

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :
ORCID : - - -

Trabzon

ÖNSÖZ

Bu çalışmada beton yol kaplamalarındaki en büyük sorunlardan biri olan günlük sıcaklık farkı ve tekerlek yükünden dolayı oluşan çekme gerilmelerinin kaplamada oluşturduğu etkilere değinilmiştir. Bu gerilmelerin azaltılması için elastisite modülü ve ısı genleşme katsayısı daha küçük olan hafif beton kullanmanın alternatif bir seçenek olacağı, sıcaklık ve tekerlek yükünden dolayı oluşabilecek gerilmelerin önceden tahmin edilmesi ve bu doğrultuda önlem alınması durumu incelenmiştir. Bu doğrultuda sonlu elemanlar yöntemiyle birlikte hafif beton ve geleneksel beton (şahit beton) verileri, ANSYS programına girilmiş farklı kaplama ölçüleriyle ve kaplamanın derzli olması durumunda oluşabilecek gerilme değerleri üzerine çalışılmıştır.

Hafif beton ve geleneksel betondan üretilmiş bir kaplamada oluşabilecek basınç gerilmesi değerlerinin kaplama malzemesini oluşturan betonun basınç dayanımının yanında oldukça küçük değerde olduğu, önemli olan çekme gerilmesi değerlerinin de kaplamada oluşabilecek maksimum sıcaklık farkıyla birlikte mukavemet sınır değerlere kadar çıktığı durumları araştırılmıştır.

Bu çalışmada ANSYS sonlu elemanlar yöntemiyle çözüm yapılırken 122M335 isimli Tübitak 1001 projesinde yapılan laboratuvar çalışmalarından elde edilen ısı genleşme katsayısı, elastisite modülü, basınç mukavemeti, eğilmede çekme mukavemeti ve yoğunluk değerleri kullanılmıştır. Bu doğrultuda 122M335 isimli Tübitak 1001 projesinde bulunan Yeternur Asena AKTÜRK'e ve Ahmet Hakan YİĞİT'e, Aşkale Hazır Beton Tesisi Laboratuvar çalışanları ve KTÜ laboratuvar çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmanın tümünde; gerilme analizlerinin yapılmasında, değerlendirilmesinde ve bir sonuca bağlanmasında bilgisiyle desteğini esirgemeyen hocam Prof.Dr.M. Vefa AKPINAR'a saygılarımı sunarım.

Ümit Yaşar BAL

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora tezi olarak sunduğum “SICAKLIK DEĞİŞİMLERİ ve TRAFİK YÜKÜ ALTINDA GELENEKSEL ve HAFİF BETON YOL KAPLAMASININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ KULLANILARAK GERİLME ANALİZLERİ” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof.Dr.M. Vefa AKPINAR’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 04/11/2024

Ümit Yaşar BAL

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Beton Dökümü Sırasında Oluşan Çatlaklar	3
1.2.1. Plastik Rötire Çatlakları	3
1.2.2. Oturma Çatlakları	4
1.3. Sertleşmiş Beton Çatlakları	5
1.4. Günlük Sıcaklık Farkından Oluşan Dolaylı Çatlaklar	7
1.5. Betonda Isıl Genleşme	3
1.5.1. Beton Yol Tabakasında Isıl Gerilme Oluşumu	13
1.6. Literatür Çalışması	14
1.7. Hafif Beton ve Özellikleri	51
1.7.1. Hafif Betonların Birim Hacim Ağırlığı	51
1.7.2. İşlenebilirlik	51
1.7.3. Dayanım	52
1.7.4. Su Emme	52
1.7.5. Agrega Aderansı	53
1.7.6. Hafif Betonun Dayanımına Göre Sınıflandırılması	55
1.8. Betonun Mekanik Özellikleri	55
1.8.1. Betonun Çekme Mukavemeti	55
1.8.2. Betonun Isıl Genleşme Katsayısı	56
1.8.3. Betonun Elastisite Modülü ve Basınç Mukavemeti	59

1.9. Sonlu Elemanlar yöntemi	62
1.10. Tezin Amaç ve Kapsamı	63
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	65
2.1. Geleneksel ve Hafif Betonun Yoğunluğu	66
2.2. Geleneksel ve Hafif Betonun Çekme Dayanımı	66
2.3. Geleneksel ve Hafif Betonun Isıl Genleşme Katsayısı	70
2.4. Geleneksel ve Hafif betonun Elastisite Modülü ve Basınç Dayanımı	76
2.5. Termal Şartlardaki Malzeme Özellikleri	78
2.5.1. Isıl Genleşme	78
2.5.2. Özgül Isı	80
2.5.3. Isı İletim Katsayısı	81
2.6. Hafif Beton Termal Özellikleriyle Gerilme Hesabı	82
2.7. Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Beton Yol Kaplamasının Analizi	85
2.7.1. Analiz Parametreleri	85
2.7.2. Tekerlek Yüğü Olması Durumu	87
2.7.3. Yüzey Sıcaklığının Yüksek, Üst-Alt Sıcaklık Farkının Az Olduğu Durum	89
2.7.4. Sıcaklık Farkının Yüksek Olması Durumu	90
2.7.5. Soğuk Bölgelerdeki Sıcaklık Durumu	91
2.7.6. Tekerlek Yüğü ve Sıcaklık Yüğü Olması Halinde Kaplamada Oluşan Çekme Gerilmelerinin Birbirleriyle İlişkileri	92
2.7.7. Beton Yol Kaplamasının Kalınlık Değişimi Durumu	94
2.7.8. Beton Yol Kaplamasında Derz Olması Durumu	94
2.7.9. Kaplama Üzerinde Tır Olması Durumu	96
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	99
3.1. Genleşme Formülü Kullanılması Halinde	99
3.2. Kaplamada Sadece Tekerlek Yüğü Olması Halinde	99
3.3. Kaplamada Yüksek Sıcaklık Olması Halinde	101
3.4. Kaplamada Yüksek Sıcaklık Farkı Olması Halinde	102
3.5. Kaplamanın Soğuk Bölgede Olması Halinde	104
3.6. Kaplamada Yüğü ve Sıcaklık Değerlendirmesi	105
3.7. Kaplamada Yüğü ve Sıcaklık Etkisi	106
3.8. Kaplamada Kalınlık Boyunca Kritik Gerilme Değerleri	109

3.9. Sadece Sıcaklık Yüğü Varken Kaplamada Kalınlık Etkisi	113
3.10. Kaplamada Derz Olması Halinde	114
3.10.1. 2,5 cm Derz Derinliğı Olan Kaplamadan Elde Edilen Bulgular ...	114
3.10.2. 5,0 cm Derz Derinliğı Olan Kaplamadan Elde Edilen Bulgular ...	121
3.10.3. 7,5 cm Derz Derinliğı Olan Kaplamadan Elde Edilen Bulgular ...	126
3.10.4. Derzsiz Beton Yol Kaplamasından Elde Edilen Bulgular	131
3.11. Kaplamada Tır Olması Halinde	145
4. SONUÇLAR	151
5. ÖNERİLER	155
6. KAYNAKLAR	156
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

SICAKLIK DEĞİŞİMLERİ ve TRAFİK YÜKÜ ALTINDA GELENEKSEL ve HAFİF BETON YOL KAPLAMASININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ KULLANILARAK GERİLME ANALİZLERİ

Ümit Yaşar BAL

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof.Dr.M. Vefa AKPINAR
2024, 160 sayfa

Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de SSB, derzli donatısız, derzli donatılı ve sürekli donatılı beton yol kaplamaları uygulamaları artmaya devam etmektedir. Beton yol kaplamaların kullanımının artışına rağmen kaplamalarda oluşan farklı çatlak durumlarının devam ettiği görülmektedir. Günlük sıcaklık değişimleri beton yol kaplaması için tekerlek yükü yanında ekstra gerilme oluşturmaktadır. Bu gerilmelerin azaltılması ve beton yol kaplamasında rastgele çatlaklar oluşmaması için derzler kesilmektedir. Ancak derz kesimleri ek maliyet getirmesinin yanında kesim yerlerinde kaplamayı önemli ölçüde zayıflattığı görülmüştür.

Bu tez kapsamında hafif beton ve geleneksel beton verileri sonlu elemanlar yöntemi için girdi olarak alınarak ANSYS sonlu elemanlar yöntemiyle günlük sıcaklık farkları ve tekerlek yükleri altında farklı kalınlık, genişlik ve uzunluklardaki beton yol kaplamalarının gerilme analizleri yapılmıştır. Hafif beton ile yapılmış bir yol kaplamasının mekanik ve yoğunluk değerleriyle birlikte daha düşük gerilme ve deformasyon değerleri oluşturduğu bulunmuştur. Ayrıca kaplamada derz kesim derinliğinin kaplamanın 1/3'ü veya 1/4'ü oranında olmasının yanında 1/8 oranında da kesilmesi halinde kaplamada oluşacak olan çekme gerilmesi değerlerinde aynı etkinin oluşacağı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Beton yol kaplaması, Sonlu elemanlar yöntemi, Hafif beton, Isıl genleşme katsayısı, Elastisite modülü

PhD. Thesis

SUMMARY

STRESS ANALYSIS OF TRADITIONAL AND LIGHTWEIGHT CONCRETE ROAD PAVEMENT UNDER TEMPERATURE CHANGES AND TRAFFIC LOAD USING FINITE ELEMENT METHOD

Ümit Yaşar BAL

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof.Dr. M. Vefa AKPINAR
2024, 160 Pages

As in the whole world, in our country, RCC, jointed unreinforced, jointed reinforced and continuously reinforced concrete road pavement applications continue to increase. Despite the increase in the use of concrete road pavements, it is seen that different crack situations in the pavements continue. Daily temperature changes create extra stress in addition to the wheel load for the concrete road pavement. Joints are cut to reduce these stresses and to prevent random cracks in the concrete road pavement. However, it has been observed that joint cuts bring additional costs and significantly weaken the pavement in the cut areas.

Within the scope of this thesis, lightweight concrete and traditional concrete data were taken as input for the finite element method and stress analyses of concrete road pavements with different thickness, width and length were performed under daily temperature differences and wheel loads with the ANSYS finite element method. It was found that a road pavement made of lightweight concrete created lower stress and deformation values together with mechanical and density values. In addition, it was observed that the same effect would occur in the tensile stress values that would occur in the pavement if the joint cutting depth was $\frac{1}{3}$ or $\frac{1}{4}$ of the pavement as well as $\frac{1}{8}$.

Key Words: Concrete road pavement, Finite element method, Lightweight concrete, Thermal expansion coefficient, Elasticity modulus

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.4.1. KTÜ’de ölçülen günlük sıcaklık değerleri	9
Şekil 1.4.2. Beton yol kaplamasında sıcaklık dağılımı	10
Şekil 1.4.3. Beton yol kaplaması boyunca sıcaklık dağılımı	10
Şekil 1.6.1. Beton yol kaplamasında gece sıcaklık dağılımları	15
Şekil 1.6.2. Beton yol kaplamasında gündüz sıcaklık dağılımları	15
Şekil 1.6.3. Beton yol kaplamasındaki sıcaklık dağılımları tipik bileşenleri	16
Şekil 1.6.4. Gece ve gündüz beton yol kalınlığı boyunca sıcaklık dağılımları	17
Şekil 1.6.5. -2,7 0C’den 11 0C sıcaklık farkına kadar beton yol kaplamasında meydana gelen deplasman değerleri	19
Şekil 1.6.6. Sıcaklık dağılımına karşılık gelen yer değiştirmeler	20
Şekil 1.6.7. Numunedeki farklı noktalardaki sıcaklık dağılımları	22
Şekil 1.6.8. Beton yol kaplamasındaki sıcaklık dağılımı	23
Şekil 1.6.9. Farklı kalınlıklardaki beton yol kaplaması	24
Şekil 1.6.10. Beton yol kaplamasındaki sıcaklık eğrileri	24
Şekil 1.6.11. Hava sıcaklığı ve beton tabaka sıcaklık değişimi	25
Şekil 1.6.12. Tabakada derinlik boyunca oluşan sıcaklık dağılımı	26
Şekil 1.6.13. Hava sıcaklığına göre yol kaplamasındaki sıcaklık değişimi	27
Şekil 1.6.14. Beton yol kaplaması içerisindeki sıcaklık dağılımları	27
Şekil 1.6.15. Gündüz kaplama içerisindeki sıcaklık ile çekme ve basınç gerilme değerleri	29
Şekil 1.6.16. Gece kaplama içerisindeki sıcaklık ile çekme ve basınç gerilme değerleri ..	29
Şekil 1.6.17. Polonya’da hava ve kaplamada ölçülen sıcaklık değerleri	30
Şekil 1.6.18. Gün içerisinde 24 saat boyunca alınmış olan sıcaklık değerleri	31
Şekil 1.6.19. Beton kaplama kalınlığı boyunca sıcaklık dağılımı	32
Şekil 1.6.20. Beton kaplama kalınlığı boyunca sıcaklık dağılımı	32
Şekil 1.6.21. Pozitif sıcaklık farkında meydana gelen gerilme değerleri	33
Şekil 1.6.22. Negatif sıcaklık farkında meydana gelen gerilme değerleri	33
Şekil 1.6.23. Plak köşesindeki kalınlık boyunca oluşan sıcaklık dağılımları	38
Şekil 1.6.24. Yaz mevsiminde kaplama üzerinde oluşan gerilme değerleri	39

Şekil 1.6.25. Yaz mevsiminde kaplama altında oluşan gerilme değerleri	39
Şekil 1.6.26. Kış mevsiminde kaplama üzerinde oluşan gerilme değerleri	40
Şekil 1.6.27. Kış mevsiminde kaplama altında oluşan gerilme değerleri	40
Şekil 1.6.28. Kaplama üstü ile altının sıcaklık değişimi	41
Şekil 1.6.29. Sonlu elemanlar yöntemi ile kaplamadaki kalınlık boyunca sıcaklık değişimi	42
Şekil 1.6.30. Sonlu elemanlar yöntemi ile beton yol kaplamasında kalınlık boyunca sıcaklık değişimi	42
Şekil 1.6.31. Ağustos ve Eylül ayı gece ve gündüz sıcaklık verileri	43
Şekil 1.6.32. Mayıs ayındaki hava ve beton kaplama sıcaklıkları	45
Şekil 1.6.33. Şubat-Mart ayındaki hava ve beton kaplama sıcaklıkları	45
Şekil 1.6.34. Beton plakta günlük sıcaklık değişimi	49
Şekil 1.6.35. Beton plakta köşe, kenar ve merkezde meydana gelen yer değiştirmeler	49
Şekil 1.8.3.1. 2018 TBDY	59
Şekil 1.8.3.2. Zhao ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadaki gerilme-birim şekil değiştirme değerleri	60
Şekil 1.8.3.3. Sarıbaş'ın yaptığı çalışmadaki gerilme-birim şekil değiştirme değerleri	61
Şekil 2.1. Akış Diyagramı	63
Şekil 2.7.1.1. Ansys programına girilen yol	86

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.6.1. Farklı tarihlerdeki beton yol kaplamasındaki sıcaklık farkları ve bu farklara karşılık gelen deplasman değerleri	21
Tablo 1.6.2. Tabaka boyunca ölçülen sıcaklık değerleri	26
Tablo 1.6.3. Beton kaplamanın alt ve üst yüzeyinin farklı sıcaklıklarda olmasına göre elde edilen gerilme değerleri	44
Tablo 1.6.4. Tekerlek yüklemesine göre meydana gelen gerilme değerleri	44
Tablo 1.8.1. Lifli ve lifsiz betonda yapılan üç ve dört noktalı eğilmede çekme dayanımı değerleri	56
Tablo 1.8.2.1. Oluşturulan beton numune grupları	58
Tablo 1.8.2.2. Kaya dolgulu beton ile kendiliğinden yerleşen betonun farklı numune boyutlarındaki ısı genleşme katsayıları	58
Tablo 1.8.3.1. Standartlara göre elastisite modülü formülleri	61
Tablo 1.8.3.2. Çeşitli oranlarda lastik kullanılan betonun elastisite modülleri	62
Tablo 2.3.1. LVDT okumalarıyla birlikte bulunan ısı genleşme katsayıları	75
Tablo 2.3.2. LVDT ve strain gauge okumalarıyla birlikte bulunan ısı genleşme katsayıları	75
Tablo 2.4.1. Standartlara göre elastisite modülü değerleri	77
Tablo 2.5.1.1. Geleneksel betonun mekanik özellikleri ve ısı genleşme katsayısı	78
Tablo 2.5.1.2. Beton sınıfları ve ısı genleşme katsayılarına göre betonun dayanabileceği sıcaklık değerleri	79
Tablo 2.5.1.3. Beton sınıfının maksimum absorbe edebileceği sıcaklık değerine göre maksimum uzunluktaki kaplama mesafesi	80
Tablo 2.6.1. Kabay'ın çalışmasına göre hafif betonun adlandırılması	82
Tablo 2.6.2. Laboratuvar çalışmasından elde edilen verilerle bulunan kaplama uzunluğu ve sıcaklık farkı değerleri	84
Tablo 2.7.1.1. Zemin tabakasının farklı çalışmalardaki mekanik değerleri	86
Tablo 2.7.1.2. Laboratuvar deneylerinden elde edilen beton ve hafif beton mekanik değerleri	86
Tablo 2.7.1.3. Beton ve Hafif beton mekanik değerleri	87

Tablo 3.6. Sadece yük ve sadece sıcaklık varken beton yol kaplamasındaki gerilme ve deformasyon değerleri	106
Tablo 3.8. Literatürde yapılan çalışmalardan elde edilen gerilme değerleri	112
Tablo 3.9. C30/37 beton verileriyle yapılan yol kaplamasının kalınlık ve sıcaklık değişimlerine göre maksimum çekme gerilmesi, şekil değiştirme ve deformasyon değerleri (5mx5mxh cm)	113
Tablo 3.10.1. 5mx15mx20cm ebatlarındaki %0 GP(C30/37) ve %15 GP içeren beton yol kaplamasında $\Delta T=15^{\circ}\text{C}$ ve 5m’de bir derz yapılmasıyla C hattında x doğrultusunda meydana gelen maksimum gerilme değerleri	138
Tablo 3.10.2. 5mx15mx20cm ebatlarındaki %0 GP(C30/37) ve %15 GP içeren beton yol kaplamasında $\Delta T=15^{\circ}\text{C}$ ve 5m’de bir derz yapılmasıyla E hattında y doğrultusunda meydana gelen maksimum gerilme değerleri	139
Tablo 3.10.3. Derz üzerinde meydana gelen maksimum çekme gerilmesi değerleri	140

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

NHDP	:Ulusal Otoyol Geliştirme Programı
JPCP	:Derzli donatısız beton yol kaplaması
PCC	:Portland Çimentolu Beton
σ_e :	:Eğilmede çekme gerilmesi
F	:Kırılma anındaki yük
L	:İki mesnet arasındaki açıklık
b	:Numunenin genişliği
d	:Numunenin yüksekliği
E	:Elastisite Modülü
ε	:Birim şekil değiştirme
α	:Isıl genleşme katsayısı
TBDY	:Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
ΔL	:Sıcaklık altında boyca değişme miktarı
ΔS	:Sıcaklık altında alanca değişme miktarı
ΔV	:Sıcaklık altında hacimce değişme miktarı
L	:İlk sıcaklıktaki cismin uzunluğu
S	:İlk sıcaklıktaki cismin alanı
V	:İlk sıcaklıktaki cismin hacmi
Q	:Tüketilmesi gereken ısı
m	:Malzemenin ağırlığı
c	:Malzemenin özgül ısısı
ΔT	:Malzemede oluşan sıcaklık farkı
Q	:Isı miktarı
λ	:Isı iletim katsayısı
A	:Alan
d	:Malzemenin kalınlığı
t	:Geçen zaman
GP	:Genleştirilmiş Perlit
%0 GP	:Geleneksel beton (Şahit beton)
σ_x	:x doğrultusundaki gerilme

σ_y	:y doğrultusundaki gerilme
σ_z	:z doğrultusundaki gerilme
Üst	:Kaplamanın üstü
Alt	:Kaplamanın altı
GP	:Genleştirilmiş perlit içeren
% 15 GP	:%15 genleştirilmiş perlit içeren beton
Y	:Yük varken
S	:Sıcaklık varken
Y+S	:Yük ve sıcaklık beraber varken



1.GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Modern olarak ilk beton yol kaplaması, Avustralya'nın Sydney şehrinde 1880 yılında yapılmış olup 50 yıl hizmet vermiştir. On yıl kadar sonra A.B.D.'de ilk beton yol Ohio Eyaleti'nin Bellefontaine şehrinde 1891 yılında yapılmıştır. Beton yolların yaygınlaşmaya başlaması 20.yüzyılın ortalarına doğru hızlanmıştır. Yüzyılın ilk yarısında A.B.D.'nin yanında Fransa ve Belçika'da, sonrasında Almanya'da beton yollar yapılmıştır. 1930'lu yıllarda 2. Dünya Savaşı'na hazırlanan Almanya'da beton otoyolların uzunluğu 4.000 km'yi bulmuştur. Son 50 yılda Belçika, Fransa, Almanya ve Avustralya'ya ilaveten Avusturya, İspanya, İngiltere, Kanada ve Güney Afrika gibi ülkelerde de beton yollar yapılmıştır. Son yıllarda Azerbaycan, Hindistan ve Çin'de beton yol projeleri başlamıştır (Yeğınobalı, 2010).

Günümüzde ülkemizde ve dünyada yüzlerce kilometre uzunluğunda beton yol kaplaması yapılmaktadır. ABD'de farklı eyaletlerde farklı kullanım oranları olmakla birlikte genelde ağır trafiğe maruz kalan yollarda derzli donatılı veya sürekli donatılı beton yollar tercih edilirken kırsal yollarda silindirle sıkıştırılmış beton yollar tercih edilmektedir. Örneğin, Los Angeles gibi büyük şehirlerin çevre yollarında beton kaplama oranı %90'a yaklaşmaktadır. Hindistan'da 1300 km uzunluğunda beton karayolu bulunmakta olup birçok kesimde yenilenecek yollar beton kaplama olarak planlanmıştır (URL-1, 2023).

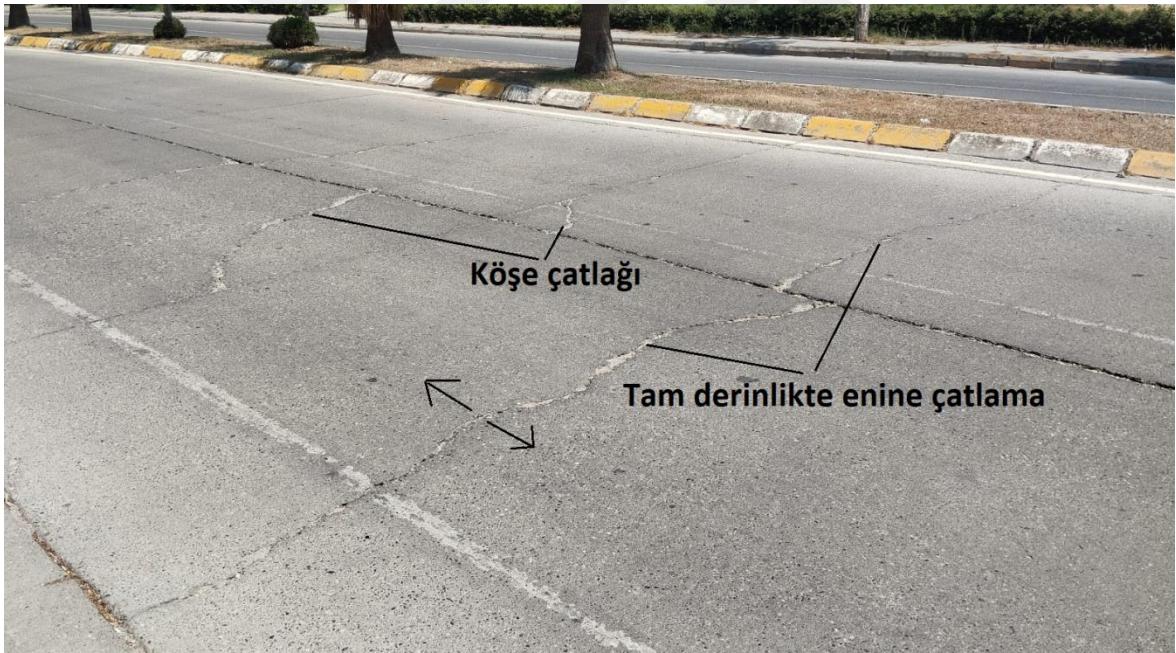
Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği bakanlığının istatistik verilerine göre ülkemizde Mart 2023'te yayımlanan bültene göre 2022 yılsonu itibariyle sadece beton kaplama olan köy yollarının uzunluğu yaklaşık 6950 km'dir. Bu bağlamda beton yol kaplamaları diğer yol kaplamalar arasında %3,65'lik bir orana sahiptir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023). Bunların dışında havaalanları, beton park alanları, lojistik alanlar, endüstriyel zemin sahaları, liman kaplamaları ve kapalı otopark alanlarının tasarımı da beton kaplamalar kullanılmaktadır.

Beton yol kaplamalarının kullanımı her geçen gün artmakla beraber sıcaklık altında genleşmeden, soğuma anında büzüşmeden ve trafik yüklerinden dolayı gerilme artışları ve gerilmelere bağlı olarak kaplamalarda çatlamlar meydana gelmektedir. Bir beton yol kaplamasında beton döküm aşamasında, beton dökümünden sonra derz kesimi yapılırken,

kullanım aşamasında trafik yükünden dolayı veya trafik yükü olmasa bile günlük sıcaklık farkından dolayı meydana gelen gerilmelerden dolayı çatlaklar görülebilmektedir.

Ulusal Otoyol Geliştirme Programı (NHDP) kapsamında her yıl yüzlerce kilometre uzunluktaki beton yollar, en yeni yöntemler kullanılarak yapılmaktadır. En son teknoloji ekipmanlar ve yöntemler kullanılarak yapılmasına rağmen beton yol kaplamalarında çatlaklar oluşmaktadır. En çok görülen sorunlar, tam derinlikte enine ve boyuna çatlama, oturmaya bağlı çatlama, köşe çatlakları, kayma donatısı çubukları üzerinde çatlaklar, kaplama menfezleri üzerinde çatlaklar ve patlamalar vb. şeklinde olmaktadır (Resim 1.1) (Kumar & Mathur, 2023).

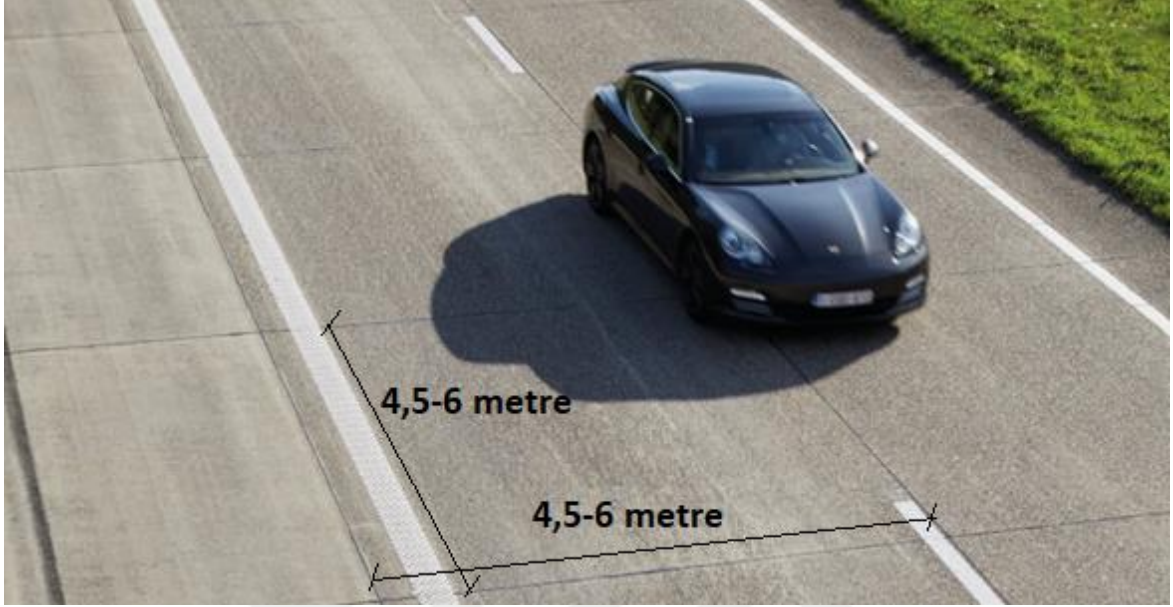
Resim 1.1'den görüldüğü üzere beton yol kaplamasına enine ve boyuna tam derz yapılmış olmasına rağmen çatlama meydana gelmiştir. Çatlaklar bir anodan başlayıp diğer anoya devam etmiştir. En son teknikler kullanılmış olsa bile beton yol kaplamasında sıcaklık farklarından dolayı çatlama meydana gelmektedir.



