

TC  
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TRAFİK YÜKLEMESİ ALTINDA  
KEMER KESİTLİ BETON YOL  
KAPLAMALARINDA OLUŞAN GERİLMELER

Rümeysa KOÇ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

SAMSUN

2019

Her hakkı saklıdır.

## TEZ ONAYI

Rümeysa Koç tarafından hazırlanan “Trafik Yüklemesi Altında Kemer Kesitli Beton Yol Kaplamalarında Oluşan Gerilmeler” adlı tez çalışması 14/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

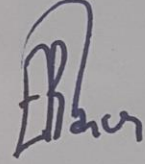
**Danışman** Doç. Dr. Erhan Burak Pancar  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

### Jüri Üyeleri

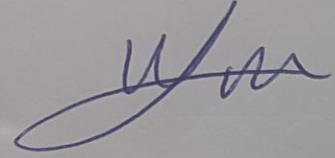
**Başkan** Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR  
Karadeniz Teknik Üniversitesi  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı



**Üye** Doç. Dr. Erhan Burak PANCAR  
Ondokuz Mayıs Üniversitesi  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı



**Üye** Doç. Dr. Ufuk KIRBAŞ  
Ondokuz Mayıs Üniversitesi  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı



## ETİK BEYAN

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

14/06/2019

Rümeysa KOÇ

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### TRAFİK YÜKLEMESİ ALTINDA KEMER KESİTLİ BETON YOL KAPLAMALARINDA OLUŞAN GERİLMELER

Rümeysa KOÇ

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Ulaştırma Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Erhan Burak Pancar

Beton yollar, kullanım avantajları, düşük koruma ve bakım masrafları ve uzun kullanımlarından ötürü giderek yükselen bir değere sahiptir. Bu çalışmada, trafik yüklemesi altındaki beton yol kaplamalarında oluşan gerilmeler ve aynı yükleme altında kemer kesitli beton yol kaplamalarında oluşan gerilmeler karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, çalışma ilk olarak deneysel yöntemle başlatılarak, 15x15x15 cm'lik standart ve 36, 50, 72 mm çaplarında kemer kesitli beton numuneleri C20/25, C25/30, C30/37 beton sınıfları için ayrı ayrı oluşturulmuştur. Numuneler, basınç deneylerine tabi tutularak, gerilme sonuçları elde edilmiştir. Ardından, ANSYS programıyla aynı boyutlarda C20/25, C25/30, C30/37 beton sınıfları modellenmiş ve her birine ayrı ayrı taşıyabilecekleri maksimum basınç yükü uygulanarak oluşan gerilme ve deformasyonlar incelenmiştir. Aynı modelleme SAP2000 programı kullanılarak yapılmış ve iki programda oluşan gerilme sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırılmadan yola çıkılarak, en ideal beton sınıfı seçilip, trafik yüklemesi altında beton yol kaplamalarında oluşan gerilmeleri hesaplamak için SAP2000 programı kullanılmıştır. SAP2000 programında, 4 m x 4.5 m x 15 cm boyutlarındaki beton yol kaplamasında, kemersiz ve 36, 50, 72 mm çaplı kemer kesitli beton numunelerine trafik yüklemeleri uygulanmıştır. Zayıf ve orta sağlam zeminlerde, 70 km/sa hızla tek ve arka arkaya elli araç geçişi için tasarlanan yüklemeler sonucunda oluşan gerilmeler analiz edilmiştir. Bu analizler neticesinde, kemer kesit için en ideal çap 36 mm olarak belirlenmiştir. Gerilmelerin sonucunda, beton yol kesitinde kemer kesit çaplarının artmasıyla plakta oluşan gerilmelerin de arttığı, zeminin sağlamlığı arttıkça oluşan gerilmelerin azaldığı ve tasarlanan yol kaplamasında sayıca fazla araç geçişinin de gerilmeyi arttırdığı tespit edilmiştir. Beton yol kesitinin kemerli yapılmasının, kullanılacak beton hacmini de düşürdüğü görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Beton yol, Trafik yüklemesi, Kemer kesit, SAP2000

## **ABSTRACT**

Master's Thesis

### **STRESSES ON CONCRETE PAVEMENT WITH ARCH SECTION UNDER TRAFFIC LOADING**

Rümeysa KOÇ

Ondokuz Mayıs University

Graduate School of Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Erhan Burak Pancar

Concrete roads have a gradual interest rise due to their advantage of use, low maintenance costs and lasting. In this study, the stresses on concrete roads which have standard cross section and arch shapes cross sections were compared each other under different types of traffic loadings. For this purpose, 15x15x15 cm standard and 36, 50, 72 mm diameter arch shape cross section concrete specimens were prepared with C20 / 25, C25 / 30, C30 / 37 types of concrete. The stresses under the compression tests were obtained for these samples. Later, C20 / 25, C25 / 30, C30 / 37 types of concrete samples were modeled by using ANSYS program and stress and strain values, were compared with the experimental test. The same modelling was developed for the SAP2000 program and the stress results obtained from two programs were compared to each other. Traffic loads were applied to the concrete road with 4 m x 4.5 m x 15 cm dimension which has standard and arch shape cross sections with 36, 50, 72 mm diameters. The compression stresses which were obtained after different types of traffic loadings on two different types of ground were analyzed. The ideal arch diameter was determined as 36 mm. It was obtained that, the stresses were increasing with the increment of arch diameter, decreasing with increment of strength of soil, increasing with the increment of number of truck that pass on the road. It was determined that constructing the concrete road with an arch shape cross section reduces the volume of concrete.

**Key words:** Concrete road, Traffic loading, Arch cross section, SAP2000

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Akademik eğitim sürecimin bir üst noktası olan yüksek lisans tez çalışmam boyunca ilgi ve desteğini benden esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Erhan Burak PANCAR'a, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Başkanı Sayın Prof. Dr. Zeki KARACA'ya birçok konuda fikrine danıştığım, teknik konularda yardımını esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Sertaç TUHTA'ya, teknik program bilgisiyle yardımcı olan Arş. Gör. Muhammet Fatih BAŞOĞLU'na ve Arş. Gör. Ferruh TURAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Beni bugünlere getirmek için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan canım babama ve tüm gücünü her zaman yanımda hissettiğim canım aileme teşekkür ederim. Yüksek lisans eğitimim boyunca benden desteklerini esirgemeyen arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Haziran 2019, Samsun

Rümeysa KOÇ

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
1.GİRİŞ.....	1
2.BETON YOL TASARIMI.....	2
2.2. Beton Yol Tasarımında Kullanılan Beton.....	2
2.2.1. Betonun basınç dayanımı.....	2
2.3. Beton Yol Tasarımında Yol Kaplamalarında Oluşan Gerilmeler.....	3
2.3.1. Taşıt ve trafik yüklemesinden oluşan gerilmeler.....	4
2.3.2. Sıcaklık değişimlerinden dolayı oluşan gerilmeler.....	9
2.3.3. Burulmadan dolayı oluşan gerilmeler.....	12
2.3.4. Sürtünmeden dolayı oluşan gerilmeler.....	14
2.4. Beton Yol Tasarımında Betonun Yorulma Analizi.....	15
2.5 Beton Yol Tasarımının Sınıflandırılması.....	16
2.5.1 Derzli donatısız beton yol kaplamaları.....	17
2.5.2 Derzli donatılı beton yol kaplamaları.....	19
2.5.3 Sürekli donatılı beton yol kaplamaları.....	20
2.6. Beton Kemer Yapısı.....	21

2.7. Literatürde ANSYS Bilgisayar Analiz Programı Kullanılarak Beton Numunede Oluşan Gerilme Hesabı .....	23
2.8. Literatürde SAP2000 Bilgisayar Analiz Programı Kullanılarak Beton Yol Kaplamasında Oluşan Gerilme Hesabı.....	24
3.MATERYAL VE YÖNTEM .....	26
3.1. Materyal.....	26
3.2 Yöntem .....	26
3.2.1. Deney için kalıpların hazırlanması .....	26
3.2.2. Deney için numune oluşturulması .....	28
3.2.3 ANSYS bilgisayar analiz programı için sistemin modellenmesi.....	31
3.2.4 ANSYS bilgisayar analiz programı için malzeme özelliklerinin girilmesi	31
3.2.5. ANSYS bilgisayar analiz programı için basınç yüklerinin tanımlanması	31
3.2.6. SAP2000 bilgisayar analiz programı için sistemin modellenmesi .....	31
3.2.7. SAP2000 bilgisayar analiz programı için malzeme özelliklerinin tanımlanması.....	32
3.2.8 SAP2000 bilgisayar analiz programı için taşıt yüklerinin tanımlanması ..	33
4.BULGULAR VE TARTIŞMA .....	34
4.1. Deney Sonunda Beton Numune Kırımı ve Analiz Sonuçları.....	34
4.2. ANSYS Bilgisayar Analiz Programında Beton Numunesinde Oluşan Deformasyon .....	37
4.3. ANSYS Bilgisayar Analiz Programında Beton Numunesinde Oluşan Gerilmeler .....	40
4.4. SAP2000 Bilgisayar Analiz Programında Beton Numunesinde Oluşan Gerilmeler.....	44
5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	65
KAYNAKLAR .....	68

## ÖZGEÇMİŞ



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### SİMGELER

a	Dairesel yükleme alanının yarıçapı
a <sub>1</sub>	Köşeden, köşe yükleme merkezine olan uzaklık
a <sub>2</sub>	Yarı dairesel yükleme alanının yarıçapı
°C	Santigrat
C <sub>x</sub>	Beton plağın uzunluğu yönündeki katsayı
C <sub>y</sub>	Beton plağın genişliği yönündeki katsayı
C20/25	Beton sınıfı
C25/30	Beton sınıfı
C30/37	Beton sınıfı
E	Elastisite modülü
f <sub>a</sub>	Betonla zemin arasındaki ortalama sürtünme katsayısı
gr	Gram
h	Beton plak kalınlığı
HSn-44	Sap2000 programında taşıt tipi
inç	Uzunluk ölçüsü birimi
k	Zemin yatak katsayısı veya zemin reaksiyon modülü
kg	Kilogram
km	Kilometre
L	Plak uzunluğu
Ĺ	Boyuna doğrultuda plak mesafesi
l	Beton plağın bağıl sertlik yarıçapı
L <sub>x</sub> ve L <sub>y</sub>	Beton plağın serbest uzunluğu ve genişliği
mm	Milimetre
Mpa	Megapascal
MR	Betonun 28 gün sonunda eğilmede çekme dayanımı
N <sub>i</sub>	İzin verilen tekerlek yük

$n_i$	Oluşan tekerlek yükü
$P$	Tek teker yüklemesi
$p$	Zemin reaksiyon basıncı
$q$	Zeminin bir noktasındaki basınç
$r$	Yarıçap
$sa$	Saat
$v$	Araç hızı
$V$	HSn-44 taşıt yükünde değişken ayak
$w$	Çökme
$W$	HSn-44 iki dingil üzerindeki toplam ağırlık
$W$	Enine doğrultuda plak mesafesi
$X_1$	Köşe yüklemesine bağlı, köşeden, eğilmede çekme gerilmesinin maksimum olduğu noktaya olan uzaklık
$\alpha$	Lineer termal genişleme katsayısı
$\alpha_t$	Isıl genişleme katsayısı
$\varepsilon$	Isıl genişleme katsayısı
$\gamma$	Euler sabiti
$\gamma_c$	Betonun birim ağırlığı
$\mu$	İzin verilen bağ gerilmesi
$\nu$	Beton plağın poisson oranı
$\sigma$	Maksimum eğilmede çekme gerilmesi
$\sigma_c$	Maksimum çekme gerilmesi
$\sigma_o$	Beton plakta $\Delta t$ ısı farkı ile oluşan gerilme
$\Delta$	Plakanın çökmesi
$\Delta_t$	Sıcaklık gradyanı

## **KISALTMALAR**

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials- Amerikan Karayolları Birliği
ANSYS Workbench	Bilgisayar analiz programı
CBR	Kaliforniya taşıma oranı
SAP2000	Structural Analysis Program- Bilgisayar analiz programı
TS EN 206	Beton standartı
TS 500	Türk standartı



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. CBR değeri ile yatak katsayısı (k) arasındaki ilişki.....	4
Şekil 2.2. Yatak katsayısı.....	5
Şekil 2.3. Beton plakta yükün etkidiği noktaya göre çökme oluşumu.....	5
Şekil 2.4. Beton kaplamadaki kritik dingil yüklemesi.....	6
Şekil 2.5. Karayolu trafik yönetmeliğine göre araçlarda maksimum boyut.....	7
Şekil 2.6. Beton kaplamada gündüz- gece sıcaklık gradyanı etkisi.....	9
Şekil 2.7. Beton plak hareketini engelleyen, gündüz-gece sıcaklık gradyanının beton kaplama üzerine etkisi.....	11
Şekil 2.8. Pozitif sıcaklık gradyanında plak merkezi boyunca oluşan dikey deformasyonlar ve eğilme gerilmeleri.....	12
Şekil 2.9. Farklı ısıların etkisiyle beton plakta oluşan burulma.....	12
Şekil 2.10. Burulma gerilmeleri katsayıları.....	13
Şekil 2.11. Beton plakta oluşan sürtünme .....	14
Şekil 2.12. Kayma demir uygulaması gösterimi.....	17
Şekil 2.13. Beton yolda bağlantı demirleri .....	17
Şekil 2.14. Derzli donatısız beton yol kaplamaları.....	18
Şekil 2.15. Derzli donatılı beton yol kaplamaları.....	19
Şekil 2.16. Sürekli donatılı beton yol kaplamaları.....	21
Şekil 2.17. Beton kemer yapısı .....	22
Şekil 2.18. Beton kemer yapısının yol plakası içinden geçiş gösterimi.....	22
Şekil 2.19. Kemer yapıya etkiyen yük dağılımı.....	23
Şekil 2.20. ANSYS’de tanımlanan geometrik beton modeli .....	24

Şekil 2.20. Belirli bir anda beton plaktaki deplasman grafiği .....	25
Şekil 3.1. Teflon malzeme gösterimi.....	27
Şekil 3.2. Teflon malzemenin yapıştırılması.....	27
Şekil 3.3. C20/25 Malzemelerinin Tartım Aşaması .....	28
Şekil 3.4. C20/25 Beton Numunesi Oluş .....	29
Şekil 3.5. Sonlu elemanlara bölünmüş plak.....	32
Şekil 3.6. Sonlu elemanlara bölünmüş kemer kesitli plak.....	32
Şekil 3.7. Trafik şeridinin üç boyutlu görünüşü.....	33
Şekil 3.8. AASHTO HS20-44 kamyonu dingil yüklemesi.....	33
Şekil 4.1. Deney sonucunda uygun beton numunesi.....	37
Şekil 4.2. C20/25 sınıfı beton numunelerde 25 MPa altında oluşan deformasyonlar..	38
Şekil 4.3. C25/30 sınıfı beton numunelerde 30 MPa altında oluşan deformasyonlar..	39
Şekil 4.4. C30/37 sınıfı beton numunelerde 37 MPa altında oluşan deformasyonlar..	40
Şekil 4.5. C20/25 sınıfı beton numunelerde 25 MPa altında oluşan gerilmeler.....	41
Şekil 4.6. C25/30 sınıfı beton numunelerde 30 MPa altında oluşan gerilmeler.....	42
Şekil 4.7. C30/37 sınıfı beton numunelerde 37 MPa altında oluşan gerilmeler.....	43
Şekil 4.8. C30/37 beton sınıfında şahit için oluşan gerilme: 0,98 MPa.....	45
Şekil 4.9. C30/37 beton sınıfında 36 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 2,15 MPa..	46
Şekil 4.10. C30/37 beton sınıfında 50 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 2,4 MPa..	46
Şekil 4.11. C30/37 beton sınıfında 72 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 2,7 MPa..	47
Şekil 4.12. C30/37 beton sınıfında zayıf zeminde bir araç için oluşan gerilme grafiği.....	47

Şekil 4.13. C30/37 beton sınıfında zayıf zeminde bir araç için gerilmelerin yüzdelik artış grafiği.....	47
Şekil 4.14. C30/37 beton sınıfında şahit için oluşan gerilme: 1,66 MPa.....	48
Şekil 4.15. C30/37 beton sınıfında 36 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 2,4 MPa...49	
Şekil 4.16. C30/37 beton sınıfında 50 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 2,8 MPa...49	
Şekil 4.17. C30/37 beton sınıfında 72 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 4,2 MPa...50	
Şekil 4.18. C30/37 beton sınıfında zayıf zeminde elli araç için oluşan gerilme grafiği.....	50
Şekil 4.19. C30/37 beton sınıfında zayıf zeminde elli araç için gerilmelerin yüzdelik artış grafiği.....	51
Şekil 4.20. C30/37 beton sınıfında zayıf zeminde farklı araç sayılarında gerilmelerin karşılaştırma sütun grafiği.....	52
Şekil 4.21. C30/37 beton sınıfında zayıf zeminde farklı araç sayılarında gerilmelerin karşılaştırma çizgi grafiği.....	52
Şekil 4.22. C30/37 beton sınıfında şahit için oluşan gerilme: 0,89 MPa.....	53
Şekil 4.23. C30/37 beton sınıfında 36 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 1,5 MPa...53	
Şekil 4.24. C30/37 beton sınıfında 50 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 1,94 MPa.54	
Şekil 4.25. C30/37 beton sınıfında 72 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 2,15 .....54	
Şekil 4.26. C30/37 beton sınıfında orta sağlam zeminde bir araç için oluşan gerilme grafiği.....	55
Şekil 4.27. C30/37 beton sınıfında orta sağlam zeminde bir araç için gerilmelerin yüzdelik artış grafiği.....	55
Şekil 4.28. C30/37 beton sınıfında şahit için oluşan gerilme: 1,26 MPa.....	56

Şekil 4.29. C30/37 beton sınıfında 36 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 1,9 MPa...	56
Şekil 4.30. C30/37 beton sınıfında 50 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 2,4 MPa...	57
Şekil 4.31. C30/37 beton sınıfında 72 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 3,6 MPa...	57
Şekil 4.32. C30/37 beton sınıfında orta sağlam zeminde elli araç için oluşan gerilme grafiği.....	58
Şekil 4.33. C30/37 beton sınıfında orta sağlam zeminde elli araç için gerilmelerin yüzdelik artış grafiği.....	58
Şekil 4.34. C30/37 beton sınıfında orta sağlam zeminde farklı araç sayılarında gerilmelerin karşılaştırma sütun grafiği.....	59
Şekil 4.35. C30/37 beton sınıfında orta sağlam zeminde farklı araç sayılarında gerilmelerin karşılaştırma çizgi grafiği.....	60
Şekil 4.36. C30/37 şahit betonunda araç geçişinde plakta oluşan deformasyon etkisi.	60
Şekil 4.37. C30/37 36 mm çaplı kemer kesitli betonda araç geçişinde plakta oluşan deformasyon etkisi.....	61
Şekil 4.38. C30/37 50 mm çaplı kemer kesitli betonda araç geçişinde plakta oluşan deformasyon etkisi.....	62
Şekil 4.39. C30/37 72 mm çaplı kemer kesitli betonda araç geçişinde plakta oluşan deformasyon etkisi.....	62

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Beton malzeme miktarları.....	29
Çizelge 4.1. Beton basınç deneyi sonuçları.....	34
Çizelge 4.2. C20/25 Beton İçin % lik Düşüş Tablosu.....	35
Çizelge 4.3. C25/30 Beton İçin % lik Düşüş Tablosu.....	36
Çizelge 4.4. C30/37 Beton İçin % lik Düşüş Tablosu.....	36
Çizelge 4.5 ANSYS-SAP2000 programlarında bulunan gerilmelerin karşılaştırılması.....	44
Çizelge 4.6. C30/37 beton sınıfında zayıf zeminde gerilmelerin karşılaştırılması.....	51
Çizelge4.7. C30/37 beton sınıfında orta sağlam zeminde gerilmelerin karşılaştırılması.....	59
Çizelge 4.8. Çalışmada yapılan işlemlerin özeti.....	63

## 1.GİRİŞ

Bir karayolu üst yapısı değişik tabakalardan oluşmaktadır. Bu üst yapılar esnek üst yapı (Asfalt Yollar) ve rijit üst yapı (Beton Yollar) olmak üzere genellikle ikiye ayrılmaktadır. Bu tabakalar, tasarlanan yol projesinin ömrü süresince emniyetli bir şekilde ve her türlü iklim koşulları altında hizmet verebilmektedir. Çimento betonu ile oluşturulan kaplamalara “Beton Yollar” denir. Trafik yüklerinin etkisiyle oluşan gerilmelere karşı koymak ve trafik yüklerini zemine aktarmak için beton yollar, ağır taşıt trafiğinin bulunduğu kısımlarda uygulama alanı bulmaktadır.

Yol beton olarak planlandığında konu sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmeli ve tüm durumlar ciddi şekilde ele alınmalı ve olabilecek tüm durumlara karşı tedbirlerin alınması uygun olmaktadır. Beton yollarının hizmet ömrünü olumsuz etkileyen faktörün ortaya çıkması diğer olumsuz faktörleri de beraberinde getirmektedir. Ağır taşıt yüklemesine maruz kalmış bir beton yolda kırılmalar olabilmekte ve bununla beraber geçirimsizlik artmaktadır ve zeminde deformasyonlar oluşup, yolda bozulmalar meydana gelmektedir.

Sürdürülebilirlik açısından, mümkün mertebe daha az miktarda beton kullanılarak aynı verimlilikte beton kaplama yapmak önemli bir hedeftir. Bu amaçla, çalışmamızda beton yol kesitinde kemerler oluşturarak ideal kesitler meydana getirilmeye çalışılmıştır. ANSYS programı ile farklı beton sınıflarında standart 15x15x15 cm’lik küp numunesinde beton sınıfları için her birine ayrı ayrı taşıyabilecekleri maksimum basınç yükü uygulanarak oluşan maksimum ve minimum deformasyonlara ve gerilmelere bakılmıştır.

Trafik yüklemesi altında, söz konusu farklı kesitlerde oluşacak gerilmeler, farklı zemin tipleri ve farklı sayıda trafik yüklemesine göre SAP2000 programı ile hesaplanmıştır. Daha az beton kullanarak, yol kesit yüksekliği aynı kalmak şartıyla, kesit içine kemerli boşluklar açılarak daha verimli ve daha sürdürülebilir beton yol yapılabileceği gösterilmiştir.

## **2.BETON YOL TASARIMI**

Beton yol tasarımı, döşeme kalınlığı, donatı ve yük transferini ve diğer üstyapı özelliklerinin belirlenmesini, en uygununun seçilmesini ve geliştirilmesini, üstyapı performansı, servis ömrü ve seçilen betonun özelliklerini içerir. Tasarım süreci boyunca, üstyapının performansı üzerinde seçilen malzeme ve yapı özellikleri önemli rol oynadığı için malzemeyi uygun şekilde arazi deneyleri aracılığıyla belirlemek çok önemlidir.

### **2.1. Beton Yol Tasarımı Performansı**

Beton yol tasarımının amacı, üst yapının iyi bir performans göstermesini sağlamaktır. Belirlenen yol tasarımı, trafik yükleri ve çeşitli çevresel yükler altında en istenilir düzeyde hizmet sağlaması ve üstyapıya etkileyen trafik yüklerini emniyetle taşıyabilmesi ve sürücülere belirlenen hız limitleri içerisinde konforlu bir sürüş sağlayabilmesi gibi yapısal ve işlevsel performans ölçütlerini sağlamalıdır.

### **2.2. Beton Yol Tasarımında Kullanılan Beton**

Beton yol tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli unsur, tasarımın doğru bir şekilde yapılmasıdır. Tasarımın doğru bir şekilde yapılabilmesi, yolların istenilen performansı sağlayabilmesi için betonun birçok özelliği dikkatle incelenmelidir. Tasarım performansı açısından en esaslı beton özellikleri dayanım, rijitlik, kuruma rötresi, ısıl değişkenlikler ve durabilitedir (Amerikan Karayolu Federal İdaresi, 2006).

Beton yol tasarımının doğru şekilde yapılamaması durumunda, tasarlanan yolda çatlakların oluşması kaçınılmaz olmaktadır.

#### **2.2.1. Betonun basınç dayanımı**

Beton basınç dayanımı, “eksenel basınç yükü altında bulunan betonun kırılmamak için gösterdiği direnme kabiliyeti başka bir deyişle eksenel basınç yükü etkisiyle betonda oluşan maksimum gerilme” olarak ifade edilir. Betonun dayanım türleri içinde en çok kullanılanı basınç dayanımıdır (Macit,2009).

Yapıların tasarımında, yol tasarımının yöntemlerinde döşeme kalınlığının belirlenmesinde en önemli parametre betonun dayanımıdır. Beton yol tasarımında

betonun üzerine gelen en önemli yüklerin basınç yükleri oldukları kabul edilerek hesap yapılmaktadır. Betonun çekme dayanımı ile eğilme dayanımı arasında yakın bir bağlantı bulunmaktadır. Bu sebeple basınç dayanımı hesaplandığı takdirde diğer türdeki dayanımlar hakkında yorum yapılabilir.

Tasarımının doğru bir şekilde yapılmaması durumunda, yolda çatlakların oluşması kaçınılmazdır. Dökülen büyük kütleli betonlarda, beton içeriğinde yapılacak olan küçük hatalar dahi istenmeyen çatlaklara yol açabilir. Farklı ülkelerin, beton yol tasarımında kullandıkları beton tasarımlarında farklılıklar olabilmektedir.

### **2.3. Beton Yol Tasarımında Yol Kaplamalarında Oluşan Gerilmeler**

Beton yol kaplamaları beton plaklardan imal edilirler. Betonun basınç, eğilmede çekme, yorulma, vb. mekanik özellikleri dikkate alınarak tasarlanan beton kaplamalar çeşitli etkilerden dolayı oluşan gerilmelere, inşa edilen kaplamaya en uygun beton plaklarla karşı koyarlar. Çeşitli etkilerle oluşan bu gerilmeler;

1. Taşıt ve trafik yükleri
2. Periyodik şekilde oluşan ısı değişimleri (burulma - kıvrılma, büzülme, genişleme, vb.)
3. Periyodik şekilde oluşan hacimsel değişimler (don kabarması, oturma, vb.)
4. Plak ile temel arasında oluşan sürtünme
5. Plaklar arasındaki sürtünme ve yük geçişi gibi nedenlerden dolayı farklı şiddetlerde meydana gelmektedir.

Bu sebeplerle, beton kaplama kalınlıklarının tasarımı için; zemin taşıma gücü, betonun mekanik özellikleri, iklim ve trafik (dingil yükü ve tekerrür sayısı) gibi etkenler dikkatle incelenerek göz önüne alınmalıdır.(Ulusoy, 2010)

Beton kaplamalarda oluşan gerilmeler;

- Teker yükü ve lastik basıncı
- Tekerler arası mesafe
- Teker yükünün beton plak noktasındaki yükleme konumu (köşe, kenar veya orta)
- Zemin yatak katsayısı

- Çevresel etkilerden (ısı, rutubet) dolayı beton plakta oluşan burulma
- Burulmanın yönü (dış bükey, iç bükey) gibi nedenlere bağlıdır.

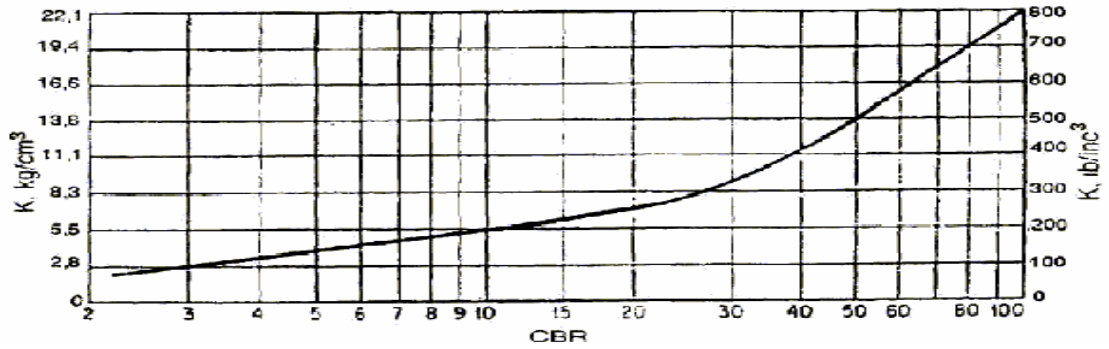
### 2.3.1. Taşıt ve trafik yüklemesinden oluşan gerilmeler

Taşıt ve trafik yüklemesinden ötürü oluşan gerilmeler yol kaplamalarının hizmet ömrü süresince yorulmasını etkiler.

