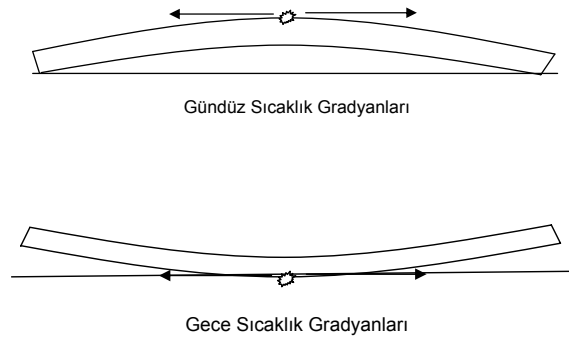
- Trafik yükünden
- Zemindeki farklı oturmalardan kaynaklanmaktadır.

Betonun sertleşmesi sırasındaki kırılmalara ve sıcaklık değişimine bağlı gerilme ve şekil değiştirmeler, betonu plaklar halinde yapmakla yok edilmektedir.

### 1.8.3.1. Sıcaklık Değişimlerinden Kaynaklanan Gerilmeler

Hiller ve Roesler' e [43] göre, beton yol kaplamalarındaki bozulmalarda, araç yükleriyle birlikte sıcaklık değişimleri önemli bir rol oynamaktadır. Sıcaklıktaki artma, taze betondaki hidratasyon hızını artırmakta, bu da çimento ve agrega arasındaki kimyasal reaksiyonlara bağlı, daha da fazla sıcaklık dalgalanmalarına sebep olmaktadır. Termal çekme gerilmesi, o sıradaki beton dayanımından daha fazla olursa, erken çatlamlar görülmektedir. Bu nedenden dolayı, sıcak havalarda beton yol dökümü sırasında çok dikkat edilmelidir [44].

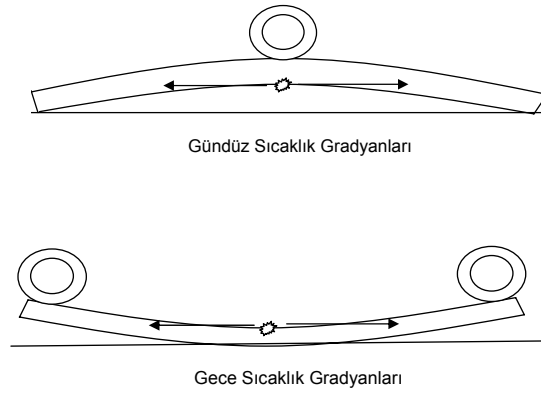
Beton kaplamanın üst yüzeyi ile alt yüzeyi arasında oluşan sıcaklık farkları, beton plağın geceleri yukarıya doğru, gün içinde ise aşağı doğru bükülmesine sebep olmaktadır (Şekil 1.18.).



Şekil 1.18. Beton kaplamada gündüz ve gece sıcaklık gradyanlarının etkisi

Beton plağın üst ve alt yüzeylerinde oluşan sıcaklık farklarından dolayı, gündüz maksimum çekme gerilmesi plağın merkezinde ve üst yüzeyinde, gece ise plağın alt yüzünde oluşmaktadır (Şekil 1.18.).

Bunun yanında, bir başka çekme gerilmesi, plağın ağırlığı, araç yükü, beton plak ve temel arasındaki sürtünme kuvveti gibi sebeplerden dolayı, yukarıda bahsedilen çekme gerilmelerinin oluştuğu yerlerin tam karşısında da meydana gelmektedir (Şekil 1.19.). Bu durumda çekme gerilmesi, beton plağın üst yüzeyinde gece vakti, alt yüzeyinde ise gündüz vaktinde oluşmaktadır [45].



Şekil 1.19. Beton plak hareketlerini engelleyen etmenlerden kaynaklanan, gündüz ve gece sıcaklık gradyanlarının beton kaplama üzerinde etkisi

Choubane ve Tia [46], kaplama kalınlığı boyunca sıcaklık dağılımının lineer olmadığını göstermiştir. Richardson ve Armaghani [47] ve Shoukry [48], diferansiyel sıcaklığın, 225 mm kalınlığındaki beton plakta  $10^{\circ}\text{C}$  olduğunu belirtmişlerdir. Byrum ve Hansen [49], çalışmalarında diferansiyel sıcaklığı gündüz vakti,  $0.087$  ve  $0.109^{\circ}\text{C} / \text{mm}$  arasında, gece vakti ise  $0.044$  ve  $0.065^{\circ}\text{C} / \text{mm}$  arasında kullanmışlardır.

Mohamed ve Hansen [50] ve ayrıca Heath ve Roesler' in [51] çalışmalarında elde ettikleri sonuçlar, beton plak derinliğince lineer olmayan sıcaklık dağılımlarının, beton plak, pozitif sıcaklık gradyanına (gündüz) maruz kaldığında lineer sıcaklık dağılımından daha küçük olduğunu; beton plak negatif sıcaklık gradyanına (gece) maruz kaldığında ise, lineer sıcaklık dağılımından daha büyük olduğunu göstermiştir. Kuo [52], kaplama analizlerinde, gündüz vakti plak ortasındaki yüklemenin, gece ise derzdeki yüklemenin dikkate alınmasını önermektedir.

Sıcaklık gradyanları ( $\Delta t$ ), trafik yüklemeleri kadar önemli eğilme gerilmeleri meydana getirmektedir ve beton yol tasarımında kesinlikle hesaba katılmalıdır.  $\Delta t$  değeri (1.3) ile bulunmaktadır.

$$\Delta t = \frac{T_t - T_b}{h} \quad (1.3)$$

$T_t$  = Beton yüzeyindeki sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_b$  = Beton altındaki sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )

$h$  = Beton plak kalınlığı (mm),

Almanya’ da, genel olarak negatif sıcaklık gradyanı (gece oluşan), beton yol tasarım hesaplarında dikkate alınmaz. Bunun sebeplerinden bir tanesi de, negatif gradyanın pozitif gradyandan daha düşük olmasıdır [36]. Tablo 1.7. de, Almanya’ da beton yol tasarımında kullanılan standart sıcaklık gradyan frekans dağılımı görülmektedir [36].

Tablo 1.7. Alman beton yol tasarım metodunda standart sıcaklık gradyan frekans dağılımı

<b>Sıcaklık Gradyan Sınıfı (<math>^{\circ}\text{C}/\text{mm}</math>)</b>	<b>Ortalama sıcaklık gradyanı <math>\Delta t</math> (<math>^{\circ}\text{C}/\text{mm}</math>)</b>	<b>Frekans dağılımı (%)</b>
0.000-0.005	0.0025	59
0.005-0.015	0.01	22
0.015-0.025	0.02	7.5
0.025-0.035	0.03	5.5
0.035-0.045	0.04	4.5
0.045-0.055	0.05	1.0
0.055-0.065	0.06	0.5



Sıcaklık Gradyan Gerilmeleri (Eisenmann Teorisi)

Eisenmann, beton plaktaki eğilme gerilmelerini hesaplamak için bir teori geliştirmiştir [53]. Teorisinde, kritik plak uzunluğunu (1.4) ve (1.5) eşitlikleri ile hesaplamıştır.

$$\text{Uzun plak: } (L/W > 1.2 \text{ yada } L/W < 0.8): l_{crit} = 200h \sqrt{E\alpha\Delta t} \quad (1.4)$$

$$\text{Kare plak: } (0.8 \leq L/W \leq 1.2): l_{crit} = 228h \sqrt{E\alpha\Delta t} \quad (1.5)$$

$l_{crit}$  = Kritik plak uzunluğu (mm)

$h$  = Beton plak kalınlığı (mm)

$E$  = Betonun Elastisite modülü (MPa)

$\alpha$  = Lineer termal genişleme katsayısı ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

$\Delta t$  = Pozitif sıcaklık gradyanı ( $^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ )

$L$  = Plak uzunluğu (mm)

$W$  = Plak genişliği (mm)

Bunun yanında Eisenmann, kenara yakın yerde beton plağın belirli bir mesafe üzerinden desteklendiğini hesaba katmıştır. Bu uzunluğu da, “destek uzunluğu” ( $C$ ) olarak adlandırmıştır. Plak mesafesi  $L'$ , her zaman plak uzunluğu  $L$  den daha kısadır.

$$L' = L - \frac{2}{3} C \quad (1.6)$$

Destek uzunluğu  $C$ , yaklaşık olarak (1.7) ile hesaplanmaktadır.

$$C = 4.5 \sqrt{\frac{h}{k\Delta t}}, \text{ eğer } C \ll L \quad (1.7)$$

$C$  = Destek uzunluğu (mm)

$h$  = Beton plak kalınlığı (mm)

$k$  = zemin yatak katsayısı ( $\text{N}/\text{mm}^3$ )

$\Delta t$  = Pozitif sıcaklık gradyanı ( $^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ )

Plak mesafesi  $L'$  ile plak kritik uzunluğu  $l_{crit}$  arasındaki orantıya bağlı olarak Eisenmann, üç durum tanımlamıştır [53]:

1. Plak mesafesi ( $L'$ ), plak kritik uzunluğundan ( $l_{crit}$ ) çok fazla büyükse, beton plağın merkez bölgesi, altyapının üzerine oturmaktadır. Bu merkezi bölgede, eğilme gerilmesi  $\sigma_t$  (boyuna yönde, plak ortasının altında eğilmede çekme gerilmesi):

$$\sigma_t = \frac{1}{1-\nu} \frac{h\Delta t}{2} \alpha E, \text{ eğer } L' > 1.1 l_{crit} \quad (1.8)$$

$\nu$  = Betonun poisson oranı

$h$  = Beton plak kalınlığı (mm)

$\Delta t$  = Pozitif sıcaklık gradyanı ( $^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ )

$\alpha$  = Lineer termal genişleme katsayısı ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

$E$  = Betonun Elastisite modülü (MPa)

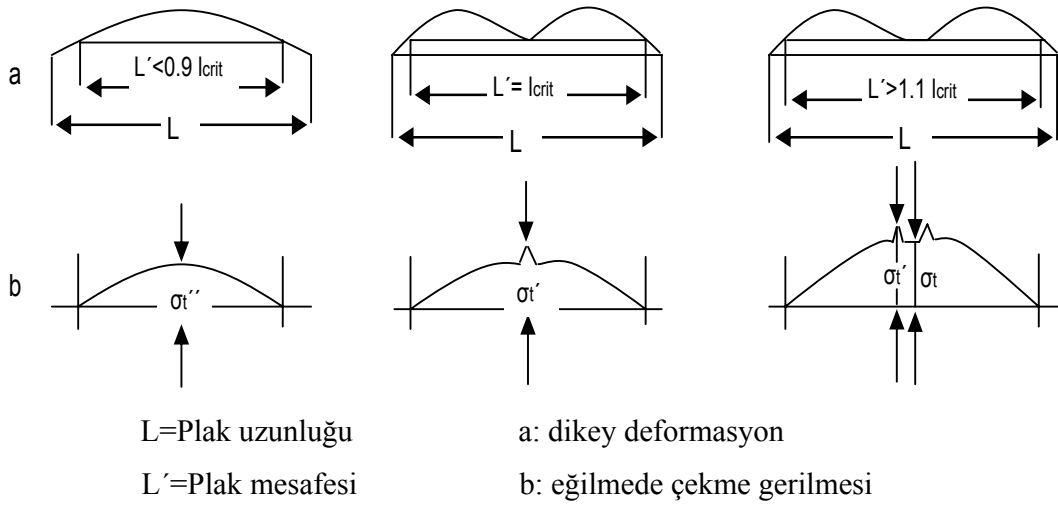
2. Beton plak merkezinin dışında, normal eğilme gerilmelerinden %20 daha fazla artan plak eğilme gerilmeleri vardır.

$$\sigma_t' = 1.2 \sigma_t \quad (1.9)$$

3. Plak mesafesi ( $L'$ ), plak kritik uzunluğundan ( $l_{crit}$ ) çok daha küçükse, düşürülen eğilme gerilmesi  $\sigma_t''$ , (1.10) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma_t'' = \left( \frac{L'}{0.9 l_{crit}} \right)^2 \sigma_t, \text{ eğer } L' < 0.9 l_{crit} \quad (1.10)$$

Şekil 1.20. de, pozitif sıcaklık gradyanı için plak mesafe fonksiyonu olarak, plak merkezi boyunca dikey deformasyonlar ve eğilme gerilmeleri görülmektedir.



Şekil 1.20. Pozitif sıcaklık gradyanı için plak mesafe fonksiyonu olarak plak merkezi boyunca dikey deformasyonlar ve eğilme gerilmeleri

Eisenmann, plak kenar ortasındaki sıcaklık gerilmesini, plak ortasındaki eğilme gerilmesinin %85 i kadar almaktadır [53].

#### Sıcaklık Gradyan Gerilmeleri (Alman Metodu)

Hollanda' da VNC (Cement Industry Association), donatısız beton yolların analitik tasarımını geliştirmiştir [54], [55]. Bu metot, sürekli donatılı beton kaplama da dahil edilerek genişletilmiştir [36].

Plak kenar orta noktasında eğilmede çekme gerilmesi  $\sigma_t$ , (1.11) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma_t = \frac{h\Delta t}{2} \alpha E \quad (1.11)$$

$h$ = Beton plak kalınlığı (mm)

$\Delta t$ = Pozitif sıcaklık gradyanı ( $^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ )

$\alpha$  = Lineer termal genişleme katsayısı ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

$E$ = Betonun Elastisite modülü (MPa)

Belirli bir limit değerinden ( $\Delta t$ ) daha büyük pozitif sıcaklık gradyanlarında, beton plak kenarı, alt yapı ile temasını kaybetmekte ve sonundaki destek uzunluğu (C) üzerinden desteklenmektedir. Bu durumda, kenar bölgesindeki beton kiriş, kendi ölü ağırlığı ile yüklenmektedir. Plak kenar orta noktasının altında eğilmede çekme gerilmesi  $\sigma_t$ , betonun birim ağırlığı 24 kN/m<sup>3</sup> olarak kabul edilmesi durumunda, (1.12) ve (1.13) eşitlikleri ile hesaplanmaktadır.

$$\text{Boyuna kenar: } \sigma_t = 1.8 \times 10^{-5} L'^2 / h \quad (1.12)$$

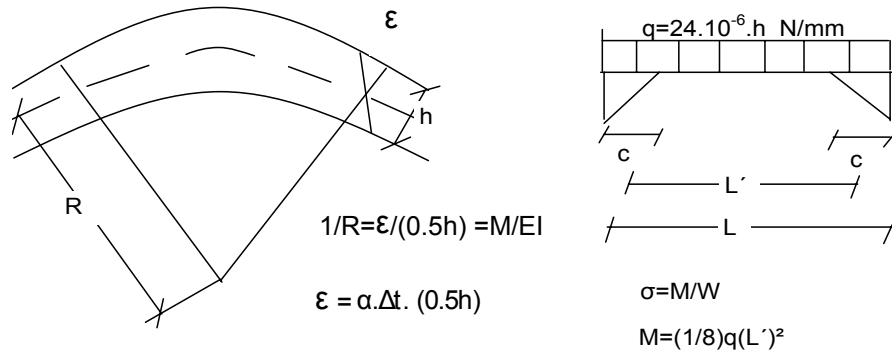
$$\text{Enine kenar: } \sigma_t = 1.8 \times 10^{-5} W'^2 / h \quad (1.13)$$

$L'$  = Boyuna doğrultuda plak mesafesi (mm)

$W'$  = Enine doğrultuda plak mesafesi (mm)

$h$  = Beton plak kalınlığı (mm)

Şekil 1.21. de, Alman beton yol tasarım metodunda, pozitif sıcaklık gradyanına bağlı plak kenar ortasının altında oluşan, eğilmede çekme gerilmesinin hesaplanmasında kullanılan eşitlikler görülmektedir.

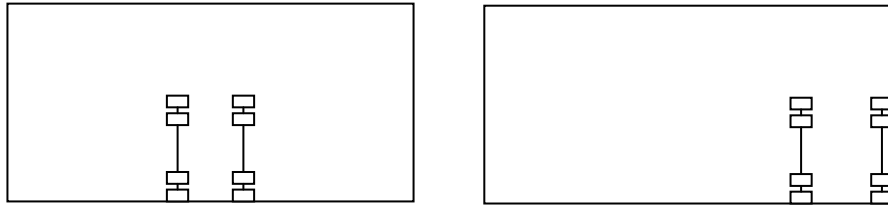


Şekil 1.21. Alman metodunda pozitif sıcaklık gradyanına ( $\Delta t$ ) bağlı plak kenar ortasının altında eğilmede çekme gerilmesinin hesaplanmasında kullanılan eşitlikler

### 1.8.3.2. Trafik Yüklemesinden Oluşan Gerilmeler

#### Dingil Gruplarının Kaplama Üzerinde Yerleştirilmesi

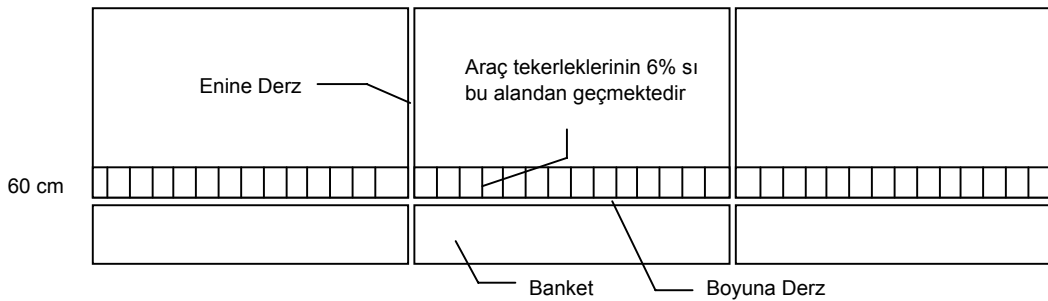
Packard ve Tayabji [13] yaptıkları çalışmada, tek ve çift dingil yüklemelerinde beton kaplamada oluşan en büyük çekme gerilmesinin, plak kenarında iki enine derzin ortasında olduğunu (Şekil 1.22.a.), derzli beton yollarda en büyük çökmenin ise plak köşesinde olduğunu tespit etmişlerdir (Şekil 1.22.b.).



a) Kritik eğilmede çekme gerilmesi yüklemesinin durumu      b) Kritik çökme için yüklemesinin durumu

Şekil 1.22. Beton kaplama üzerindeki kritik dingil yüklemesi

Packard ve Tayabji [13], oluşan trafiğin sadece 6% sınıfın trafik şeridinin kenar alanından geçtiğini kabul etmişlerdir (Şekil 1.23.). Kenar alanı, boyuna derzden veya plak kenarından 600 mm uzaklıkta, enine derz yönünde tanımlanmıştır. Lennie ve Bunker [14], Queensland eyaletindeki trafik ölçümlerinde, kenar alanından geçen trafik hacminin yukarıda bahsedilen kabulden daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir.



Şekil 1.23. Packard ve Tayabji'nin [13] kabulü

AASHTO' da [56], komşu beton plağın ve trafik şeridinin, yükleme altındaki beton plak üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla sonlu elemanlar modellemesi kullanılarak bir araştırma yapılmıştır. Bu çalışma için, 200 mm, 250 mm ve 300 mm kalınlıklarında derzli beton kaplama, 27-54 kPa/mm arasında değişen zemin tepki modülüne sahip temel üzerinde düşünülmüştür. 80 kN ağırlığındaki tek dingil yüklemesi plak kenarına uygulanmıştır (Şekil 1.22.a.). Beton plağın üst ve alt yüzeylerindeki sıcaklık farkı ise 11.1°C olarak kabul edilmiştir. Sonuçlar, komşu trafik şeridinin, yükleme altındaki beton plakta oluşan maksimum çekme gerilmesini etkilemediğini göstermiştir. Buna ek olarak, boyuna yöndeki farklı beton plakların hesaba katılmasının da maksimum çekme gerilmesine önemli bir etki yapmadığını göstermiştir.

### Dingil Grup Tipleri

Araç üreticileri, ağır araçlar için farklı dingil grup tipleri kullanmaktadır. Tayabji ve Colley [57], Packard ve Tayabji [58,13], Smith [59], Yu [60] ve AASHTO' daki [56] çalışmalar, çift tekerlekli, tek dingilli yükleme hesaba katılarak yapılmıştır. Tayabji ve Colley [57], Packard ve Tayabji [58] ve AASHTO [56] tarafından, çift dingil yüklemesinin beton kaplama üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Packard ve Tayabji [13] ve AASHTO [56] çalışmalarında üç dingilli yükleme de kullanılmıştır.

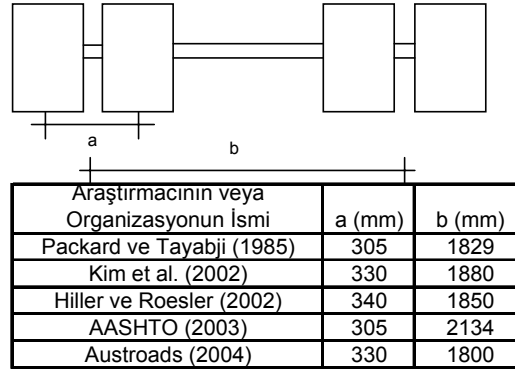
### Dingil Gruplarındaki Dingil Mesafeleri

Packard ve Tayabji [13], üçlü dingil grubunda, dingil mesafesini 1220 mm – 1372 mm aralığında, çift dingil grubunda ise dingil mesafesini 1270 mm olarak almıştır. Gillespie [61] ve AASHTO [56], kritik plak değerlerine ulaşmak için 1295.4 mm dingil mesafesinin kullanılmasını önermektedir. Bunun yanında, Kim [62] ve Hiller ve Roesler [63] kritik dingil mesafesi için 1320 mm yi kullanmışlardır.

### Dingil Genişliği ve Çift Tekerlekler Arasındaki Mesafe

Lee ve Carpenter [64] ve Packard ve Tayabji [13], çift tekerlekler arası mesafeyi ve dingil genişliğini sırasıyla 305 mm ve 1829 mm olarak kabul etmişlerdir. Kim [62], bu mesafeleri 330 mm ve 1880 mm olarak ele alırken, Hiller ve Roesler [63], 340 mm ve

1850 mm olarak kabul etmiştir. AASHTO [56], tasarım hesaplarında çift tekerleklerin arasındaki mesafeyi merkezden merkeze 305 mm olarak alırken, dingil genişliğini 2134 mm olacak şekilde artırmıştır. Austroads [65], bu mesafelerin sırasıyla 330 mm ve 1800 mm olarak kabul edilmesini önermektedir. Şekil 1.24., bu kabulleri özetlemektedir.



Şekil 1.24. Çift tekerlekli tek dingil için kabul edilen mesafeler

### Tekerlek Hava Basıncı

Araç yükünü kaplamaya aktarmak için farklı tekerlek tipleri kullanılmaktadır. Tekerlek ölçüleri genel olarak, tekerlek genişliği, uzunluğu ve temas alanı olarak tanımlanmaktadır [61]. Tekerlek hava basıncı, tekerlek-kaplama temas alanını ve gerilmeleri etkilemektedir. Austroads [66], ağır araçlar için tekerlek basıncının 500 kPa ile 1000 kPa arasında değiştiğini belirtmektedir. Tasarım hesaplarında, tekerlek basıncının 750 kPa olarak alınması uygun bir değer olarak kabul edilebilir. Shackel [67], endüstriyel kaplamalarda kullanılan ağır araçlar için, bu basıncın 700 kPa civarında değiştiğini belirtmektedir.

### Tekerlek-Kaplama Temas Gerilmesi

Lippmann [68], De Beer [69] ve Douglas [70], farklı tekerlek tiplerinde yaptıkları çalışmalar neticesinde, tekerlek ile kaplama yüzeyi temas gerilmesinin, özellikle tekerlek hava basıncı düşük olduğunda, sabit olmadığı sonucuna varmışlardır. Marshek [71] ve Gillespie [61], tekerlek-kaplama temas gerilmesinin sabit olmadığını ve tekerlek temas gerilmesinin beton kaplama üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermiştir. Tasarım

hesaplarını basitleştirmek için beton kaplamalarda, tekerlek temas gerilmesi sabit olarak alınabilir.

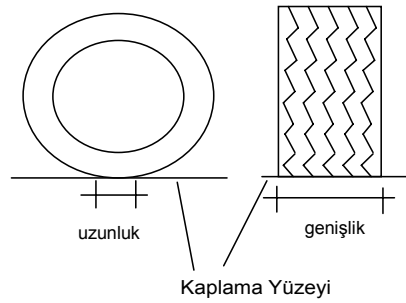
### Tekerlek-Kaplama Temas Yüzey Şekli

Handson ve Seeds [72], tekerlek-kaplama temas alanının, dairesel bir şekilden daha çok dikdörtgene daha yakın olduğunu belirtmektedir. Shackel [67], tekerlek izinin eliptik bir şekil olduğunu, fakat hesaplamalarda kolaylık sağlaması amacıyla, aynı alana sahip dikdörtgen şeklin kullanılması önermektedir. Tekerlek temas alanı, (1.14) den hesaplanabilmektedir.

$$A_t = \frac{W_l}{T_p} \quad (1.14)$$

Eşitlikte,  $A_t$ , tekerlek temas alanı;  $W_l$ , tekerlek yükü;  $T_p$ , tekerlek basıncıdır.

Packard ve Tayabji [13], tekerlek temas alanının enini ve boyunu sırasıyla 178 mm ve 254 mm olarak ele almıştır. Handson ve Seeds [72], bu değerleri sırasıyla, 196 mm ve 250 mm olarak kabul etmiştir. Gillespie [61], tekerlek temas alanını, çift tekerlekler için 203 mm x 203 mm lik bir kare olarak, tek tekerlek içinse 203 mm x 229 mm olarak değerlendirmiştir. Kim [62] ise, tekerlek temas alanını 203 mm x 178 mm lik bir dikdörtgen olarak almıştır. Şekil 1.25. de, örnek bir tekerlek-kaplama temas alanı görülmektedir.



Şekil 1.25. Tekerlek-kaplama temas alanı genişlik ve uzunluğu



Douglas [70], yaptığı deneysel çalışmada, farklı hava basıncındaki tekerlekler kullanarak, tekerlek ağırlığı ve tekerlek temas alan uzunluğunu ilişkilendiren bir grafik elde etmiştir. Bu çalışma, tekerlek hava basıncının artması durumunda, temas alan uzunluğunun azaldığını göstermiştir. Fakat söz konusu çalışma, tekerlek basıncının 480 kPa dan daha büyük değerlere çıkması durumunda, tekerlek temas uzunluğunun çok daha az küçüldüğünü de göstermektedir. 22.5 kN ağırlığındaki tekerlek için, tekerlek basıncının 480 kPa dan 690 kPa değerine çıkması durumunda, tekerlek temas uzunluğunun 240 mm den 230 mm ye düştüğü görülmüştür.

Beton plağın iç, kenar ve köşe noktalarında, maksimum eğilmede çekme gerilmesi “ $\sigma$ ” ve maksimum çökme “ $w$ ” için birçok modifiye edilmiş Westergaard eşitlikleri farklı kaynaklarda mevcuttur. En önemli eşitlikler aşağıdadır:

#### İç Yükleme

Klasik Teori, Dairesel Yükleme Alanı [73], [74]:

$$\sigma = \frac{3P(1+\nu)}{2\pi h^2} \left\{ \ln\left(\frac{2l}{a}\right) + 0.5 - \gamma \right\} \quad (1.15)$$

$$W = \frac{P}{8kl^2} \left[ 1 + \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln\left(\frac{a}{2l}\right) + \gamma - 1.25 \right\} \left(\frac{a}{l}\right)^2 \right] \quad (1.16)$$

#### Kenar Yükleme

Klasik Teori, Yarı-Dairesel Yükleme Alanı [73], [74]:

$$\sigma = \frac{0.529P}{h^2} (1 + 0.54\nu) \left\{ \log\left(\frac{Eh^3}{ka_2^4}\right) - 0.71 \right\} \quad (1.17)$$

$$w = \frac{P}{\sqrt{6kl^2}} (1 + 0.4\nu) \quad (1.18)$$

Yeni Teori, Dairesel Yükleme Alanı [74], [75]:

$$\sigma = \frac{3(1+\nu)P}{\pi(3+\nu)h^2} \left\{ \ln\left(\frac{Eh^3}{100ka^4}\right) + 1.84 - \frac{4}{3}\nu + \frac{1-\nu}{2} + 1.18(1+2\nu)\frac{a}{l} \right\} \quad (1.19)$$

$$w = \frac{\sqrt{2+1.2\nu}P}{\sqrt{Eh^3k}} \left\{ 1 - (0.76 + 0.4\nu)\frac{a}{l} \right\} \quad (1.20)$$

Yeni Teori, Yarı Dairesel Yükleme Alanı [74], [75]:

$$\sigma = \frac{3(1+\nu)P}{\pi(3+\nu)h^2} \left\{ \ln\left(\frac{Eh^3}{100ka_2^4}\right) + 3.84 - \frac{4}{3}\nu + 0.5(1+2\nu)\frac{a_2}{l} \right\} \quad (1.21)$$

$$w = \frac{\sqrt{2+1.2\nu}P}{\sqrt{Eh^3k}} \left\{ 1 - (0.323 + 0.17\nu)\frac{a_2}{l} \right\} \quad (1.22)$$

Sonlu eleman ve sonlu farklar hesaplamaları, kenar yüklemesi için gösterilen klasik Westergaard eşitliklerinin (1.17), (1.18) doğru olmadığını göstermektedir. Bunun aksine, kenar yüklemesi için yeni Westergaard eşitliklerinin (1.19), (1.20), (1.21), (1.22), sonlu eleman ve sonlu farklarla benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Dairesel ve yarı dairesel yüklemeler arasındaki farkın değeri düşüktür.

Köşe Yüklemesi

Dairesel Yükleme Alanı [74], [75]:

$$\sigma = \frac{3P}{h^2} \left\{ 1 - \left(\frac{a_1}{l}\right)^{0.6} \right\} \quad (1.23)$$

$$w = \frac{P}{kl^2} \left\{ 1.1 - 0.88\left(\frac{a_1}{l}\right) \right\} \quad (1.24)$$

Köşeden maksimum gerilme noktasına olan uzaklık:

$$x_1 = 2\sqrt{a_1 l} \quad (1.25)$$

(2.15 – 2.25) de kullanılan değerler:

$\sigma$  = Eğilmede çekme gerilmesi (MPa)

w = Çökme

P = Tek teker yüklemesi (N)

p = Temas basıncı (MPa)

$a = \sqrt{\frac{P}{\pi p}}$  = Dairesel yükleme alanının yarıçapı

$a_2 = \sqrt{\frac{2P}{\pi p}}$  = Yarı dairesel yükleme alanının yarıçapı

E = Betonun Elastisite modülü (MPa)

$\nu$  = Betonun poisson oranı

h = Beton plak kalınlığı (mm)

k = zemin yatak katsayısı (N/mm<sup>3</sup>)

$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k}}$  = Beton plağın bağıl sertlik yarıçapı (mm)

$\gamma$  = Euler sabiti (=0.5772156649)

$a_1 = a\sqrt{2}$  = Köşeden, köşe yükleme merkezine olan uzaklık (mm)

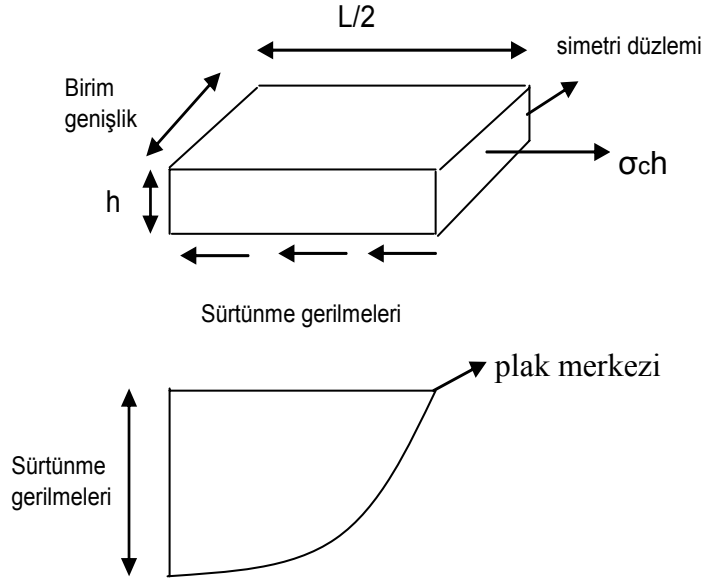
$x_1$  = Köşe yüklemesine bağlı, köşeden, eğilmede çekme gerilmesinin maksimum olduğu noktaya olan uzaklık (mm)

### 1.8.3.3. Sürtünmeden Dolayı Oluşan Gerilme

Şekil 1.26. da, beton plakla zemin arasındaki sürtünme gerilmeleri ifade edilmektedir. Sürtünme gerilmesi merkezde sıfırken, plak kenarına doğru artmaktadır. Beton plak, sürtünme kuvvetini (1.26) eşitliğinde gösterildiği üzere karşılamaktadır.

$$\sigma_c = \frac{\gamma_c L f_a}{2} \quad (1.26)$$

Burada,  $\sigma_c$  betondaki gerilme,  $\gamma_c$  betonun birim ağırlığı, L plak uzunluğu,  $f_a$  ise betonla zemin arasındaki ortalama sürtünme katsayısıdır ve yaklaşık olarak 1.5 alınmaktadır. (1.26) eşitliğinden anlaşılacağı üzere, sürtünmeden dolayı oluşan beton gerilmesinde plak kalınlığının etkisi yoktur.

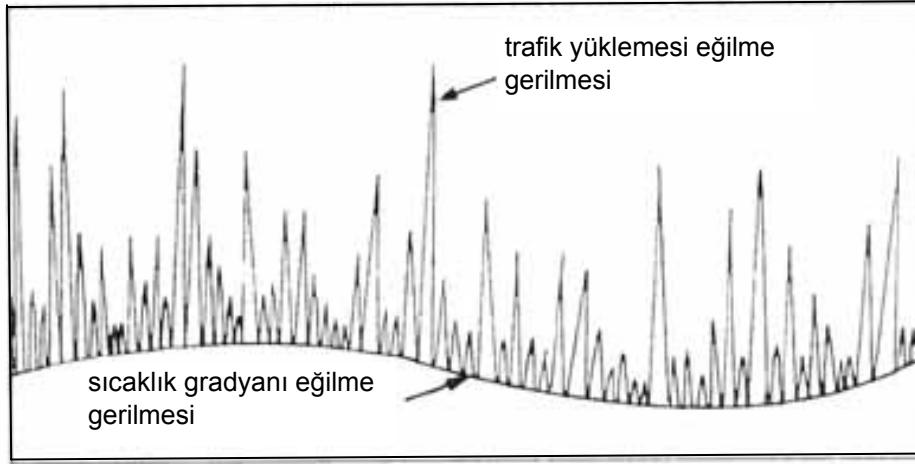


Şekil 1.26. Plakta Oluşan Sürtünme

Çelik, beton kaplamalarda donatı, bağlantı elemanı veya kayma demiri olarak kullanılmaktadır. Boyuna ve enine donatılar ve boyuna derzlere yerleştirilen bağlantı demirleri, sürtünmeden oluşan gerilmelere dayalı tasarlanmaktadır. Kayma demirlerinin tasarımı ise sürtünmeye bağlı gerilmelere bağlı değildir.

#### 1.8.4. Yorulma Analizi

Donatısız beton yol, trafik yüklemesinden ve dalgalı sıcaklık gradyanından (hava sıcaklığındaki değişimlerinden kaynaklı) dolayı, dalgalı yüklemelere maruz kalmaktadır. Sıcaklık gradyanındaki değişim frekansı, trafik yüklemesi frekansına göre çok küçüktür. Bu sebepten, beton kaplamadaki yüklenme modellenirken, sıcaklık gradyanı eğilme gerilmesi ( $\sigma_t$ ), uzun dalga boyuyla, trafik yüklemesi eğilme gerilmesi ( $\sigma_v$ ) ise kısa dalga boyu ile gösterilmektedir (Şekil 1.27) [76].



Şekil 1.27. Beton kaplama üzerinde yüklenme modelinin şematik gösterimi [76]

Beton yol tasarımında en önemli unsur, betonun çatlamasını önlemektir. Bu sebepten dolayı dayanım analizleri ve birçok kez yüklenme olacağından, beton yorulma analizleri de yapılmalıdır. Bu analizler, kaplamanın kritik bölgelerinde yapılmaktadır:

- Donatısız beton yollarda
  - a. Boyuna kenarın ortasında (serbest kenar ve/veya boyuna derzde)
  - b. Enine derzde tekerlek izinin ortasında
- Donatılı beton yollarda
  - a. Enine çatlaklarda tekerlek izinin ortasında

Beton plağın her bir kritik bölgesinde, her bir pozitif sıcaklık gradyanı ( $\Delta_{ii}$ ) için sıcaklık gradyan gerilmesi ( $\sigma_{ii}$ ) ve ayrıca her bir tekerlek yükü ( $P_i$ ) için trafik yük

gerilmesi ( $\sigma_{vi}$ ) hesaplanmalıdır. Daha sonra, izin verilen yük tekrar sayısı ( $N_i$ ) hesaplanarak, her bir bölgede, tekerlek yükü ( $P_i$ ) ve sıcaklık gradyan ( $\Delta_{ti}$ ) kombinasyonu için eğer varsa yük transferini de dikkate alarak yorulma analizi yapılmaktadır. Tasarım kriteri:

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1.0 \quad (1.27)$$

$n_i$  = oluşan tekerlek yük ( $P_i$ ) tekrarı; örneğin, kaplama servis süresince sıcaklık gradyan gerilmesi ( $\sigma_{ti}$ ) varken, trafik yük gerilmesi ( $\sigma_{vi}$ )

$N_i$  = izin verilen tekerlek yük ( $P_i$ ) tekrarı; örneğin, yorulmaya kadar sıcaklık gradyan gerilmesi ( $\sigma_{ti}$ ) varken, trafik yük gerilmesi ( $\sigma_{vi}$ )

İzin verilen tekerlek yük miktarı N, farklı ülkeler tarafından beton yorulması ile ilişkilendirilmiş ve Tablo 1.8. deki eşitlikler oluşturulmuştur [77].

Tablo 1.8. Beton yol tasarım metotlarında beton yorulması ile yol servis ömrü boyunca izin verilen yük tekrar sayısı ilişkisi

No	Kullanıldığı Yer	Yorulma Kuralı	Notlar
1	PCA (Amerika)	log N=11.73-12.08( $\sigma_p$ /MR) log N=(4.2577/(( $\sigma_p$ /MR)-0.4325))x3.268 log N=limitsiz	Eğer ( $\sigma_p$ /MR)>0.55 Eğer 0.45<( $\sigma_p$ /MR)<0.55 Eğer ( $\sigma_p$ /MR)<0.45
2	Darter (Amerika)	log N=16.61-17.61xSR	Hata oranı %24
3	Vaverka (Belçika)	log N=20-20( $\sigma$ /MR)	$\sigma = \sigma_p$ ; Eğer plak uzunluğu<6 m $\sigma = \sigma_{max}$ ; Eğer plak uzunluğu>6 m
4	Iwana (Japonya)	log N=16.72-16.13xSR	Hata oranı %15
5	VNC (Hollanda)	log N=12.6(1-0.8 $\lambda$ /B)	$\lambda = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/MR$ B=0.8- $\sigma_{min}/MR$
6	Domenic et al. (İtalya)	log N=10.48 (1-SR)/(1-R)	
7	Faraggi et al. (İspanya)	log N=11 (1-SR)/(1-R)	
8	Yao (Çin)	log N=13.02 (0.944-SR)/(1-R)	

Not: SR=  $\sigma_{max}/MR$ ; R= $\sigma_{min}/\sigma_{max}$ ;  $\sigma_{max} = \sigma_p + \sigma_{\Delta t}$   
MR=Betonun 28 gün sonunda eğilmede çekme dayanımı (Mpa)  
 $\sigma_p$ =Trafik yüklemesinden doğan gerilme  
 $\sigma_{\Delta t}$ =Sıcaklık gradyanından doğan gerilme  
N=İzin verilen yük tekrarı

### 1.8.5. Kayma Demir Tasarımı ve Enine Derzler

Kayma demirleri ve derzler, genel olarak deneyimlere ve bazı teorik metotlara dayanmaktadır. Bazı kaynaklarda, kayma demirinin boyutunun plak kalınlığına bağlı olduğu belirtilmektedir [11]. PCA' da [78], 254 mm den daha az kalınlıktaki beton yollar için 32 mm çapında, 254 mm ve daha fazla kalınlıktaki beton yollar için ise 38 mm çapında kayma demirlerinin kullanılmasını tavsiye edilmektedir. Amerika' da kullanılan kayma demiri ASTM A615 Grade 40 (akma dayanımı 280 MPa) yada Grade 60 (akma dayanımı 420 MPa) dır.