Resim 1.1. Beton yol kaplamasında meydana gelen çatlaklar

Tüm malzemeler gibi beton da sıcaklık değişimleriyle genişler ve büzülür. Beton dökümünden itibaren 2-6 saat sonrasında priz almaya başlamaktadır ve priz aldıkça da rötre çatlakları oluşabilmektedir. Beton kaplama plakalarının üstü ile altı arasında oluşan sıcaklık ve nem değişimi, kaplamanın kıvrılmasına ve eğilmesine neden olmaktadır. Bu da beton yol kaplamasının çatlamasına neden olmaktadır. Genellikle her 4,5-6 metrelik

aralıkta kesilen büzülme derzleri, özellikle bu tür çatlakların konumunun kontrol edilmesi içindir (Resim 1.2) (Rens, 2020).



Resim 1.2. 4,5-6 metre aralıkta derz kesilmiş beton yol kaplaması (Rens, 2020)

1.2. Beton Dökümü Sırasında Oluşan  atlaklar

1.2.1. Plastik R tre  atlakları

Sıcak ve rüzgarlı havalarda beton dökümü yapıldığında gerekli  zen gösterilmediği takdirde plastik rötre çatlakları oluşmaktadır. Bu çatlaklar betonun yerleştirilmesinden itibaren ilk 30 dakika ile 5 saat arasında genelde geniş y zeeye dökülen betonlarda görülür (Resim 1.2.1).

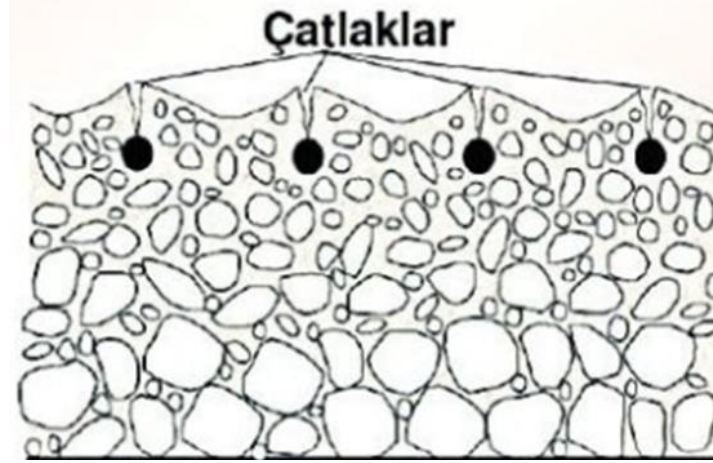
Bu tür çatlaklar genellikle yol, park ve havaalanı gibi geniş y zeeye sahip betonlarda oluşmaktadır. Beton yüzeyindeki suyun buharlaşma hızı, betonun içindeki suyun yükselme hızından fazla ise betonun yüzeyindeki su kurumaya, dolayısı ile beton hacimsel olarak b z lmeye başlamaktadır. Alttaki beton bu b z lmeye uyum sa layamadı ı için, üst tabakasında çekme gerilmeleri oluşur ve betonun çekmeye karşı  ekil değiştirme kapasitesinin de düşük olması nedeniyle beton  atlayabilmektedir (Yıldırım, 2022).



Resim 1.2.1. Betonda oluşan rötre çatlağı

1.2.2. Oturma Çatlakları

Bu çatlaklar genellikle kirişlerin üst yüzeye yakın donatılarının hemen üstünde veya iyi sıkıştırılmamış ve oturması kendiliğinden devam eden temel betonlarında oluşmaktadır. Taze beton dökümünde iri agrega taneleri dibe çökerken su yüzeye doğru hareket eder. Donatıların üst kısmında kalan yerlerde çimento hamuru yer çekimi etkisiyle beton donatısının sağına ve soluna doğru hareket etmek ister. Bu aşamada donatı üzerindeki betonda oluşan çekme gerilmesi donatı paralelindeki kısımlarda çatlamalara sebep olmaktadır (Resim 1.2.2). Bu gibi çatlamların oluşmaması için kıvamı çok akıcı olmayan plastik kıvamda betonların dökülmesi, özellikle kalın temellerin vibratörlerle iyice sıkıştırılması ve kıvamı yüksek olan beton dökümü yapılmışsa beton dökümünden yaklaşık bir-iki saat sonra (betonun prizini almaya başladığı zamanlarda) beton yüzeyine ikinci bir master uygulanması yapılması yararlı olacaktır (Yıldırım, 2022).



Resim 1.2.2. Betonda oturma çatlağı

1.3. Sertleşmiş Beton Çatlakları

Sertleşmiş beton, dayanımını kısmen de olsa kazanmış betondur. Ancak sertleşmiş beton dendiğinde 28 günlük veya daha yaşlı betonlar anlaşılmaktadır. Sertleşmiş beton çatlakları bir aylık betonda olabileceği gibi çok uzun yıllar beklemiş betonlarda da görülebilir. Çatlaklar çok geniş yüzeyli betonlarda (çok büyük derzsiz, anosuz veya büyük anolu beton dökümü yapıldığında veya gecikmiş derz kesimi yapıldığında) kuruma rötresi olarak veya kimyasal etkilerden dolayı oluşabilmektedir (Resim 1.3.1). İlk başta çok küçük olan çatlaklar daha sonra büyümekte, bunun arkasından da beton yüzeyinde kırılma, soyulma, dökülme ve patlamalar görülmektedir. Önlem alınmadığı takdirde, beton elemanlar zamanla tamamen tahrip olabilmektedir (Yıldırım, 2022).

Çok büyük ano kullanılmasından dolayı oluşabilen bu tür çatlakların oluşmaması için beton dökümlerinde en büyük ano boyutu, $10-12 \text{ m}^2$ civarında olmalıdır. Bu tip çatlaklar, plastik rötire gibi başlayıp kuruma rötresi gibi devam etmektedir. Çatlaklar başladığında ve derzler uygun derinlikte ve özellikle zamanında kesilmediğinde, çatlak bir anonun kenarına gelir ve o noktaya yakın yerden diğer anoya devam eder. Bu tip çatlakların oluşumu, beton sınıfının ve dozajının yüksek olduğu durumlarda da görülmektedir. Ano büyüklüğünden meydana gelen çatlakların bir kısmı da plastik rötire karakterine dönüşebilmektedir (Yıldırım, 2022).



Resim 1.3.1. Beton yol kaplamasında kuruma rötresi  atlaklı (URL-2, 2023)

Derz kesim işlemi, uygun zamanda ve uygun testere ucuyla yapılmadığında kesim esnasında betonun parçalanmasıyla oluşan tahribatlar ve farklı yönlerde meydana gelen çatlamlar oluşabilmektedir. Bu tür durumların önlenmesi için derz kesim zamanlamasının çok iyi ayarlanmış olması gerekir. Derz kesim zamanlaması; beton özelliklerine, çevresel faktörlere ve derz kesim testeresinin özelliklerine bağlıdır. Doğru bir derz kesimi yapılabilmesi için düz ve keskin kenarlı farklı boyutlarda elmas uçlu makineli testereler kullanılmalıdır. Bu süreçte oluşan beton çamuru kesim esnasında veya sonrasında temizlenmelidir (T.C. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2016). Doğru uygulanmış derz kesimi Resim 1.3.2’de ve doğru olmayan derz kesimi Resim 1.3.3’te verilmiştir.



Resim 1.3.2. Doğru uygulanmış derz kesimi (URL-3, 2023)



Resim 1.3.3. Doğru olmayan derz kesimi (T.C. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2016)

1.4. Günlük Sıcaklık Farkından Dolayı Oluşan Çatlaklar

Gün içinde güneşten gelen ısıdan dolayı beton yol kaplamasının üst yüzeyi, beton yol kaplamasının alt yüzeyinden daha sıcaktır. Bu da tabakanın altı ile üstü arasında 20°C 'ye kadar sıcaklık farkı oluşturmaktadır (Seferoğlu vd., 2015; Choubane & Tia, 1992; Siddique vd., 2005; Maitra vd., 2013; Shreenath & Jeffery 2005). Benzer şekilde gece olduğunda beton yol tabakası üst yüzeyi dış ortamdan dolayı daha hızlı soğuduğundan, alt yüzeyinden daha soğuktur ve -15°C 'ye kadar sıcaklık farkı oluşmaktadır. Sıcaklık farkı oluşması genleşmeye ve beton yol tabakasının üstü ile altının farklı zamanlarda birbirlerine göre daha uzun veya daha kısa olmasına sebep olmaktadır (Resim 1.4.1 ve Resim 1.4.2). Bu kısalık veya uzunluk da beton yol tabakası içerisinde büyük gerilmelere ve dolayısıyla beton yol kaplamasının çatlamasına neden olmaktadır.



Resim 1.4.1. Gündüz beton yol kaplamasında oluşan gerilmeler



Resim 1.4.2.Gece beton yol kaplamasında oluşan gerilmeler

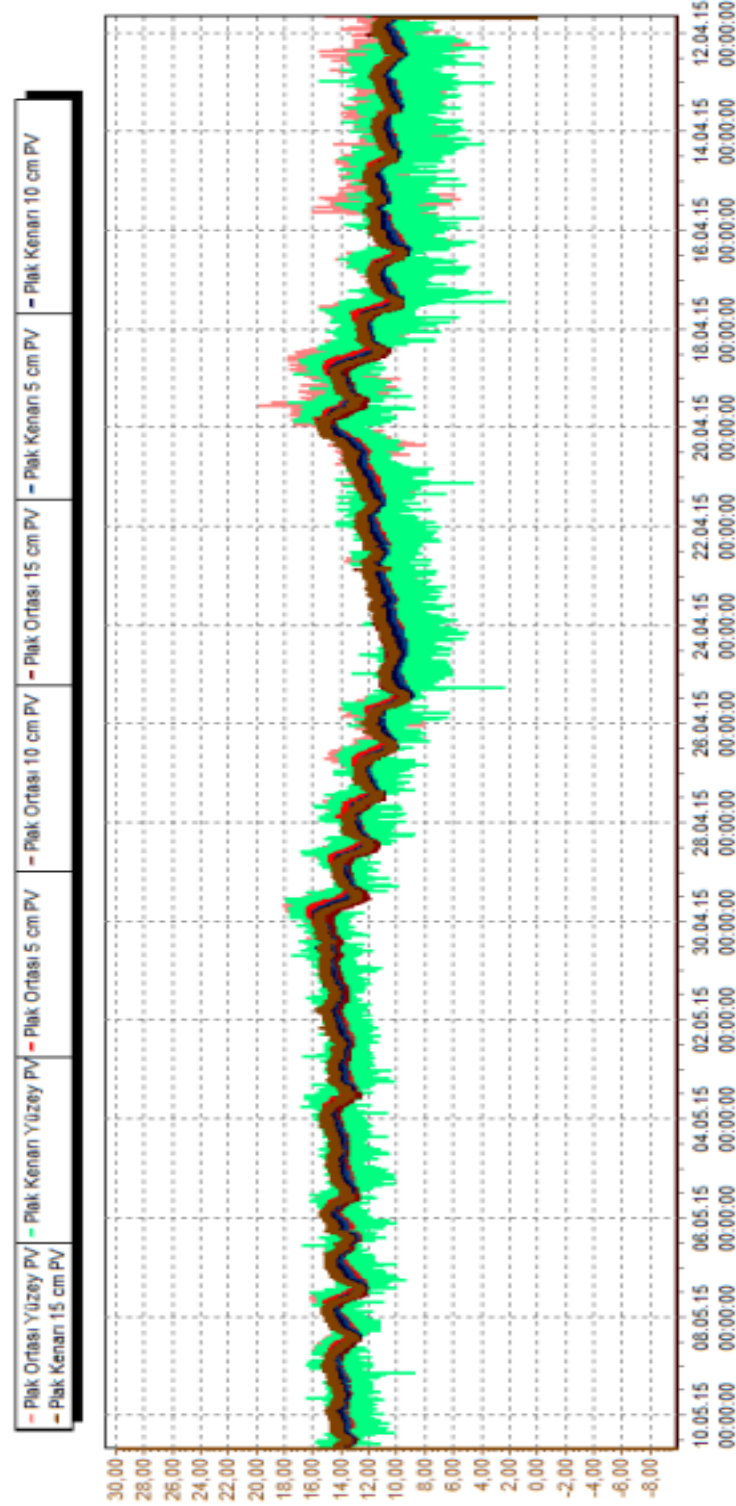
Bu çatlaklar, zamanla arasına giren suyun donma çözünmesiyle birlikte artmakta ve hem temel tabakasının yumuşamasına hem de beton yolun deforme olmasına ve kullanılamaz hale gelmesine neden olmaktadır.

Beton kaplamalarda ısı değişiminin gerilme oluşturduğu ilk olarak Wastergaard tarafından ortaya atılmıştır. Onun kaplama derinliği boyunca lineer olarak dağılan sıcaklık dağılımı varsayımı kıvrılmaya maruz kalan beton kaplamalardaki gerilmelerin tahmininde geniş çapta kabul görmüştür. Wastergaard'ın beton kaplama boyunca oluşan ısı gerilmeleri fikri Bradbury tarafından sonlu boyutlara indirgenmiş ve kaplamanın alt ve üst yüzey sıcaklıklarının bilinmesi halinde oluşacak termal gerilmenin kesin olarak bulunabileceği fikri ileri sürülmüştür. Daha sonraki çalışmalar, beton kaplamaların açıkta kalan kenar yüzeylerinin üst yüzeydeki ısı akışından kolayca etkilenebildiği için lineer değil nonlineer bir sıcaklık dağılımına sahip olduğunu göstermiştir (Seferoğlu vd., 2015).

Kaplama sıcaklıkları, hava sıcaklıklarının yanı sıra yağış, rüzgâr hızı ve güneş radyasyonundan etkilenir. Bir üstyapı sisteminin tepkisi, yüzey tabakalarının sıcaklığından ve zeminlerin nem içeriğinden büyük ölçüde etkilenir. Sıcaklık ve yağıştaki yıllık, mevsimsel ve günlük değişimler kaplamanın hizmet ömrü üzerinde büyük etkisi vardır. Bu nedenle iklimsel faktörler, istenen performansın sağlanmasına yardımcı olmak için kaplama tasarımı analizine dâhil edilmelidir (Ongel & Harvey, 2004).

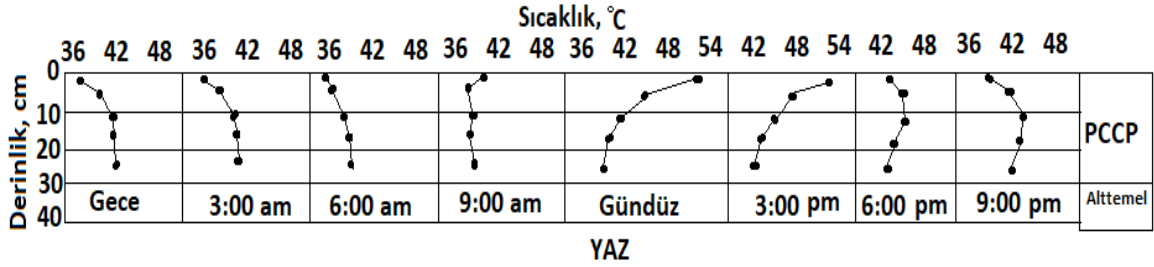
Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hızlandırılmış Yol Test Laboratuvarında gerçek koşullar altında yol temel tabakası üzerine C30 betonuyla dökülerek yapılan kaplamada, ısı ölçümleri kenar ve orta bölgelerinde kaplama kesiti boyunca günlük olarak alınarak bir çalışma yapılmıştır. Laboratuvarında alınan ısı verileri ANSYS sonlu elemanlar programına girilerek analizler yapılmıştır. Sonrasında beton kaplamanın yüzeyinde, köşe ve kenar bölgelerinde çatlakları meydana getiren ısı genleşmeye bağlı gerilmeler tespit edilmiştir. Sonuçlar, beton yollarda kaplamanın üst ve

alt yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının 15 °C'ye kadar çıktığını göstermektedir (Şekil 1.4.1) (Seferoğlu vd., 2015). Kaplamada günlük sıcaklıklardan dolayı oluşan sıcaklık farkları Şekil 1.4.2 ve Şekil 1.4.3'te verilmiştir.

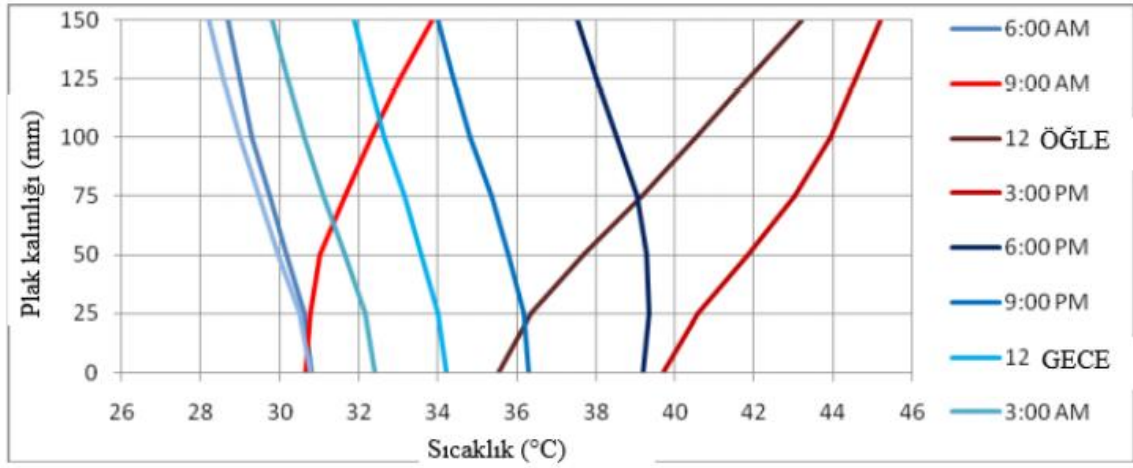


Şekil 1.4.1. KTÜ'de ölçülen günlük sıcaklık değerleri (Seferoğlu vd., 2015)

Çalışmada 12 Nisan ile 10 Mayıs tarihleri arasında iki günde bir alınan sıcaklık verilerine bakıldığında sıcaklıktaki en büyük değişim plak kenar yüzeyinde meydana gelmektedir. Bu bölgedeki sıcaklık değişimi, Nisan ayında Mayıs ayına göre daha yüksek çıkmaktadır. Genel itibariyle sıcaklık değişimleri, plağın çeşitli noktalarından alınan veriler göz önüne alındığında birbirleriyle paralellik göstermektedir. Nisan ayında genel itibariyle 8 °C civarında olan kaplama sıcaklığı Mayıs ayında olan 16 °C'ye kadar çıkmaktadır. 20 Nisan'da meydana gelen sıcaklık artışının sebebi, o gün hava şartlarının güneşli ve sıcak olduğu göstermektedir.



Şekil 1.4.2. Beton yol kaplamasında sıcaklık dağılımı



Şekil 1.4.3. Beton yol kaplaması boyunca sıcaklık dağılımı (Kayıpmaz, 2019)

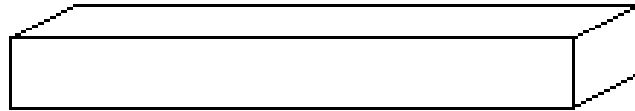
Şekil 1.4.2'de 250 mm kalınlığındaki plaktan alınan ölçümlerden görüldüğü üzere yaz ayında gece beton yol kaplamasının alt yüzeyi daha sıcakken, gündüz üst yüzeyi daha sıcak hale gelmektedir. Gündüz saat 9.00 ile gece saat 18.00'de sıcaklıklar hemen hemen eşit olup sıcaklık farkı sıfıra çok yakındır. Farklı beton yol kaplaması dizaynına göre bu saatler değişebileceği gibi genellikle bu saatlerde sıcaklık farkı sıfıra yaklaşmaktadır.

Başka bir deyişle yaz aylarında 18.00'dan 9.00'a kadar beton yol kaplamasının altı daha sıcakken, 9.00'dan 18.00'e kadar beton yol kaplamasının üstü daha sıcaktır. Beton yol kaplamasında güneşten gelen radyasyon ışınına ve yol kaplamasının ısı iletim katsayısına göre farklı saatlerde değişik nonlinear bir sıcaklık değişimi meydana gelmektedir.

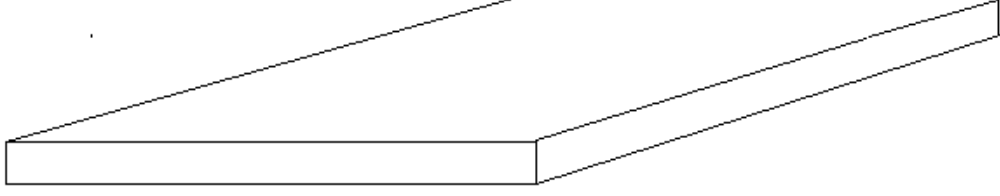
Şekil 1.4.3'de 15 cm kalınlığındaki plaktan alınan veriler göz önüne alındığında kaplamanın altı ile üstü arasındaki en büyük sıcaklık farkı gündüz saat 12.00'de $7,5^{\circ}\text{C}$ olarak meydana gelmektedir. Akşam 18.00 ile gece 3.00 saatleri arasında kaplamada yaklaşık olarak $2,5^{\circ}\text{C}$ 'lik negatif sıcaklık farkı meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca kaplamanın alt $2,5\text{ cm}$ 'inde lineer bir sıcaklık dağılımı oluşurken $12,5\text{ cm}$ 'lik kısmında nonlinear bir sıcaklık dağılımı meydana gelmektedir.

1.5. Betonda Isıl Genleşme

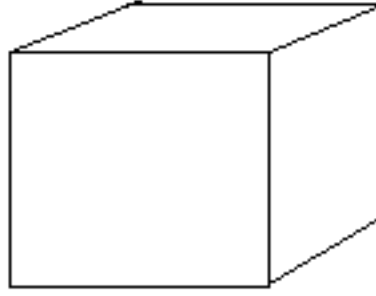
Beton elemanlarda genleşme üç şekilde oluşmaktadır. Birinci genleşme şekli iki boyutu diğer boyutuna göre önemsiz veya küçük olan genleşmedir ve tek doğrultuda genleşme (Resim 1.5.1) olduğu varsayılır. Boyca genleşme olan bu genleşmeye çubukların genleşmesi örnek olarak verilebilir. Genleşme katsayısı α olarak alınır. İkinci genleşme şekli iki boyutunun üçüncü boyutundan büyük veya daha önemli olduğu genleşmedir (Resim 1.5.2). Bu genleşme şekline yüzeylerin veya kabukların genleşmesi örnek olarak verilebilir. Alanca genleşme olan bu genleşmenin genleşme katsayısı 2α 'dır. Üçüncü genleşme şekli de üç boyutunun da önemli olduğu hacimsel genleşmedir (Resim 1.5.3). Buraya küre veya üç boyut ölçüsünün de önemli olduğu prizmalar örnek olarak gösterilebilir. Genleşme katsayısı 3α olarak alınır.



Resim 1.5.1. İki boyu diğer boyutuna göre önemsiz olan tek doğrultuda genleşme



Resim 1.5.2. İki boyu diğer boyutuna göre önemli olan iki doğrultuda (yüzeysel) genleşme



Resim 1.5.3. Üç boyutu da önemli olan üç doğrultuda (hacimsel) genleşme

Buradan; derzlerle kesilmiş ve 5mx5mx20cm ebatlarında olan beton yol kaplamasının genleşme şekli, yüzeysel genleşme olarak alınabilirken sıcaklığın ve dolayısıyla genleşmenin kalınlık boyunca doğrusal olmayan bir artışa uğradığı için üçüncü boyutunun da önemli hale geldiği hacimsel genleşme ile de değerlendirilebilir. Ayrıca yol kaplamasının derzle ayrılmadığı durumda kaplama uzunluğunun diğer boyutlardan çok büyük olduğu göz önünde bulundurulursa tek doğrultuda genleşme olduğu da kabul edilebilir. Özellikle sıcaklık farkının beton yol kaplamasını çatlatarak seviyeye ulaşmadığı durumlarda beton yol kaplaması için tek doğrultuda genleşmenin olduğunu söylemek daha doğrudur.

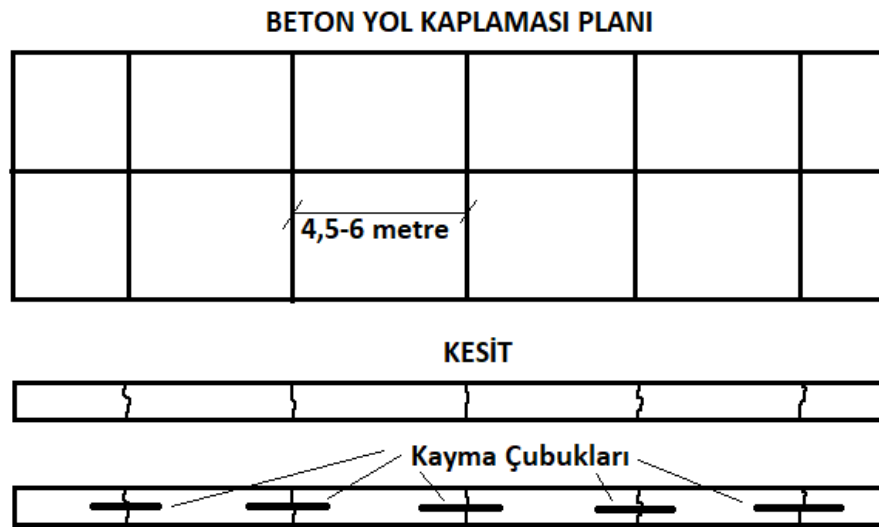
Betonun ısı genleşme katsayısı, beton içindeki çimento oranıyla doğru orantılıdır. Betonda kullanılan agrega malzemesinin ısı genleşme katsayısı da betonun genleşme katsayısının değişkenlik göstermesinde etkilidir. Beton içerisinde ne kadar çimento varsa ısı genleşme katsayısı o kadar fazla olur. Betonun ısı genleşme katsayısı genel itibarıyla $\alpha=(1-1,4) \times 10^{-5} / ^{\circ}\text{C}$ aralığındadır. Bunun için su/çimento oranı beton içerisinde azaltılabilirse betonun sıcaklık altındaki gerilmesi daha az olacaktır. Ayrıca beton içerisindeki iri agreganın yüzey alanı aynı hacme sahip ince agreganın yüzey alanından çok daha az olduğundan daha az çimento hamuru kullanılmasını gerektirir böylece sıcaklık

altında genleşme daha azalacaktır. Bu durumun özel bir hali olarak agrega çok büyürse yan yana geldiklerinde ara boşlukları çok olacağından veya birbirlerini bağlamak için çok çimento hamuru kullanılacağından sıcaklık altında genleşme fazla olacaktır. Bunun için bir denge sağlanmalıdır. Bu doğrultuda agrega-çimento hamuru durumu incelendiğinde betonda kullanılacak olan agrega gradasyonu oldukça önemlidir.