Taşıt yüklerinin etkisiyle beton plaklarda basınç ve çekme gerilmeleri bir arada oluşmaktadır. Fakat betonun yüksek basınç mukavemetine sahip olması nedeniyle betonun eğilme - çekme gerilmesi esas alınarak geliştirilen metotlar ile beton kaplama kalınlığı belirlenmektedir.

Beton yol kaplamalarında kullanılan plakların kalın olması, eğilme gerilmelerini azalttığı için daha fazla yük taşıma imkanı sağlar. Aynı zamanda bu durum yol kaplamalarının yorulma ömrünü uzatır.

Beton yol kaplama tasarımında zemin mukavemeti, plağa yükleme testi ile elde edilen yatak katsayısı (k) ile tanımlanır. Şekil 2.1'de CBR-k ilişkisi görülmektedir.

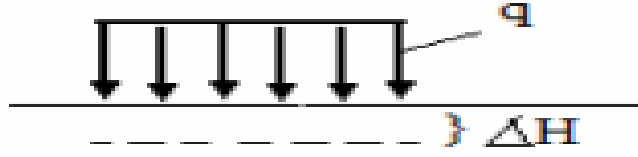


Şekil 2.1. CBR değeri ile yatak katsayısı (k) arasındaki ilişki (Ağar vd, 1998)

Kaliforniya taşıma oranı (CBR), zemin direncini ölçmeye yarayan orandır. Kaplamaların tasarımında, kaplamaların tasarlanan yola uygunluğu hakkında bilgi verir.

Yatak katsayısı (k); zeminin herhangi bir noktasındaki basınç (q) ile, aynı noktadaki oturma ( $\Delta H$ ) arasındaki oran olarak tanımlanır. Yatak katsayısı denklemi (2.1) eşitliğinde gösterilmektedir. Şekil 2.2'de bu ilişki gösterilmiştir.

$$k = q / \Delta H \quad (2.1)$$



Şekil 2.2. Yatak katsayısı (Kant, 2009)

Trafik yüklemesine maruz kalan bir beton plakta çökme ve zemin reaksiyon basıncı görülmektedir (Edis, 2007). Bu durum Şekil 2.3'te gösterilmektedir.

Yatak katsayısı, çökme ve zemin reaksiyonu arasındaki ilişkinin denklemi (2.2) eşitliğinde gösterilmektedir.

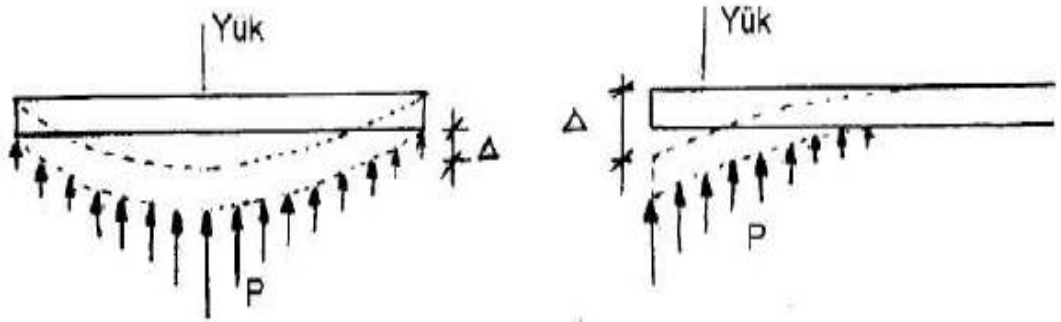
$$p = k\Delta \quad (2.2)$$

Burada;

p: Zemin reaksiyon basıncı,  $\text{kg/cm}^2$

k: Zemin yatak katsayısı veya zemin reaksiyon modülü,  $\text{kg/cm}^2/\text{cm}$  (veya  $\text{kg/cm}^3$ )

$\Delta$ : Plakanın çökmesi, cm



a. Plak orta yüklemesi

b. Plak kenar veya köşe yüklemesi

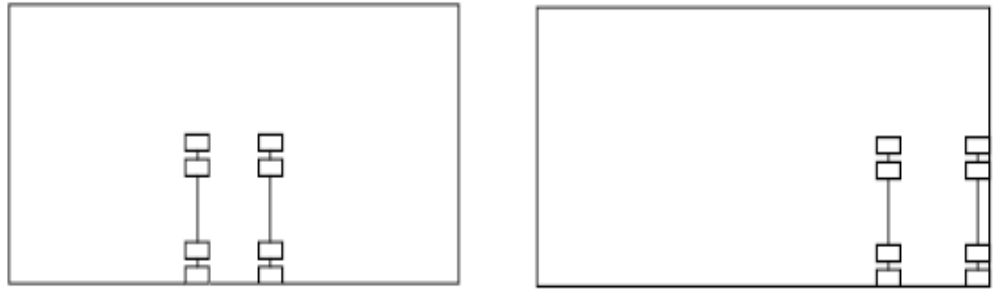
Şekil 2.3. Beton plakta yükün etkidiği noktaya göre çökme oluşumu (Edis, 2007)

Beton yol kaplamalarında plak üzerine etki eden teker yükü plağın farklı bölgelerinde farklı eğilme gerilmeleri oluşturur. En kritik gerilmeler plağın köşe

noktasına yük etkimesi durumunda, en düşük gerilmeler ise plağın orta noktasına yük etki etmesi durumunda oluşmaktadır.

Bir beton kaplama plağı üzerine etki eden teker yükü; teker yükünün büyüklüğü, yükün etki ettiği pozisyon, yükün etkide bulunduğu alan gibi parametrelere bağlı olarak yüzeyde deformasyonların oluşmasını sağlar. (Ulusoy, 2010)

Dingil gruplarının kaplama üzerine yerleştirilmesinde Packard ve Tayabji (1985) çalışmalarında tek ve çift dingil yüklemelerinde beton kaplamada oluşan en büyük çekme gerilmesinin, plak kenarında iki enine derzin ortasında olduğunu (Şekil 2.4.a), derzli beton yollarda en büyük çökmenin ise plak köşesinde olduğunu tespit etmişlerdir. (Şekil 2.4.b)



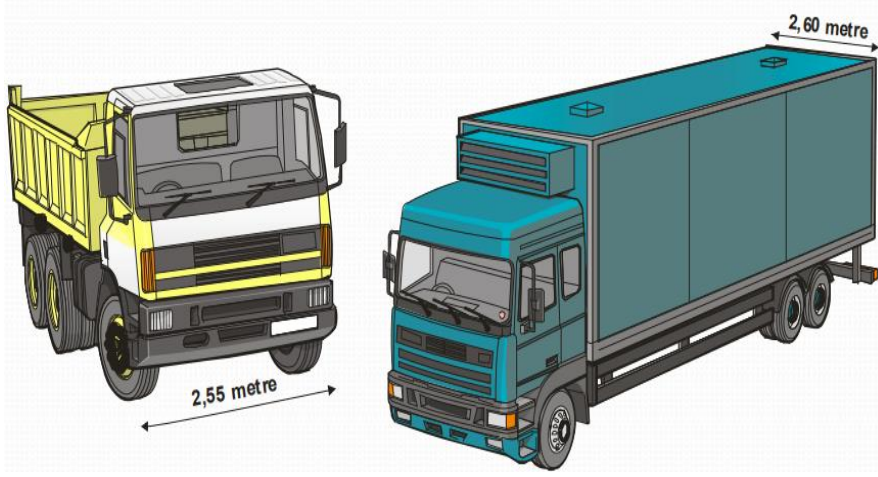
a. Kritik eğilmede çekme gerilmesi

b. Kritik çökme için yükleme

Şekil 2.4. Beton kaplamadaki kritik dingil yüklemesi (Packard ve Tayabji, 1985)

Dingil gruplarındaki dingil mesafeleri için farklı mesafeler alınarak farklı çalışmalar yapılmış ve yapılmaktadır.

Karayolları trafik yönetmeliğinin 128. maddesine göre trafikte seyir halinde olan araçlarda karayoluna zarar vermeksizin güvenli şekilde seyir yapacak maksimum boyut ve ağırlıklar azami genişlik için 2,55 m, frigorifik araçlarda yalnız frigorifik yapı genişliği 2,60 m dir. Yükseklik ise 4,0 m dir. Şekil 2.5.te gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Karayolu trafik yönetmeliğine göre araçlarda maksimum boyut

(Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2019)

Beton plağın iç, kenar ve köşe noktalarında oluşan maksimum eğilmede çekme gerilmesi( $\sigma$ ) ve maksimum çökme( $w$ ) Westergaard eşitlikleri ile değişik kaynaklarda bulunmaktadır. Beton plağın iç yükleme için klasik teori, dairesel yükleme alanı denklemi (2.3) ve (2.4) eşitliğiyle hesaplanmaktadır. (Westergaard, 1926; Ioannides, 1986)

$$\sigma = \frac{3P(1+\nu)}{2\pi rh^2} \left\{ \ln\left(\frac{2l}{a}\right) + 0.5 - \gamma \right\} \quad (2.3)$$

$$W = \frac{P}{8kl^2} \left[ 1 + \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln\left(\frac{a}{2l}\right) + \gamma - 1.25 \right\} \left(\frac{a}{l}\right)^2 \right] \quad (2.4)$$

Beton plağın kenar yükleme için klasik teori, yarı dairesel yükleme alanı denklemi (2.5) ve (2.6) eşitliğiyle hesaplanmaktadır. (Westergaard, 1926; Ioannides, 1986)

$$\sigma = \frac{0.529P}{h^2} (1 + 0.54\nu) \left\{ \log\left(\frac{Eh^3}{ka^4}\right) - 0.71 \right\} \quad (2.5)$$

$$W = \frac{P}{\sqrt{6}kl^2} (1 + 0.4\nu) \quad (2.6)$$

Beton plağın yeni teori, dairesel yükleme alanı denklemi (2.7) ve (2.8) eşitliğiyle hesaplanmaktadır. (Westergaard, 1948; Ioannides, 1986)

$$\sigma = \frac{3P(1+\nu)}{\pi(3+\nu)h^2} \left\{ \ln\left(\frac{Eh^3}{100ka^4}\right) + 1.84 - \frac{4}{3}\nu + \frac{1-\nu}{2} + 1.18(1 + 2\nu) \frac{a}{l} \right\} \quad (2.7)$$

$$W = \frac{\sqrt{2+1.2\nu}P}{\sqrt{Eh^3k}} \left\{ 1 - (0.76 + 0.4\nu) \frac{a}{l} \right\} \quad (2.8)$$

Beton plağın yeni teori, yarı dairesel yükleme alanı denklemi (2.9) ve (2.10) eşitliğiyle hesaplanmaktadır. (Westergaard, 1948; Ioannides, 1986),

$$\sigma = \frac{3P(1+\nu)}{\pi(3+\nu)h^2} \left\{ \ln\left(\frac{Eh^3}{100ka_2^4}\right) + 3.84\frac{4}{3}\nu + 0.5(1+2\nu)\frac{a_2}{l} \right\} \quad (2.9)$$

$$W = \frac{\sqrt{2+1.2\nu}P}{\sqrt{Eh^3k}} \left\{ 1 - (0.323+0.17\nu)\frac{a_2}{l} \right\} \quad (2.10)$$

Sonlu eleman ve sonlu farklar hesaplamaları, kenar yüklemesi için gösterilen klasik Westergaard eşitliklerinin (2.5), (2.6) doğru olmadığını göstermektedir.

Bunun tersine, kenar yüklemesi için yeni bulunan Westergaard eşitliklerinin (2.7), (2.8), (2.9), (2.10), sonlu eleman ve sonlu farklarla yakın sonuçlar ortaya çıkardığı, bu sonuçlar doğrultusunda dairesel ve yarı dairesel yüklemeler arasındaki farkın düşük olduğu görülmüştür.

Beton plağın köşe yüklemesi, dairesel yükleme alanı denklemi (2.11) ve (2.12) eşitliğiyle hesaplanmaktadır. (Westergaard, 1948; Ioannides, 1987)

$$\sigma = \frac{3P}{h^2} \left\{ 1 - \left(\frac{a_1}{l}\right)^{0.6} \right\} \quad (2.11)$$

$$W = \frac{P}{kl^2} \left\{ 1.1 - 0.88\left(\frac{a_1}{l}\right) \right\} \quad (2.12)$$

Köşe noktasından maksimum gerilme noktasına olan mesafe (2.13) eşitliğiyle hesaplanır.

$$X_1 = 2\sqrt{a_1 l} \quad (2.13)$$

Bu denklemlerde;

$\sigma$ = 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>)

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

$\gamma$ = Euler sabiti (=0.5772156649)

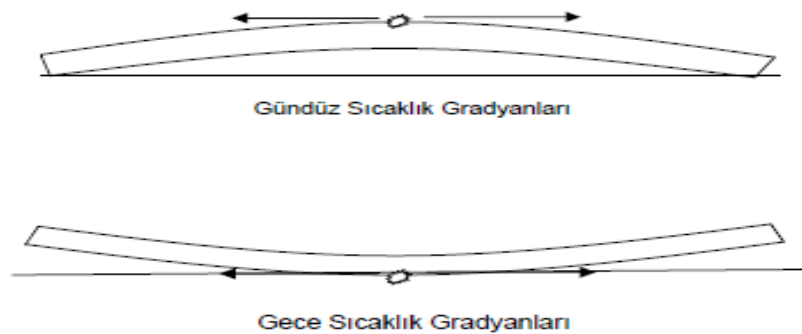
$a_1 = a\sqrt{2}$  = Köşeden, köşe yükleme merkezine olan uzaklık (mm)

$X_1$ = Köşe yüklemesine bağlı, köşeden, eğilmede çekme gerilmesinin maksimum olduğu noktaya olan uzaklık (mm)

### 2.3.2. Sıcaklık değişimlerinden dolayı oluşan gerilmeler

Beton yol kaplamalarında oluşan gerilmelerde taşıt yükleri ile beraber sıcaklık değişimleri de önemli rol oynar. Sıcaklık değişimleri betonun yapısını değiştirebileceğinden ötürü yolda bozulmalara, erken çatlamalara sebep olabilmektedir. Bu nedenle hava koşullarına uygun şekilde beton dökümü önemlidir.

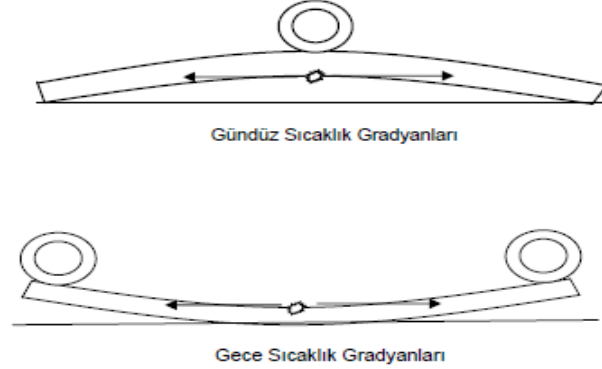
Beton plağın üst ve alt yüzeylerinde meydana gelen sıcaklık farklarından ötürü, gündüz vakti beton plağın merkezinde ve üst kısmında maksimum çekme gerilmesi olurken, gece vakti beton plağın alt kısmında meydana gelmektedir. Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Beton kaplamada gündüz- gece sıcaklık gradyanı etkisi (Pancar, 2012)

Beton plağın ağırlığı, taşıt yükleri, beton plak ile temel arasında oluşan sürtünme kuvveti gibi nedenlerden ötürü sıcaklık farklarından dolayı oluşan çekme

gerilmelerinin olduğu kısmın tam karşısında da başka bir çekme gerilmesi oluşmaktadır. Böyle bir çekme gerilmesi beton plağın üst kısmında gece vakti, alt yüzeyinde ise gündüz vakti oluşmaktadır. Şekil 2.7’de gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Beton plak hareketini engelleyen, gündüz-gece sıcaklık gradyanının beton kaplama üzerine etkisi (Ongel ve Harvey, 2004)

Beton yol kaplama tasarımında, sıcaklık gradyanları önemli eğilme gerilmeleri oluşturmaktadır. Yol tasarımında göz ardı edilmemesi gerekmekte ve hesaba katılmaktadır. Sıcaklık gradyanları (2.14) eşitliğiyle hesaplanmaktadır.

$$\Delta_t = \frac{T_t - T_b}{h} \quad (2.14)$$

Burada;

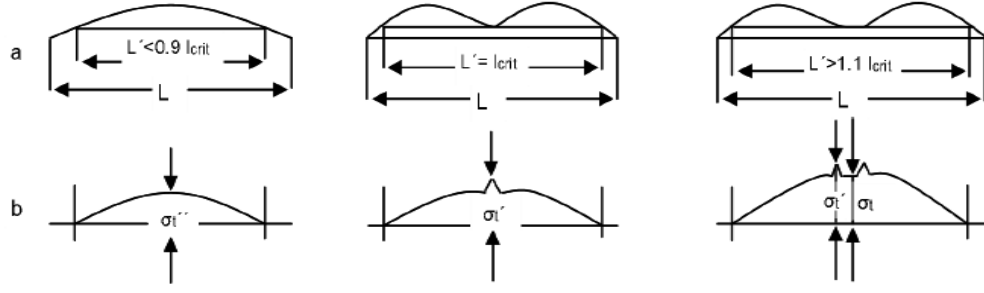
$\Delta_t$ =Sıcaklık gradyanı

$T_t$ =Beton yüzeyindeki sıcaklık (°C)

$T_b$ = Beton altındaki sıcaklık (°C)

$h$ = Beton plak kalınlığı (mm)

Eisenmann (1979) çalışmasında, plak kenar ortasındaki sıcaklık gerilmesini, plak ortasındaki eğilme gerilmesinin %85’i kadar almaktadır. Şekil 2.8’de, pozitif sıcaklık gradyanında, plak merkezi boyunca oluşan dikey deformasyonlar ve eğilme gerilmeleri görülmektedir.



Şekil 2.8. Pozitif sıcaklık gradyanında plak merkezi boyunca oluşan dikey deformasyonlar ve eğilme gerilmeleri (Eisenmann, 1979)

Plağın kenar orta noktasında eğilmede çekme gerilmesi ( $\sigma_t$ ) Alman Metodu ile (2.15) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma_t = \frac{h\Delta_t}{2} \alpha E \quad (2.15)$$

Burada;

$h$  = 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)

Plağın kenar orta noktasının altında bulunan eğilmede çekme gerilmesi ( $\sigma_t$ ) betonun birim ağırlığı  $24 \text{ kN}/\text{m}^3$  olarak kabul edilmesi durumunda (2.16) ve (2.17) eşitlikleri ile hesaplanmaktadır.

Boyuna kenar için;

$$\sigma_t = 1.8 \times 10^{-5} \frac{\acute{L}^2}{h} \quad (2.16)$$

Enine kenar için;

$$\sigma_t = 1.8 \times 10^{-5} \frac{\acute{W}^2}{h} \quad (2.17)$$

Burada;

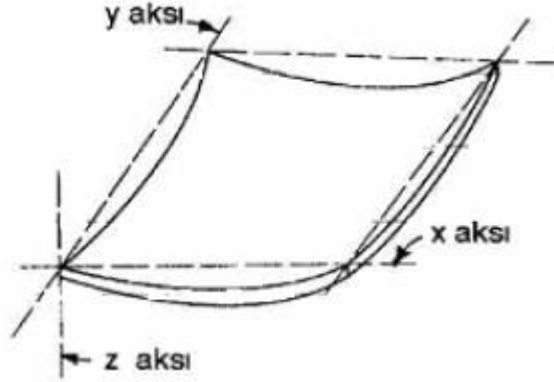
$\acute{L}$  = Boyuna doğrultuda plak mesafesi (mm)

$\acute{W}$  = Enine doğrultuda plak mesafesi (mm)

$h$  = Beton plak kalınlığı (mm)

### 2.3.3. Burulmadan dolayı oluşan gerilmeler

Bir beton plağın alt ve üst yüzeyleri farklı ısıların etkisinde kalması durumunda kıvrılmaya yani burulmaya zorlanır. Beton plak kendi ağırlığı ile bu kıvrılmaya karşı koymak ister. Bu karşı koymaya gösterdiği direnç iç gerilmelerin oluşmasına neden olmaktadır. Farklı ısıların etkisiyle meydana gelen bu burulma Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Farklı ısıların etkisiyle beton plakta oluşan burulma (Ulusoy, 2010)

Westergaard yaptığı çalışmalarda elde ettiği sonuçlara göre ısıdan ötürü şekil değişikliğine uğrayan beton plağın üst yüzeyinde oluşan çekme gerilmeleri (2.18) ve (2.19) eşitliğiyle hesaplamıştır.

$$\sigma_y = \sigma_o \left[ 1 - \sqrt{2} \sin\left(\frac{y}{l\sqrt{2}} + \frac{\pi}{4}\right) e^{-y/(1\sqrt{2})} \right] \quad (2.18)$$

$$\sigma_x = \sigma_o + \mu(\sigma_y - \sigma_o) \quad (2.19)$$

$$\sigma_o = \frac{E \varepsilon_t \Delta_t}{2(1-\mu)} \quad (2.20)$$

Burada;

$\sigma_o$ =Beton plakta  $\Delta t$  ısı farkı ile oluşan gerilme

$\varepsilon$ = Isıl genleşme katsayısı

E= Beton plağın elastisite modülü

$\Delta_t$ = Isı farkı

$\nu$ : Beton plağın poisson oranı

Bradbury yaptığı çalışmada Westergaard eşitliklerini kenar ve orta gerilme için (2.21), (2.22), (2.23) düzenleyerek hesaplamıştır.

Kenar gerilmeleri için;

$$\sigma_x = \frac{C_x E \varepsilon_t \Delta_t}{2} \quad (2.21)$$

Orta gerilmeleri için;

$$\sigma_x = \frac{E \varepsilon_t \Delta_t}{2} \left( \frac{C_x + \mu C_y}{1 - \mu^2} \right) \quad (2.22)$$

$$\sigma_y = \frac{E \varepsilon_t \Delta_t}{2} \left( \frac{C_x + \mu C_x}{1 - \mu^2} \right) \quad (2.23)$$

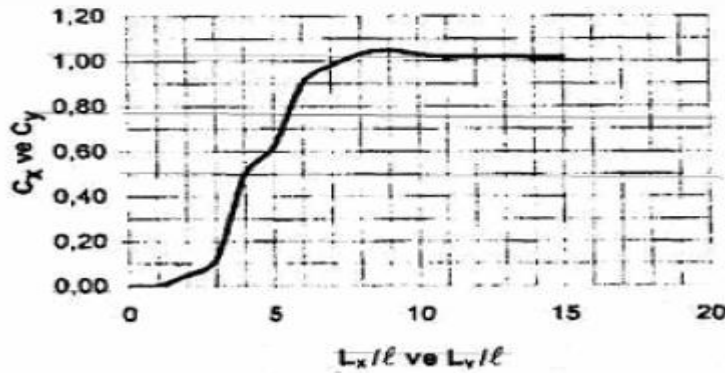
Burada;

$C_x$ = Beton plağın uzunluğu yönündeki katsayı

$C_y$ = Beton plağın genişliği yönündeki katsayı

$L_x$  ve  $L_y$ = Beton plağın serbest uzunluğu ve genişliği

Burulma gerilme katsayıları arasındaki ilişki Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Burulma gerilmeleri katsayıları (Ulusoy, 2010)

Beton yol kaplamalarında oluşan en kritik gerilmeler, beton plağın serbest köşesinde ısı ile ortaya çıkan yukarı kıvrık olduğu durumda gözlemlenir. Böyle bir durumda yük transferi önemli rol oynar. Şayet köşe yüklemesinde komşu plağa yük transferi %20'den fazla ise korunmuş köşe olarak isimlendirilir. Köşeler donatılı yapılırlar veya komşu köşeler arasında yalancı derz olması durumunda köşeler korunmuş olacaktır (Ulusoy, 2010).

Beton yol kaplamalarında oluşan gerilmelerin tespit edilmesinde başvurulan yöntemlerde zeminin, beton plağın her noktasında etki gösterdiği ve bu etkinin

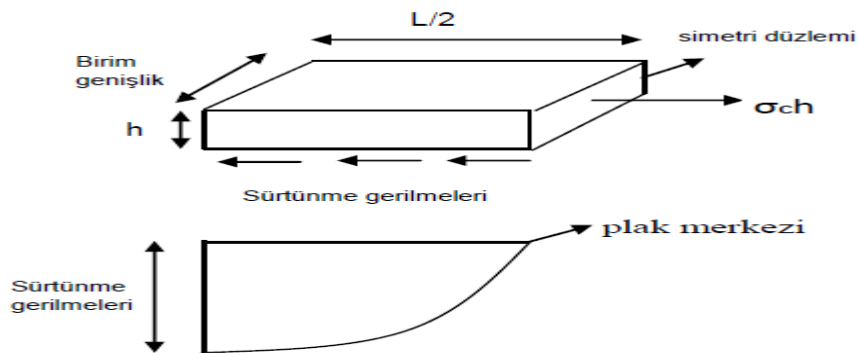
büyükliğünün çökme ile artış gösterdiği kabul edilmektedir. Beton plak burulduğunda kenarlarının yukarı veya aşağı kıvrılması durumunda zeminin desteği beton plakta devamlılık belirtmemektedir. Zeminde ya da temel tabakasında etkiyen yükler sonucunda oluşan kalıcı deformasyonlar, beton plak ile zemin arasındaki teması düşürmektedir.

Isı etkisiyle meydana gelen burulmalar ve zeminde oluşan kalıcı deformasyonlar sonucunda hacimsel değişimler beton kaplamada oluşan gerilmeleri artırmaktadır. Bu durumda beton plakta merkez ve köşe noktalarında çatlaklar oluşmaktadır. Zeminin rijitliği yani zemin yatak katsayısı da burulma gerilmelerine etki oluşturduğundan, zeminin rijitliği arttıkça yani fleksibilitesi azaldıkça beton plağın burulması sırasında zemin esneklik gösteremediğinden ötürü burulma gerilmesi de artmaktadır. Bu durumdan dolayı, kaya zeminler üzerine direkt plak yapılması ya da beton üzerine beton plak yapılması durumunda oluşan burulma gerilmelerinden ötürü çatlaklar artmaktadır.

Killi zeminler kolay şekilde esneklik gösterebildiklerinden ötürü oluşan burulma gerilmeleri azalmaktadır fakat bu durumda da zemin pompajı, don kabarması, hacim değiştirmesi, vb. durumlardan ötürü beton plakta ek gerilmeler oluşmaktadır. Bu nedenlerden dolayı beton yol kaplaması için en uygun temel tabaka kalınlığı seçilerek yatak katsayısı belirlenmelidir.

#### 2.3.4. Sürtünmeden dolayı oluşan gerilmeler

Beton yol kaplamalarında sürtünmeden dolayı gerilmeler oluşmaktadır. Beton plakla zemin arasında oluşan bu sürtünme gerilmeleri Şekil 2.11’de gösterilmektedir.



Şekil 2.11. Beton plakta oluşan sürtünme (Pancar, 2012)

Beton plakta oluşan sürtünme gerilmesi merkez noktasında sıfırken, merkez noktasından plak kenarına doğru artmaktadır. Sürtünmeden dolayı oluşan gerilmelerde beton kalınlığının etkisi yoktur. Beton plak sürtünme kuvvetini (2.24) eşitliğiyle hesaplamaktadır.

$$\sigma_c = \frac{\gamma_c L f_a}{2} \quad (2.24)$$

Burada;

$\sigma_c$  = Betonda oluşan gerilme

$\gamma_c$  = Betonun birim ağırlığı

L = Plak uzunluğu

$f_a$  = Betonla zemin arasındaki ortalama sürtünme katsayısı ( yaklaşık  $f_a=1,5$  olarak alınır.)

Sürtünmeden dolayı oluşan gerilmeler için boyuna ve enine donatılar ve boyuna derzlere yerleştirilen bağlantı demirleri dizayn edilir. Kayma demirlerinin dizaynı ise sürtünmeye bağlı fakat gerilmelere bağlı değildir. Beton kaplamalarda donatı, bağlantı elemanı veya kayma demiri olarak çelik kullanılmaktadır (Pancar, 2012).

#### **2.4. Beton Yol Tasarımında Betonun Yorulma Analizi**

Beton yol tasarımında kullanılan yorulma analizi, inşa edilen beton yolun hizmet ömrünün tespiti için kullanılır.