Kayma demir çaplarının genel olarak, 32 mm – 38 mm arasında olduğu, uzunluklarının 460 mm olduğu ve 305 mm aralıkta konulmaları gerektiği belirtilmektedir [79]. Şekil 1.28. de örnek kayma demirleri görülmektedir.



Şekil 1.28. Kayma demir uygulaması

Kayma demirleri, enine derzler boyunca yükü bir sonraki plağa iletmek için kullanılmaktadır. Derzdeki gerilme ve çökmeler, yük iki plak tarafından da taşındığı zaman, tek bir plağın taşıması durumuna göre çok daha fazla azalmaktadır.

Beton, çelikten daha zayıf olduğu için, ihtiyaç duyulan kayma demirlerinin boyutu ve aralığı, betonla kayma demiri arasındaki gerilmeler dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Huang' da [11], izin verilen gerilmenin (1.28) eşitliği ile hesaplanacağı belirtilmektedir.

$$f_b = ((4 - d)/3)fc' \quad (1.28)$$

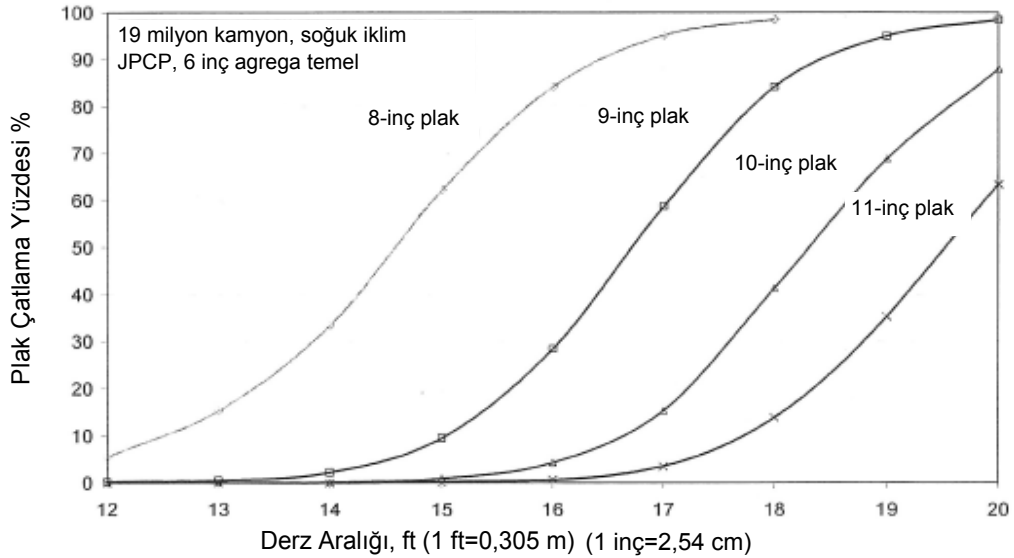
Burada,  $f_b$ , izin verilen gerilme (psi),  $d$ , kayma demir çapı (in),  $fc'$  (psi) ise betonun basınç dayanımıdır.

Friberg' de [80], kayma demirinin, elastik zemin üzerinde kiriş gibi çalıştığı kabul edilmektedir. Derz yüzeyindeki gerilmenin,  $\sigma_0$  (N/mm<sup>2</sup>), bu noktadaki beton deformasyonu “yo” (mm) ile, direkt olarak bağlantılı olduğu kabul edilmekte ve (1.29) eşitliği verilmektedir.

$$\sigma_0 = k \cdot yo \quad (1.29)$$

$k$ = zemin yatak katsayısı (N/mm<sup>3</sup>)

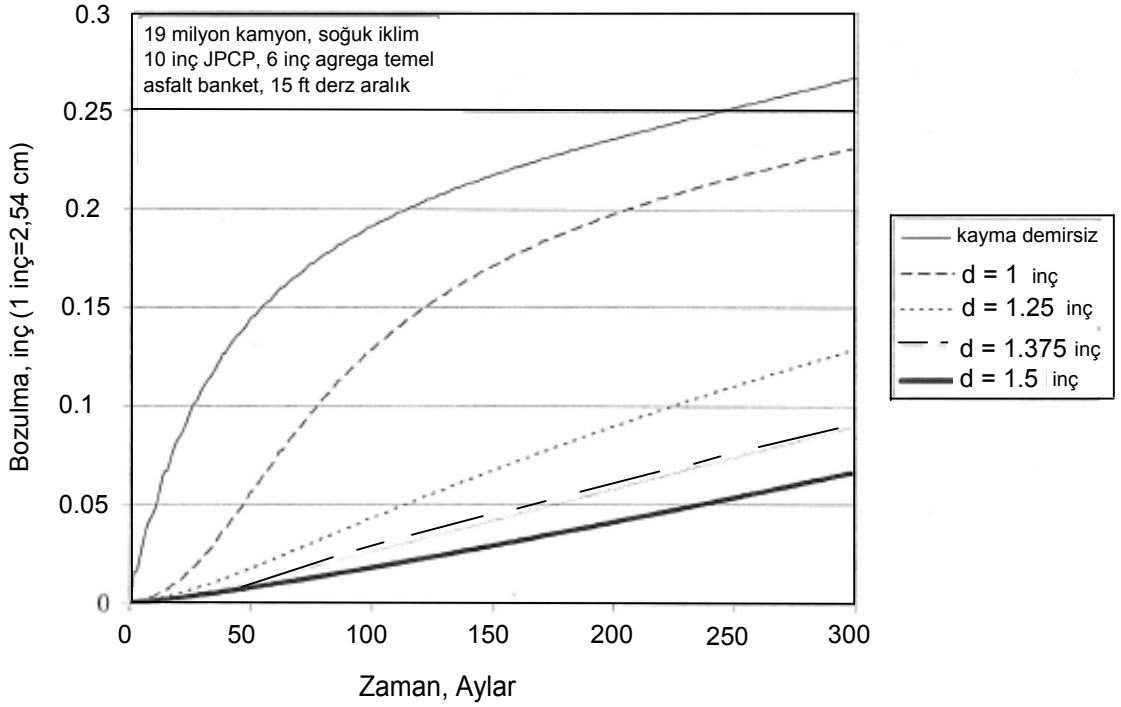
AASHTO' da [81], beton kalınlığıyla enine derz aralığı arasında bir ilişki olduğu vurgulanmakta ve Şekil 1.29. da, farklı beton kalınlıklarında enine derz aralıklarına göre plak çatlama oranları verilmektedir.



Şekil 1.29. Farklı beton kalınlıklarında enine derz aralıklarına göre plak çatlama oranları



AASHTO' da [81], kayma demir çapının artırılmasının, dilatasyon yerlerindeki bozulmaları azaltacağı belirtilmektedir. Kayma demir aralığının tipik olarak 30.5 cm olduğu, derzlerdeki bozulmaların kayma demir çapına çok hassas şekilde duyarlı olduğu vurgulanmaktadır. Şekil 1.30. da, zamana bağlı derzlerdeki bozulmayla kayma demir çapı ilişkilendirilmiştir. Beton plak kalınlığı artırılırken, buna bağlı olarak kayma demir çapı artırılmazsa, plak kalınlığına bağlı olan demirin etkin alanındaki azalmadan dolayı, derz yerlerinde beklenenden bir miktar daha fazla bozulmalar gözleneceği belirtilmektedir.



Şekil 1.30. Zamana bağlı derzlerdeki bozulmayla kayma demir çapı ilişkisi

AASHTO' da [81], 4.58 m aralıklı derzdeki bozulmanın, 3.8 mm yi geçmemesi için, 25.4 cm kalınlığındaki bir plakta kullanılması gereken kayma demir çapının 38 mm olması gerektiği belirtilmektedir. Amerika' da farklı eyaletlerde kullanılan kayma demiri çapları Tablo 1.9. da verilmektedir [82].

Tablo 1.9. Amerika eyaletlerinde kaplama kalınlığına göre kayma demiri çapları

	6"	6.5"	7"	7.5"	8"	8.5"	9"	9.5"	10"
Tavsiye Edilen	1	1	1	1	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250
California	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.5	1.5	1.5	1.5
Iowa	0.750	0.750	0.750	0.750	1.250	1.250	1.250	1.250	1.5
Illinois	1	1	1.250	1.250	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Indiana	1	1	1	1	1	1	1.250	1.250	1.250
Michigan	1	1	1	1	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250
Minnesota	1	1	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250
Missouri	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250
North Dakota	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250
Ohio	1	1	1	1	1	1.250	1.250	1.250	1.250
Wisconsin			1	1	1.250	1.250	1.250	1.250	1.5

Yapılan bir çalışmada [83], 32 mm çapında veya daha büyük çapta kayma demiri kullanılması gerektiği, 25 mm çapında veya daha küçük çapta kayma demiri kullanılması durumunda, kayma demirini kaplayan betonda yüksek gerilmeler oluşacağı belirtilmektedir. Ağır trafik altında, kayma demirlerinin arasının 305 mm, daha hafif trafik altında ise 380 mm olması gerektiği vurgulanmaktadır.

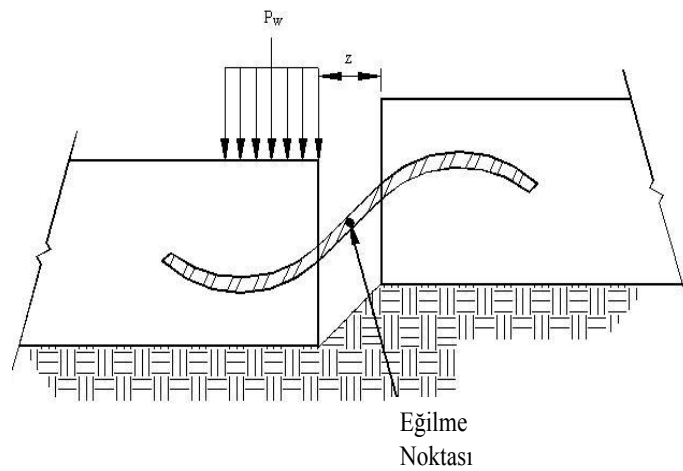
Yapılan bir saha çalışmasında [84], 305 mm aralığında ve 380 mm aralığında yerleştirilen kayma demirlerinin aynı performansı verdiği, sürüş konforunun iyi olduğu, kayma demir aralığının 460 mm çıkarılması durumunda ise, derzlerde bozulmalar görüldüğü ve sürüş konforunun bozulduğu sonucuna varılmıştır. Aynı çalışmada, eliptik şeklindeki kayma demirlerinin, yuvarlak kayma demirlerine göre, derz bozulmalarına karşı daha etkili sonuçlar verdiği sonucuna varılmıştır. Şekil 1.31. de eliptik şeklindeki kayma demirleri görülmektedir.



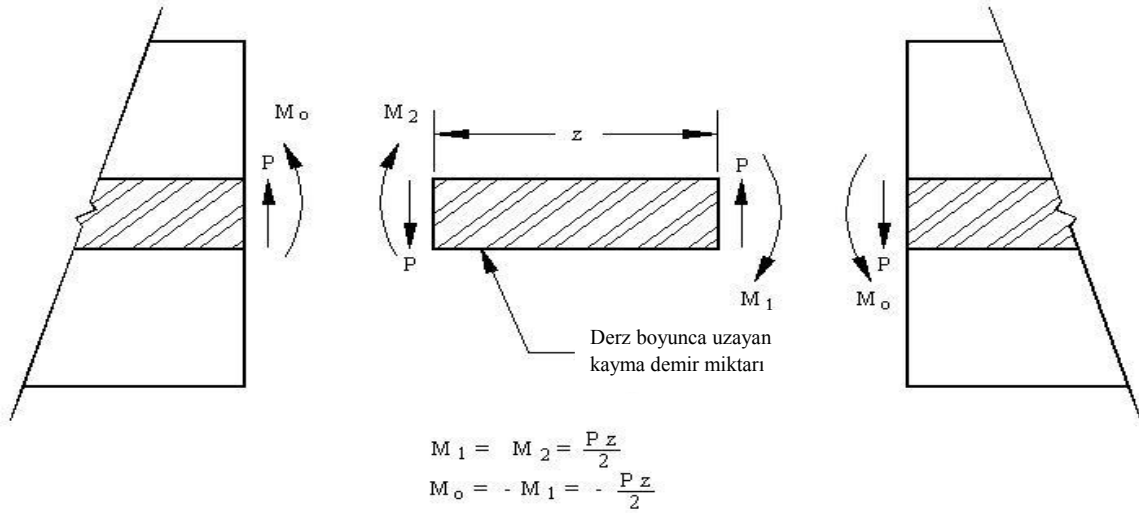
Şekil 1.31. Eliptik şeklinde kayma demirleri

AASHTO' da [81], enine derzlerin çatlakları toplayacak şekilde en az derinlikte kesilmesi tavsiye edilmekte, birçok gözlem ve deneyimler sonucu bu derinliğin genel olarak, plak kalınlığının dörtte biri kadar olduğu belirtilmektedir. Geçirgen veya stabilize temellerde bu derinliğin, plağın üçte biri kadar olması önerilmektedir. Boyuna derzlerin ise, sıcaklık değişiminden kaynaklanan kıvrılma gerilmelerinden dolayı, çoğunlukla enine derzlerden daha derin kesilmesi gerektiği (özellikle yol ile banket birleşim yerinde) ve ideal derinliğin ise plağın üçte biri kadar olduğu belirtilmektedir.

Porter ve Guinn' de [85], kayma demirinin yükleme altında alacağı durum Şekil 1.32. de, oluşan momentler ise Şekil 1.33. de gösterilmektedir.



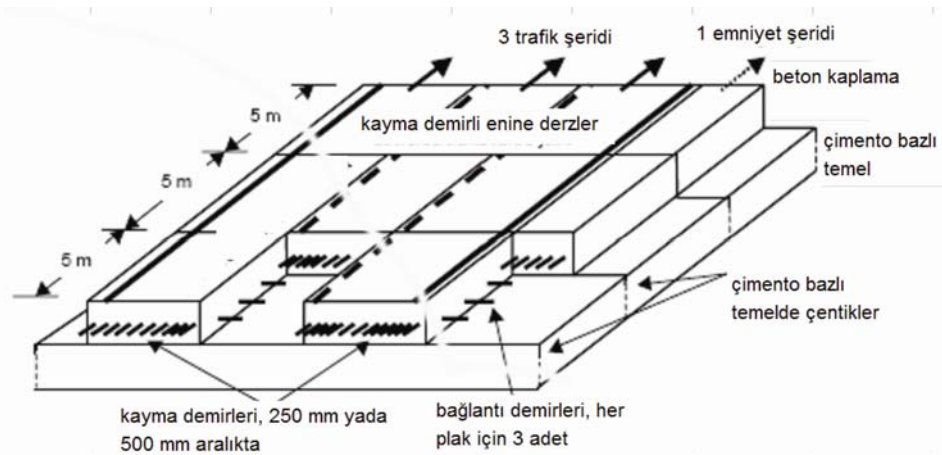
Şekil 1.32. Kayma demirinin yükleme altında alacağı durum



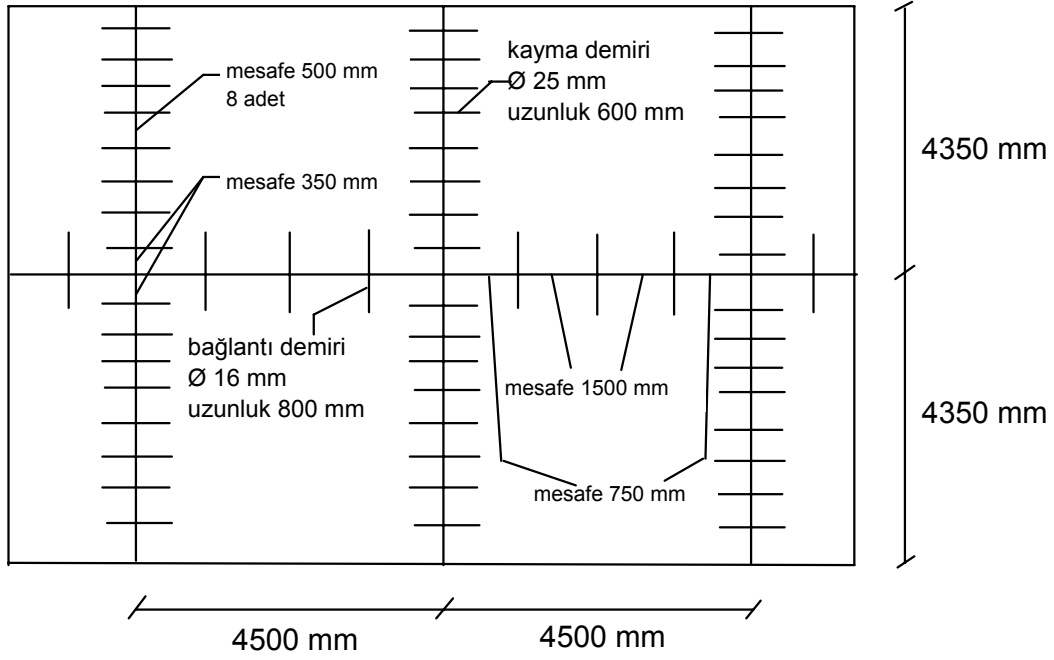
Şekil 1.33. Kayma demirinde yükleme altında oluşan momentler

Almanya’ da, ağır trafik altındaki yollarda 25 mm çapında ve 25 cm aralıklı kayma demirleri kullanılmaktadır. Hafif trafik altında ise bu aralık 50 cm dir. Kayma demirleri, 0.3 mm kalınlığındaki plastiklerle kaplanmakta ve bu sayede kayma demirlerinde oluşabilecek paslanma ve demirle betonun bağı engellenmektedir. Boyuna derzlerin açılmasını engellemek için, 800 mm uzunluğunda, 20 mm çapında bağlantı demirleri kullanılmaktadır. Her 5 metrelik plakta, 3 adet bağlantı demiri kullanılmaktadır [86].

Şekil 1.34. [86] ve Şekil 1.35. de [39], Almanya’ da uygulanmakta olan örnek bir derzli donatısız beton yol kesiti görülmektedir:

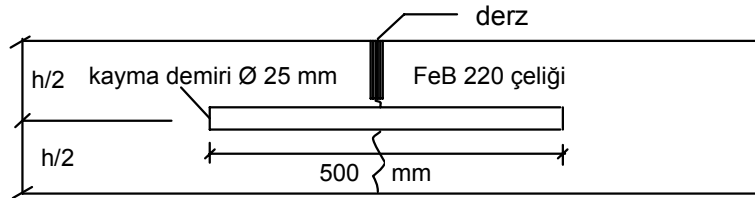


Şekil 1.34. Almanya’ da örnek beton yol kesiti



Şekil 1.35. İki şeritli endüstriyel yolda bağlantı ve kayma demirli örnek bir beton yol kesiti

Houben' e [39] göre, iyi bir yük transferi için kayma demirleri, enine kesilen derzlerde kaplamanın ortasına gelecek şekilde konmalıdır. Kayma demiri, beton plak kalınlığının yaklaşık %10 u kadar olan  $\varnothing$  çapında çelik çubuktur (genelde yol kaplamasında  $\varnothing=25$  mm, havaalanı kaplamalarında  $\varnothing=32$  mm) ve uzunluğu 50-60 cm arasında değişmektedir. Kayma demirleri, mutlak sıcaklıklardaki değişimlerden kaynaklanan yatay hareketleri engellememelidir. Bu sebepten dolayı, betonla yapışmasını engellemek için, bitümlü ya da plastik bir malzemeyle kaplanmaktadır. Şekil 1.36. da kayma demirli enine derz kesiti görülmektedir [87].



Şekil 1.36. Almanya' da kayma demirli enine büzülme derz kesiti

### 1.8.6. Bağlantı Demirleri ve Boyuna Derzler

Bağlantı demirleri (Şekil 1.37.), iki plağı birbirine bağlamak için boyuna derz boyunca yerleştirilmektedir. Bu sayede, derz sıkıca bağlanmış olmakta ve derz boyunca yük transferi sağlanmış olmaktadır. Bağlantı demirleri için gerekli olan çelik, boyuna ve enine donatı hesaplamasına benzer şekilde yapılmaktadır. Tasarım hesabında, (1.30) eşitliği kullanılmaktadır.

$$A_s = \frac{\gamma_c h L' f_a}{f_s} \quad (1.30)$$

Bu eşitlikte  $A_s$ , plağın birim uzunluğu için gerekli olan çelik alanını göstermektedir.  $L'$ , boyuna derzden bağlantı demiri olmayan serbest kenara kadar olan uzaklığı göstermektedir. İki veya üç şeritli karayolunda  $L'$ , şerit genişliği olarak alınmaktadır. Eğer bağlantı demiri dört şeritli karayolunda üç adet boyuna derz için de kullanılacaksa  $L'$ , dış taraftaki iki derz için şerit genişliği kadar, içerdeki derz için ise şerit genişliğinin iki katı kadar alınmaktadır [11].



Şekil 1.37. Beton yolda bağlantı demirleri

Bağlantı demirinin uzunluğu, izin verilen bağlantı gerilmesine bağlıdır. Bu değer genellikle 2.4 MPa olarak alınmaktadır. Bağlantı demirinin uzunluğu, (1.31) eşitliği ile bulunmaktadır.

$$t = \frac{1}{2} (f_s \cdot d / \mu) \quad (1.31)$$

Burada  $t$ , bağlantı elemanının uzunluğu,  $f_s$  izin verilen çelik gerilmesi,  $d$ , bağlantı elemanının çapı,  $\mu$  ise izin verilen bağ gerilmesidir.

$t$  uzunluğunun, yerleştirme sırasında donatının tam doğru olarak yerleştirilmesinde çıkabilecek sorunlar da düşünülerek 76 mm daha uzatılması önerilmektedir. Genel olarak 13 mm çapında, 914 mm uzunluğunda ve 762 – 1016 mm aralıklarla bağlantı elemanı kullanılması tavsiye edilmektedir [11].

Mallela ve Gotlif [88], bağlantı demirleri üzerine bir çalışma yapmış ve boyutlandırmada genel olarak, Tablo 1.10. un dikkate alınmasını önermişlerdir.

Tablo 1.10. Farklı temel tiplerine göre bağlantı demirleri

Temel Tipi	Bağlantı Demir Çapı	Bağlantı Demir Aralığı, in	Demir Uzunluğu, in	Çelik Tipi
Asfalt Temel (6 inç)	#6 (6/8 inç)	36	24	Grade 60
CTB Temel (6 inç)	#6 (6/8 inç)	36	24	Grade 60
CTB Temel (5-4 inç)	#5 (5/8 inç)	36	24	Grade 60
Geçirgen Çimento uygulamalı Temel (6 inç)	#6 (6/8 inç)	36	24	Grade 60
Geçirgen Çimento uygulamalı temel (4-5 inç)	#5 (5/8 inç)	36	24	Grade 60
Toprak çimento esaslı temel (4-5-6 inç)	#5 (5/8 inç)	36	24	Grade 60
Bağsız temel (6 inç)	#4 / #5 (4/8, 5/8 inç)	45	24	Grade 40/60

(1 inç=2,54 cm)

ASTM A615 Grade 40 in akma dayanımı 280 MPa ve Grade 60 in akma dayanımı 420 MPa dır.

Florida DOT kaplama tasarımında (Florida Department of Transportation (FDOT)) [89], sürtünme katsayısı 1.5 olarak kabul edilmekte, Grade 40 çeliği kullanılmakta, demir boyu, #4 (13 mm) demiri için 25 inç (63 cm), #5 (16 mm) demiri için 30 inç (76 cm) olarak kabul edilmekte, bağlantı demir aralıkları için ise Tablo 1.11. ve Tablo 1.12. nin kullanılması önerilmektedir.

Tablo 1.11. Florida DOT #4 (4/8 inç) demiri için maksimum bağlantı demir aralığı

Kaplama kalınlığı (inç) (1 inç=2,54 cm)	Serbest Kenara olan uzaklık (ft) (1 ft=30,5 cm)		
	12	14	24
6	24	24	24
7	24	24	22
8	24	24	19
9	24	24	17
10	24	24	15
11	24	24	14
12	24	22	13
13	24	21	12
14	22	19	11
15	21	18	10



Tablo 1.12. Florida DOT #5 (5/8 inç) demiri için maksimum bağlantı demir aralığı

Kaplama kalınlığı (inç) (1 inç=2,54 cm)	Serbest Kenara olan uzaklık (ft) (1 ft=30,5 cm)		
	12	14	24
6	38	38	38
7	38	38	35
8	38	38	31
9	38	38	27
10	38	38	24
11	38	38	22
12	38	35	20
13	38	32	19
14	35	30	17
15	33	28	16

AASHTO' da [81], bağlantı demirlerinin ağır trafik altındaki yollarda, 13 mm çapında, 76 cm boyunda ve 76 cm aralığında konulmasının yeterli performansı sağlayacağı belirtilmektedir.

TS500 de kenetlenme boyu için öngörülen donatı boyu,

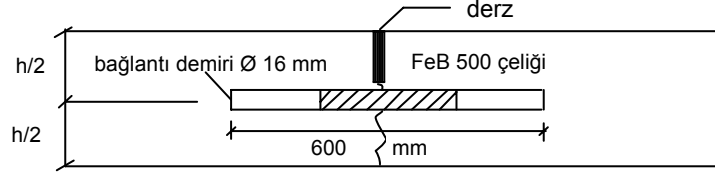
$$l_b \geq 0,12 (f_{yd}/f_{ctd}) \varnothing \quad (1.32)$$

$$l_b \geq 20 \varnothing \quad (1.33)$$

$\varnothing < 32 \text{ mm} \Rightarrow$  kenetlenme boyu = 1,4 lb olarak gösterilmektedir ( $\varnothing$ , donatı çapını göstermektedir) [90].

Almanya' da bağlantı demirleri,  $\varnothing=16 \text{ mm}$  çapında ve 60 cm uzunluğundadır. Her iki uç noktada bağlantı demirleri betonun içine sabitlenmekte olup, bağlantı demirinin üçte biri kadar olan orta kısmı kaplanmaktadır (betonla bağ kurması engellenir). Bu işlem, değişen mutlak sıcaklıklara bağlı oluşan beton plakların hareketlerini yeterli uzunluğa

dağıtmak için yapılmaktadır. Bu sayede, bağlantı demirinin akması oluşmamaktadır. Bağlantı demirleri, her plak için boyuna derzlerde genellikle 3 tane olacak şekilde konulmaktadır. Şekil 1.38. de, Almanya’ da uygulanmakta olan örnek bir bağlantı demirli boyuna derz görülmektedir [87].



Şekil 1.38. Almanya’ da bağlantı demirli enine büzülme derz kesiti

Büzülme derzleri, sertleşmiş betonun 3 mm genişliğinde kesilmesi ile oluşturulmaktadır. Bu kesme işlemi, mümkün olduğunca çabuk ve beton dökümünden sonra 24 saat içinde yapılmalıdır. Boyuna derzlerin derinliği, beton plağın %40-45 i kadar, enine derzlerinki ise, yaklaşık olarak %35 i kadar olmalıdır. Bu derzlerle, beton plakta oluşacak olan kaçınılmaz çatlakların (sertleşen betonun büzülmesine veya sertleşmiş betonun mutlak sıcaklığın düşmesine bağlı) derzlerin altında oluşması sağlanmaktadır. Bu derzler, önemsiz yollarda doldurulmayabilir. Fakat, genel olarak içleri doldurulan (bitüm malzeme veya özel boşluklu plastik profillerle) bu derzler, daha da genişletilmektedir (örneğin 8 mm) [91].

### 1.9. Donatılı Beton Yol

Donatılı beton yollarda, enine büzülme derzleri bulunmamaktadır. Sertleşmiş betonun kırılması, betonun çelik donatıya yapışması ve alt tabakayla olan sürtünme ile sınırlandırılmaktadır. Bunun sonucunda, yüzeyde küçük enine çatlaklar gözlemlenmektedir. Kullanılacak olan donatı miktarı, ortalama çatlak aralığının 1.5-3 m arasında olması gerektiği göz önüne alınarak ayarlanmalıdır. Bu durumda, çatlak genişliği genel olarak 0.4 mm den daha küçük olmaktadır. Bu sayede, yağmur suyunun sızması ve donatının korozyona uğraması engellenmektedir. Çatlakların son halini alması birkaç yıl sürmektedir [92].

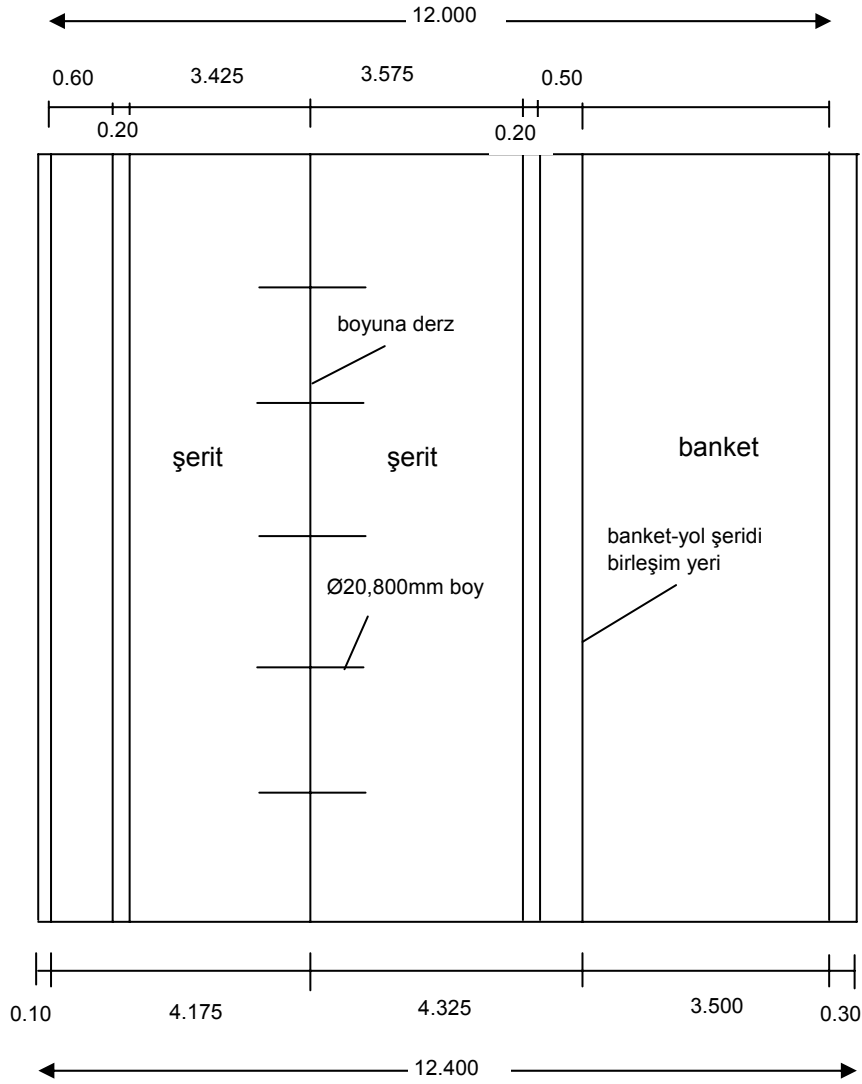
Donatılandırma, öncelikle boyuna yapılmaktadır (çapları 14-20 mm arasında değişen demirler, donatı oranı %0.60-0.75 arası). Enine donatı, yapım aşamasında boyuna donatılara destek olmaları için yapılmaktadır. Boyuna donatılar, yaklaşık olarak kaplama kalınlığının ortasına yerleştirilmektedir [92].

Donatılı beton yoldaki çok dar çatlakların yük transferi çok iyidir. Donatılı beton yolun kalınlık tasarımı, donatısız beton yolunki ile aynıdır [92]. Alman tasarım metodunda, donatılı beton kaplamanın kalınlığı, donatısız beton kaplama kalınlığından bir miktar (20 mm ye kadar) az olmaktadır [39]. Beton kaplamanın kalınlığı belirlendikten sonra, ihtiyaç duyulan donatı miktarı hesaplanmaktadır.

Donatılı beton kaplama, donatısız beton kaplamaya göre daha esnektir (zemindeki orantısız çökmelere karşı daha az hassastır). Bunun sebebi, donatılı beton yoldaki çatlak aralıklarının, donatısız beton yoldaki enine derz aralıklarından daha az olmasındandır. Hollanda’ da donatılı beton yolların altına, 50-60 mm arasında asfalt yapılmaktadır. Bu işlemin yapılma nedenleri aşağıda belirtilmektedir.

- Asfalt kaplama, erozyona karşı çok dirençlidir. Bu durum da, beton kaplamanın yapısal davranışı için çok önemlidir.
- Asfalt kaplama, üzerindeki donatılı beton kaplama ile düzgün bir sürtünme yaratmaktadır. Bu durum da, beton kaplamada düzenli küçük çatlakların oluşması için idealdir.
- Asfalt yüzeyi düzgündür ve donatılı beton kaplamanın sabit bir kalınlıkta yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu durum da, beton kaplamada düzenli küçük çatlakların oluşması için idealdir.

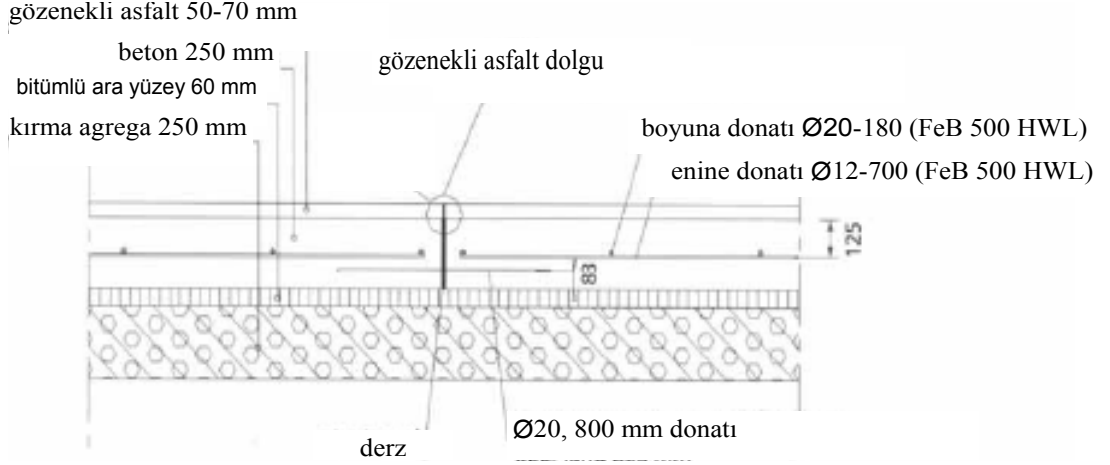
Şekil 1.39 da, 12 metre genişliğinde, 2 şeritli ve 1 acil şeridi olan donatılı beton yol görülmektedir [93].



Şekil 1.39. Almanya' da örnek donatılı beton kaplama kesiti

Şekil 1.39. daki donatılı beton yol, iki plak halinde dökülmüştür. İlk plak, sol taraftaki hızlı trafik şeridini taşımakta, ikinci plak ise, sağ taraftaki yavaş trafik şeridini ve acil şeridini taşımaktadır.

Şekil 1.39. da, ağır trafik şeridinin hemen sol tarafında boyuna derz bulunmaktadır. Boyuna derzde kullanılan bağlantı demirleri, 20 mm çapında, 800 mm uzunluğunda ve 1.67 m aralığında yerleştirilmiştir. Şekil 1.40. da, boyuna derzler, bağlantı demirleri, enine ve boyuna demirler daha detaylı olarak gösterilmektedir [93].



Şekil 1.40. Almanya’ da örnek donatılı beton kaplamada boyuna büzülme derz kesiti

Sağ tarafa dökülen plak genişliği, 7.83 m olduğundan dolayı (5 m den çok daha geniş olduğundan dolayı), boyuna derz yapılması gerekmektedir. Bu boyuna derzde, bağlantı demiri kullanılmasına gerek yoktur. Mevcut enine donatı demirleri, bağlantı demirinin görevini görmektedir.

### 1.10. Beton Yol Tasarımında Kullanılan Beton

Beton yollarda dikkat edilmesi gereken en önemli unsur, beton tasarımının doğru bir şekilde yapılmasıdır. Beton tasarımının doğru bir şekilde yapılmaması durumunda, yolda oluşacak çatlaklar kaçınılmazdır. Dökülen büyük kütleli betonlarda, beton içeriğinde yapılacak olan küçük hatalar bile istenmeyen çatlaklara yol açacaktır. Farklı ülkelerin, beton yol tasarımında kullandıkları beton tasarımlarında farklılıklar olabilmektedir. Avrupa ülkelerinde derzli donatısız beton kaplamalarda kullanılan beton özellikleri ve karışımları Tablo 1.13. de verilmektedir [94].

Tablo 1.13. Avrupa ülkelerinin beton yollarında kullanılan beton özellikleri

Gerekli Olanlar										
Ülke	Kaplama Tipi	28 Günlük Basınç Dayanımı MPa	28 Günlük Eğilme Dayanımı MPa	Max w/c oranı	Çimento içeriği Kg/m <sup>3</sup>	Agrega Gradasyonu	Çimento	Karışım Oranları	% Hava sürtükleyici (Min-Max)	Temel Tipi
Avusturya	JPCP	Min 40 (üst tabaka) Min 35 (alt tabaka) (20 cm küp)	Min 5.5	Genelde <0.43	Yok	Yok	OPC yada + 20%GGBFS (YÜKSEK FIRIN CÜRUFULU) uçucu kül yok	Şartnamelere bağlı	3.5-5%	CTB 250-300 mm
Danimarka	JPCP	Yok	Yok	0.40	325	Yok	Az alkali, uçucu kül var	Deneme karışımlarına bağlı	4-7%	CTB 150 mm
Finlandiya	JPCP	Yok	7	0.42	350	Projeye Özel	OPC	Deneme karışımlarına bağlı	2-4%	CTB 120-250 mm
Fransa	JPCP	Yok	>5	Yok	300-350	NFP standartlarına göre	OPC yada OPC w Pfa	Deneme karışımlarına bağlı	3-6%	LCB/CTB 120-220 mm
Almanya	JPCP	Min 35 (20 cm küp)	Min 5.5	<0.42	Min 300 (340 Tipi)	DIN e göre (min %50 kırma taş)	OPC yada OPC+GGBFS Uçucu kül yok	Deneme karışımlarına bağlı	4% (min 3.5%)	Bağlı LCB/CTB 150 mm
İngiltere	JPCP/JRCP	40	Yok	0.5	300	Yok	OPC yada OPC+GGBFS (<50%+uçucu kül 15-35%)	Deneme karışımlarına bağlı	4 yada 5% (+- 1.5) Agregat boyutuna	150 mm
Norveç	JPCP	45-75	4.3	0.5	330	Yok	Max 20% uçucu kül	Deneme karışımlarına bağlı	-	Granüler
İsveç	JPCP	Yok	4.8	Yok	Yok	Yok	Özel, uçucu kül yok	Deneme karışımlarına bağlı	4.8-7%	CTB 150 mm

1980 li yıllarda, Almanya' daki 5-10 senelik beton yollarda, boyuna, paralel veya ağısı yapıda çatlaklar meydana gelmiştir [95]. Bu hasarlı yollarda, %1-1.4 oranında Na<sub>2</sub>O (sodyum oksit) içeren çimento kullanılmıştır. Laboratuvar çalışmaları, yüksek alkali içeren çimentoların, betonda yüksek gerilmelere sebep olduğunu göstermiştir [96]. % 1 veya daha az Na<sub>2</sub>O içeren çimento kullanıldıktan sonra bu tür çatlaklara rastlanmamıştır. Beton kaplamada, CEM I 32.5 çimentosu kullanılması tavsiye edilmektedir [95]. Almanya' da derzli donatısız beton kaplamalar için izin verilen maksimum kalınlık, 35-65 MPa aralığındaki basınç dayanımına sahip betonlar için 26 cm olarak belirtilmektedir [97].