1.5.1. Beton Yol Tabakasında Isıl Gerilme Oluşumu

Gündüz güneş radyasyonu altında beton yol kaplamasının üst yüzeyi daha çok ısınarak kaplama yüzeyinin sıcaklığı artar ve meydana gelen kıvrılmayla birlikte beton yol tabakasının üst yüzeyinde çekme gerilmesi oluşur. Gece ise hava, beton yola göre daha soğuk olduğundan beton yol kaplaması üst yüzeyinde soğuma meydana gelir ve bu sefer de zemin, beton yol kaplamasından daha sıcak hale geçer. Buradaki kıvrılmalar da ters yönde olacağından kaplamanın alt yüzeyinde çekme gerilmeleri meydana gelir.

Beton kaplamalardaki mevsimsel ve günlük sıcaklık değişimleri ve bunun sonucunda oluşan kaplama şekilleri, trafik yüklerinin neden olduğu gerilme ve deformasyonların büyüklüğünde önemli bir rol oynar. Çevresel ve trafik yüklerinin birleşik etkileri nedeniyle derzli kayma donatılı beton yol kaplamaları (Resim 1.5.1.1) kullanılmaktadır (Ashtiani vd., 2013).



Resim 1.5.1.1. Derzli donatısız beton yol kaplaması

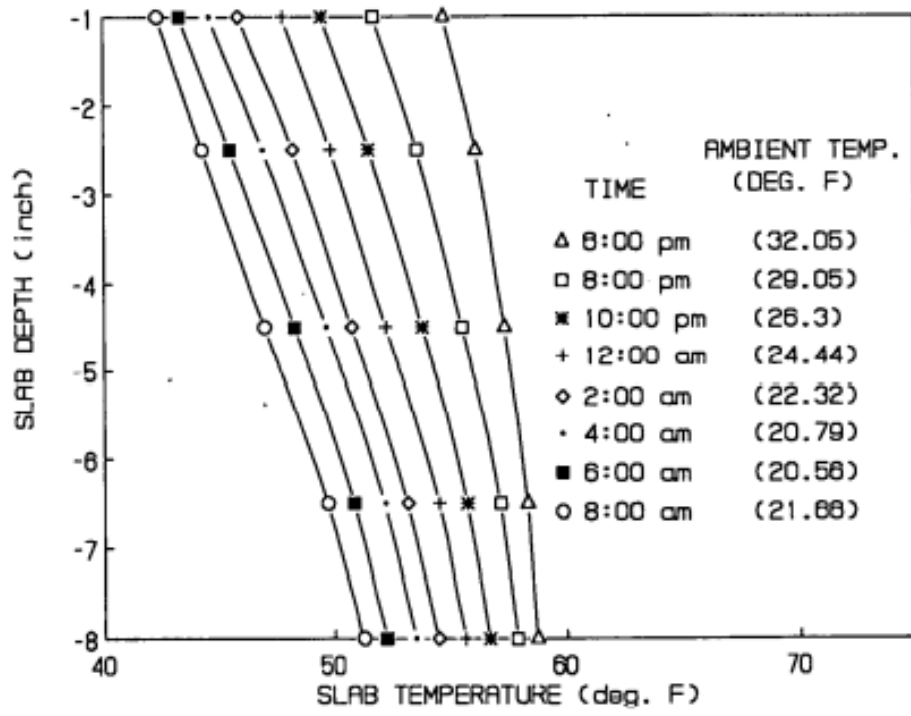
Beton yollarda çok büyük yüzey alanları meydana geldiğinden beton yol tabakalarında günlük sıcaklık farkından meydana gelen ısı genleşmeyi ve bu genleşmeden meydana gelen gerilmeleri azaltmak için belli aralıklarda derz kesilerek yüzey alanı daha küçük hale getirilmektedir.

Enine derz, yol üstyapısının rastgele çatlamasını önlemek için gereklidir. Diğer bir ifadeyle JPCP(derzli donatısız beton yol kaplaması)'nin temel ilkesi, bu derzlerle bilinçli olarak çatlaklar oluşturarak çatlakların yerini ve genişliğini kontrol etmektir (Rens, 2020).

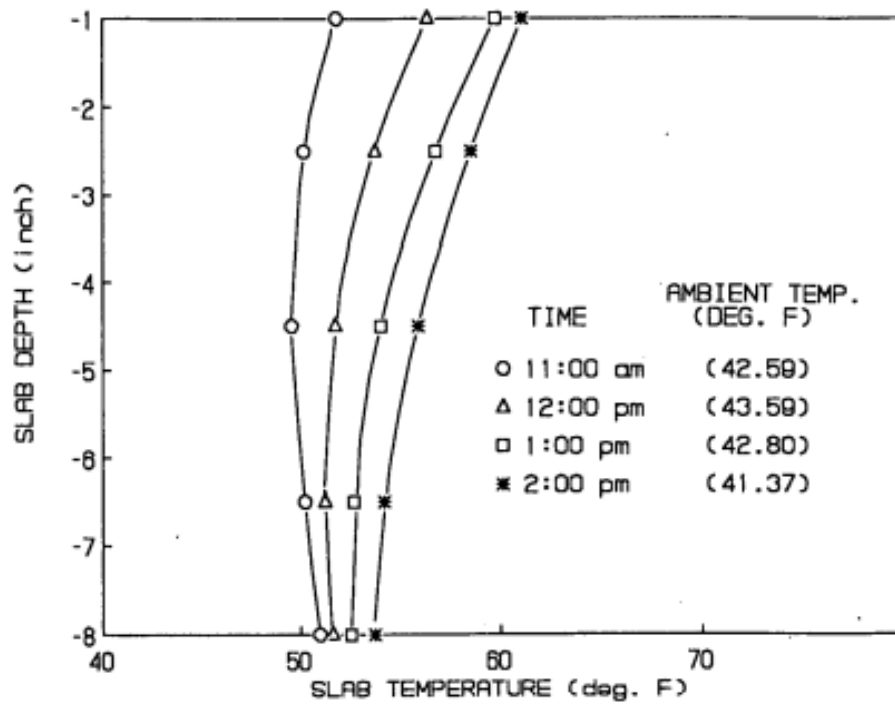
1.6. Literatür Çalışması

1920 ortalarından beri iklim değişiklikleriyle birlikte Portland Çimentolu Beton (PCC) kaplamanın derinliği boyunca sıcaklık ve nem değişimleri, kaplamanın kıvrılmasına ve eğilmesine neden olduğu bilinmektedir. Genel olarak, beton kaplamanın derinliği boyunca sıcaklık farklılıkları kıvrılmaya neden olurken, nem farklılıkları eğilme davranışına neden olur. Hem sıcaklık hem de nem gradyanları, beton yol kaplamanın yukarı veya aşağı eğilmesine neden olur ve kaplamada sıcaklık veya nem gradyanı varsa kaplama düz değildir (Kim vd., 2010).

Choubane ve Tia yaptıkları çalışmada kaplamadaki sıcaklık farkının gündüz pozitif ve gece negatif olma eğiliminde olduğu ortaya koymuşlardır. Yılın farklı dönemlerinde günün çeşitli zamanları için beton yol kaplaması boyunca sıcaklık dağılımında kaydedilen değişiklikler Şekil 1.6.1 ve Şekil 1.6.2'de gösterilmektedir. Şekillerden sıcaklık dağılımının doğrusal olmadığı belirgin bir şekilde görülmektedir. Ayrıca sıcaklık dağılımının eğriliği, ΔT pozitif olduğunda içe doğru ve ΔT negatif olduğunda dışa doğrudur (Choubane & Tia, 1992). Şekil 1.6.1'de akşam saat 20.00'den sabah saat 8.00'e kadar her iki saatte bir alınan sıcaklık verilerine göre sıcaklığın çok az da olsa nonlineer olarak değiştiği görülmektedir. Saat ilerledikçe yüzey sıcaklığı düşmekte ve yüzey sıcaklığına paralel olarak taban sıcaklığı da düşmektedir. Hemen hemen birbirine paralel olan eğrilerden dolayı sıcaklık farkı neredeyse hep aynı kalmaktadır. Akşam saat 20.00'den sonra ise sıcaklık farkı sıfır olma eğilimine dönmüştür.



Şekil 1.6.1. Beton yol kaplasında gece sıcaklık dağılımları (Choubane & Tia, 1992)

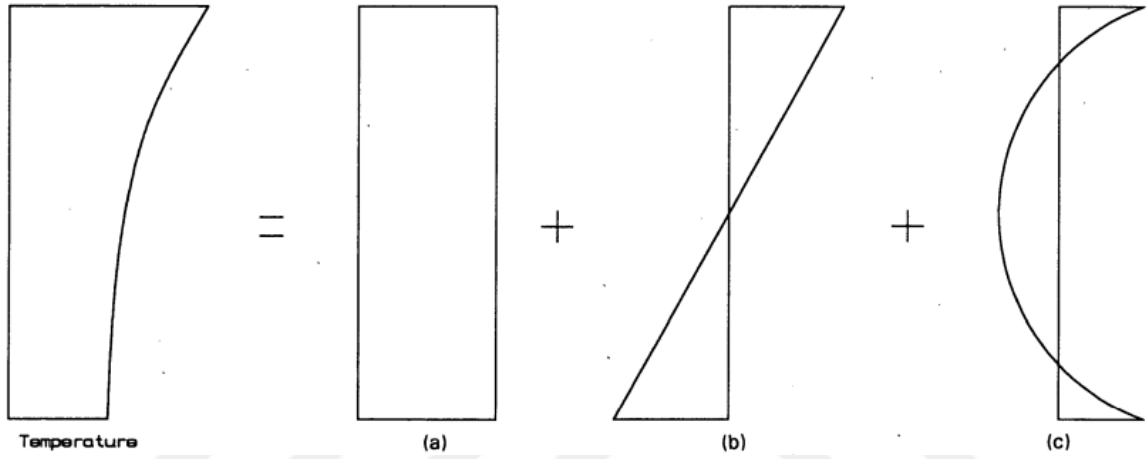


Şekil 1.6.2. Beton yol kaplamasında gündüz sıcaklık dağılımları (Choubane & Tia, 1992)

$$(1,8^{\circ}\text{C}+32=^{\circ}\text{F})$$

Şekil 1.6.2’de gündüz vakti saat 11.00’dan öğlen 14.00’e kadar alınan sıcaklık okumalarında da pozitif yönde sıcaklık farkı olduğu ve en büyük sıcaklık farkının da saat 12.00 ile 13.00 civarında olduğu görülmektedir.

Beton yol kaplamasındaki sıcaklık dağılımı tipik olarak üç bileşene bölünebilir (Şekil 1.6.3): (a) aksenal yer değiştirmeye neden olan bir bileşen (uzamaya veya kısalmaya), (b) bükülmeye neden olan bir bileşen, (c) doğrusal olmayan bileşen (Choubane & Tia, 1992).



Şekil 1.6.3. Beton yol kaplamasındaki sıcaklık dağılımları tipik bileşenleri (Choubane & Tia, 1992)

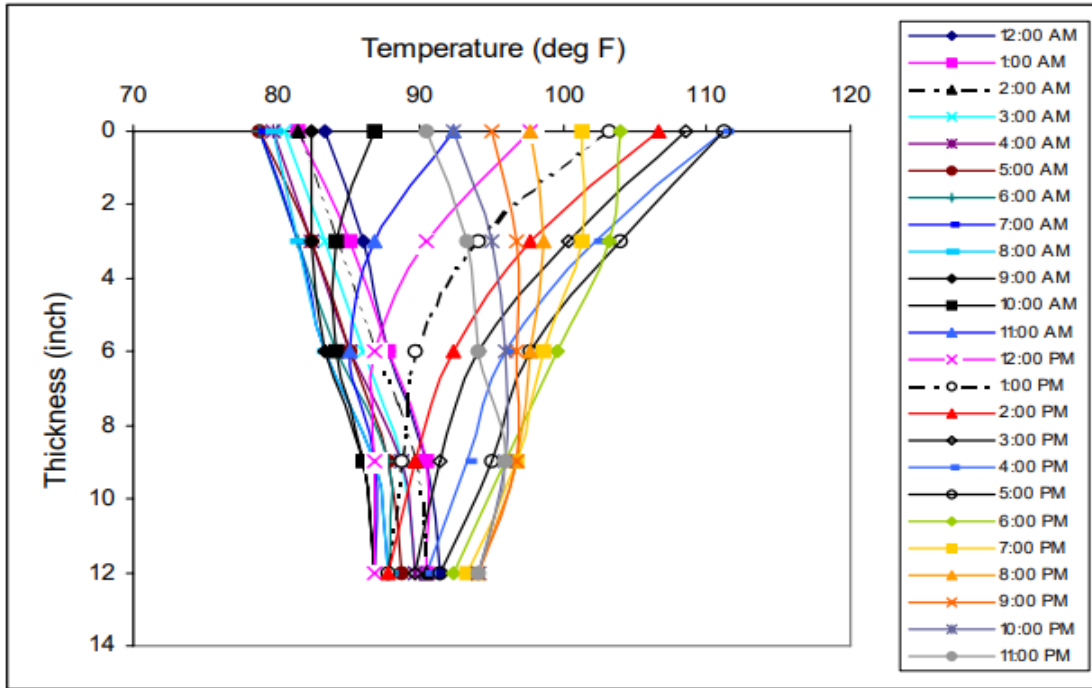
Beton, basınç gerilmelerine karşı daha dayanıklı olduğundan çekme gerilmeleri, basınç gerilmelerinden çok daha kritik hale gelmektedir. Bu nedenle çekme gerilmeleri daha fazla sorun teşkil etmektedir. Doğrusal olmayan bir sıcaklık dağılımında, sıcaklık farkının negatif olduğu gece şartlarında kaplamada toplam maksimum gerilmeyi artırma eğiliminde olduğu, buna karşın gün boyunca pozitif sıcaklık farkının meydana geldiği ve trafik yüküyle birlikte maksimum gerilmeyi azaltma eğiliminde olduğu gözlemlenmektedir (Choubane & Tia, 1992).

Gao ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada güneş radyasyonu, rüzgâr, yağmur gibi etkenlerden dolayı beton kaplama tabakasının üst yüzeyindeki sıcaklığın, ciddi farklılıklar gösterdiği buna karşın kaplama tabanındaki sıcaklığın nispeten sabit olduğunu belirtmişlerdir. Doğrusal olmayan bir sıcaklık gradyanı, kaplama derinliği boyunca oluşur ve bu gradyan, levhanın iç bükey veya dış bükey olarak kıvrılmasına ve doğal olarak da kaplamanın deformasyonuna yol açar. Sıcaklıktan dolayı beton yol kaplamasında oluşan

kıvrılma, kaplama tabanının temas alanını önemli ölçüde azaltabilir ve ağır kamyon yükleri altında kısa sürede deforme olmasına neden olabilir. Sıcaklığa bağlı kıvrılmanın derz bölgelerindeki gerilmeler ve yük transfer verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bilgisine varılmıştır (Gao vd., 2016).

Literatürdeki çalışmalar göz önüne alındığında hava sıcaklığı, beton yol kaplaması ısı iletim katsayısı, günün farklı saatleri, kaplama kalınlığı ve farklı mevsim ve aylara göre sıcaklık dağılımları farklılık göstermektedir.

Siddique ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada sıcaklık dağılım eğrileri Şekil 1.6.4'te verilmiştir. Şekilden kaplama kalınlığı boyunca sıcaklık dağılımının doğrusal olmadığı açıkça görülmektedir. Kaplamanın alt yarısı için kalınlık boyunca sıcaklık dağılımının doğrusal olmama durumu, üst yarısındaki kadar belirgin değildir. Alt yarı için dağılım neredeyse doğrusaldır. Kaplamanın alt yarısındaki saatlik sıcaklık değişimi çok fazla değildir (Siddique vd., 2005).

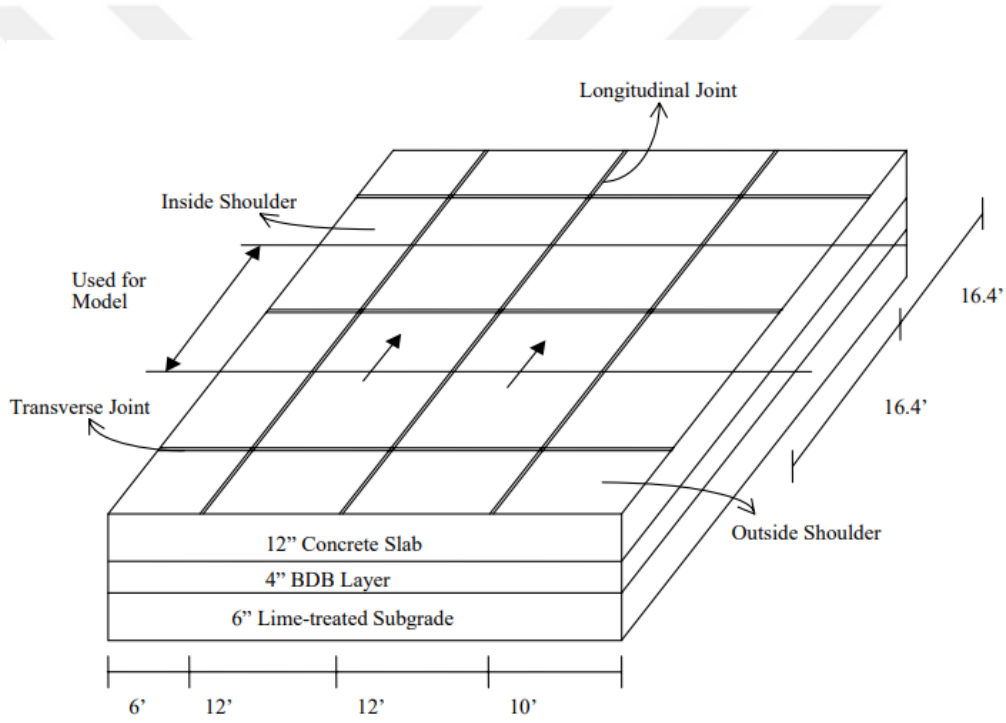


Şekil 1.6.4. Gece ve gündüz beton yol kalınlığı boyunca sıcaklık dağılımları (Siddique vd., 2005)

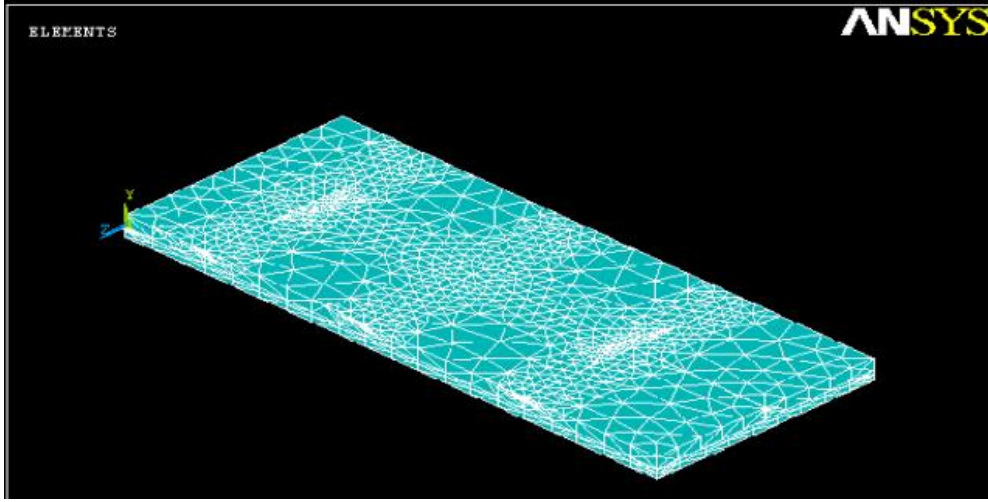
Siddique ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadan görüldüğü üzere saat 18.00'dan itibaren sıcaklık farkı sıfırlanmaya ve negatif sıcaklık farkı oluşturmaya geçmiştir. Sabah 10.00'dan itibaren de sıcaklık farkı pozitif etki etmeye başlamış ve saat 15.00'te

maksimum sıcaklık farkına ulaşmıştır. Günün farklı saatlerine göre sıcaklık değerleri nonlineer değişmiş olup özellikle yol alt kısmının yaklaşık 1/4 kısmında sıcaklığın lineer değiştiği görülmektedir.

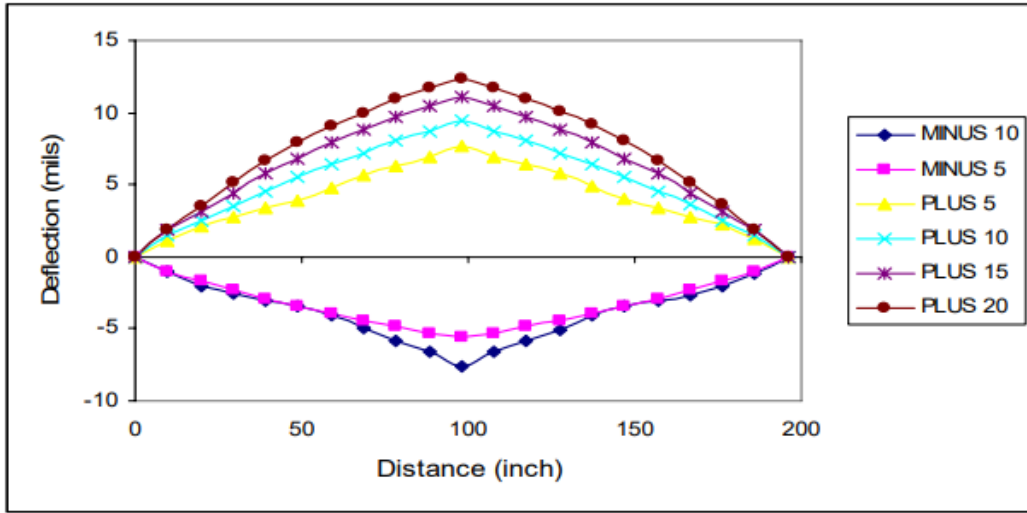
Siddique ve arkadaşlarının yapığı çalışmada 2,7 °C (-5 °F)'den 11,1 °C (20 °F) sıcaklık farkına kadar beton yol kaplamasında meydana gelen deplasman değerleri ANSYS sonlu elemanlar programında simüle edilmiş (Resim 1.6.1 ve Resim 1.6.2) ve sonuçları Şekil 1.6.5'te verilmiştir. 5 metre (200 inç) genişliğindeki beton yol kaplamasında en büyük deplasman, sıcaklık farkının en büyük olduğu kaplamanın tam ortasında meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca farklı tarihlerde kaplamada meydana gelen deplasman değerleri de ölçülmüştür (Tablo 1.6.1).



Resim 1.6.1. ANSYS programına girilen beton yol kaplamasının görünümü (Siddique vd., 2005)



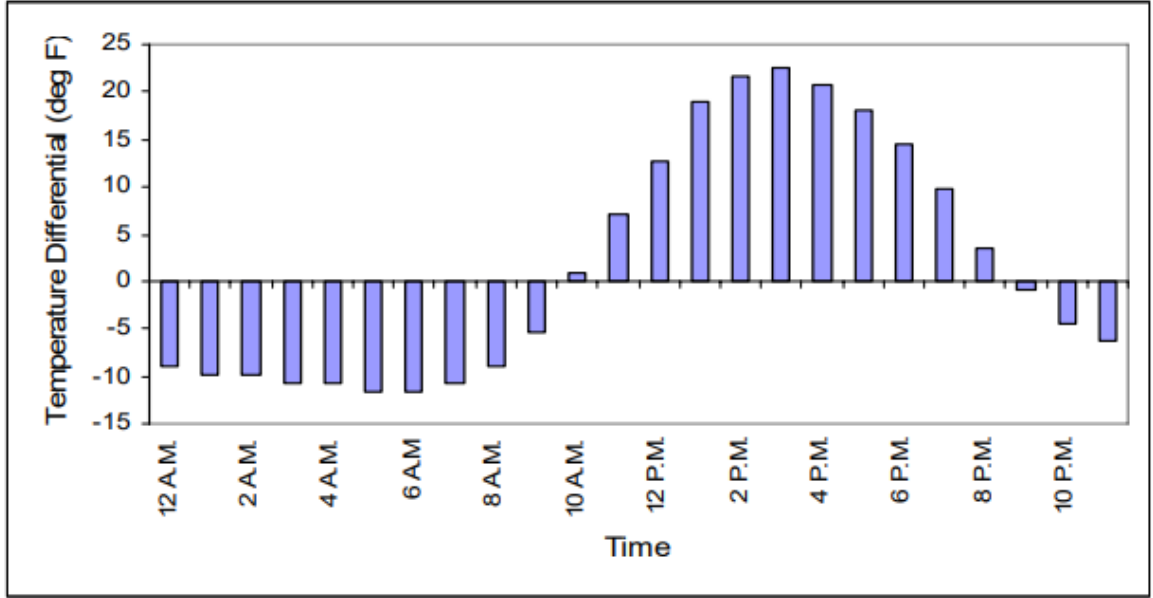
Resim 1.6.2. Beton yol kaplamasının ANSYS sonlu elemanlar programında görünüşü
(Siddique vd., 2005)



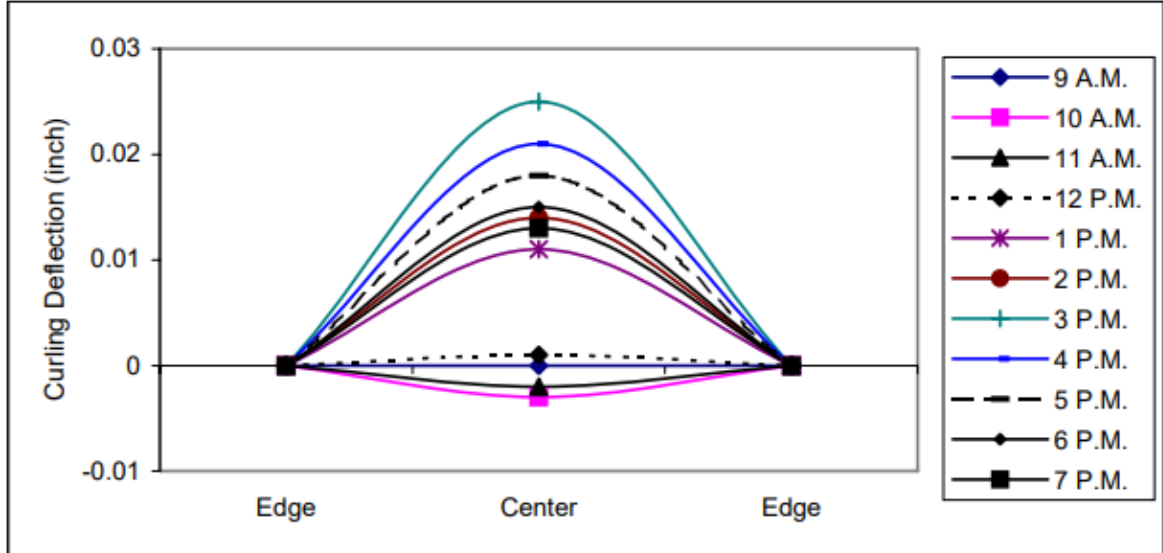
Şekil 1.6.5. -2,7 °C'den 11,1 °C sıcaklık farkına kadar beton yol kaplamasında meydana gelen deplasman değerleri (Siddique vd., 2005)

Siddique ve arkadaşlarının yaptığı çalışmasında Şekil 1.6.6'da Grafik 1.6.1'deki sıcaklık dağılımlarına karşılık gelen yer değiştirme eğrileri verilmiştir. Buradan gündüz vaktinde beton yol tabakasının merkezinin daha büyük oranda kıvrıldığı açıkça görülmektedir. Gece ise yol tabakasının alt yüzeyi kıvrılmıştır (Siddique vd., 2005). Görüldüğü üzere maksimum sıcaklık farkı saat 15.00'te yaklaşık olarak 13 °C (22 °F) olarak meydana gelmiştir. Bu sıcaklık farkından dolayı beton yol kaplamasının orta yüzeyinde maksimum yer değiştirme 0,252 mm (0,01 inç) olmaktadır. Bu durum kaplamada herhangi bir çatlama sebebin olmayacağı görülmektedir (betonun birim şekil

değiştirme miktarı 0,003'tür. (T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, 2018)). Sabah 10.00'da da beton yol kaplamasında negatif yönde 0,13 mm (0,005 inç) değerinde bir eğilme meydana gelmiştir. Maksimum negatif sıcaklık farkı ise sabah saat 5.00'te 6,6 °C (12 °F) olarak meydana gelmiştir.