Donatısız inşa edilen bir beton yol kaplaması, trafik yüklerinin etkisi ve hava sıcaklığındaki değişimlerden ötürü, dalgalı yüklemelere maruz kalmaktadır. Sıcaklık gradyanındaki değişimin frekansı, trafik yüklemesi frekansına göre daha küçüktür. Bu nedenlerden ötürü beton kaplamadaki yükleme modellenirken, sıcaklık gradyanı eğilme gerilmesi ( $\sigma_t$ ), uzun dalga boyuyla, trafik yüklemesi eğilme gerilmesi ( $\sigma_v$ ) ise kısa dalga boyu ile ifade edilmektedir (Pancar, 2012).

Beton yol kaplama tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli unsur, betonun çatlamamasını sağlamaktır. Bu durumdan ötürü dayanım analizleri ve beton yorulma analizleri de yapılmalıdır. Bu analizler, kaplamanın kritik bölgelerinde donatılı ve donatısız beton yollar için yapılmaktadır.

Donatısız beton yol kaplamalarında;

- Boyuna kenarın ortasında (serbest kenar ve/veya boyuna derzde)
- Enine derzde tekerlek izinin ortasında

Donatılı beton yol kaplamasında;

- Enine çatlaklarda tekerlek izinin ortasında analizler yapılmaktadır.

Beton plağın her bir kritik bölgesinde, pozitif sıcaklık gradyanı ( $\Delta_{ti}$ ) için sıcaklık gradyan gerilmesi ( $\sigma_{ti}$ ), tekerlek yükü ( $P_i$ ) için trafik yük gerilmesi ( $\sigma_{vi}$ ) hesaplanmalıdır. Ardından, uygun görülen yük tekrar sayısı ( $N_i$ ) hesaplanarak, her bir bölgede, tekerlek yükü ( $P_i$ ) ve sıcaklık gradyan ( $\Delta_{ti}$ ) birleşimi için şayet varsa yük transferi de dikkate alınarak yorulma analizi yapılmaktadır. Bu analizler için tasarım kriteri (2.25) eşitliğiyle hesaplanmaktadır.

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1.0 \quad (2.25)$$

Burada;

$n_i$ = 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 ( $\sigma_{vi}$ ))

Yorulma analizi yolun tasarım ömrü boyunca yola etkiyen yüklere ve oluşan gerilmelere karşı yol üzerinde oluşan yorulma çatlakları ile karakterize edilebilir.

## 2.5. Beton Yol Tasarımının Sınıflandırılması

Beton yol kaplama tasarımında, genellikle üç farklı yapı tasarım türü kullanılır.

- Derzli donatısız beton yol kaplaması
- Derzli donatılı beton yol kaplaması
- Sürekli donatılı beton yol kaplaması

Bu tasarım türleri yapılacak olan projeler için en uygunu seçilerek uzun ömürlü beton yollar sağlar. Bu üç çeşit üst yapı beton kaplamaları inşası, mevcut olan yolların kaplanması için uygundur.

### 2.5.1. Derzli donatısız beton yol kaplamaları

Derzli donatısız beton yol kaplaması, maliyet açısından verimli olmaları ve güvenilirliklerinden ötürü beton üstyapılarında oldukça tercih edilir.

Derzli donatısız beton yol kaplaması, enine ve boyuna derz bulundurur. Derzlerde kayma ve bağlantı demirleri kullanılabilir. Şekil 2.12’de kayma demirleri görülmektedir.



Şekil 2.12. Kayma demir uygulaması gösterimi (Pancar, 2012)

Derzli donatısız beton yol kaplamasında kullanılan kayma demirleri, enine derzler boyunca etkiyen yükü plağa aktarmak için kullanılmaktadır. Etkiyen yük iki plak tarafından taşındığı durumda, tek bir plağın taşımasına göre derzlerde gerilme ve çökmeler azalmaktadır.

Derzli donatısız beton yol kaplamasında kullanılan bağlantı demirleri, plakları birbirine bağlamak için boyuna derz boyunca yerleştirilmektedir. Böylece, derz sıkı bir şekilde bağlanır ve derz boyunca yük aktarımı gerçekleşmiş olur. Beton bir yolda bağlantı demirleri Şekil 2.13’de gösterilmiştir.



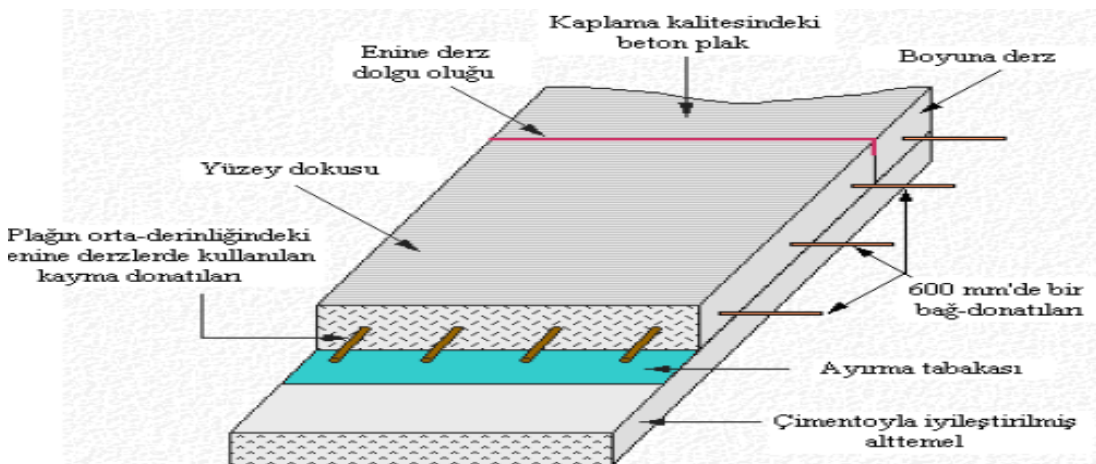
Şekil 2.13. Beton yolda bağlantı demirleri (Pancar, 2012)

Derzli donatısız beton yol kaplamalarında, ano ortası çatlamayı en aza indirmek ve derz açıklıklarını daha küçük tutmak için derz aralığı küçük tutulur. Aynı durum için boyuna derzlerde kullanılabilir. Blokların kalınlığı 125- 350 mm yapılır ve donatı çeliği içermezler. Temel tabakası kalınlıkları 100-200 mm olabilir. Derzli yapılan bu yol kaplamaları, inşaatı kolaylaştırmak, çatlamalara yol açabilecek gerilmeleri azaltmak ve zeminin sürekliliği için planlanır.

Malzeme kenetlenmesi de, derzlerde bağlantı yük aktarımı için oldukça yararlıdır. Yük aktarımını sağlamanın en önemli nedenlerinden biri üzerlerinden tekerlekli araçlar geçtiğinde derzlerin kırılmasını önlemektir.

Derzli donatısız beton yol kaplaması, yoğun trafik hacmi bulunan beton yollarda, ve nemli bölgelerde, yük transferini en ideal şekilde geliştirmek için beton demirleri veya stabilize temel tabakasını da kullanır. Stabilize temeller, yüksek trafik hacminin bulunduğu özellikle yumuşak ve ince taneli taban zeminleri için tavsiye edilen temel tipidir. Yüksek trafik hacminin bulunduğu beton yol kaplamalarında, kaplamaların altına destekliğin artması, neme karşı daha duyarlı olunması ve kaplama işlerinin daha düzgün ve sağlam yapılması için sıklıkla stabilize temeller yerleştirilir.

Derzli donatısız beton yol kaplamalarında ya da derzli donatılı beton yol kaplamalarında, plak ile alt temel arasındaki sürtünmenin azaltılması ve orta açıklıktaki çatlamaların engellenebilmesi için ayırma tabakası kullanılır. Bu durum Şekil 2.14'te gösterilmektedir.



Şekil 2.14. Derzli donatısız beton yol kaplamaları (BCA, 2002)

## 2.5.2. Derzli donatılı beton yol kaplamaları

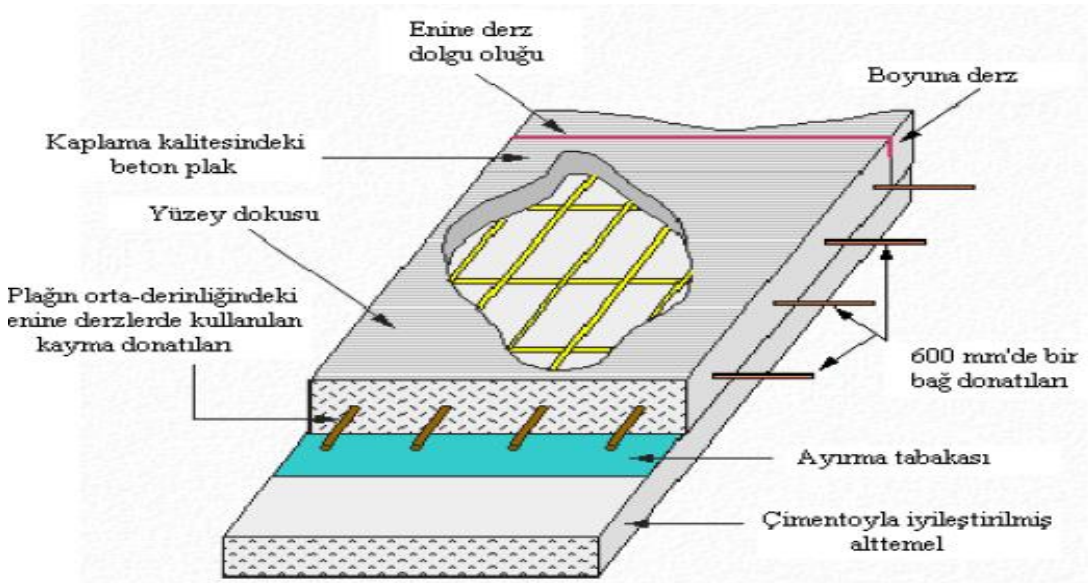
Derzli donatılı beton yol kaplaması, derz ve donatı bulundurur. Derz açıklıkları daha uzundur ve enine ve boyuna derzlerde kayma ve bağ çubukları kullanılır.

Bu kaplamaların, uzunlukları 8-30 m'lik anolardan oluşur. Blok kalınlıkları 150-350 mm olarak tasarlanmış ortalarında donatı ağı bulundurur. Temel tabakasının kalınlığı ise 100-200 mm dir. Bu derz aralıkları daha uzun tasarlandığında kurumadan dolayı büzölmeye ve ısıdan dolayı kıvrılmaya maruz bırakıldığında kaplamada çatlaklar oluşur.

Derzli donatılı beton yol kaplamalarında, donatı çeliği kullanılmasının amacı ano ortası çatlaklarının oluşmasını engellemektir. Oluşan bu çatlakları sıkıca tutarak, yük aktarımının sağlanması donatı tarafından yapılır. Burada kullanılan donatı, beton bloğun esneklik kapasitesini artırarak fayda sağlar. Daha uzun derz aralığı kullanılması daha büyük derz açıklıklarına sebep olur. Bu nedenle derzler arası yük transferini sağlamak için donatı çubukları kullanılır.

Derzli donatılı beton yol kaplamaları, uygun bölgelerdeki şehirlerarası yollarda yoğun olarak kullanılmaktadır.

Derzli donatılı beton yol kaplamaları, derzli donatısız beton yol kaplamaları ile benzer özellikler gösterebilir. Bu durum Şekil 2.15'te gösterilmektedir.



Şekil 2.15. Derzli donatılı beton yol kaplamaları (BCA, 2002)

### 2.5.3. Sürekli donatılı beton yol kaplamaları

Sürekli donatılı beton yol kaplamaları, enine derzler içermez fakat önemli miktarda boyuna donatı içerir. Sıklıkla enine donatı da kullanılır. Yüksek oranda donatı kullanılması (kabul edilebilir bir açıklıkta) enine çatlak oluşumu ve çatlak genişliğinin düşük olmasına fayda sağlar.

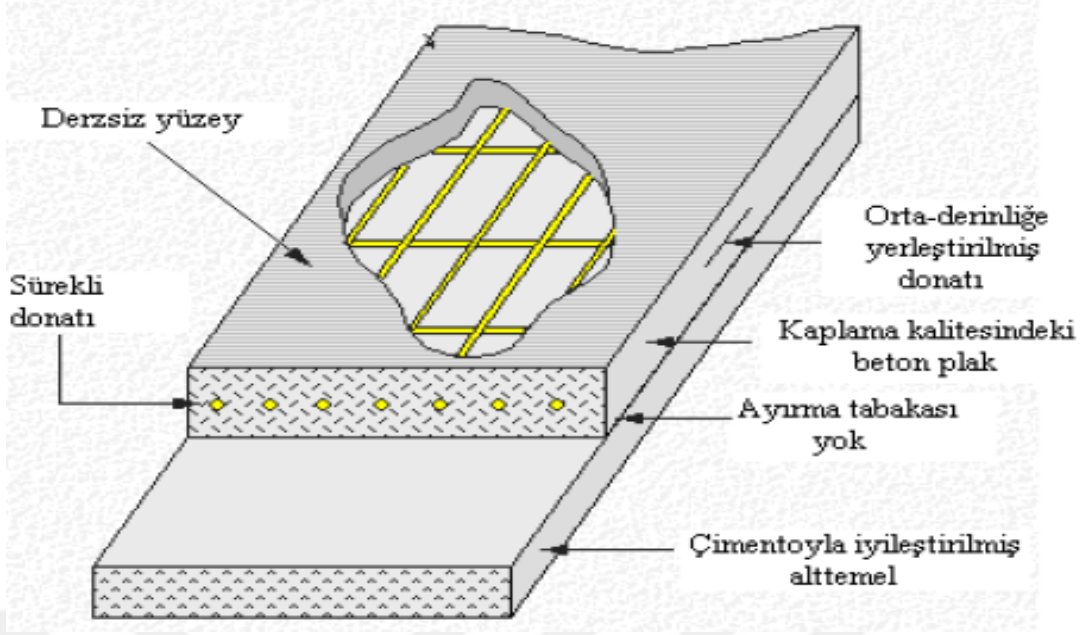
Donatı plak boyunca sürekli olarak bulunur. Derzler her gün yapılan işin bitiminde yerleştirilir. Plak kalınlıkları 150-250 mm dir. Sürekli donatılı beton yol kaplamaları, derzli donatılı beton yol kaplamalarından oldukça fazla donatı bulundurur. Bu oran genellikle kesit alanının %5-%7'si kadardır.

Derz aralıklarının uzun olmasından ötürü, bu tür kaplamalarda kaplama ömrünün birkaç yılında 0.6-2.4 m lik aralıklarla enine çatlaklar oluşur. Bu çatlaklar plak içindeki donatı çeliği sağlam olduğu sürece sıkıca kapalı kalırlar. Şayet donatı yüksek çekme gerilmelerine karşı koyamazsa, enine çatlaklar açılarak bozulabilir. Uzun şekilde oluşan çatlaklarla birleşen bozulmuş çatlak bölgeleri, ciddi kaplama bozulması oluştuğunun sinyalini vererek, yüzeysel oyulmalara (zımbalama etkisi) yol açabilir.

Beton yol kaplamalarında, plak desteğini artırmak ve tekerlek yükleri altında oluşan ano gerilmelerini azaltmak için bu kaplama ile birlikte genel olarak stabilize temel kullanılır. Bu kaplama türünün yaygın olarak kullanılmasına karşılık beton kaplamaya kıyasla oranı olabildiğince düşüktür.

Üstyapı sonundaki oynamalar, alt-temel ile sağlanan desteklik ile azaltılır ve uygun görülen çatlama modeli için koruma sağlar. Plaktaki süreksizliklerin mümkün olan her yerde önüne geçilmesi gerekmektedir. Aksi durumda plakta kabarıp dökülme riski ile birlikte birbirine yakın aralıklı çatlamalara olanak sağlar. Bu nedenlerden ötürü rögarların ve suyollarının, bu tipteki beton yolların üstyapı plaklarının dışında bulundurulması daha uygun olmaktadır (Ulusoy, 2010).

Beton temel ile alt-temel arasında daha yüksek bir sürtünme elde edilebilmesi için derzli donatısız ve derzli donatılı beton yol kaplamalarında görülen ayırma tabakası, sürekli donatılı beton yol kaplamalarında çıkarılmıştır. Bu durum Şekil 2.16'da gösterilmektedir.



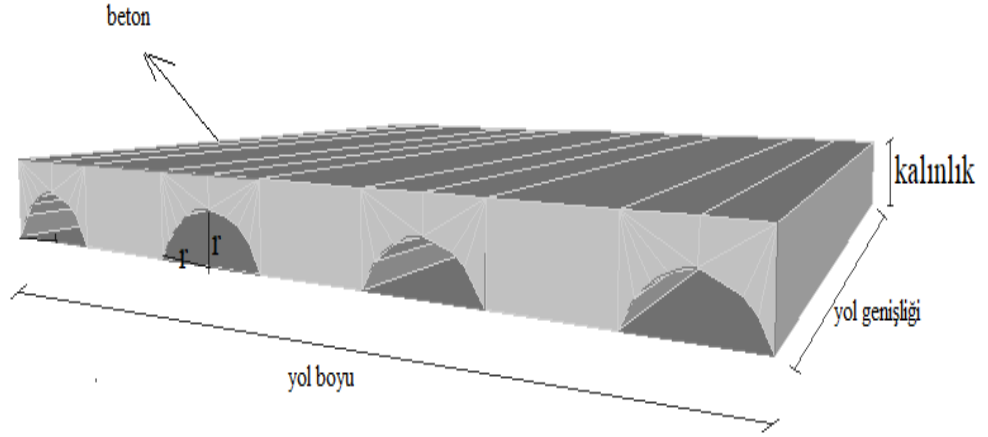
Şekil 2.16. Sürekli donatılı beton yol kaplamaları (BCA, 2002)

## 2.6. Beton Kemer Yapısı

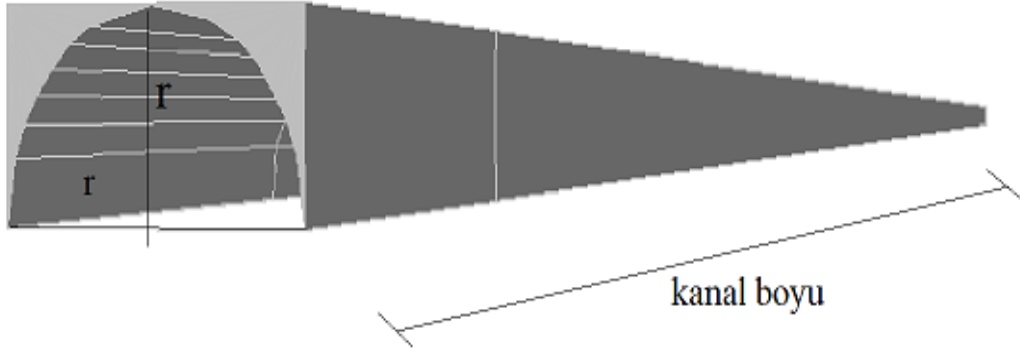
Kemer yapısı, üzerine etkiyen yükleri aşağıya aktarmakta emniyetli olduğu ve yapı hizmet ömrü süresince olumlu sonuçlar verdiği için açıklıkları geçmede önemlidir. Kısa veya uzun açıklıklar için faydalanılan yapı şekillerinden birisidir. Kısa açıklıklar için ahşap, taş, çelik ya da betonarme kirişler kullanılırken geniş açıklıklar için ise çelik veya betonarme kirişler tercih edilmektedir.

Kemer yapısı, açıklıklarda çekme gerilmesinin oluşmaması, basınç gerilmelerinin meydana gelmesi açısından da önemlidir. Bu sebeple kemer yapılarında bu özellikleri sağlayacak yapı malzemeleri tercih edilir. Çekmeye karşı mukavemeti olmayan yapı malzemelerinin tercih edilmesiyle ilk başta taşıyıcı sistemler genel olarak kemer yapısında inşa edilmiştir. Eğik kirişlerde yüksek eğilme momentleri oluşurken, kemerler yapısında küçük eğilme momentleri oluşur. Küçük eğilme momenti oluşumundan ötürü kemer yapısı birçok alanda uygulanmaktadır (Uçar ve Şakar, 2011).

Beton kemer yapısı, betonun oyularak içine belirli çapta kemer kesit açılıp içinden geçirilmesi ile oluşmaktadır. Şekil 2.17. ve Şekil 2.18'de gösterilmektedir.



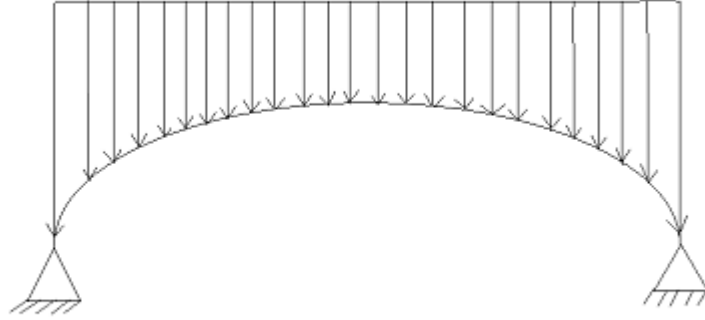
Şekil 2.17. Beton kemer yapısı



Şekil 2.18. Beton kemer yapısının yol plakası içinden geçiş gösterimi

Beton kemer yapısı, betonun oyularak içine belirli çapta kemer kesit açılıp içinden geçirilmesi ile tonoz jeolojisine benzemektedir. Üzerine etkileyen yükleri tonozun taşıma prensibine göre taşır. Üzerine etkileyen basınç yüklerinden ötürü basınç gerilmeleri oluşturur. Yol kaplamasında açılan kemer kesitlerde zati yük (sabit yük) ve hareketli yükler (taşıt yükleri) etkisiyle gerilmeler oluşmaktadır. Etkileyen düşey yük sadece dik bir basınç uygulamaz aynı zamanda kemer etkisinden ötürü yanlara doğru

da belirli bir basınç uygular. Şekil 2.19'da kemer yapısına etkiyen yük gösterilmektedir.



Şekil 2.19. Kemer yapıya etkiyen yük dağılımı

Yol kaplamasında oyuk açılacak betonun kalite koşulları, zemin türünün sağlamlığı, tanımlanan yolun uzunluğu, şekli, çapı hesaplamalarda önemli etki oluşturur.

Kemer yapısının sayısal hesapları sonlu elemanlar yöntemi, çeşitli bilgisayar analiz programları ile yapılabilir.

Yapılarda kemer kesit uygulaması yapının istenilen taşıma gücünü sağlaması durumunda, iskele ve kalıp maliyetlerinin azaltılması, kirişli ve çerçevesiz sistemlere karşın ekonomik bir avantaj sağlamaktadır. Tüm bunlara bir de görünüm, estetik ve ekonomik avantaj durumu eklenirse yapılarda kemer uygulama seçeneği ön plana çıkar.

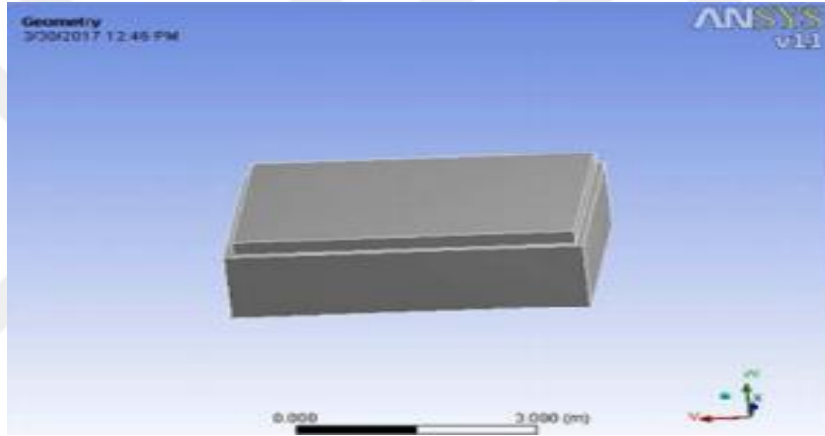
## 2.7. Literatürde ANSYS Bilgisayar Analiz Programı Kullanılarak Beton Numunede Oluşan Gerilme Hesabı

Pandey (2018) ANSYS bilgisayar analiz programı kullanarak yaptığı çalışmada, boyu ve eni 5m, olan beton numunesini farklı kalınlıklarda modelleyerek beton numunesinin farklı kalınlık ve farklı yüklere maruz kalması durumunda köşe, kenar ve sıcaklık gerilmelerindeki değişimi analiz etmiştir.

10, 15, 20, 25, 30 cm kalınlıklarda beş farklı beton numunesini farklı yüklemelerle yükleyerek oluşan gerilmelere bakıldığında kalınlık arttıkça oluşan gerilmelerin azaldığı görülmüştür. Köşede oluşan gerilmenin kenarda oluşan

gerilmeden daha fazla olduğu belirtilmiştir. Sıcaklık gerilmesinde ise, kalınlığın artmasıyla (kalınlığın artışı kadar olmasa da) sıcaklığın artması sıcaklık gerilmesini azaltmıştır.

Harle ve Pajgade (2018) ANSYS bilgisayar analiz programı kullanarak yaptığı çalışmada, boyu 4,5 m, eni 4 m, kalınlığı 1,4436 m olan beton kaplamasına kaplamanın konumuna uygun şekilde çelik yapı konularak deformasyon, maksimum gerilmeler, maksimum kayma gerilmesini analiz etmiştir. Analizler sonucunda deformasyonun beton kaplamanın en üst kısmında maksimum olduğu, maksimum gerilmenin betonun sağ köşesinde daha fazla olduğu, maksimum kayma gerilmesinin betonun üst kısmında olduğu, gerilmenin yoğunluğunun köşe noktalarında daha çok olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır.



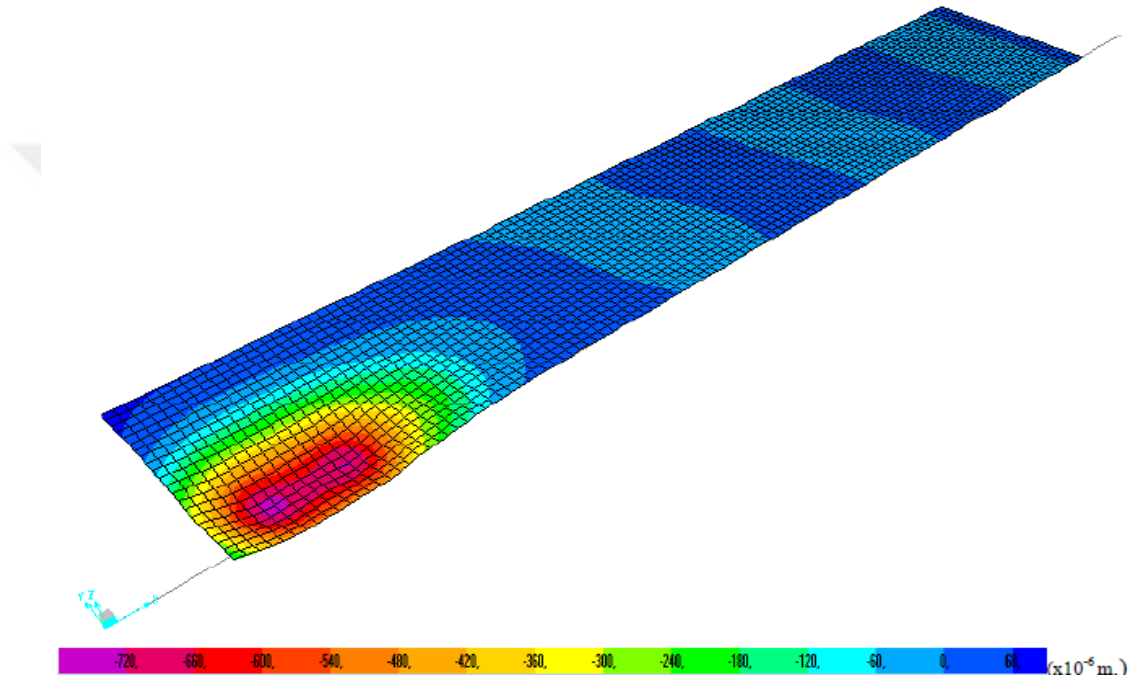
Şekil 2.20. ANSYS’de tanımlanan geometrik beton modeli ( Harle ve Pajgade, 2018)

Yapılan bu çalışmalar modellenen bir beton numunesinde gerilmelerin nerelerde yoğunlaştığı hakkında bilgi vermektedir. Çalışmamızda standart beton numunesine ilaveten numune içine farklı çaplarda kemer kesit açıldığında deformasyonun nasıl değiştiği, gerilmelerin büyüklüğü ve yoğunluğu belirtilmiştir.