Springenschmid ve Fleischer' e [98] göre, beton kaplamada kullanılan agregaların en az %50 si 8 mm den büyük olmalı ve bütün agreganın en az %35 ise kırılmış olmalıdır. Buna ek olarak, betondaki sürüklenmiş hava boşluğu en az %4 olmalıdır. Sürüklenmiş hava boşluğu için aralık faktörü 0.2 mm yi geçmemelidir. Betonun çimento içeriği en az

350 kg/m<sup>3</sup> olmalıdır. Su/çimento oranı 0.38-0.44 arasında değişmektedir. 200 mm lik küplerde, 28 günlük basınç dayanımı en az 40 N/mm<sup>2</sup> olmalıdır. Eğilmede çekme dayanımı, 28 gün sonunda en az 5.5 N/mm<sup>2</sup> olmalıdır.

Beton yollarda, basınç dayanımından kaynaklanan bozulmalar çok nadir olarak görülse de, beton basınç dayanımı beton kalitesini ölçen en önemli özelliktir. Basınç dayanımı, sertleşmiş betonun mikro yapısıyla doğrudan ilişkilidir [99]. Yüksek dayanımlı beton, homojen bir malzeme olarak davranmaktadır. Bu tür betonlarda, kırılmadan hemen önceye kadar mikro çatlaklar görülmemektedir. Aynı zamanda, çatlama davranışı daha kırılğan bir hal almaktadır [100].

Basınç dayanımı, belirgin olarak w/c (su/çimento) oranına bağlıdır. w/c oranı düştükçe basınç dayanımı artmaktadır [101,102]. Bunun yanında, kaba agreganın dayanımı, mineral yapısı ve kalitesi, yüksek basınç dayanımını kontrol eden faktörlerdendir. Buna ek olarak, agrega tipi, agrega-yapıştırıcı bağı etkilemektedir [103].

Agrega boyutunun artırılması, genel olarak ihtiyaç duyulan su miktarını azaltmakta ve beton basınç dayanımına katkıda bulunmaktadır. Aynı zamanda, iri agregalar, agregalar içindeki kusurların olma olasılığını artırmaktadır. Bu sebeplerden dolayı, normal dayanımlı betona göre yüksek dayanımlı betonlarda agrega oranı çok önemli bir hal almaktadır [83]. Agregada gradasyonu, işlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılık bakımından önemlidir. Genel olarak, kullanılan kum oranı, agrega tipine ve en büyük agrega boyutuna göre 40-60% arasında değişmektedir. Yüksek dayanımlı betonlar için kullanılan kum, su ihtiyacını artıracığından dolayı, çok küçük boyutta olmamalıdır [104].

Kimyasal katkıları, betonun işlenebilirliğini artırmaktadır [105]. Hava sürükleyiciler de işlenebilirliği artırmakta olup, bunun yanında basınç dayanımını azaltmaktadır [102]. Hava sürükleyicilerin kullanılması, donma-çözülme dayanımı için önemlidir. Silis dumanı ve uçucu kül gibi mineral katkıları, genel olarak betonda kullanılmaktadır. Mineral katkıları beton dayanımını etkilemektedir. Uçucu kül, erken dayanım artışında çimento gibi etkili değildir ve etkisi uçucu kül sınıfına bağlıdır. Yine de, yavaş pozolan reaksiyonu, uzun dönem dayanım artışında etkilidir. Amerikan Beton Enstitüsü'nce [106] uçucu külün, çimentolu malzemenin %25-35 ini geçmemesi önerilmektedir. Tachibana' a [107] göre,

uçucu kül kullanılması, geçirgenliği, termal çatlamları ve malzeme maliyetini düşürmektedir.

Görüldüğü üzere, değişik ülkelerin beton yollarda kullanılan beton tasarımlarında farklılıklar olmasının yanında, değişik çalışmalarda da beton tasarımı için farklı öneriler bulunmaktadır. Burada, yol tasarımında kullanılacak olan beton tasarımı için, Rupert ve Walter' a göre [98], Avrupa' nın en iyi otobanlarına sahip olduğu belirtilen Almanya' nın uygulamakta olduğu tasarım ele alınacaktır.

Beton yollarda değişik kalitelerde beton kullanılmaktadır. Almanya' da, 1 Temmuz 2004 e kadar Dutch Standard NEN 6720 [18] kullanılmaktaydı. Beton kalitesi “B” değeri ile gösterilmekteydi ve değer, 28 günün sonunda küp numunenin kısa zamanlı yükleme (birkaç dakikalık yükleme) sonucundaki basınç dayanımını (MPa birimi ile) göstermekteydi. Bu tarihten günümüze kadar ise, NEN-EN 206-1 [108] yada Alman uygulaması Standard NEN 8005 kullanılmaktadır. Beton kalitesi “C” değeri ile gösterilmektedir ve sondaki sayı, 28 günün sonunda küp numunenin kısa zamanlı yükleme (birkaç dakikalık yükleme) sonucundaki basınç dayanımını (MPa birimi ile) göstermektedir. Bu arada uzun süreli yükleme,  $10^3$  den  $10^6$  saate kadar statik yükleme yada  $2 \cdot 10^6$  yük döngüsü ile dinamik yükleme olarak tanımlanabilmektedir. Tablo 1.14. de, beton kalitelerine göre basınç dayanım değerleri verilmektedir.

Tablo 1.14. Beton kalitelerine göre basınç dayanım değerleri

Beton Kalitesi		28 Gün sonunda kısa süreli yükleme için küp basınç dayanımı, $f_{cc,k,o}$ (MPa)
B- değerleri	C- değerleri	
B35	C28/35	35
B45	C35/45	45
B55	C45/55	55

Genellikle, ağır yükleme altındaki donatısız beton kaplamalarda (otobanlar ve havaalanları gibi), C35/45 betonu kullanılmaktadır. Daha hafif trafik altındaki yollarda ise,



C28/35 betonu tercih edilmektedir. C45/55 betonu ise, prekast elemanlar için kullanılmaktadır (beton bloklar, kaldırımlar gibi).

CEB-FIP Model Code 1990 [109] ve Eurocode 2' ye [19] göre, kısa süreli yükleme ile 28 gün sonunda, küp numunenin ortalama basınç dayanımı ( $f_{cc,m,o}$ ), (1.34) ile hesaplanmaktadır.

$$f_{cc,m,o} = f_{cc,k,o} + 8 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (1.34)$$

Beton yol yapısal tasarımında basınç dayanımı o kadar önem taşımamaktadır. En önemlisi, çekme dayanımıyla ilgili olan eğilmede çekme dayanımıdır. Elastik destekli beton yollarda, 28 gün sonunda kısa yüklemeler için ortalama çekme dayanımı ( $f_{ct,m,o}$ ), (1.35) ile hesaplanmaktadır.

$$f_{ct,m,o} = 0.9 [1.05 + 0.05 f_{cc,m,o}] = [1.05 + 0.05(f_{cc,k,o} + 8)] \text{ (MPa)} \quad (1.35)$$

28 gün sonunda, uzun süreli yüklemeler için ortalama çekme dayanımı ( $f_{ct,m,\infty}$ ), kısa süreli yükleme için ortalama çekme dayanımının %70 i kadardır.

$$f_{ct,m,\infty} = 0.7 f_{ct,m,o} \quad (1.36)$$

Tasarım hesaplarında kullanılacak, uzun süreli yüklemeler için çekme dayanımı ( $f_{ct,d,\infty}$ ), (1.37) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$f_{ct,d,\infty} = 1.4 f_{ct,m,\infty} / \gamma_m = 1.4 f_{ct,m,\infty} / 1.2 \text{ (MPa)} \quad (1.37)$$

$\gamma_m = 1.2$  çekme altında beton için malzeme faktörü

Beton kaplama tasarımı için Alman tasarım metodunda [110], kısa süreli yüklemeler için 28 gün sonunda ortalama çekme tasarım dayanımı ( $f_{ct,d,o}$ ) kullanılmaktadır.

$$f_{ct,d,o} = f_{ct,d,\infty} / 0.7 \approx 1.3[1.05 + 0.05(f_{cc,k,o} + 8)] / 1.2 \text{ (MPa)} \quad (1.38)$$

Donatısız beton yollarda, eğilmede çekme dayanımı, çekme dayanımına göre çok daha önemlidir. NEN 6720 [18] ve Eurocode 2' ye [19] göre, eğilmede çekme dayanımı ( $f_{ct,fl,o}$ ) ile çekme dayanımı ( $f_{ct,d,o}$ ) arasındaki ilişki, beton kaplamanın kalınlığı  $h$  (mm) ile ilişkilendirilmiştir:

$$f_{ct,fl,o} = [(1600-h)/1000] f_{ct,d,o} = 1.3[(1600-h)/1000] [1.05 + 0.05(f_{cc,k,o} + 8)] / 1.2 \text{ (MPa)} \quad (1.39)$$

Alman tasarım metodunda [110], donatısız ve donatılı beton yol kalınlık tasarımı, kaplamanın kritik noktalarında yorulma analizlerine bağlıdır. Beton yol tasarımında, (1.40) yorulma ilişkisi kullanılmaktadır [111].

$$\log N_i = \frac{12.903(0.995 - \sigma_{\max i} / f_{ct,fl,o})}{1.000 - 0.7525(\sigma_{\min i} / f_{ct,fl,o})}, \quad 0.5 \leq \sigma_{\max} / f_{ct,fl,o} \leq 0.833 \quad (1.40)$$

$N_i = P_i$  tekerlek yüklemesi için izin verilen tekrar sayısı, örneğin; sıcaklık değişim gerilmesi ( $\sigma_{ti}$ ) mevcutken, bozulmaya kadar trafik yük gerilmesi ( $\sigma_{vi}$ ) altında

$\sigma_{\min i}$  = Minimum oluşan eğilmede çekme gerilmesi (=  $\sigma_{ti}$ )

$\sigma_{\max i}$  = Maksimum oluşan eğilmede çekme gerilmesi (=  $\sigma_{vi}$ )

$f_{ct,fl,o}$  = 28 gün sonunda kısa süre yüklemesi sonunda oluşan eğilmede ortalama çekme dayanımı (MPa)

Dayanımın yanında, betonun sertliği de (örneğin Elastisite Modülü) beton yolun yapısal tasarımında önemlidir. Betonun Elastisite Modülü, dayanımındaki bazı ölçülere bağlıdır. NEN 6720 [18] ve Eurocode 2' ye [19] göre, Elastisite Modülü ( $E_c$ ), (1.41) eşitliği ile bulunmaktadır:

$$E_c = 22250 + 250 \cdot f_{cc,k,o} \text{ (MPa)}, \quad 15 \leq f_{cc,k,o} \leq 65 \quad (1.41)$$

$f_{cc,k,o} = 28$  gün sonunda kısa süreli yükleme altında karakteristik küp basınç dayanımı (MPa)

Kaplama mühendisliğinde kullanılan 3 farklı beton sınıfı için, Tablo 1.15. de dayanımlar ve sertlik değerleri verilmektedir. Bunun yanında, poisson oranı (trafik yük gerilmelerinin hesabında rol oynamaktadır), lineer termal genleşme katsayısı (sıcaklık değişiminden gelen gerilme hesaplarında rol oynamaktadır) ve beton sınıfına ait bir takım değerler de verilmektedir [18].

Tablo 1.15. Beton kalitesine göre tasarımda kullanılan beton değerleri

Özellik	Beton Kalitesi		
	C28/35 (B35)	C35/45 (B45)	C45/55 (B55)
28 gün sonunda kısa süreli yükleme altında karakteristik küp basınç dayanımı (MPa) ( $f_{cc,k,o}$ )	35	45	55
28 gün sonunda kısa süreli yükleme altında ortalama küp basınç dayanımı (MPa) ( $f_{cc,m,o}$ )	43	53	63
28 gün sonunda ortalama çekme tasarım dayanımı (MPa) ( $f_{ct,d,o}$ )	3.47	4.01	4.55
28 gün sonunda kısa süreli yükleme sonunda oluşan eğilmede ortalama çekme dayanımı (MPa) ( $f_{ct,fl,o}$ )			
Beton kalınlığı			
h=180 mm	4.92	5.69	6.46
h=210 mm	4.82	5.57	6.32
h=240 mm	4.71	5.45	6.19
H=270 mm	4.61	5.33	6.05
Elastisite Modülü, $E_c$ (MPa)	31000	33500	36000
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	2300-2400		
Poisson oranı ( $\gamma$ )	0.15-0.20		
Lineer termal genişleme katsayısı, $\alpha$ ( $^{\circ}C^{-1}$ )	$1(10^{-5}) - 1.2(10^{-5})$		

### 1.11. Beton Yollarda Bozulmalara Karşı Önlemler

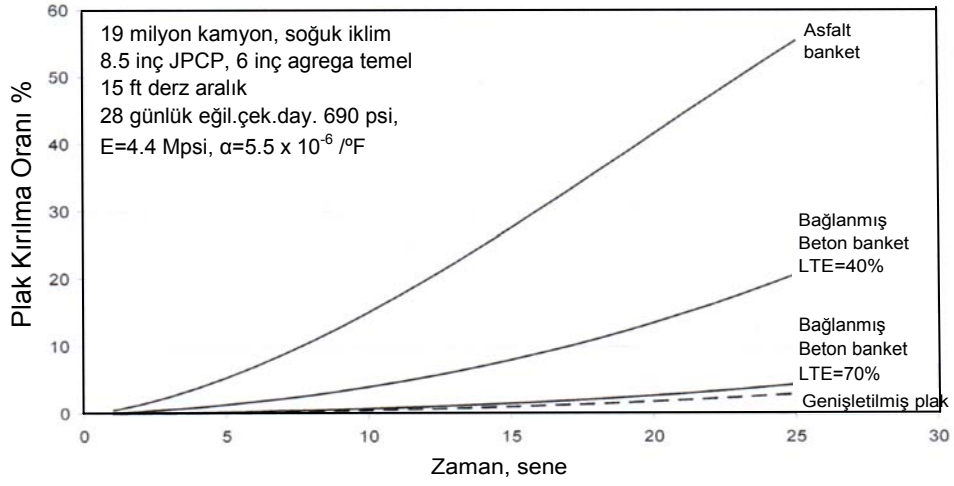
Beton yollarda karşılaşılan bozulmalara, çatlaklara karşı birçok kaynakta detaylı olarak bilgi verilmektedir [81,112]. Genel olarak, bu tür sorunlara karşı alınacak önlemler aşağıda sıralanmaktadır:

- Plak kalınlığını artırmak
- Enine derz aralığını azaltmak
- Beton banket kullanmak
- Plak genişliğini artırmak
- Termal genleşmesi az olan yüksek dayanımlı beton kullanmak
- Stabilize temel kullanmak

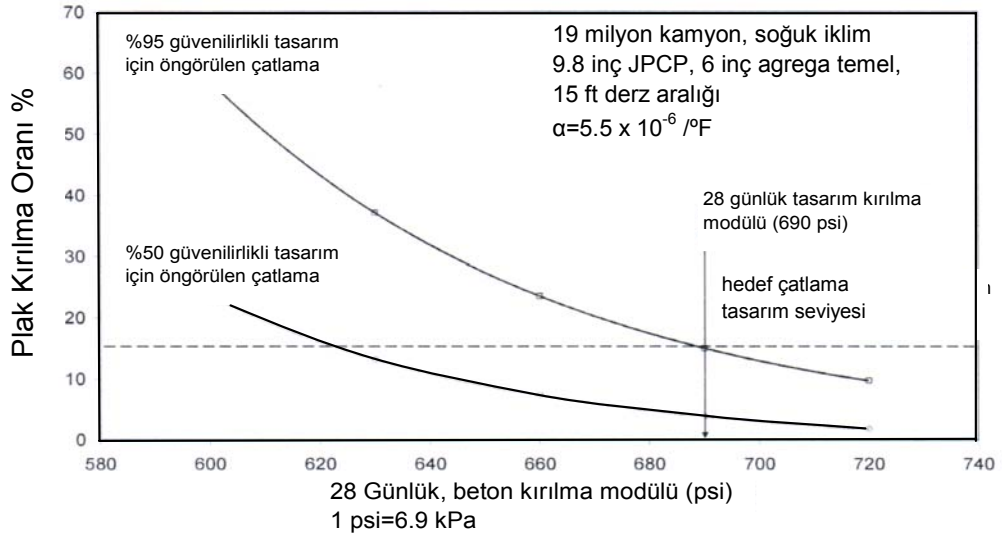
Derzlerdeki bozulmaları önlemek için ayrıca;

- Kayma demir çapını artırmak
- Erezyona uğramayacak temel kullanmak
- Agrega boyutunu artırmak gerekmektedir.

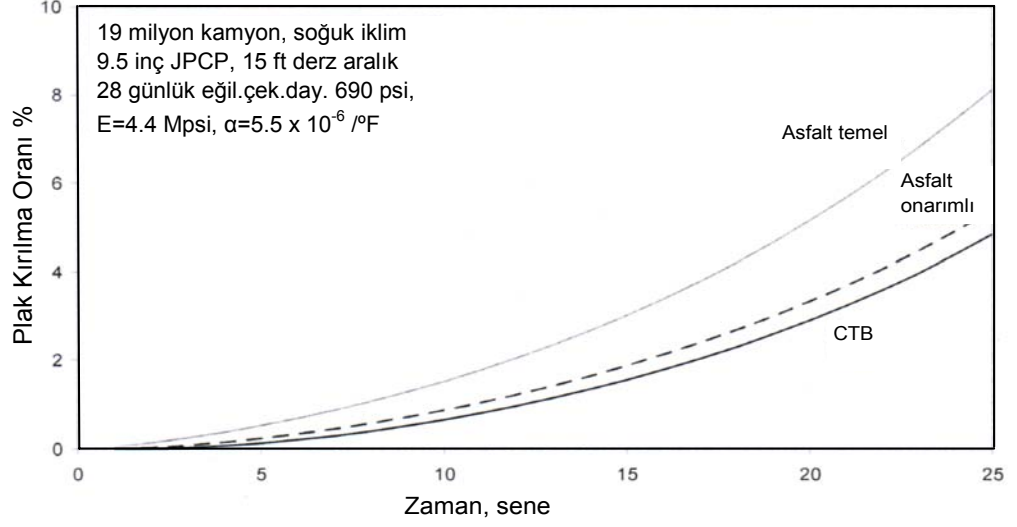
AASHTO' da [81], Şekil 1.41., Şekil 1.42. ve Şekil 1.43. de farklı banket türlerine göre plak kırılma oranları verilmektedir. Görüldüğü üzere, plağın genişletilmesi en iyi sonucu vermektedir. Bu gerçek de göz önüne alınarak, Almanya' da yol şerit çizgisi plak kenarından 50 cm içerde çizilmektedir [113].



Şekil 1.41. Farklı banket türleri için zamana bağlı plak kırılma oranı



Şekil 1.42. Plak kırılma oranı ile beton kırılma modülü arasındaki ilişki



Şekil 1.43. Plak kırılma oranı ile temel arasındaki ilişki

### 1.12. Bilgi İşleme ve Yapay Zeka

Tasarım hesaplamalarında, ideal çözüme ulaşabilmek için girdi bilgileri değerlendirilip en doğru sonuca ulaşılmaya çalışılmaktadır. Söz konusu işlem için, bilinen girdi bilgileri 3 farklı şekilde işlenmektedir:

- 1) Elle Bilgi İşleme (Bilgisayar çözümü de dahil): İç denetim sistemi vardır. Karar odak noktaları işlem aşamalarına bağlı olarak bizzat bilgiyi işleyen tarafından belirlenir.
- 2) Paket programların kullandığı bilgisayar destekli bilgi işleme: Elle bilgi işlemenin ifadelerini bilgisayarla çözüme işlemine dayanır.
- 3) Bilgi sistemleri ve yapay zeka yaklaşımı ile elektronik bilgi işleme: İç denetim sistemi ile sistem tarafından karar verilmektedir.

Bilgi işleme, yapay zeka yaklaşımı ile iki türde yapılmaktadır:

- 1) İstatistikî Yaklaşım: Fuzzy sistem ve yapay sinir ağlarında ihtimal hesabına göre çalışılmaktadır. Çok sayıda mevcut olayı analiz ederek, sayısal istatistik yöntemleri kullanarak, gelecekteki olaylar için karar sistemleri kurulmaktadır. Sayısal olarak

belirlenen sonuçların, girdi bilgileri ile kişiye göre değişiklik gösterebilecek bir ilişkilendirilmesi yapılmaktadır. Bu ilişkilendirme sonucunda, çıktı değeri bilinmeyen farklı girdi değerlerinin, çıktı sonuçlarının elde edilmesinde kullanılmaktadır.

2) Deterministik Yaklaşım: Bilgi Sistemleri İformatik ve Siberetik olarak iki dala ayrılır. İformatik, amaç ve çevre ile ilişkiyi, siberetik ise kendi kendini düzenlemeyi içermektedir.

Bilgi sistemleri ve yapay zeka yaklaşımlı çözüm deterministik yaklaşımla olmaktadır. Deterministik yaklaşım içinde istatistiki yaklaşım olabilir; ancak istatistiki yaklaşım deterministik yaklaşımı içermemektedir.

Latince “intellectus” kelimesinin karşılığı olan zekanın, kavramsal olarak birkaç tarifi şöyledir;

- Cevap vermede, muhtemel çözümleri inceden inceye aramadaki çabukluk ve bir problemin evreleri arasındaki yeni ilişkileri anlayabilme kapasitesidir,
- Yeni bir düzeneği veya kuralı keşfetme ya da bir tahmin yürütme ile ilgili faaliyettir,
- Beynin bilgiyi alıp, hızlı ve doğru olarak analiz etmesidir [114].

Biyologlar, zekayı çevreye uyum kabiliyeti olarak görürken, eğitimciler öğrenme, psikologlar ilişkileri anlama, bilgisayarlılar bilgiyi işleme kabiliyeti şeklinde değerlendirmektedirler. Şuur, bilinçaltı, ruh gibi açık uçlu bir kelime olduğu için zekanın evrensel bir tarifi yapılamamıştır [114].

Yapay zeka ise; bir bilgisayar bilim dalıdır, bilgi ve davranışa dayalı sistemler oluşturur ve zeki davranışlar üzerine araştırmalar yapar. Yapay zeka, insanın düşünme yapısını anlamak ve bunun benzerini ortaya çıkaracak bilgisayar işlemlerini geliştirmeye çalışmak olarak tanımlanır. Yani programlanmış bir bilgisayarın düşünme girişimidir. Daha geniş bir tanıma göre ise, yapay zeka, bilgi edinme, algılama, görme, düşünme ve karar verme gibi insan zekasına özgü kapasitelerle donatılmış bilgisayarlardır [114].



Yapay zeka teknikleri aşağıdaki gibi gruplandırılabilir;

- Yapay Sinir Ağları,
- Bulanık Mantık,
- Sezgisel Algoritmalar (Genetik Algoritmalar, Tabu Arama, Karınca Algoritması, Isıl İşlemler, Bağışıklık Sistemi vb.)
- Uzman Sistemler [114].

### 1.12.1. Yapay Zekanın Gelişim Süreci

Yapay zeka konusundaki ilk çalışma McCulloch ve Pitts tarafından yapılmıştır. Bu araştırmacıların önerdiği, yapay sinir hücrelerini kullanan hesaplama modeli, önermeler mantığı, fizyoloji ve Turing'in hesaplama kuramına dayanmaktadır. Araştırmacılar, bu çalışmaları ile her hangi bir hesaplanabilir fonksiyonun, sinir hücrelerinden oluşan ağlarla hesaplanabileceğini ve mantıksal işlemlerin gerçekleştirilebileceğini göstermişlerdir. Bu ağ yapılarının uygun şekilde tanımlanmaları halinde öğrenme becerisi kazanabileceğini de ileri sürmektedirler. Hebb, sinir hücreleri arasındaki bağlantıların şiddetlerini değiştirmek için basit bir kural önermesiyle birlikte, öğrenebilen yapay sinir ağlarını gerçekleştirmek de olası hale gelmiştir [114].

1950'lerde Shannon ve Turing, bilgisayarlar için satranç programları yazmışlardır. İlk yapay sinir ağı temelli bilgisayar SNARC, MIT'de Minsky ve Edmonds tarafından 1951'de yapılmıştır. Çalışmalarını Princeton Üniversitesi'nde sürdüren Mc Carthy, Minsky, Shannon ve Rochester'le birlikte 1956 yılında Dartmouth'da iki aylık bir çalışma düzenlemişlerdir. Bu toplantıda bir çok çalışmanın temelleri atılmakla birlikte, toplantının en önemli özelliği Mc Carthy tarafından önerilen yapay zeka adının konmasıdır.

İlk kuram ispatlayan programlardan mantık kuramcısı, burada Newell ve Simon tarafından tanıtılmıştır [114]. Daha sonra Newell ve Simon, insan gibi düşünme yaklaşımına göre üretilmiş ilk program olan genel sorun çözücüyü geliştirmişlerdir. Simon, daha sonra fiziksel simge varsayımını ortaya atmış ve bu kuram, insandan bağımsız zeki sistemler yapma çalışmalarıyla uğraşanların hareket noktasını oluşturmuştur [114].

Bundan sonraki yıllarda, mantık temelli çalışmalar egemen olmuş ve programların başarımlarını göstermek için bir takım yapay sorunlar ve dünyalar kullanılmıştır. Daha sonraları bu sorunlar gerçek yaşamı hiçbir şekilde temsil etmeyen oyuncak dünyalar olmakla suçlanmış, yapay zekanın yalnızca bu alanlarda başarılı olabileceği ve gerçek yaşamdaki sorunların çözümüne ölçülenemeyeceği ileri sürülmüştür [114].

Zeki davranışı üretmek için bu çalışmalarda kullanılan temel yapılardaki bazı önemli yetersizliklerin de ortaya konmasıyla birçok araştırmacı çalışmalarını durdurmuşlardır. Buna en temel örnek, sinir ağları konusundaki çalışmaların Minsky ve Papert'in 1969'da yayınlanan Perceptrons adlı kitaplarında tek katmanlı algılayıcıların bazı basit problemleri çözemeyeceğini gösterip aynı kısırlığın çok katmanlı algılayıcılarda da beklenilmesi gerektiğini söylemeleri ile bıçakla kesilmiş gibi durmasıdır [114].

Her sorunu çözecek genel amaçlı program yerine belirli bir uzmanlık alanındaki bilgiyle donatılmış programlar kullanma fikri yapay zeka alanında yeniden bir canlanmaya yol açmıştır. Kısa sürede uzman sistemler adı verilen bir metodoloji gelişmiştir. Fakat burada çok sık rastlanan tipik bir durum, bir otomobilin tamiri için önerilerde bulunan uzman sistem programının otomobilin ne işe yaradığından haberi olmamasıdır [114].

İnsanların iletişimde kullandıkları Türkçe, İngilizce gibi doğal dilleri anlayan bilgisayarlar konusundaki çalışmalar bu sıralarda hızlanmaya başlamıştır. Doğal dil anlayan programların dünya hakkında genel bilgiye sahip olması ve bu bilgiyi kullanabilmek için genel bir metodolojisi olması gerektiği belirtilmektedir [114].

Uzman dizgelerin başarıları beraberinde ilk ticari uygulamaları da getirmiştir. Yapay Zeka yavaş yavaş bir endüstri haline gelmiştir. DEC tarafından kullanılan ve müşteri siparişlerine göre donanım seçimi yapan R1 adlı uzman sistem, şirkete bir yılda 40 milyon dolarlık tasarruf sağlamıştır. Diğer ülkeler de yapay zeka'yı yeniden keşfetmişler ve araştırmalara büyük kaynaklar ayırmaya başlamışlardır [114].

Bütün bu çalışmaların sonunda Yapay Zeka araştırmacıları iki gruba ayrılmışlardır. Bir grup insan gibi düşünen sistemler yapmak için çalışırken, diğer grup ise rasyonel karar verebilen sistemler üretmeyi amaçlamıştır. Aşağıda bu yaklaşımlar kısaca açıklanmıştır.

### İnsan gibi düşünen sistemler:

İnsan gibi düşünen bir program üretmek için insanların nasıl düşündüğünü saptamak gerekir. Bu da psikolojik deneylerle yapılabilir. Yeterli sayıda deney yapıldıktan sonra elde edilen bilgilerle bir kuram oluşturulabilir. Daha sonra bu kurama dayanarak bilgisayar programı üretilebilir. Programın giriş/çıkış ve zamanlama davranışı insanlarınkine benzerse, programın düzeneklerinden bazılarının insan beyininde de mevcut olabileceği söylenebilir [114].

İnsan gibi düşünen sistemler üretmek bilişsel bilimin araştırma alanına girmektedir. Bu çalışmalarda asıl amaç genellikle insanın düşünme süreçlerini çözümlemede bilgisayar modellerini bir araç olarak kullanmaktır [114].

### İnsan gibi davranan sistemler:

Yapay zeka araştırmacılarının baştan beri ulaşmak istediği ideal, insan gibi davranan sistemler üretmektir. Turing zeki davranışı, bir sorgulayıcıyı kandırarak kadar bütün bilişsel görevlerde insan düzeyinde başarı göstermek olarak tanımlamıştır. Bunu ölçmek içinde Turing testi olarak bilinen bir test önermiştir. Turing testinde denek, sorgulayıcıyla bir terminal aracılığıyla haberleşir. Sorgulayıcı, deneğin insan mı yoksa bir bilgisayar mı olduğunu anlayamazsa denek Turing testini geçmiş sayılır [114].

Turing, testini tanımlarken; zeka için bir insanın fiziksel benzetiminin gereksiz olduğunu düşündüğü için sorgulayıcıyla bilgisayar arasında doğrudan fiziksel temastan söz etmekten kaçınmıştır. Burada vurgulanması gereken nokta, bilgisayarda zeki davranışı üreten sürecin insan beynindeki süreçlerin modellenmesiyle elde edilebileceği gibi tamamen başka prensiplerden de hareket edilerek üretilmesinin olası olmasıdır [114].

### Rasyonel düşünen sistemler:

Bu sistemlerin temelinde mantık yer almaktadır. Burada amaç çözülmesi istenen sorunu mantıksal bir gösterimle betimledikten sonra çıkarım kurallarını kullanarak

çözümünü bulmaktır. Yapay Zeka'da çok önemli bir yer tutan mantıkçı gelenek, zeki sistemler üretmek için bu çeşit programlar üretmeyi amaçlamaktadır [114].

Bu yaklaşımı kullanarak gerçek sorunları çözmeye çalışınca iki önemli engel karşımıza çıkmaktadır. Mantık, formel bir dil kullanır. Gündelik yaşamdan kaynaklanan, çoğu kez de belirsizlik içeren bilgileri mantığın işleyebileceği bu dille göstermek hiç de kolay değildir. Bir başka güçlük de en ufak sorunların dışındaki sorunları çözerken kullanılması gereken bilgisayar kaynaklarının üstel olarak artmasıdır [114].

#### Rasyonel davranan sistemler:

Amaçlara ulaşmak için inançlarına uygun davranan sistemlere rasyonel davranan sistemler denir. Bir ajan, algılayan ve harekette bulunan bir şeydir. Bu yaklaşımda Yapay zeka, rasyonel ajanların incelenmesi ve oluşturulması olarak tanımlanmaktadır. Rasyonel bir ajan olmak için gerekli koşullardan biri de doğru çıkarımlar yapabilmek ve bu çıkarımların sonuçlarına göre harekete geçmektir. Ancak, yalnızca doğru çıkarım yapabilmek yeterli değildir. Çünkü bazı durumlarda doğruluğu ispatlanmış bir çözüm olmadığı halde gene de bir şey yapmak gerekebilir. Bunun yanında çıkarımdan kaynaklanmayan bazı rasyonel davranışlar da vardır. Örneğin, sıcak bir şeye değince insanın elini çekmesi bir refleks harekettir ve uzun düşünce süreçlerine girmeden yapılır [114].

Bu yüzden Yapay zekayı rasyonel ajan tasarımı olarak gören araştırmacılar, iki avantaj öne sürerler. Birincisi düşünce yasaları yaklaşımından daha genel olması, ikincisi ise bilimsel geliştirme yöntemlerinin uygulanmasına daha uygun olmasıdır [114].

#### **1.12.2. Yapay Zekanın Amaçları**

Yapay zekanın amaçları aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- İnsan beyninin fonksiyonlarını bilgisayar modelleri yardımıyla anlamaya çalışmak,
- İnsanların sahip olduğu zihinsel yetenekleri, bilgi kazanma, öğrenme ve buluş yapmada uyguladıkları strateji, yöntem ve teknikleri araştırmak,

- Bu öğrenme yöntemlerini biçimsel hale getirmek ve bilgisayarlarda bilgi sistemleri halinde uygulamak,
- İnsanların bilgisayar kullanımını kolaylaştıracak insan/bilgisayar arabirimleri geliştirmek,
- Belli bir uzmanlık alanı içindeki bilgileri bir bilgi sistemi (veya uzman sistem) halinde toplamak,
- Geleceğin bilgi toplumunun kurulmasında önemli rol oynayacak genel bilgi sistemleri geliştirmek,
- Yapay Zeka iş yardımcıları ve zeki robot timleri geliştirmek,
- Bilimsel araştırma ve buluşlarda yararlanmak üzere, araştırma yardımcıları geliştirmektir [114].

### **1.12.3. Yapay Zeka Uygulamaları**

Yapay zeka uygulamaları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Uzman Sistemler,
- Robotik,
- Doğal Diller,
- İnsan Duyularının Taklidi,
- Yapay Sinirsel Ağlar,
- Sanal Gerçeklik [114].

### **1.12.4. Yapay Sinir Ağları (YSA)**

Bir yapay sinir ağı, bir biriyle etkileşim içindeki pek çok yapay nöronun paralel bağlı bir hiyerarşik organizasyonudur [115]. Programda adım adım yürütülen bir yöntemin verilmesi yerine sinirsel ağ ilişkilendirmeyi yapan iç kurallarını kendi üretir ve bu kuralları, sonuçları örneklerle karşılaştırarak düzenler [116].

En genel anlamda yapay sinir ağları ileri beslemeli ve geri beslemeli ağlar şeklinde iki ana grupta düşünülebilir. İleri beslemeli ağlarda nöronlar; girdi, saklı ve çıktı olarak adlandırılan katmanlar vasıtasıyla organize edilir. Her bir katmandaki nöronlar; bir sonraki katman nöronları ile bağlantı ağırlıkları vasıtasıyla ilişkilidir. Ancak katmanların kendi

aralarında her hangi bir bağlantı yoktur. Bilgi, girdi katmanından çıktı katmanına doğru ilerler. Buna aktivasyon yönü de denilir. Bu tür yapay sinir ağına örnek olarak tek ve çok katmanlı algılayıcı verilebilir. Bu tür ağlar denetimli öğrenme teknikleriyle eğitilir. Geri beslemeli ağların en belirgin özelliği; katmanlar arasındaki nöronlar biri biriyle bağlantılı olup ayrıca bir dinamik hafızaya sahiplerdir [117].

Kohonen [118] ağı ve Hopfield [119] ağı bu ağlara örnek teşkil etmektedir. Kohonen öğrenme kuralı, Biyolojik sistemdeki öğrenmeden esinlenmiştir. Sinirler, öğrenmek için elverişli durum ya da ölçülerini güncellemek için yarışır. En büyük çıkış ile işlenen sinir, kazananı ilan eder ve komşularına bağlantı boyularını güncellemeleri için izin verilir. Hopfield öğrenme kuralında, İstenilen çıkış ve girişin her ikisi de aktif ya da ikisi de durgun ise, bağlantı boyutları öğrenme oranı kadar arttırılır. Aksi halde boyut öğrenme oranı kadar azaltılır [120].

#### **1.12.4.1. Yapay Sinir Ağlarında Öğrenme ve Ağın Eğitilmesi**

Yapay sinir ağları konvansiyonel programlama gibi belirli bir algoritma çerçevesinde programlanmazlar. Sinir ağları insanlar gibi örnekler ile eğitilirler. Yapay sinir ağlarının öğrenmesi bir çocuğun öğrenmesi gibidir. Sıcak bir nesneye dokunmaması gerektiğini deneyerek öğrenen çocuklar zamanla daha az sıcak olan bir cisme dokunabilme cesaretini gösterirler ve sıcak süt dolu bardağı elleriyle tutarlar. Yani çocuk sıcaklık bilgisini öğrenmiş olmaktadır. Yapay sinir ağları da benzer olarak; mevcut örnek kümesi üzerinde girdi ile çıktı arasındaki bağıntının ağırlıkların değiştirilmesiyle eğitilirler [117].

Bu eğitim, sunulan girdi kümesi için; transfer fonksiyonu tarafından sağlanan değerlere cevap olarak bağlantı ağırlıklarının tamamının veya bir kısmının istenen çıktı ile ağ çıktısı arasındaki farkın belirli bir değere düşüncüye kadar değiştirilmesi ile olur. Günümüze kadar çeşitli öğrenme algoritmaları geliştirilmiştir. Bunlar temel olarak denetimli öğrenme, denetimsiz öğrenme ve takviyeli öğrenme olarak üç ana gruba ayrılır. Denetimli öğrenmede sinir ağına hem girdi hem de çıktı değerleri sunulur. Ağın ürettiği çıktı ile istenen çıktı arasındaki fark sıfır veya ona yakın bir değere gelinceye kadar ağırlıklar değiştirilir. Bu tür öğrenme modelini kullanan ağlar; algılayıcı ve ilişkili hafızalar, takviyeli öğrenme, stokastik öğrenme, vektör nicelik öğrenmesi, delta ve

genelleştirilmiş delta kuralı, geri yayılma algoritması, bu grup öğrenmede kullanılan etkin metotlardır [117].

Denetimsiz öğrenmede ağı sadece girdi vektörü uygulanır. Girdi değerlerine uygun bir çıktı üretilinceye kadar bağlantı ağırlıkları değiştirilir. Bu metot görüntü işleme, işaret işleme ve kontrol problemlerinde etkin olarak kullanılır. Kohonen'in kendini düzenleyen uzaylar, ve adaptif rezonans teorisi (ART) denetimsiz öğrenmeye örnek olarak verilebilir. Takviyeli öğrenmede ise giriş değerlerine karşılık gelecek uygun çıktıların elde edilmesi sırasında ağırlıkların en uygun değerlerinin bulunmasında genetik algoritmalar veya tabu en iyilime yöntemleri kullanılır. Böylece ağırlıklar optimize edilmektedir [117].