Grafik 1.6.1. Gece ve gündüz sıcaklık dağılımı (Siddique vd., 2005)



Şekil 1.6.6. Sıcaklık dağılımına karşılık gelen yer değiştirmeler (Siddique vd., 2005)

Siddique ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada Tablo 1.6.1'de farklı tarihlerde alınmış sıcaklık farkları ile bu sıcaklık farkına karşılık gelen deplasman değerleri verilmiştir. Tüm

aylarda sıcaklık farklarının pozitif olduğu zaman dilimi 15.00 ile 16.00 saatleri arasında meydana gelmektedir. Maksimum sıcaklık farkı 2 Eylül'de saat 16.00'da 14,5 °C (24,3 °F) olarak ölçülürken Ağustos ayında 12,5 °C'lik (22,5 °F) sıcaklık farkına karşılık maksimum deplasman değeri 0,635 mm (25 mils) olmuştur. Negatif sıcaklık farkı ise 25 Eylül tarihinde -6,6 °C (-11,7 °F) ile sabah 8.00 ile 9.00 arasında meydana gelmiştir.

Tablo 1.6.1. Farklı tarihlerdeki beton yol kaplamasındaki sıcaklık farkları ve bu farklara karşılık gelen deplasman değerleri (Siddique vd., 2005)

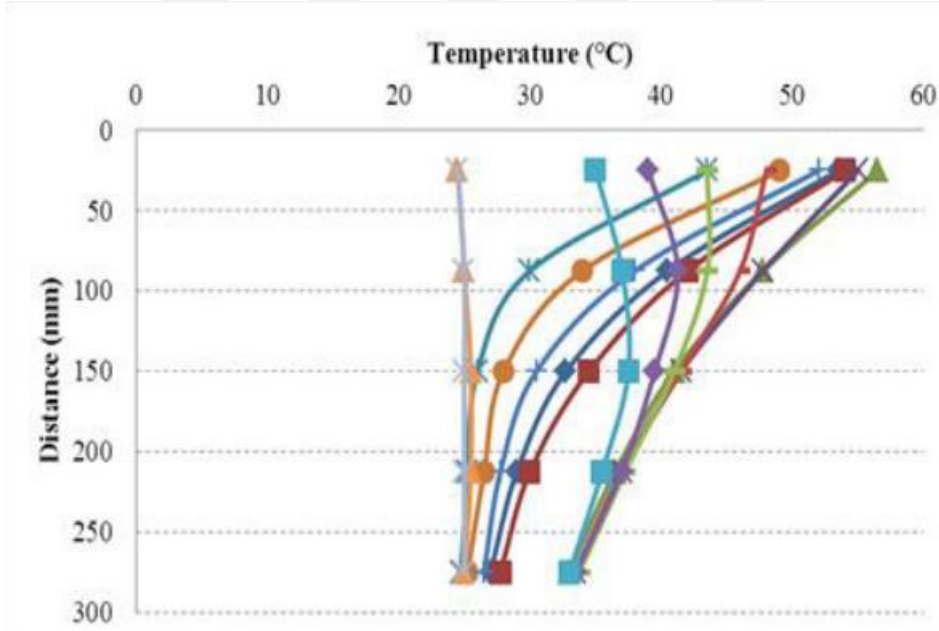
Day Time	August 7		September 2		September 25		October 15		November 6	
	Curling (mils)	Temp. Diff. (°F)	Curling (mils)	Temp. Diff. (°F)	Curling (mils)	Temp. Diff. (°F)	Curling (mils)	Temp. Diff. (°F)	Curling (mils)	Temp. Diff. (°F)
8 am	-	-9.0	-2.008	-9.0	-0.984	-11.7	-	-9.9	-	-8.1
9 am	-0.984	-5.4	-5.000	-5.4	-0.984	-7.2	-2.992	-8.1	-2.008	-8.1
10 am	-2.992	0.9	-0.402	-0.9	-2.008	-2.7	-2.008	-1.8	-2.992	-4.5
11 am	-2.008	7.2	-2.008	2.7	-2.008	2.7	-2.008	4.5	-0.945	0.0
12 pm	0.984	12.6	2.008	9.9	2.008	8.1	2.992	9.9	-0.984	4.5
1 pm	10.984	18.9	7.992	16.2	9.016	11.7	9.016	12.6	2.992	9.0
2 pm	14.016	21.6	12.992	20.7	15.000	14.4	12.992	14.4	7.008	11.7
3 pm	25.000	22.5	22.992	23.4	17.992	15.3	17.008	15.3	14.016	12.6
4 pm	20.984	20.7	20.000	24.3	20.000	14.4	15.984	13.5	12.992	10.8
5 pm	17.992	18.0	15.984	21.6	15.000	11.7	15.984	10.8	10.984	7.2
6 pm	15.000	14.4	12.992	17.1	14.016	7.2	12.008	7.2	9.016	1.8
7 pm	12.992	9.9	12.992	11.7	10.984	2.7	-	3.6	-	-2.7

(1 mils=0,00254 cm)

Maitra ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği laboratuvar çalışmasında, beton numunelerdeki sıcaklık değişimini gözlemlemek için 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğinde beton silindir numune dökülmüştür. Bu amaçla laboratuvarında silindir numunenin bir yüzeyi toprakla kapatılarak öbür ucundan sıcak hava üflenmiştir. Farklı konumlardaki sıcaklıkları ölçmek için silindirin uzunluğu boyunca eşit aralıklarla beş termometre yerleştirilmiştir. Resim 1.6.3'te sıcaklık ölçümü için laboratuvarında gerçekleştirilen deneyin fotoğrafı ve Şekil 1.6.7'de sıcaklık dağılımı görülmektedir (Maitra vd., 2013). Elde edilen verilere bakıldığında numunenin yarısından aşağı kısmındaki sıcaklık dağılımları neredeyse lineer azalırken yarıdan yukarı kısmında nonlineer bir sıcaklık dağılımı meydana gelmiştir. Pozitif sıcaklık farklarında yüzeydeki sıcaklığın çok büyük bir nonlineeriteye sahip olduğu görülmektedir.



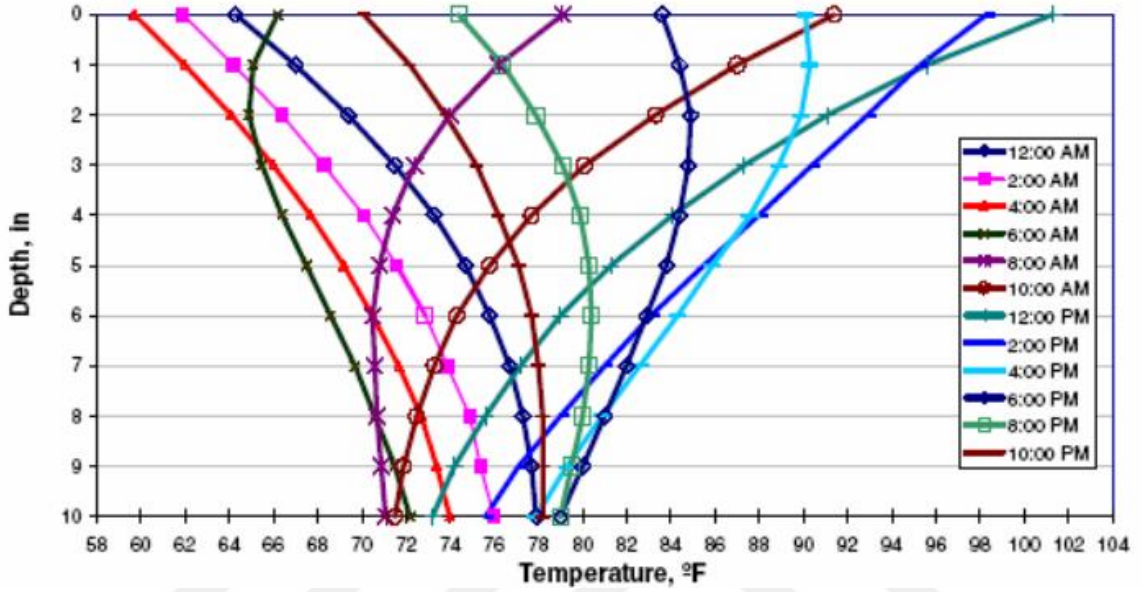
Resim 1.6.3. Laboratuvar deney fotoğrafı (Maitra vd., 2013)



Şekil 1.6.7. Numunedeki farklı noktalardaki sıcaklık dağılımları (Maitra vd., 2013)

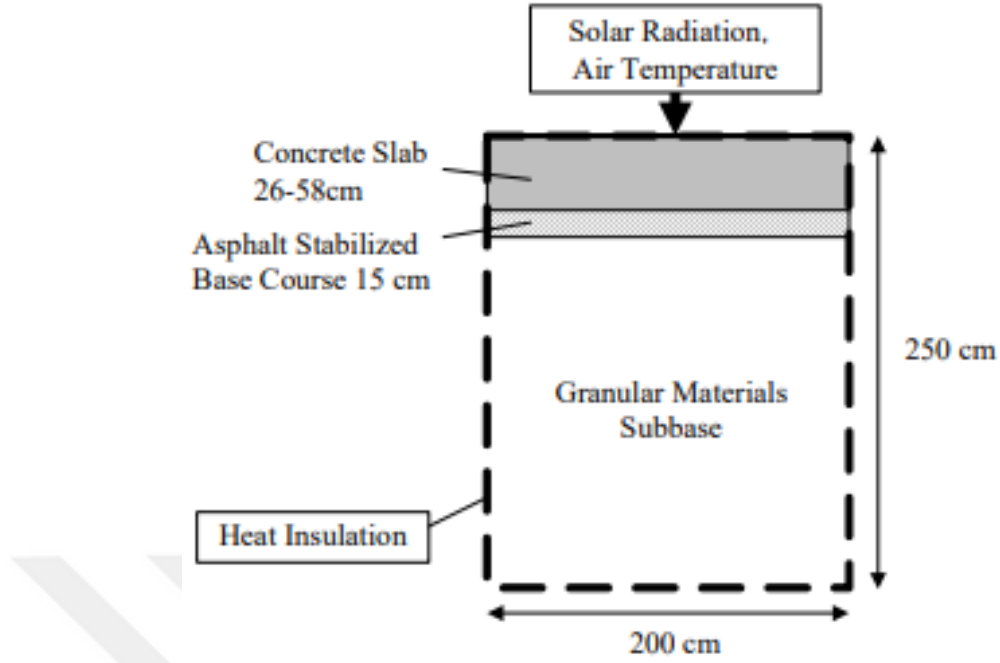
Shreenath ve Jeffery Mart ayında yaptıkları çalışmada 25,4 cm (10 inç) kalınlığındaki bir beton yol kaplamasının sıcaklık dağılımı Şekil 1.6.8’de görülmektedir (Shreenath & Jeffery, 2005). Sıcaklık dağılımlarına bakıldığında akşam saat 18.00’de ve sabah saat 6.00-8.00 arasında sıcaklıklar yön değiştirmeye başlamış ve sıcaklık farkları tersine dönmüştür. Maksimum sıcaklık farkının öğle saatlerinde ve saat 12.00’de 16,1 °C

olarak olduğu görülmektedir. Maksimum negatif sıcaklık farkı ise gece saat 2.00 ile 4.00 arasında $-7,8^{\circ}\text{C}$ olarak meydana gelmiştir. Kaplama yüzey sıcaklığı günün değişik saatlerinde $15,5^{\circ}\text{C}$ ile $38,8^{\circ}\text{C}$ arasında değişiklik gösterdiği görülmektedir. Kaplamanın alt yüzey sıcaklığı ise $21,6^{\circ}\text{C}$ ile 26°C arasında değişmektedir.

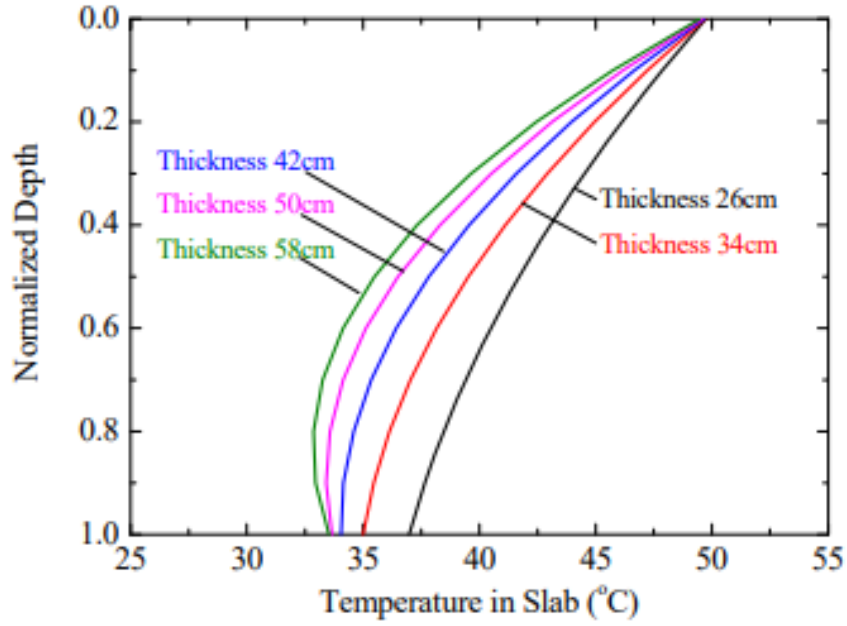


Şekil 1.6.8. Beton yol kaplamasındaki sıcaklık dağılımı (Shreenath & Jeffery, 2005)

Yukitomo ve arkadaşları yaptıkları çalışmada deneysel olarak gözlem süresi içinde bir yaz günü iklim koşulları kullanılarak 26-58 cm kalınlığındaki beton yol kaplamasının kalınlığı boyunca sıcaklık dağılımını göstermişlerdir (Şekil 1.6.9 ve Şekil 1.6.10). Dikey eksen, döşeme kalınlığı ile normalize edilen döşeme yüzeyinden itibaren derinliği göstermektedir. Burada kalınlığı 40 cm'nin üzerinde olan kaplamanın alt ve üst arasındaki sıcaklık farkının hemen hemen aynı olduğunu ancak sıcaklık dağılımının doğrusal olmama durumunun kaplama kalınlığının artmasıyla arttığını göstermektedir. Bu nedenle, kaplama kalınlığının artmasıyla iç gerilmenin daha büyük olması beklenmektedir (Yukitomo vd., 2011). Beton yol kaplaması kalınlığının azalmasıyla oluşan sıcaklık dağılımı lineere yaklaşmıştır. Aynı zamanda daha kalın olan kaplamaya göre sıcaklık farkı da azalmıştır. Yol kaplama kalınlığının artmasıyla nonlineer sıcaklık dağılımı meydana gelirken sıcaklık farkı da artmaktadır. Bunun sonucu olarak da kaplamada meydana gelen gerilmelerin artacağı görülmektedir.



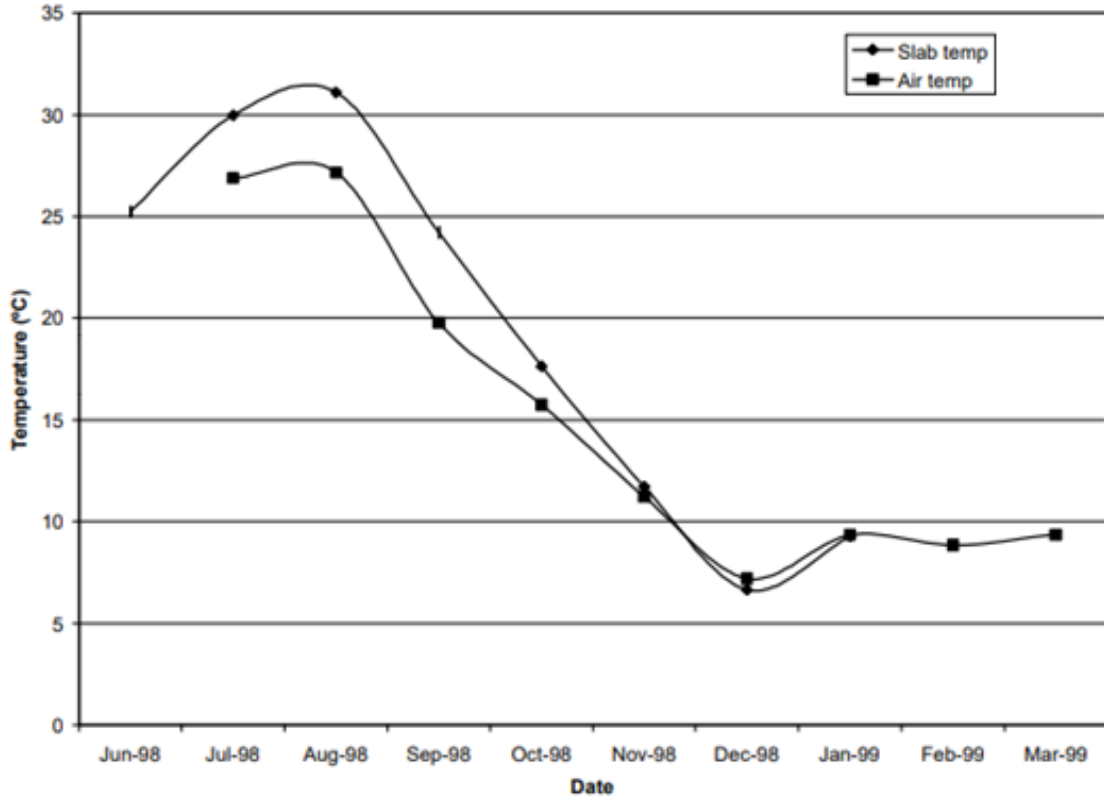
Şekil 1.6.9. Farklı kalınlıklardaki beton yol kaplaması (Yukitomo vd., 2011)



Şekil 1.6.10. Beton yol kaplamasındaki sıcaklık eğrileri (Yukitomo vd., 2011)

Andrew ve Jeffery yaptığı çalışmada Şekil 1.6.11'de gösterildiği gibi beton yol kaplama sıcaklığının hava sıcaklığını takip etme eğiliminde olduğunu görülmektedir ancak sıcaklık artışı özellikle kaplamanın daha fazla güneş ışığı aldığı ve dolayısıyla kaplama sıcaklığının yükseldiği yaz aylarında biraz daha yüksek çıkmaktadır. 1998 yılında Ağustos

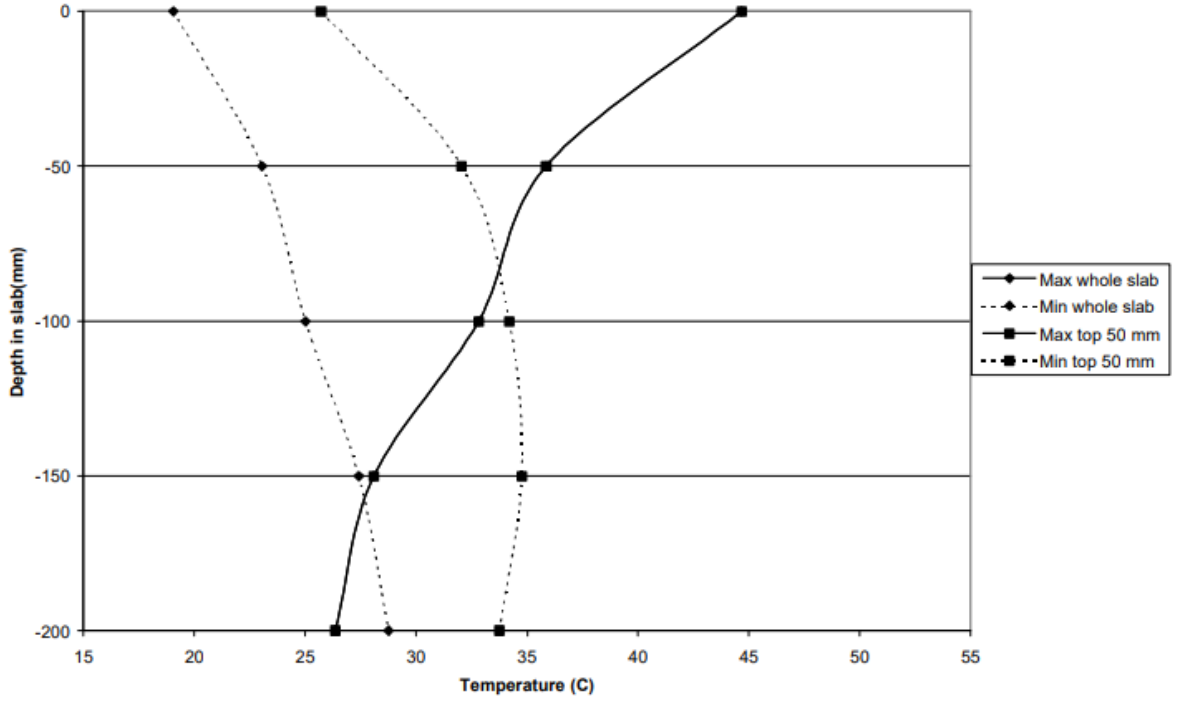
ayında yapılan ölçümde kaplama yüzeyi 32°C iken hava sıcaklığı 28°C olmaktadır. Aşırı sıcaklık gradyanları, bir beton plaktaki maksimum gerilmelerin hesaplanmasında önemlidir. Üst 50 mm'de ve tüm plak boyunca en büyük pozitif ve negatif sıcaklık gradyanı için en kötü durum elde edilmiştir. Bu durumlarda kaplama boyunca sıcaklıklar Tablo 1.6.2 ve Şekil 1.6.12'de verilmiştir. Kaplamanın tamamı için en kötü pozitif sıcaklık gradyanı, kaplamanın üst 50 mm'si için oluşan sıcaklık gradyanı ile aynı zamanda meydana gelmiştir (Andrew & Jeffery, 1999). Kaplamanın üstü $44,67^{\circ}\text{C}$ iken 5 cm alt kısmı $35,86^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar düşmektedir. Hava sıcaklığı ile beton yol kaplaması sıcaklığı arasında paralel bir ilişki olduğu görülmektedir. Özellikle yaz aylarında beton yol kaplamasına güneşten gelen direk ışınlardan dolayı beton yol kaplaması sıcaklığının hava sıcaklığından diğer aylara göre biraz daha fazla olmaktadır. Ayrıca derinlik boyunca sıcaklığın yaklaşık dörtte bir derinlikten sonra nonlinear olduğu ve kaplamanın altına doğru sıcaklığın lineer değiştiği saptanmıştır.



Şekil 1.6.11. Hava sıcaklığı ve beton tabaka sıcaklık değişimi (Andrew & Jeffery, 1999)

Tablo 1.6.2.Tabaka boyunca ölçülen sıcaklık değerleri (Andrew & Jeffery, 1999)

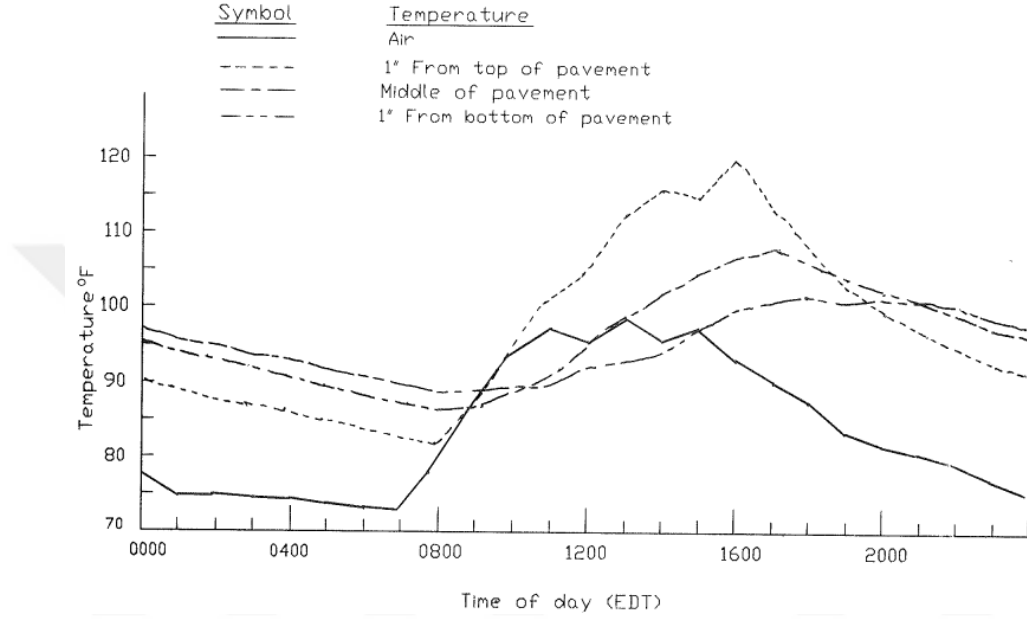
	Greatest positive gradient		Greatest negative gradient	
	Whole slab	Top 50 mm	Whole slab	Top 50 mm
Date	7/6/98	7/6/98	8/17/98	8/31/98
Time	14:00	14:00	4:00	18:00
Gradient ($^{\circ}\text{C} / \text{m}$)	91.61	176.28	-48.55	-126.94
Depth (mm)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)			
0	44.67	44.67	19.05	25.71
50	35.86	35.86	23.06	32.06
100	32.81	32.81	25.01	34.19
150	28.08	28.08	27.41	34.76
200	26.35	26.35	28.76	33.75



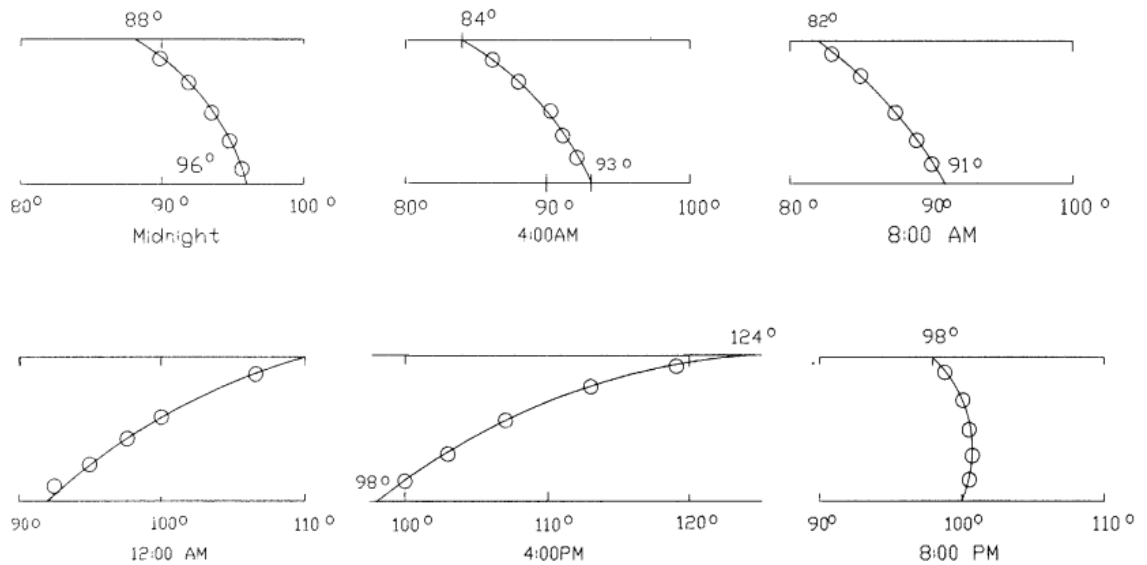
Şekil 1.6.12. Tabakada derinlik boyunca oluşan sıcaklık dağılımı (Andrew & Jeffery, 1999)

Richardson ve Armaghani, gece boyunca beton kaplama sıcaklıklarının hava sıcaklığındaki değişimlerle birlikte paralel değiştiğini göstermişlerdir (Şekil 1.6.13). Ancak

gündüz saatlerinde kaplama yüzeyinde meydana gelen güneş radyasyonundan dolayı üst yüzey sıcaklığındaki hızlı artışın, hava sıcaklığından dolayı meydana gelen sıcaklık artışından çok daha büyük bir rol oynadığı görülmüştür (Şekil 1.6.14) (Richardson & Armaghani, 1990). Şekilde güneş radyasyonundan dolayı saat 16.00'da kaplama üst sıcaklığı $48,8^{\circ}\text{C}$ olurken hava sıcaklığının 35°C olduğu görülmektedir.