## **2.8. Literatürde SAP2000 Bilgisayar Analiz Programı Kullanılarak Beton Yol Kaplamasında Oluşan Gerilme Hesabı**

Ulusoy (2010) SAP2000 bilgisayar analiz programı kullanılarak beton yollarda taşıt hızlarının ve beton özelliklerinin yer değiştirme ve gerilmelere etkisi üzerine yaptığı çalışmada, beton yolun uzunluğunu 60 m, genişliğini 11 m, plak kalınlığını 30 cm olarak almıştır. Zemin yatak katsayısı sabit olup  $1000 \text{ t/m}^3$  olarak sisteme yay olarak atanmıştır. Çalışmada C30, C40, C50 beton sınıfları kullanılmıştır. Taşıt tipi HS<sub>n</sub>-44

olarak tanımlanmıştır. Hızları 72 km/saat, 108 km/saat, 144 km/saat, 180 km/saat olarak tanımlanmış ve beton yoldaki deplasman ve gerilme değerlerine etkisi incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde tüm beton sınıflarında düşük hızlarda deplasman değerinin sabit kaldığı, hız belli bir değere ulaştığında deplasman değerinin azaldığı saptanmıştır. Betonun basınç dayanımı arttıkça yolda oluşan deplasmanlar azalmıştır. Belli bir araç sayısının gerilme üzerinde farklı sonuçlar verdiği görülmüştür. Plak kalınlığının artmasıyla oluşan deplasman değerlerinin azaldığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 2.21. Belirli bir anda beton plaktaki deplasman grafiği (Ulusoy, 2010)

Yapılan bu çalışma beton yolda hızların, plak kalınlığının, beton kalitesinin gerilmeye etkisini göstermiştir. Çalışmamızda bu verilere ek olarak tanımlanan beton yol kesitine farklı çaplarda kemer kesit açılmasının farklı zemin türlerinde, farklı sayıda araç geçişi için gerilmeye nasıl etkilediği gösterilmiştir. Uzun vadede yol tasarımlarında kullanılabilirliği hakkında bilgi vermektedir.

### **3.MATERYAL VE YÖNTEM**

#### **3.1. Materyal**

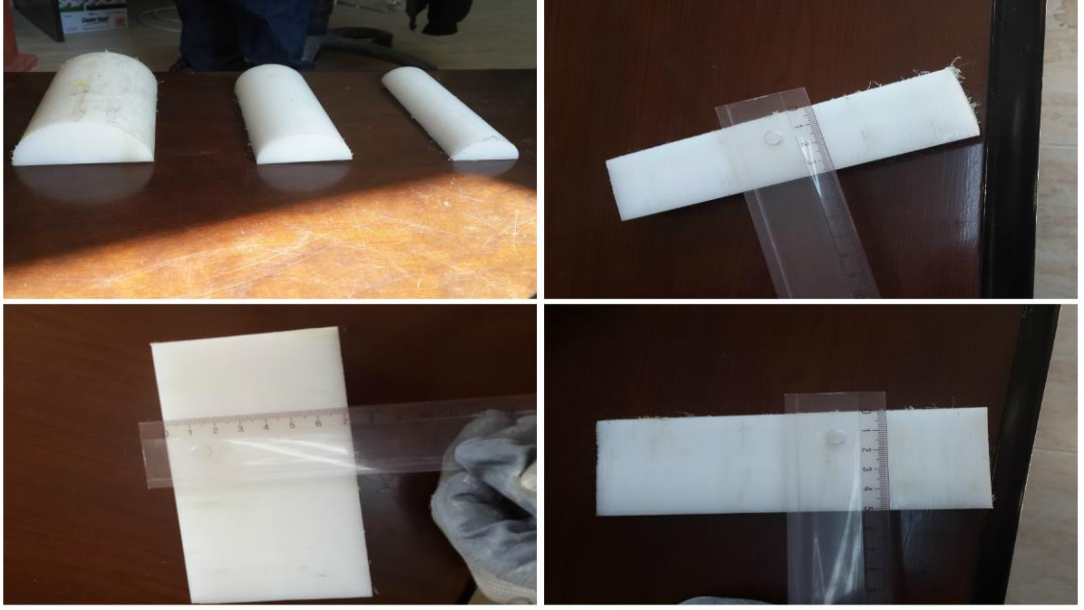
Bu çalışmanın materyalini, çalışmanın deney sürecinde gerekli tüm koşullar altında yapılan laboratuvar çalışmalarında kullanılan kalıplar, çalışmada numune olarak kullanılacak betonun yapımı için gereken yapı malzemeleri, numune yapıldıktan sonra kırımı için gerekli ekipmanlar oluşturmaktadır. Deney sürecinin ardından elde edilen verilerin karşılaştırılması amacıyla ANSYS bilgisayar analiz programında tanımlanan 15x15x15 cm'lik beton numuneler ve SAP2000 bilgisayar analiz programında tanımlanan beton bir plak oluşturmaktadır. Standart bir beton yol kesiti ve farklı çaplarda kemer kesitli beton plakta trafik yüklemesi altında oluşacak gerilmeler, farklı zemin türleri, plak üstünden geçen farklı araç sayıları için analiz edilip karşılaştırılmıştır.

#### **3.2. Yöntem**

Beton yol kaplamasında kullanılan betonun deney sürecinde yapımı için deney standart 15x15x15 cm'lik kalıplar içerisinde yapılmıştır. Standart kalıplara farklı çaplarda kemer kesit oluşturabilmek için çapların boyutunda yarım silindir şeklinde malzeme kullanılmıştır. Bu standart kalıplara yerleştirilmek üzere gerekli yapı malzemeleri kullanılarak beton numunesi hazırlanmıştır. Bu işlem her bir beton sınıfı için tekrarlanmıştır. Ardından beton numune kırımı ve analiz sonuçları kaydedilmiştir.

##### **3.2.1. Deney için kalıpların hazırlanması**

Deney için standart 15x15x15 cm'lik kalıplar içerisine kemer kesitli beton numunesi oluşturmak için teflon malzemesinden oluşan 36, 50, 72 mm çaplı yarım silindirler, kalıpların herhangi bir yan yüzeyine silikon yardımıyla yapıştırılarak yeni kalıplar oluşturulmuş ve kurumaya bırakılmıştır. Şekil 3.1. ve Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Teflon malzeme gösterimi



Şekil 3.2. Teflon malzemenin yapıştırılması

6 adet kemerli (2x36, 2x50, 2x72 mm) ve 2 adet şahit olmak üzere üç ayrı beton sınıfı (C20,C25,C30) için toplamda 24 adet kalıp hazırlanmıştır. Kalıplar kuruduktan sonra yağlanarak beton dökümüne hazır hale getirilmiştir.

### 3.2.2. Deney için numune oluşturulması

Numune oluşturulması aşamasında, oluşturulan kalıplara dökülmek üzere ek olarak sunulacak beton reçeteleri göz önünde bulundurularak üç ayrı beton karışımı hazırlanmıştır. Bu karışımların ayrı ayrı slump değerleri ölçülmüştür ve TS EN 206'ya uygun olduğu görülmüştür ( Çökme değeri, 190 mm). 24 adet numune hazırlanarak küre bırakılmıştır. Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te C20/25 beton sınıfı için malzeme oluşum aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 3.3. C20/25 Malzemelerinin Tartım Aşaması



Şekil 3.4. C20/25 Beton Numunesi

Şekil 3.3. ve Şekil 3.4’de gösterilen işlemler C25/30 ve C30/37 beton sınıfları için gramajları değiştirilerek yapılmıştır. Çizelge 3.1’de tüm malzemelerin kilogram ve gram bazında miktarları belirtilmiştir.

Çizelge 3.1. Beton malzeme miktarları

	<b>ÇİMENTO (kg)</b>	<b>SU (kg)</b>	<b>KUM (kg)</b>	<b>7/15 (kg)</b>	<b>15/25 (kg)</b>	<b>KATKI (gr)</b>
<b>C20/25</b>	7.80	5.55	30.58	13.88	12.76	93.6
<b>C25/30</b>	8.4	5.56	29.18	14.33	13.22	100.8
<b>C30/37</b>	9.60	5.57	27.54	14.63	13.54	115.2

DeneySEL sürecin ardından beton yol kaplamasında kullanılan betonda, belirli yüklerin etkimesiyle betonda oluşan deformasyonlar ve gerilmeler ANSYS bilgisayar analiz programı kullanılarak elde edilmiştir. Bu amaçla 15x15x15 cm’lik beton küp numuneler farklı beton sınıfları için ANSYS de modellenmiş, bu beton küp numuneleri her beton sınıfının eşdeğer küp basınç dayanımı ile yüklenerek numunede oluşan gerilmeler hesaplanmıştır. Aynı işlemler söz konusu modellerin içine 36, 50,

72 mm çaplarda kemer kesitler açılarak da yapılmıştır. Kemer kesitli beton numunelerinde oluşan gerilmelerde hesaplanmıştır.

ANSYS bilgisayar analiz programında modellenen beton numunesi üzerinde oluşan gerilmeler SAP2000 bilgisayar analiz programıyla da modellenmiş ve aynı beton sınıfları için aynı yük etkileri altında oluşan gerilmelerin sayısal değerlerinin benzerliği karşılaştırılmıştır. İki program arasında gerilme hesap benzerlik karşılaştırılmasının tutarlılık gösterdiği belirlenmiştir. Bu karşılaştırmada benzerlik oranı ve yol kaplamalarında daha çok tercih edilen ideal beton sınıfı dikkate alınarak tasarlanan beton yol için uygun beton sınıfı C30/37 belirlenmiş ve SAP2000 bilgisayar analiz programında trafik etkisi altında beton yol kaplamalarında oluşan gerilmeler farklı zemin türleri, farklı çaplarda beton yol kaplaması, farklı sayıda araç geçişi için tasarlanan beton yol için hesaplanmıştır.

ANSYS, mühendislik çalışmalarında karmaşık ve uzun zaman alan problemlerin modellenmesinde ve pratik şekilde çözümlenmesi için geliştirilmiş sonlu eleman yazılım programıdır (Kibar ve ztrk, 2012).

SAP2000 (Structural Analysis Program); basit iki boyutlu ereve analizinden, geniş ve karmaşık üç boyutlu statik ve dinamik çözüm ve boyutlanma analize kadar her türlü yapılar ve köprülerin Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak, gelişmiş analitik tekniklerle analiz motoru ve tasarım araçlarıyla desteklenen ara yüze sahip olup kullanma kolaylığı, modelleme hızı ve elde edilen verilerin grafik olarak görüntülenip basılabilmesini sağlayan bir yazılım serisidir (SAP2000, 2006).

ANSYS ve SAP2000 programlarında analiz için aşağıdaki adımlar uygulanmıştır.

- a) Sistemin modellenmesi
- b) Malzeme zelliklerinin girilmesi
- c) Basınç yüklerinin tanımlanması
- d) Kemer kesitli sistemin modellenmesi
- e) Kemer kesitli sistemin malzeme özelliklerinin girilmesi
- f.) Kemer kesitli sistemin basınç yüklerinin ve kemer kesit için çapların tanımlanması

### **3.2.3. ANSYS bilgisayar analiz programı için sistemin modellenmesi**

Beton numunesi 15x15x15 cm boyutlarında modellenmiştir.

### **3.2.4. ANSYS bilgisayar analiz programı için malzeme özelliklerinin girilmesi**

Programa malzeme sekmesinden beton seçilmiş, C20/25, C25/30, C30/37 beton sınıfları için ayrı ayrı yüklemeler yapıp analizler elde edildiğinden her beton sınıfı için özellikler girilmiştir.

Bu çalışmada C20/25, C25/30, C30/37 beton sınıfları analiz edilmiştir. Programa;

C20 için;  $E_C=28000$  MPa ,  $\nu=0.2$  ,  $\alpha_t= 10^{-5}$  °C

C25 için;  $E_C=30000$  MPa ,  $\nu=0.2$  ,  $\alpha_t= 10^{-5}$  °C

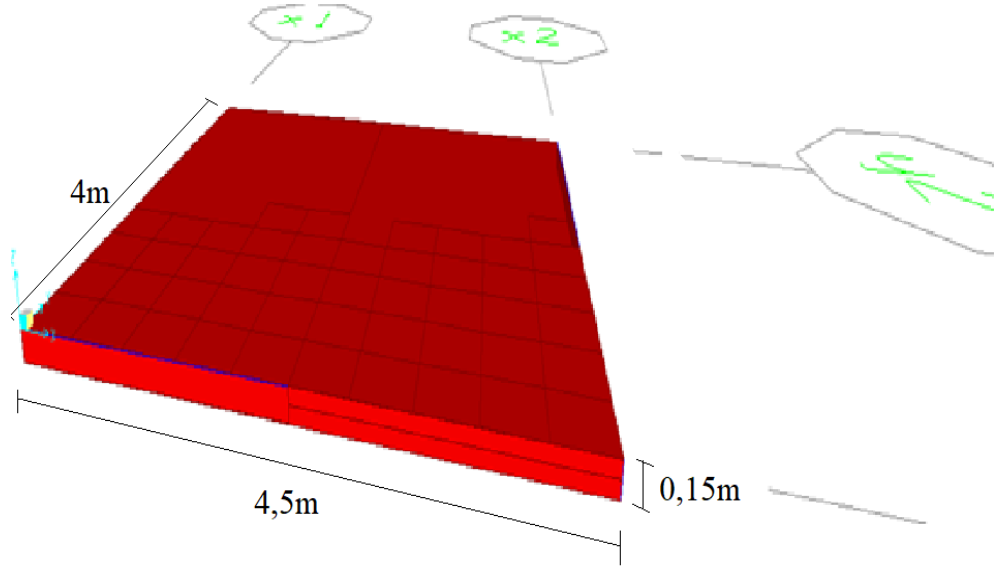
C30 için;  $E_C=32000$  MPa ,  $\nu=0.2$  ,  $\alpha_t= 10^{-5}$  °C değerleri girilmiştir (TS/500, 2000).

### **3.2.5. ANSYS bilgisayar analiz programı için basınç yüklerinin tanımlanması**

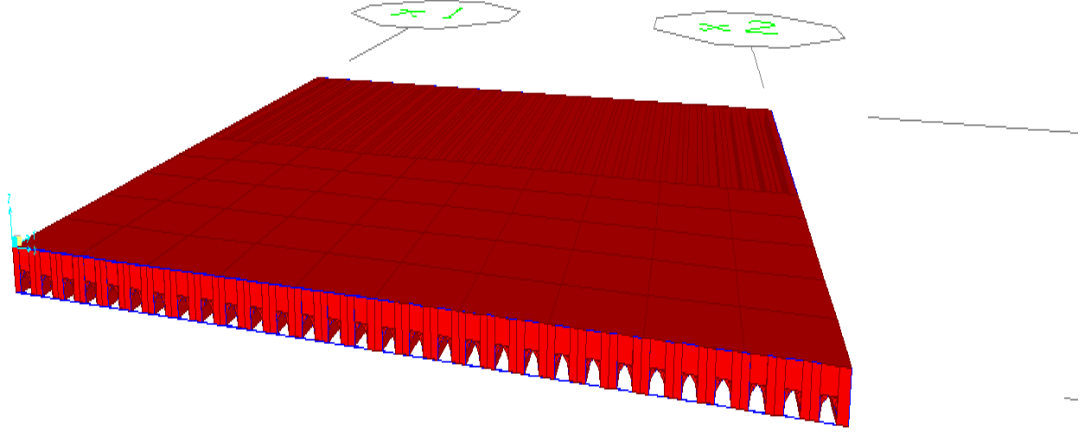
Beton numunesine tanımlanan her beton sınıfının eşdeğer küp basınç dayanım değeri yüklenmiştir. Yüklenen bu kuvvetler numunenin tam orta noktasına basınç kuvveti şeklinde uygulanmıştır. Her beton numunesi için 36 mm, 50 mm ve 72 mm çapında kanallar betonun alt kısmına açılıp kemer kesit oluşturulmuştur.

### **3.2.6. SAP2000 bilgisayar analiz programı için sistemin modellenmesi**

Beton yol kaplaması plak eleman olarak modellenmiştir. Yol uzunluğu 4.5 m, genişliği 4 m, plak kalınlığı ise 15 cm olarak alınmıştır. Beton plak 0.45 m aralıklarla sonlu elemanlara bölünmüştür. Zemin yatak katsayısı zayıf zeminler için  $5000$  kN/m<sup>3</sup>, orta sağlam zeminler için  $15000$  kN/m<sup>3</sup> kabul edilip sisteme yay olarak tanımlanmıştır (Bowles, 1996). Sistemin modellenmesi için 36 mm, 50 mm ve 72 mm çaplı kemer kesitler oluşturulmuştur. Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Sonlu elemanlara bölünmüş plak



Şekil 3.6. Sonlu elemanlara bölünmüş kemer kesitli plak

### 3.2.7. SAP2000 bilgisayar analiz programı için malzeme özelliklerinin tanımlanması

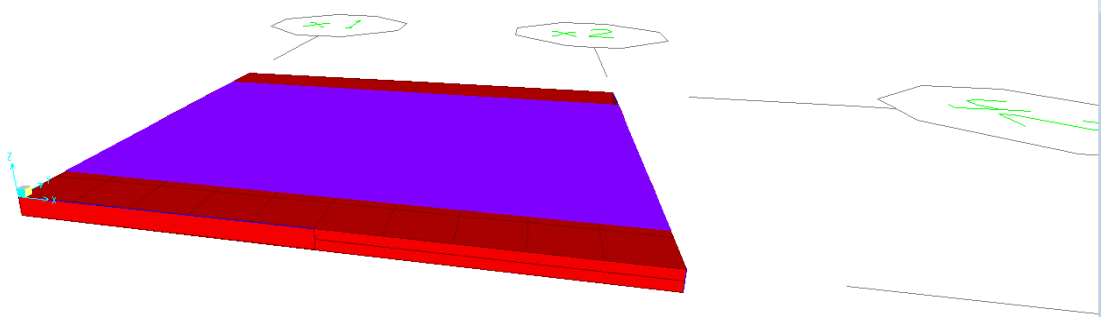
Programa malzeme sekmesinden beton seçilmiş C30 beton sınıfı analiz edilmiştir.

Programa;

C30 için;  $E_C=32000$  MPa ,  $\nu=0.2$  ,  $\alpha_t= 10^{-5}$  °C değerleri girilmiştir (TS/500, 2000).

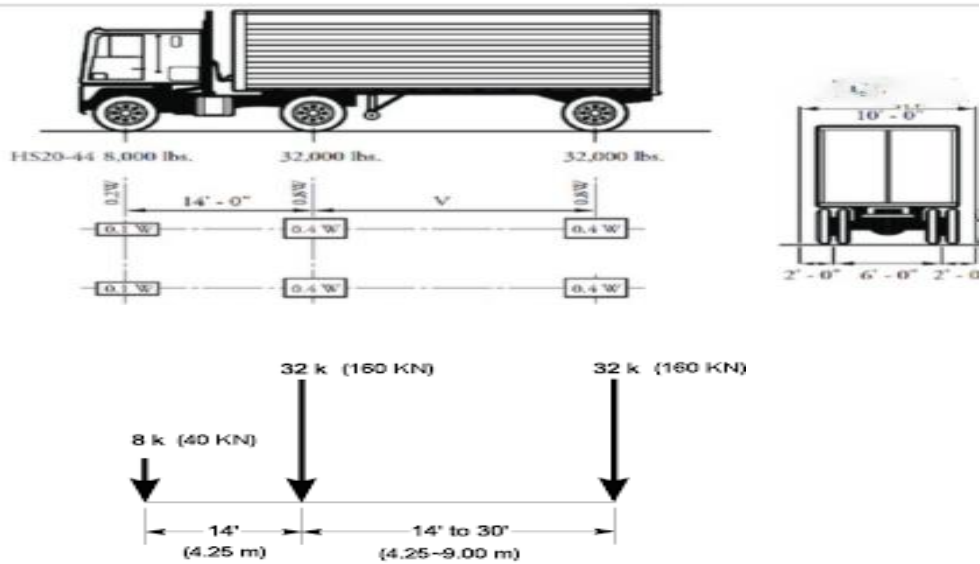
### 3.2.8. SAP2000 bilgisayar analiz programı için taşıt yüklerinin tanımlanması

Taşıt yüklemesi için önce taşıtın geçeceği çizgi belirlenmiştir. Çizgi belirlendikten sonra trafik şeridi oluşturulmuştur. Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7 Trafik şeridinin üç boyutlu görünüşü

Hareketli yükün analizi için taşıt sınıfları tanımlanmıştır. Taşıt sınıfı hareketli yükün analizinin yapılacağı bir veya birden fazla taşıttan oluşan kısımdır. Programda çok sayıda taşıt tanımı mevcuttur. Bu çalışma için Tip=HSn-44 ismi ile AASHTO Şartnamesinin standart HS kamyon yüklemesini temsil eden taşıt tipi tanımlanmıştır. AASHTO Standart HS20-44 kamyonuna ait dingil yüklemesi Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. AASHTO HS20-44 kamyonu dingil yüklemesi (Matthew B.Gries vd, 2013)

Taşıt tipi belirlendikten sonra trafik şeridi üzerinde hareket eden taşıtların doğrultu, başlangıç zamanı ve hızları tanımlanmıştır. Çalışmada taşıt geçişi için 70 km/sa hız tanımlanmıştır. Tanımlanan bu veriler çalışmada belirlenen beton sınıfı

kullanılarak oluşturulan beton yol kaplamalarında zayıf ve orta sağlam zeminler için sadece bir araç geçişi ve arka arkaya elli araç için uygulanmış ve gerilme analizi yapılmıştır.

Beton yol kaplamasında, tanımlanan yolun boyutları kullanılarak beton yolun hacmi hesaplanmıştır. Ardından beton yolda farklı çaplarda kemer kesitlerin oluşturduğu hacim boşlukları hesaplanmıştır.

#### 4.BULGULAR VE TARTIŞMA

##### 4.1. Deney Sonunda Beton Numune Kırımı ve Analiz Sonuçları

Deneyin ilk aşaması olan bu aşamada, her bir çaptan 2'şer adet oluşturulmuş numunelerin birer tanesi beton dayanımını almak için beton basınç deneyine tabi tutulmuştur. Analiz sonuçları Çizelge 4.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Beton basınç deneyi sonuçları

Beton Cinsi	Kanal Çapı (mm)	Ağırlık (kgF)	Yük (kN)	Gerilme (MPa)
C20/25	şahit	8.034	758.28	33.7
C20/25	36	7.752	714.35	31.75
C20/25	50	7.564	650.65	28.92
C20/25	72	7.288	513.42	22.82
C25/30	şahit	8.042	875.60	38.92
C25/30	36	7.818	789.73	35.10
C25/30	50	7.626	687.01	30.53
C25/30	72	7.270	554.30	24.64

Çizelge 4.1 (Devam)

<b>C30/37</b>	şahit	8.082	906.12	40.27
<b>C30/37</b>	36	7.828	927.36	41.22
<b>C30/37</b>	50	7.744	852.77	37.90
<b>C30/37</b>	72	7.322	665.38	29.57

Deney sonucunda;

1) Numunelerde kanal çapı arttıkça dayanımın düştüğü gözlenmiştir. Düşme oranları yüzde olarak Çizelge 4.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.2. C20/25 Beton İçin % lik Düşüş Tablosu

<b>BETON CİNSİ</b>	<b>BASINÇ DAYANIMI (MPa)</b>	<b>% DÜŞÜŞ</b>
C20/25-ŞAHİT	33.7	5.8
C20/25- 36 MM	31.75	
C20/25- ŞAHİT	33.7	14.2
C20/25- 50 MM	28.92	
C20/25- ŞAHİT	33.7	
C20/25- 72 MM	22.82	32.3

Çizelge 4.3. C25/30 Beton İçin % lik Düşüş Tablosu

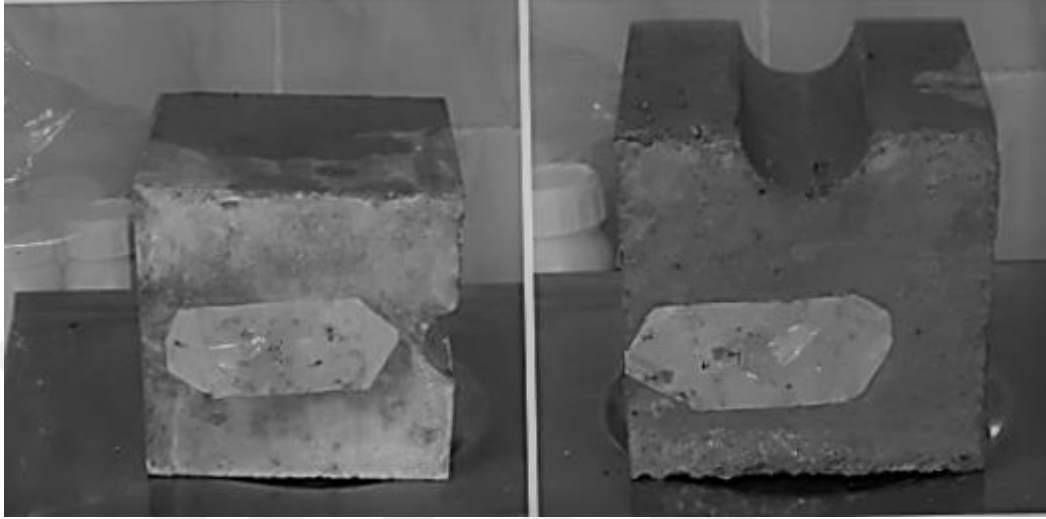
<b>BETON CİNSİ</b>	<b>BASINÇ DAYANIMI (MPa)</b>	<b>% DÜŞÜŞ</b>
C25/30-ŞAHİT	38.92	9.8
C25/30-36 MM	35.10	
C25/30-ŞAHİT	38.92	21.6
C25/30-50 MM	30.53	
C25/30-ŞAHİT	38.92	36.7
C25/30-72 MM	24.64	

Çizelge 4.4. C30/37 Beton İçin % lik Düşüş Tablosu

<b>BETON CİNSİ</b>	<b>BASINÇ DAYANIMI (MPa)</b>	<b>% DÜŞÜŞ</b>
C30/37-ŞAHİT	40.27	
C30/37-36 MM	41.22	-
C30/37-ŞAHİT	40.27	
C30/37-50 MM	37.90	5.9
C30/37-ŞAHİT	40.27	
C30/37-72 MM	29.57	26.7

2)Yüzelik değişimlerin karşılaştırılması sonucunda uygun beton sınıfı C30/37 olarak belirlenmiştir.

3) Beton sınıfı ve yüzelik dayanım değişimleri göz önünde bulundurularak uygun çap 36 mm veya 50 mm seçilmiştir.

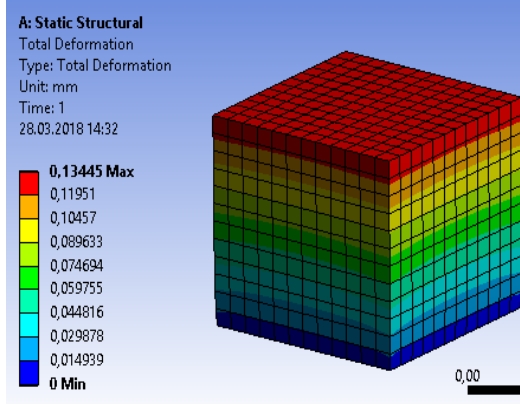


Şekil 4.1. Deney sonucunda uygun beton numunesi

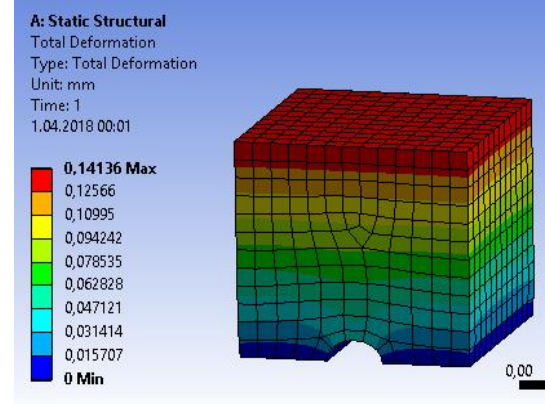
#### **4.2. ANSYS Bilgisayar Analiz Programında Beton Numunesinde Oluşan Deformasyon**

Deney sonucunda en uygun beton numunesinin çapı ve sınıfı belirlendikten sonra ANSYS bilgisayar analiz programında C20/25, C25/30, C30/37 beton sınıfları için her birine ayrı ayrı eşdeğer küp basınç dayanımları uygulanarak oluşan maksimum ve minimum deformasyonlara bakılmıştır.