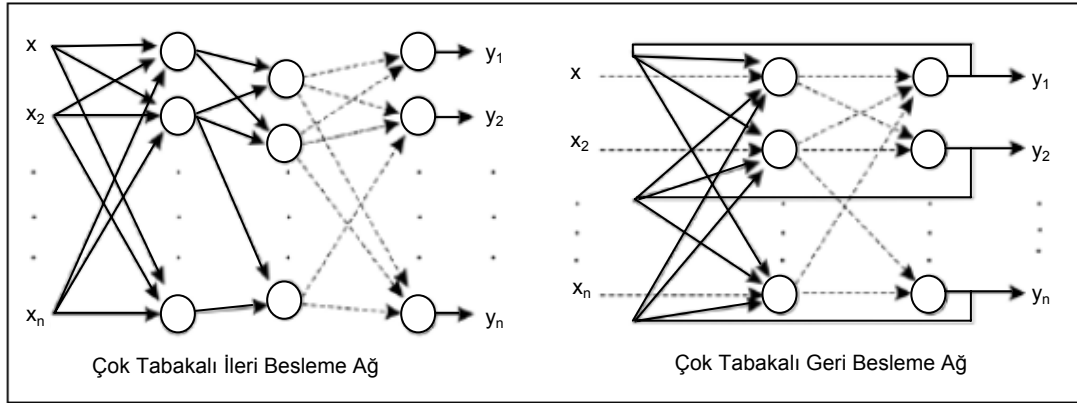
Bunların dışında hibrit öğrenme algoritmaları da geliştirilmiştir. Yapay sinir ağlarındaki ağırlıklar sabit değildir. Öğrenme kuralı giriş işaretlerine ve transfer fonksiyonu tarafından sağlanan değerlere cevap olarak, yerel bellekteki ağırlıkların hepsini veya bazılarını değiştiren bir denklem olarak bilinir. Öğrenme kuralı giriş işaretlerinin doğasına bağlı olarak işleme elemanının cevabının zamanla değişmesine imkan sağlar. Bu şekilde ağ, kendisini istenen cevaplara uyarlayabilir ve kendi içinde bilgiyi düzenleyebilir, yani öğrenir. Eğitim yeterli sayıda giriş-çıkış örnek kümesi için yapılmalıdır. Eğitim sonucunda ağ hem eğitme örnek kümesine ait veriyi tanımalı hem de interpolasyon ve ekstrapolasyon yapabilmelidir. Yani eğitim kümesinde olmayan örnek için uygun çıktılar vermelidir. Aslında eğitilmiş bir yapay sinir ağından beklenen de budur [117].

Yapay sinir ağının eğitimi iki aşamalı bir işlemdir. İlk adımda, ağı bir giriş vektörü uygulanarak, ağ içindeki her birim için toplam giriş ve çıkış hesaplanır ve her birimin çıkışı daha sonraki ağırlık düzenlenmesi için saklanır. Çıkış vektörü oluşturulduktan sonra, eğitme işlemi çıkış hatasını hesaplar ve bu hatanın geriye doğru yayılımını sağlar. Birimlerin ağırlıkları bu hata işaretine göre ayarlanır. Bu iki adımlı işlem ağ istenilen cevapları üretinceye kadar, eğitme vektör çiftçileri ile tekrarlanır. Çıkış katmanını eğitmek kısmen daha basittir. Eğitimin nispeten zor olduğu aşama, ara katmanının eğitilmesidir. Bunu aşmak için, hata işaretinin çıkıştan daha iç katmanlara yayılımını sağlamakla bulunur. Yani, bir iç veya ara katman birimi kendisinden sonraki katmanın hata işaretlerinin ağırlıklı toplamı olan bir hat işareti alır. Bu hata işareti her birimin ağırlıklarını eğitmek için kullanıldıktan sonra, eğitme işlemi oluşturulan yeni hata işaretinin daha

önceki katmanlara doğru yayılımını sağlar. Yapay sinir ağların öğrenme mekanizması, girdi vektörü ve transfer fonksiyonu tarafından sağlanan değerlere karşılık olarak bağlantı ağırlıklarının hepsinin veya bir kısmının değiştirilmesidir. Yapay sinir ağları ne kadar çok örnekle eğitilirse hem öğrenebilecekleri olay ve tanıyabilecekleri obje sayısı artar, hem de hata oranı azalarak daha hassas sonuçlar elde edilir. En genel anlamda nöral ağlar; kullanılan nöron modeli, bu nöronların ağ yapısında bir arada bulunma şekli yani ağ mimarisi, ağırlıkların ayarlanması için öğrenme kuralının belirlenmesi ve kullanılan aktivasyon fonksiyonu gibi dört farklı özellik ile karakterize edilir. Ağdaki her bir katman işleme elemanının bir toplamından oluşur. Her bir işleme elemanı kendi girdi bağlantılarındaki değerlerin ağırlıklı toplamını bir eşik fonksiyonundan geçirerek bir çıktı değeri üretir. Bilginin ağ içerisinde saklanması bağlantı ağırlıklarının ayarlanarak uygun değerleri almasıyla sağlanır. Bu ağırlık değerleri eğitim işlemi başlangıcında rasgele küçük sayılara atanır. İstenen çıktı ile ağ çıktısı arasındaki fark yeterince küçük oluncaya kadar yapılan eğitim işlemi sırasında öğrenme kuralına bağlı olarak ağırlıklar düzenlenerek sonuç değerleri elde edilir [117].

Bazı ağlar ileri besleme şeklinde yapılandırılırken, bazı ağlar ise geri besleme yapısı içermektedir. İleri besleme sinir ağlarında, işlem elemanları arasındaki bağlantılar bir döngü oluşturmazlar ve bu ağlar girdi veriye genellikle hızlı bir şekilde karşılık üretirler. Geri beslemeli ağlarda ise bağlantılar döngü içerirler ve hatta her seferinde yeni veri kullanabilmektedirler. Bu ağlar, döngü sebebiyle girdinin karşılığını yavaş bir şekilde oluştururlar. Bu yüzden, bu tür ağların eğitim süreci daha uzun olmaktadır. Ayrıca, hem ileri besleme hem de geri yayılma olarak tanımlanabilecek ağ yapıları da mevcuttur. Şekil 1.44. de, bir kıyaslamaya imkan tanıyabilmek için, çok tabakalı ileri besleme ağ yapısı ile birlikte çok tabakalı geri besleme ağ yapısı örneklenmektedir [121].





Şekil 1.44. İleri beslemeli ve geri beslemeli ağ yapıları [121]

#### 1.12.4.2. YSA Uygulamalarının Dezavantajları

YSA'nın oluşturulmasında ve kullanılmasında avantajlar yanında dezavantajlar da bulunmaktadır. Bunların bazıları aşağıdaki gibi listelenebilir:

- YSA'nın oluşturulmasında, model seçilmesinde, ağın topolojisinin belirlenmesinde bir kurallar seti yoktur. Bu hususlar, kullanıcının tecrübesine dayalı olarak düzenlenmektedir.
- Problemin YSA ile çözülebilmesi ve örneklerin tasarlanabilmesi içinde bir kurallar seti bulunmamaktadır. Aynı problem değişik şekillerde gösterilebilmekte ve her gösterimin kendisine has performansı da değişmektedir. Doğru gösterimin bulunması, tecrübelerle sınırlı bulunmaktadır.
- Ağın, davranışlarının açıklanması mümkün değildir. Bu durumda ağa duyulacak güveni azaltmakta ve özellikle insan hayatı ile ilgili olan problemlerde sonuçların neden verilemediğinin açıklanamaması, kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır.
- Eğitim işlemlerinin gerçekleştirilmesi uzun zaman alabilmektedir.
- Problemlere optimum sonuçlar garanti edilememektedir. Üretilen sonucun, iyi sonuçlardan biri olduğu ifade edilebilir. Geleneksel yöntemlerin optimum sonuç

sunmasının yanında YSA uygulamalarının başka yöntemlerle bir arada kullanılması gerekliliği doğabilmektedir.

- Örneklerin bulunmasının güç olduğu durumlarda ve problemi doğru temsil eden örnek bulunmaması durumunda; sağlıklı çözümler üretmek mümkün olamamaktadır [114].

Bir probleme birden fazla çözüm üretilebilmektedir. Bu nedenle YSA'ların her zaman en iyi çözümü ürettikleri söylenemez. Kabul edilebilir bir çözüm ürettiklerini söylemek daha doğrudur. Üretilen çözüm en iyi çözüm olsa bile bunun bilinmesi zordur. Çoğu durumda bunun bilinmesi mümkün değildir [122].

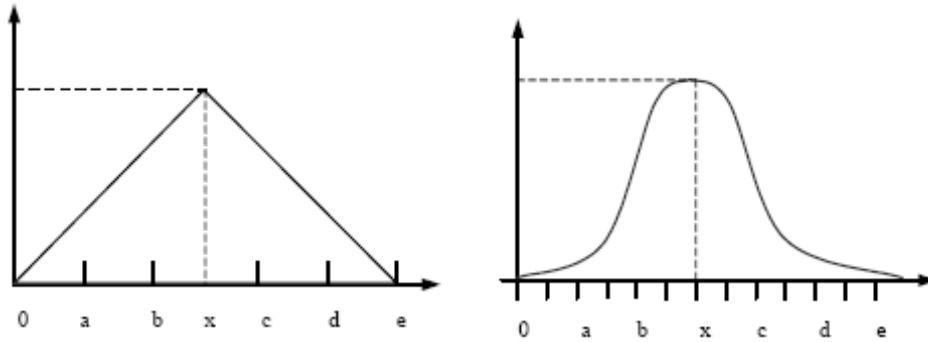
En iyi sonucun bulunamamasının nedenleri arasında;

- Problem eğitilirken bulunan örneklerin problem uzayını tamamen temsil edememesi,
- Oluşturulan ağ için doğru parametreler seçilememiş olması,
- Ağın ağırlıklarının başlangıçta tam istenilen şekilde belirlenmemiş olması ve
- Ağın topolojisinin yetersiz seçilmiş olması sayılabilir [122].

### 1.12.5. Bulanık Mantık

Elemanların mevcut bir kümeye dahil edilip edilmemesi konusunda kesin bir sınırın bulunduğu klasik küme teorisi uygulamada esnek olmamaktadır. 1960' lı yıllarda teorisi oluşturulan yeni bir küme kuramı tabiattaki uygulamalar için daha esnek olmuştur. İlk defa L. A. Zadeh tarafından ortaya atılan ve geliştirilen bu yeni teknik Fuzzy (Bulanık) küme teorisi olarak bilinmektedir. Zadeh' e göre gerçek dünyada bir kümenin(uzayın) elemanları arasındaki ilişkiler kesin olarak tanımlanamamaktadır. Bundan dolayı, sözü edilen kümede ortaya atılan problemler kolaylıkla çözülememektedir. Klasik küme teorisinden kaynaklanan bu problem, klasik mantığın kabulü olan var - yok çiftinin ara değerlerini tanımlamakla yok edilebilir. Bulanık bir küme çalışma yapılan alana ait her bir bireye veya elamana matematiksel olarak kümedeki üyelik derecesini temsil eden bir değer atayarak tanımlanır. Bu değer o üyenin bulanık küme tarafından ifade edilen kavrama uygunluk derecesini ifade eder. Bundan dolayı bireylerin kümeye ait olması farklı farklıdır. Bu üyelik dereceleri 0 ile 1 arasındaki gerçel sayılarla temsil edilirler. Üyelik fonksiyonları bir çok farklı şekillerde olabilir. Özel bir şeklin uygun olup olmayacağını tespit etmek

çalışılan uygulama alanı tarafından elde edilen verilerle belirlenir. Bununla birlikte, pek çok uygulama bu tür şekil değişikliklerine karşı çok fazla duyarlılık göstermezler. Hesaplama açısından getirdiği kolaylıklar göz önüne alınarak istenilen şekilde üyelik fonksiyonunun seçilmesi, bulanık küme teorisinin esnekliğini yansıtmasında öne çıkan bir durumdur. Pek çok uygulamada, üçgen ve parabol üyelik fonksiyonları yeterli olmaktadır (Şekil 1.45.) [117].



Şekil 1.45. Bulanık Mantıkta Üçgen ve Parabol Üyelik Fonksiyonları [117]

### 1.12.6. YSA ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Yapılan literatür taraması sonucunda YSA uygulamaları ile ilgili bazı çalışmalarda edinilen bulgular aşağıda sunulmuştur. Basheer ve Hajmeer [123], yaptıkları çalışmalarında; YSA'nın, beyin hücrelerindeki görev dağılımının ve birbirleri arasındaki ilişkilerin benzerlerinin bilgisayar ortamında oluşturulması olduğunu ifade etmişlerdir. Matematiksel olarak modellenen çok sayıda nöron, birbirlerinden aldıkları bilgileri değerlendirerek bir çıktıya dönüştürmektedirler. Birçok nöronun eşzamanlı olarak çalışması, eğitilebilmesi, denetlenmesi ve çözüme ulaşma hızının kısa olması gibi özellikleri nedeni ile YSA'nın, bilimsel araştırmalarda giderek artan bir şekilde kullanılmakta olduğunu belirtmişlerdir.

Civalek ve Ülker [117] yaptıkları çalışmada, "Dikdörtgen Plakların Doğrusal Olmayan Analizinde Yapay Sinir Ağı Yaklaşımı" nı incelemişler, bu çalışmalarında burulma rijitliği sıfır olan izotrop plakların kesit tesirleri ve şekil değiştirmelerini sonlu elemanlar metodunu kullanarak araştırmışlardır.

Pala vd. [124] çalışmalarında, YSA modellerinin algoritmik olmayan, paralel ve yayılı bilgi işleme yetenekleri ile klasik modellerden farklı olduğunu, farklı olan bu özellikleri sayesinde YSA'nın karmaşık ve doğrusal olmayan hesapları kolaylıkla ve hızlı bir şekilde yapabildiklerini belirtmişlerdir. Algoritmik olmayan ve çok yoğun paralel işlem yapabilen YSA'nın, ayrıca öğrenebilme kabiliyeti ve paralel dağıtılmış hafıza ile de, hesaplamada yeni bakış açılarına sebep olduğunu ifade etmişlerdir.

Ülker ve Civalek [125] çalışmalarında, mühendislik sistemlerinin analizinin genel anlamda iki evreyi içerdiğini, bunların; mevcut bir fiziksel sistemin matematik modelinin kurulması ve elde edilen matematik denklemin analitik olarak veya çeşitli yaklaşık sayısal yöntemler kullanılarak çözülmesi olduğunu ifade etmişlerdir. Bu iki evreden birincisi deneyim, sezgi ve iyi bir matematik alt yapı, ikincisi ise modellemede kullanılan sezgi ve bilgiye ek olarak hızlı ve kapsamlı bir hesaplayıcıyı gerektirdiğini belirtmişlerdir. Bilgisayar tekniğindeki yeniliklerin sayısal analiz metotlarında büyük bir gelişmeye neden olduğunu belirten yazarlar, bilgisayar tekniğindeki gelişmelerin farklı analiz tekniklerinin ortaya çıkmasını sağladığını, bunlardan birinin de insan beyninin çalışma biçimini model edinen Yapay Zeka uygulamaları olduğunu vurgulamışlardır. Bilgisayar, endüstri, tıp, ekonomi ve askeri alanlardaki uygulamalarda başarıyla kullanılan bu tekniğin, yapı mühendisliğinde de kullanılmaya başlandığını ifade etmişlerdir.

Elazouni vd. [126] çalışmalarında, tahmin modellerinin, proje maliyeti ve/veya performansını optimize edebilmek için farklı alternatifleri değerlendirmek üzere tasarımcılara potansiyel yardımcı olabileceğini ifade etmişlerdir. Bu aşamada farklı alternatiflerin maliyetinin belirlenmesinin, yeniden tasarım maliyetinin engellenmesi ve bakım, operasyon ve değiştirme maliyetlerinin minimize edilmesi sayesinde maliyet tasarrufu sağlayacağını vurgulamışlardır. Buna ilave olarak, bu modellerin yüklenicinin son dakika teklif tahmini için çok yararlı olduğunu belirtmişlerdir. Kaynak ihtiyacı tahmini için, tahmin aracı olarak geriye yayılım ağlarının kullanılabilirliğini araştırdıkları bu çalışmada, 28 adet silo inşaatına ait değerler gruplanmıştır. Uygulanan YSA modeli ile elde edilen sonuçlar, çoklu regresyon analizi sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve YSA modelinin tahmin için oldukça kullanışlı olduğu tespit edilmiştir.

Weiss ve Kulikowski'nin [127], Hinton'un [128], Ripley vd. nin [129] ve Warren'ın [130] çalışmalarında; YSA'nın son yıllarda hem teorik ve hem de pratik uygulamalar bakımından geliştiği, kendisine olan ilgiyi daha da arttırdığı vurgulanarak YSA modelleri ile istatistik modellerin benzer olduğuna (bazılarının ise aynı olduğuna) dikkat çekilmiştir.

Stern'in [131], Ripley'in [132], Wang'ın [133] ve Yasdi'nin [134] çalışmalarında, YSA modelleri ile istatistik modellerin benzer olmasının tesadüfi olmadığını, bu iki alanın sıkı ilişkili olduğunu göstermişlerdir. YSA ve istatistik metotların karşılaştırılması, bu modellerden birinin, uygun olan bir diğerinin geliştirilmesinde önemli olduğunu ortaya koymuşlardır. Birçok pratik problemde, her iki sınıf yöntemlerin kullanılarak hesaplama sonuçlarının karşılaştırılmasının daha iyi çözümün bulunması içinde bir araç olduğunu ifade etmişlerdir.

Zhang [135] çalışmasında, hibrid (melez) yöntemlerin kullanılmasının yani, istatistik ve YSA metotların birlikte kullanımının daha çok yararlı olduğunu, bu bakımdan bu iki alanın karşılıklı incelenmesinin önemli konulardan biri olduğunu ve ileri araştırmalar gerektirdiğini ifade etmiştir.

Kim ve arkadaşları [136] yaptıkları çalışmalarında; 530 eski maliyet verisinin yardımı ile Çoklu Regresyon Analizi, YSA ve Vaka Tabanlı Sebeplendirme adlı üç yöntemin performanslarını karşılaştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda YSA esaslı yöntem, diğer iki maliyet değerlendirme yöntemine göre daha kusursuz sonuçlar vermiştir.

Liu [137] yüksek lisans tezinde, projelerin önünde bulunan maliyet ve zamansal risklerin değerlendirilmesi konusunda YSA esaslı bir araştırma yapmış ve sonuçlar, petrol ile gaz endüstrisindeki projelerde, eski basit projelerden öğrenme yaparak genel temayı betimleyebilecek bir YSA oluşturmanın mümkün olabileceğini göstermiştir. Liu, YSA esaslı uygulamaların çoklu regresyon yöntemine göre daha üstün sonuçlar verdiğini belirtmiştir.

Adeli ve Wu [138], otoyol inşaatı maliyetlerinin çok değişken olduğunu ve bu değişkenliğin yönetici kararları, rasgele pazar değişimleri ve hava durumu gibi tahmin edilemeyen birçok faktörden ileri geldiğini göstermiştir.

Günaydın ve Doğan [139], inşaat tasarımının erken aşamalarında, proje yöneticileri ve tasarımcılar tarafından bir maliyet tahmin aracı kullanılması ihtiyacına işaret ederek; 4 - 8 katlı 30 adet konuta ait verilerin öğretildiği bir geri yayılım ağının, maliyeti % 93 doğrulukla tahmin edebileceğini ortaya koymuştur.

Baykan [140] doktora tezinde, farklı proje özelliklerine sahip konut inşaatlarını örnekleyerek, proje parametrelerini YSA'na öğretmiş ve elde edilen sonuçlara göre ağı öğrenme performansını test etmiştir. Bu sonuçları, aynı parametrelerin regresyon analizinde kullanılması ile elde edilen sonuçlarla karşılaştıran Baykan, YSA tahmin performansının regresyon analizine oranla daha yüksek olduğunu, bu yaklaşımın konut tipi binaların kaynak ihtiyacının tahmininde hızlı, verimli ve güvenilir bir yöntem olarak başarı ile kullanılabilirliğini ortaya koymuştur.

Tekniğin inşaat mühendisliğinde kullanım potansiyeli için geniş bir literatür Vanluchene [141] ve Hajela ve Berke [142], uygulama prensipleri ise Adeli [143,144] tarafından verilmiştir. Bu uygulamalar, daha çok malzeme modellenmesi [145], boyutlandırma [146], optimizasyon [147], hasar analizi [148,149], deprem mühendisliği [150,151] gibi konuları içermektedir. Daha önce yapılan bu çalışmalarda daha çok, geri-yayıma ve Hopfield sinir ağları kullanılmıştır. Yapılardaki hasarların belirlenmesi konusunda yapılan çalışmalarda, yapay sinir ağları uygulaması hayli ümit verici olmuştur. Yapay sinir ağları, boyutlandırma problemlerine başarıyla uygulanmış, elde edilen sonuçların klasik optimizasyon teknikleri kullanılarak elde edilen sonuçlardan daha elverişli olduğu gösterilmiştir [152]. Hajela ve Berke' nin [142] çalışmasında, yapay sinir ağları, betonun farklı yüklemeler altındaki gerilme-şekil değiştirme bağıntılarının belirlenmesine başarıyla uygulanmış ve çalışmada malzeme davranışı ile ilgili herhangi bir kabul yapılmamıştır. Yapılan çalışmalarda, depreme dayanıklı yapı tasarımı, yapıların dinamik analizinde metot başarıyla uygulanmış ve sonuçlar çok sağlıklı bulunmuştur [153,154,155,156]. Ayrıca, plak ve kabukların gerilme analizinde bulanık destekli geriye yayılma sinir ağları ile yeterli hassasiyete sahip sonuçlar elde edilmiştir [157,158,159,160].

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Çalışmanın Amacı

Dünyada beton yol uygulamalarına bakıldığında, genel olarak derzli donatısız beton yolun daha fazla olduğu görüldüğünden dolayı ve Türkiye’ de de deneme amaçlı yapılan ilk beton yolun derzli donatısız beton yol olması sebebiyle, tez çalışmasında, derzli donatısız beton yol tasarımı üzerinde durulmuştur. Ülkemizde bu konuda eksiklik olduğundan dolayı, konunun geniş olarak incelenmesi gerekmektedir. Dingil yüklerinin, beton yoldan geçişleri sırasındaki sıcaklık gradyan değerlerine göre oluşturacakları gerilmeler farklı olacaktır. Ağır araç yükü arttıkça veya yol üzerinden geçen dingil sayısı arttıkça, beton plak kalınlığının artırılması beklenir. Fakat tasarım hesaplamalarında kullanılan beton plağın eğilmede çekme dayanımı, plak kalınlığı arttıkça azalmaktadır. Yapılacak olan tasarım hesaplamalarında, bu tezat durum da göz önüne alınmalıdır. Beton yolda kullanılacak olan betonun sınıfı da plak kalınlığını etkilemektedir.

Literatür çalışmalarına bakıldığında, verilen bir plak kalınlığında tekerlek yüklemesine göre oluşması beklenen gerilmeler, arazide ölçülen gerilmelerle karşılaştırılmakta veya ölçülen çökme değerlerinden, söz konusu gerilme değerleri, yapay sinir ağ metoduyla bulunmaktadır. Sıcaklık gradyanlarından kaynaklanan gerilmeler, beton yol kalınlığının tespitinde ya hesaba katılmamış, yada hesaba katıldığında sıcaklık gradyanına göre trafik dağılımı göz önüne alınmamış, sabit bir sıcaklık gradyan değeri kullanılmıştır. Plak kalınlığı, deneme yanılma yoluyla bulunmaktadır. Söz konusu çalışmalarda, beton elastisite modülü, dingil yükü, dingil tekrar sayısı ve sıcaklık gradyan değerleri birlikte göz önüne alınarak, yorulma analizlerinde bu değerlerdeki değişimlere bağlı ideal beton kalınlıkları bulunmamıştır. Söz konusu değişkenlere bağlı, ideal beton yol kalınlığının kısa zamanda tespiti, yol tasarımında büyük kolaylık sağlayacaktır.

Çalışmanın amacı, beton sınıfının, dingil yükünün, yük tekrarının ve sıcaklık gradyan değerlerinin, beton yol kalınlığı üzerindeki etkisini araştırmak ve plak kalınlığına, sıcaklık gradyan değerine ve beton sınıfına göre, 8 ton, 10 ton ve 12 ton ağırlığındaki, çift tekerlekli tek dingillerin birbirlerine dönüşüm katsayılarını belirlemektir. Söz konusu

çalışmada, mekaniğin sonlu farklar metodu ve bilgi sistemleri ve yapay zeka yaklaşımı kullanılarak, plak kalınlığı hem diterministik hem de istatistiki yöntemle hesaplanmıştır. Her iki yöntemle de plak kalınlığı çok kısa zaman içinde bulunabilmektedir. Çalışmada sabit olarak alınan zemin yatak katsayısı ve plak uzunluğu, literatür araştırması sonucu daha uzun ömürlü beton yol yapımı için kullanılması önerilen değerlerdir. Söz konusu sabit değerler, değişken olarak alınarak da çalışma genişletilebilir. Saha üzerinde yapılacak geniş kapsamlı deneylerle, çalışmada bulunan değerler kalibre edilebilir. Bu çalışma neticesinde, ülkemizin farklı bölgelerinde, farklı trafik yoğunluklarında, yapılacak olan beton yolun kalınlık tayinininde, faydalı sonuçlar elde edileceği düşünülmektedir.

## 2.2. Çalışmada İzlenen Yol

Çalışmada sonlu farklar yönteminden yararlanılarak dokusal tarama yapılmıştır. Farklı dingil ağırlıkları, söz konusu dingil ağırlığının tekrar sayısı, beton kalınlığına bağlı beton plak üst ve alt yüzeyindeki sıcaklık farkları (sıcaklık gradyanı), beton elastisite modülü, yorulma analizleri de yapılarak ilişkilendirilmiş ve ideal beton kalınlığı tespit edilmiştir. Söz konusu tasarım hesabında geri yayımlı yapay sinir ağı kullanılmış ve C++ da yeni bir program yazılmıştır.

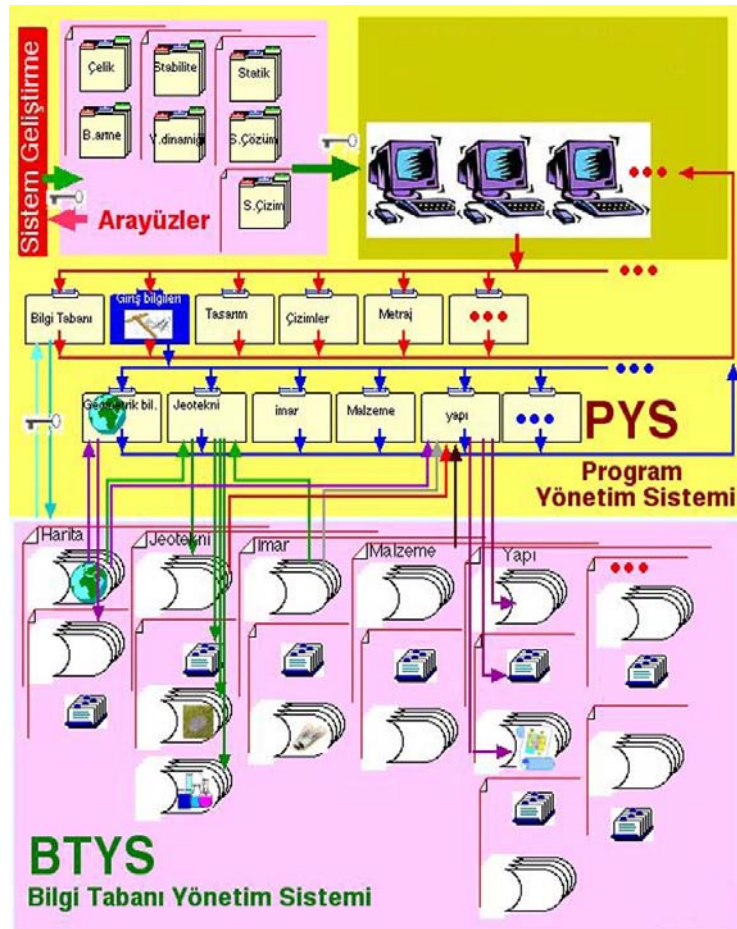
Mevcut çalışmalarda, plağın her noktasına yüklemeler yapılarak, o noktadaki gerilmeler ve çökmeler bulunmaktadır. Bu çözüm tekniği çok uzun zaman almaktadır. Bu sebepten dolayı, girdi ve çıktıları belli olan bir eğitim seti oluşturulmakta, diğer noktadaki gerilme ve deformasyonlar bu eğitim setindeki veriler ilişkilendirilerek bulunmaya çalışılmaktadır. Söz konusu eğitim setini oluşturmak da ayrıca uzun zaman almakta ve girdi-çıkıtı bilgilerinin ilişkisinin değerlendirilmesi uygulayıcıya göre değiştiğinden bu yaklaşımla herkes için aynı sonuçların bulunacağı söylenememektedir.

Tez çalışmasında uygulanan dokusal tarama sayesinde, farklı trafik yüklemelerinde plak üzerinde oluşacak deformasyonlar, gerilmeler, moment ve burulma değerleri bulunabilmektedir. Bulunan kritik noktadaki gerilmeler kullanılarak, yorulma analizleri de yapılmış ve ideal beton yol tasarım kalınlığını, farklı girdi bilgilerinin hangi oranda etkilediği araştırılmıştır. C++ da hazırlanan yazılım, Nesne Yönelimli Programlama (object oriented programming) şeklindedir. Bilgi sistemleri ve yapay zeka yaklaşımı tasarımı



önemli avantajı, elle bilgi girişinin dışında sistemin kendisinin girilen bilgi tabanları baz alınarak çözüm duyarlılığını artırmasıdır. Ayrıca sayısal çözümlerin, teknik şartname sınır değerleri ile elektronik ortamda, iç denetim sistemi kurulabilmektedir.

Mevcut bina tasarımı paket programlarında kolon, kiriş gibi boyutlandırmalar elle girilip sonra analiz yaptırılmakta, analiz sonuçlarına göre tekrar boyutlandırma yapılmaktadır. Uygulanacak olan yaklaşımla sistem, boyutlandırmayı deneme yanılma yöntemiyle yapmamaktadır. Şartnamelerde belirtilen en küçük boyuttan başlayarak, bu boyutu giderek artırmakta ve ideal ölçüye ulaşıldığında tasarım hesabını sonuçlandırmaktadır. Sistem bu işlemi kendi içindeki iç denetim sistemini kullanarak yapmaktadır. Sistemin ucu açık olduğundan dolayı da, sonradan bilgi tabanındaki bilgilerin değişen şartlara göre değiştirilmesi durumunda, sistemin kendini yenileyebilme yeteneği bulunmaktadır. Şekil 2.1. de örnek bir bilgi tabanı yönetim sistemi görülmektedir.

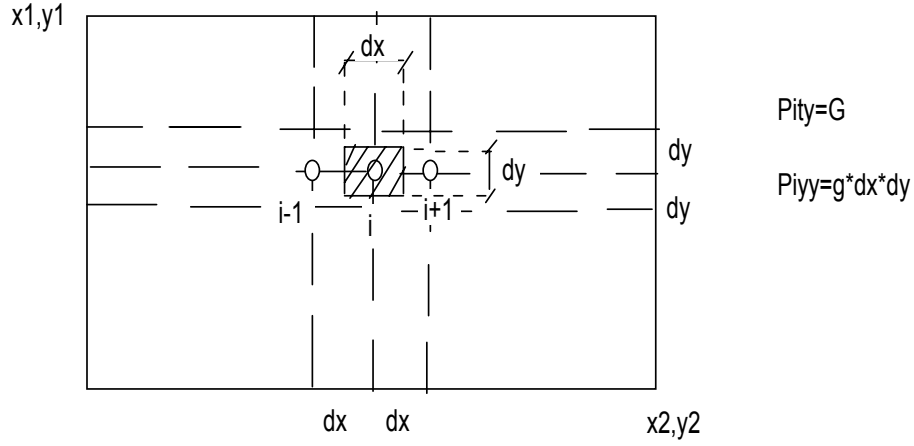


Şekil 2.1. Bilgi tabanı yönetim sistemi

### 2.2.1. Sayısal Çözümleme Yöntemi

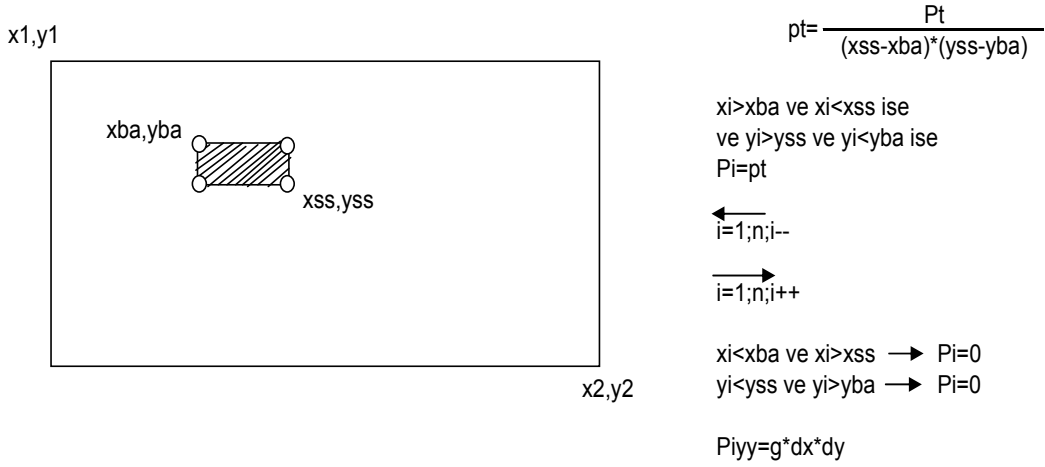
Yüzeysel taşıyıcı sistemlerde sistemin geometrisinden bağımsız sınır şartlarına ve değerlerine bağlı olarak noktalar arası uzaklıklar, diferansiyellerin diferans olarak kabul edileceği kadar sık alınmaktadır. Çözümde de bilgi ve bilgisayar teknolojileri kullanılarak, diferans yöntemle sayısal çözümler yapıp gerilme ve şekil değiştirme dağılımları belirlenip sistemin tasarımı yapılmaktadır. Çözümde, farklı dingil ağırlıkları akıllı bir obje olarak tanımlanarak, bu objelerin plak üzerinde gezdirilmesi ile dokusal tarama yapılmaktadır. Bu sayede, her bir noktadaki çökme, gerilme, moment ve burulma değerleri elde edilebilmektedir. Sayısal çözümleme sırasında yüklerin plak üzerinde nasıl değerlendirileceği Şekil 2.2. ve Şekil 2.3. de gösterilmektedir

a) Noktasal Etki:



Şekil 2.2. Yayılı yükün (g) noktasal etkiye dönüştürülmesi

b) Yerel Etki:



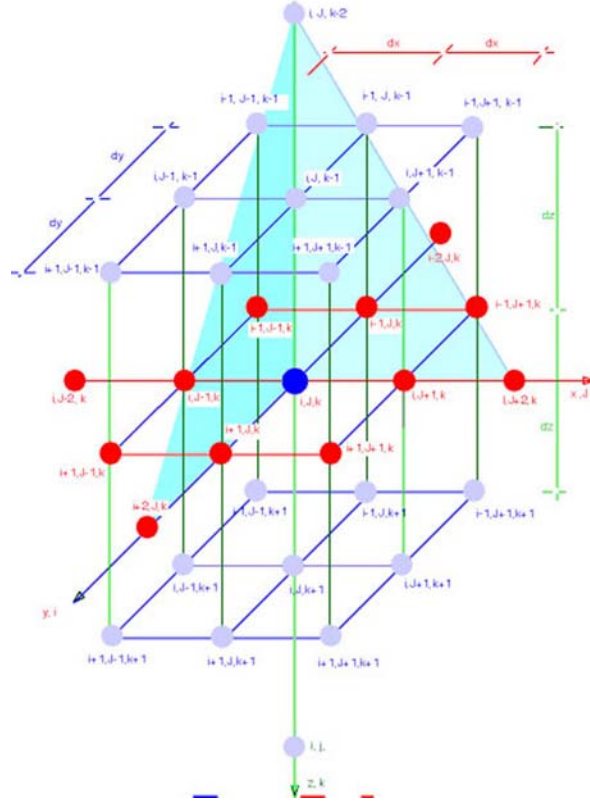
Şekil 2.3. Eksenel yükün (Pt) yayılı yüke (pt) dönüşümü ve plakta dokusal tarama yapılması

Bilindiği gibi, diferans olarak alınan noktalar arasındaki mekaniksel ilişkilerden, sayısal çözümlerin yüksek dereceden diferansiyel (diferans) denklemleri elde edilmektedir. Bu denklemler, mekaniğin yüzeysel taşıyıcı sistemlerin genel elastikiyet denklemleri ile parametrik olarak örtüşmektedir. Bilgi teknolojilerini de kullanarak, bu diferansiyel denklemler elektronik ortamda çözüldüğünde, sistemin nokta nokta gerilme ve şekil değiştirme dağılımları elde edilmektedir. Çözüm yönteminde, yüzeysel taşıyıcı sistemlerde mekaniğin sonlu farklar yöntemi kullanılmaktadır.

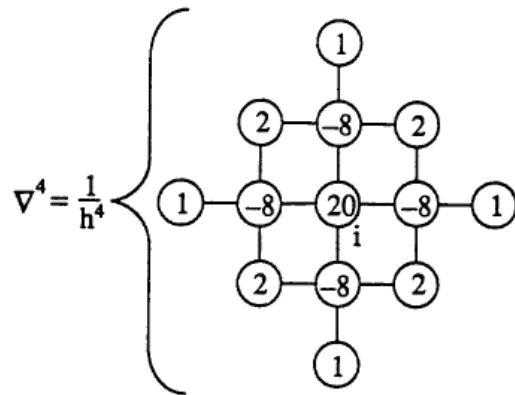
Sonlu elemanlar yönteminde, tasarım hesaplarında genel elastikiyet denklemlerinin tek boyutu veya kesiti göz önüne alınmaktadır. Diğer boyutlar, o doğrultuda da tanımlama yapılarak benzeşimle yaklaşık çözüm alınabilmektedir (yüzeysel taşıyıcı sistemler için). Duyarlılık ne kadar artırılmak istense bile, denklemin tek boyutu ile çalışmak zorunda olunması nedeniyle çözüm duyarlılığı her zaman amaca yetmeyebilir.

Burada kullanılacak yöntemde ise, genel elastikiyet denklemlerinin tamamı (üç boyutlu, yüzeysel taşıyıcılar için iki boyutlu ve yüzey denklemleri hacimsel taşıyıcılar için hacim denklemleri) işlemlere katılabilmektedir. Yine bilgi teknolojileri ile farklı katmanlardan oluşan sistemlerin çözümünde dokusal tarama ile katmanların mekanik özelliklerinin değişimine bağlı olarak sistemin bütünlüğü içinde çözüm üretilebilmektedir.

Eğer katmanların ilgili parametreleri deneysel olarak duyarlı yapılabilirse, çözüm duyarlılığı da o kadar artmaktadır. Şekil 2.4. de uzaysal bir noktanın çevresel ilişkileri, Şekil 2.5. de ise sonlu farklar molekülü görülmektedir.



Şekil 2.4. Uzaysal bir noktanın çevresel ilişkileri



Şekil 2.5. Plak üzerindeki her bir  $i$  düğüm noktasına uygulanabilecek sonlu farklar molekülü

Winkler modeli (2.1) eşitliği ile gösterilmektedir.