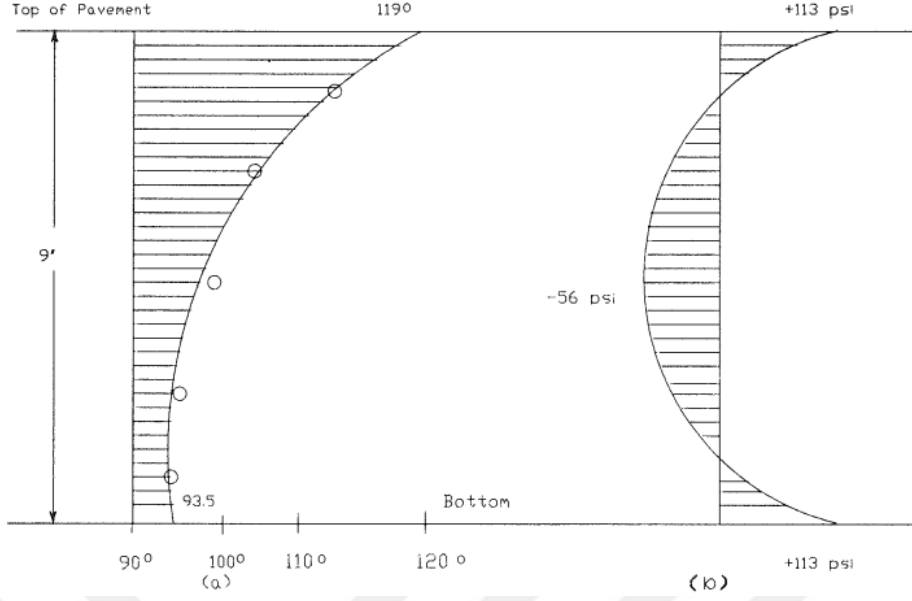
Şekil 1.6.13. Hava sıcaklığına göre yol kaplamasındaki sıcaklık değişimi (Richardson & Armaghani, 1990)



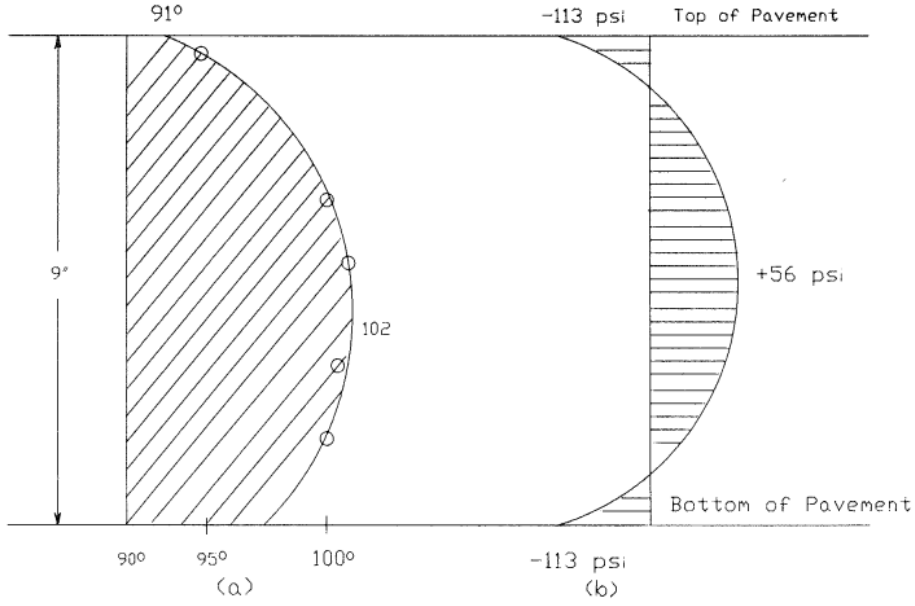
Şekil 1.6.14. Beton yol kaplaması içerisindeki sıcaklık dağılımları (Richardson & Armaghani, 1990)

Richardson ve Armaghani çalışmasında Ağustos 1984'te yapılan ölçümlere göre beton yol kaplamasının sıcaklığı hava sıcaklığıyla hemen hemen paralellik göstermiştir. Özellikle sabah 8.00 ile 10.00 arasında beton yol kaplamasının sıcaklığı hava sıcaklığıyla aynı olmuştur. Yol yüzeyinin hava sıcaklığından diğer bölgelerine göre çok daha yüksek olmasının sebebi ayrıca güneşten direk gelen sıcaklık ışınlarından dolayı olduğu görülmüştür. Şekil 1.6.14'e göre kaplamanın altı ile üstü arasındaki en büyük sıcaklık farkı $12,3^{\circ}\text{C}$ olarak saat 16.00'da meydana geldiği görülmektedir.

Richardson ve Armaghani çalışmasında hava koşullarının, yol kaplamasının içinde olan sıcaklık dağılımını ve dolayısıyla da gerilme değerlerini etkilediğini belirtmektedir. 1984 yılında yapılan gece ve gündüz sıcaklık ölçümlerinden beton kaplama içindeki sıcaklık ve gerilme dağılımları Şekil 1.6.15 ve Şekil 1.6.16'da verilmiştir (Richardson & Armaghani, 1990). Gündüz saat 13.00'te ve gece saat 20.00'de beton yol kaplamasında alınan sıcaklık değerleri ve bu değerlere karşılık gelen gerilme değerleri gece ile gündüz oluşan sıcaklık değerlerinin pozitif ve negatif yönde olduklarını göstermektedir. Gündüz yaklaşık $13,4^{\circ}\text{C}$ 'lik (24°F) bir sıcaklık farkı oluşurken gece 5°C 'den (9°F) daha düşük bir sıcaklık farkı oluşmuştur. Buna rağmen yol kaplamasının üst orta ve altında oluşan gerilme değerleri her iki durumda da aynı kalmıştır. Yol kaplamasının yüzeyinden aşağıya ve altından yukarıya 2,54 cm mesafesi ile yolun tam ortasındaki ölçülen sıcaklık değerleri ve hava sıcaklığı Şekil 1.6.13'te görülmektedir. Negatif sıcaklık farkında yol yüzeyine yaklaştıkça hava sıcaklığı ile beton yol kaplaması arasındaki sıcaklık farkı azalırken, güneş ışınlarının yolun üst yüzeyini artırdığı vakitlerde hava sıcaklığı ile beton yol kaplamasının yüzeye yakın sıcaklıkları arasındaki fark artmıştır.



Şekil 1.6.15. Gündüz kaplama içerisindeki sıcaklık (a) ile çekme ve basınç gerilme (b) değerleri (Richardson & Armaghani, 1990)

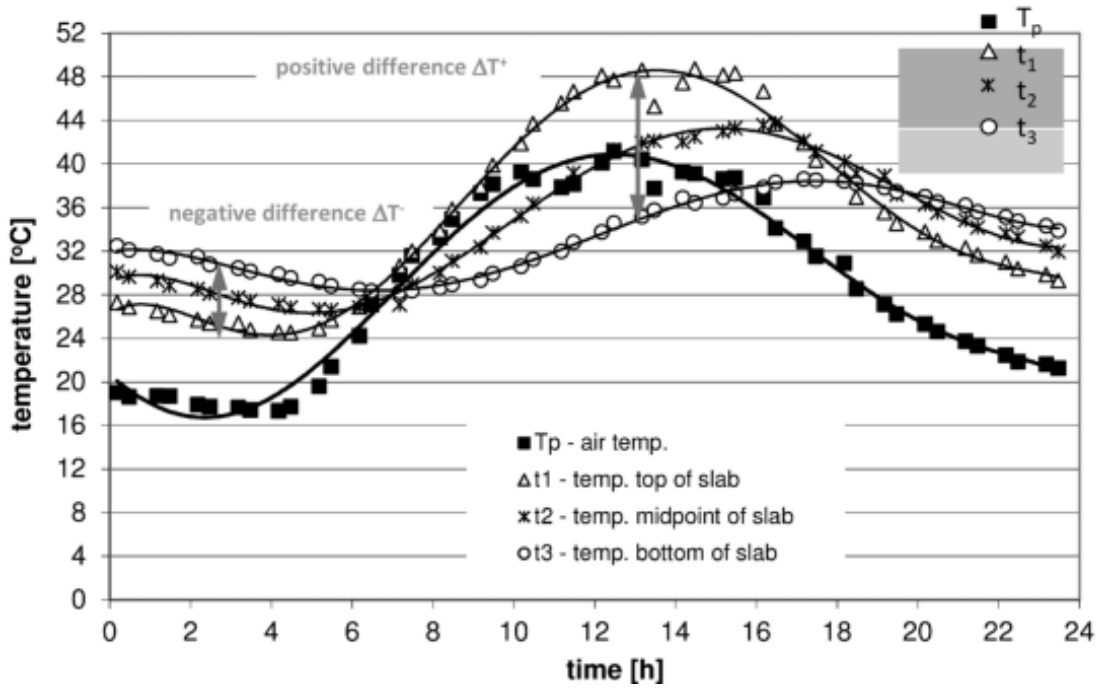


Şekil 1.6.16. Gece kaplamada içerisindeki sıcaklık (a) ile çekme ve basınç gerilme (b) değerleri (Richardson & Armaghani, 1990)

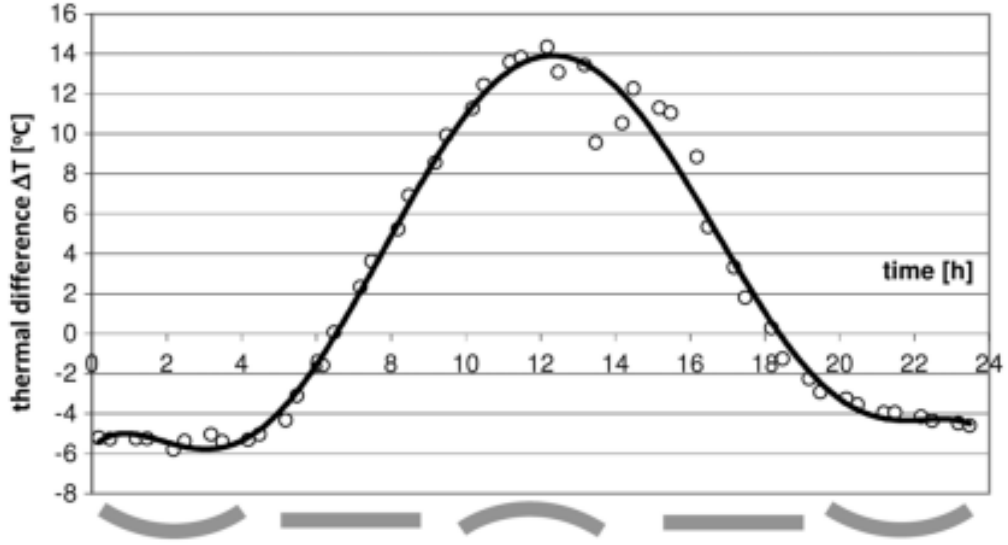
Piotr ve Antoni yaptıkları çalışmada Polonya’da yaz aylarında 8 Temmuzda almış oldukları hava ve beton kaplama sıcaklık ölçümleri Şekil 1.6.17’de görülmektedir. Beton kaplama sıcaklık değişiminin hava sıcaklığı değişimini takip ettiği görülmektedir. En yüksek sıcaklık beton yol kaplamasının yüzeyinde 48 °C olarak saat 15.00’da

oluşmaktadır. Kaplamanın altı ile üstü arasında oluşan maksimum sıcaklık farkı da 13°C civarındadır. Beton yol kaplamasının orta ve alt kısımlarındaki sıcaklık değişimleri de hava sıcaklık değişimlerini takip etmektedir (Piotr & Antoni, 2020).

Piotr ve Antoni yaptıkları çalışmada Polonya’da yaz aylarında 8 Temmuzda gün içerisinde 24 saat boyunca oluşan sıcaklık farkı da Şekil 1.6.18’de verilmektedir. Görüldüğü üzere akşam 19.00’den sabah 4.00’a kadar negatif sıcaklık farkı oluşurken sabah 9.00 ile akşam 16.00 saatleri arasında pozitif sıcaklık farkı oluşmuştur. Ara saatlerde de geçiş bölgeleri olarak sıcaklık farkı sıfıra yaklaşıp ters yönde değişmiştir.

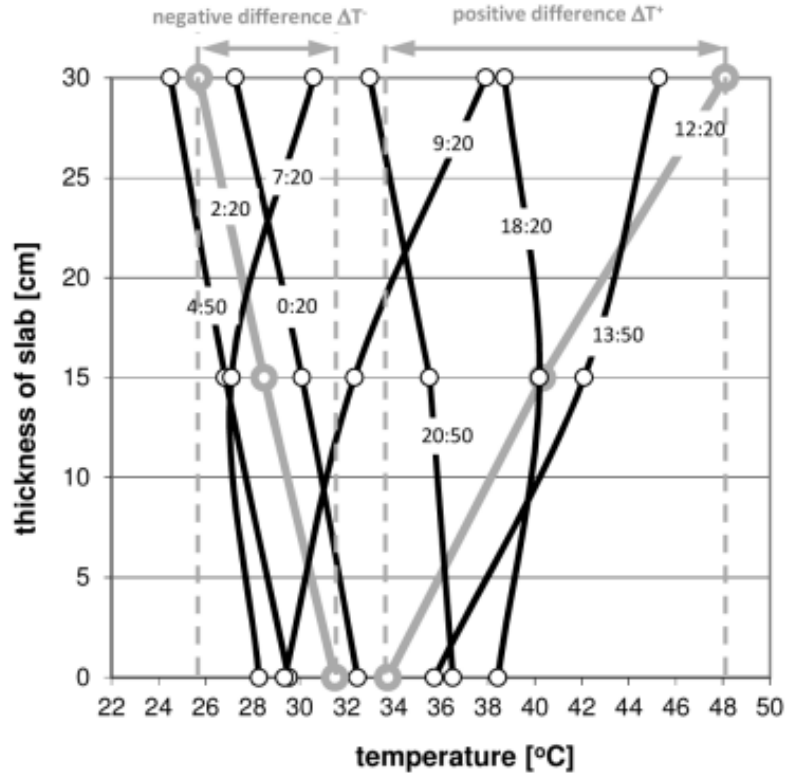


Şekil 1.6.17. 8 Temmuzda Polonya’da hava ve kaplamada ölçülen sıcaklık değerleri (Piotr & Antoni, 2020)

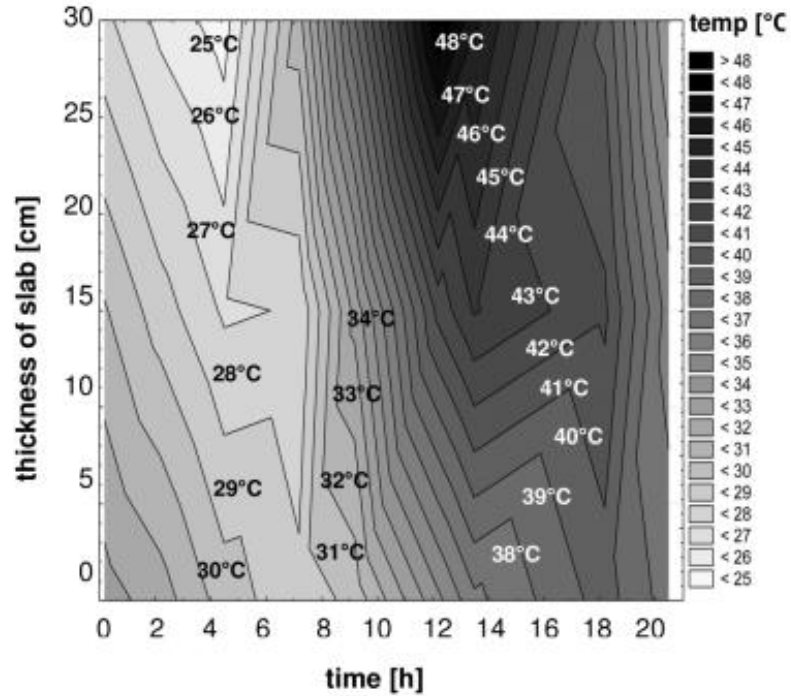


Şekil 1.6.18. Gün içerisinde 24 saat boyunca alınmış olan sıcaklık değerleri (Piotr & Antoni, 2020)

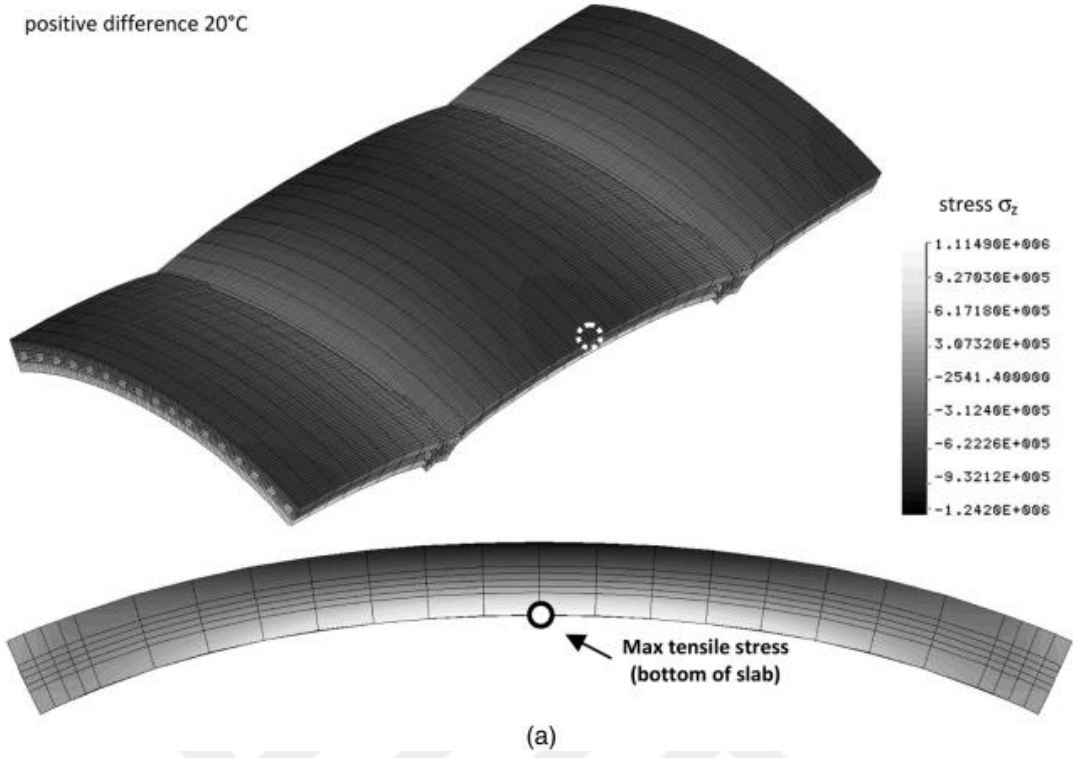
Piotr ve Antoni yaptıkları çalışmada plak kalınlığı boyunca sıcaklık değişimleri de Şekil 1.6.19 ve Şekil 1.6.20’de görülmektedir. Kalınlık boyunca sıcaklık dağılımları nonlineer olup günün değişik saatlerinde farklı değerler almıştır. Pozitif ve negatif sıcaklık farklarına göre 3,5mx5m ve 3,5mx7m ebatlarında 30 cm kalınlığında beton yol kaplamasında gerilme değerleri Şekil 1.6.21 ve Şekil 1.6.22’de elde edilmiştir (Piotr & Antoni, 2020). 20 °C ve -9 °C sıcaklık farklarında maksimum çekme gerilmeleri bulunmuştur. 20 °C’lik pozitif sıcaklık farkında maksimum çekme gerilmesi yol boyuna doğrultusunda kaplama altında 1,11 MPa olarak yol kenarında meydana gelirken -9 °C’lik sıcaklık farkında maksimum çekme gerilmesi yol boyuna doğrultusunda kaplama yüzeyinde 0,69 MPa olarak yolun tam ortasında meydana gelmektedir.



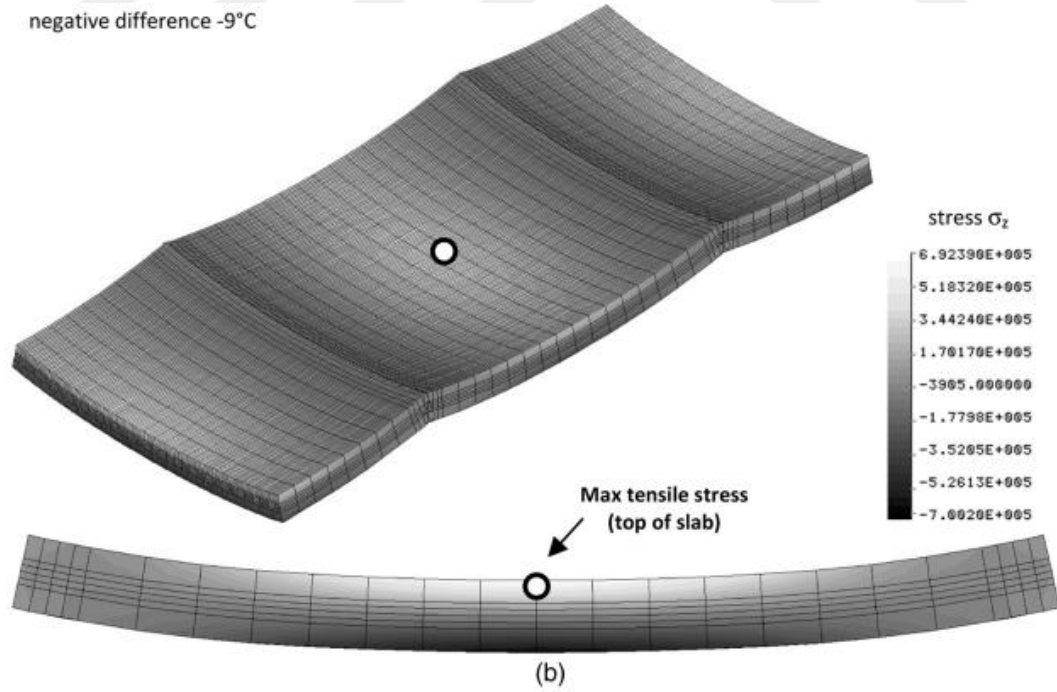
Şekil 1.6.19. Beton kaplama kalınlığı boyunca sıcaklık dağılımı (Piotr & Antoni, 2020)



Şekil 1.6.20. Beton kaplama kalınlığı boyunca sıcaklık dağılımı (Piotr & Antoni, 2020)



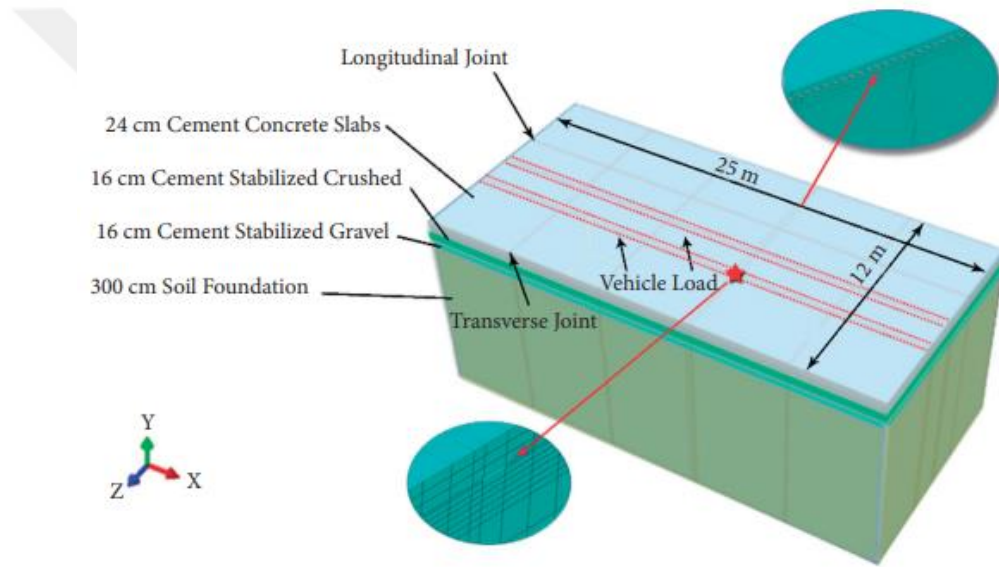
Şekil 1.6.21. Pozitif sıcaklık farkında meydana gelen gerilme değerleri (Piotr & Antoni, 2020)



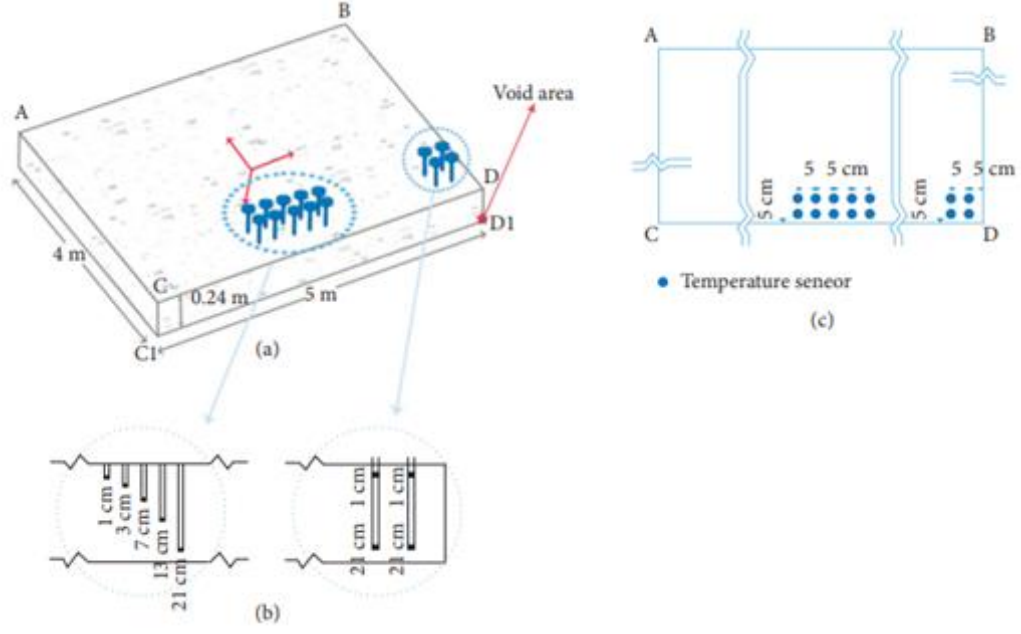
Şekil 1.6.22. Negatif sıcaklık farkında meydana gelen gerilme değerleri (Piotr & Antoni, 2020)

Şekil 1.6.21 ve Şekil 1.6.22’de meydana gelen maksimum çekme gerilmesi değerleri, sıcaklık farkı göz önünde bulundurulduğunda yanlış yerde çıkmıştır. Pozitif sıcaklık farkında maksimum gerilme değerleri yol kaplama yüzeyinde ve negatif sıcaklık farkında da maksimum çekme gerilmesi değerleri yol kaplaması altında çıkması gerekmektedir.

Cui ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada 4mx5m ebatlarında derzlerle ayrılmış 24cm kalınlığında 12mx25m’lik bir beton yol kaplamasında (Resim 1.6.4) farklı derinlikte sıcaklık ölçümleri yapıp (Resim 1.6.5) sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerilme değerleri elde etmiştir (Cui vd., 2022).