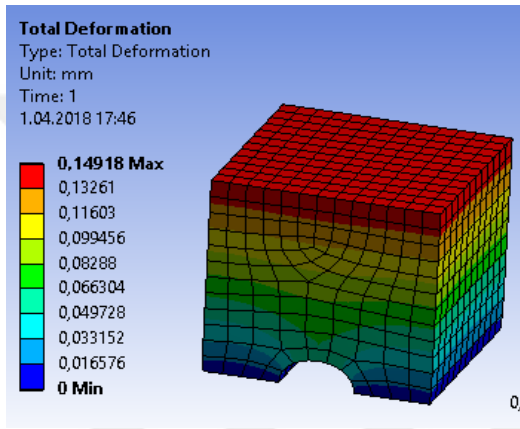
İlk olarak standart C20/25 beton sınıfı küp numunesine (15x15x15 cm), numunenin altına 36 mm, 50 mm ve 72 mm kemer çaplı kanallar açıldıktan sonra oluşan numunelere 25 MPa büyüklüğünde basınç uygulanması durumunda beton numuneleri üzerinde oluşan maksimum ve minimum deformasyon değerleri Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



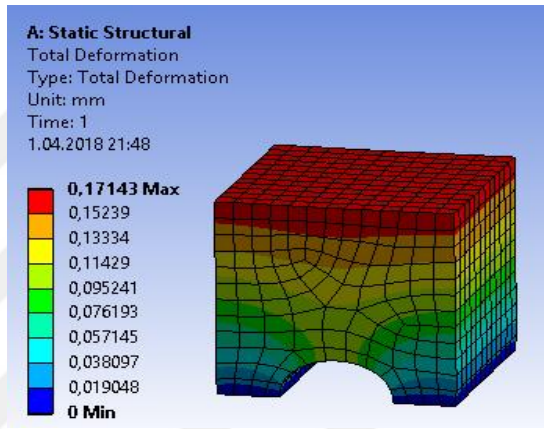
a. Standart numune



b. 36 mm çaplı numune



c. 50 mm çaplı numune

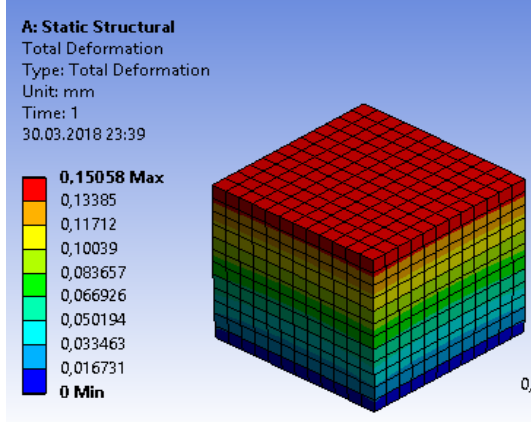


d. 72 mm çaplı numune

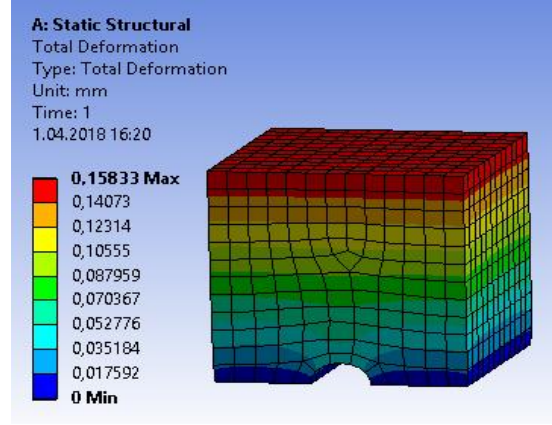
Şekil 4.2. C20/25 sınıfı beton numunelerde 25 MPa altında oluşan deformasyonlar

C20/25 beton sınıfı numunesine 25 MPa basınç yükü uygulandığında beton numunesinde açılan kemer kesitli kanallarda çapların boyutları arttırıldıkça oluşan deformasyonların arttığı gözlenmiştir.

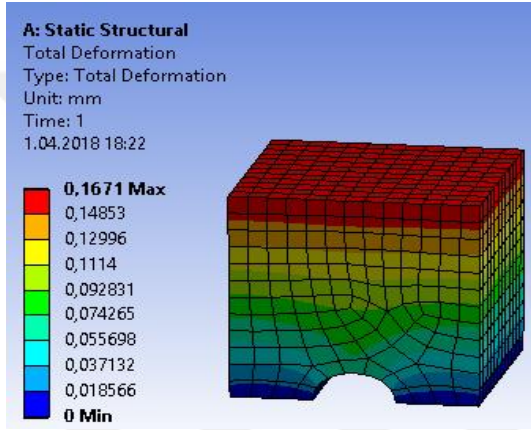
Standart C25/30 beton sınıfı küp numunesine (15x15x15 cm), numunenin altına 36 mm, 50 mm ve 72 mm kemer çaplı kanallar açıldıktan sonra oluşan numunelere 30 MPa büyüklüğünde basınç uygulanması durumunda beton numuneleri üzerinde oluşan maksimum ve minimum deformasyon değerleri Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



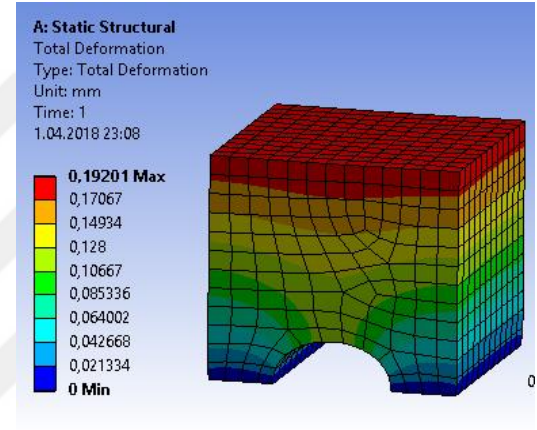
a. Standart numune



b. 36 mm çaplı numune



c. 50 mm çaplı numune

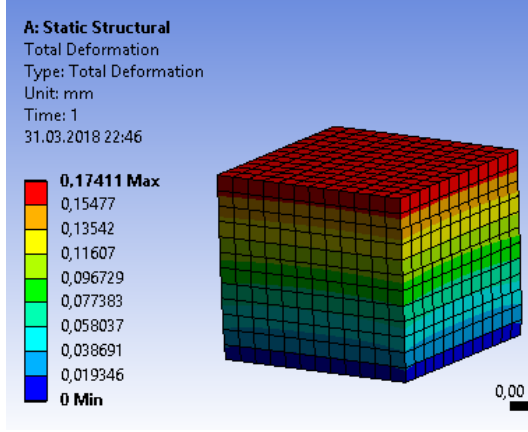


d. 72 mm çaplı numune

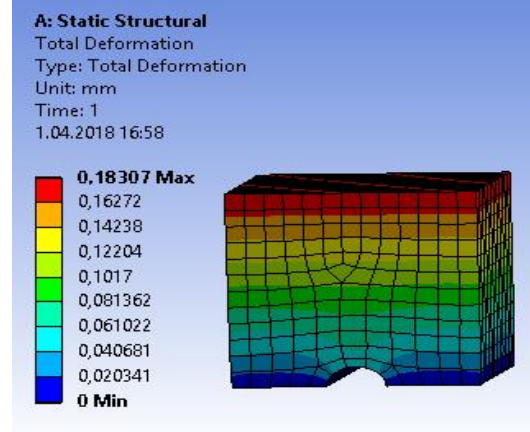
Şekil 4.3.C25/30 sınıfı beton numunelerde 30 MPa altında oluşan deformasyonlar

C25/30 beton sınıfı numunesine 30 MPa basınç yükü uygulandığında beton numunesinde açılan kemer kesitli kanallarda çapların boyutları arttırıldıkça oluşan deformasyonların arttığı gözlenmiştir.

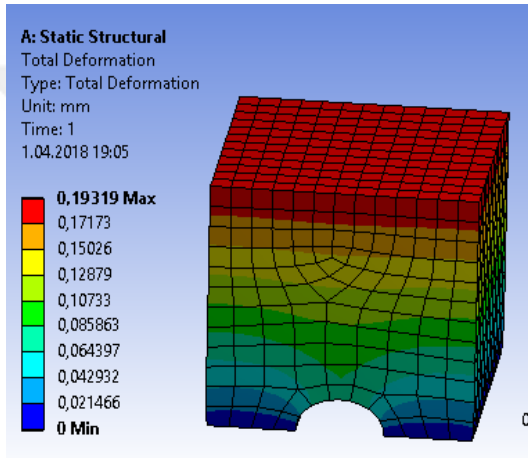
Standart C30/37 beton sınıfı küp numunesine (15x15x15 cm), numunenin altına 36 mm, 50 mm ve 72 mm kemer çaplı kanallar açıldıktan sonra oluşan numunelere 37 MPa büyüklüğünde basınç uygulanması durumunda beton numuneleri üzerinde oluşan maksimum ve minimum deformasyon değerleri Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



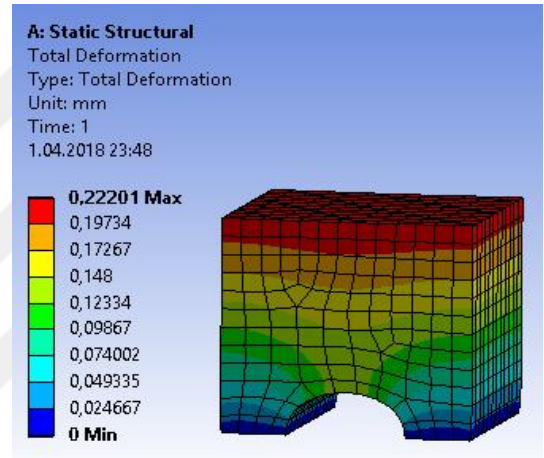
a. Standart numune



b. 36 mm çaplı numune



c. 50 mm çaplı numune



d. 72 mm çaplı numune

Şekil 4.4. C30/37 sınıfı beton numunelerde 37 MPa altında oluşan deformasyonlar

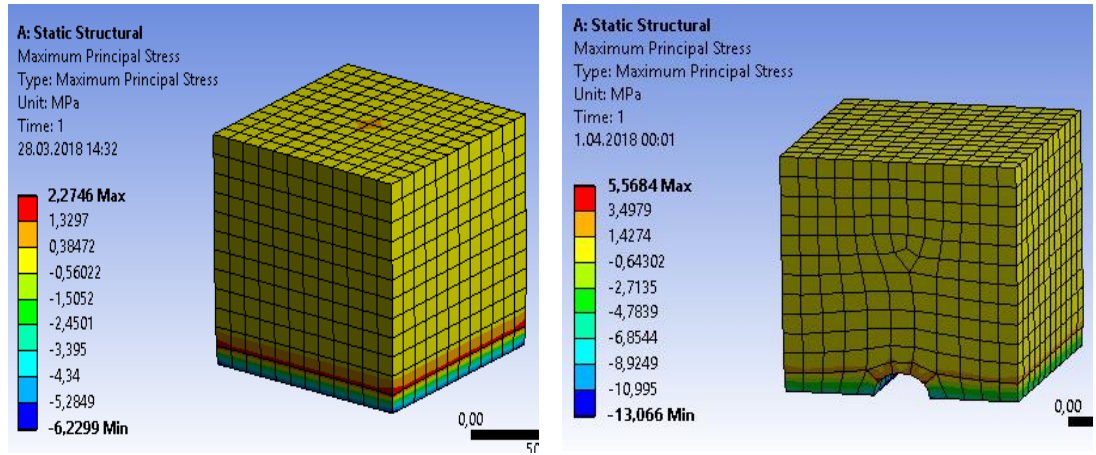
C30/37 beton sınıfı numunesine 37 MPa basınç yükü uygulandığında beton numunesinde açılan kemer kesitli kanallarda çapların boyutları arttırıldıkça oluşan deformasyonların arttığı gözlenmiştir.

### 4.3. ANSYS Bilgisayar Analiz Programında Beton Numunesinde Oluşan Gerilmeler

ANSYS bilgisayar analiz programında C20/25, C25/30, C30/37 beton sınıfları için her birine ayrı ayrı eşdeğer küp basınç dayanımları uygulanarak oluşan maksimum ve minimum gerilmelere bakılmıştır.

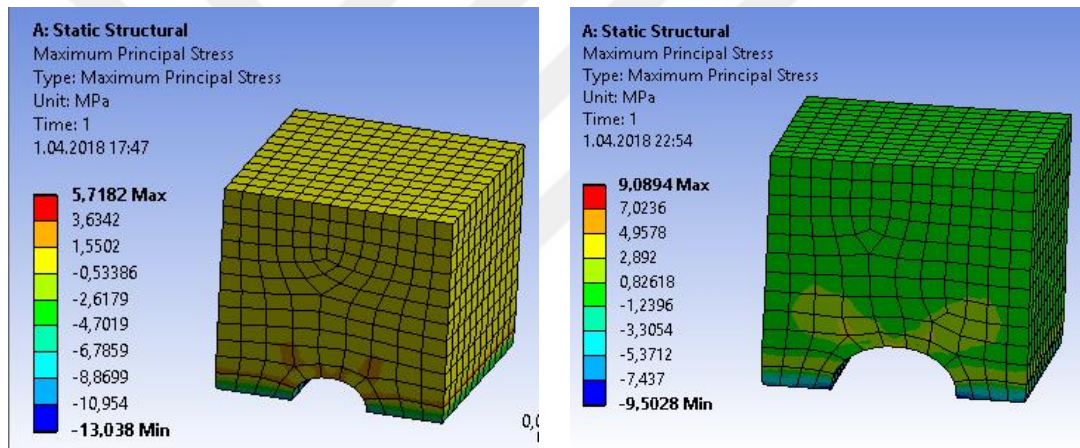
İlk olarak standart C20/25 beton sınıfı küp numunesine (15x15x15 cm), numunenin altına 36 mm, 50 mm ve 72 mm kemer çaplı kanallar açıldıktan sonra oluşan numunelere 25 MPa büyüklüğünde basınç uygulanması durumunda beton

numuneleri üzerinde oluşan maksimum ve minimum gerilme değerleri Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



a. Standart numune

b. 36 mm çaplı numune



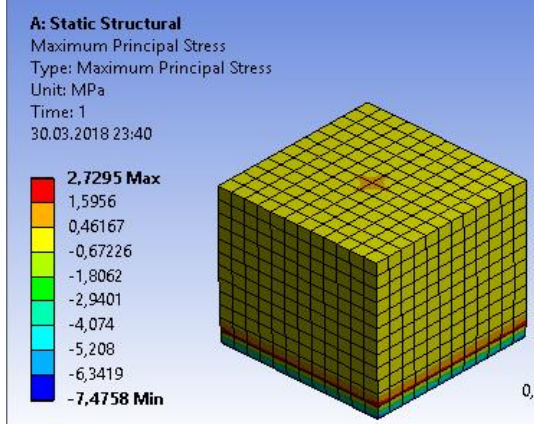
c. 50 mm çaplı numune

d. 72 mm çaplı numune

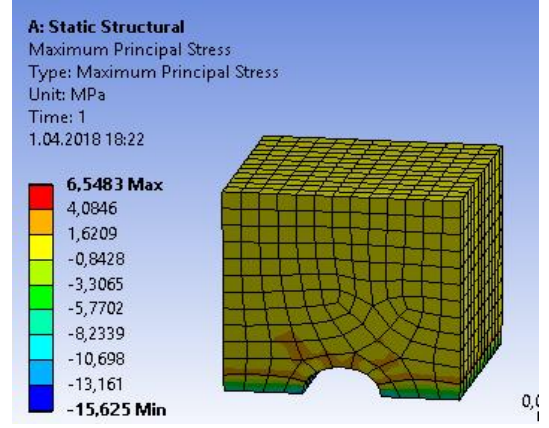
Şekil 4.5. C20/25 sınıfı beton numunelerde 25 MPa altında oluşan gerilmeler

C20/25 beton sınıfı numunelerine 25 MPa basınç yükü uygulandığında beton numunesinde açılan kemer kesitli kanallarda çapların boyutları arttırıldıkça oluşan gerilmelerin arttığı gözlenmiştir.

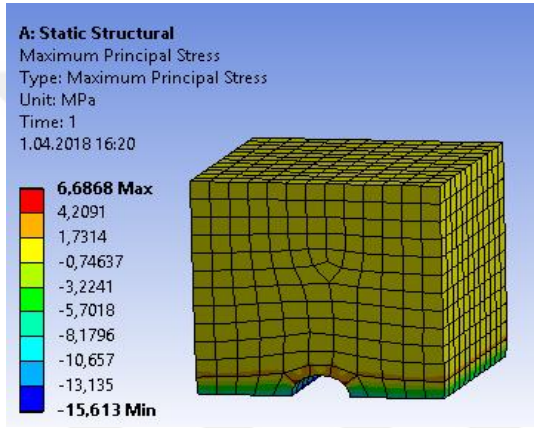
Standart C25/30 beton sınıfı küp numunesine (15x15x15 cm), numunenin altına 36 mm, 50 mm ve 72 mm kemer çaplı kanallar açıldıktan sonra oluşan numunelere 30 MPa büyüklüğünde basınç uygulanması durumunda beton numuneleri üzerinde oluşan maksimum ve minimum gerilme değerleri Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



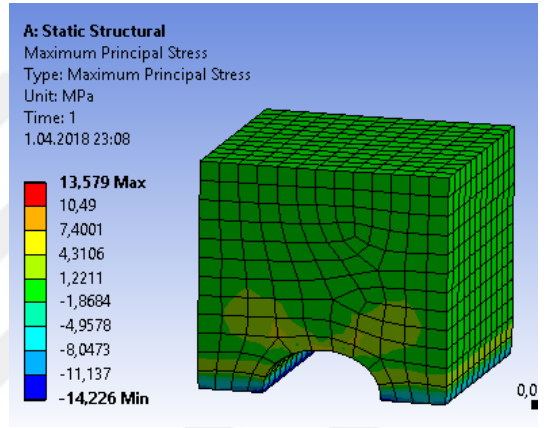
a. Standart numune



b. 36 mm çaplı numune



c. 50 mm çaplı numune

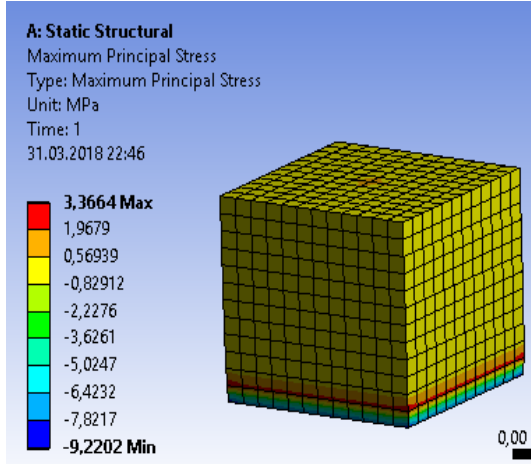


d. 72 mm çaplı numune

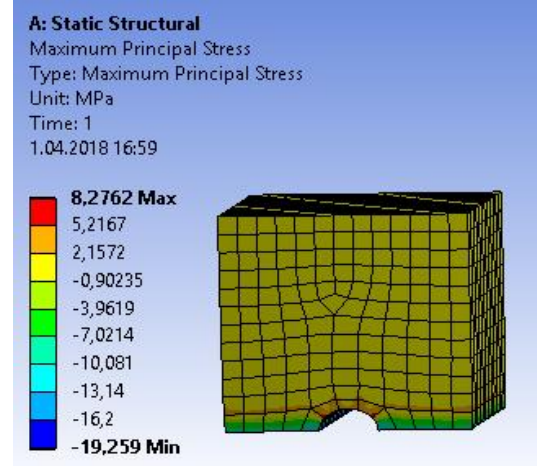
Şekil 4.6. C25/30 sınıfı beton numunelerde 30 MPa altında oluşan gerilmeler

C25/30 beton sınıfı numunelerine 30 MPa basınç yükü uygulandığında beton numunesinde açılan kemer kesitli kanallarda çapların boyutları arttırıldıkça oluşan gerilmelerin arttığı gözlenmiştir.

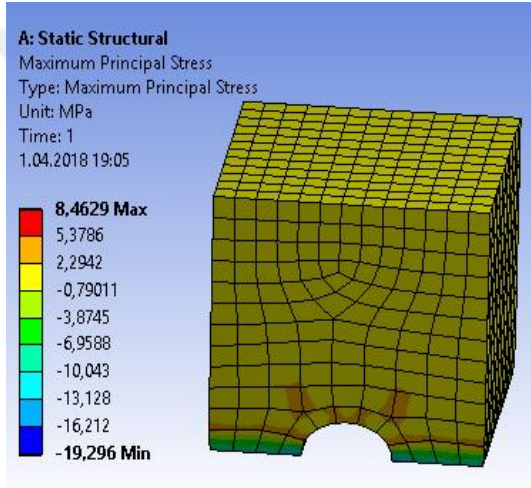
Standart C30/37 beton sınıfı küp numunesine (15x15x15 cm), numunenin altına 36 mm, 50 mm ve 72 mm kemer çaplı kanallar açıldıktan sonra oluşan numunelere 37 MPa büyüklüğünde basınç uygulanması durumunda beton numuneleri üzerinde oluşan maksimum ve minimum gerilme değerleri Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



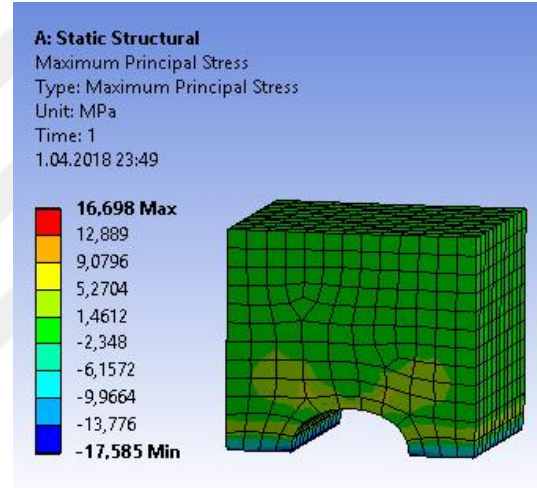
a. Standart numune



b. 36 mm çaplı numune



c. 50 mm çaplı numune



d. 72 mm çaplı numune

Şekil 4.7. C30/37 sınıfı beton numunelerde 37 MPa altında oluşan gerilmeler

C30/37 beton sınıfı numunesine 37 MPa basınç yükü uygulandığında beton numunesinde açılan kemer kesitli kanallarda çapların boyutları arttırıldıkça oluşan gerilmelerin arttığı gözlenmiştir.

ANSYS bilgisayar analiz programında beton numunelerine her beton sınıfının eşdeğer küp basınç dayanımı yüklenerek oluşan deformasyonlar ve gerilmeler hesaplanmıştır. Aynı işlemleri SAP2000 bilgisayar analiz programında 15x15x15 cm boyutlarında beton numunesi yapılarak her beton sınıfının eşdeğer küp basınç dayanımı aynı noktadan aynı büyüklükte etkiyerek sonuçlar hesaplanmış ve ANSYS bilgisayar analiz programında bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar %80-%99 benzerlik göstermiştir.

Bu benzerlik sonucunda trafik yüklemesi altında kemer kesitli beton yol kaplamalarında oluşan gerilmeleri hesaplamak için, geniş ve karmaşık statik ve dinamik çözüm sağlayan ve her türlü yapılar için Sonlu Elemanlar Yöntemini kullanan SAP2000 bilgisayar analiz programı kullanılmasına karar verilmiştir.

#### 4.4. SAP2000 Bilgisayar Analiz Programında Beton Numunesinde Oluşan Gerilmeler

Trafik yüklemesi altında kemer kesitli beton yol kaplamalarında oluşan gerilmeleri hesaplamak için C30/37 beton sınıfı kullanılarak yol uzunluğu 4.5 m, genişliği 4 m, plak kalınlığı ise 15 cm olan bir beton yol kesiti tanımlanmıştır. Zemin yatak katsayısı zayıf zeminler için 5000 kN/m<sup>3</sup>, orta sağlam zeminler için 15000 kN/m<sup>3</sup> kabul edilip sisteme yay olarak tanımlanmıştır.

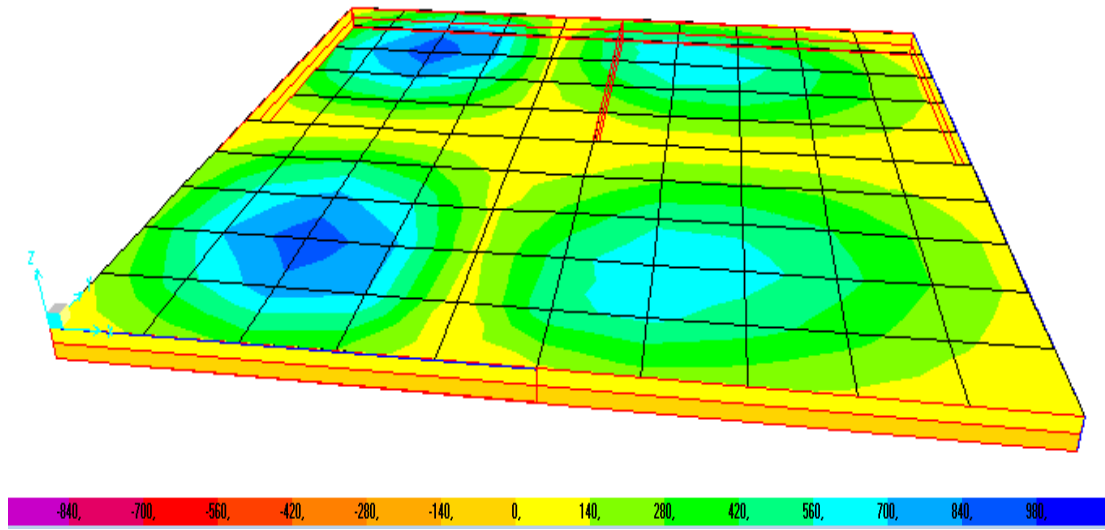
ANSYS ve SAP2000 bilgisayar analiz programlarında beton numuneleri üzerinde oluşan basınç gerilmeleri karşılaştırıldığında C30/37 beton sınıfı kullanılarak oluşturulan beton numunesindeki gerilme hesabında iki program arasında % 99 oranında benzerlik çıktığı ve yol kaplamalarında daha çok tercih edilen ideal beton sınıfının da C30/37 olduğu dikkate alınarak tasarlanan beton yol için uygun beton sınıfı C30/37 belirlenmiştir. Benzerlik değerleri Çizelge 4.5'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.5 ANSYS-SAP2000 programlarında bulunan gerilmelerin karşılaştırılması

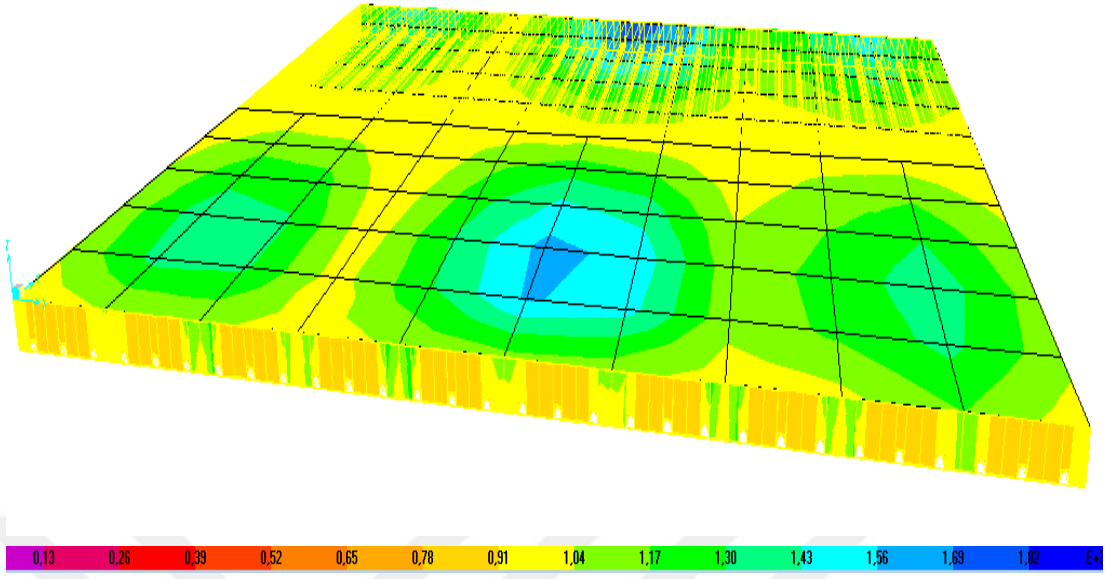
		ANSYS Maksimum Basınç Gerilmeleri (MPa)		SAP2000 Maksimum Basınç Gerilmeleri (MPa)	
		şahit	3,37	şahit	3,25
<b>C30</b>	<b>37 MPa</b>	36	8,28	36	8,26
		50	8,46	50	8,40
		72	16,7	72	16,2

Çalışmada kullanılan beton sınıfı için beton plak tanımlanarak şahit, 36 mm, 50 mm ve 72 mm çaplı kemer kesitler oluşturulmuştur. Bu beton plak üzerinden hızı 70 km/ sa olan bir araç geçişi ve arka arkaya elli araç geçişi yapıldığında zayıf ve orta sağlam zeminlerde C30/37 beton sınıfı kullanılarak oluşturulan beton plakta gerilme sonuçları elde edilmiştir.