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + ky = q \quad (2.1)$$

Sonlu farklar modellemesinde uygulanan (2.2) eşitliğinde, plaktaki burulma rijitliği dikkate alınmaktadır.

$$\nabla^4 u = \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 u}{\partial y^4} \quad (\text{Biharmonik Operatör}) \quad (2.2)$$

Yüze dik gelen yayılı  $q$  yükü altındaki yol kaplaması için kullanılan eşitlik, (2.3) de gösterilmektedir.

$$D \left( \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 u}{\partial y^4} \right) + kw = q \quad (\text{LaGrange 1881}) \quad (2.3)$$

Burada  $k$ , zemin reaksiyon modülü,  $w$ , çökme ve  $D$  ise plâğin burulma rijitliğidir.

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2.4)$$

(2.3) Eşitliğinin matris gösterimi, Şekil 2.6. da gösterilmektedir.

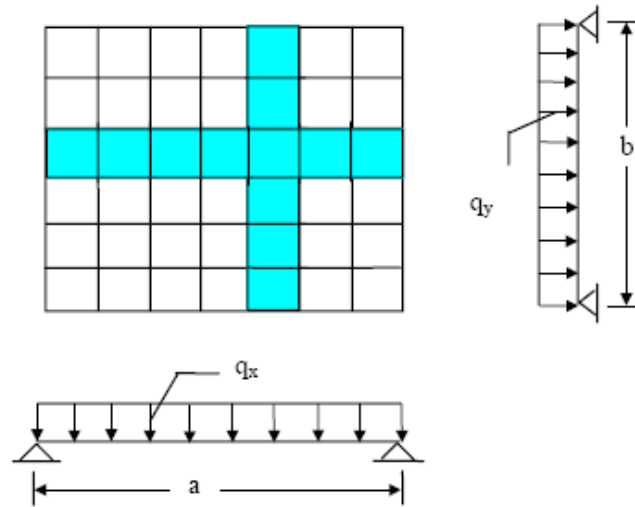
$$\begin{bmatrix} S_{11} + \frac{\lambda^4 K}{D} & S_{12} & \cdot & \cdot & \cdot \\ S_{21} & S_{22} + \frac{\lambda^4 K}{D} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \{W\} = \{q\}$$

Şekil 2.6. Zemine oturan plakta sonlu farklar matrisi

Plâğın sonlu elemanlar modellenmesinde ise, (2.2) eşitliği (2.5) eşitliğine dönüşmekte ve plaktaki burulma rijitliği ihmal edilmektedir.

$$\nabla^4 u = \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 u}{\partial y^4} \quad (2.5)$$

Winkler yönteminde genişlik, birim uzunluk olarak düşünülmekte ve tek yönlü şerit halinde olmaktadır. Bu sebepten dolayı, incelenen yüzey birçok şeritler halinde ve iki yönlü olarak ele alınmaktadır [161]. Bu yöntem bize genel bir düşünce verse de, diferansiyel denklem çözümünde sadece bir yön dikkate alındığından dolayı yetersizdir. Şekil 2.7. de, burulma rijitliği ihmal edilen bir plak ve bu plaktaki yükleme durumu görülmektedir [117].



Şekil 2.7. Plâğın sonlu elemanlar ile modellenmesi

Straughan [162], doktora tezinde, elastik zemine oturan plakları sonlu farklar yöntemiyle çözmüştür. Araştırmacı, çalışmasında sonlu elemanlar metodunu kullanmamasının sebebi olarak, sonlu elemanlar metodunun bir enerji metodu olmasını göstermiş ve plak burulması için oluşturulacak katsayılar matrisinde fazladan derivasyonlara ihtiyaç duyulduğunu belirtmiştir. Ayrıca, katsayılar matrisine, üretilecek alt matrislerin de iterasyonlarla eklenmesi ile çözüme gidilmesi gerektiğini ve bu işlemin sıkıcı ve zaman alıcı bir işlem olduğunu belirtmiştir. Araştırmacı, sonlu elemanlar metodunda düşük dereceden türevler üzerinde işlemler yapılırken, sonlu farklar metodunda direkt olarak dördüncü dereceden diferansiyel eşitlikler üzerinden işlemler yapıldığını ve bu nedenle daha az bilinmeyenle daha doğru sonuçlara ulaşıldığını vurgulamıştır. Bu sebepten dolayı, tez çalışmasında, elastik zemine oturan plak olarak ele alınan beton yol kaplaması için, sonlu farklar metodu kullanılarak doku tasarımı çözümü yapılması daha uygun olacaktır.

Domingos vd. [163], çalışmalarında sonlu farklar metodunu kullanmışlardır. Çalışmalarında, havaalanı için yapılan, derzli donatılı beton kaplama analizinde, deflektometre testi ile model parametreleri kalibre edilmiş, beton kaplama derzlerine bağlı olarak farklı pozisyonlarda yüklemeler yapılarak, modellemede gerçekçi sonuçlara ulaşılmıştır.

Burada belirtilmesi gereken önemli hususlardan bir tanesi de deflektometre testlerinden elde edilen sonuçların güvenilir olup olmadığıdır. Yapay sinir ağları ile yol tasarımında, deflektometre testlerinden de faydalandığı önceki bölümlerde belirtilmişti. Yapılan çalışmalarda, zemine oturan plak modellemesi için sonlu elemanlar veya sonlu farklardan faydalanılmış ve bir kısmında modellemenin kalibre edilmesi için deflektometre testlerinden elde edilen sonuçlardan faydalanılmıştır. Ancak, Zaghoul ve arkadaşlarının [164] yaptıkları çalışmada, aynı veya farklı imalatçıların ürettiği deflektometre test aletlerinin, kalibre edilseler dahi aynı bölgelerde birbirlerinden farklı çökme değerleri verdiği belirtilmektedir. Bu sebepten dolayı da, farklı deflektometre aletleri arasında analiz sonuçlarına bakıldığında güvenilirlik bakımından önemli farklar olduğu sonucuna varılmıştır [164]. Bu sebepten dolayı, modellemenin deflektometre test sonuçlarına göre

yapılması ve bu şekilde plak üzerinde gerilme, moment ve burulma değerlerinin bulunmasının doğru olmayacağı düşünülebilir.

Civalek ve Ülker' in [117], dikdörtgen plakların doğrusal olmayan analizinde yapay sınır ağı konulu çalışmasında, plaktaki burulma rijitlikleri ihmal edilerek, sonlu elemanlar modellemesi yapılmıştır. Söz konusu çalışmada, çıktı olarak orta noktadaki momentler ve deplasman elde edilmek istenmiştir. Bu amaçla, daha önceden başka bir araştırmacının, dört kenarından serbestçe oturan burulma rijitliği olmayan plak için oluşturmuş olduğu eğitim seti dikkate alınmış, farklı mesnet şartları için de yeni eğitim setleri hazırlanmıştır. Yazarların belirttiğine göre, yeni eğitim setini hazırlamak, çalışmanın en zor ve uzun kısmını oluşturmuştur [117].

### **2.2.2. Program Tasarımı**

Bilgi sistemleri ve yapay zeka yaklaşımının gereksinimi olan programların tasarımı, modüler ve sistematik tasarım tekniklerini zorunlu kılmaktadır. Bilgi tabanı yapısı, program dosyaları ile veri dosyalarından oluşmaktadır. Belirli bilgi kümeleri, bu sistemde birer ara yüz (interface) durumundadır. Her program modülü, ilişkide bulunduğu diğer programları çekirdek belleğe çağırarak (overlaying), daha sonra kendisi çekirdek bellekten uçup gidebilmektedir. Yani, sistemi oluşturan bütün programlar ve modülleri aynı anda çekirdek bellek üzerinde değildir. Bunun için de, bilgi sistemini oluşturan bir program yönetim sistemi tasarlanır.

Programların sistem içerisindeki ilişkilerini ve bilgi tabanı üzerinde bulunan verilerin programlar ve birbirleri ile ilişkilerini, sistemin program işletim sistemi yürütmektedir. Bu yaklaşım, genelde bilgisayar işletim sistemlerinden (Windows, Unix, vb.) bağımsız bir platform oluşturmaktadır. Diğer taraftan, bu yaklaşım kodlama sistemlerinden ve dillerinden de bağımsızdır. Örneğin, bazı program ve modülleri, etkinliği artırmak amacıyla farklı kodlama dillerinde ve sistemlerinde tasarlanabilmektedir. Yani bir program veya modülü "C++" ile kodlanmışsa, başka modül, Pascal veya Fortran' la da kodlanmış olabilir. Kurulacak olan program yönetim sistemi, tek dille kodlanmış gibi, bütün kodlama dillerini işletebilmekte (run) ve yönetebilmektedir.



Tez çalışmasında, nesne yönelimli programlama (Object Oriented Programming) kullanılmıştır. Nesne yönelimli programlama (NYP), özetle bir bilgisayar programlama yaklaşımıdır. Günümüzde, pekçok çağdaş programlama dili tarafından desteklenmektedir.

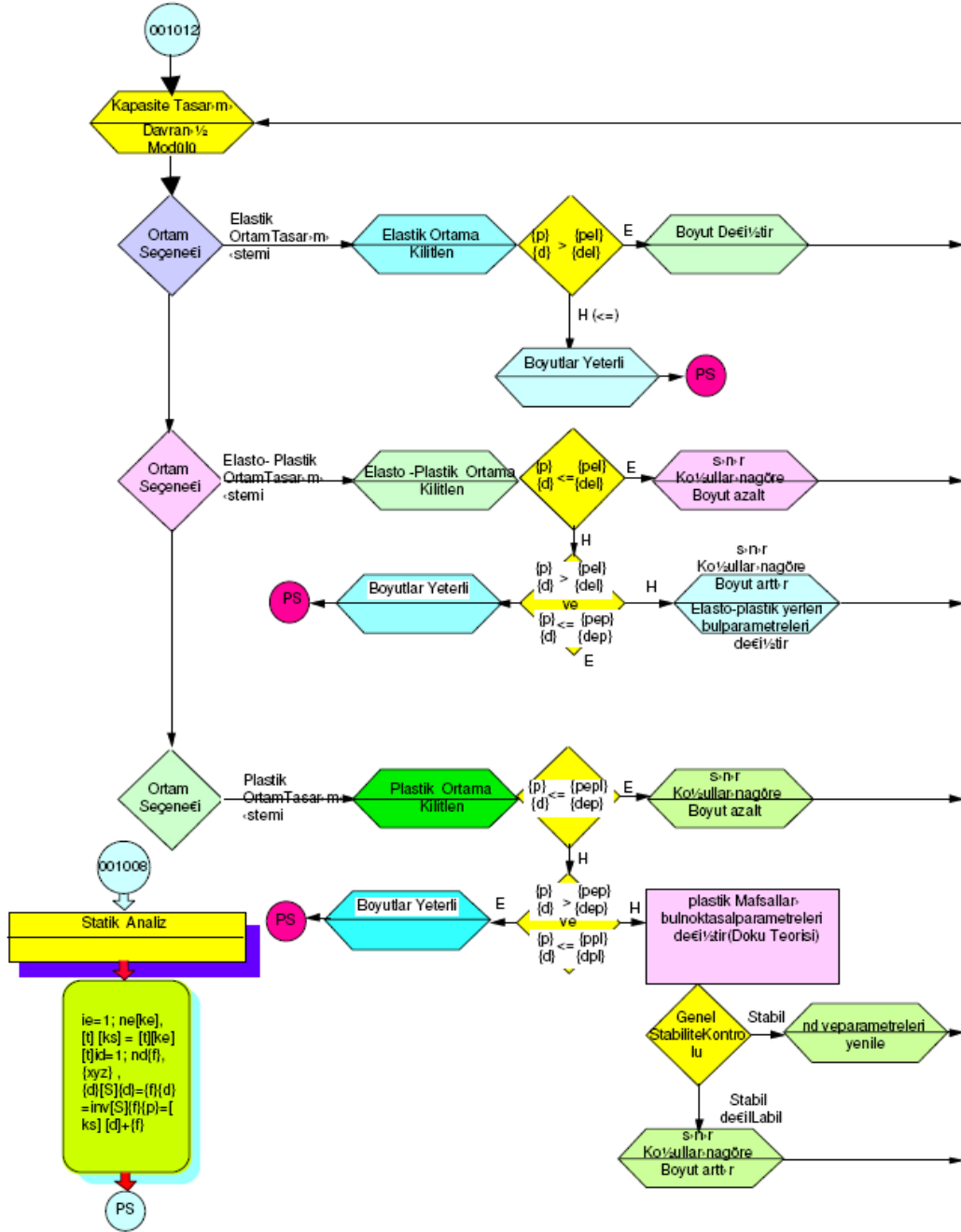
1960' lı yılların sonuna doğru ortaya çıkan bu yaklaşım, o dönemin yazılım dünyasında beliren bir bunalımın sonucudur. Yazılımların karmaşıklığı ve boyutları sürekli artıyor, ancak belli bir nitelik düzeyi korumak için gereken bakımın maliyeti zaman ve çaba olarak daha da hızlı artıyordu. NYP' yi, bu soruna karşı bir çözüm haline getiren başlıca özelliği, yazılımda birimselliği (modularity) benimsemesidir. NYP ayrıca, bilgi gizleme (information hiding), veri soyutlama (data abstraction), çok biçimlilik (polymorphism) ve kalıtım (inheritance) gibi, yazılımın bakımını ve aynı yazılım üzerinde birden fazla kişinin çalışmasını kolaylaştıran kavramları da yazılım literatürüne kazandırmıştır. Sağladığı bu avantajlardan dolayı, NYP günümüzde geniş çaplı yazılım projelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [165].

NYP'nin altında yatan birimselliğin ana fikri, her bilgisayar programının (izlence), etkileşim içerisinde olan birimler veya nesnelere kümesinden oluştuğu varsayımdır. Bu nesnelere her biri, kendi içerisinde veri işleyebilmekte ve diğer nesnelere ile çift yönlü veri alışverişinde bulunabilmektedir. Halbuki, NYP'den önce var olan tek yaklaşımda (Yordamsal programlama), programlar sadece bir komut dizisi veya birer işlev (fonksiyon) kümesi olarak görülmekteydiler [165].

Nesne yönelimli programlama dilleri, yukarıda adı geçen tüm öğelere sahip olurken, Visual Basic gibi nesne tabanlı programlama dilleri birkaçından yoksundur [165]. Etkinliği ve yapısal özellikleri nedeniyle bu çalışmada sunulan kodlama C++ ile yapılmıştır. Bilgi kümelerinin seçimi ile içerdikleri çok sayıda standart bilgiler, seçeneğe bağlı olarak bilgi tabanından doğrudan çekilmektedir. Bu ve benzeri bilgilerin her program işletimi sırasında girilmesi, hem iş tekrarını artırmakta, hem de yanlış bilgi girişine kaynak oluşturabilmektedir.

Çalışmada oluşturulacak bilgi sisteminin ana başlıkları, kendi içlerinde birçok dallara ayrılmakta ve her biri için C++ da birer modül yazılmaktadır. Sistem, yapısı gereği sonradan da her türlü şekilde genişletilebilir, dosyaları okuyup geri göndererek

çalışacağından dolayı, ne kadar büyük sistem olursa olsun her türlü bilgisayarda çok küçük bir yer kaplama özelliğinden dolayı kolaylıkla çalışabilme imkanı sağlamaktadır. Bilgi teknolojileri yaklaşımında hiyerarşik alt sistemler oluşturularak modüler ve sistematik bilgi tasarımı teknolojileri kullanılmaktadır. Program yönetim sistemi tasarımında çoklu program ve çoklu dil (konuşma dili, Türkçe, İngilizce, Almanca gibi) ile sistem kurulabilmektedir. Şekil 2.8. de, örnek bir kesit davranış modülü görülmektedir.



Şekil 2.8. Tasarım hesaplarında kullanılan örnek kesit davranış modülü

Sistemde bulunan sayısal çözümlemenin bir kolu olan doku yaklaşımı hakkında, Bölüm 2.2.3. de bilgi verilmektedir.

### 2.2.3. Doku Yaklaşımı ve Düzlem Yüzeysel Taşıyıcı Sistemlerin Çözümü

Yüzeysel taşıyıcı sistemler, hatta sürekli ortam mekaniği problemlerinin çoğunun çözümü, düzlemde genellikle 4. dereceden bir diferansiyel denklem ile tanımlanmaktadır. Doku üzerindeki bir noktanın, kendisine diferansiyelleri diferans alacak kadar yakın noktalarla fonksiyonel ve parametrik ilişkisi, sürekli ortam denklemleri ile çözüm uyumluluğu göstermektedir. Bu durumda çözüm, taşıyıcı sistemin geometrisinden bağımsızdır. Yani, taşıyıcı sistemin düzenli veya düzensiz geometrisini içine alacak şekilde tanımlanacak olan doku yapısı ile sistem çözülebilmektedir. Sistem geometrisinin sınırlarını belirleyen sınır değerleri ile çözüm belirginleşmektedir.

#### 2.2.3.1. Plaklar İçin Uygulama

Plaklar, xy düzleminde varsayılan ve çeşitli dış etkilere göre daha çok eğilmeye çalışan yüzeysel taşıyıcılardır. Düşey (z eksen) doğrultusundaki etki dağılımları için, düzgün geometri durumunda elemanter yöntemler kullanılmaktadır. Ancak, düzgün olmayan geometrilerde ve yük dağılımlarının da değişmesi durumunda, çözüm elemanter yöntemlerle çok külfetli duruma gelmektedir. Doku yapısının kullanılması ile; etki dağılımlarının fonksiyonel ilişkileri ile sistemin geometrik özellikleri vb. ilişkiler, parametrik ve fonksiyonel olarak sınır koşullarına getirilerek özel ve genel amaçlı çözümler yapılabilmektedir.

#### Plak çözümünde doku yaklaşımının temel uygulaması

$$[K] \{M\} = \{P\} \rightarrow \{M\} = [K]^{-1} \{P\} \quad (2.6)$$

$$[K] \{w\} = \{M\} \frac{dx^2}{KR} \quad (2.7)$$

$$KR = \frac{EI}{(1 - \mu^2)} \quad (2.8)$$

Zemine oturan plakta doku yaklaşımı

$$\Delta \Delta w + kw = 0 \quad (2.9)$$

$$[K] \{M\} = \{P\} \rightarrow \{M\} = [K]^{-1} \{P\} \quad (2.6)$$

$$[K] \{w\} + k \{w\} = \{M\} \frac{dx^2}{KR} \quad (2.10)$$

$$[K+k] \{w\} = \{M\} \frac{dx^2}{KR} \quad (2.11)$$

$$\{w\} = [K+k]^{-1} \{M\} \frac{dx^2}{KR} \quad (2.12)$$

k: zemin yatak katsayısı

KR: plak rijitliği

[K]: katsayılar matrisi

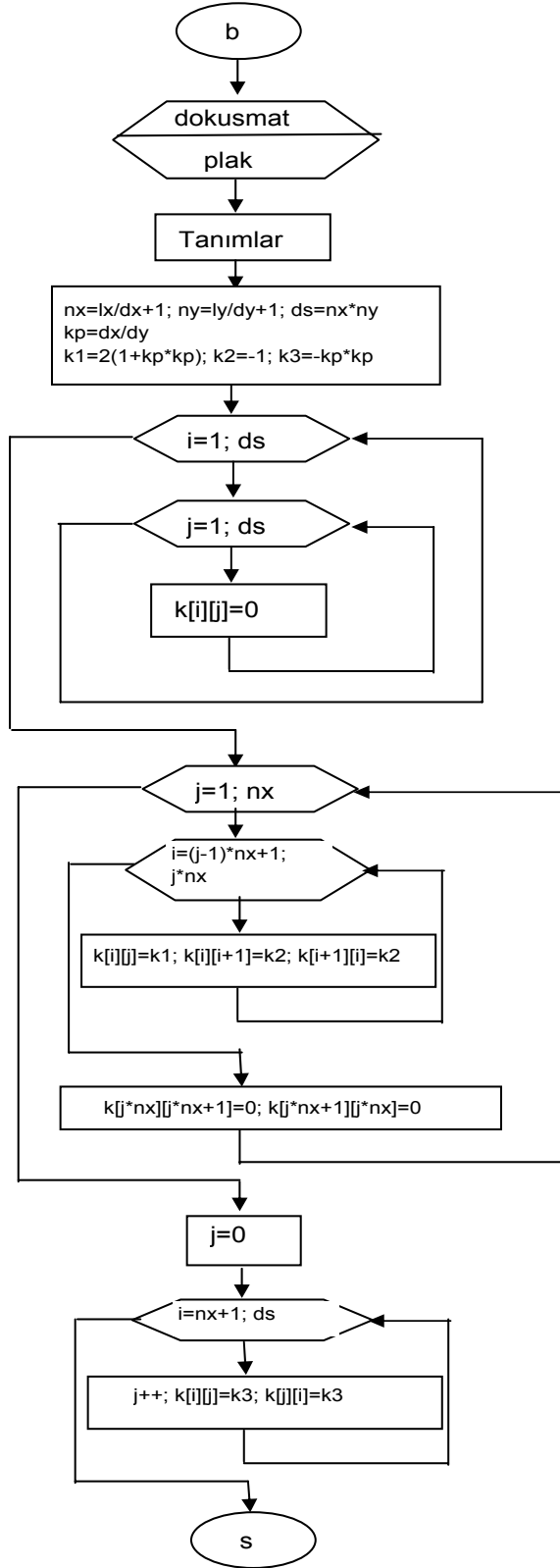
{M}: bilinmeyen vektörü

{P}: yük vektörü

{w}: çökme vektörü

Sistem, geometrik bilgiler girildikten sonra, katsayılar matrisini Şekil 2.9. daki işleyiş şemasına göre oluşturmaktadır.

## KATSAYILAR MATRISI



$$\begin{aligned}
 [k]\{m\} &= \{p\} \\
 \{m\} &= \text{inv}[k] \{p\} \\
 [k] \{w\} &= \{mk/kr\} dx \cdot dx \\
 [k] \{w\} &= \{m\} dx \cdot dx / kr \\
 pe[i] &= \{m\} dx \cdot dx / kr \\
 \{w\} &= \text{inv}[k] pe[i]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 kr &= EI / (1 - \mu \cdot \mu) \\
 \{m\}_{xyz} &= f(k, w, dx, dy, \mu) \\
 \{q\} &= f(k, w, dx, dy, \mu, \dots)
 \end{aligned}$$

Şekil 2.9. Katsayılar matrisi işleyiş şeması

Çökme vektörü bulunduktan sonra etki dağılımları,

$$\{mx\} = -K \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (2.13)$$

$$\{my\} = -K \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (2.14)$$

$$\{mxy\} = -(1-\mu)K \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (2.15)$$

eşitlikleri ile bulunmaktadır.

Birim genişlik için,

$$K = \frac{Ed^3}{12(1-\mu^2)} \quad (2.16)$$

E, elastisite modülü; d, plak kalınlığı;  $\mu$ , poisson oranıdır.

### Fonksiyonlar (etki dağılımı)

$$w_{i,j} = fw(E, d, \mu, k, x, y, z, I, p) \quad (2.17)$$

$$mx_{i,j} = fm(E, d, \mu, k, x, y, z, I, p, \overset{\boxed{1}}{drm}) \quad (2.18)$$

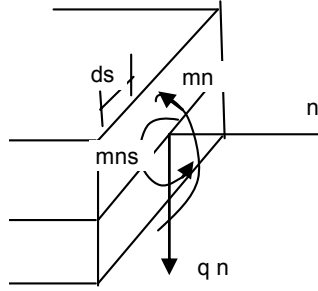
$$my_{i,j} = fm(E, d, \mu, k, x, y, z, I, p, \overset{\boxed{2}}{drm}) \quad (2.19)$$

$$mxy_{i,j} = fm(E, d, \mu, k, x, y, z, I, p, \overset{\boxed{3}}{drm}) \quad (2.20)$$

Yapılacak olan çalışmada, kullanılacak olan sınır şartları, aşağıda belirtilmektedir:

### Plak yüzeysel taşıyıcı sistemlerde sınır şartları

Şekil 2.10. da, yük altında plak kenarında oluşan momentler gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Plak kenar momentleri

$mn$ , eğilme momentini;  $mns$ , burulma momentini;  $qn$  ise kesme kuvvetini göstermektedir.

Burulma momentini oluşturan kuvvetler eşdeğer kesme kuvvetine dönüştürülür ve etkiyen kesme kuvvetleri ile birleştirilir.

$$q_n = q_n + \frac{\partial mns}{\partial s} \quad (2.21)$$

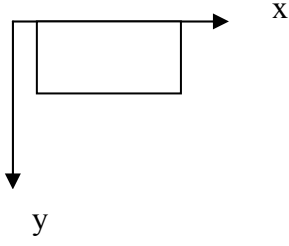
birleşir

Bu durumda,

$$q_{xb} = q_x + \frac{\partial mxy}{\partial y} = -k \left[ \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2 - \mu) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right] \quad (2.22)$$

$$q_{yb} = q_y + \frac{\partial mxy}{\partial x} = -k \left[ \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + (2 - \mu) \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} \right] \quad (2.23)$$

1) Tam serbest (x kenarı boşta)

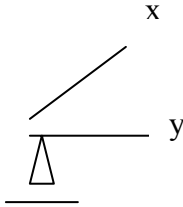


$$\bar{q}_x = q_x + \frac{\partial m_{xy}}{\partial y}; \quad \bar{q}_y = q_y + \frac{\partial m_{xy}}{\partial x}$$

$$\bar{q}_x = 0; \quad m_x = 0$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0; \quad \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2 - \mu) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} = 0$$

2) Basit mesnet

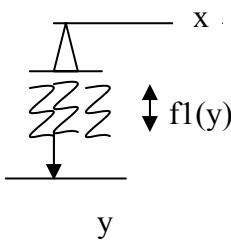


$$w = 0; \quad \longrightarrow \quad \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0$$

$$\Delta w = 0; \quad \longrightarrow \quad \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0$$

$$\text{Mafsal boyunca } \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0; \quad w = 0; \quad \Delta w = 0 \quad (\text{Navier Sınır Şartı})$$

3) Elastik mesnet

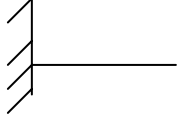


$$w = f_l(y) \quad \longrightarrow \quad \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0$$

$$m_x = 0$$



## 4) Ankastre mesnet

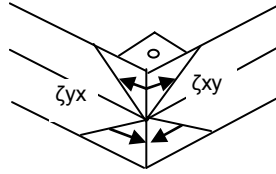
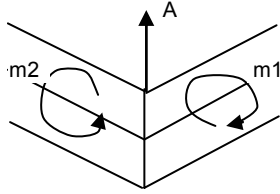


$$w = 0; \frac{\partial w}{\partial x} = 0; \text{ Ankastre kenar boyunca, } \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = 0$$

Tam ankastre olan plak kenarlarında bir burulma momenti oluşmaz.

Plak Köşeleri:

5) Serbestçe dönebilen mesnetlenmiş plak köşelerine  $m_1$ ,  $m_2$  burulma momenti etkir.  $A = m_1 + m_2$  lik moment etkisi oluşur.



$$m_1 = m_2 = m_{xy}; A = 2m_{xy}$$

6) Ankastre plak köşesi: Köşede burulma momentleri sıfır olur. Tam ankastre plak köşesinde münferit kuvvet oluşmaz.

7) Serbest köşe: Bitişik kenarlar boyunca  $m_n = 0$ ;  $q_{n_{bir}} = 0$  dır. Köşede münferit kuvvet reaksiyonu oluşmaz. Serbest ve dik açılı köşede  $m_{xy} = 0$ ; yani  $\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = 0$  dır.

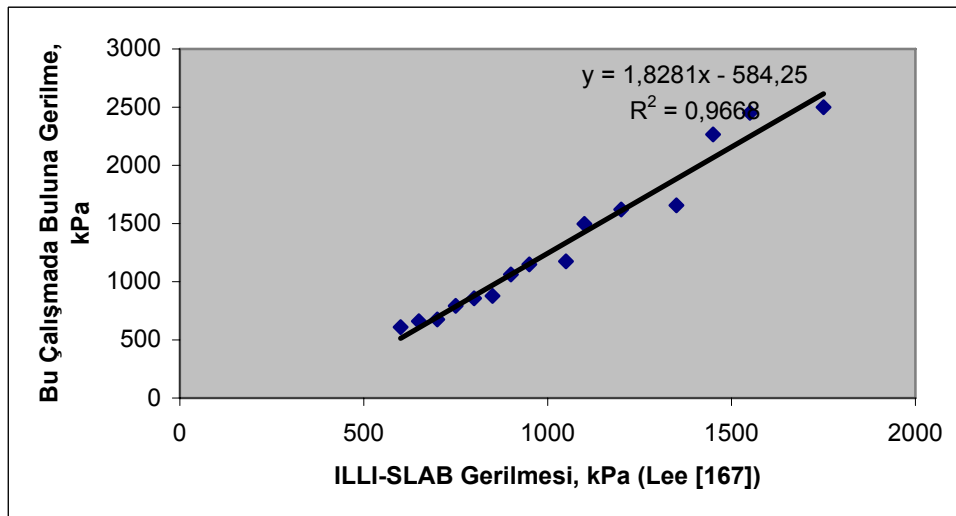
**2.2.3.2. Bulunan Gerilme Değerlerinin ILLI-SLAB Değerleri ile Kontrolü**

Tek dingilli araçlar için AASHO yol testlerinde geliştirilmiş ve plak kenar gerilmesini hesaplamak için (2.24) eşitliği kullanılmaktadır [166].

$$\frac{\varepsilon_d}{L_1} = \frac{20.54}{10^{0.0031\Delta T} h^{1.278}} \quad (2.24)$$

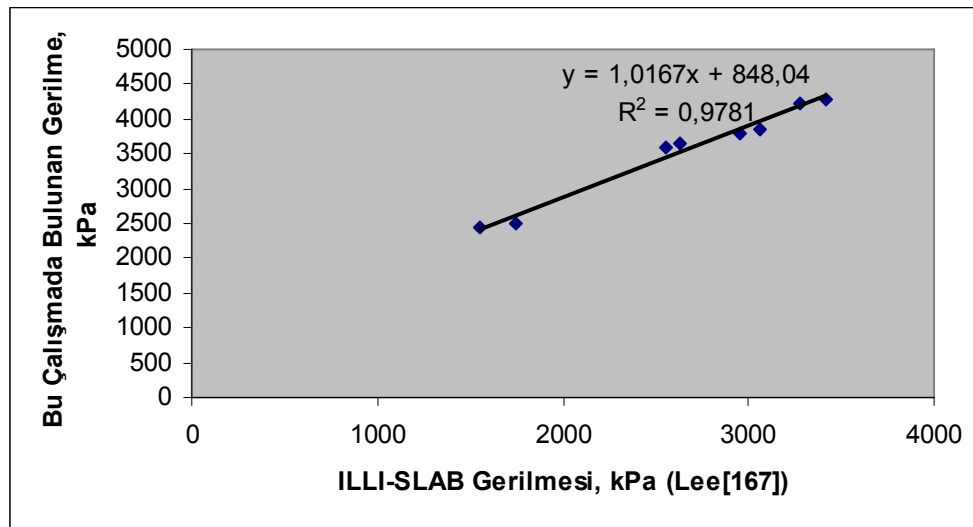
$\varepsilon_d$  = dinamik kenar çökmesi ( $\times 10^{-6}$ );  $L_1$  = test aracının sembolik dingil ağırlığı, kips;  $h$  = sembolik beton plak kalınlığı, inç;  $\Delta T$  = AASHO yol testlerinde tanımlanan standart sıcaklık farkı, °F.

Lee [167],  $\Delta T$  değerini sıfır olarak alıp, 80 kN ağırlığındaki tek dingil yüklemesi altında kenar gerilmesini ILLI-SLAB programını kullanarak ve saha çalışmasında ölçülen değerlerle karşılaştırmış ve birbirleriyle örtüşen değerler bulmuştur. Lee' nin [167], çalışmasında kullandığı kabuller:  $E = 43.1$  GPa (kaplama betonu elastisite modülü),  $L_1 = 80$  kN (dingil ağırlığı);  $P = 40$  kN (tekerlek yükü);  $\mu = 0.28$  (poisson oranı);  $L = 4.57$  m (plak uzunluğu);  $W = 3,66$  m (plak genişliği); tekerlek yükleme alanı =  $279 \times 356$  mm<sup>2</sup>; plak kalınlıkları 165, 203, 241, 279 ve 318 mm; “k” (yatak katsayısı) değerleri 27.1, 40.7, 54.3 kPa/mm olmak üzere toplamda 15 farklı kombinasyondur. Tekerlek yüklemesi, tekerlek dış yüzeyi, plak kenarının orta noktasından 330 mm içerde olacak şekilde uygulanmıştır. Aynı kabuller doğrultusunda, sonlu farklar metodu kullanılarak yapılan çalışmada elde edilen gerilmeler ve Lee' nin [167] ILLI-SLAB programı kullanarak elde ettiği gerilmeler Şekil 2.11. de karşılaştırılmış, ve 203 mm den daha büyük kalınlıklardaki plaklar için birbirine yakın değerler bulunmuştur.



Şekil 2.11. Dingil ağırlığından kaynaklanan eğilmede çekme gerilmelerinin ILLI-SLAB programı ve tez çalışmasında bulunan değerleri

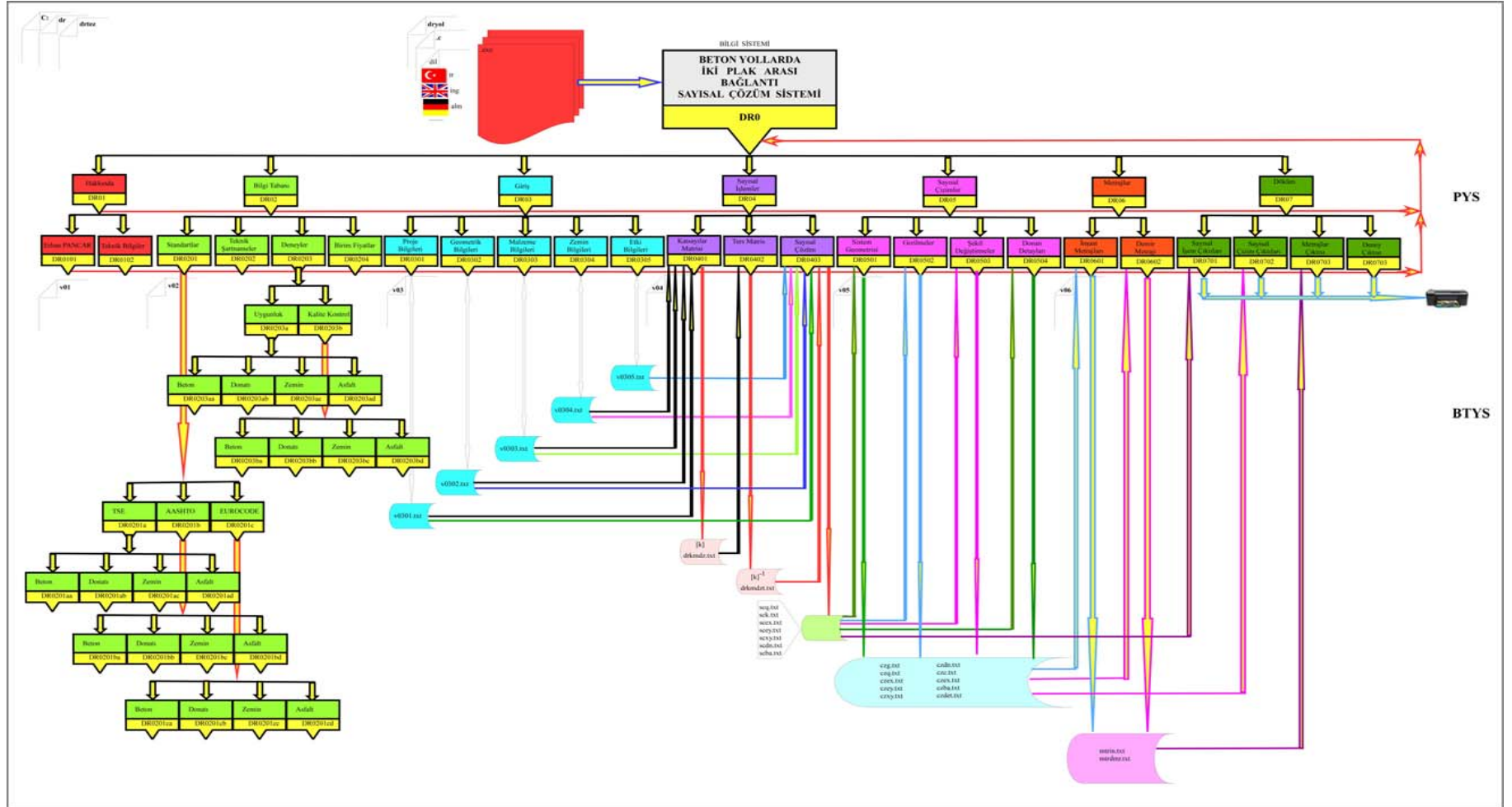
Bunun yanında Lee [167], yükleme ve plak eğilmesi üzerine de bir analiz yapmıştır. Analizinde 165 mm kalınlığında bir plak kullanmış, 0, 5.6, 8.3 ve 1.1°C sıcaklık değişiminde ve “k” değeri 27.1 ve 40.7 kPa/mm olması durumunda oluşacak olan toplam gerilmeyi ILLI-SLAB programıyla hesaplamıştır. Hesaplarında, termal genleşme katsayısını 9.0E-06/ °C ve plak birim ağırlığını 2.410 kg/m<sup>3</sup> olarak kabul etmiştir. Bulduğu gerilme değerleri, ölçülen değerlere yakın çıkmıştır. Aynı kabuller doğrultusunda, çalışmada elde edilen gerilmeler ve Lee’ nin [167] ILLI-SLAB programı kullanarak elde ettiği gerilmeler Şekil 2.12. de karşılaştırılmış ve sıcaklık değişiminden kaynaklı oluşan gerilmeler için birbirine yakın değerler bulunmuştur.



Şekil 2.12. Dingil ağırlığından plak eğilmesinden kaynaklanan toplam eğilmede çekme gerilmelerinin ILLI-SLAB programı ve tez çalışmasında bulunan değerleri

#### 2.2.4. Bilgi Sistemlerinin Oluşturulması

Bilgi sistemleri ve yapay zeka yaklaşımını, farklı trafik yükleri altında zemine oturan plak olarak sonlu farklar modellemesi ile çözümlenecek olan beton yol kaplaması tasarımı için öncelikle, sistemin nasıl işleyeceğini belirlemekte fayda vardır. Her biri C++ da ayrı ayrı yazılan modüller, sistem tarafından okunup geri gönderilmektedir. Söz konusu işlem, kullanım kolaylığı sağlamak ve sistemin daha sonradan da genişletilebilme imkanını doğurmaktadır. Sistemin işleyişi önceki bölümlerde detaylı olarak anlatılmış olup, Şekil 2.13. de oluşturulan sistemin işleyişi gösterilmektedir.



Şekil 2.13. Beton yol tasarımı sistem şeması

### 2.2.5. Türkiye' deki Trafik

Karayolları Trafik Yönetmeliğinin 128. Maddesi' nde [168], araçların ölçü ve ağırlıkları şu şekilde tanımlanmıştır:

- a- Azami genişlik ..... : 2.55 metre,  
 Frigorifik araçlarda yalnız frigorifik yapı genişliği ..... : 2.60 metre,  
 b-Azami yükseklik ..... : 4.00 metre,



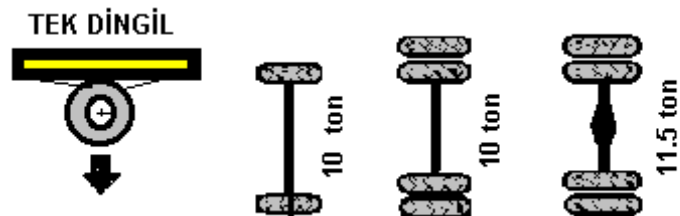
Şekil 2.14. Araç azami genişlik ve yüksekliği

c- Azami ağırlıklar:

1- Tek dingilde en çok;

-Tahriksiz tek dingilde ..... : 10 ton,

-Tahrikli tek dingilde ..... : 11.5 ton,



Şekil 2.15. Araç azami ağırlıkları

Türkiye karayollarında 2009 yılı içerisinde dingil ağırlığı etüt yerleri, etüde alınan taşıt sayıları ve YOGT değerleri Tablo 2.1. de gösterilmektedir [12].