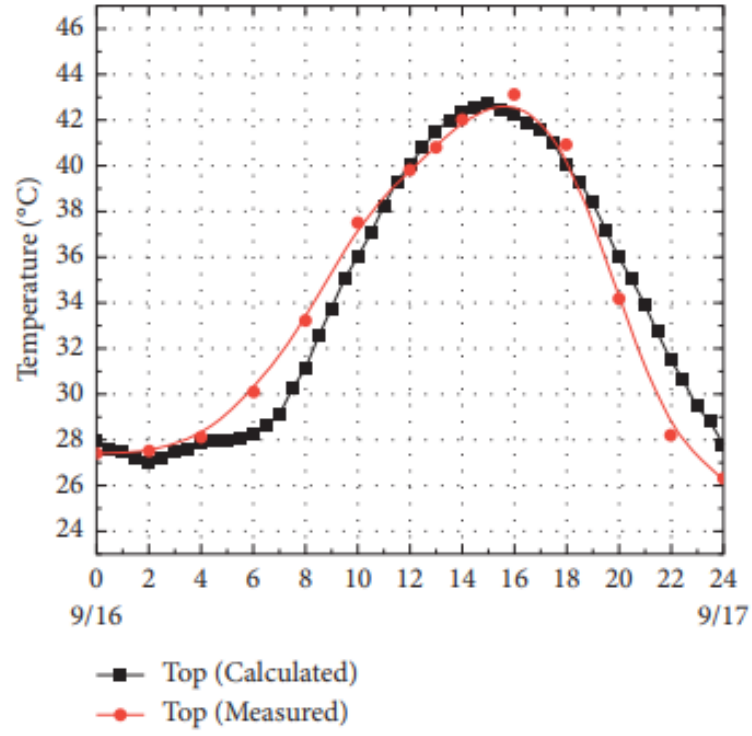


Resim 1.6.4. Sonlu elemanlar yöntemindeki yolun görüntüsü (Cui vd., 2022)

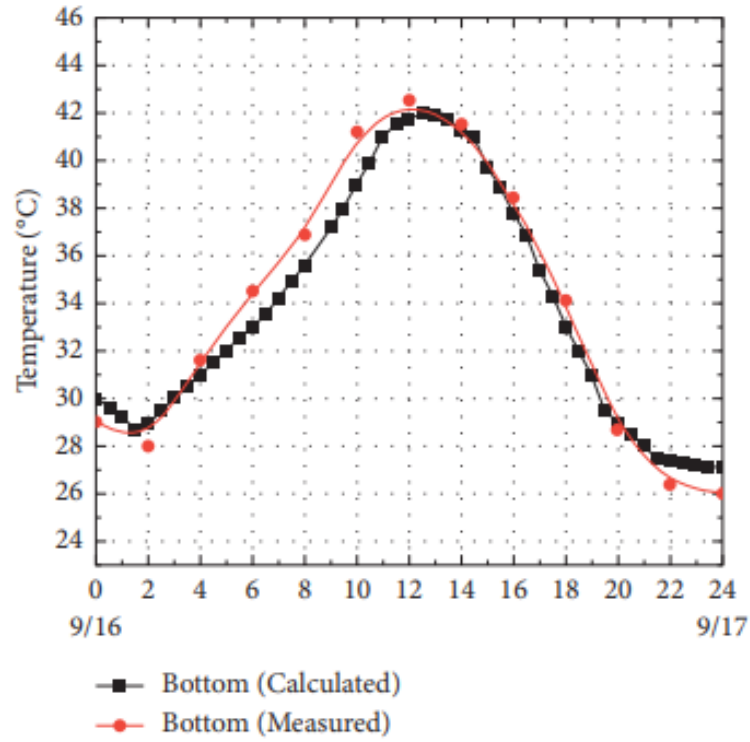


Resim 1.6.5. Derzle ayrılmış bir anodaki sıcaklık ölçümlerinin alındığı yerler (Cui vd., 2022)

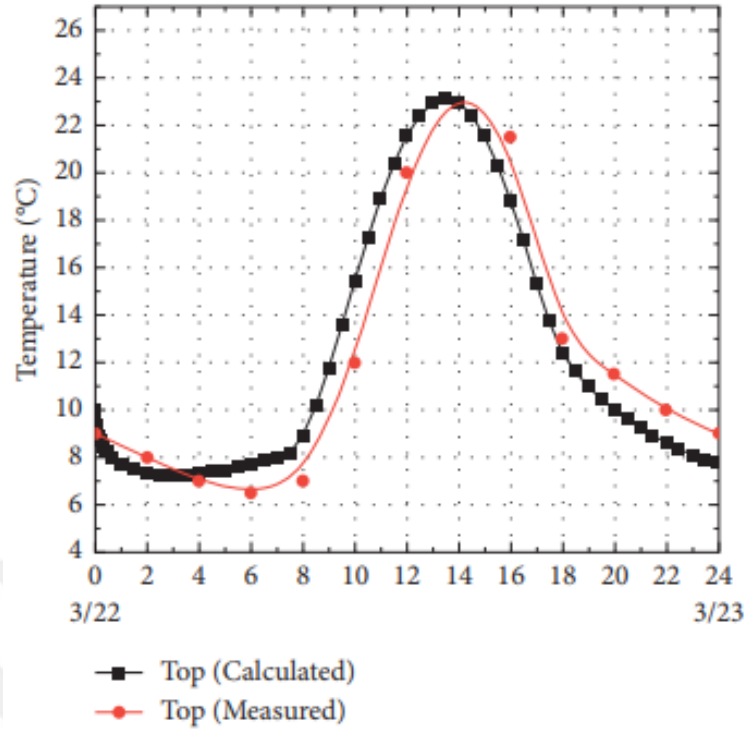
Cui ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada yaz ve kış aylarına göre yol kaplamasının 1 cm, 3 cm, 7 cm, 13 cm ve 21 cm derinliklerdeki sıcaklık ölçümleri ve Abaqus FEA yazılım programı yardımıyla hesaplanan sıcaklık değerleri Grafik 1.6.2, Grafik 1.6.3, Grafik 1.6.4 ve Grafik 1.6.5'te verilmiştir. Ayrıca kalınlık boyunca köşe bölgesindeki sıcaklık dağılımları Şekil 1.6.23'de görülmektedir. Bu durumlara göre yaz ve kış mevsimlerinde kaplamanın üst ve altında meydana gelen gerilme değerleri Şekil 1.6.24, Şekil 1.6.25, Şekil 1.6.26 ve Şekil 1.6.27'de verilmiştir (Cui vd., 2022). Grafiklerden görüldüğü gibi yaz mevsiminde kaplama yüzeyinde maksimum sıcaklık değeri saat 15.00'te 43°C olurken bu değer kaplama altında 39°C olmaktadır. Kaplama altındaki maksimum sıcaklık değeri de saat 12.00'de 42°C olmuştur. Bu değerlerin tamamı Abaqus FEA yazılım programıyla hesaplanan değerlerle paralel çıkmıştır. Kış mevsiminde kaplama yüzeyinde ölçülen maksimum sıcaklık değeri, saat 13.00'te 23°C olurken, minimum sıcaklık değeri saat 3.00'te 7°C olmaktadır. Kaplama altında maksimum sıcaklık değeri saat 17.00'de 13°C olurken minimum sıcaklık değeri de saat 9.00'da 10°C olmaktadır.



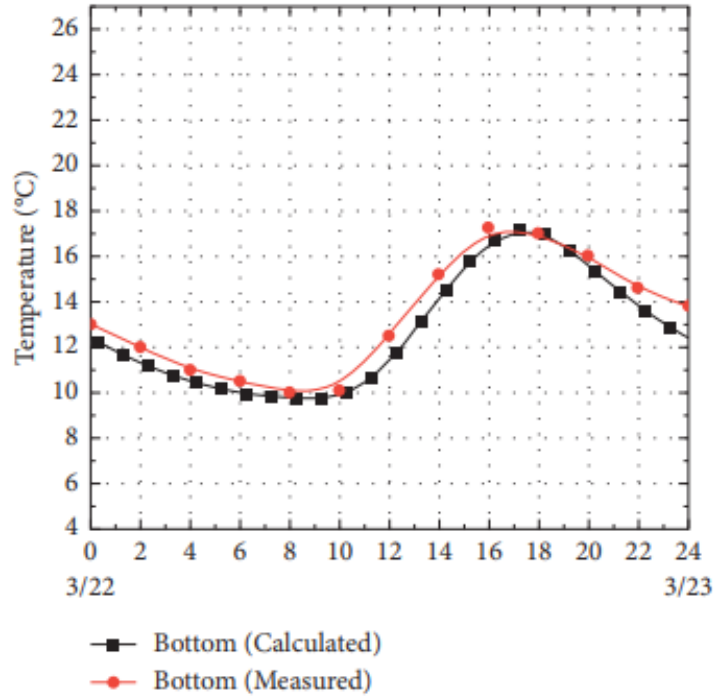
Grafik 1.6.2. Yaz mevsiminde kaplama üzerinde ölçülen ve hesaplanan sıcaklık değerleri (Cui vd., 2022)



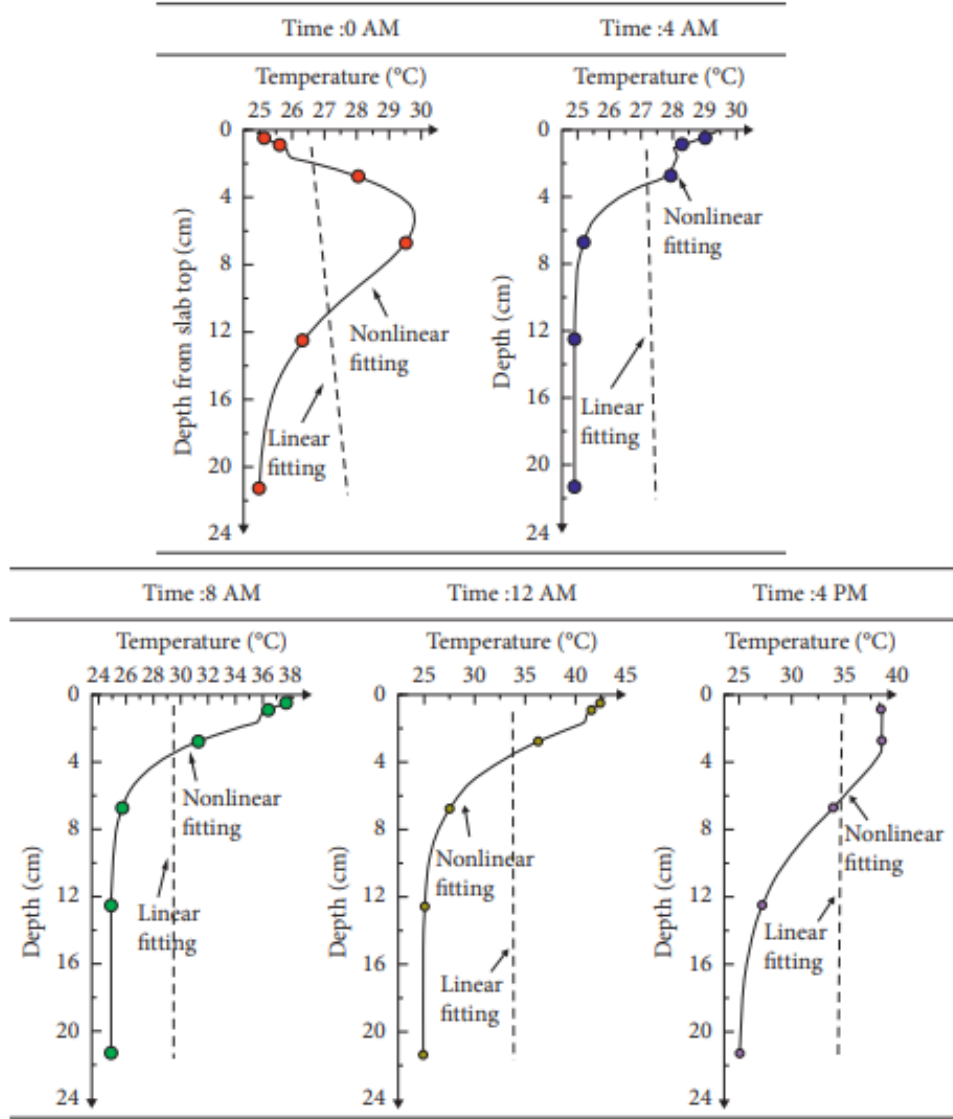
Grafik 1.6.3. Yaz mevsiminde kaplama altında ölçülen ve hesaplanan sıcaklık değerleri (Cui vd., 2022)



Grafik 1.6.4. Kış mevsiminde kaplama üzerinde ölçülen ve hesaplanan sıcaklı değerleri (Cui vd., 2022)

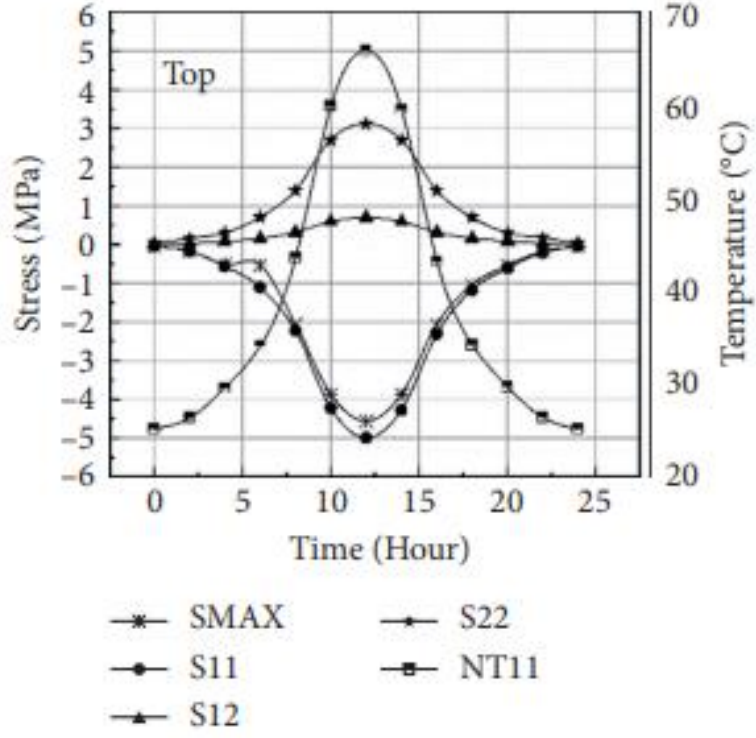


Grafik 1.6.5. Kış mevsiminde kaplama altında ölçülen ve hesaplanan sıcaklı değerleri (Cui vd., 2022)

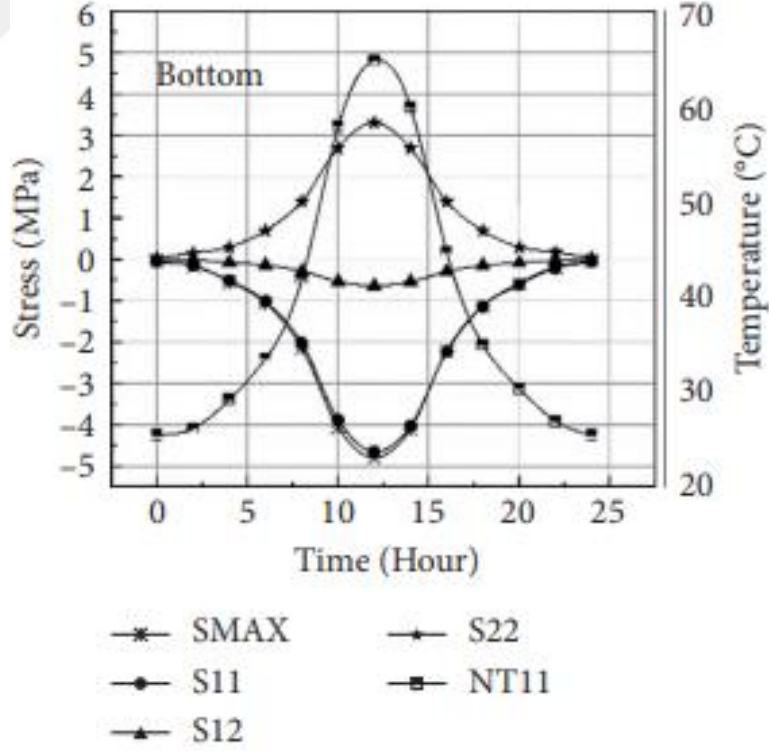


Şekil 1.6.23. Plak köşesindeki kalınlık boyunca oluşan sıcaklık dağılımları (Cui vd., 2022)

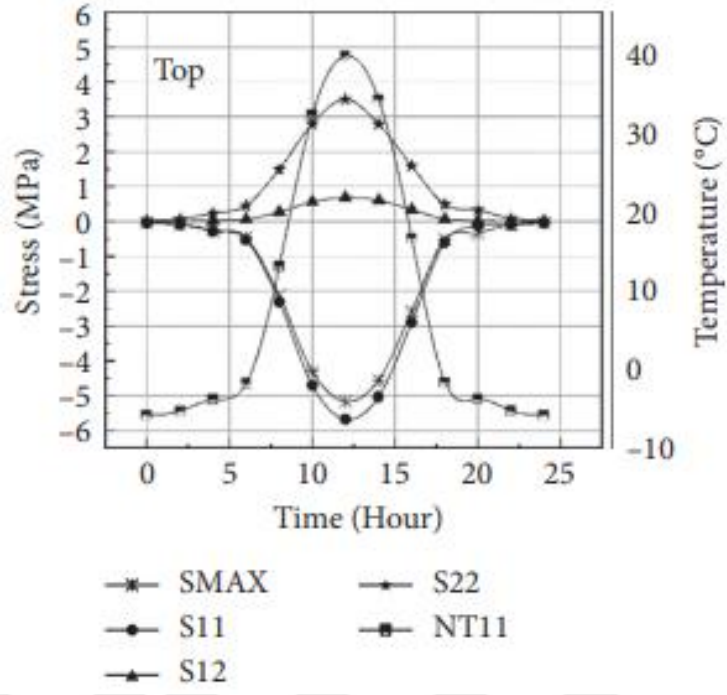
Cui ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada Şekil 1.6.23'te kaplama köşesindeki sıcaklık dağılımları görülmektedir. Sıcaklık dağılımları nonlineer meydana gelmektedir. Ayrıca kaplama yüzeyinde en yüksek sıcaklık saat 12.00'de 43°C olarak meydana gelmiştir. Aynı kesitte kaplama alt yüzeyindeki sıcaklık değeri 25°C olmaktadır. Buradan aradaki sıcaklık farkı 18°C olduğu görülmektedir. Bu tez kapsamında ANSYS programında analiz yaparken 15°C sıcaklık farkı kullanılmıştır. Bu çalışmayla karşılaştırıldığında 15°C sıcaklık farkının alınması gerçekte uyuşmakta olduğu görülmektedir.



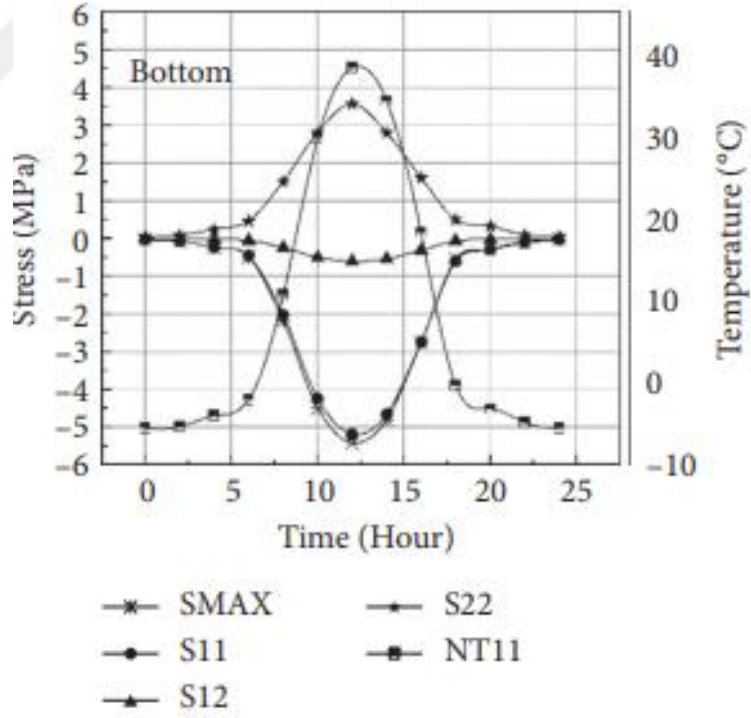
Şekil 1.6.24. Yaz mevsiminde kaplama üzerinde oluşan gerilme değerleri (Cui vd., 2022)



Şekil 1.6.25. Yaz mevsiminde kaplama altında oluşan gerilme değerleri (Cui vd., 2022)



Şekil 1.6.26. Kış mevsiminde kaplama üzerinde oluşan gerilme değerleri (Cui vd., 2022)

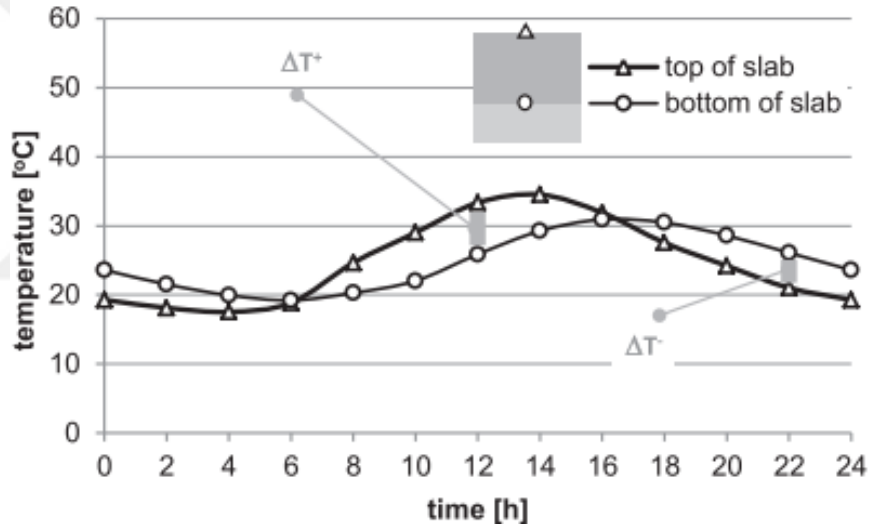


Şekil 1.6.27. Kış mevsiminde kaplama altında oluşan gerilme değerleri (Cui vd., 2022)

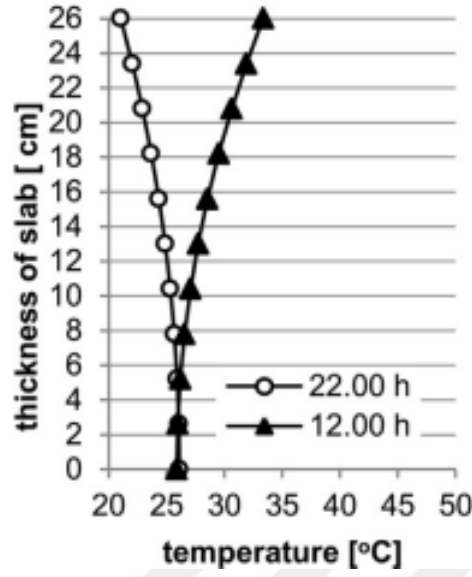
(Şekil 1.6.24, 1.6.25, 1.6.26, 1.6.27’de $S11=\sigma_x$, $S22=\sigma_y$, $S12=\tau_{xy}$, $SMAX=\sigma_{max}$ ve $NT11$ =Sıcaklık değişimi manasına gelmektedir.)

Cui ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada şekiller incelendiğinde yazın kaplama üst ve altındaki sıcaklıklar 65°C 'yi bulurken maksimum çekme gerilmesi, kaplama üstünde 3,12 MPa ve kaplama altında 3,31 MPa olmaktadır. Kışın ise kaplama üst ve altındaki sıcaklıklar 38°C civarında olurken maksimum çekme gerilmesi kaplama yüzeyinde 3,51 MPa ve kaplama tabanında 3,57 MPa olduğu görülmektedir.

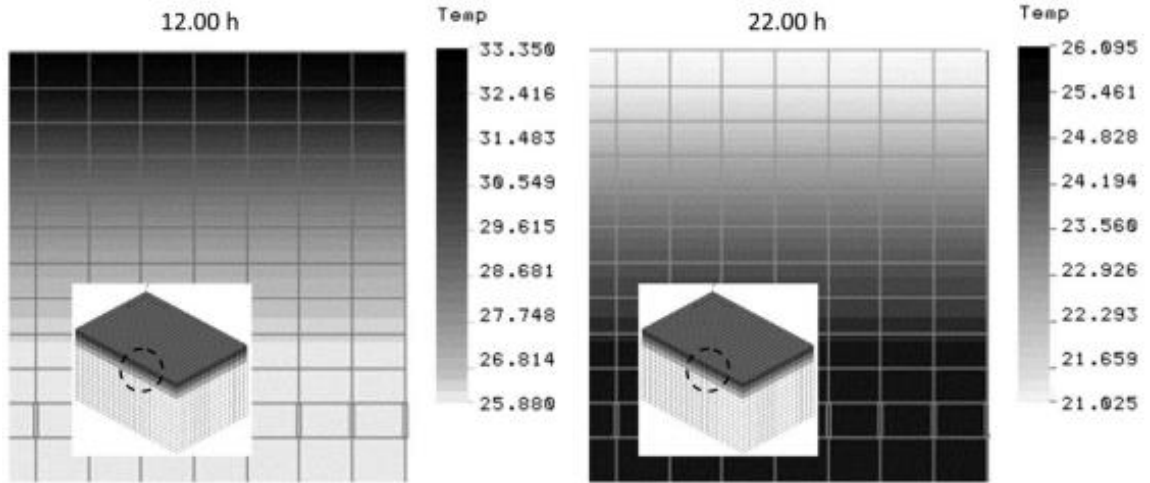
Piotr yaptığı çalışmada Temmuz ayında gün içerisinde beton kaplaması yüzeyi ile alt yüzeyinin sıcaklık dağılımları ölçmüştür (Şekil 1.6.28). Daha sonra sonlu elemanlar yöntemi ile sıcaklığın kaplama kalınlığı boyunca değişimini ortaya koymuştur (Şekil 1.6.29 ve Şekil 1.6.30) (Piotr, 2014). Akşam 16.30 ile sabah 6.00 saatleri arasında kaplamanın altının üstünden daha sıcak olduğu görülmektedir. Maksimum sıcaklık farkı öğlen saat 12.00'de 8°C olarak meydana gelmektedir.



Şekil 1.6.28. Kaplama üstü ile altının sıcaklık değişimi (Piotr, 2014)



Şekil 1.6.29. Sonlu elemanlar yöntemi ile kaplamadaki kalınlık boyunca sıcaklık değişimi (Piotr, 2014)

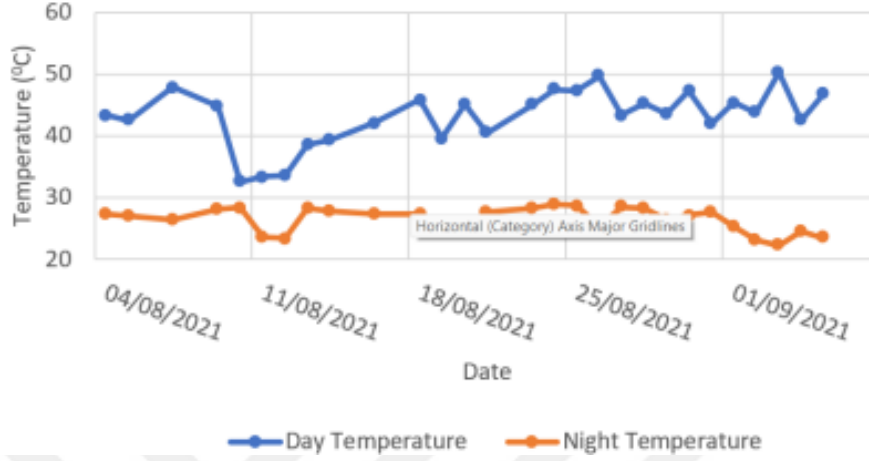


Şekil 1.6.30. Sonlu elemanlar yöntemi ile beton yol kaplamasında kalınlık boyunca sıcaklık değişimi (Piotr, 2014)

Piotr çalışmasında gün içerisinde sıcaklık dağılımının maksimum pozitif sıcaklık farkı saat 12.00'de, maksimum negatif sıcaklık farkı da saat 22.00'de meydana geldiği görülmektedir. 26 cm kalınlığındaki plakta sonlu elemanlar yöntemi ile sıcaklık hesaplandığında saat 12.00'de 8 °C ve saat 22.00'de 5 °C'lik sıcaklık farkı oluşmuştur. Sıcaklıkların kesit kalınlığı boyunca nonlineer olarak dağılım gösterdiği görülmektedir.