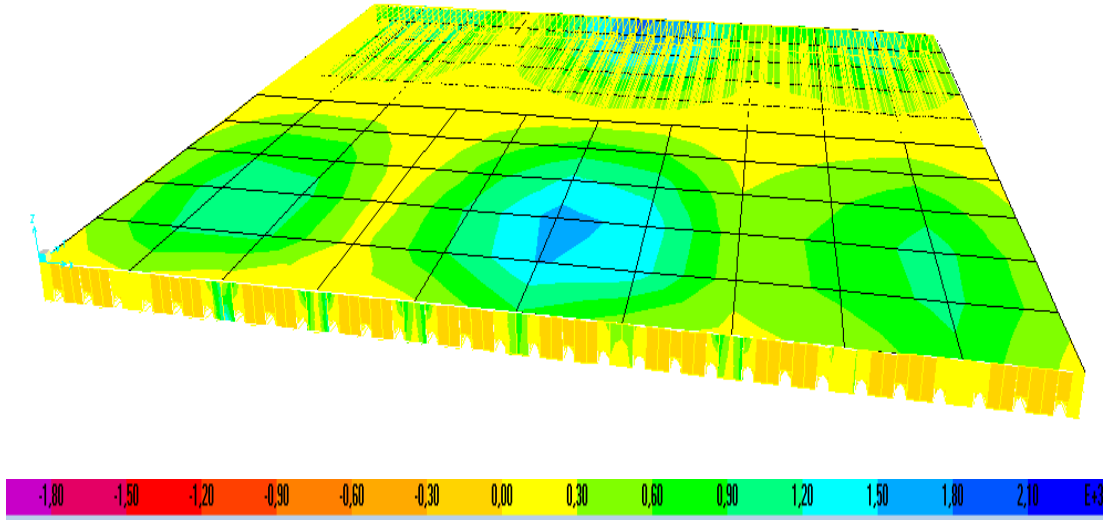
Beton yol kaplamasında C30/37 beton sınıfı malzeme olarak kullanılarak yol uzunluğu 4.5 m genişliği 4 m, plak kalınlığı ise 15 cm olan yol kesiti şahit, 36 mm, 50 mm, 72 mm çaplı kemer kesitler ile açılarak zemin yatak katsayısı zayıf zemin için  $5000 \text{ kN/m}^3$  sisteme yay olarak tanımlanmış ve yol kesitinden hızı 70 km/sa olan bir araç geçmesi durumunda oluşan basınç gerilmeleri Şekil 4.8. , Şekil 4.9. , Şekil 4.10. ve Şekil 4.11’de gösterilmektedir. Şekil 4.12’de gerilme grafiği, Şekil 4.13’te gerilmelerin açılan kemer kesitli çaplara bağlı olarak yüzdelerle artış grafiği gösterilmektedir.



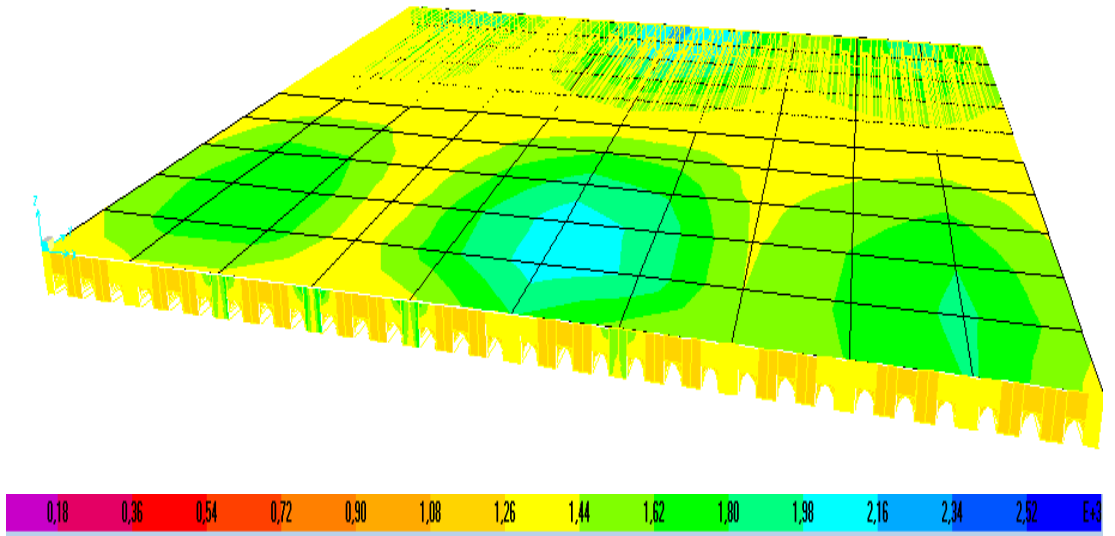
Şekil 4.8. C30/37 beton sınıfında şahit için oluşan gerilme: 0,98 MPa



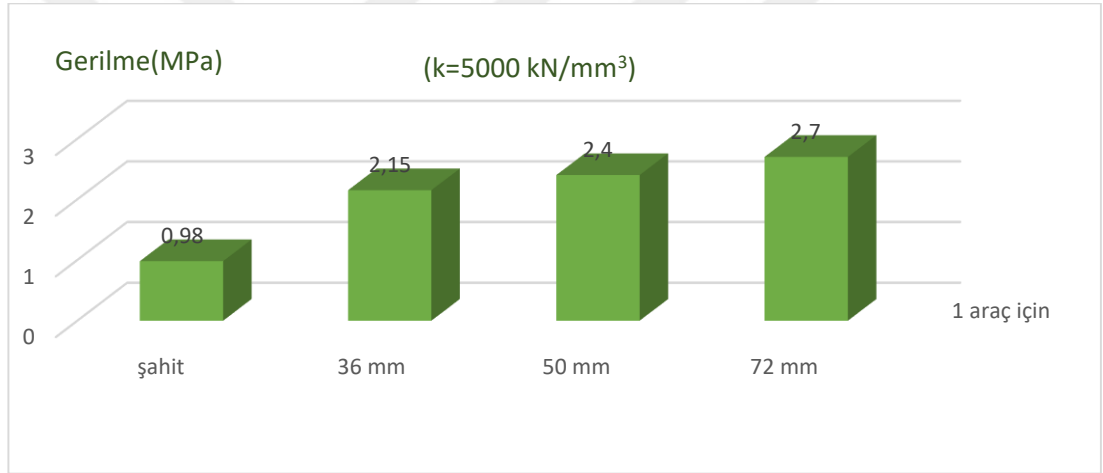
Şekil 4.9. C30/37 beton sınıfında 36 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 2,15 MPa



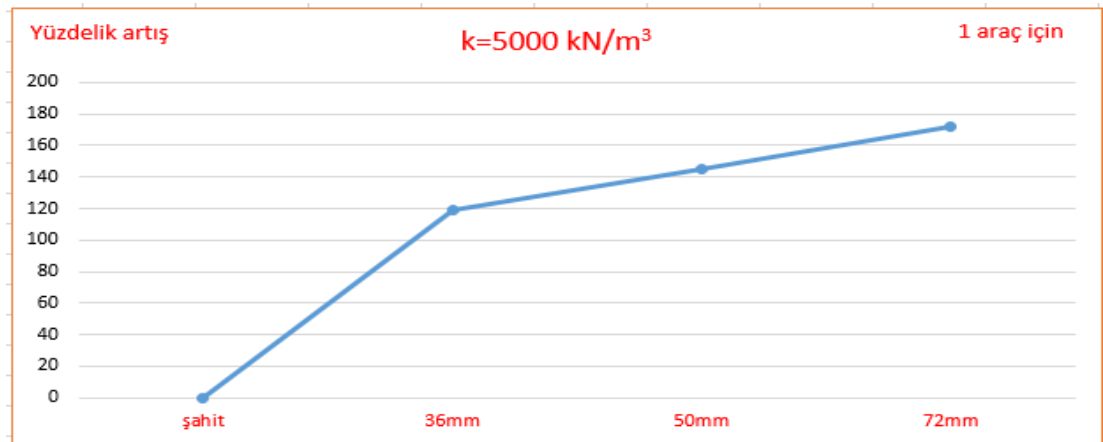
Şekil 4.10. C30/37 beton sınıfında 50 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 2,4 MPa



Şekil 4.11. C30/37 beton sınıfında 72 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 2,7 MPa



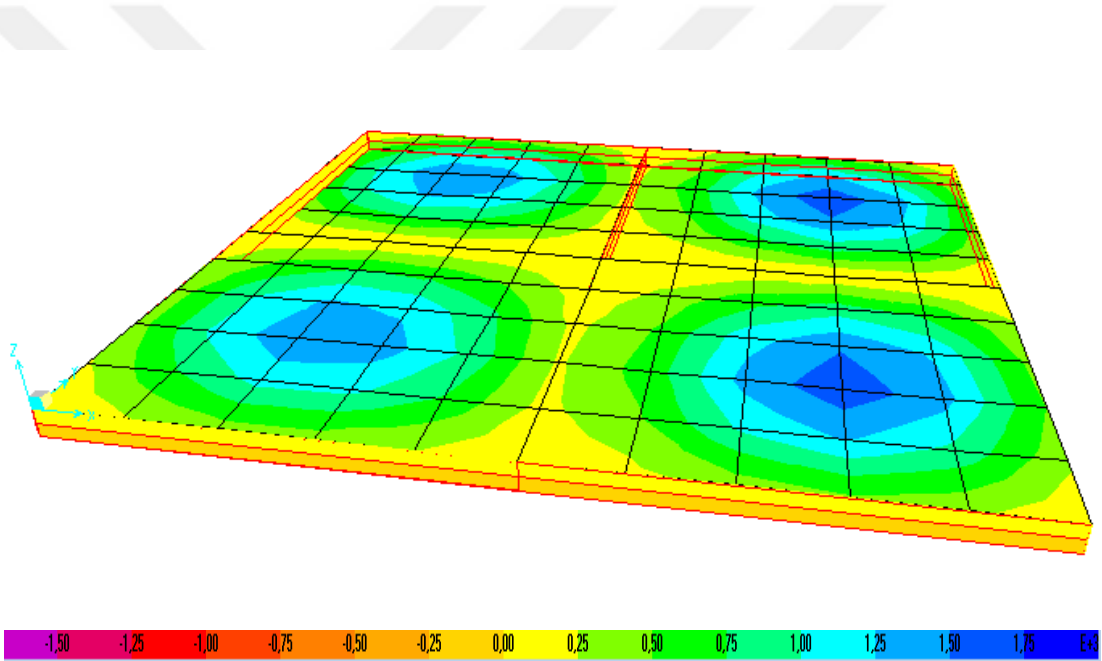
Şekil 4.12. C30/37 beton sınıfında zayıf zeminde bir araç için oluşan gerilme grafiği



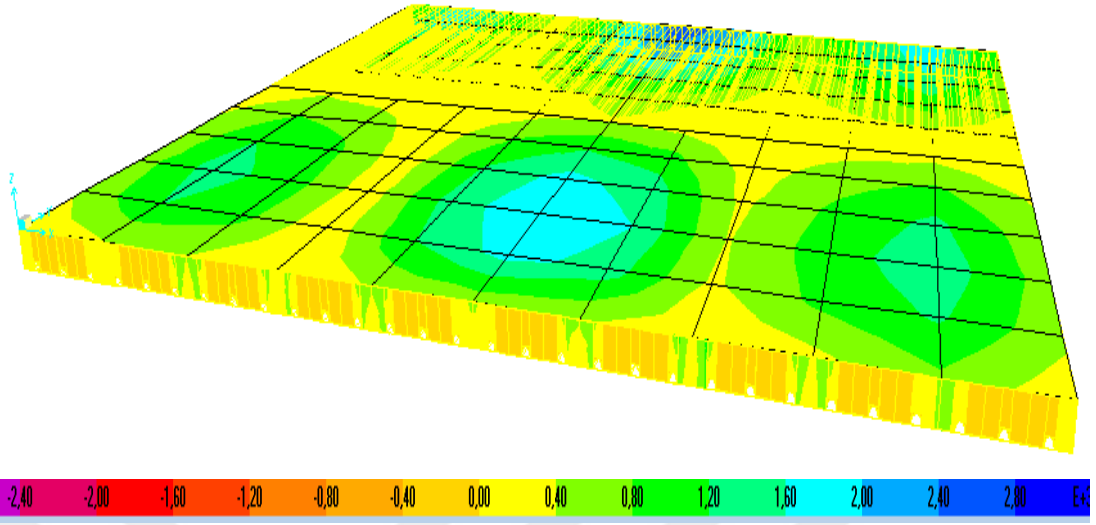
Şekil 4.13. C30/37 beton sınıfında zayıf zeminde bir araç için gerilmelerin yüzelik artış grafiği

C30/37 beton sınıfı kullanılarak oluşturulan beton plakta zayıf zemin için hızı sabit 70km/sa olan bir araç geçmesi durumunda oluşan gerilmelerin açılan kemer kesitli çaplara bağlı olarak artış gösterdiği görülmektedir.

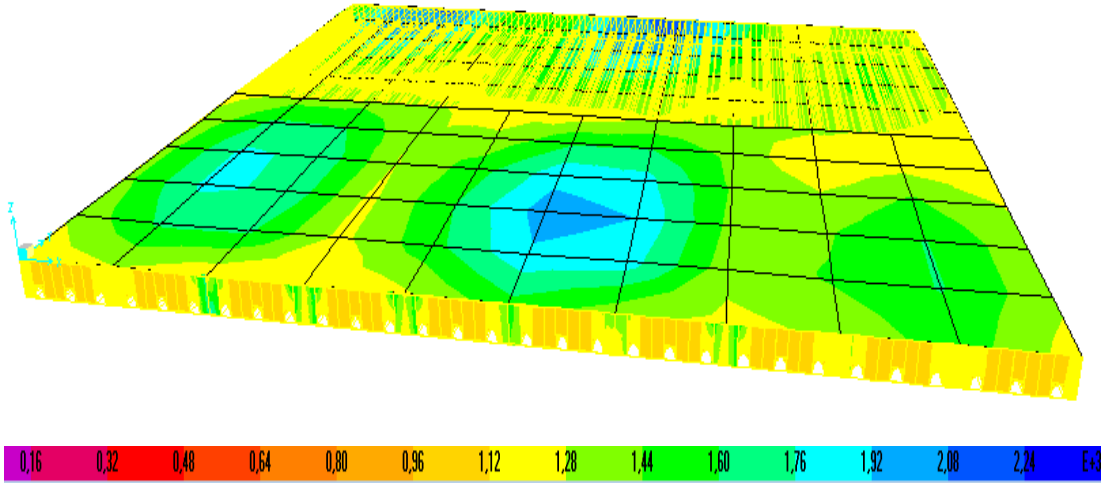
Beton yol kaplamasında C30/37 beton sınıfı malzeme olarak kullanılarak yol uzunluğu 4.5 m genişliği 4 m, plak kalınlığı ise 15 cm olan yol kesiti şahit, 36 mm, 50mm, 72 mm çaplı kemer kesitler ile açılarak zemin yatak katsayısı zayıf zemin için 5000 kN/m<sup>3</sup> sisteme yay olarak tanımlanmış ve yol kesitinden hızı sabit 70 km/sa olan arka arkaya elli araç geçmesi durumunda oluşan basınç gerilmeleri Şekil 4.14. , Şekil 4.15. , Şekil 4.16. ve Şekil 4.17’de gösterilmektedir. Şekil 4.18’de gerilme grafiği, Şekil 4.19’da gerilmelerin açılan kemer kesitli çaplara bağlı olarak yüzdelik artış grafiği gösterilmektedir.



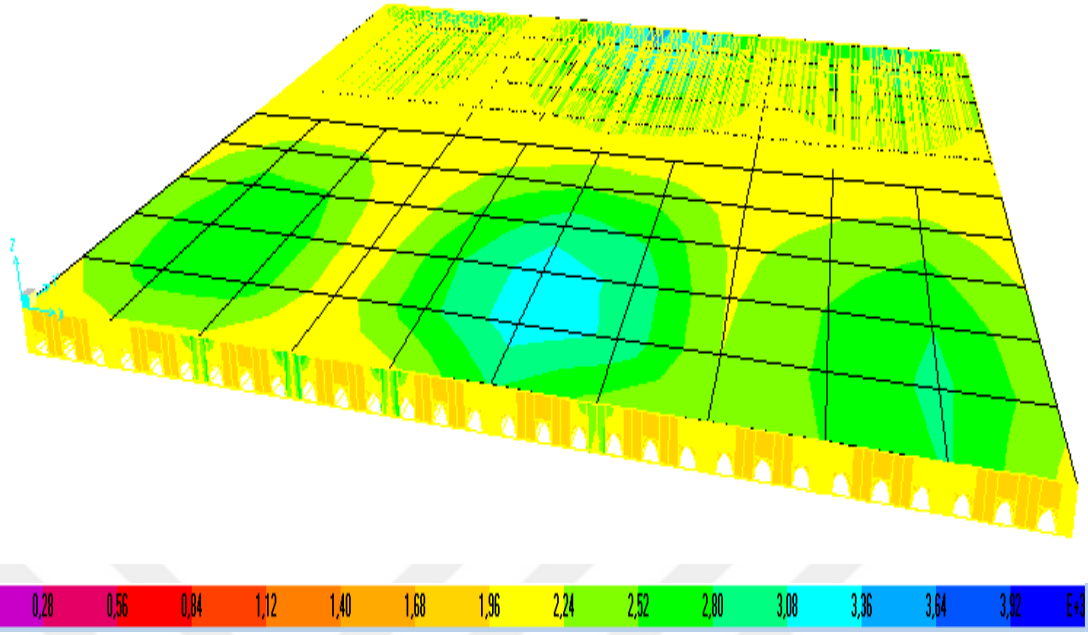
Şekil 4.14. C30/37 beton sınıfında şahit için oluşan gerilme: 1,66 MPa



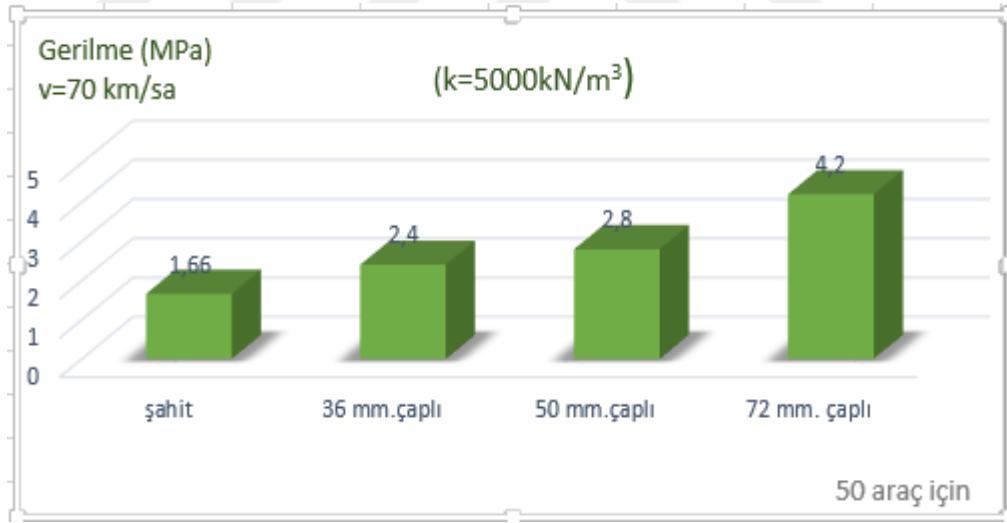
Şekil 4.15. C30/37 beton sınıfında 36 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 2,4 MPa



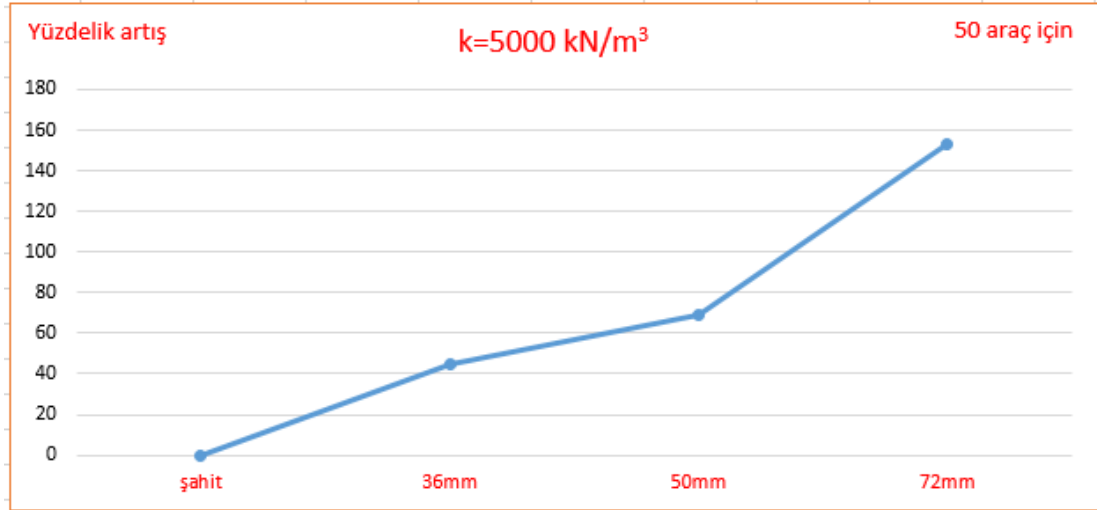
Şekil 4.16. C30/37 beton sınıfında 50 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 2,8 MPa



Şekil 4.17. C30/37 beton sınıfında 72 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 4,2 MPa



Şekil 4.18. C30/37 beton sınıfında zayıf zeminde elli araç için oluşan gerilme grafiği

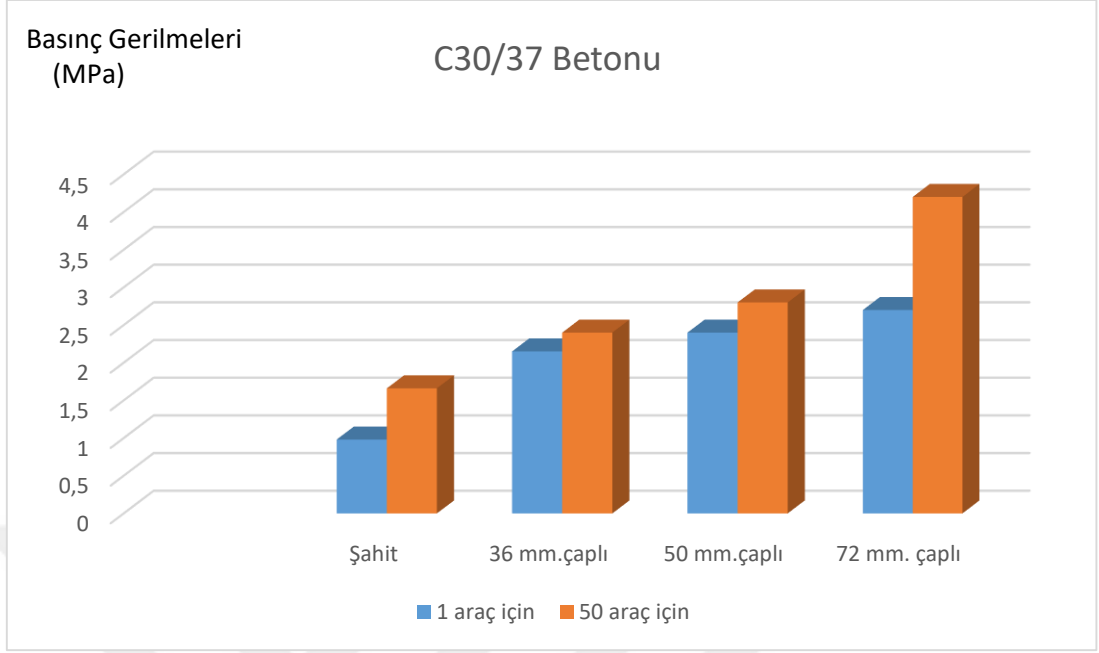


Şekil 4.19. C30/37 beton sınıfında zayıf zeminde elli araç için gerilmelerin yüzelik artış grafiği

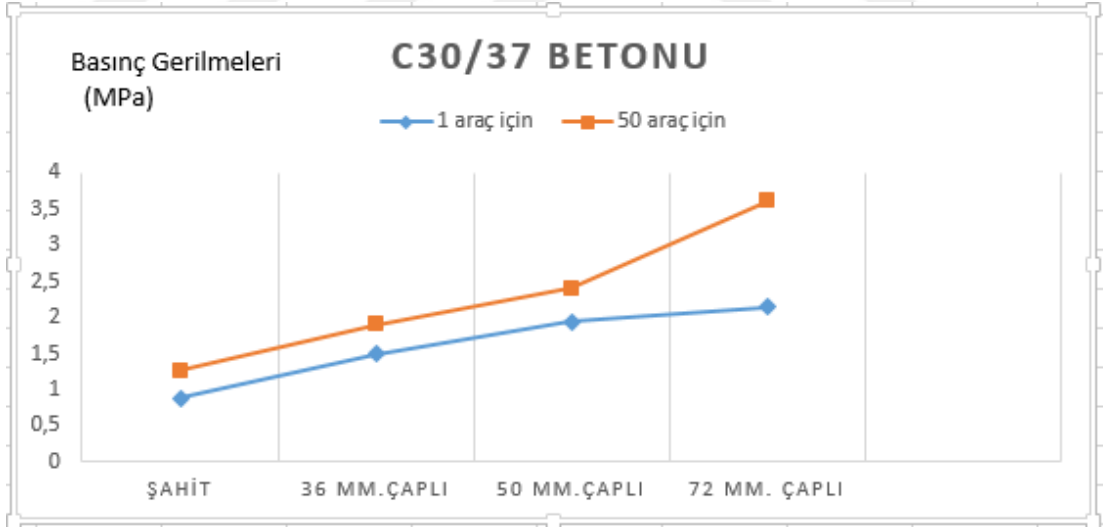
C30/37 beton sınıfı kullanılarak oluşturulan beton plakta zayıf zeminde, hızları sabit 70 km/sa olan arka arkaya elli araç geçmesi durumunda oluşan gerilmelerin açılan kemer kesitli çaplara bağlı olarak artış gösterdiği görülmektedir.