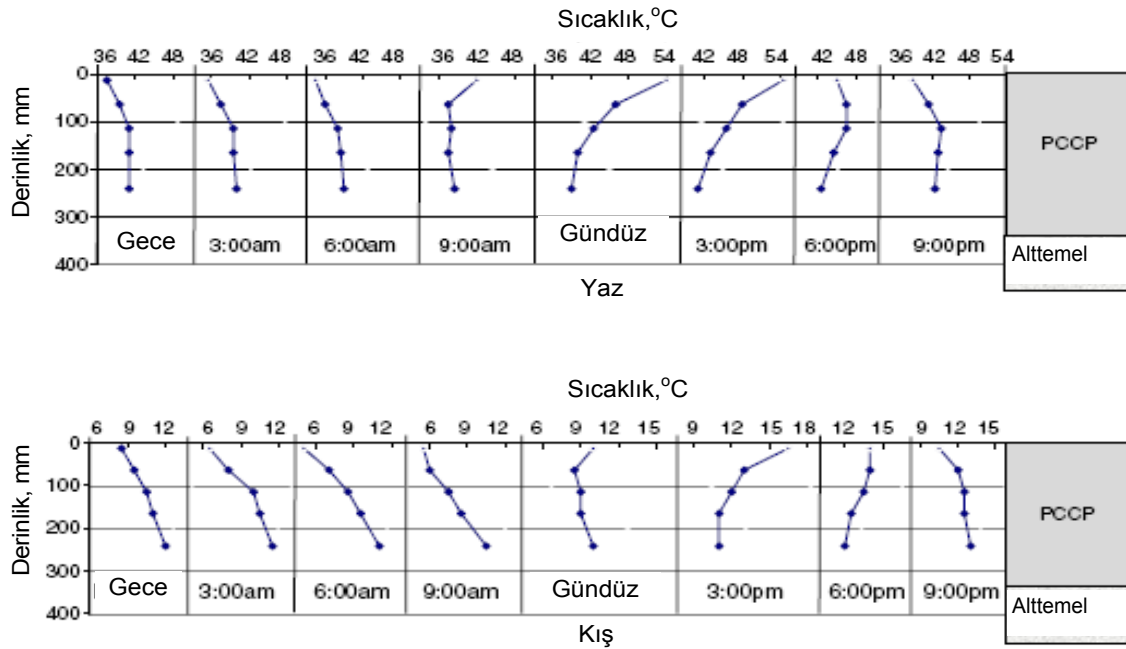
Tablo 2.1. Türkiye karayollarında 2009 yılı etüt yerleri ve YOGT değerleri [12]

Etüt Yılı	Mevsim	Etüt Günleri	Etüt Tanımı	Etüde Alınan Taşıt Sayısı			YOGT Değerleri		
				Kamyon	Kam.+Römork Çekici+Yarı Römork	TOPLAM	Kamyon	Kam.+Römork, Çekici+Yarı Römork	TOPLAM
2009	İLKBAHAR	26-29 Mayıs	İzmit-Sakarya	357	200	557	2.564	1.352	3.916
2009		12-15 Mayıs	(Salihli-Kulu)Ayr.-Alaşehir	204	52	256	862	420	1.282
2009		26-29 Mayıs	Konya-Sarayönü	353	48	401	2.231	1.047	3.278
2009		26-29 Mayıs	Kırkkale-Keskin	324	186	510	871	988	1.859
2009		26-29 Mayıs	Narlı-Pazarlık	202	118	320	1.338	440	1.778
2009		12-15 Mayıs	<b>Kayseri-Malatya*</b>	<b>315*</b>	<b>31*</b>	<b>346*</b>	<b>806*</b>	<b>342*</b>	<b>1148*</b>
2009		12-15 Mayıs	Ondokuzmayıs-Samsun	240	52	292	4.196	574	4.770
2009		05-08 Mayıs	Elazığ-İçme	218	72	290	1.045	242	1.287
2009		12-15 Mayıs	Birecik-Şanlıurfa	236	143	379	1.514	656	2.170
2009		26-29 Mayıs	Torul-Gümüşhane	246	42	288	572	198	770
2009		26-29 Mayıs	Aşkale-Erzurum	260	232	492	945	523	1.468
2009		26-29 Mayıs	Sandıklı-Dinar Ayr.	353	67	420	1.286	642	1.928
2009		12-15 Mayıs	Bandırma-Karacabey	199	100	299	1.999	796	2.795
2009		26-29 Mayıs	Sivas-(Şarkışla-Ulaş)Ayr.	267	74	341	868	363	1.231
<b>2009 İLKBAHAR TOPLAM:</b>				<b>3.459</b>	<b>1.386</b>	<b>4.845</b>	<b>20.291</b>	<b>8.241</b>	<b>28.532</b>
2009	YAZ	16-19 Haziran	Lüleburgaz-Murath	207	153	360	949	391	1.340
2009		28-31 Temmuz	Turgutlu-Salihli	249	119	368	2.324	1.120	3.444
2009		11-14 Ağustos	Konya-Aksaray	138	58	196	662	253	915
2009		09-12 Haziran	Bolu-Gerede	319	185	504	1.411	782	2.193
2009		04-07 Ağustos	Toprakale Ayr.-İskenderun	130	226	356	1.355	670	2.025
2009		14-17 Temmuz	<b>Ak Madeni-16.Böl. Hud.*</b>	<b>226*</b>	<b>28*</b>	<b>254*</b>	<b>353*</b>	<b>97*</b>	<b>450*</b>
2009		16-19 Haziran	Turhal-Tokat	155	37	192	1.118	206	1.324
2009		23-26 Haziran	Malatya-Doğaneğir	203	79	282	1.233	249	1.482
2009		17-20 Ağustos	Siverek-Diyarbakır	211	156	367	1.257	334	1.591
2009		22-26 Haziran	Rize-Pazar	325	53	378	1.632	517	2.149
2009		02-05 Haziran	(Van-Muradiye)Ayr.-Erciş	357	149	506	1.076	186	1.262
2009		02-05 Haziran	Kars-(Selim-Kötek)Ayr.	257	34	291	539	62	601
2009		18-21 Ağustos	Eğirdir-Şarkikaraağaç	158	48	206	500	107	607
2009		14-17 Temmuz	İnönü-Kütahya	166	96	262	2.071	1.183	3.254
2009	01-04 Haziran	Ereğli-Akçakoca	260	237	497	762	684	1.446	
2009	04-07 Ağustos	Kurşunlu-Ilgaz	370	56	426	946	632	1.578	
2009	14-17 Temmuz	Suşehri-(Refahiye-İmranlı)Ayr.	86	60	146	293	422	715	
<b>2009 YAZ TOPLAM:</b>				<b>3.591</b>	<b>1.746</b>	<b>5.337</b>	<b>18.128</b>	<b>7.798</b>	<b>25.926</b>
2009	SONBAHAR	06-09 Ekim	Tekirdağ-Kırkları Ayr.	272	137	409	1.679	623	2.302
2009		13-16 Ekim	Aydın-Nazilli	217	106	323	1.716	808	2.524
2009		06-09 Ekim	Afyon-Kütahya	198	113	311	1.231	601	1.832
2009		06-09 Ekim	Kırkkale-Delice Ayr.	309	197	506	1.461	734	2.195
2009		17-20 Kasım	Ceyhan-Adana	208	133	341	1.824	614	2.438
2009		20-23 Ekim	<b>Kayseri-Sivas*</b>	<b>264*</b>	<b>25*</b>	<b>289*</b>	<b>978*</b>	<b>372*</b>	<b>1.350*</b>
2009		20-23 Ekim	Çorum-Amasya	191	77	268	573	173	746
2009		06-09 Ekim	Küreci-Malatya	112	86	198	462	78	540
2009		23-26 Kasım	Ergani-Diyarbakır	261	82	343	1.358	238	1.596
2009		03-06 Kasım	Tirebolu-Beşikdüzü	332	75	407	1.409	782	2.191
2009		29 Eylül,02 Eki.	Tatvan-Gevaş	150	79	229	951	166	1.117
2009		29 Eylül,02 Eki.	Eleşkirt-Ağrı	244	214	458	547	445	992
2009		17-20 Kasım	Kızıcadağ-Çavdır Ayr.	205	91	296	549	190	739
2009		06-09 Ekim	Susurluk-Bahkesir	291	99	390	3.061	1.443	4.504
2009	05-08 Ekim	Devrek-Mengen	272	111	383	497	190	687	
2009	29 Eylül,02 Eki.	Sivas-Hafik	258	56	314	494	183	677	
<b>2009 SONBAHAR TOPLAM:</b>				<b>3.520</b>	<b>1.656</b>	<b>5.176</b>	<b>17.812</b>	<b>7.268</b>	<b>25.080</b>
<b>2009 GENEL TOPLAM:</b>				<b>10.570</b>	<b>4.788</b>	<b>15.358</b>	<b>56.231</b>	<b>23.307</b>	<b>79.538</b>
<b>2007, 2008 ve 2009 GENEL TOPLAM:</b>				<b>28.252</b>	<b>11.598</b>	<b>39.850</b>	<b>138.215</b>	<b>55.642</b>	<b>193.857</b>

\*:Hatalı tarım nedeniyle ağırlık bilgileri değerlendirilmeye alınmamıştır.

Tablo 2.1. de görüldüğü üzere, farklı bölgelere göre ağır taşıtlar için 2009 yılı ölçümlerine göre YOGT değeri, 600 ile 5.000 arasında değişmektedir. 2009 yılı içerisinde yapılan ölçümlere göre en büyük YOGT, 4.770 değeri ile Ondokuzmayıs-Samsun hattında ölçülmüştür. Rize-Pazar güzergahında 2009 YOGT değeri 2.149, Araklı-Of arasında 2008 YOGT değeri 2.030 dur. 2008 yılı verilerine göre en büyük YOGT değeri Karacabey-Bursa güzergahında olup, 5.296 dır. 2007 yılı verilerine göre en büyük YOGT değeri Ankara-Elmadağ arasında olup, 5.907 dir. Türkiye karayolları yük taşımacılığı etütlerinde, 2007-2008-2009 yılları için sunulan verilerde, yıllara göre etüt yerlerinin değiştiği görülmekte olup, söz konusu yıllarda ölçülen en büyük YOGT değerinin 6.000 i geçmediği tespit edilmiştir [12].

Çalışmada uygulanan sayısal tasarımlarda sıcaklık gradyan değerleri de kullanıldığından, Belshe vd. nin [169], Amerika' nın Arizona eyaletinin Phoenix şehrinde yaz ve kış mevsimindeki farklı saatlerde, beton yoldaki kaplama kalınlığınca değişen sıcaklık değerlerini incelemekte fayda vardır. Söz konusu değerler Şekil 2.16. da gösterilmektedir [169].

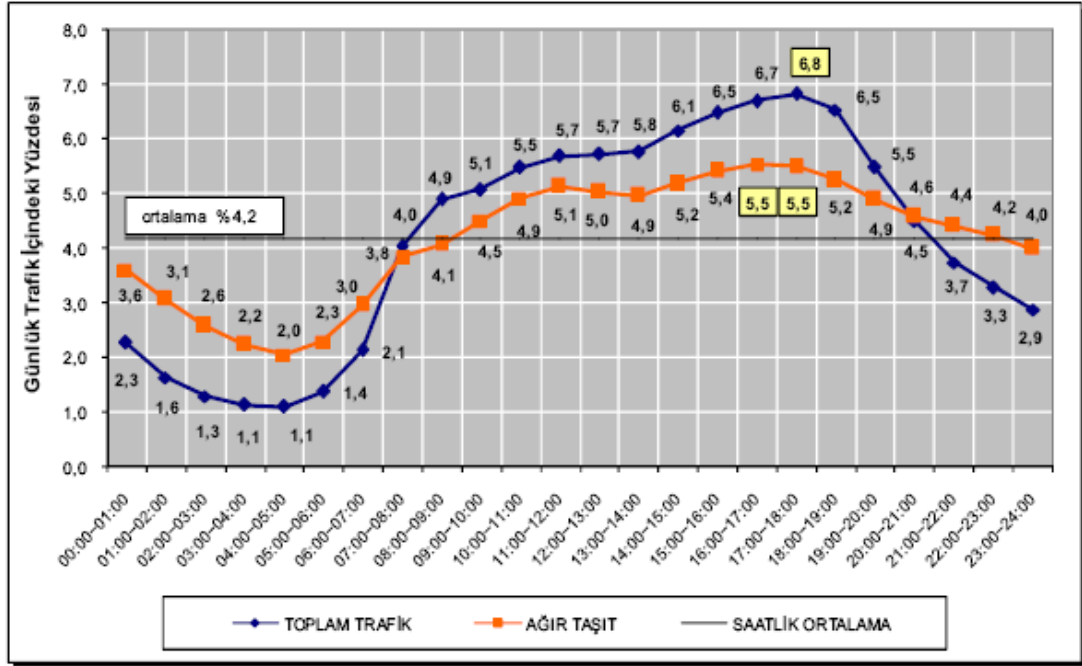


Şekil 2.16. Beton yol kaplamasında farklı saatlerdeki sıcaklık değerleri

Şekil 2.16. da görüldüğü üzere, beton kaplama alt ve üst yüzey arasındaki en büyük sıcaklık farkı, yaz mevsiminde sabah 9:00 ve öğleden sonra 15:00 saatleri arasındadır ve

16°C dir. 250 mm plak kalınlığı hesaba katılırsa, söz konusu saatler arası sıcaklık gradyan değeri ( $\Delta t$ ), 0.06°C/mm dir. Kış mevsiminde ise kaplama yüzeyleri arasındaki en büyük sıcaklık farkı sabah saatlerinde görülmektedir (7°C). 250 mm plak kalınlığı hesaba katılırsa, söz konusu vakit için sıcaklık gradyan değeri ( $\Delta t$ ), 0.03°C/mm dir.

Şekil 2.17. de, 2009 yılı ölçümlerine göre Türkiye Karayollarında ağır taşıt trafiğinin günün saatlerine göre dağılımı görülmektedir. Söz konusu trafik dağılımı, dört mevsim için de benzer şekilde olmaktadır [12]. Şekil 2.17. incelendiğinde, ağır taşıt trafiğinin sabah 08:00 den akşam 18:00 e kadar artan bir eğilim gösterdiği görülmektedir. Belshe vd. nin [169] çalışmasında elde edilen sıcaklık gradyan değerleri dikkate alındığında, beton kaplama ömrünü daha uzun tutabilmek amacıyla, yazın 10:00-15:00 saatleri arasında ağır taşıt trafiğinin yoğun olmaması gerektiği görülmektedir. Fakat, Şekil 2.17. den de anlaşılacağı üzere, ülkemizde bu saatler arasında ağır taşıt trafiği yoğundur. Mevcut trafik dağılımının kış mevsimine göre uygun olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 2.17. Toplam trafik ve ağır taşıt trafiğinin gün içinde dağılımı 2009 [12]

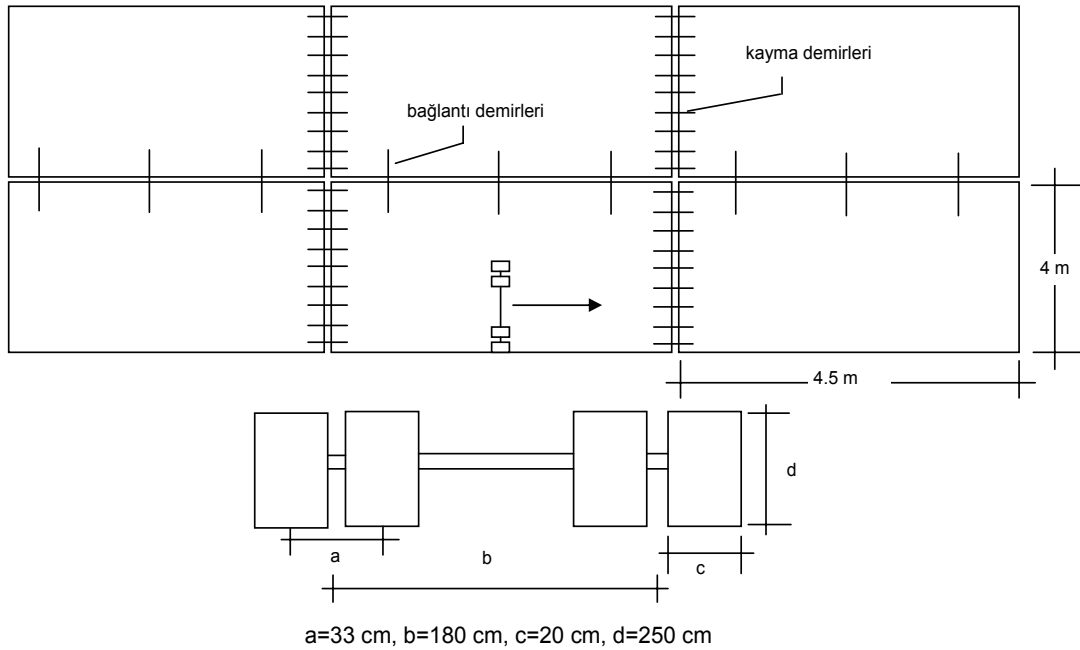
Belshe vd. nin [169] çalışmasında elde ettiği sıcaklık gradyan değerlerinin gün içindeki saatlere göre dağılımı ve Şekil 2.17. de ülkemizdeki ağır taşıt trafiğinin gün içindeki dağılımı birlikte ele alınacak olursa, yapılacak olan beton yol kalınlığı tasarım



hesaplarında, sıcaklık gradyan değerinin genel olarak  $0.05^{\circ}\text{C}/\text{mm}$  olarak alınmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

### 2.2.6. Çalışmadaki Kabuller

Çalışmada, plak yüzeyine etkiyen tekerlek yükleri, Şekil 2.18. de görüldüğü gibi, çift tekerlekten oluşan tek dingil olarak modellenmiş ve söz konusu dingil, plak boyunca tarama yapmıştır. Şekil 2.18. de, 12 tonluk dingil için kabul edilen iki tekerlek arası mesafe, aks genişliği, tekerlek-beton kaplama temas yüzeyi, plak eni ve boyu görülmektedir. Söz konusu kabullerde, konu ile ilgili yapılan çalışmalarda kullanılan değerler dikkate alınmıştır. Diğer dingil ağırlıklarında da, tekerlek basıncı  $0.6 \text{ N}/\text{mm}^2$  dir. Şekil 2.18. deki “c” değerleri 10 ton ve 8 ton dingil yükleri için sırayla; 18 cm ve 16 cm; “d” değerleri ise 23 cm ve 21 cm dir.



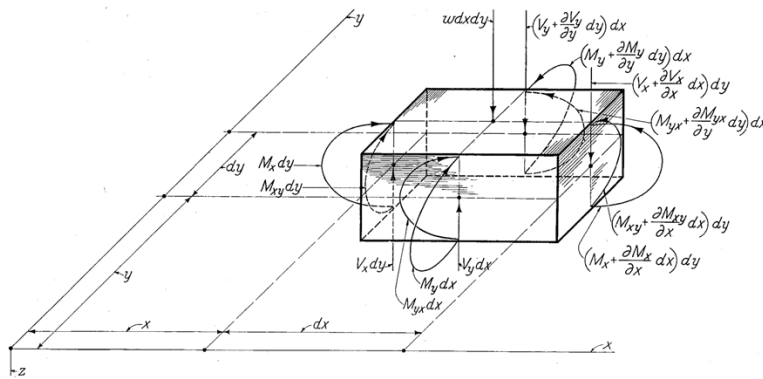
Şekil 2.18. Çift tekerlekli tek dingilin plak üzerinde tarama yapması

Çalışmada, 12 ton, 10 ton ve 8 ton ağırlığında, üç farklı dingil yükü kullanılmıştır. Tekerlek yükleri, plak üzerindeki her bir noktaya etki yaptıkça diğer noktalar da bir önceki bölümde anlatıldığı üzere, bu yüklemelerden etkilenmektedir. Bütün yüzey, dokusal olarak farklı dingil yüklemeleri altında tarandıktan sonra, oluşacak tesir çizgileri ile maksimum

gerilmeler bulunmuştur. Söz konusu dingil ağırlıklarının plak üzerindeki aynı noktadan geçme olasılığı %10 olarak kabul edilmiştir. Çalışmada, zemin yatak katsayısı “k” değeri 0.105 N/mm<sup>3</sup> olarak alınmıştır. Bu değer, 150 mm kalınlığında,  $E_f=6000$  N/mm<sup>2</sup> lik Elastisite modülüne sahip grobeton temel (lean concrete base) için kullanılmaktadır. Yol imalatında kullanılan betonun lineer termal genleşme katsayısı, 0.00001/°C olarak alınmıştır. Tasarım hesaplarında kullanılan C25 betonu için elastisite modülü 30.000 MPa, C30 betonu için 32.000 MPa ve her iki beton sınıfı için de poisson oranı ( $\nu$ ) 0.15 olarak alınmıştır.

- Plak üzerinde, trafik yüklemesinden kaynaklanan en büyük gerilme değeri, Bölüm 2.2.3. deki sayısal çözümlene yöntemi ile dokusal tarama yapılarak bulunmaktadır.
- Eğilmede çekme dayanımı için kullanılan eşitlik (1.39)
- $P_i$  tekerlek yüklemesi için izin verilen tekrar sayısı için kullanılan eşitlik (1.40)
- Destek uzunluğu için kullanılan eşitlik (1.7)
- Plak mesafesi  $L'$  için kullanılan eşitlik (1.6)
- Sıcaklık gradyan gerilmeleri  $\sigma_t$  için kullanılan eşitlik (1.11) ve (1.12)
- Tasarım kriteri için kullanılan eşitlik (1.27)

Şekil 2.19. da beton plağın bir kesitine etkiyen yayılı yük altında oluşacak etkiler görülmektedir.



Şekil 2.19. Yayılı yük altında beton plağa etkiyen kuvvetler

### 2.3. Yapay Zeka ile Plak Kalınlığının Tespiti

Çalışma sonunda, trafik yükünden ve sıcaklık gradyanının sebep olduğu plak eğilmesinden kaynaklanan, beton plaktaki maksimum eğilmede çekme gerilmeleri, yorulma analizinde kullanılmış ve plak kalınlığını bulmak amacıyla kurulan geri yayımlı yapay sinir ağı için, eğitim seti oluşturulmuştur.

Türkiye’ de beton yollarda, büyük oranda C30 veya C25 betonu kullanılmaktadır. Bu sebepten dolayı, kurulacak eğitim setinde, bu iki beton sınıfı kullanılmaktadır. Tablo 2.2. de, çalışmada eğitim seti için kullanılan, Bölüm 2.2.6. da bahsedilmiş olan kabuller doğrultusunda, farklı Elastisite modülü, dingil ağırlığı, yük tekrar sayısı ve sıcaklık gradyanı girdileri ile bulunan ideal beton plak kalınlıkları görülmektedir. Söz konusu eğitim seti kullanılarak oluşturulan geri yayımlı yapay sinir ağı ile ideal beton plak kalınlıkları bulunabilmektedir.

Tablo 2.2. Çalışmada kullanılan eğitim seti

<b>C30 Beton (Elastisite Modülü 32.000 MPa), Dingil Ağırlığı 12 t</b>					
<b><math>\Delta t(^{\circ}\text{C}/\text{mm})</math></b>					
<b>Plak Kalınlığı h (cm)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.06)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.05)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.04)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.03)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.02)</b>
<b>Dingil Tekrar Sayısı</b>					
18			10	100	560
20	220	280	530	3.720	20.890
21	2.190	2.720	3.630	15.370	88.380
22	15.550	18.980	24.650	51.680	306.510
23	80.280	96.420	122.620	171.720	867.240
24	333.990	395.710	494.330	675.120	2.141.320

<b>C30 Beton (Elastisite Modülü 32.000 MPa), Dingil Ağırlığı 10 t</b>					
<b>Plak Kalınlığı h (cm)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.06)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.05)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.04)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.03)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.02)</b>
<b>Dingil Tekrar Sayısı</b>					
18	10	40	320	1.800	8.460
20	2.950	3.700	6.740	40.330	198.120
21	22.680	27.790	36.280	138.010	697.550
22	129.340	155.630	198.410	394.610	2.062.220
23	555.360	658.670	823.940	1.127.490	5.095.300
24	1.970.080	2.308.030	2.840.970	3.800.660	11.166.420

<b>C30 Beton (Elastisite Modülü 32.000 MPa), Dingil Ağırlığı 8 t</b>					
<b>Plak Kalınlığı h (cm)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.06)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.05)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.04)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.03)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.02)</b>
<b>Dingil Tekrar Sayısı</b>					
18	510	1.420	7.950	37.420	151.530
20	47.120	57.850	99.960	511.090	2.182.800
21	274.610	330.730	422.120	1.433.940	6.318.540
22	1.238.370	1.467.810	1.834.600	3.449.850	15.754.910
23	4.370.320	5.114.250	6.285.960	8.392.350	33.687.410
24	13.080.030	15.141.060	18.346.240	24.008.430	65.007.160

<b>C25 Beton (Elastisite Modülü 30.000 MPa), Dingil Ağırlığı 12 t</b>					
<b>Plak Kalınlığı h (cm)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.06)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.05)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.04)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.03)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.02)</b>
<b>Dingil Tekrar Sayısı</b>					
18			0	0	7
20	0	0	4	50	530
21	10	15	20	300	2.830
22	130	180	260	1.230	12.040
23	1.120	1.450	2.050	4.120	42.130
24	6.980	8.880	12.150	18.820	125.170

<b>C25 Beton (Elastisite Modülü 30.000 MPa), Dingil Ağırlığı 10 t</b>					
<b>Plak Kalınlığı h (cm)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.06)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.05)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.04)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.03)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.02)</b>
<b>Dingil Tekrar Sayısı</b>					
18	0	0	2	27	190
20	10	20	100	1.050	7.900
21	210	280	410	4.360	34.090
22	1.890	2.470	3.500	14.680	119.970
23	12.390	15.790	21.680	41.410	356.190
24	62.890	78.580	105.150	157.830	916.260

<b>C25 Beton (Elastisite Modülü 30.000 MPa), Dingil Ağırlığı 8 t</b>					
<b>Plak Kalınlığı h (cm)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.06)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.05)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.04)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.03)</b>	<b>Sıcaklık Gradyanı <math>\Delta t</math> (0.02)</b>
<b>Dingil Tekrar Sayısı</b>					
18	0	10	120	930	5.480
20	460	620	2.530	20.590	128.800
21	4.350	5.680	8.060	68.270	444.760
22	29.080	37.070	50.920	188.930	1.289.940
23	148.550	185.520	248.100	449.120	3.233.510
24	609.320	747.920	977.790	1.420.760	7.166.910

Tablo 2.2. deki eğitim setindeki veriler kullanılarak, geri yayımlı YSA oluşturulmuştur. Geri yayılma algoritması, hataları geriye doğru çıkıştan girişe doğru azaltmaya çalışmaktadır. Geri yayılım ağında hatalar, ileri besleme aktarım işlevinin türevi tarafından, ileri besleme mekanizması içinde kullanılan aynı bağlantılar aracılığıyla, geriye doğru yayılmaktadır. Öğrenme işlemi, bu ağda basit çift yönlü hafıza birleştirmeye dayanmaktadır [170].

Q katmanlı ileri beslemeli bir ağ için geri yayılım algoritmasının işleyişi aşağıdaki gibi özetlenebilir;

$q=1, 2, 3, 4, \dots, Q$  katman numarası

$H_i^q = q$  katmanındaki  $i$  biriminin girdisi

$y_i^q = q$  katmanındaki  $i$  biriminin çıktısı

$w_{ij}^q = (q-1)$  katmanındaki  $i$  birimini,  $q$  katmanındaki  $j$  birimine bağlayan ağırlık

$y_i^{qp} = (q-1)$  katmanındaki  $i$  birimini,  $q$  katmanındaki  $j$  birimine bağlayan ağırlık sayısının rastlantısal olarak atanması sonucu elde edilen çıktı değeri

**1. Adım:**  $w$  için reel değerli küçük sayılar, rastlantısal şekilde başlangıç değeri olarak verilir.

**2. Adım:** Rastgele bir çalışma modeli seçilir (giriş-hedef) ve  $q$  katmanındaki her bir  $j$  birimi için çıktı değerleri ileri yönde hesaplanır. Söz konusu durum için çıkış değeri, (2.25) eşitliği ile hesaplanır.

$$y_i^{qp} = f\left(\sum_i y_i^{q-1} w_{ij}^q\right) \quad (2.25)$$

**3. Adım:** Çıkış birimleri için hata terimleri, (2.26) eşitliği ile hesaplanır.

$$\delta_i^q = (y_i^q - y_i^{qp}) f'(H_i^q) \quad (2.26)$$

**4. Adım:**  $q = Q, Q-1, Q-2, \dots, 2$  katmanlarındaki  $i$  birimleri, yani gizli katman birimleri için hata terimleri, (2.27) eşitliği ile hesaplanır.

$$\delta_i^{q-1} = f'(H_i^{q-1}) \sum_j \delta_j^q w_{ij}^q \quad (2.27)$$

**5. Adım:** Ağırlıkların hepsi, (2.29) eşitliği ile yenilenir.

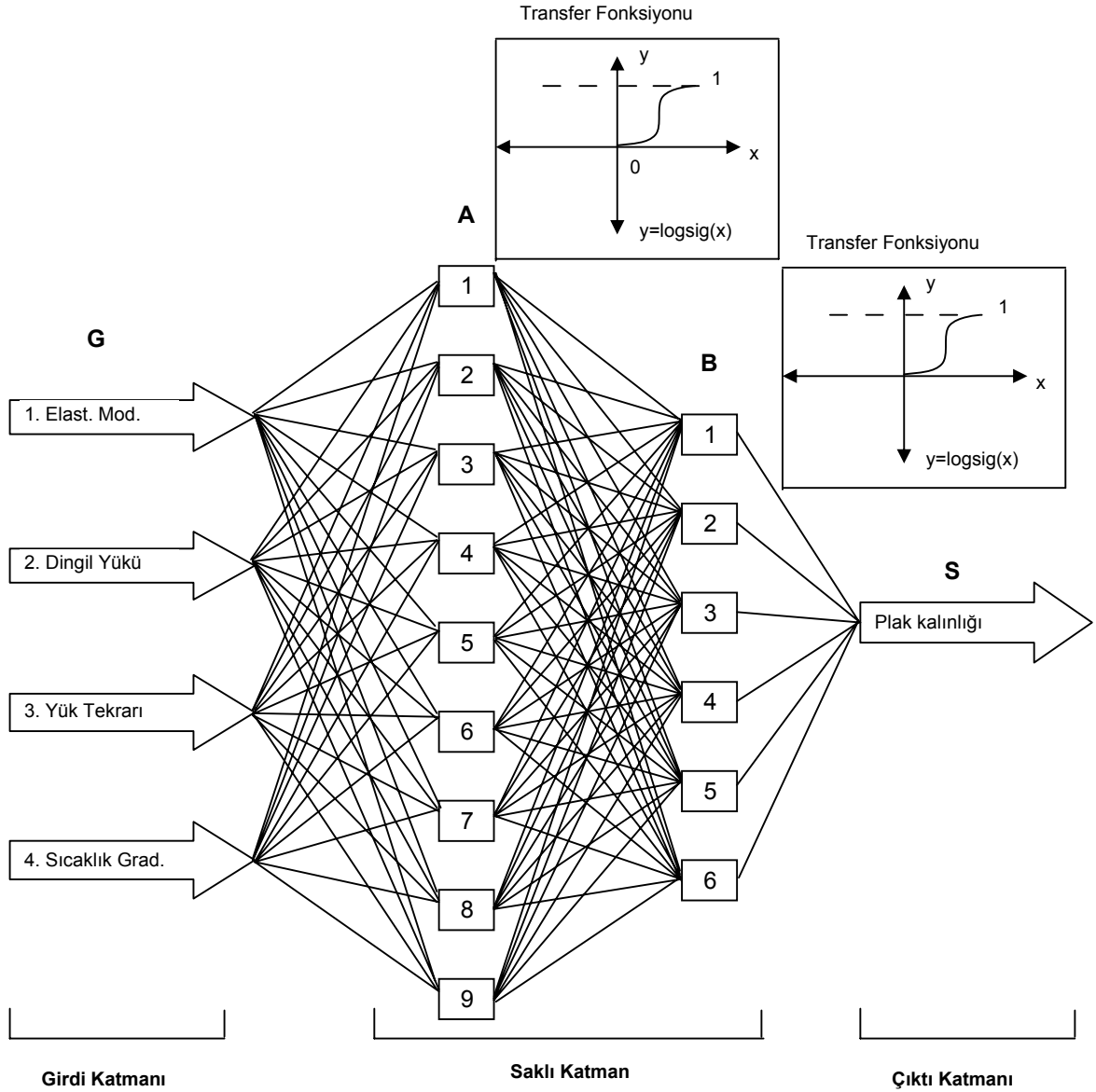
$$\Delta w_{ij}^q = \eta \delta_i^q y_j^{q-1} \quad (2.28)$$

$\eta$ , öğrenme katsayısıdır.

$$w_{ij}^{yeni} = w_{ij}^{eski} + \Delta w_{ij}^q \quad (2.29)$$

**6. Adım:** 2. adıma geri dönülerek toplam hata kabul edilebilir bir duruma gelene kadar işlemler tekrarlanır.

Geri yayılım algoritmasının amacı, uygunluk fonksiyonunu minimum yapmaktır. Uygunluk fonksiyonu YSA' nın ağırlık değerlerine bağlı olduğundan dolayı algoritma, YSA ağırlıklarının en uygun biçimde değiştirilmesi işlemlerinden oluşmaktadır [171]. Şekil 2.20. de, çalışmada kullanılan geri yayımlı YSA' nın işleyişi görülmektedir.



Şekil 2.20. Beton plak kalınlığının tespitinde YSA işleyiş şeması

Şekil 2.20. de görüldüğü üzere, girdi katmanındaki 4 farklı girdi (beton elastisite modülü= $G_1$ , dingil yüğü= $G_2$ , yüğü tekrarı= $G_3$ , sıcaklık gradyanı= $G_4$ ), birisi 9 adet, diğeri 6 adet olmak üzere, iki adet saklı katman grubunun her bir elemanı ile ilişkilidir. Söz konusu saklı katmanlardaki eleman sayıları ve elde edilen eşitliklerdeki ağırlık değerleri (girdi ve saklı katmanlardaki elemanların çarpan değerleri), eğitim setindeki çıktı değerleri ile en yakın sonuca ulaşıncaya kadar, yukarıda 6 adımda anlatılan iterasyon çözüm yöntemi ile bulunmaktadır. Bu ağırlık değerleri, çözüm yönteminde 1. Adımda sözü geçen “w” değerleridir. “A” ile isimlendirilen ve 9 adet elemandan (A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8,

A9) oluşan birinci saklı katman grubunun elde edilmesi için kullanılan sayısal gösterim aşağıdadır:

$$A = \frac{1}{1 + e^{-Net_A}}$$

$$Net_{A1} = G1 \times (-1,8) + G2 \times (-0,0) + G3 \times (-1,6) + G4 \times (1,3) - 2,6$$

$$Net_{A2} = G1 \times (0,4) + G2 \times (0,5) + G3 \times (1,9) + G4 \times (0,1) + 2,3$$

$$Net_{A3} = G1 \times (-0,2) + G2 \times (0,0) + G3 \times (2255,3) + G4 \times (0,1) + 2254,9$$

$$Net_{A4} = G1 \times (-6,3) + G2 \times (0,0) + G3 \times (-1,2) + G4 \times (-11,6) - 0,9$$

$$Net_{A5} = G1 \times (5,6) + G2 \times (-0,1) + G3 \times (55,5) + G4 \times (-0,1) + 53,5$$

$$Net_{A6} = G1 \times (26,2) + G2 \times (-10,4) + G3 \times (69,4) + G4 \times (-10,2) + 66,0$$

$$Net_{A7} = G1 \times (15,2) + G2 \times (-15,7) + G3 \times (65,1) + G4 \times (-39,6) + 108,3$$

$$Net_{A8} = G1 \times (102,6) + G2 \times (0,1) + G3 \times (-179,9) + G4 \times (-0,3) + 77,3$$

$$Net_{A9} = G1 \times (-18,0) + G2 \times (12,0) + G3 \times (155,0) + G4 \times (27,2) + 137,1$$

G1, G2, G3 ve G4 ile adlandırılan girdi bilgileri ile, A saklı katmanı elemanlarını bulmak için kullanılan “w” ağırlık çarpanları (örnek olarak, A1 elemanını bulmak için kullanılan eşitlikteki altı çizili, -1.8, -0.0, -1.6, 1.3 değerleri) iterasyon yöntemi ile bulunan çarpanlardır.

“A” saklı katman grubunun her bir elemanının ilişkide olduğu “B” saklı katman grubunun elemanları (B1, B2, B3, B4, B5, B6) aşağıdaki şekilde elde edilmektedir:

$$B = \frac{1}{1 + e^{-Net_B}}$$

$$Net_{B1} = A1 \times (-13,0) + A2 \times (-9,5) + A3 \times (-104,5) + A4 \times (88,8) + A5 \times (-46,0) + A6 \times (115,1) + A7 \times (-61,0) + A8 \times (2,1) + A9 \times (14,4) + 104,3328$$

$$Net_{B2} = A1 \times (-36,7) + A2 \times (29,9) + A3 \times (8,0) + A4 \times (29,7) + A5 \times (-45,8) + A6 \times (2,5) + A7 \times (-24,0) + A8 \times (53,1) + A9 \times (-41,2) + 31,6479$$

$$Net_{B3} = A1 \times (418,5) + A2 \times (191,6) + A3 \times (3268,9) + A4 \times (-43,7) + A5 \times (-272,2) + A6 \times (-265,5) + A7 \times (-0,3) + A8 \times (874,2) + A9 \times (2,0) + 652,2446$$

$$Net_{B4} = A1 \times (-9,1) + A2 \times (-4,2) + A3 \times (35,9) + A4 \times (0,1) + A5 \times (115,9) + A6 \times (-104,9) + A7 \times (0,4) + A8 \times (-16,8) + A9 \times (1,5) + 4,3995$$



$$\text{Net}_{B5} = A1 \times (9,4) + A2 \times (4,9) + A3 \times (1,0) + A4 \times (-2,3) + A5 \times (33,6) + A6 \times (-30,4) + A7 \times (142,6) + A8 \times (-1,1) + A9 \times (-2,2) - 147,1618$$

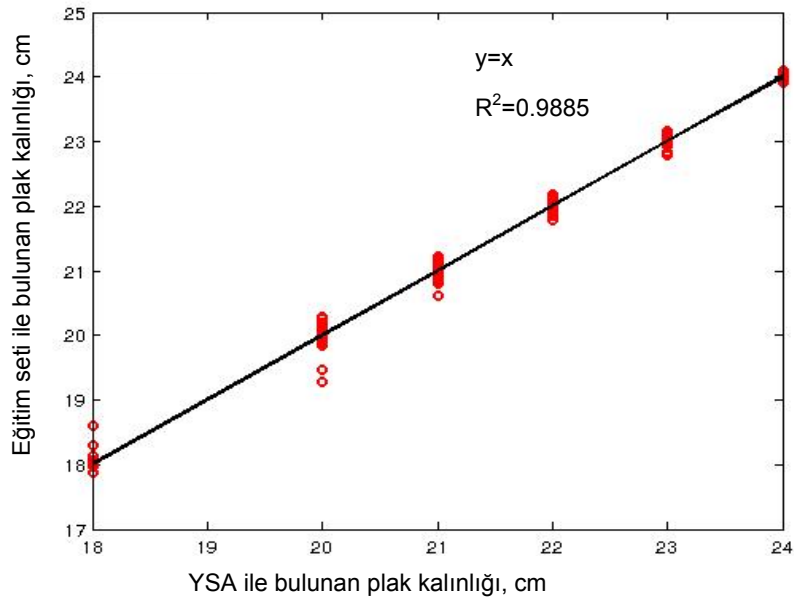
$$\text{Net}_{B6} = A1 \times (2,7) + A2 \times (-1,8) + A3 \times (-0,2) + A4 \times (-0,7) + A5 \times (-10,0) + A6 \times (10,9) + A7 \times (7,0) + A8 \times (0,7) + A9 \times (-0,7) - 7,1623$$

Son olarak da, elde edilmiş olan “B” saklı katman grubunun elemanları kullanılarak, “S” ile gösterilen ideal plak kalınlığı bulunmaktadır:

$$S = \frac{1}{1 + e^{-\text{Net}_S}}$$

$$\text{Net}_S = B1 \times (-1,669) + B2 \times (1,1179) + B3 \times (-255,1752) + B4 \times (80,3123) + B5 \times (2,9571) + B6 \times (-5,5110) - 78,7641$$

En ideal YSA algoritmasının kurulması için, söz konusu ağırlık değerlerinin, saklı katman sayısının ve saklı katmanlardaki eleman sayısının bulunmasında, binlerce iterasyon yapılmaktadır. Eğitim setindeki plak kalınlıkları ve YSA kullanılarak elde edilen plak kalınlıklarının karşılaştırılması sonucu elde edilen hata oranı Şekil 2.21. de gösterilmektedir. Eğitim setindeki plak kalınlıkları ile YSA sonuçları, %99 oranında örtüşmektedir.