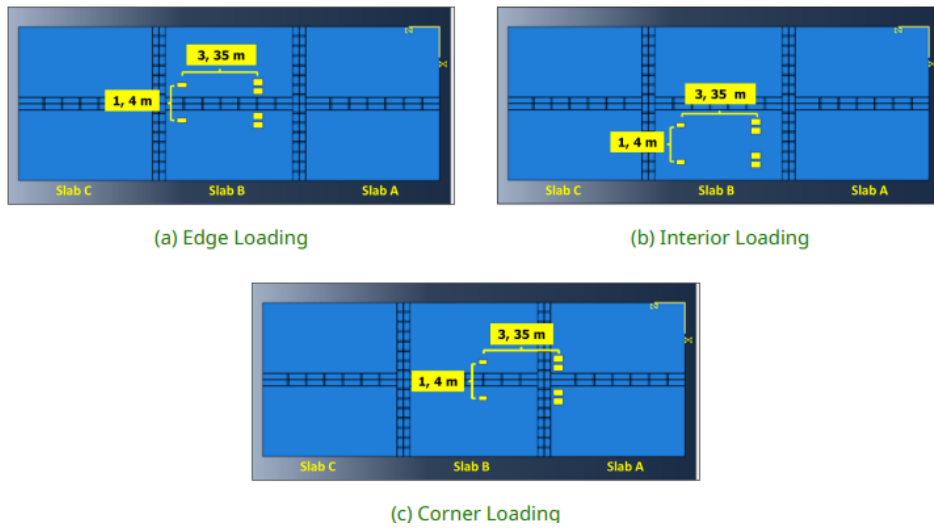
Anno ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada 2,75mx5m ebatlarında 25cm kalınlığındaki derzli kayma (dowel bar) ve bağlama donatılı (tie bar) beton yol kaplaması

Abaqus sonlu elemanlar yöntemi ile sıcaklık yüküyle ve tekerlek yüküyle yüklenerek analizleri yapılmıştır. Ağustosta gece ve gündüz alınmış sıcaklık verileri Şekil 1.6.31’de verilmiştir.



Şekil 1.6.31. Ağustos ve Eylül ayı gece ve gündüz sıcaklık verileri (Anno vd., 2023)

Anno ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada sonlu elemanlar yöntemine göre beton yol kaplamasının simülasyonu Resim 1.6.6’da verilmektedir. Analiz sonucu beton yol kaplamasının alt ve üst yüzeyinin farklı sıcaklık değerlerine göre elde edilen gerilme değerleri Tablo 1.6.3’te verilmiştir. Tekerlek yüklemesinde ise köşe, orta ve kenar yüklemesi yapılarak simülasyon oluşturulmuştur. Bu yüklemeden meydana gelen gerilme değerleri de Tablo 1.6.4’te verilmiştir (Anno vd., 2023).



Resim 1.6.6. Beton yol kaplamasında kenar, orta ve köşelerde tekerlek yüklemesi (Anno vd., 2023)

Tablo 1.6.3. Beton kaplamanın alt ve üst yüzeyinin farklı sıcaklıklarda olmasına göre elde edilen gerilme değerleri (Anno vd., 2023)

Top Surface (°C)	Bottom Surface (°C)		S_{xx} (MPa)	S_{yy} (MPa)	S_{zz} (MPa)	S_{xy} (MPa)	S_{xz} (MPa)	S_{yz} (MPa)
50	33.5	Max	2.329	2.395	2.04	2.3	2.802	2.515
		Min	-3.167	-2.52	-2.389	2.254	-1.608	-2.543
45	28.5	Max	2.245	2.295	1.711	1.433	1.107	2.213
		Min	-2.922	-2.103	-0.952	-1.41	-1.109	-2.213
40	23.5	Max	2.23	2.278	1.707	1.503	1.329	2.207
		Min	-2.879	-0.691	-0.935	-1.532	1.33	-2.277
30	38.25	Max	1.871	2.202	1.7	1.665	1.305	1.07
		Min	-2.17	-1.816	-1.112	-1.694	-1.295	-1.84
28	36.25	Max	1.586	2.02	1.782	1.894	1.097	1.921
		Min	-1.602	-1.753	-1.297	-1.91	-1.087	-1.878
25	33.25	Max	1.135	2.022	1.881	2.005	0.831	1.924
		Min	-1.67	-1.914	-1.398	-2.003	-0.86	-1.923

(Burada; $S_{xx}=\sigma_x$, $S_{yy}=\sigma_y$, $S_{zz}=\sigma_z$) (S_{xz} , S_{xy} , S_{yz} ; kayma gerilmeleri)

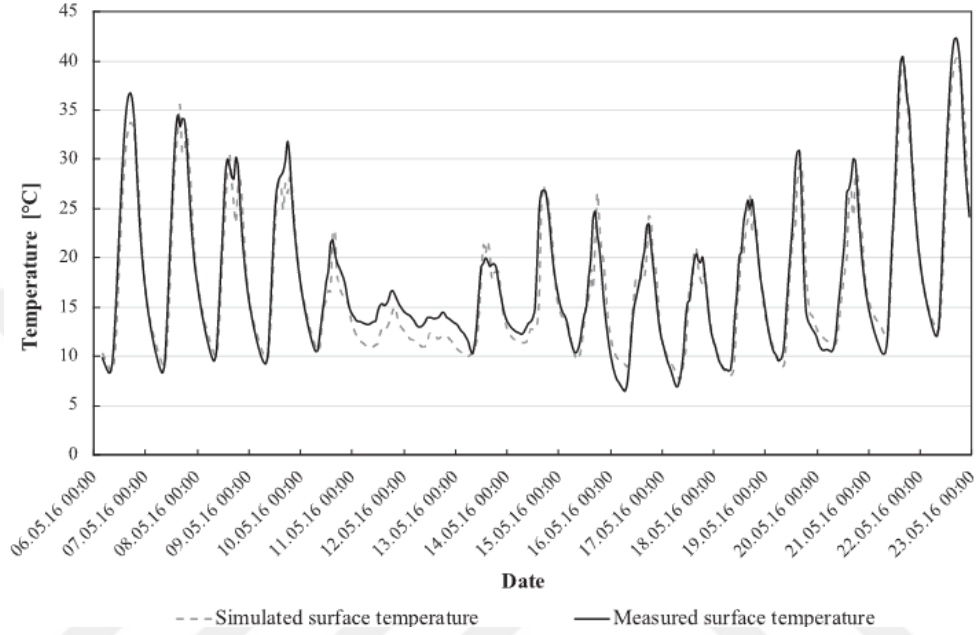
Tablo 1.6.4. Tekerlek yüklemesine göre meydana gelen gerilme değerleri (Anno vd., 2023)

Load Position		S_{xx} (MPa)	S_{yy} (MPa)	S_{zz} (MPa)	S_{xy} (MPa)	S_{xz} (MPa)	S_{yz} (MPa)
Interior	Max	0.382	0.155	0.431	0.609	0.185	0.372
	Min	-0.692	-1.273	-0.518	-0.247	-0.112	-0.339
Edge	Max	1.310	0.520	0.759	0.387	0.837	0.543
	Min	-1.157	-0.641	-0.928	-0.409	-0.437	-0.230
Corner	Max	0.352	0.152	0.386	0.397	0.344	0.396
	Min	-0.823	-1.772	-0.969	-0.278	0.145	-0.404

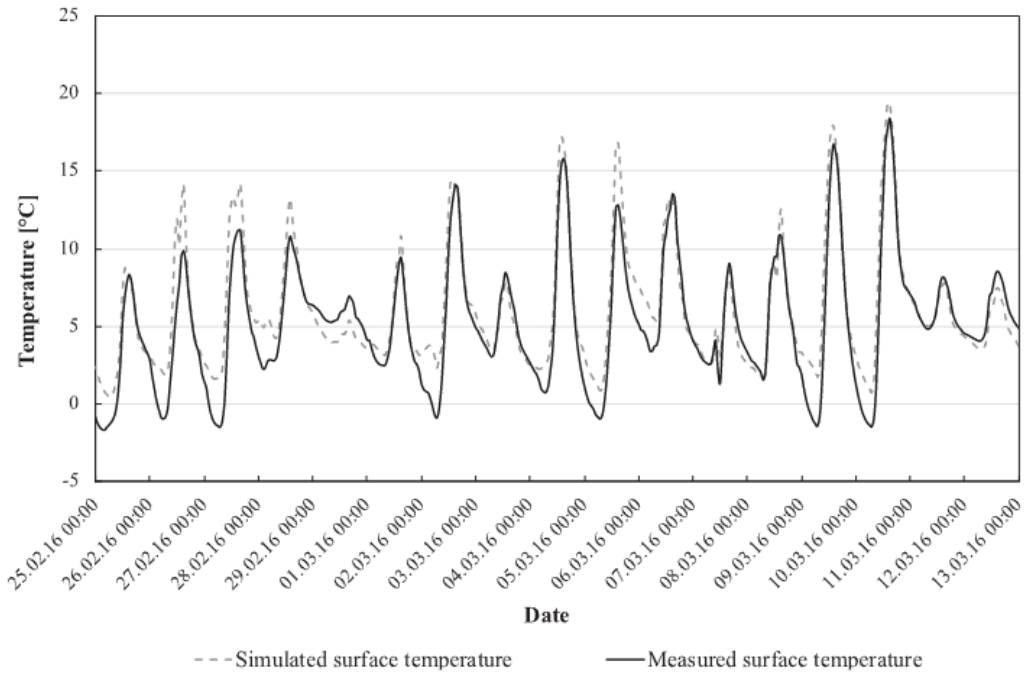
Anno ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada sıcaklıklar Ağustos ve Eylül aylarında beton yol kaplaması üzerinde ölçülmüş olup maksimum sıcaklık Eylül ayında gündüz vakti 50 °C olarak meydana gelmektedir. Maksimum çekme gerilme değerleri de yüzey sıcaklığının 50 °C ve sıcaklık farkının 16,5 °C olduğu durumda y doğrultusunda 2,395 MPa olarak ortaya çıkmaktadır. Yüzey sıcaklığı değerleri düştüğünde aradaki sıcaklık farkı eşit kalmasına rağmen gerilme değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Yüzeyin tabandan daha soğuk olduğu durumlarda da benzer durum meydana gelmektedir. 8,25 °C'lik sıcaklık farkında taban sıcaklığı daha yüksek olan 30 °C'de gerilme değeri 2,202 MPa ile daha yüksek çıkmıştır. Çalışmada kaplama ortası, kenarı ve köşesinin yüklenmesiyle oluşturulan simülasyonda maksimum gerilme değeri x doğrultusunda 1,31 MPa ile köşe bölgesinde meydana gelmektedir.

Bayraktarova ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada Şekil 1.6.32 ve Şekil 1.6.33'ten görüldüğü gibi sıcaklığın yaz ve kış aylarına göre programla hesaplanmasının ölçülen verilerle hemen hemen aynı olduğunu ortaya koymuşlardır. Isı akısını tanımlayan farklı

parametrelerin hava koşullarına bağlı olarak kullanılması gerektiğini göstermişlerdir. Sıcaklık değişiminin yalnızca hava sıcaklığına ve güneş radyasyonuna bağlı olduğunu vurgulamışlardır. Avusturya’da bu tür sınır değerleri tanımlamak için birden çok hava istasyonundan veri alıp hepsini bir arada değerlendirmişlerdir (Bayraktarova vd., 2022).

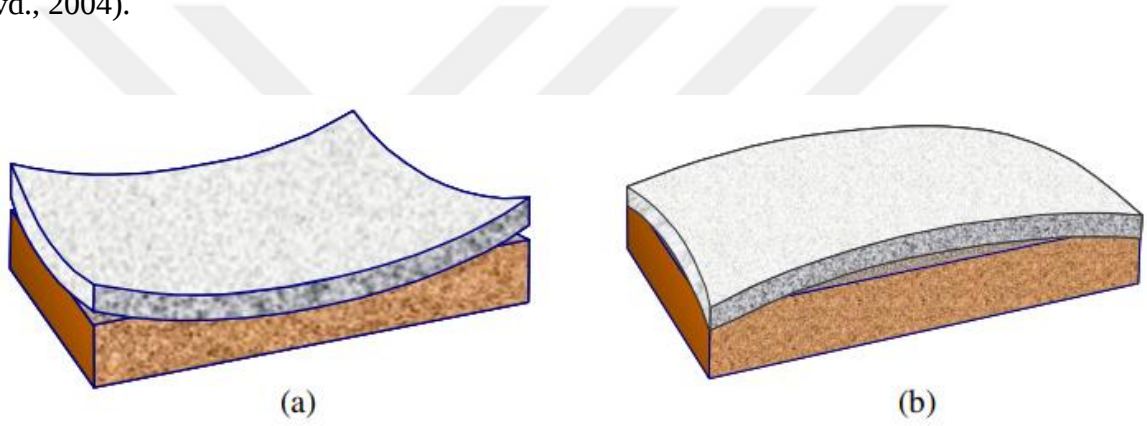


Şekil 1.6.32. Mayıs ayındaki hava ve beton kaplama sıcaklıkları (Bayraktarova vd., 2022)



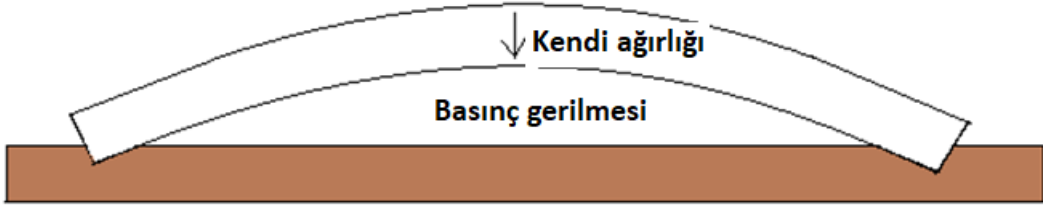
Şekil 1.6.33. Şubat-Mart ayındaki hava ve beton kaplama sıcaklıkları (Bayraktarova vd., 2022)

Yu ve arkadaşları yaptığı çalışmada rijit üstyapılardaki kritik gerilmelerin sıcaklık gradyanlarına aşırı duyarlılığı nedeniyle, sıcaklık koşullarındaki saatlik değişimin dikkate alınması gerektiğini ileri sürmüşlerdir. Çalışmalarında tasarım yazılımı olarak EICM kullanılarak otomatik olarak gerçekleştirmişlerdir. EICM programı iklim tasarım döneminin her yılı için PCC döşemesindeki saatlik sıcaklık verileri üretmiştir. Kıvrılma ve eğilme, sıcaklık ve nem gradyanlarının neden olduğu portland çimentolu beton (PCC) levhaların bozulmasını ifade etmiştir. Sıcaklık ve nem gradyanlarındaki kalınlık boyunca farklılıklar, kaplama plakalarının kıvrılmasına (Resim 1.6.7a) veya aşağı doğru eğilmesine (Resim 1.6.7b) neden olmuştur. Bozulmalar döşeme kenarlarında ve köşelerinde destek kaybına neden olarak kritik eğilme gerilimlerinde önemli bir artışa neden olmuştur (Yu vd., 2004).



Resim 1.6.7. Beton yol kaplamasının sıcaklığa göre aldığı şekil (Yu vd., 2004)

Lederle yaptığı çalışmada beton yol tabakasının üst yüzeyinin tabandan daha sıcak veya daha ıslak olduğunda, plağın üstünün genişleyerek aşağı doğru bükülmüş bir dışbükey şekil oluşturduğunu göstermiştir. Bazı durumlarda, bu genleşme uzaması tabakanın ortasını alttaki zeminden kaldıracak kadar aşırıdır ve levhanın altında bir boşluk oluşur (Resim 1.6.8). Tabakanın üst kısmı tabandan daha soğuk veya daha kuru ise tabakanın köşeleri alttaki zeminden kaldırarak yukarı doğru içbükey bir şekil almaktadır (Resim 1.6.9). Herhangi bir sıcaklık veya nem durumu yoksa beton yol tabakası teorik olarak tamamen düz ve alttaki katmanla tam temas halinde olmaktadır (Lederle, 2011).



Resim 1.6.8. Gündüz sıcaklık farkından kıvrılan beton plak (Lederle, 2011)



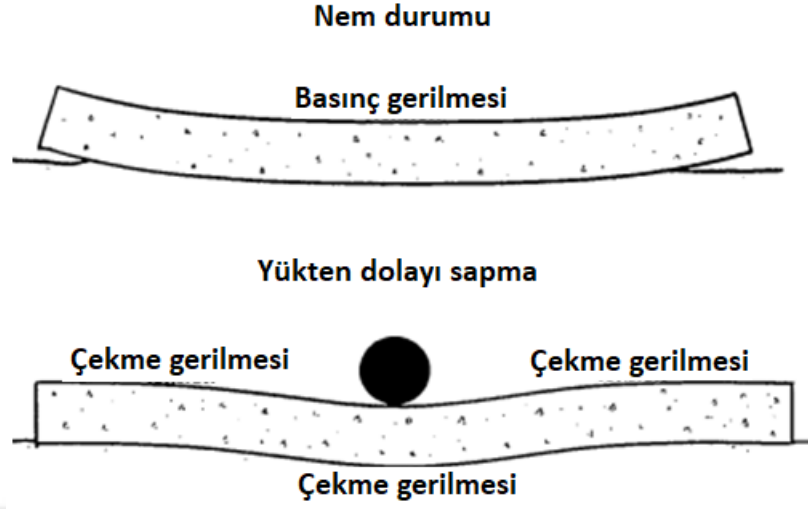
Resim 1.6.9. Gece sıcaklık farkından kıvrılan beton plak (Lederle, 2011)

Beton yol kaplamasının üst yüzeyi gündüz saatlerinde güneş ısısından dolayı daha sıcak olurken gece tam tersi olarak havanın soğumasıyla birlikte kaplamanın alt yüzeyi daha sıcak hale gelir. Bu durumda beton yol kaplaması ya içbükey veya dışbükey olarak eğilir. Eğer sıcaklık farkı yoksa beton yol kaplaması düz kalır.

Byrun ve Hansen yaptıkları çalışmada ILLI-SLAB bilgisayar programını, doğrusal esnekliğe dayalı bir FEM modeli olarak kullanmışlardır. Derzli rijit üstyapılar için yük transfer sistemlerini analiz etmek için Illinois Üniversitesi'nde bu program geliştirilmiştir. Bu programda gece, gündüz, nemli ve yük şartları altında beton plak görünümü Resim 1.6.10 ve Resim 1.6.11'de verilmiştir (Byrum & Hansen, 1994).



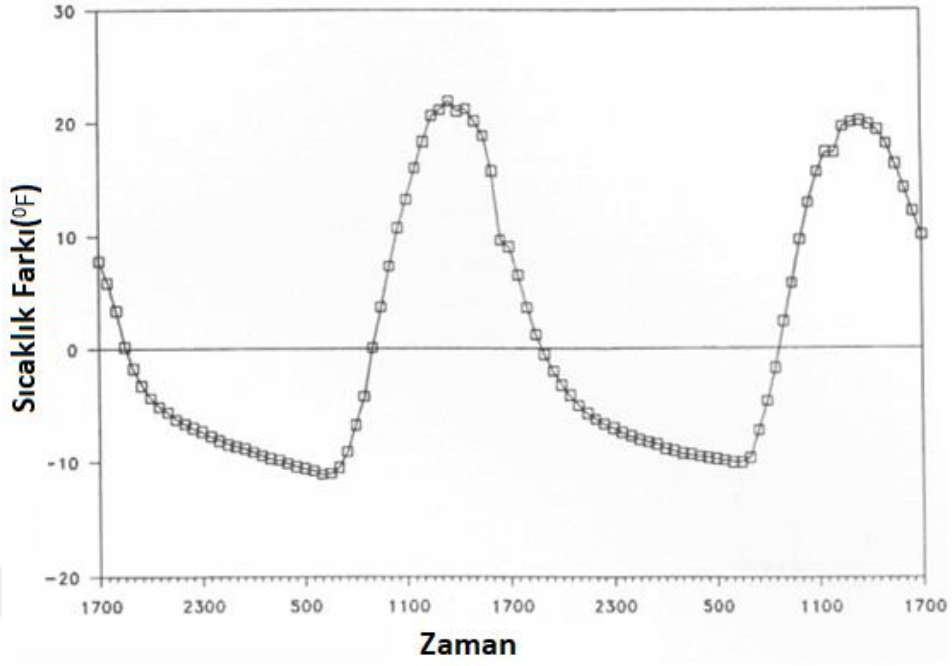
Resim 1.6.10. Beton yol kaplamasının gece ve gündüze göre şekli (Byrum & Hansen, 1994)



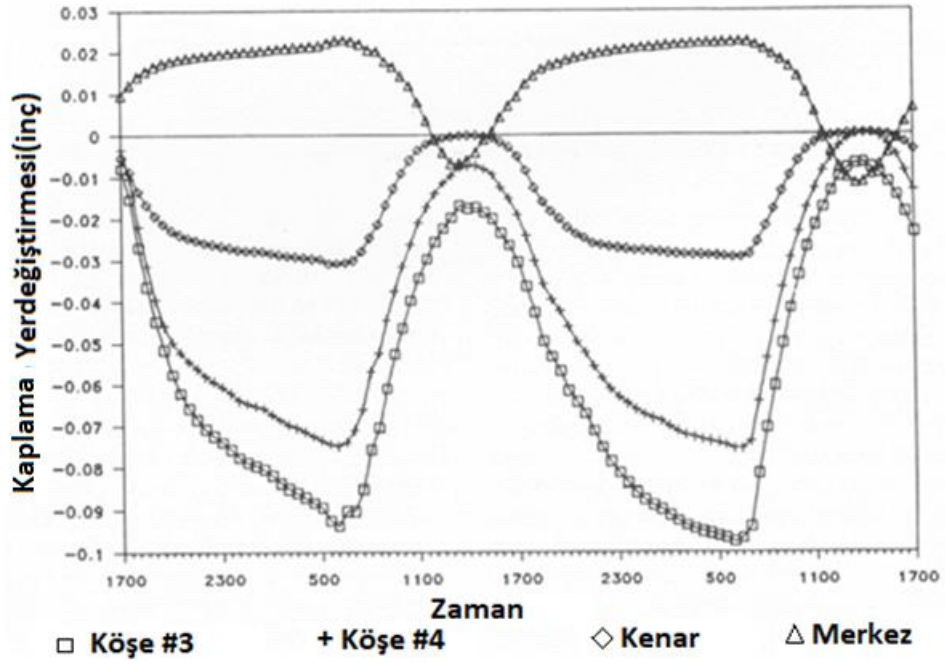
Resim 1.6.11. Beton yol kaplamasının nem ve yük durumuna göre şekli (Byrum & Hansen, 1994)

Üniversitede geliştirilen ILLI-SLAB programıyla yapılan simülasyona göre sıcaklık, nem ve tekerlek yüklemesi altında beton yol kaplaması içbükey veya dışbükey şekil halini almıştır.

Yoonseok yaptığı çalışmada 9 inç kalınlığında bir beton plağa beş farklı derinlikte termokupllar yerleştirmiştir. Kaplamanın düşey yer değiştirmesini ölçmek için de doğrusal değişken diferansiyel transformatörler (LVDT'ler) kullanmıştır. Çalışmada, Şekil 1.6.34'te olduğu gibi kaplamanın üstü ve altı arasındaki sıcaklık farkı gece boyunca negatif, gündüz ise pozitif olduğunu göstermiştir. Maksimum negatif ve pozitif sıcaklık farkları sabah 6.00 ve öğlen 13.00'te meydana gelirken sıfır sıcaklık farkı yaklaşık olarak sabah 9.00 ve akşam 19.00'da meydana gelmiştir. Şekil 1.6.35'te bir kaplamanın köşe, kenar ve merkezindeki düşey yer değiştirmeler zamana göre gösterilmektedir. Kaplamadaki düşey yer değiştirmeler, Resim 1.6.12 ve Resim 1.6.13'te gösterildiği gibi kaplamanın üst ve altı arasındaki sıcaklık farkıyla yakından ilişkilidir. Resimlerden anlaşılacağı üzere kaplama gece saatlerinde içbükey ve gündüz saatlerinde dışbükey olduğunda kendi ağırlığı ile ters yönde gerilme değerleri meydana gelmektedir. Kaplamanın köşesi ve kenarı, gece boyunca yukarı doğru kıvrılırken, gündüzleri ise aşağı doğru kıvrılmaktadır (Yoonseok, 2012).



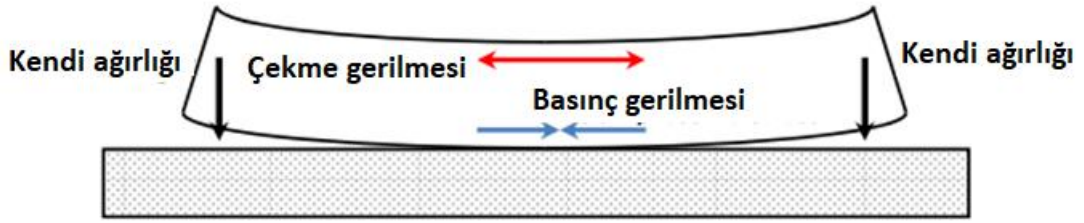
Şekil 1.6.34. Beton plakta günlük sıcaklık değişimi (Yoonseok, 2012)
 $(^{\circ}\text{F}=1,8^{\circ}\text{C}+32)$



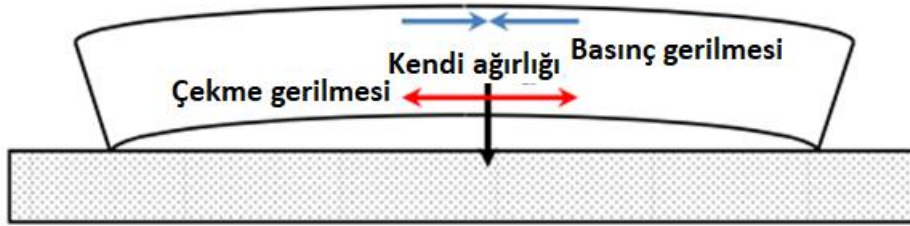
Şekil 1.6.35. Beton plakta köşe, kenar ve merkezde meydana gelen yer değiştirmeler
 (Yoonseok, 2012)

Şekil 1.6.35'e bakıldığında maksimum yer değiştirme değerleri köşelerde meydana gelmektedir. Uzun olan köşede kıvrılmadan dolayı 2,3 mm yer değiştirme meydana

gelirken kısa köşede 1,83 mm yer değiştirme meydana gelmiştir. Bu değerler sabah saat 5.00 civarında oluşmuştur. Yolun tam merkezinde aynı saate zıt yönde maksimum yer değiştirme 0,58 mm olarak ortaya çıkmıştır. Çalışmada hem bir gün içerisinde farklı saatlerde sıcaklık ölçümleri yapılmış hem de beton kaplamanın köşe, kenar ve merkezdeki yer değiştirme değerleri LVDT'ler ile ölçülmüştür. En büyük yer değiştirme büyük olan köşede sabah saat 6.00'da meydana gelmiştir. Yolun merkezinin maksimum yer değiştirmesi de saat 14.00 civarında oluşmuştur. Saat 14.00'de maksimum sıcaklık farkı $12,2^{\circ}\text{C}$ (22°F) olduğu, sıcaklık farkının sıfır olduğu saatler sabah 9.00 ve akşam 18.00 olduğu Şekil 1.6.135'te görülmektedir. Sabah saat 7.00 civarında alt ile üst yüzey arasındaki sıcaklık farkı maksimum negatif değerinde $-6,6^{\circ}\text{C}$ (12°F) olup buradaki yer değiştirme değeri 0,241 cm (0,095 inç) olmuştur. (1 inç=2,54 cm)



Resim 1.6.12. Gece boyunca beton kaplamanın kıvrılması (Yoonseok, 2012)



Resim 1.6.13. Gündüz boyunca beton kaplamanın kıvrılması (Yoonseok, 2012)

Beton yol kaplamasında sıcaklık dağılımı, kesit boyunca lineer olmayıp nonlineer olarak dağılmaktadır. Bunun yanında kaplamanın zeminden itibaren yaklaşık dörtte birlik kısmı lineer sıcaklık dağılımı göstermektedir. Kaplama yüzey sıcaklığı hava sıcaklığıyla aynı olmakla birlikte yaz aylarında güneşten gelen radyasyon etkisiyle birlikte hava sıcaklığından daha büyük olmaktadır. Yaz aylarında genel itibariyle kaplama üst yüzeyi alt yüzeyinden daha sıcakken kış aylarında kaplama alt yüzeyi üst yüzeyinden daha sıcak olmaktadır. Bununla birlikte gün içinde hava sıcaklığının değişimine göre farklı saatlerde

kaplamanın üst yüzeyi alt yüzeyinden daha sıcak olurken özellikle gece saatlerinde kaplamanın alt yüzeyi üst yüzeyinden daha sıcak olabilmektedir. Kaplamada farklı bölge ve farklı mevsimlerde alınan sıcaklık verilerine göre pozitif sıcaklık farkı değişmekle birlikte genel itibarıyla 15°C civarında olmaktadır. Negatif sıcaklık farkı ise -6°C civarında oluşmaktadır. Pozitif sıcaklık farkında kaplamanın üst yüzeyi dış bükey olarak yer değiştirmeye maruz kalırken negatif sıcaklık farkında bu durum tam tersi yönde olup iç bükey bir yer değiştirme meydana gelmektedir.