Çizelge 4.6. C30/37 beton sınıfında gerilmelerin karşılaştırılması

	Basınç Gerilmeleri (MPa)	v=70km/h	v=70km/h
		1 araç için	50 araç için
<b>k=5000 KN/m<sup>3</sup></b>	Şahit	0,98	1,66
	<b>C30</b> 36mm çaplı	2,15	2,4
	50 mm çaplı	2,4	2,8
	72 mm çaplı	2,7	4,2

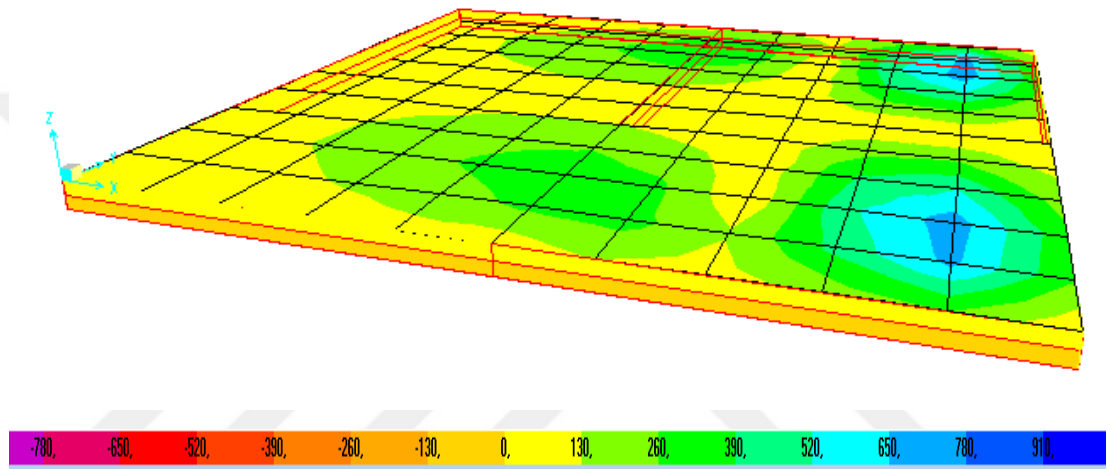


Şekil 4.20. C30/37 beton sınıfında zayıf zeminde farklı araç sayılarında gerilmelerin karşılaştırma sütun grafiği

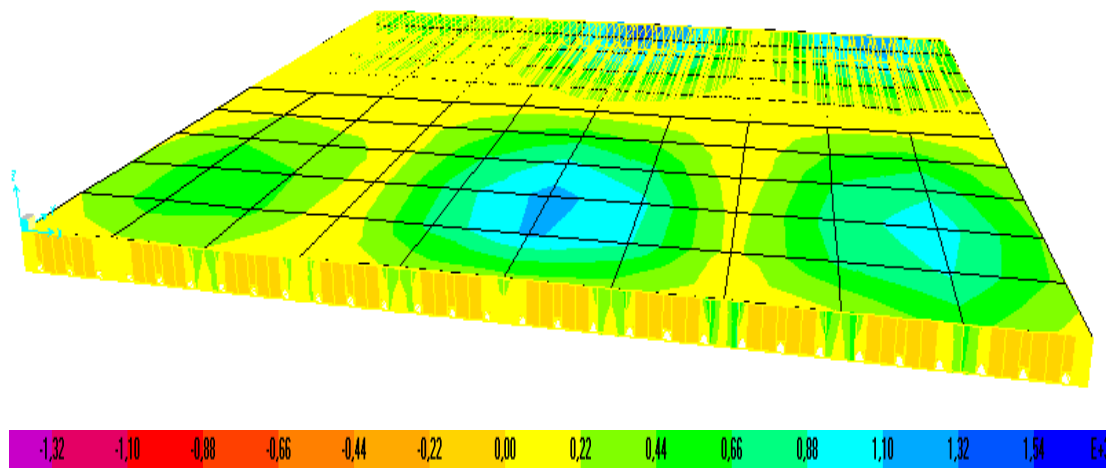


Şekil 4.21. C30/37 beton sınıfında zayıf zeminde farklı araç sayılarında gerilmelerin karşılaştırma çizgi grafiği

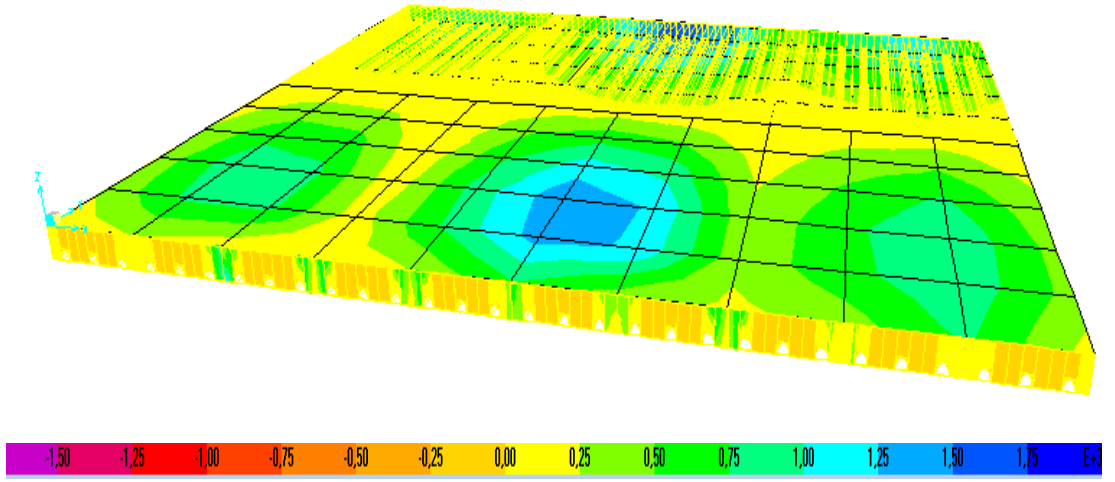
Beton yol kaplamasında C30/37 beton sınıfı malzeme olarak kullanılarak yol uzunluğu 4.5 m genişliği 4 m, plak kalınlığı ise 15 cm olan yol kesiti şahit, 36 mm, 50 mm, 72 mm çaplı kemer kesitler ile açılarak zemin yatak katsayısı orta sağlam zeminler için  $15000 \text{ kN/m}^3$  sisteme yay olarak tanımlanmış ve yol kesitinden hızı 70 km/sa olan bir araç geçmesi durumunda oluşan basınç gerilmeleri Şekil 4.22. , Şekil 4.23. , Şekil 4.24. ve Şekil 4.25'te gösterilmektedir. Şekil 4.26'da gerilme grafiği, Şekil 4.27'de gerilmelerin açılan kemer kesitli çaplara bağlı olarak yüzdelik artış grafiği gösterilmektedir.



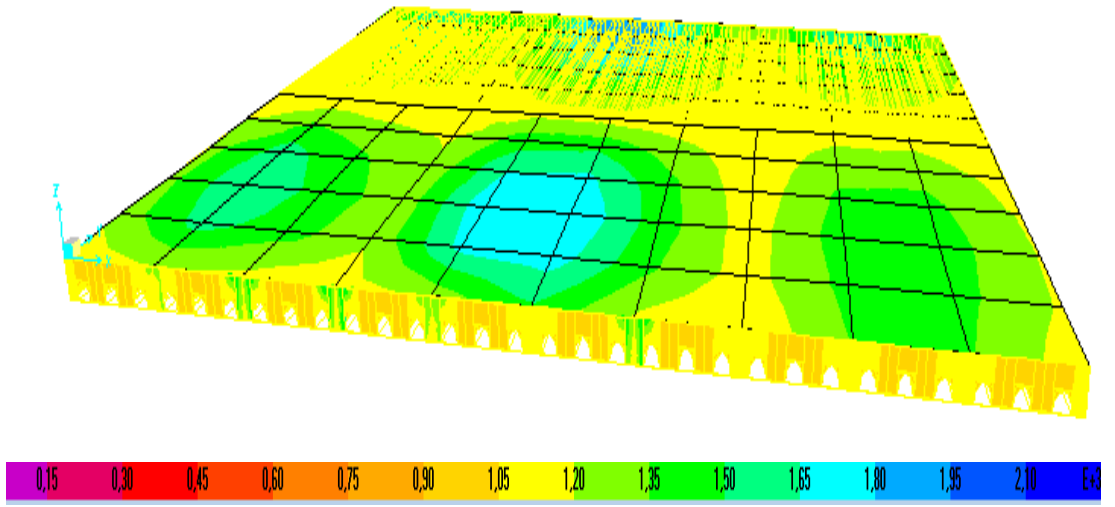
Şekil 4.22. C30/37 beton sınıfında şahit için oluşan gerilme: 0,89 MPa



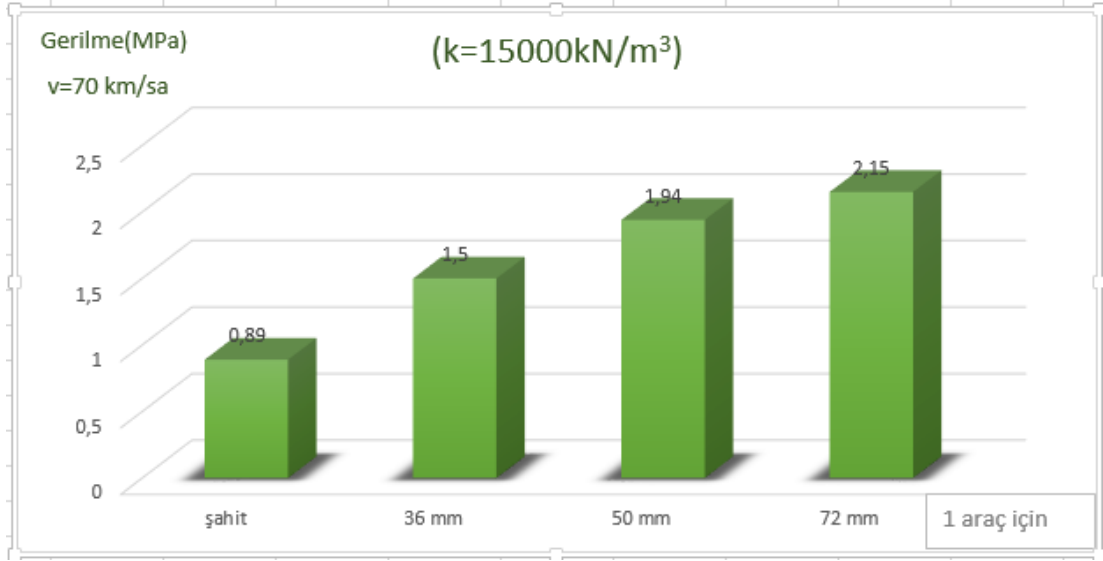
Şekil 4.23. C30/37 beton sınıfında 36 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 1,5 MPa



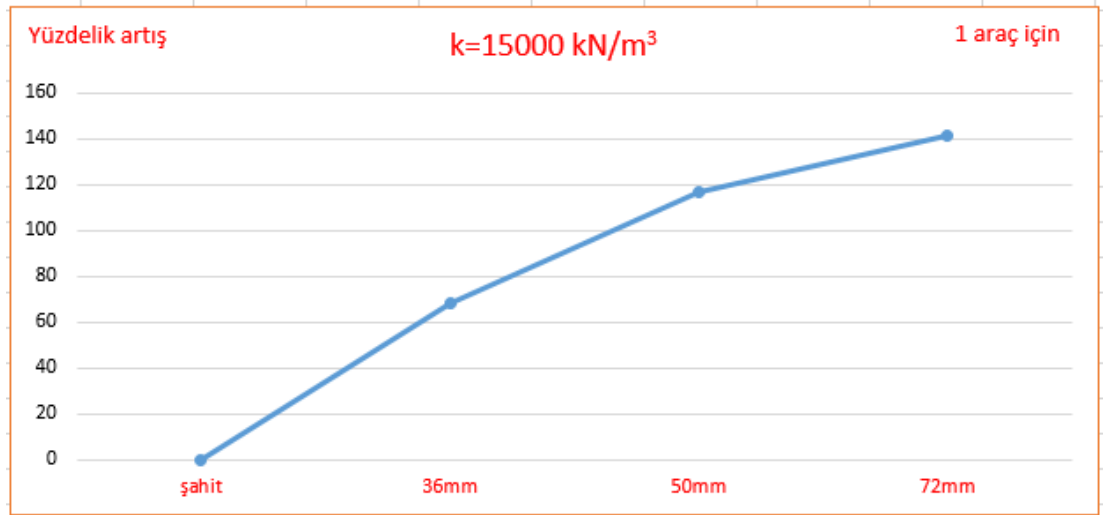
Şekil 4.24. C30/37 beton sınıfında 50 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 1,94 MPa



Şekil 4.25. C30/37 beton sınıfında 72 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 2,15 MPa



Şekil 4.26. C30/37 beton sınıfında orta sağlam zeminde bir araç için oluşan gerilme grafiği

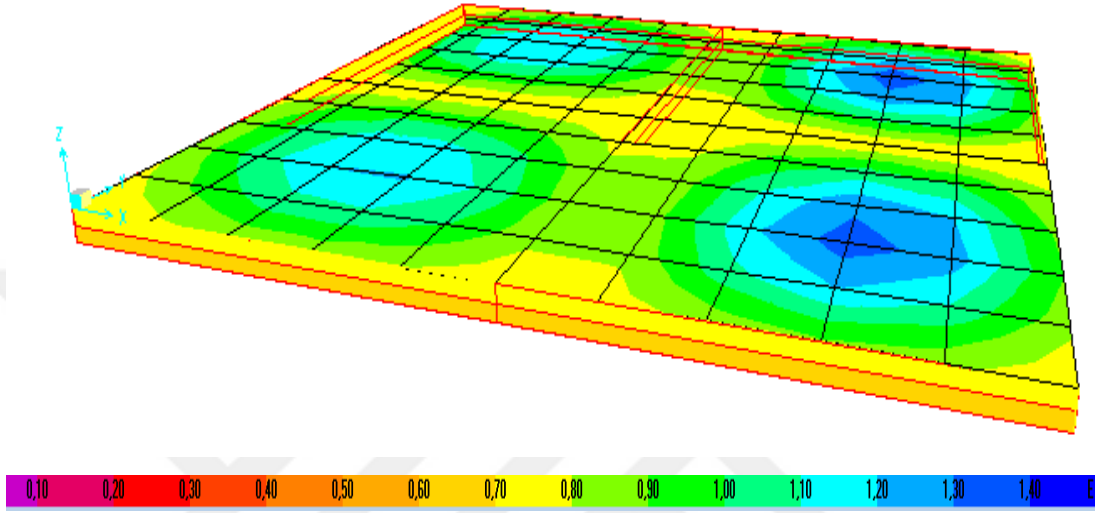


Şekil 4.27. C30/37 beton sınıfında orta sağlam zeminde bir araç için gerilmelerin yüzelik artış grafiği

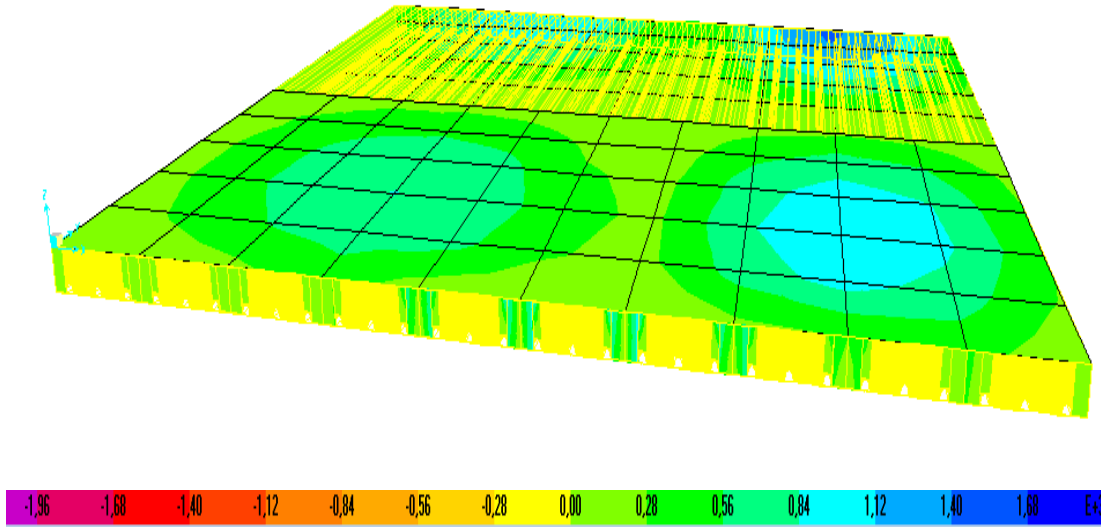
C30/37 beton sınıfı kullanılarak oluşturulan beton plakta orta sağlam zeminde hızları sabit 70 km/sa olan bir araç geçmesi durumunda oluşan gerilmelerin açılan kemer kesitli çaplara bağlı olarak artış gösterdiği görülmektedir.

Beton yol kaplamasında C30/37 beton sınıfı malzeme olarak kullanılarak yol uzunluğu 4.5 m genişliği 4 m, plak kalınlığı ise 15 cm olan yol kesiti şahit, 36 mm, 50 mm, 72 mm çaplı kemer kesitler ile açılarak zemin yatak katsayısı orta sağlam zeminler için 15000 kN/m<sup>3</sup> sisteme yay olarak tanımlanmış ve yol kesitinden hızı 70

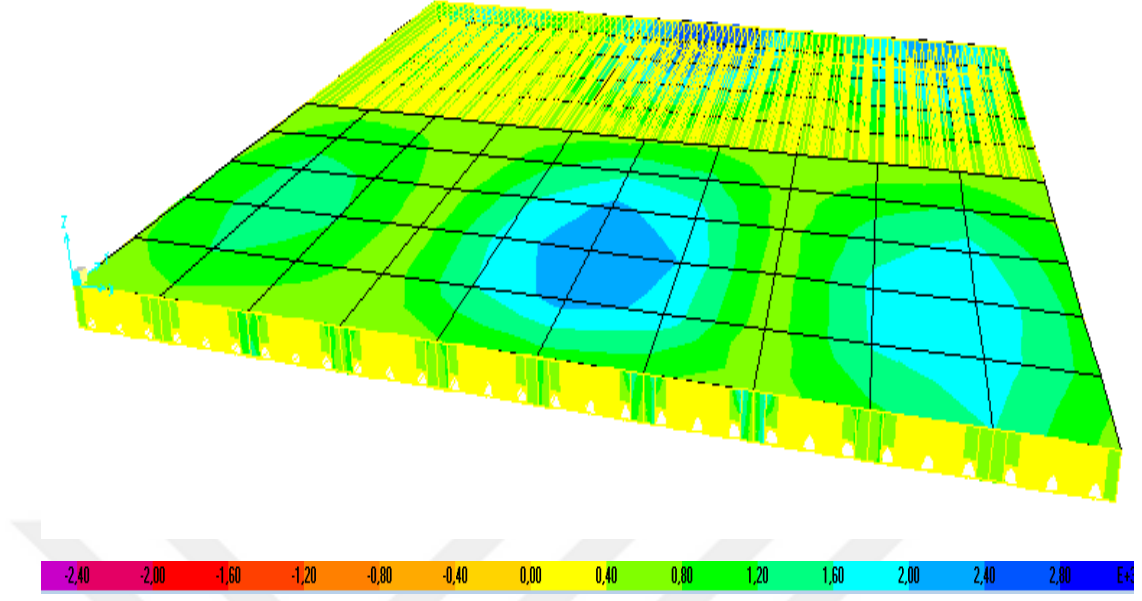
km/sa olan arka arkaya elli araç geçmesi durumunda oluşan basınç gerilmeleri Şekil 4.28. , Şekil 4.29. , Şekil 4.30. ve Şekil 4.31’de gösterilmektedir. Şekil 4.32’de gerilme grafiği, Şekil 4.33’te gerilmelerin açılan kemer kesitli çaplara bağlı olarak yüzdelik artış grafiği gösterilmektedir.



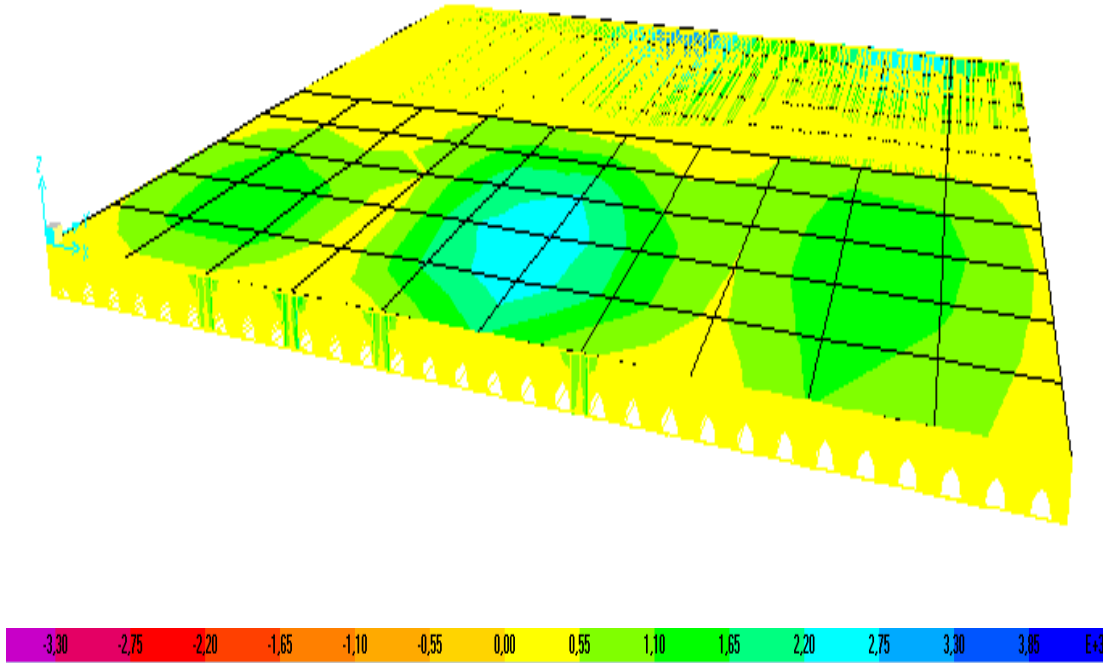
Şekil 4.28. C30/37 beton sınıfında şahit için oluşan gerilme: 1,43 MPa



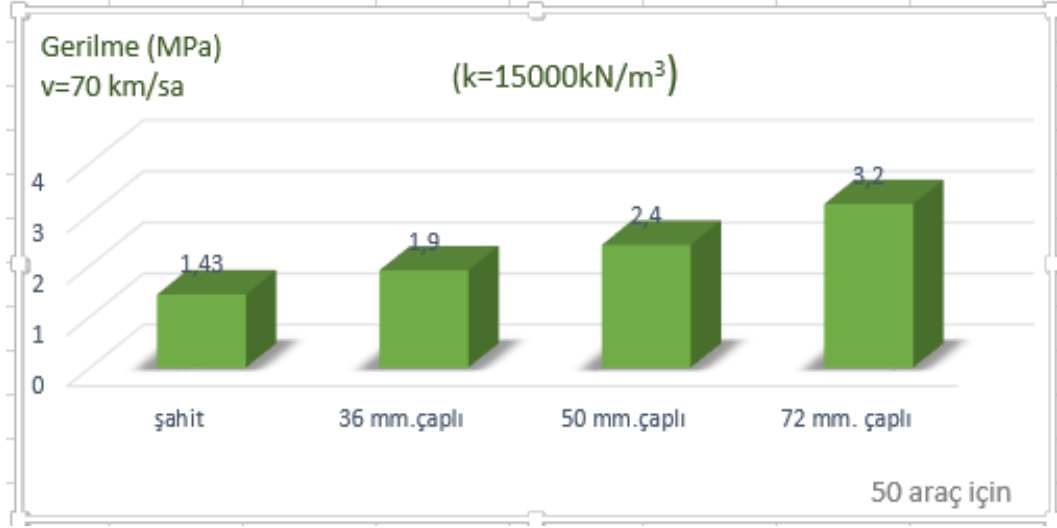
Şekil 4.29. C30/37 beton sınıfında 36 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 1,9 MPa



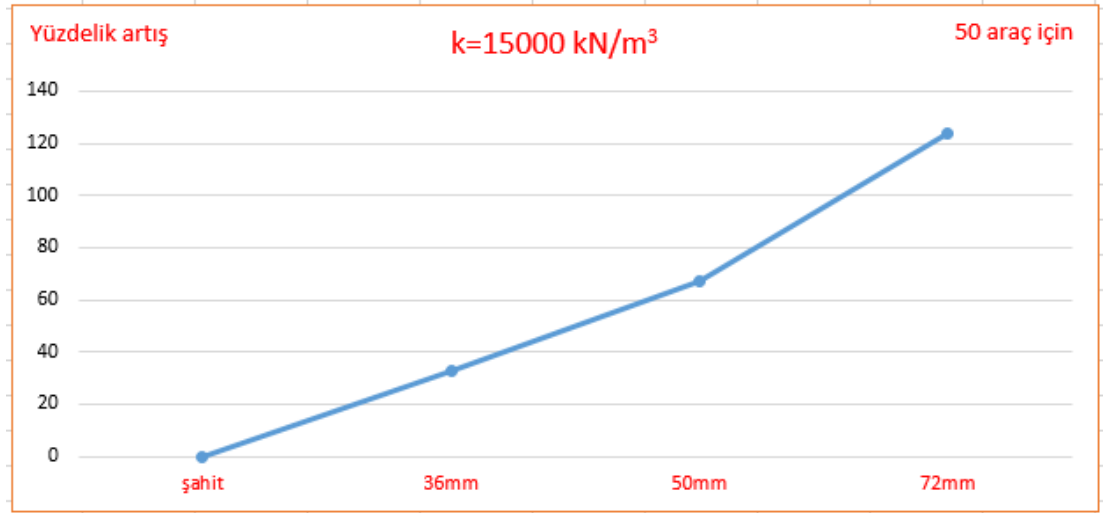
Şekil 4.30. C30/37 beton sınıfında 50 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 2,4 MPa



Şekil 4.31. C30/37 beton sınıfında 72 mm çaplı kemer kesitlerde gerilme: 3,2 MPa



Şekil 4.32. C30/37 beton sınıfında orta sağlam zeminde elli araç için oluşan gerilme grafiği

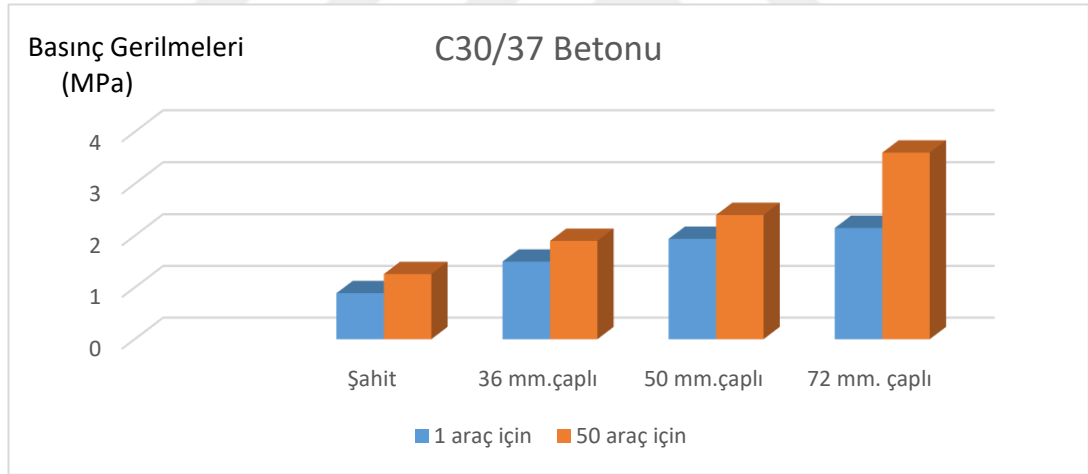


Şekil 4.33. C30/37 beton sınıfında orta sağlam zeminde elli araç için gerilmelerin yüzelik artış grafiği

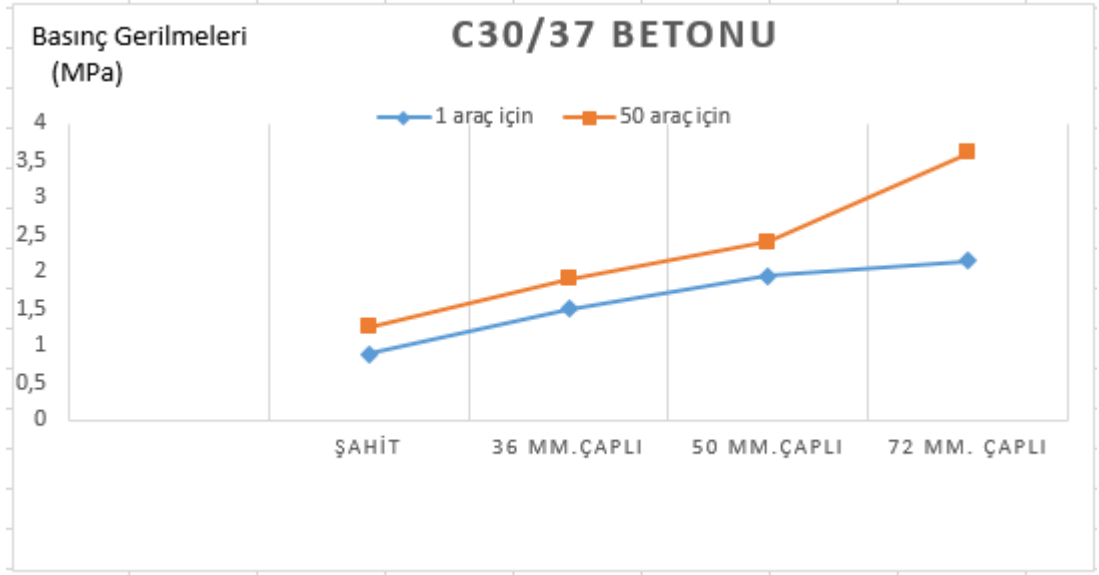
C30/37 beton sınıfı kullanılarak oluşturulan beton plakta orta sağlam zemin hızları sabit 70 km/sa olan arka arkaya elli araç geçmesi durumunda oluşan gerilmelerin açılan kemer kesitli çaplara bağlı olarak artış gösterdiği görülmektedir.