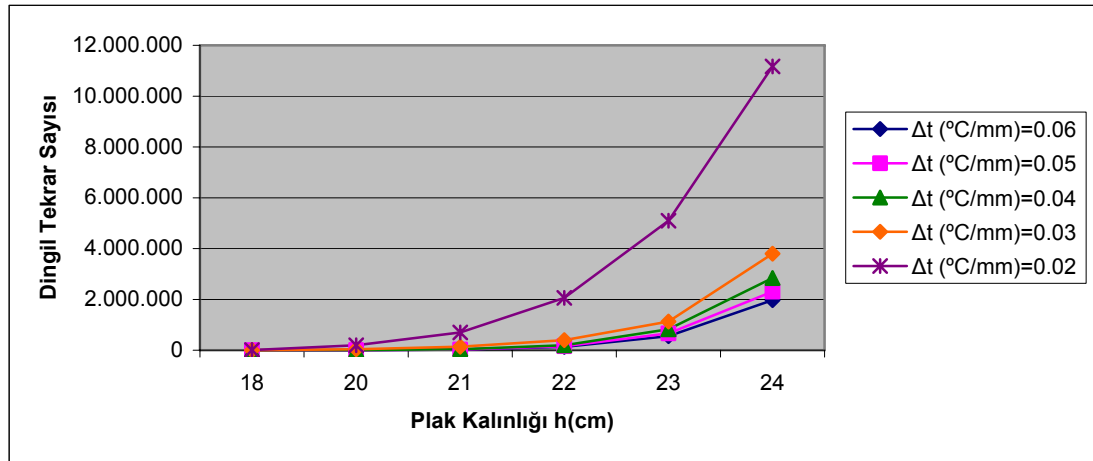
Şekil 2.21. Eğitim seti ve YSA sonuçlarının karşılaştırılması

### 3. BULGULAR VE İRDELEME

Beton yol kalınlığının belirlenmesinde, beton sınıfının, dingil ağırlığının, dingil geçiş sayısının ve dingil geçişinin olduğu zamandaki sıcaklık gradyan değerinin önemli etkileri bulunmaktadır. Bu Bölümde, söz konusu etkilerin hangi oranda olduğu irdelenecektir.

#### 3.1. Beton Kalınlığını Etkileyen Etmenler Üzerine Bulgular

Şekil 3.1. de, beton plakta, C30 betonu kullanılması durumunda, farklı sıcaklık gradyanları için 10 ton ağırlığındaki dingil geçiş sayıları görülmektedir.



Şekil 3.1. C30 Betonunda farklı sıcaklık gradyanları için 10 ton ağırlığındaki dingil geçiş sayısı

Şekil 3.12. deki grafik çizgileri için eşitlikler:

$$\Delta t(^{\circ}\text{C}/\text{mm})=0.02 \text{ için : } y=706105x^2 - 3\text{E}+06x + 3\text{E}+06 \quad (R^2=0.9845)$$

$$\Delta t(^{\circ}\text{C}/\text{mm})=0.03 \text{ için : } y=280607x^2 - 1\text{E}+06x + 1\text{E}+06 \quad (R^2=0.9386)$$

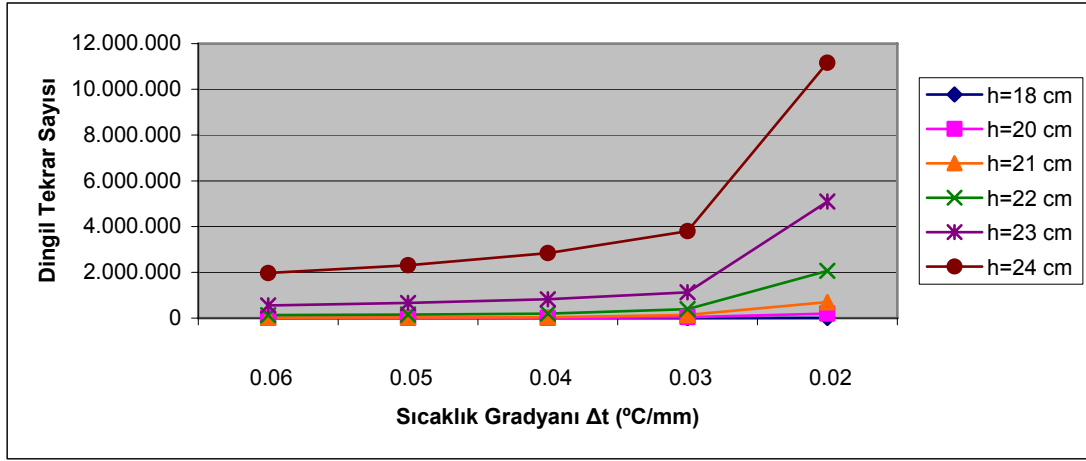
$$\Delta t(^{\circ}\text{C}/\text{mm})=0.04 \text{ için : } y=222089x^2 - 1\text{E}+06x + 1\text{E}+06 \quad (R^2=0.9415)$$

$$\Delta t(^{\circ}\text{C}/\text{mm})=0.05 \text{ için : } y=181148x^2 - 878532x + 853090 \quad (R^2=0.9399)$$

$$\Delta t(^{\circ}\text{C}/\text{mm})=0.06 \text{ için : } y=155072x^2 - 753672x + 732656 \quad (R^2=0.9386)$$

Şekil 3.1. de görüldüğü üzere, plak kalınlıkları arttıkça, beton yolun dingil tekrar kapasitesi artmaktadır. Bu kapasite artışı, tasarım hesabında kullanılan sıcaklık gradyanına da önemli derecede bağlıdır. Örnek vermek gerekirse, C30 betonu kullanılan beton plakta, 0.06 sıcaklık gradyanında, 12 ton dingil ağırlığının plak kenar orta noktasından geçiş kapasitesi 20 cm plak kalınlığı için 220 iken, 24 cm plak kalınlığına kadar, her bir plak kalınlığının kendisinden bir önceki plak kalınlığının dingil geçiş kapasitesine oranı sırayla, %995 ( $h=21$  cm kapasite/ $h=20$  cm kapasite), %710 ( $h=22$  cm kapasite/ $h=21$  cm kapasite), %516 ( $h=23$  cm kapasite/ $h=22$  cm kapasite), %416 ( $h=24$  cm kapasite/ $h=23$  cm kapasite) olmaktadır. Sıcaklık gradyanının 0.04 olması durumundaki kapasite ile 0.06 olması durumundaki kapasite oranı ise, 20 cm, 21 cm, 22 cm, 23 cm ve 24 cm plak kalınlıkları için sırayla, %241, %166, %159, %153, %148 dir.

Sıcaklık gradyan değeri düştükçe, plak kalınlığının artırılması, daha fazla dingil tekrarına imkan sağlamaktadır. Sıcaklık gradyanı 0.03 iken, 21 cm plak kalınlığı ile 20 cm plak kalınlığı arasındaki 12 ton dingil geçiş kapasite farkı, 11.650; sıcaklık gradyanı 0.06 olduğunda ise, 1.970 dir. Bu iki farkın birbirine oranı 5.9 dur. Söz konusu oran, 22 cm ve 23 cm plak kalınlıkları karşılaştırıldığında, 2.72, 23 cm ve 24 cm plak kalınlıkları karşılaştırıldığında ise 1.98 dir. Beton kalınlıkları arttıkça, bu oran her ne kadar düşse de, plak kalınlık artışı ile birlikte beton plağın dingil tekrar kapasitesi önemli miktarda artmaktadır. Azalan bu oranın, plak kalınlığının düşük olduğu durumlardaki dingil geçiş kapasitesine göre çok daha büyük kapasite miktarlarına ait olduğu bilgisi ihmal edilmemelidir. Beton plak kalınlığı arttıkça, sıcaklık gradyan değeri, dingil tekrar sayısı bakımından çok daha önemli bir hal almaktadır. Şekil 3.2. de, beton plakta, C30 betonu kullanılması durumunda, farklı plak kalınlıkları için 10 ton ağırlığındaki dingil geçiş sayıları görülmektedir.



Şekil 3.2. C30 Betonunda farklı plak kalınlıkları için 10 ton ağırlığındaki dingil geçiş sayısı

Şekil 3.13. deki grafik çizgileri için eşitlikler:

$$h=18\text{cm için : } y=1032.9x^2 - 4331.1x + 3758 \quad (R^2=0.9510)$$

$$h=20\text{cm için : } y=24616x^2 - 105002x + 94592 \quad (R^2=0.9453)$$

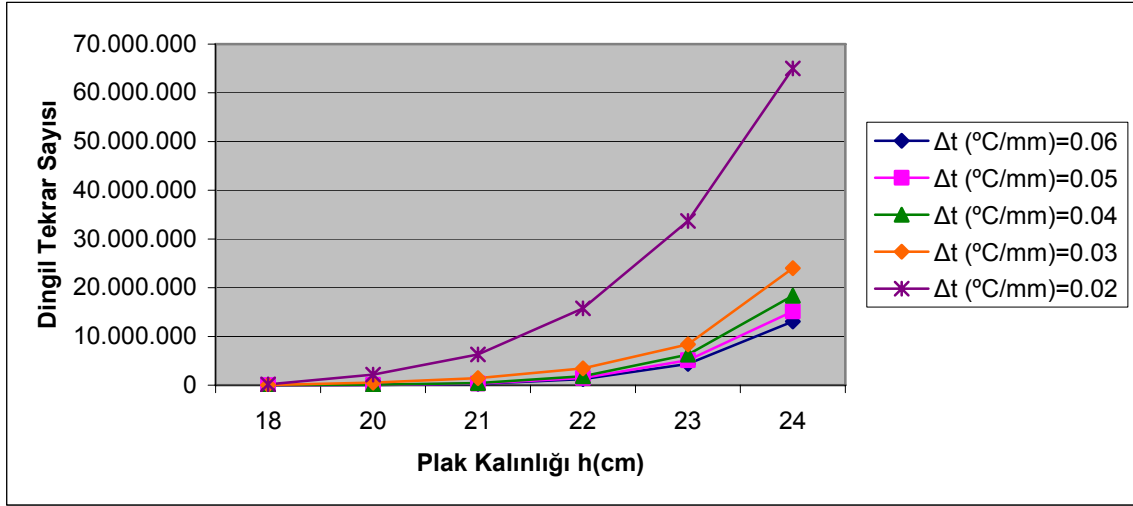
$$h=21\text{cm için : } y=85864x^2 - 369190x + 347524 \quad (R^2=0.9357)$$

$$h=22\text{cm için : } y=245433x^2 - 1E+06x + 1E+06 \quad (R^2=0.9161)$$

$$h=23\text{cm için : } y=561949x^2 - 2E+06x + 3E+06 \quad (R^2=0.9022)$$

$$h=24\text{cm için : } y=1E+06x^2 - 4E+06x + 6E+06 \quad (R^2=0.9264)$$

Şekil 3.2. de görüldüğü üzere, sıcaklık gradyanı  $\Delta t$  (°C/mm) 0.03 den daha az değerlere düştükçe, beton plak üzerindeki dingil tekrar kapasitesi 22 cm ve daha büyük plak kalınlıklarında ani bir artış göstermektedir. Şekil 3.3. de, beton plakta, C30 betonu kullanılması durumunda, farklı sıcaklık gradyanları için 8 ton ağırlığındaki dingil geçiş sayıları görülmektedir.



Şekil 3.3. C30 Betonunda farklı sıcaklık gradyanları için 8 ton ağırlığındaki dingil geçiş sayısı

Şekil 3.14. deki grafik çizgileri için eşitlikler:

$$\Delta t(^{\circ}\text{C}/\text{mm})=0.02 \text{ için : } y=4\text{E}+06x^2 - 1\text{E}+07x + 1\text{E}+07 \quad (R^2=0.9922)$$

$$\Delta t(^{\circ}\text{C}/\text{mm})=0.03 \text{ için : } y=2\text{E}+06x^2 - 7\text{E}+06x + 7\text{E}+06 \quad (R^2=0.9534)$$

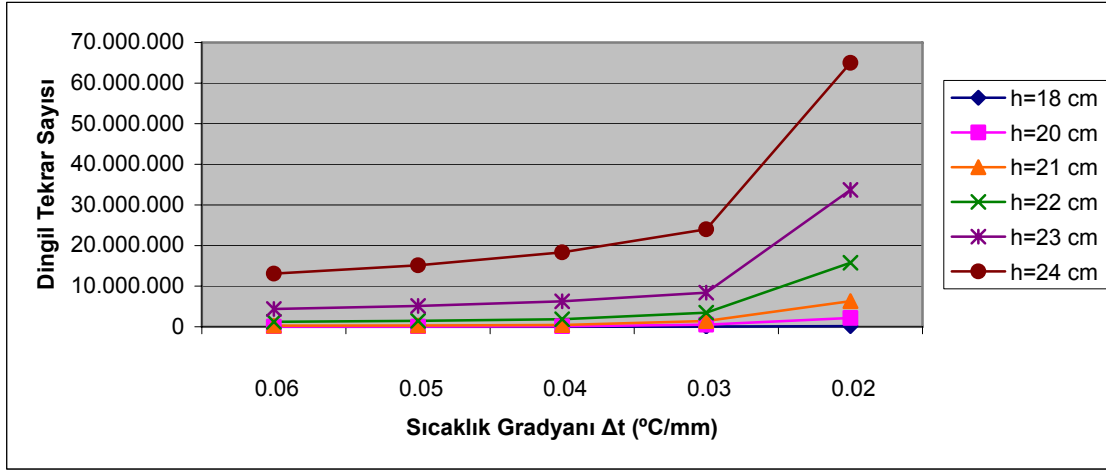
$$\Delta t(^{\circ}\text{C}/\text{mm})=0.04 \text{ için : } y=1\text{E}+06x^2 - 6\text{E}+06x + 6\text{E}+06 \quad (R^2=0.9588)$$

$$\Delta t(^{\circ}\text{C}/\text{mm})=0.05 \text{ için : } y=1\text{E}+06x^2 - 5\text{E}+06x + 5\text{E}+06 \quad (R^2=0.9575)$$

$$\Delta t(^{\circ}\text{C}/\text{mm})=0.06 \text{ için : } y=980952x^2 - 5\text{E}+06x + 4\text{E}+06 \quad (R^2=0.9564)$$

Şekil 3.3. ile Şekil 3.1. birbirleri ile karşılaştırıldığında, dingil ağırlığı değişse de, sıcaklık gradyan değerinin düşmesi durumunda, plak kalınlığının artırılmasının daha fazla dingil tekrarına imkan sağladığı; fakat daha az dingil ağırlığında sıcaklık gradyanı ile değişen dingil tekrar sayısı farkının daha fazla olduğu görülmektedir.

Şekil 3.4. de, beton plakta, C30 betonu kullanılması durumunda, farklı plak kalınlıkları için 8 ton ağırlığındaki dingil geçiş sayıları görülmektedir.



Şekil 3.4. C30 Betonunda farklı plak kalınlıkları için 8 ton ağırlığındaki dingil geçiş sayısı

Şekil 3.15. deki grafik çizgileri için eşitlikler:

$$h=18\text{cm için : } y=17810x^2 - 73056x + 63024 \quad (R^2=0.9605)$$

$$h=20\text{cm için : } y=263641x^2 - 1E+06x + 1E+06 \quad (R^2=0.9537)$$

$$h=21\text{cm için : } y=755528x^2 - 3E+06x + 3E+06 \quad (R^2=0.9430)$$

$$h=22\text{cm için : } y=2E+06x^2 - 8E+06x + 8E+06 \quad (R^2=0.9215)$$

$$h=23\text{cm için : } y=4E+06x^2 - 2E+07x + 2E+07 \quad (R^2=0.9057)$$

$$h=24\text{cm için : } y=6E+06x^2 - 2E+07x + 3E+07 \quad (R^2=0.9296)$$

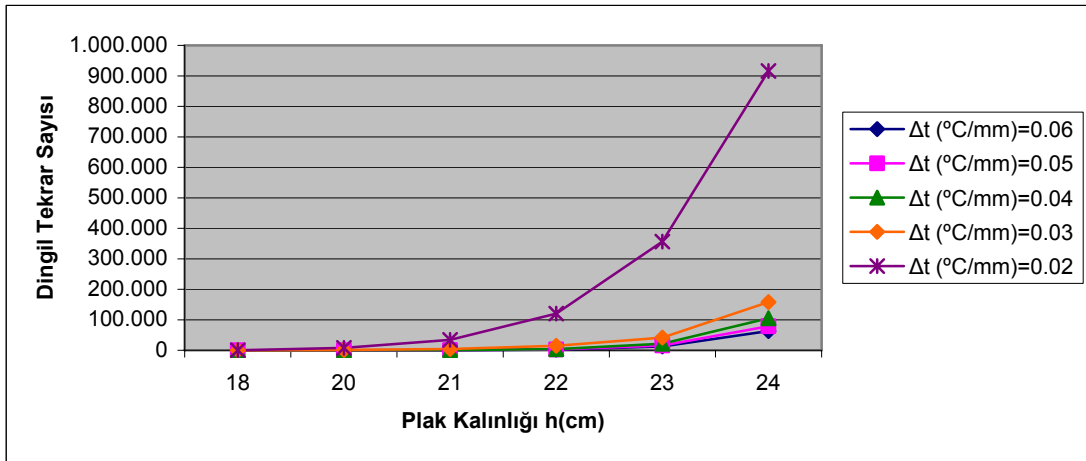
Şekil 3.4. de görüldüğü üzere, sıcaklık gradyanı  $\Delta t$  (°C/mm) 0.03 den daha az değerlere düştükçe, beton plak üzerindeki dingil tekrar kapasitesi 22 cm ve daha üzeri plak kalınlıklarında ani bir artış göstermektedir. Bu artış, dingil ağırlığı azaldıkça artmaktadır.

C30 betonunda, 10 ton dingil ağırlığında ve 24 cm plak kalınlığında, sıcaklık gradyanı  $\Delta t$  (°C/mm) 0.04 den 0.03 e ve 0.03 den 0.02 ye düştüğünde dingil tekrar sayısı sırasıyla 1.34 ve 2.94 kat artmaktadır. Dingil ağırlığı 8 ton olduğunda ise sırasıyla 1.31 ve 2.71 kat artmaktadır.

Bu değerler, 23 cm plak kalınlığında, dingil ağırlığı 10 ton iken, sırayla 1.37 ve 4.52 iken, 8 ton dingil ağırlığı için 1.34 ve 4.01 dir. Plak kalınlığı 22 cm olduğunda, bu değerler 10 ton dingil ağırlığında sırayla 1.99 ve 5.23 iken, 8 ton dingil ağırlığı için 1.88 ve 4.57 dir (Şekil 3.2., Şekil 3.4.).

Dingil ağırlığı arttıkça, aynı kalınlıktaki dingil tekrar sayısı, sıcaklık gradyanı düşüşüne bağlı olarak, daha düşük dingil ağırlığına göre daha büyük oranda artmaktadır. Örnek vermek gerekirse, C30 betonu kullanıldığında, 0.06 sıcaklık gradyanında, 12 ton dingil ağırlığının geçiş kapasitesi 21 cm kalınlığındaki plak için 2.190; sıcaklık gradyanı 0.03 olduğunda ise 15.370 olmaktadır. Dingil geçiş kapasitesi 7 kat artmaktadır. Aynı şartlar altında, dingil ağırlığı 8 ton olarak alındığında ise dingil geçiş kapasitesi 5 kat artmaktadır.

Plak kalınlığının azaltılması, izin verilen dingil tekrar sayısı bakımından, sıcaklık gradyan değerini daha etkili kılmaktadır. Şekil 3.5. de, beton plakta, C25 betonu kullanılması durumunda, farklı sıcaklık gradyanları için 10 ton ağırlığındaki dingil geçiş sayıları görülmektedir.



Şekil 3.5. C25 Betonunda farklı sıcaklık gradyanları için 10 ton ağırlığındaki dingil geçiş sayısı

Şekil 3.16. daki grafik çizgileri için eşitlikler:

$$\Delta t(^{\circ}\text{C}/\text{mm})=0.02 \text{ için : } y=64320x^2 - 287066x + 268310 \quad (R^2=0.9709)$$

$$\Delta t(^{\circ}\text{C}/\text{mm})=0.03 \text{ için : } y=11976x^2 - 57536x + 56295 \quad (R^2=0.9265)$$

$$\Delta t(^{\circ}\text{C}/\text{mm})=0.04 \text{ için : } y=8720.4x^2 - 44083x + 43840 \quad (R^2=0.9063)$$

$$\Delta t(^{\circ}\text{C}/\text{mm})=0.05 \text{ için : } y=6537.3x^2 - 33121x + 32965 \quad (R^2=0.9040)$$

$$\Delta t(^{\circ}\text{C}/\text{mm})=0.06 \text{ için : } y=5243.7x^2 - 26613x + 26513 \quad (R^2=0.9022)$$

Şekil 3.5. ile Şekil 3.1. karşılaştırıldığında, beton dayanımının düşmesi durumunda, sıcaklık gradyanı düştükçe, plak kalınlığının artışına bağlı olarak, beton plaktan geçen dingil tekrar sayısının daha büyük oranda arttığı görülmektedir.

C30 betonunda, sıcaklık gradyanı  $\Delta t$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ ) 0.04, 0.03 ve 0.02 olduğunda, 24 cm kalınlığındaki plaktan geçen 10 ton ağırlığındaki dingil sayısı, 18 cm kalınlıktaki plaktan geçen dingil sayısının sırasıyla 8.88, 2.11 ve 1.32 katıdır. Bu oran, aynı sıcaklık gradyanında C25 betonu için sırasıyla, 52.58, 5.85 ve 4.82 dir.

C30 betonunda, sıcaklık gradyanı  $\Delta t$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ ) 0.04, 0.03 ve 0.02 olduğunda, 24 cm kalınlığındaki plaktan geçen 8 ton ağırlığındaki dingil sayısı, 23 cm kalınlıktaki plaktan geçen dingil sayısının sırasıyla 2.92, 2.86 ve 1.93 katıdır. Bu oran, aynı sıcaklık gradyanında, C25 betonu için sırasıyla, 3.94, 3.16 ve 2.22 dir.

### **3.2. Dingil Dönüşüm Katsayılarını Etkileyen Etmenler Üzerine Bulgular**

Tasarımda kabul edilecek sıcaklık gradyanına göre, farklı dingil ağırlıklarının birbirine dönüşüm katsayıları, beton kalınlığı ve beton yolda kullanılan beton sınıfı ile değişmektedir. Tablo 3.1. de, C30 betonu kullanılması durumunda, sıcaklık gradyanına ve beton kalınlığına bağlı, 12 ton ve 10 ton ağırlığındaki dingil yüklerinin eşdeğer 8 ton dingil ağırlığına dönüştürülmesi için kullanılacak olan katsayılar görülmektedir. Tablo 3.2. de ise, benzer dingil dönüşüm katsayıları C25 betonu için bulunmuştur.



Tablo 3.1. C30 Betonlu için farklı sıcaklık gradyanlarında ve plak kalınlıklarında dingil dönüşüm katsayıları

<b><math>\Delta t</math> (0.06°C/mm)</b>					
<b>h (cm)</b>	<b>Dingil Ağırlığına Göre Plak Kalınlığına Bağlı Dingil Tekrar Sayısı</b>			<b>12 ton dingilin 10 t dingile dönüşüm katsayısı</b>	<b>10 ton dingilin 8 ton dingile dönüşüm katsayısı</b>
	<b>12 ton</b>	<b>10 ton</b>	<b>8 ton</b>		
<b>20</b>	220	2.950	47.120	13,41	15,97
<b>21</b>	2.190	22.680	274.610	10,36	12,11
<b>22</b>	15.550	129.340	1.238.370	8,32	9,57
<b>23</b>	80.280	555.360	4.370.320	6,92	7,87
<b>24</b>	333.990	1.970.080	13.080.030	5,90	6,64
<b><math>\Delta t</math> (0.05°C/mm)</b>					
<b>h (cm)</b>	<b>Dingil Ağırlığına Göre Plak Kalınlığına Bağlı Dingil Tekrar Sayısı</b>			<b>12 ton dingilin 10 t dingile dönüşüm katsayısı</b>	<b>10 ton dingilin 8 ton dingile dönüşüm katsayısı</b>
	<b>12 ton</b>	<b>10 ton</b>	<b>8 ton</b>		
<b>20</b>	280	3.700	57.850	13,21	15,64
<b>21</b>	2.720	27.790	330.730	10,22	11,90
<b>22</b>	18.980	155.630	1.467.810	8,20	9,43
<b>23</b>	96.420	658.670	5.114.250	6,83	7,76
<b>24</b>	395.710	2.308.030	15.141.060	5,83	6,56
<b><math>\Delta t</math> (0.04°C/mm)</b>					
<b>h (cm)</b>	<b>Dingil Ağırlığına Göre Plak Kalınlığına Bağlı Dingil Tekrar Sayısı</b>			<b>12 ton dingilin 10 t dingile dönüşüm katsayısı</b>	<b>10 ton dingilin 8 ton dingile dönüşüm katsayısı</b>
	<b>12 ton</b>	<b>10 ton</b>	<b>8 ton</b>		
<b>20</b>	530	6.740	99.960	12,72	14,83
<b>21</b>	3.630	36.280	422.120	9,99	11,64
<b>22</b>	24.650	198.410	1.834.600	8,05	9,25
<b>23</b>	122.620	823.940	6.285.960	6,72	7,63
<b>24</b>	494.330	2.840.970	18.346.240	5,75	6,46
<b><math>\Delta t</math> (0.03°C/mm)</b>					
<b>h (cm)</b>	<b>Dingil Ağırlığına Göre Plak Kalınlığına Bağlı Dingil Tekrar Sayısı</b>			<b>12 ton dingilin 10 t dingile dönüşüm katsayısı</b>	<b>10 ton dingilin 8 ton dingile dönüşüm katsayısı</b>
	<b>12 ton</b>	<b>10 ton</b>	<b>8 ton</b>		
<b>20</b>	3.720	40.330	511.090	10,84	12,67
<b>21</b>	15.370	138.010	1.433.940	8,98	10,39
<b>22</b>	51.680	394.610	3.449.850	7,64	8,74
<b>23</b>	171.720	1.127.490	8.392.350	6,57	7,44
<b>24</b>	675.120	3.800.660	24.008.430	5,63	6,32
<b><math>\Delta t</math> (0.02°C/mm)</b>					
<b>h (cm)</b>	<b>Dingil Ağırlığına Göre Plak Kalınlığına Bağlı Dingil Tekrar Sayısı</b>			<b>12 ton dingilin 10 t dingile dönüşüm katsayısı</b>	<b>10 ton dingilin 8 ton dingile dönüşüm katsayısı</b>
	<b>12 ton</b>	<b>10 ton</b>	<b>8 ton</b>		
<b>20</b>	20.890	198.120	2.182.800	9,48	11,02
<b>21</b>	88.380	697.550	6.318.540	7,89	9,06
<b>22</b>	306.510	2.062.220	15.754.910	6,73	7,64
<b>23</b>	867.240	5.095.300	33.687.410	5,88	6,61
<b>24</b>	2.141.320	11.166.420	65.007.160	5,21	5,82

Tablo 3.2. C25 Betonu için farklı sıcaklık gradyanlarında ve plak kalınlıklarında dingil dönüşüm katsayıları

<b><math>\Delta t</math> (0.06°C/mm)</b>					
<b>h (cm)</b>	<b>Dingil Ağırlığına Göre Plak Kalınlığına Bağlı Dingil Tekrar Sayısı</b>			<b>12 ton dingilin 10 t dingile dönüşüm katsayısı</b>	<b>10 ton dingilin 8 ton dingile dönüşüm katsayısı</b>
	<b>12 ton</b>	<b>10 ton</b>	<b>8 ton</b>		
<b>20</b>	0	10	460		46,00
<b>21</b>	10	210	4.350	21,00	20,71
<b>22</b>	130	1.890	29.080	14,54	15,39
<b>23</b>	1.120	12.390	148.550	11,06	11,99
<b>24</b>	6.980	62.890	609.320	9,01	9,69
<b><math>\Delta t</math> (0.05°C/mm)</b>					
<b>h (cm)</b>	<b>Dingil Ağırlığına Göre Plak Kalınlığına Bağlı Dingil Tekrar Sayısı</b>			<b>12 ton dingilin 10 t dingile dönüşüm katsayısı</b>	<b>10 ton dingilin 8 ton dingile dönüşüm katsayısı</b>
	<b>12 ton</b>	<b>10 ton</b>	<b>8 ton</b>		
<b>20</b>	0	20	620		31,00
<b>21</b>	15	280	5.680	18,67	20,29
<b>22</b>	180	2.470	37.070	13,72	15,01
<b>23</b>	1.450	15.790	185.520	10,89	11,75
<b>24</b>	8.880	78.580	747.920	8,85	9,52
<b><math>\Delta t</math> (0.04°C/mm)</b>					
<b>h (cm)</b>	<b>Dingil Ağırlığına Göre Plak Kalınlığına Bağlı Dingil Tekrar Sayısı</b>			<b>12 ton dingilin 10 t dingile dönüşüm katsayısı</b>	<b>10 ton dingilin 8 ton dingile dönüşüm katsayısı</b>
	<b>12 ton</b>	<b>10 ton</b>	<b>8 ton</b>		
<b>20</b>	4	100	2.530	25,00	25,30
<b>21</b>	20	410	8.060	20,50	19,66
<b>22</b>	260	3.500	50.920	13,46	14,55
<b>23</b>	2.050	21.680	248.100	10,58	11,44
<b>24</b>	12.150	105.150	977.790	8,65	9,30
<b><math>\Delta t</math> (0.03°C/mm)</b>					
<b>h (cm)</b>	<b>Dingil Ağırlığına Göre Plak Kalınlığına Bağlı Dingil Tekrar Sayısı</b>			<b>12 ton dingilin 10 t dingile dönüşüm katsayısı</b>	<b>10 ton dingilin 8 ton dingile dönüşüm katsayısı</b>
	<b>12 ton</b>	<b>10 ton</b>	<b>8 ton</b>		
<b>20</b>	50	1.050	20.590	21,00	19,61
<b>21</b>	300	4.360	68.270	14,53	15,66
<b>22</b>	1.230	14.680	188.930	11,93	12,87
<b>23</b>	4.120	41.410	449.120	10,05	10,85
<b>24</b>	18.820	157.830	1.420.760	8,39	9,00
<b><math>\Delta t</math> (0.02°C/mm)</b>					
<b>h (cm)</b>	<b>Dingil Ağırlığına Göre Plak Kalınlığına Bağlı Dingil Tekrar Sayısı</b>			<b>12 ton dingilin 10 t dingile dönüşüm katsayısı</b>	<b>10 ton dingilin 8 ton dingile dönüşüm katsayısı</b>
	<b>12 ton</b>	<b>10 ton</b>	<b>8 ton</b>		
<b>20</b>	530	7.900	128.800	14,91	16,30
<b>21</b>	2.830	34.090	444.760	12,05	13,05
<b>22</b>	12.040	119.970	1.289.940	9,96	10,75
<b>23</b>	42.130	356.190	3.233.510	8,45	9,08
<b>24</b>	125.170	916.260	7.166.910	7,32	7,82

Tablo 3.1. de, C30 betonu için farklı sıcaklık gradyanlarında ve plak kalınlıklarında dingil dönüşüm katsayıları görülmektedir. Plak kalınlığı arttıkça veya sıcaklık gradyanı azaldıkça, daha küçük dingil yüküne dönüşüm katsayısı azalmaktadır.

Tablo 3.2. de, C25 betonu için farklı sıcaklık gradyanlarında ve plak kalınlıklarında dingil dönüşüm katsayıları, C30 betonundaki katsayılarla doğru orantılı olarak değişmektedir. C25 betonundaki dingil dönüşüm katsayıları, C30 betonunda elde edilen katsayılardan daha büyüktür.

### **3.3. Trafik Dağılımının Beton Kalınlığına Etkisi Üzerine Bulgular**

Bu bölümde, beton yol kalınlığının hesaplanmasında, trafik dağılımının günün hangi vakitlerinde olduğunun önemi vurgulanmaktadır. Gün içinde farklı zamanlarda, farklı sıcaklık değişimleri olmaktadır. Araç trafiğinin, toplam sayısı aynı olmasına rağmen, geçiş yapılan zamanlardaki trafik dağılım oranı değiştiğinde, yol kalınlık tasarımının nasıl değiştiği, örnek bir çözümle gösterilmektedir.

#### Örnek Çözüm:

Örnek bir beton yolun, 30 senelik servis süresine sahip tasarım hesabı yapılmıştır. Farklı sıcaklık gradyanlarında geçen taşıt sayısına göre yapılan hesaplamalar neticesinde, Tablo 3.4 ve Tablo 3.5. elde edilmiştir. Yapılan yorulma analizlerinde, Bölüm 2.2.6. daki kabuller dikkate alınmıştır. Örnekte, C30 betonu (Elastisite modülü 32.000 MPa) kullanılmıştır.

Yorulma analizinde hesaba katılan dingil yükleri: 12 ton (treyleler için), 10 ton (kamyonlar için), 8 ton (kamyonlar için). Hesapta, her bir kamyon ve treylelerin ortalama 3 adet çift tekerlekli dingili olduğu kabul edilmiştir.

Kabullerde, dingillerin aynı noktadan geçme olasılığı %10 olarak kabul edilmiş, üç farklı dingil ağırlığının farklı sıcaklık gradyanlarında yol güzergahından geçme oranları, Tablo 3.3. de ve Tablo 3.4. de farklı değerlerde girilmiş ve bu değişikliğin plak kalınlığındaki etkisi incelenmiştir. 8 tondan daha küçük dingil yükleri, beton plak yorulma analizlerinde çok daha az bir etki oluşturacağından dolayı, tasarım hesabında dikkate alınmamıştır. 1 sene içerisinde yoldan geçen taşıt sayısının tespitinde, hesaplarda alınacak gün sayısı 300 olarak kabul edilmiştir. Zemin yatak katsayısı “k” değeri, çimento katkı plentmiks temel için kullanılan değer olan,  $0.105 \text{ N/mm}^3$ , betonun lineer termal genleşme

katsayısı, 0.00001/°C olarak alınmıştır. Burada, dingil yüküne göre yol güzergahından geçen taşıt sayıları örnek olarak verilmiştir. Bu durumda, 30 senelik yol tasarım için oluşan yük tekrarları:

8 ton dingil yükü:

30 (sene) x 1200 (günlük geçen taşıt sayısı) x 3 (dingil sayısı) x 300 (çalışma günü sayısı) x 0,1 (aynı noktaya gelme olasılığı)= 3.240.000

10 ton dingil yükü:

30 (sene) x 720 (günlük geçen taşıt sayısı) x 3 (dingil sayısı) x 300 (çalışma günü sayısı) x 0,1 (aynı noktaya gelme olasılığı)= 1.944.000

12 ton dingil yükü:

30 (sene) x 180 (günlük geçen taşıt sayısı) x 3 (dingil sayısı) x 300 (çalışma günü sayısı) x 0,1 (aynı noktaya gelme olasılığı)= 486.000

Tablo 3.3. Beton yolun 30 yıllık servis süresi için yorulma analizi (h=23 cm)

Sıcaklık gradyanı $\Delta t$ (°C/mm)	Gradyana göre dağılım oranı (%)	Çift tekerlekli dingil ağırlığı (kN)	Dingil yük gerilmesi $\sigma_v$ (MPa)	Sıcaklık gradyanı gerilmesi $\sigma_t$ (MPa)	Maksimum gerilme $\sigma_{max}$ (MPa)	İzin verilen yük tekrarı (N)	Oluşan yük tekrarı (n)	Yorulma miktarı (n/N)
0,06	0,50	120,00	2,06	1,21	3,27	76.552,58	2.430,00	0,0317
		100,00	1,81	1,21	3,02	532.217,86	9.720,00	0,0183
		80,00	1,54	1,21	2,75	4.210.765,10	16.200,00	0,0038
0,05	1,00	120,00	2,06	1,17	3,23	92.013,02	4.860,00	0,0528
		100,00	1,81	1,17	2,98	631.673,47	19.440,00	0,0308
		80,00	1,54	1,17	2,72	4.930.741,15	32.400,00	0,0066
0,04	4,50	120,00	2,06	1,17	3,23	92.013,02	21.870,00	0,2377
		100,00	1,81	1,13	2,94	790.912,81	87.480,00	0,1106
		80,00	1,54	1,13	2,67	6.065.531,39	145.800,00	0,0240
0,03	5,50	120,00	2,06	1,07	3,12	164.265,63	26.730,00	0,1627
		100,00	1,81	1,07	2,87	1.083.690,41	106.920,00	0,0987
		80,00	1,54	1,07	2,61	8.107.512,81	178.200,00	0,0220
0,02	7,50	120,00	2,06	0,74	2,80	834.985,19	36.450,00	0,0437
		100,00	1,81	0,74	2,55	4.926.574,43	145.800,00	0,0296
		80,00	1,54	0,74	2,28	32.719.179,77	243.000,00	0,0074
0,01	22,00	120,00	2,06	0,37	2,43	4.151.115,03	106.920,00	0,0258
		100,00	1,81	0,37	2,18	21.938.211,97	427.680,00	0,0195
		80,00	1,54	0,37	1,91	129.550.806,01	712.800,00	0,0055
0,0025	59,00	120,00	2,06	0,09	2,15	12.199.217,60	286.740,00	0,0235
		100,00	1,81	0,09	1,90	59.871.201,01	1.146.960,00	0,0192
		80,00	1,54	0,09	1,63	326.710.451,88	1.911.600,00	0,0059
<b>TOPLAM:</b>							<b>5.670.000,00</b>	<b>0,9797</b>

Tablo 3.4. Beton yolun 30 yıllık servis süresi için yorulma analizi (h=24 cm)

Sıcaklık gradyanı $\Delta t$ (°C/mm)	Gradyana göre dağılım oranı (%)	Çift tekerlekli dingil ağırlığı (kN)	Dingil yük gerilmesi $\sigma_v$ (MPa)	Sıcaklık gradyanı gerilmesi $\sigma_t$ (MPa)	Maksimum gerilme $\sigma_{max}$ (MPa)	İzin verilen yük tekrarı (N)	Oluşan yük tekrarı (n)	Yorulma miktarı (n/N)
0,06	5,00	120,00	1,89	1,15	3,04	334.015,70	24.300,00	0,0728
		100,00	1,66	1,15	2,81	1.970.186,70	97.200,00	0,0493
		80,00	1,42	1,15	2,57	13.080.687,77	162.000,00	0,0124
0,05	10,00	120,00	1,89	1,12	3,01	395.736,55	48.600,00	0,1228
		100,00	1,66	1,12	2,78	2.308.147,47	194.400,00	0,0842
		80,00	1,42	1,12	2,53	15.141.820,67	324.000,00	0,0214
0,04	15,00	120,00	1,89	1,12	3,01	395.736,55	72.900,00	0,1842
		100,00	1,66	1,07	2,73	2.841.118,69	291.600,00	0,1026
		80,00	1,42	1,07	2,49	18.347.159,15	486.000,00	0,0265
0,03	15,00	120,00	1,89	1,01	2,90	675.161,73	72.900,00	0,1080
		100,00	1,66	1,01	2,67	3.800.851,41	291.600,00	0,0767
		80,00	1,42	1,01	2,43	24.009.631,88	486.000,00	0,0202
0,02	20,00	120,00	1,89	0,77	2,66	2.141.433,33	97.200,00	0,0454
		100,00	1,66	0,77	2,43	11.166.987,47	388.800,00	0,0348
		80,00	1,42	0,77	2,18	65.010.413,77	648.000,00	0,0100
0,01	20,00	120,00	1,89	0,38	2,28	10.905.596,95	97.200,00	0,0089
		100,00	1,66	0,38	2,05	51.050.797,42	388.800,00	0,0076
		80,00	1,42	0,38	1,80	264.877.960,15	648.000,00	0,0024
0,0025	15,00	120,00	1,89	0,10	1,99	32.362.837,64	72.900,00	0,0023
		100,00	1,66	0,10	1,76	140.953.039,94	291.600,00	0,0021
		80,00	1,42	0,10	1,51	677.180.051,26	486.000,00	0,0007
<b>TOPLAM:</b>							<b>5.670.000,00</b>	<b>0,9954</b>

İlk beton kalınlığı 18 cm olarak alınıp tasarım yapılmaya başlanmış, yorulma miktarı oranı (n/N)=1 oluncaya kadar, kurulan sistem beton kalınlığını artırarak tasarım yapmaya devam etmiş ve istenilen değer bulununca hesaplama işlemini sonlandırmıştır. Tablo 3.3. ve Tablo 3.4. de, aynı dingil ağırlıklarının toplam geçiş sayıları aynı olmasına rağmen, sıcaklık gradyan değerlerine bağlı dingil geçiş oranları değiştiğinde, plak kalınlığının da değiştiği görülmektedir. Tablo 3.3. deki sıcaklık gradyanı-dingil dağılımına göre plak kalınlığının en az 23 cm olması gerektiği bulunurken, Tablo 3.4. de ise söz konusu dağılım değiştiği zaman, plak kalınlığının 24 cm den az olmaması gerektiği görülmüştür.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan sayısal çalışmalar sonucunda, derzli donatısız beton yol kaplama tasarımında, taşıt geçişi sırasında yol kaplama yüzeyi ile kaplama altı arasında oluşacak sıcaklık farklarının, plak kalınlığının tespitinde önemli bir rol oynadığı görülmüştür.