Çizelge 4.7. C30/37 beton sınıfında gerilmelerin karşılaştırılması

		Basınç Gerilmeleri (MPa)	v=70km/h 1 araç için	v=70km/h 50 araç için
<b>k=15000 KN/m<sup>3</sup></b>	<b>C30</b>	Şahit	0,89	1,43
		36mm çaplı	1,5	1,94
		50 mm çaplı	1,94	2,4
		72 mm çaplı	2,15	3,2

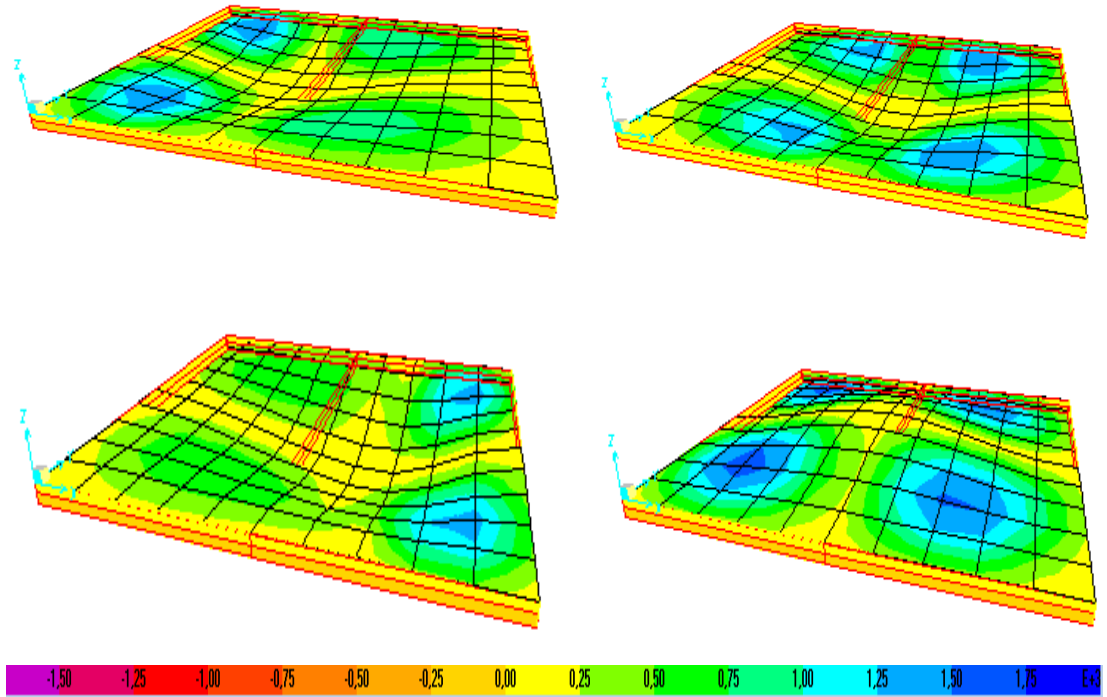


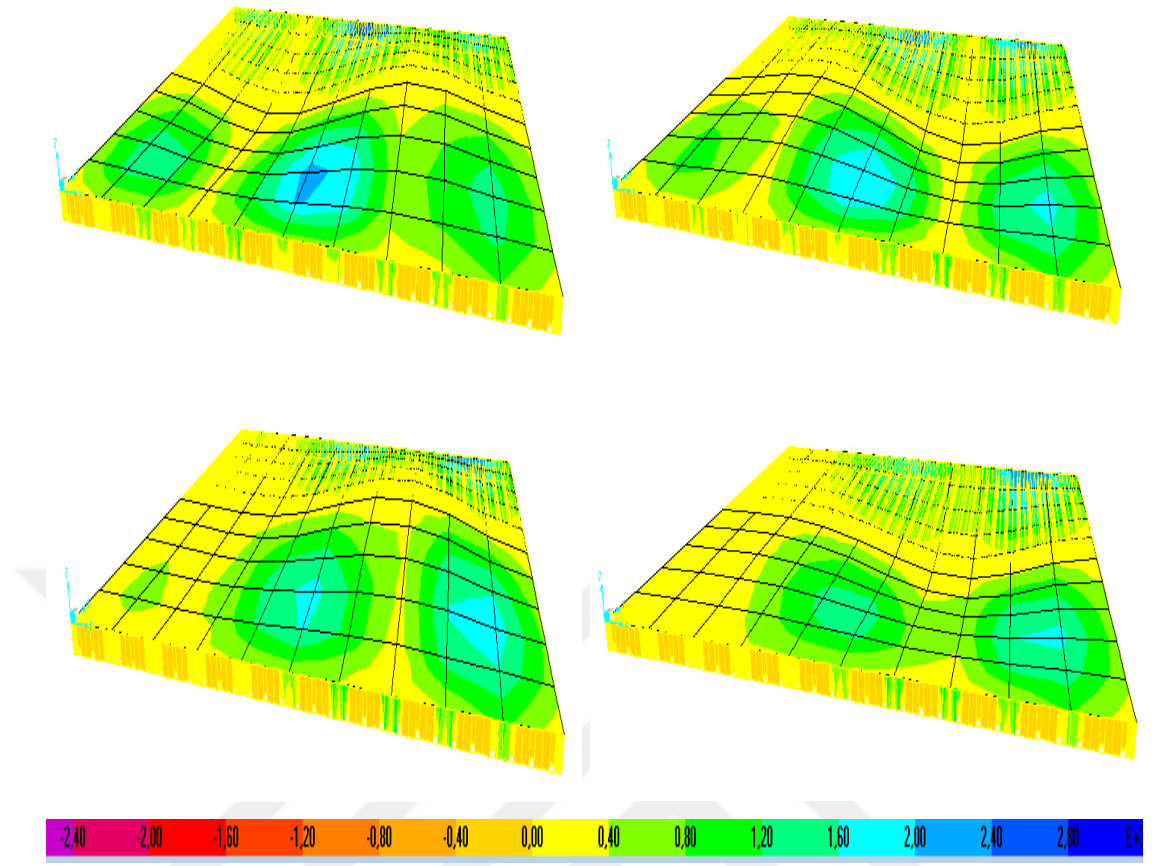
Şekil 4.34. C30/37 beton sınıfında orta sağlam zeminde farklı araç sayılarında gerilmelerin karşılaştırma sütun grafiği



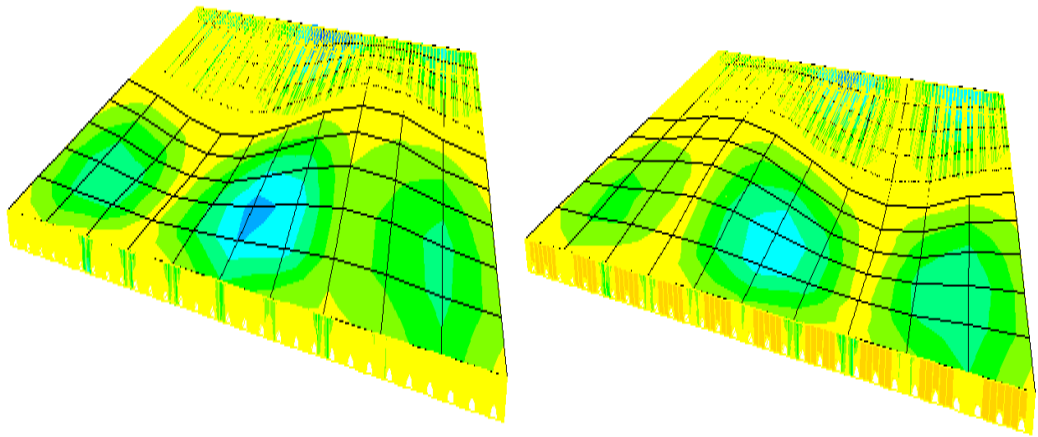
Şekil 4.35. C30/37 beton sınıfında orta sağlam zeminde farklı araç sayılarında gerilmelerin karşılaştırma çizgi grafiği

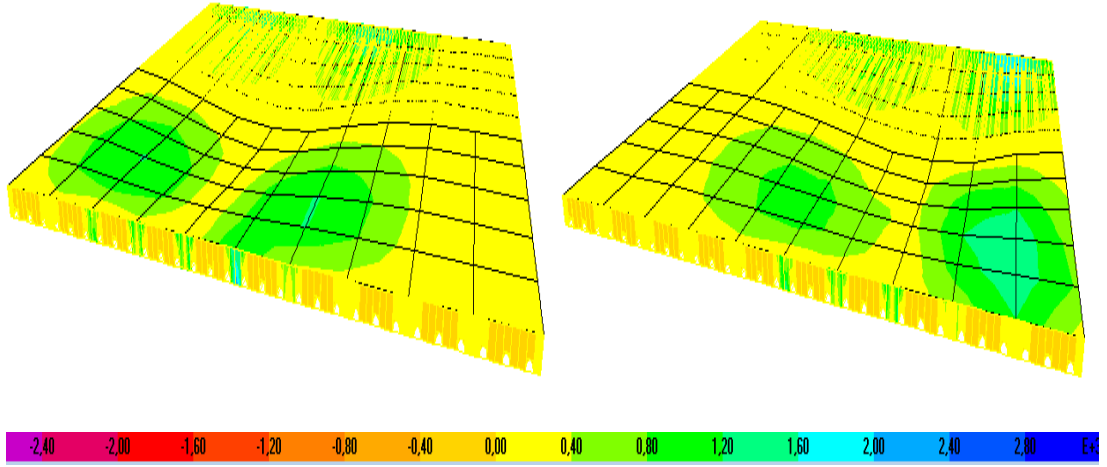
C30/37 betonunda Sap2000 bilgisayar analiz programında elli aracın arka arkaya geçişi sırasında beton plakta oluşan deformasyonun gerilme üzerinde gösterimi Şekil 4.36. , Şekil 4.37. , Şekil 4.38. , Şekil 4.39’da gösterilmektedir.



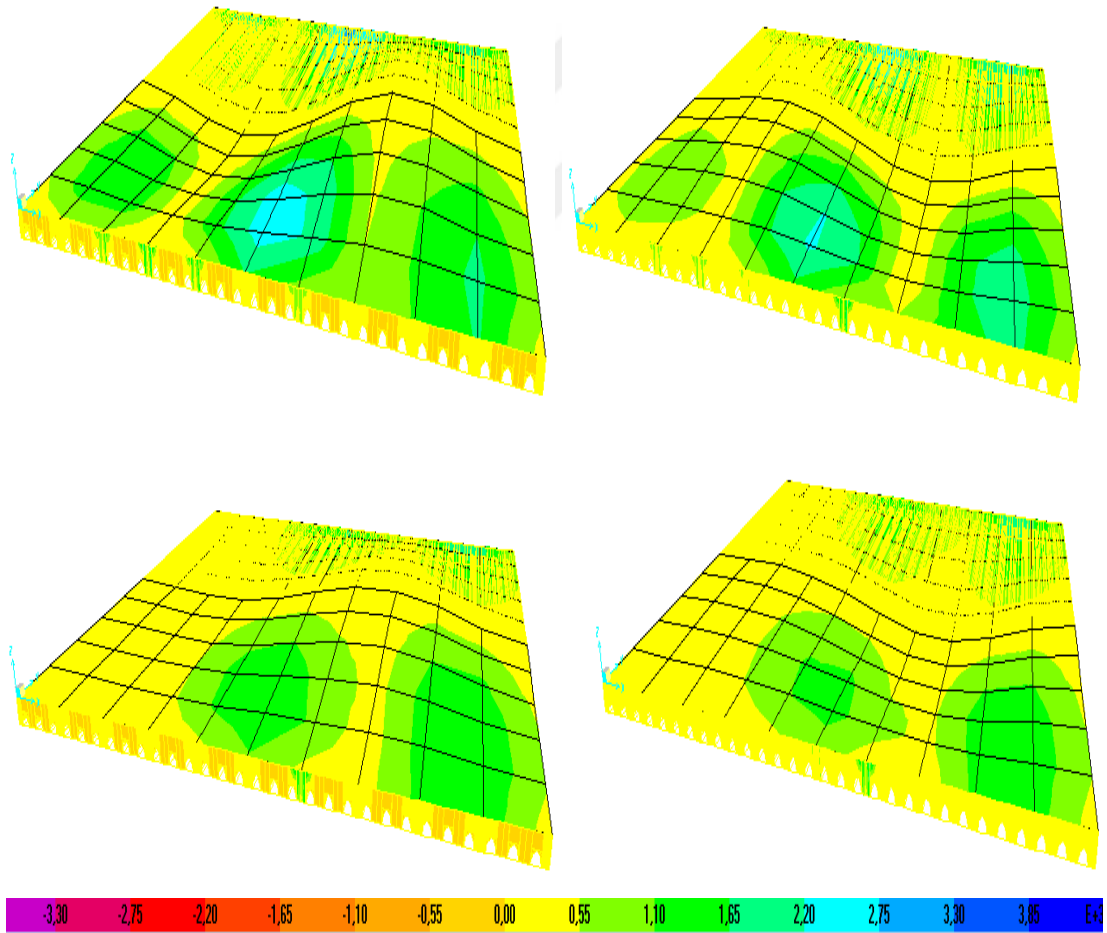


Şekil 4.37. C30/37 36 mm çaplı kemer kesitli betonda araç geçişinde plakta oluşan deformasyon etkisi





Şekil 4.38. C30/37 50 mm çaplı kemer kesitli betonda araç geçişinde plakta oluşan deformasyon etkisi



Şekil 4.39. C30/37 72 mm çaplı kemer kesitli betonda araç geçişinde plakta oluşan deformasyon etki

Çalışmada yapılan işlemler özetlenerek Çizelge 4.8’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.8. Çalışmada yapılan işlemlerin özeti

Tek araç geçişi için				Elli araç geçişi için			
Zayıf Zemin		Orta sağlam zemin		Zayıf Zemin		Orta sağlam zemin	
Çap (mm)	Basınç Gerilme (MPa)	Çap (mm)	Basınç Gerilme (MPa)	Çap (mm)	Basınç Gerilme (MPa)	Çap (mm)	Basınç Gerilme (MPa)
şahit	0,98	şahit	0,89	şahit	1,66	şahit	1,43
36	2,15	36	1,5	36	2,4	36	1,9
50	2,4	50	1,94	50	2,8	50	2,4
72	2,7	72	2,15	72	4,2	72	3,2

Çizelgede çalışmanın özeti gösterilmektedir. Kemer kesit çapı arttıkça oluşan basınç gerilmelerinin arttığı görülmektedir. Açılan kemer kesitlerin oluşturduğu hacimsel boşluğun oluşturduğu dayanım etkisinin beton yol kaplamasına etkisini saptamak için hacim oranı hesaplanmıştır. Beton yol kaplamasının hacmi için tanımlanan yolun boyu, yolun kalınlığı ve 1 km (1000m) de oluşan hacim için veriler birbiriyle çarpılmıştır.

Beton yol kaplamasında yolun hacmi;

$$4,5 \times 0,15 \times 1000 = 675 \text{ m}^3$$

Çalışmada, 30 adet 36, 50, 72 mm çaplı kemer kesitli açılmıştır. Bu kemer kesitlerdeki boşluklar neticesinde beton hacminde azalma yaşanmaktadır.

36 mm çaplı kemer kesitte azalan hacim;

$$\Pi \times (0,036/2)^2 \times 1000 \times 30 / 2 = 15,3 \text{ m}^3$$

Söz konusu miktar, tüm yol hacminin % 2,3 üne karşılık gelmektedir.

50 mm çaplı kemer kesitte azalan hacim;

$$\Pi \times (0,050/2)^2 \times 1000 \times 30 / 2 = 29,5 \text{ m}^3$$

Söz konusu miktar, tüm yol hacminin % 4,4 üne karşılık gelmektedir.

72 mm çaplı kemer kesitte azalan hacim;

$$\Pi \times (0,072/2)^2 \times 1000 \times 30 / 2 = 61,1 \text{ m}^3$$

Söz konusu miktar, tüm yol hacminin % 9,05 ine karşılık gelmektedir.

Yol güzergahının kilometrelerce uzunluğunda olacağı varsayıldığında, beton yol kullanımında azalacak olan beton miktarının önemli değerler taşıyacağı görülmektedir.

## 5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada ilk olarak, standart (15x15x15 cm) ve 36 mm, 50 mm ve 72 mm çapında kemer kesitli C20/25, C25/30 ve C30/37 beton sınıfı numuneler laboratuvar ortamında hazırlanmış ve bu numuneler beton basınç deneyine tabi tutulmuştur. Beton numunelerinde oluşan gerilmeler ve bu gerilmelerin beton numunesinde kemer kesit açılmasıyla ilişkisi belirlenmiştir. Bu gerilmeler sonucunda en uygun beton sınıfının C30/37, en uygun kemer kesit çapının ise 36 mm olduğuna karar verilmiştir.

ANSYS programında standart (15x15x15 cm) beton numunesi oluşturulmuş ve C20/25, C25/30, C30/37 beton sınıfları için ayrı ayrı basınç yüklemeleri uygulanmıştır. Bu basınç yüklemeleri, her beton sınıfı için eşdeğer küp basınç dayanımı alınarak uygulanmıştır. Aynı işlemler, 15x15x15 cm beton numunesinde 36 mm, 50 mm ve 72 mm çapında kemer kesitler açılarak da yapılmıştır. Numunelere uygulanan basınçlar neticesinde oluşan deformasyonlar ve maksimum gerilmeler incelenmiştir.

Geniş ve karmaşık statik ve dinamik çözüm sağlayan ve her türlü yapılar için Sonlu Elemanlar Yöntemini kullanan SAP2000 bilgisayar analiz programında da benzer sonuçların oluşup oluşmadığına bakmak için standart (15x15x15 cm) beton numunesi SAP2000 programında da tanımlanmıştır. C20/25, C25/30, C30/37 beton sınıfları için ayrı ayrı basınç yükleri aynı noktadan uygulanmıştır. Uygulanan bu basınç yükleri her beton sınıfı için eşdeğer küp basınç dayanımı alınarak yapılmıştır. Aynı işlemler, 15x15x15 cm beton numunesinde 36 mm, 50 mm ve 72 mm çapında kemer kesitler açılarak da yapılmıştır. Numunelere uygulanan basınçlar neticesinde oluşan maksimum gerilmeler incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda, ANSYS ve SAP2000 bilgisayar analiz programında beton numunesinde oluşan gerilmeler karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, %80-%99 oranında benzerlik görülmüştür. En yüksek benzerlik oranının C30/37 betonunda oluştuğu tespit edilmiştir. SAP2000 programında, beton numunelerinde oluşan gerilmeler teyit edildikten sonra, trafik yüklemesi altında kemer kesitli beton yol kaplamalarında oluşan gerilmeleri hesaplamak için SAP2000 bilgisayar analiz programının kullanılmasına karar verilmiştir. Her iki programda % 99 benzerlik sağlanması ve yol tasarımlarında daha çok tercih edilmesi sebebiyle C30/37 beton sınıfı kullanılarak tanımlanan beton plakta

standart, 36 mm, 50 mm, 72 mm çapında kemer kesitler açılarak sabit hızda farklı zemin türleri, farklı sayıda araç geçişinde oluşan gerilmeler hesaplanmıştır.

Zayıf zeminde tasarlanan beton yol kaplamasında, bir araç geçişinde standart beton yol kaplamasına 36 mm çaplı kemer kesit açılması durumunda gerilmenin %119,5 arttığı, 50 mm çaplı kemer kesit açılması durumunda gerilmenin %145 arttığı, 72 mm çaplı kemer kesit açılması durumunda %172,5 arttığı görülmektedir. Orta sağlam zeminde tasarlanan beton yol kaplamasında, bir araç geçişinde standart beton yol kaplamasına 36 mm çaplı kemer kesit açılması durumunda gerilmenin %68,5 arttığı, 50 mm çaplı kemer kesit açılması durumunda gerilmenin %117 arttığı, 72 mm çaplı kemer kesit açılması durumunda %141,5 arttığı görülmektedir.

Zayıf zeminde tasarlanan beton yol kaplamasında, arka arkaya elli araç geçişinde standart beton yol kaplamasına 36 mm çaplı kemer kesit açılması durumunda gerilmenin %45 arttığı, 50 mm çaplı kemer kesit açılması durumunda gerilmenin %69 arttığı, 72 mm çaplı kemer kesit açılması durumunda %153 arttığı görülmektedir. Orta sağlam zeminde tasarlanan beton yol kaplamasında, arka arkaya elli araç geçişinde standart beton yol kaplamasına 36 mm çaplı kemer kesit açılması durumunda gerilmenin %33 arttığı, 50 mm çaplı kemer kesit açılması durumunda gerilmenin %67 arttığı, 72 mm çaplı kemer kesit açılması durumunda %123,7 arttığı görülmektedir.

Yüzdelik artışın, her iki zemin türünde arka arkaya elli araç geçişinde tek araç geçişine göre daha az olmasının sebebi beton yol kaplamasında şahit durumunda oluşan gerilmelerin daha yüksek olmasıdır. Beton yol kesitinde kemer kesit çaplarının artmasıyla oluşan gerilmelerin arttığı, en yüksek gerilmenin 72 mm çapında oluştuğu gözlenmektedir.

Beton yol kesitinde kemer kesitli çap açılması durumunda, çalışmada kullanılan en uygun çapın 36 mm olduğu görülmüştür. Bu durum, çalışmamızda kullanılan her iki zemin türü için de aynı sonucu vermiştir. Zeminin sağlamlığı arttıkça, oluşan gerilmelerin azaldığı ve tasarlanan yol kaplamasında sayıca fazla araç geçişinin de gerilmeyi arttırdığı tespit edilmiştir. Uzun vadede bu durumun, beton yol için yorulmayı arttıracığı da öngörülmektedir.

Çalışmada rnek bir kesit için beton plak tanımlanmıştır. Plağın eni 4 m, boyu 4.5 m ve plak kalınlığı 15 cm alınmıştır. Tasarlanan yolun boyutlarıyla yapılan hacim hesabında, yol kesitinde kemer uygulamasının beton hacmini dikkate değer oranda

azalttığı görülmüştür. Yolda, 36 mm çaplı kemer kesitin oluşturduğu hacimsel azalmanın %2.3, 50 mm çaplı kemer kesitin oluşturduğu hacimsel azalmanın %4.4, 72 mm çaplı kemer kesitin oluşturduğu hacimsel azalmanın % 9.05 olduğu görülmüştür. Kullanılacak beton miktarındaki azalmanın, yolun uzunluğunu kilometrelere vurduğumuzda önemli miktarda büyüyeceği ve sürdürülebilirlik konusunda da önemli katkıları olacağı görülmektedir.

Kemer kesitli beton yol uygulamasının, yol için kullanılan beton miktarını azaltılmış olduğu gibi, aynı zamanda çatlamalara yol açabilecek gerilmeleri azaltmak için uygulanan derzlerin ara mesafelerini de arttırılabileceği düşünülmektedir.

Çalışmada plak kalınlığı ve araç hızı sabit tutulduğu için farklı plak kalınlıkları ve farklı araç hızlarında gerilme değerlerinin nasıl değişeceği incelenememiştir.

Tasarlanan beton yol kaplamasında örnek kesit için donatı kullanılmadığından ötürü, donatılı beton yolda açılacak kemer kesitli çaplar için nasıl gerilme sonuçları vereceği bilinmemektedir.

Çalışma, yorulma analizleri de dikkate alınarak, konunun daha fazla incelenebilmesi için bir hazırlık olmuştur. İleriki çalışmalarda, hızlandırılmış yüklemeye testleri altında en gerçekçi gerilmeleri bulmak için deneylerin yapılması, kemer kesitli beton yolların gürültüye olan etkisi de dahil olmak üzere, derz aralığı değişimine kadar bir çok alanda incelemeler yapılması ön görülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Ağar, E. , Sütaş, I. ve Öztaş, G. 1998, Beton Yollar. İTÜ İnşaat Matbaası, 392, İstanbul.
- Amerika Federal Karayolu İdaresi, 2006. Beton Yollar İçin Bütünleşik Malzeme ve Yapım Uygulamaları: Modern Uygulamalar El Kitabı. Ulusal Beton Yol Teknoloji Merkezi, Yayın No: HIF-07-004, Amerika.
- Bowles, J.E. , 1996, Foundation Analysis and Design: Mc Graw- Hill Companies, Inc. New York, USA.
- Edis, E. , 2007. Asfalt ve Beton Kaplamalı Yolların Maliyet Yönünden Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya, 85 s.
- Eisenmann, J. 1979. Concrete Pavements – Design and Construction (in German) Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin/Munich/Düsseldorf.
- Harle S. M. and Pajgade P. 2018. Modelling of Plain Cement Concrete Pavement Patch Using ANSYS Workbench. American Journal of Civil Engineering, 6(3-1): 1-8 doi: 10.11648/j.ajce.s.2018060301.11
- Ioannides, A.M. , Thompson, M.R. and Barenberg, E.J. 1987. The Westergaard Solutions Reconsidered Workshop on Theroretical Design of Concrete Pavements, 5-6 June 1986, Epen, The Netherlands Record 1, CROW, Ede.
- Kanıt, R. 2003. Temel İnşaatı. Gazi Kitabevi, 250, Ankara.
- Kibar, H ve Öztürk, T. 2012. ANSYS Sonlu eleman yazılımının tarımdaki uygulamaları. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2(2), 65-74.
- Macit, S. 2009. Beton yol inşaatında kendiliğinden yerleşen betonun kullanılması üzerine bir araştırma. Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 118, Trabzon.

- Matthew, B. Gries, Ryan K. Giles, Daniel A. Kuchma, Billie F. Spencer, Lawrence A. Bergman, and James Wilcoski. 2013. Advanced Bridge Capacity and Structural Integrity Assessment Methodology. US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center.
- Ongel A. and Harvey J. 2004. Analysis of 30 Years of Pavement Temperature Using the Enhanced Integrated Climate Model (EICM), Draft Report Prepared for California Department of Transportation, California.
- Packard, R.G. , Tayabji, S.D. 1985. New PCA Thickness Design Procedure for Concrete Highway and Street Pavements, Concrete Pavements&Rehabilitation Conference, Purdue, USA,
- Pancar, E.B. 2012. Beton yol kaplamaların sayısal tasarımında bilgi sistemleri ve yapay zeka yaklaşımı. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 143, Trabzon.
- Pandey N. 2018. Analysis of Pavement Using Finite Element Techniques. International Journal of Recent Engineering Research and Development (IJRERD), 03:05, 127-132. ISSN: 2455-8761
- SAP2000. (2006, Nisan). CSI (Computers and Structures, Inc.). Üç Boyutlu Yapıların Lineer ve Nonlinear Statik ve Dinamik Çözümlemesi ve Boyutlandırılması Yazılımları Serisi. Almanya.
- The British In-situ Concrete Paving Association, 2002. Cement&Concrete Association in Pavement Construction, BCA Crowthorne, Berkshire.
- TS/500. (2000). Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları.
- Uçar, T. ve Şakar, G. 2011. Kemerlerin statik analizi için basitleştirilmiş bir yaklaşım. Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, 24, 35-41.
- Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2918 Sayılı Trafik Kanunu Ağırlık ve Boyut Denetimi <http://www.udhb.gov.tr/images/hizlierisim/a3f43dbbb7bb488.pdf> (Erişim Tarihi: 15.04.2019)

Ulusoy, T. 2010. Beton yollarda taşıt hızlarının ve beton özelliklerinin yer değiştirme ve gerilmelere etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 82, Samsun.

Westergaard, H.M. 1926. Stress in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis, Public Roads, Vol.7, No.2.

Westergaard, H.M. 1948. New Formulas for Stresses in Concrete Pavements of Airfields ASCE, Transactions, Vol. 113.



## ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Rümeyssa KOÇ

Doğum Yeri : TRABZON

Doğum Tarihi : 10.05.1994

Yabancı Dili : İngilizce

### Eğitim Durumu

Lise : Maçka Mehmet Akif Ersoy Anadolu Lisesi (08.06.2012)

Lisans : Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat  
Mühendisliği Bölümü (01.06.2017)

Yüksek Lisans : Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat  
Mühendisliği Anabilim Dalı (Eylül 2017- Haziran 2019)