- Sıcaklık gradyan  $\Delta t$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ ) değeri düştükçe, beton plak üzerinde, daha fazla dingil tekrarına imkan sağlanmaktadır.
- Beton plak kalınlığı arttıkça, sıcaklık gradyan değeri, dingil tekrar sayısı bakımından çok daha önemli bir rol oynamaktadır. C30 betonu kullanıldığında 8 tonluk dingil geçiş sayısı, sıcaklık gradyanı  $\Delta t=0.06$  yerine  $\Delta t=0.03$  olması durumunda, plak kalınlığı  $h=18$  cm olduğunda 36.910,  $h=22$  cm olduğunda 2.211.480,  $h=24$  cm olduğunda 10.928.400 artmaktadır.
- Beton sınıfı düştükçe, sıcaklık gradyan değeri, plak kalınlık tasarımında daha etkili olmaktadır. C30 betonunda,  $\Delta t$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ ), 0.06, 0.05, 0.04 ve 0.03 olduğunda, 23 cm kalınlığındaki plaktan geçen 10 t ağırlığındaki dingil sayısı, 22 cm kalınlıktaki plaktan geçen dingil sayısının sırasıyla 4.29, 4.23, 4.15 ve 2.86 katıdır. Bu oran, aynı sıcaklık gradyanlarında C25 betonu için sırasıyla, 6.56, 6.39, 6.19 ve 2.82 dir.
- Yol tasarımında, C25 betonunda elde edilen plak kalınlığı, C30 betonu kullanılması durumunda, 2-3 cm arasında azalmaktadır.
- Dingil ağırlığı arttıkça, aynı kalınlıktaki dingil tekrar sayısı, sıcaklık gradyanı düşüşüne bağlı olarak, daha düşük dingil ağırlığına göre daha fazla oranda artmaktadır.
- Tasarımda kabul edilecek sıcaklık gradyanına göre, farklı dingil ağırlıklarının birbirine dönüştürüldüğü katsayı, beton kalınlığı ile değişmektedir. Plak kalınlığı arttıkça veya sıcaklık gradyanı azaldıkça, daha küçük dingil yüküne dönüşüm katsayısı azalmaktadır.
- Beton sınıfı düştükçe, dingil yüklerinin, düşük dingil yüklerine dönüşüm katsayıları artmaktadır.

- Sıcaklık gradyanı  $\Delta t$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ ), 0.03 den daha az değerlere düştükçe, beton plak üzerindeki dingil tekrar kapasitesi, 22 cm ve daha üzeri plak kalınlıklarında ani bir artış göstermektedir.
- Çalışmada kullanılan, beton elastisite modülü, dingil yükü, yük tekrarı ve sıcaklık gradyanına bağlı olarak, yapay sinir ağı metoduyla elde edilen plak kalınlık değerleri, oluşturulan eğitim seti ile 98.85% oranında aynı sonuçları vermektedir.
- Türkiye karayollarında mevcut ağır taşıt trafiğinin yoğunluğuna göre kaplama kalınlığı, çalışmadaki kabuller doğrultusunda ve kaplamada C30 betonu kullanılması durumunda, 22 cm ile 25 cm arasında değişebilmektedir.
- Yaz aylarında, gündüz vakti ağır taşıt trafik yoğunluğu düşürülürse beton yol ömrü uzamaktadır.
- Kontrol altında tutulacak saha çalışmalarıyla, beton plakta oluşacak çatlama zamanına bağlı olarak sayısal tasarım kalibre edilip, en sağlıklı tespitlerin yapılması mümkün olacaktır.
- Beton plak alt ve üst yüzeyleri arasındaki sıcaklık farklarını düşürmek için, plak altına veya üstüne asfalt serilmesi durumunda veya benzeri uygulamalar neticesinde, oluşacak sıcaklık değerlerinin ölçülmesi ve en iyi sonucu veren uygulamanın belirlenmesi, bir sonraki çalışmalarda araştırılacak konular arasındadır.
- Türkiye' nin farklı bölgelerinde, sene içerisinde eş zamanlı olarak, aynı tip beton plakların üst yüzeyinden alt yüzeyine doğru sıcaklık değişimlerinin ölçülmesi ve bulunacak değerlere göre bölgelerin sınıflandırılması, ileriki çalışmalarda kullanılacak iyi bir kaynak verisi oluşturacaktır.
- Beton plak kenar ortalarına konulacak donatıların, plak yorulmalarındaki etkilerinin saha çalışmaları ile araştırılması faydalı bir çalışma olacaktır.

## 5. KAYNAKLAR

1. Yeğınobalı, A., Ulusal Beton Yollar Kongresi 2002 (Konuşma Metinleri), Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, 2003.
2. Pancar, E.B., Beton Yollarda Enine Yivlemenin Sürtünmeye ve Basınç Dayanımına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, O.M.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 2008.
3. Abit, Ö., Sessiz Beton, THBB Hazır Beton Dergisi – Beton Yollar Özel Eki, 1996.
4. <http://samettoksoy.blogspot.com/2010/01/beton-yollar-thbb-beton-yollar-teknik.html#!/2010/01/beton-yollar-thbb-beton-yollar-teknik.html>, Ulaşım Bülteni. 20 Ekim 2011.
5. Güner. H., Beton Yollar, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2004.
6. Choubane, B. ve Tia, M., Analysis and Verification of Thermal-Gradient Effects on Concrete Pavement, Journal of Transportation Engineering, 121, 1, (1995) 75-81.
7. Masad, E., Taha, R., Muhunthan, B., Finite Element Analysis of Temperature Effects on Plain-Jointed Concrete Pavements, Journal of Transportation Engineering, 122,5, (1996) 388-398.
8. Siddique, Z. Q., Hossain, M., ve Meggers, D., Temperature and Curling Measurements on Concrete Pavements, Proc., 2005 Müd-Continent Transportation Research Symp., Iowa State Univ., Ames, IA, 2005.
9. Belshe, M., Mamlouk, M.S., Kaloush, K.E., Rodezno, M., Temperature Gradient and Curling Stres in Concrete Pavement with and without Open-Graded Friction Course, Journal of Transportation Engineering, 137, 10, (2011) 723-729.
10. Mahboub, K.C., Liu, Y., Allen, D.L., Evaluation of Temperature Responses in Concrete Pavement, Journal of Transportation Engineering, 130, 3, (2004) 395-401.
11. Huang, Y.H., Pavement Analysis and Design, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
12. T.C.K., Karayollarında Ağır Taşıt Trafığının ve Yük Taşımacılığının Özellikleri ve Eğilimleri, Ankara, 2011.
13. Packard, R. G. and Tayabji, S. D., New PCA Thickness Design Procedure for Concrete Highway and Street Pavements, Concrete Pavement & Rehabilitation Conference, Purdue, USA, 1985.
14. Lennie, S., and Bunker, J., Assessing the Spatial Impact of Multicombination Vehicles on an Urban Motorway, MSc. Thesis, Queensland University of Technology, Australia, 2005.



15. Lee, Y.H., Carpenter, S.H., PCAWIN Program for Jointed Concrete Pavement Design, Tamkang Journal of Science and Engineering, 4, 4, (2001) 293-300.
16. AASHTO, Supplement to the Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., U.S.A. 1998.
17. Tayabji, S.D. ve Colley, B.E., Analysis of Jointed Concrete Pavement, Report No. FHWA-RD-86-041, Federal Highway Administration, 1986.
18. NEN 6720:1995, TGB 1990 Concrete Standards – Structural Requirements and Calculation methods (VBC 1995), 2nd Edition with Revision A1 to A3 (in Dutch) NNI, Delft, 1995.
19. prEN 1992-1-1, Eurocode 2 Design of concrete structures – Part 1: General Rules and Rules for Buildings Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussel, July 2002.
20. Khazanovich, L., Selezneva, O., Yu, H.T., Darter, M.I., Development of Rapid Solutions for Prediction of Critical Continuously Reinforced Concrete Pavement Stress, Transportation Research Record, 1778, (2001) 64-72.
21. Bayrak, M.B., Ceylan, H., Neural Network-Based Approach for the Analysis of Rigid Pavement Systems Using Deflection Data, Transportation Research Record, 2068, (2008) 61-70.
22. Anastasios, M.I., Don, R.A., Michael, I.H., Craig, M.D., Application of Artificial Neural Networks to Concrete Pavement Joint Evaluation, Transportation Research Record, 1540, (1996) 56-64.
23. Kasthurirangan, G., Marshall, R.T., Anshu, M., Rapid Finite-Element Based Airport Pavement Moduli Solutions Using Neural Networks, International Journal of Computational Intelligence, 3, 1, (2006) 63-71.
24. Ceylan, H., Tutumluer, E., Barenberg, E.J., A Structural Model for the Rapid Analysis of Concrete Pavement Systems, Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa, August 2003.
25. Ceylan, H., Gopalakrishnan, K., Bayrak, M.B., Neural Networks Based Concrete Airfield Pavement Layer Moduli Backcalculation, Civil Engineering and Environmental Systems, 25, 3, (2008) 185-199.
26. Meier, R.W., Backcalculation of Flexible Pavement Moduli From Falling Weight Deflectometer Data Using Artificial Neural Networks, Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, School of Civil and Environmental Engineering, Atlanta, March, 1995.

27. Lou, Z., J. John Lu, M. Gunaratne, ve B.Dietrich, Forecasting of Pavement Crack Condition Using A Neural Network Model, 78th Annual TRB Meeting, Washington, D.C., 1999.
28. Sadek, A.W., Shoukry, S.N., Riad, M., Dynamic Artificial Neural Networks for Dowel Bending Moment Prediction from Temperature Gradient Profile in Concrete Slabs, 82nd Annual TRB Meeting, Washington, D.C., 2003.
29. Ceylan, H., Analysis and Design of Concrete Pavement Systems Using Artificial Neural Networks, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2002.
30. U.S. Army Corps of Engineers, Engineering and Design; Rigid Pavements for Roads, Streets, Walks and Open Storage Areas, Engineer Manual No. 1110-3-132, Washington, DC, 1984.
31. Anonim, Pavement Preservation Technology in France, South Africa and Australia, FHWA International Scanning Program, U.S. Department of Transportation, Washington, DC, 2002.
32. Anonim, Summary Report – U.S. Tour of European Concrete Highways – Follow-up Tour of Germany and Austria, FHWA-SA-93-080, Washington, DC, 1993.
33. Anonim, FHWA Study of South African Pavement and Other Highway Technologies and Practices, U.S. Department of Transportation, Washington, DC, 1997.
34. Anonim, Geleceğin Yolu-Afyonkarahisar' daki Beton Yolun Hikayesi, Turkish Cement Manufacturers' Association, R&D Institute, Ankara, 2005.
35. Karayolları Genel Müdürlüğü, Karayolu Teknik Şartnamesi, Yayın No: 267, Ankara, 2006.
36. VENCON 2.0 – Software package for structural design of concrete pavements (in Dutch) CROW, Ede, 2004.
37. Houben, L.J.M, Structural Design of Pavements, Part IV: Design of Concrete Pavements Lecture Notes CT4860, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, TU Delft, Delft January 2006.
38. NEN 6720:1995, TGB 1990 Concrete Standards – Structural requirements and calculation methods (VBC 1995), 2nd edition with revision A1 to A3 (in Dutch) NNI, Delft, 1995.
39. Houben, L.J.M, Structural Design of Pavements, Part IV: Design of Concrete Pavements Lecture Notes CT4860, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, TU Delft, Delft January 2006.
40. Fleischer, W., Sodeikat, Ch., Springenschmid, R., “Conclusion from the long-time behavior of cement-bond road bases. 7th International Symposium on Concrete Roads,

3-5 October 1994, Vienna. Proceedings, Session 1, Design and Performance, pp. 55-60, AIPCR-PIARC, 1994.

41. Blessmann, W., Fleischer, W., Wippermann, D., Concrete Pavement on a Crushed Aggregate Unbound Roadbase, A New Design for Heavy-Traffic Motorways, 8th International Symposium on Concrete Roads, 13-16. September 1998 Lisbon. Proceedings, Theme I, Quality Assurance and Specifications, pp. 35-44, AIPCR-PIARC, 1998.
42. Darter, M. I., and E.J. Barenberg, Design of Zero-Maintenance Plain Jointed Concrete Pavement, Report No. FHWA-RD-77-111, Vol.1, Federal Highway Administration, 1977.
43. Hiller J.E. and Roesler J.R., Determination of Critical Concrete Pavement Fatigue Damage Locations Using Influence Lines, Journal of Transportation Engineering, 131, 8, (2005) 599-607.
44. Schindler A.K. and McCullough B.F., Importance of Concrete Temperature Control During Concrete Pavement Construction in Hot Weather Conditions, Transportation Research Board NATL Research Council, Washington, (2002) 3-10.
45. Ongel A. and Harvey J., Analysis of 30 Years of Pavement Temperature Using the Enhanced Integrated Climate Model (EICM), Draft Report Prepared for California Department of Transportation, California, 2004.
46. Choubane B., Tia M., Analysis and Verification of Thermal-Gradient Effects on Concrete Pavement, Journal of Transportation Engineering, ASCE, 121, 1, (1995) 75-81.
47. Richardson M. and Armaghani J.M., Stress Caused by Temperature Gradient in Portland Cement Concrete Pavements, Transportation Research Record, No 1121, (1990) 7-13.
48. Shoukry S.N. and Fahmy M.R., Optimization of Concrete Slab Geometry for Enhanced Rigid Pavement Performance and Service Life, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University, WVDOT Research Project, No. 140, 2002.
49. Byrum C.R. and Hansen W., Influence Function Approach to Analysis of Jointed Portland Cement Concrete Pavement, Transportation Research Record, No 1449, (1994) 148-158.
50. Mohamed A.R., Hansen W., Effect of Nonlinear Temperature Gradients on Curling Stress in Concrete Pavements, Transportation Research Record, No. 1568, (1997) 65-71.
51. Heath A.C. and Roesler J.R., Shrinkage and Thermal Cracking of Fast Setting Hydraulic Cement Concrete Pavements in Palmdale, Preliminary Report Prepared for California Department of Transportation, California, 1999.

52. Kuo C.M., Effective Temperature Differential in Concrete Pavements, Journal of Transportation Engineering, 124, 2 (1998) 112-116.
53. Eisenmann, J., Concrete Pavements – Design and Construction (in German) Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin/Munich/Düsseldorf, 1979.
54. Anonim, Manual for Concrete Roads (in Dutch), Cement Industry Association (VNC), Hertogenbosch, The Netherlands, 1985.
55. Leewis, M., Theoretical Knowledge Leads to Practical Result (in Dutch), Journal Betonwegen Nieuws, 89, (1992) 20-22.
56. AASHTO 2003., Appendix QQ (Structural Response Models for Rigid Pavements) of Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures”, American Association of State and Highway Transportation Officials, Prepared for National Cooperative Highway Research Program – Transportation Research Board – National Research Council, ARA Inc., Illinois, U.S.A, 2003.
57. Tayabji, S. D. and Colley, B. E., Improved Rigid Pavement Joints, Transportation Research Record, Vol. 930, (1983) 69-78.
58. Packard, R. G. and Tayabji S. D., Mechanical Design of Concrete Pavements to Control Joint Faulting and Subbase Erosion, International Seminar on Drainage and Erodability at the Concrete Slab-Subbase-Shoulder Interfaces, Paris, France, 1983.
59. Smith, K.D., Mueller, A.L., Darter M.I., and Peshkin, D.G., Performance of Jointed Concrete Pavements, Volume II-Evaluation and Modification of Concrete Pavement Design and Analysis Models, FHWA-RD-89-137, Federal Highway Administration, Washington, 1990.
60. Yu, T.H., Darter, M.I., Smith, K.D., Jiang, J., and Khazanovich, L., Performance of Concrete Pavements, Volume III-Improving Concrete Pavement Performance, FHWA-RD-95-111, Federal Highway Administration, 1997.
61. Gillespie, T.D., Karamlhas, S.M., Cebon, D., Sayers, M.W., Nasim, M.A., Hansen, W. and Ehsan, N., Effects of Heavy Vehicle Characteristics on Pavement Response and Performance, Final Report, Prepared for National Cooperative Highway Research Program – Transportation Research Board- National Research Council, The University of Michigan Transportation Research Institute, Michigan, U.S.A, 1992.
62. Kim, S.M., Won, M.C., and McCullough, B.F., Dynamic Stress Response of Concrete Pavements to Moving Tandem-Axle Loads, Transportation Research Record, No. 1809, (2002) 32-41.
63. Hiller, E.J., and Roesler, J.R., Transverse Joint Analysis for Mechanistic-Empirical Design of Rigid Pavements, Transportation Research Record, 1809, (2002) 42-51.

64. Lee, Y.H., and Carpenter, S.H., PCAWIN Program for Jointed Concrete Pavement Design, Tamkang Journal of Science and Engineering, 4, 4, (2001) 293-300
65. Austroads, AUSTROADS Pavement Design Guide, Austroads Inc., Sydney, Australia, 2004.
66. Austroads, Technical Basic of Austroads Pavement Design Guide, Austroads Inc., Sydney, Australia, 2004.
67. Shackel, B., Load and Environmental Factors Affecting Industrial Pavements, School of Civil Engineering, The University of New South Wales, Australia, 1993.
68. Lippmann, S.A., Effects of Tire Structure and Operation Conditions on the Distribution of Stress Between the Tread and the Road in the Tire Pavement Interface, ASTM STP 929, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, U.S.A., 1985, 91-109
69. De Beer, M., Fisher, C., and Joeste, F.J., Determination of Pneumatic Tyre-Pavement Interface Contact Stress Under Moving Loads With Some Effects on Pavements With This Asphalt Surfacing Layers, Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements, International Society for Asphalt Pavements, 8-14 August 1997, Seattle, Washington D.C., U.S.A., 179-227.
70. Douglas, R.A., Woodward, W.D.H., Woodside A.R., Road Contact Stress and Forces Under Tires with Low Inflation Pressure, Canadian Journal of Civil Engineering, 27, 6, (2000) 1248-1258.
71. Marshek, K.M., Chen, H.H., Connell, R.B., and Hudson R.W., Experimental Determination of Pressure Distribution of Truck Tire-Pavement Contact, Transportation Research Record, No. 1070, (1986) 9-14.
72. Handson, S.W., and Seeds, S.B., Evaluation of Increased Pavement Loading and Tyre Pressure, 67th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., U.S.A, 1988.
73. Westergaard, H.M., Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis, Public Roads, Vol. 7, no. 2, 1926.
74. Ioannides, A.M., Thompson, M.R. and Barenberg, E.J., The Westergaard Solutions Reconsidered Workshop on Theoretical Design of Concrete Pavements, 5 – 6 June 1986, Epen, The Netherlands Record 1, CROW, Ede, 1987.
75. Westergaard, H.M., New Formulas for Stresses in Concrete Pavements of Airfields ASCE, Transactions, Vol. 113, 1948.
76. Houben, L.J.M, Structural Design of Pavements, Part IV: Design of Concrete Pavements Lecture Notes CT4860, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, TU Delft, Delft January 2006.

77. Domenichini, L. and Mascio, P., Procedure for JPCP Thickness Design in Italy, 2nd International Workshop on the Design and Evaluation of Concrete Pavements, 4 – 5 October 1990, Sigüenza, Spain Record 5, CROW, Ede, 1991.
78. Anonim, Design and Construction of Joints for Concrete Highways, Concrete Paving Technology, Portland Cement Association, 1991.
79. [http://pavementinteractive.org/index.php?title=Dowel\\_Bars](http://pavementinteractive.org/index.php?title=Dowel_Bars) Dowel Bars. 20 Ekim 2011.
80. Friberg, B.F., Design of Dowels in Transverse Joints of Concrete Pavements, Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol. 105, No. 2081, 1940.
81. AASHTO 2002, Design of New and Reconstructed Rigid Pavements, Part 3-Design Analysis Chapter 4, Washington, DC, 2002.
82. <http://www.cptechcenter.org/t2/documents/DowelBarStandardization-Masten.pdf> Dowel Bar Standardization. 20 Ekim 2011.
83. Anonim, Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A State-of-the-Practice Manual, FHWA and National Concrete Pavement Technology Center, December 2006.
84. National Concrete Pavement Technology Center, Field Evaluation of Elliptical Steel Dowel Performance, Iterim Report, December 2006.
85. Porter, M.L., Guinn, R.J., Assessment of Dowel Bar Research Iowa Dot Project HR-1080 CTRE Project 00-93, Center of Transportation Research and Education Iowa State University, Final Report, August 2002.
86. Springenschmid, R., Fleischer, W., Recent Developments in the Design and Construction of Concrete Pavements for German Expressways (Autobahns), Seventh International Conference on Concrete Pavement, The Use of Concrete in Developing Long-Lasting Pavement Solutions for the 21st Century, September 9-13, 2001, Volume 2 of 3.
87. Anonim, Manual for concrete pavements – Standard structures (in Dutch), Publication 120, CROW, Ede, 1997.
88. Mallela, J., Gotlif, A., Darter, M.I., Ardani, A., Littleton, P., A Mechanistic-Emprical Tie Bar Design Approach for Concrete Pavements, American Concrete Pavement Association, Final Report, Illinois, August 2009.
89. Anonim, Rigid Pavement Design Manual, Florida Department of Transportation, Tallahassee, FL, 2006.
90. Doğangün, A., Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı, Birsen Yayınevi, İstanbul 2005.

91. Vollpracht, A., Eifert, H., Hersel, O., Knopp, W., Road Construction Today – Concrete Pavements (in German), 4th Edition Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, Köln, 1995.
92. VENCON 2.0 – Software package for structural design of concrete pavements (in Dutch) CROW, Ede, 2004.
93. Anonim, Continuously Reinforced Concrete Pavements – Motorways and Other Applications (in Dutch), Publication 160, CROW, Ede, 2001.
94. Anonim, The Effects of Higher Strength and Associated Concrete Properties on Pavement Performance, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-RD-00-161, June 2001.
95. Springenschmid, R., Fleischer, W., Influence of Cement on the Durability of Concrete Pavements, 7th International Symposium on Concrete Roads, 3-5 October 1994, Vienna. Proceedings, Session 6, Materials and Concrete Technology, AIPCR-PIARC, 1994, 89-95.
96. Fleischer, W., Influence of the Cement on Shrinkage and Swelling of Concrete, Doctoral Thesis, Technical University of Munich, 1992.
97. Anonim, Summary Report – U.S. Tour of European Concrete Highways – Follow-up Tour of Germany and Austria, FHWA-SA-93-080, October 1993.
98. Springenschmid, R., Fleischer, W., Recent Developments in the Design and Construction of Concrete Pavements for German Expressways (Autobahns), Seventh International Conference on Concrete Pavement, The Use of Concrete in Developing Long-Lasting Pavement Solutions for the 21st Century, September 9-13, Volume 2 of 3, 2001.
99. Mehta, P.K., and Aitcin, P.C., Microstructural Basis of Selection of Materials and Mix Proportions for High-Strength Concrete, High-Strength Concrete: Second International Symposium, T.H. Weston, ed., ACI SP-121, (1990) 89-108 and 265-286.
100. Mehta, P. and Monteiro, P.J.M., Concrete: Structure, Properties, and Materials, Second Edition, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
101. Mindess, S., and Young, J. F., Concrete, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1981.
102. Neville, A.M., Properties of Concrete, 3rd Edition, The English Language Book Society and Pitman Publishing, London, 1983.
103. Zia, P., Leming, M. L., and Ahmad S. H., High Performance Concretes - A State of the Art Report, Strategic Highway Research Program, SHRP-C/FR-91-103, National Research Council, Washington, DC, 1991.

104. Cramer, S.M., Hall, M., and Parry, J., Effect of Optimized Total Aggregate Gradation on Portland Cement Concrete for Wisconsin Pavements, Transportation Research Record, No. 1478, (1995) 100-106.
105. Aitcin, P.C., and Lessard, M., Canadian Experience with Air-entrained High Performance Concrete, Concrete International, 16, 10, (1994) 35-38.
106. ACI Standard 211.1, Recommended Practice for Selecting Proportions for Normal Weight Concrete, ACI Manual of Concrete Practice, ACI, Detroit, MI, 1989.
107. Tachibana, D., Imai, M., Yamazaki, N., Kawai, T., and Inada, Y., High-Strength Concrete Incorporating Several Admixtures, High-Strength Concrete, Second International Symposium, ACI SP-121, T.H. Weston, ed., 1990, 309-330.
108. NEN-EN 206-1, Concrete – Part 1: Specifications, Properties, Manufacturing and Conformity (in Dutch) NNI, Delft, 2001.
109. CEB-FIP Model Code 1990, Bulletin d'Information 213/214 Comité Euro-International du Béton, London, 1993.
110. VENCON 2.0 – Software Package for Structural Design of Concrete Pavements (in Dutch) CROW, Ede, 2004.
111. Anonim, Uniform Evaluation Method for Concrete Pavements (in Dutch), Publication 136, CROW, Ede, 1999.
112. Mosa, A.M., Atiq, R., RaihanTaha, M., ve Ismail, A., Classification of Construction Problems in Rigid Highway Pavements, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5, 3, (2011) 378-395.
113. Springenschmid, R., Fleischer, W., Recent Developments in the Design and Construction of Concrete Pavements for German Expressways (Autobahns), Seventh International Conference on Concrete Pavement, The Use of Concrete in Developing Long-Lasting Pavement Solutions for the 21st Century, Volume 2 of 3, September 9-13, 2001.
114. Uğur, L.O., Yapı Maliyetinin Yapay Sinir Ağı ile Analizi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
115. Aleksander, I., Morton, I., An Introduction to Neural Computing, International Thomson Computer Press., 1995.
116. Fausett, L., Fundamentals of Neural Networks, Architectures, Algorithms, and Applications, Prentice-Hall, Inc., New-Jersey, 1994.
117. Civalek, Ö., Ülker, M., Dikdörtgen Plakların Doğrusal Olmayan Analizinde Yapay Sinir Ağı Yaklaşımı, İMO Teknik Dergi, 213, (2004) 3171-3190.
118. Kohonen, T., Content Addressable Memories, Springer-Verlag, New-York, 1980.



119. Hopfield, J.J., Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities, In Proc.of National Academy of Sciences, 79, 8, (1982) 2554-2558.
120. Elmas, Ç., Yapay Sinir Ağları, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2003.
121. Yurtoğlu, E., Yapay Sinir Ağları Metodolojisi ile Öngörü Modellemesi: Bazı Makroekonomik Değişkenler için Türkiye Örneği, Uzmanlık Tezi, Devlet Planlama Teşkilatı, Ekonomik Modeller ve Stratejik Araştırmalar Genel Müdürlüğü, Ankara, 2005.
122. Öztemel, E., Yapay Sinir Ağları, Papatya Yayıncılık, İstanbul, 2003.
123. Basheer, I.A., Hajmeer, M., Artificial Neural Networks: Fundamentals, Computing, Design and Application, Journal of Microbiological Methods, 43, 1, (2000) 3-31.
124. Pala, M., Çağlar, N., Elmas, M., Yapay Sinir Ağları ile Zemin-Yapı Dinamik Etkileşimi, International XII. Turkish Symposium On Artificial Intelligence And Neural Networks, TAINN, Çanakkale, (2003) 65-69.
125. Ülker, M., Civalek, Ö., Yapay Sinir Ağları ile Eksenel Yüklü Kolonların Burkulma Analizi, Turkish J. Eng. Sci., 26, (2002) 117-125.
126. Elazouni, A.,M., Nosair, I.,A., Mohieldin Y.,A., Mohamed A., Estimating Resource Requirements at Conceptual Design Stage Using Neural Networks, Journal Of Computing In Civil Engineering, 11, 4, (1997) 217-223.
127. Weiss, S.M. ve Kulikowski, C.A., Computer Systems that Learn, Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, (1991) 22-46.
128. Hinton, G.E., How Neural Networks Learn From Experience, Scientific American, 267, (1992) 144-151.
129. Ripley, B.D., Barndoff – Nielsen, O.E., Jensen, J.L., Kendall, W.S., Statistical Aspects of Neural Networks, Networks and Chaos - Statistical and Probabilistic Aspects, Chapman&Hall, (1993) 105-126.
130. Warren, S.S., Neural Networks and Statistical Models, Proceedings of the Nineteenth Annual SAS Users Group Int. Conf., Cary, NC, USA, (1994) 345-352.
131. Stern, H.S., Neural Networks in Applied Statistics, Technometrics, 38, 3: (1996) 205-214.
132. Ripley, B.D., Pattern Recognition and Neural Networks, Cambridge University Press, London, (1996) 28-43.
133. Wang, S., An Adaptive Approach to Market Development Forecasting, Neural Comput & Applic, 8, (1999) 3-8.

134. Yasdi, R., Prediction of Road Traffic Using a Neural Network Approach, Neural Comput & Applic, 8, (1999) 135-142.
135. Zhang, G.P., Time Series Forecasting Using a Hybrid ARIMA and Neural Network Model, Neurocomputing, 50, (2003) 159-175.
136. Kim, G.,H., An, S-H., Kang, K-I., Comparison of Construction Cost Estimating Models Based on Regression Analysis, Neural Networks, and Case-Based Reasoning, Building And Environment, 39, 10, (2004) 1235-1242.
137. Liu, X., An Artificial Neural Network Approach to Assess Project Cost and Time Risks at the Front of Projects, Yüksek Lisans Tezi, The University of Calgary, Department of Civil Engineering, Calgary, (1998) 117-123.
138. Adeli, H., Wu, M., Regularization Neural Network for Construction Cost Estimation, Journal of Construction Engineering and Management, 124, 1, (1998) 18-24.
139. Günaydın, H.M., Doğan, Z.,S., A Neural Network Approach for Early Cost Estimation of Structural Systems of Buildings, International Journal Of Project Management, 22, (2004) 595–602.
140. Baykan, U.N., İnşaat Projelerinde Kaynak İhtiyacının Yapay Sinir Ağları Yaklaşımıyla Belirlenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
141. Vanluchene, RD., ve Roufei, S., Neural Networks in Structural Engineering, Microcomputers in Civil Engineering, 5, (1990) 207-215.
142. Hajela, P., Berke, L., Neurobiological Computational Models in Structural Analysis and Design, Computers and Structures, 41,4, (1991) 657-667.
143. Adeli, H., Hung, SL., Machine Learning - Neural Networks, Genetic Algorithms and Fuzzy Systems, John Wiley & Sons, Inc., 1995.
144. Adeli, H., Yeh, C., Perception Learning in Engineering Design, Microcomputer in Civil Engineering, 4, (1989) 247-56.
145. Ghaboussi, J., Garrett, Jr., Wu, X., Knowledge - Based Modeling of Material Behavior with Neural Networks, Journal of Structural Engineering, ASCE, 117, 1, (1991) 132-53.
146. Kang, H.T., Yoon, C.J., Neural Networks Approaches to Aid Simple Truss Design Problems, Microcomputers in Civil Engineering, 9, (1994) 211-218.
147. Erbatur, F., Hasançebi, O., Tütüncü, İ., ve Kılıç, H., Optimal Design of Planer and Space Structures with Genetic Algorithms, Computers and Structures, 75, (2000) 209-224.

148. Szewczyk, ZP., Hajela, P., Damage Detection in Structures Based on Featuresensitive Neural Networks, Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, 8, 2, (1994)163-78.
149. Wu, X., Ghaboussi, J., Garrett, JH., Use of Neural Networks in Detection of Structural Damage, Computers & Structures, 42,4, (1992) 649-59.
150. Civalek, Ö., The Design of Structures Under Earthquake Effects by Using Neuro-Fuzzy Method, Fourth National Earthquake Engineering Conferences, 17-19 September, Ankara, (1997) 431-38.
151. Ghaboussi, J., Lin, C.C., New Method of Generating Spectrum-Compatible Accelerograms Using Neural Networks, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 27, (1998) 377-96.
152. Hani, KB., Ghaboussi, J., Neural Networks for Structural Control of a Benchmark Problem, Active Tendon System, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 27, (1998) 1225-45.
153. Civalek, Ö., Çatal, H.H., ve Demirdağ, O., Geriye Yayılma Yapay Sinir Ağları ile Düzlem Çerçeve ve Kirişlerin Titreşim Frekanslarının Tahmini, İMO Teknik Dergi, Cilt 13, 3, (2002) 2709-2726.
154. Civalek, Ö., Çatal, H.H., Geriye Yayılma Sinir Ağı Kullanılarak Elastik Kirişlerin Eğilme Titreşimlerinin Yaklaşık Hesabı, TMMK, Ulusal Mekanik Kongresi, Konya Selçuk Üniversitesi, 2001.
155. Civalek, Ö., Elastik Zeminde Oturan Kirişlerin Nöro-Fuzzy Tekniği ile Analizi, 7th. National Soil Mechanics and Foundation Engineering Conferences, 22-23 October, Yıldız Üniversitesi, İstanbul, 1998.
156. Ülker, M., Civalek, Ö., The Buckling Analysis Of Axially Loaded Columns With Artificial Neural Networks, Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences, TUBITAK, 26, (2002) 117- 125.
157. Civalek, Ö., The Analysis of the Rectangular Plates Without Torsion via Hybrid Artificial Intelligent Technique, Proceedings of the Second International Symposium on Mathematical & Computational Applications, September 1-3, Azerbaijan, (1999) 95-101.
158. Civalek, Ö., The Analysis of Rectangular Plates Via Neuro-Fuzzy Technique, III. National Computational Mechanic Conferences, 16-18 November, İstanbul, (1998) 517-25.
159. Civalek, Ö., The Analysis of Circular Plates Via Neuro-Fuzzy Technique, Journal of Engineering Science of Dokuze Yül University, 1, 2, (1999) 13-31.

160. Ülker, M., Civalek, Ö., The Analysis Of Circular Cylindrical Shells Via Hybrid Artificial Intelligent Technique, Turkish Chamber of Civil Eng., 12, 2, (2001) 2401-2417.
161. Çetmeli, E., Plaklar, I.T.U. Yayınları, Yayın No:19, 1987.
162. Straughan, W.T., Analyses of Plates on Elastic Foundations, A Dissertation in Civil Engineering, Texas Tech. University, May 1990.
163. Domingos, P., Antunes, M.L., Neves, J.M.C., Rigid Pavement Reinforcement: Modeling of Structural Behavior, Eight International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Champaign, Illinois, USA, June 29-July 2, 2009.
164. Zaghoul, S., Ahmed, Z., Swan, DJ., Jumikis, AA., Vitillo, N., Falling Weight Deflectometer Correlation, 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, Jan 09-13, 2005.
165. [http://tr.wikipedia.org/wiki/Nesne\\_Y%C3%B6nelimli\\_Programlama#Tarih.C3.A7e](http://tr.wikipedia.org/wiki/Nesne_Y%C3%B6nelimli_Programlama#Tarih.C3.A7e) Nesne Yönelimli Programlama, 20 Ekim 2011.
166. Lee, Y.H., Development of Pavement Prediction Models, PhD dissertation, University of Illinois, Urbana, III, 1993.
167. Lee, Y.H., TKUPAV: Stres Analysis and Thickness Design Program for Rigid Pavements, Journal of Transportation Engineering, 125, 4, (1999) 338-346.
168. <http://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Trafik/KanunYonetmelik/128MaddeDegisiklik.pdf> Karayolları Trafik Yönetmeliği 128. Maddesi, 20 Ekim 2011.
169. Belshe, M., Mamlouk, M.S., Kaloush, K.E., Rodezno, M., Temperature Gradient and Curling Stresses in Concrete Pavement with and without Open-Graded Friction Course, Journal of Transportation Engineering, ASCE, 137, 10, (2011)723-729.
170. Elmas Ç., Yapay Sinir Ağları, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2003.
171. Lin C., Lee G. (1996), Neural Fuzzy Systems, Prentice Hall, 236-240, 242, (1996) 445-448.

## ÖZGEÇMİŞ

Erhan Burak PANCAR, 1979' da Trabzon'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Trabzon'da tamamladı. 1997 yılında ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü' nü kazandı. Bu bölümü 2002 yılında bitirerek, 2002-2003 yılları arasında Diyarbakır' da askerliğini yaptı. 2003-2004 yıllarında Hırvatistan Otoyol Projesi' nde çalıştı. 2005 yılında Ondokuz Mayıs Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı' nda göreve başladı. 2008 yılında Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında lisansüstü eğitimini bitirdi ve aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ulaştırma Bilim Dalında doktorasına başladı. Evli ve bir kız çocuk babası olan Erhan Burak PANCAR, İngilizce bilmekte ve halen O.M.Ü. Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı' nda İnşaat Mühendisi olarak görev yapmaktadır.