1.7. Hafif Beton ve Özellikleri

Hafif beton, içerisinde yoğunluğu normal agregaya göre daha düşük olan agregaların kullanılması veya çeşitli yollarla beton içerisinde boşluklar oluşturulması durumunda yoğunluğu 2000 kg/m^3 'ten az olan betonlardır. Diğer bir deyişle etüv kurusu haldeki birim hacim ağırlığı 800 ile 2000 kg/m^3 arasında değişen betonlar, hafif beton olarak tanımlanmaktadır (URL-4, 2022).

1.7.1. Hafif Betonların Birim Hacim Ağırlığı

Bir betonun birim hacim ağırlığı, 1 m^3 'ü içerisinde kullanılan malzemelerin ağırlıklarının toplamıdır. Bu toplam içerisinde en büyük ağırlığı %75 oranla agregadır. Agreganın hafif olduğu betonlara hafif beton denilmektedir. Bu tezde kullanılan hafif beton, içerisinde %15 GP (genleştirilmiş perlit) agregası içeren betondur. %15 genleştirilmiş perlit agregalı hafif beton birim hacim ağırlığı laboratuvar çalışmasında 2178 kg/m^3 , %0 genleştirilmiş perlit içeren (geleneksel beton) betonun yoğunluğu ise 2561 kg/m^3 olarak bulunmuştur. Bu değerler ANSYS programında girdi olarak kullanılmıştır.

1.7.2. İşlenebilirlik

Betonun işlenebilirliği, içerisinde kullanılan malzeme gradasyonuna, su/çimento oranına, agregaların biçimine, geçen zamana ve ortamın sıcaklığı gibi durumlara bağlı

olarak değişebilmektedir. Hafif betonda da aynı durumlar geçerli olup özellikle agregaların hafif olmasından dolayı agrega ağırlığına da bağlıdır. Çok akışkan slump'a ait bir hafif betonun agregaları beton yüzeyine çıkacağından ayrışma meydana gelmektedir. Bu nedenle hafif betonların çökme değeri belirli değerlerde sınırlandırılmış olup, 75 mm çökme değerine sahip bir hafif betonun iyi bir işlenebilirlik özelliği sergileyebileceği belirtilmiştir (URL-4, 2022).

1.7.3. Dayanım

Betonun en önemli özelliklerinin başında dayanım gelmektedir. Beton içerisinde kullanılan agrega tipi, agrega dayanımı, çimento dozajı, kimyasal ve mineral katkıları, su/çimento oranı ve gradasyon eğrisi gibi özellikler betonun dayanımını değiştirebilmektedir. Hafif betonların dayanımında en önemli paya sahip olan agrega, hafif ve dayanım açısından düşüktür. Fakat agrega dayanımı ile agrega kullanılarak elde edilmiş hafif beton dayanımı arasında doğrudan bir ilişki kurmak söz konusu olmamaktadır (URL-4, 2022). Hafif agrega basınç dayanım değeri genellikle hafif betondaki çimento hamuru basınç dayanım değerinden düşük olduğundan, yükün çimento hamuru tarafından taşındığı, hafif agregalar ile aktarıldığı bilinmektedir. Bu nedenle kırılmalar beton yüzeyine uygulanan yüke paralel olacak şekilde düz bir çizgi boyunca oluşmaktadır (URL-4, 2022).

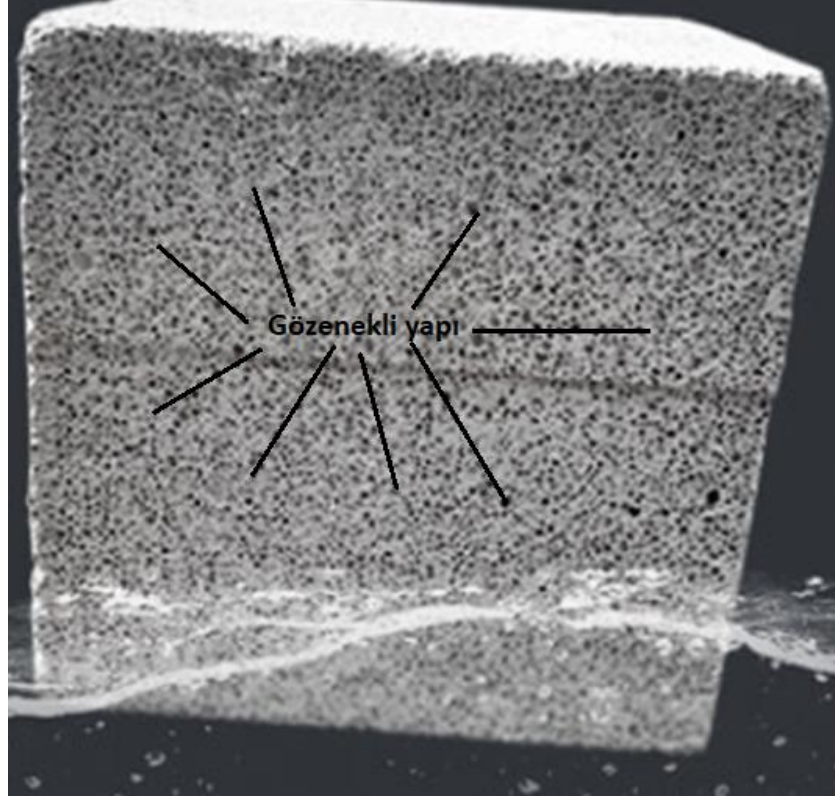
1.7.4. Su Emme

Hafif betonlarda kullanılan doğal hafif agregalardaki gözeneklilik, su emme açısından büyük önem taşımaktadır. Yüksek gözeneklilik agreganın su emme ihtiyacını artıracığından hafif beton tasarımlarının mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu nedenle hafif beton içerisinde kullanılacak hafif agregaların su emme kapasitesinin düşük olması tasarımda ciddi yarar sağlamaktadır. Fakat doğal hafif agregaların genellikle gözeneklilik oranları oldukça yüksektir. Bu bağlamda, hafif beton tasarımlarında kullanılacak hafif agrega türlerinin su emme açısından detaylı irdelenmesi gerekmektedir (URL-4, 2022).

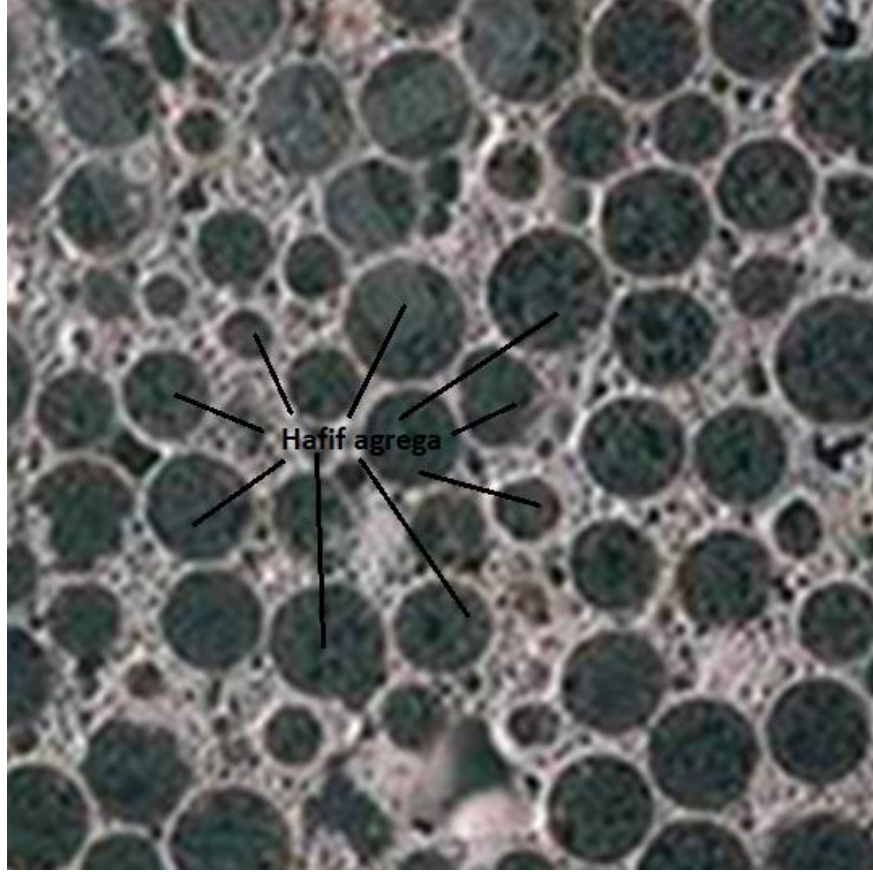
1.7.5. Agregada Aderansı

Hafif agregaların yapısı gereği gözenekli ve pürüzlü olması çimento hamuru ile çok iyi bir aderans oluşturmalarını sağlamaktadır. Bu sayede çimento hamurunun agreganın içerisindeki boşluklara kadar girmesiyle geleneksel betona kıyasla ara yüzeyin çok daha güçlü hale gelmesini sağlamaktadır.

Agrega tarafından emilen suyun bir kısmının kapiler boşluklarla dışarı atılması, beton içerisinde hidrate olmamış çimento taneciklerinin hidratasyona uğramasını ve bu sayede agregamatriş bağının daha da güçlenmesine olanak vermektedir. Resim 1.7.5a, Resim 1.7.5b, Resim 1.7.5c’de hafif agreganın beton içindeki hali görülmektedir (URL-4, 2022). Resim 1.7.5a ve Resim 1.7.5b’de kullanılan agregalar ile hafif beton elde edilirken Resim 1.7.5c’de ise beton, boşluklu bir şekilde koyularak hafif beton oluşturulmuştur.



Resim 1.7.5a. Hafif Beton agregaları görünümü (URL-4, 2022)



Resim 1.7.5b. Hafif Beton agrega görünümleri (URL-4, 2022)



Resim 1.7.5c. Hafif Beton agrega görünümleri (URL-4, 2022)

1.7.6. Hafif Betonun Dayanımına Göre Sınıflandırılması

Hafif betonlar, içerisinde kullanılan agrega türlerine, birim hacim ağırlık ve dayanım özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. ACI 213R-14'de yapısal hafif betonları 28 günlük basınç dayanımları minimum 17 MPa olan ve yoğunluğu 1350-1900 kg/m³ arasında değişen tamamen hafif agrega veya hafif agregayla normal agreganın birlikte kullanılması sonucu üretilmiş betonlar olarak tanımlanmaktadır. Üretimde kullanılan söz konusu agregalar ile 35-42 MPa arasında basınç dayanımları elde edilebildiği görülebilmektedir. Bu betonların ısısal performansları da orta dayanımlı ve düşük yoğunluklu betona göre daha düşük olmasına karşın, normal betona kıyasla daha iyi performans sergileyebilmektedir (URL-4, 2022).

1.8. Betonun Mekanik Özellikleri

Beton, genel olarak çimento hamuru ve agregadan oluşan kompozit bir malzemedir. Her betonun kendine has bir takım özellikleri vardır. Bu özellikler kabaca; ısı genleşme katsayısı, elastisite modülü, çekme mukavemeti, basınç mukavemeti, poisson oranı gibi mekanik ve ısı özellikleri olarak sıralanabilir. Ayrıca her betonun bir yoğunluğu vardır. Betonun mekanik ve fiziksel özellikleri değiştikçe davranışı ve dış etkilere karşı direnci değişmektedir. Bu doğrultuda betonun mekanik özelliklerinin istenen seviyede olması oldukça önemlidir.

1.8.1 Betonun Çekme Mukavemeti

Betonda çatlak oluşumu, dış etkilere maruzluğu kolaylaştırdığından önlenmesi gerekmekte olup büyük oranda çekme gerilmeleri ile ilişkilidir. Betonun çekme dayanımı, doğrudan veya dolaylı yükleme (yarmada çekme ya da eğilmede çekme) deneyleri ile bulunmaktadır.

Betonun çekme mukavemetinin hesaplanmasında üç ve dört noktalı çekme deneyi ile yarmada çekme deneyleri yapılmakta olup, bilgisayar simülasyonlarıyla desteklenen çalışmalar yapıldığı literatürde görülmüştür (Subaşı vd., 2009). Gemi ve Köroğlu cam

elyaf takviyeli polimer lifli beton ve lifsiz beton karşılaştırmasında üç noktalı ve dört noktalı eğilmede çekme deneyi yapmıştır. Bu deney sonucunda 15cmx15cmx15cm küp numune basınç dayanımı ortalaması 26 (C20/25) MPa civarında gelen betonun üç noktalı ve dört noktalı eğilmede çekme değerlerinden elde edilen veriler Tablo 1.8.1’de verilmiştir (Gemi & Köroğlu, 2018).

Tablo 1.8.1. Lifli ve lifsiz betonda yapılan üç ve dört noktalı eğilmede çekme dayanımı değerleri (Gemi & Köroğlu, 2018)

Numuneler	Boyut	Yük (kN)	Dayanım (N/mm ²)
1 (3 nokta)	Prizma 40x10x10	10.60	2.98
2 (4 nokta)	Prizma 40x10x10	13.24	3.97
3 (Lifli 4 nokta)	Prizma 40x10x10	11.58	3.47

Tablo 1.8.1’den görüldüğü üzere üç noktalı eğilmede çekme dayanımı, basınç dayanımının yaklaşık %11,5’u ve dört noktalı eğilmede çekme dayanımı ise basınç dayanımının %15’i civarı çıkmıştır. Emiroğlu vd. yapmış olduğu çalışmada çeşitli oranlarda lastik agregalı betonlar üretmiş ve numunelerle çalışma yapmıştır. Kontrol numunesinin basınç dayanımı 45 MPa ve üç noktalı eğilmede çekme dayanımı 4,75 MPa çıkmıştır (Emiroğlu vd., 2009). Bu da çekme dayanımının yaklaşık olarak %11 olduğunu göstermektedir.

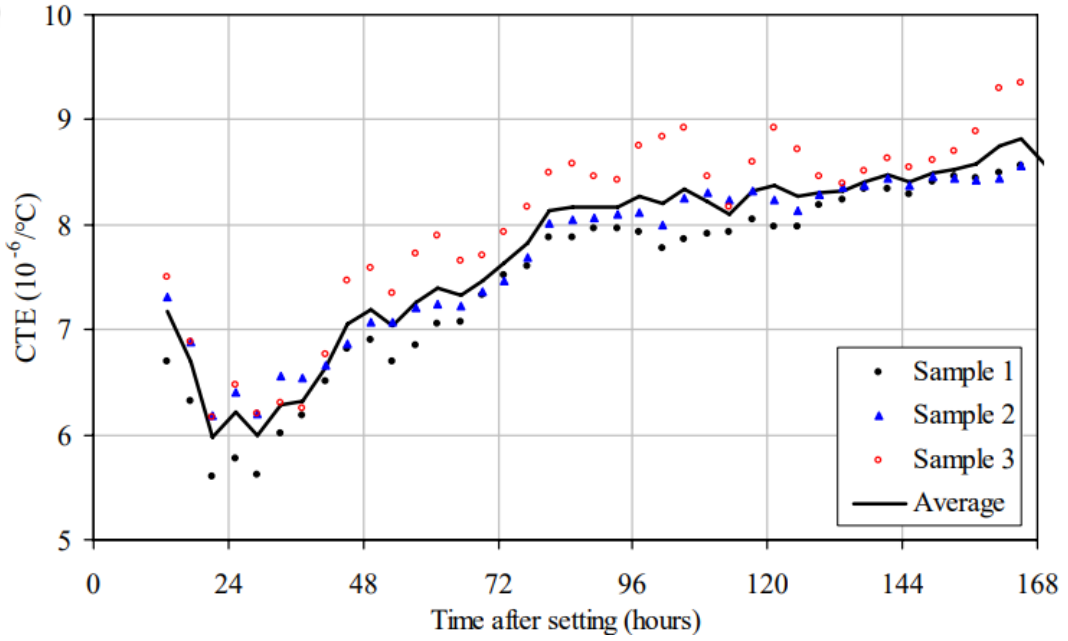
1.8.2. Betonun Isıl Genleşme Katsayısı

Isıl genleşme katsayısı; bir malzemede veya elemanda, her bir sıcaklık derecesinde meydana gelen birim şekil değişimini gösteren bir katsayıdır. Bir birim sıcaklık değişiminde, malzemede meydana gelen hacim, alan veya uzunluk değişimleri gözlemlenerek elde edilir.

Alungbe ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada bir beton numunesinde, ısı genleşme katsayısı üzerinde agreganın etkili olduğu, su/çimento oranının doğrudan büyük bir etkiye sahip olmadığı ve numunenin kuru ve nemli olmasına göre de katsayının değişim gösterdiği bilgisine varmışlardır (Alungbe vd., 1992).

Yang ve arkadaşları da yapmış oldukları çalışmada ısı genleşme katsayısını etkileyen faktörleri agrega türü, numune şekli, ısınma soğuma döngüsü ve ölçüm türlerine (dilatometre ve gerinim ölçerler) göre dört başlık altında incelemişlerdir (Yang vd., 2003).

Cusson ve Hoogeveen çalışmalarında 50 MPa'lık basınç dayanımına sahip bir betonun sıcaklığını artırarak deney düzeneği hazırlamışlardır. Bu çalışmaya göre ilk 24 saatlik kısmında ısı genleşme katsayısı $6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ve dört günün sonunda da $8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ değerine yükseldiğini görmüşlerdir (Grafik 1.8.2.1) (Hoogeveen & Cusson, 2006). Görüldüğü üzere ısı genleşme katsayısı aynı numunede ve şartlarda bile değişkenlik gösterebilmektedir.



Grafik 1.8.2.1. Cusson ve Hoogeveen çalışmasına göre ısı genleşme katsayısı (Hoogeveen & Cusson, 2006)

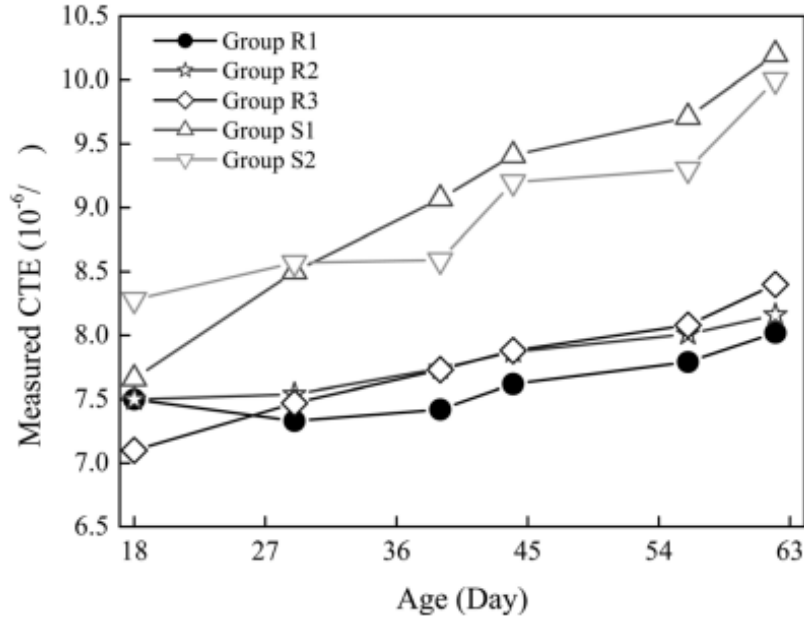
Wang ve arkadaşları yaptığı çalışmada içerisinde çeşitli oranlarda kaya dolgusu bulunan beton ile kendiliğinden yerleşen betonu (Tablo 1.8.2.1), farklı numune boyutlarında suya daldırıp ısıtarak yaptıkları ısı genleşme katsayısı hesaplamasında Tablo 1.8.2.2 ve Grafik 1.8.2.2'deki sonuçlara varmışlardır (Wang vd., 2013). Tablo ve Grafikten anlaşılacağı üzere ortam şartları değişince ısı genleşme katsayısı da değişkenlik göstermektedir.

Tablo 1.8.2.1. Oluşturulan beton numune grupları (Wang vd., 2013)

Group	RFC						SCC			
	R1		R2		R3		S1		S2	
Specimen size	Φ450 mm × 900 mm						Φ450 mm × 900 mm		Φ200 mm × 500 mm	
Specimen number	R1-1	R1-2	R2-1	R2-2	R3-1	R3-2	S1-1	S1-2	S2-1	S2-2
Rock rate, %	46		42		35		—		—	

Tablo 1.8.2.2. Kaya dolgulu beton ile kendiliğinden yerleşen betonun farklı numune boyutlarındaki ısı genleşme katsayıları (Wang vd., 2013)

Material	Group Number	CTE/($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)					
		18 d	29 d	39 d	44 d	56 d	62 d
RFC	R1	7.50	7.33	7.42	7.62	7.79	8.02
	R2	7.50	7.54	7.74	7.87	8.01	8.16
	R3	7.10	7.47	7.73	7.88	8.08	8.40
SCC	S1	7.66	8.50	9.07	9.41	9.71	10.20
	S2	8.28	8.57	8.59	9.20	9.30	10.00

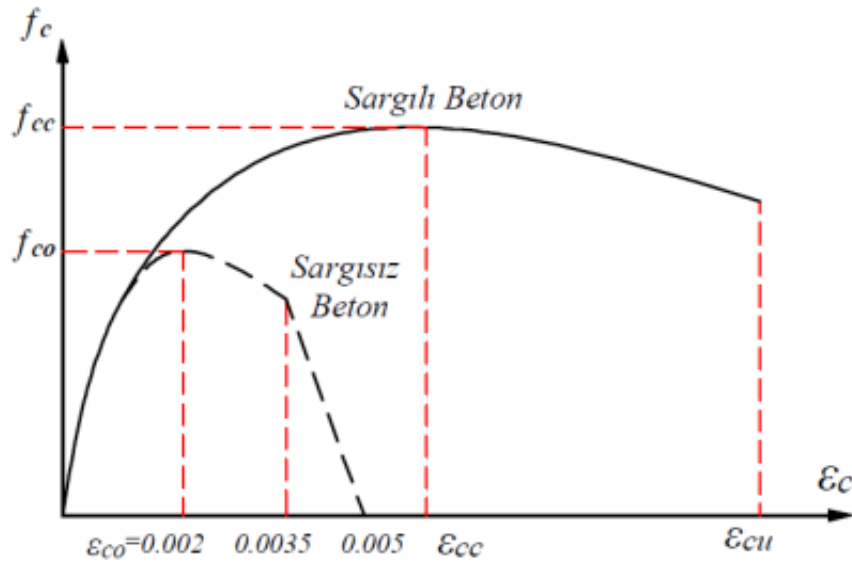


Grafik 1.8.2.2. Kaya dolgulu beton ile kendiliğinden yerleşen betonun farklı numune boyutlarındaki ısı genleşme katsayıları (Wang vd., 2013)

1.8.3. Betonun Elastisite Modülü ve Basınç Mukavemeti

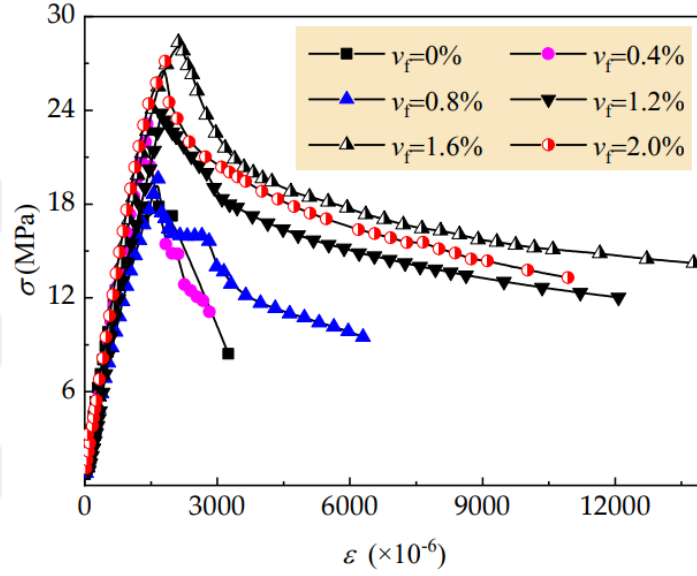
Elastisite modülünün bulunmasının yanında önemli konulardan biri de betonun gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı ve betonun çatladığı anda yapabileceği maksimum birim şekil değiştirme değeridir. Bu bağlamda Uzbaş B.'nin beton İçin Geliştirilen Gerilme-Şekil Değiştirme Modellerinin Karşılaştırılması adlı çalışmasında betonun birim şekil değiştirme hesaplarında birçok bilim adamının çalışmalarında bulunduğu görülmektedir. Farklı formülasyonlar elde edilmiş ve halen bu konuda çalışma yapan bilim adamlarının olduğu belirtilmektedir (Sheikh-Üzümeri Modeli, Saatçioğlu - Ravzi Modeli, Kent-Park ve Geliştirilmiş Kent-Park Modeli, Roy-Sozen Modeli, Soliman-Yu Modeli, Sargin Modeli, Vallenas-Bertero-Popov Modeli, Chan Modeli, Shah Modeli, Eurocode 2'de Modeli, Desayi ve Krishman modeli, Smith ve Young modeli, CEB modeli, Richard ve Abbott Modeli, Tomaszewicz modeli, . Saent Modeli, Wang vd. modeli, Ahmad ve Shah modeli, CEB-FIB Modeli, Collins vd. modeli, Hsu ve Hsu modeli, Attard ve Setunge Modeli, Van Gysel ve Taerwe Modeli, Wee vd. Modeli, Tsai modeli, Tulin ve Gerstle Modeli, Popovics Modeli) (Uzbaş, 2014).

2018 deprem yönetmeliğine göre gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı Şekil 1.8.3.1'de verilmiştir. Diyagramdan görüldüğü üzere geleneksel betonun çatlamada yapabildiği birim şekil değiştirme değeri 0.002 ile 0.0035 arasında olmaktadır (T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, 2018).



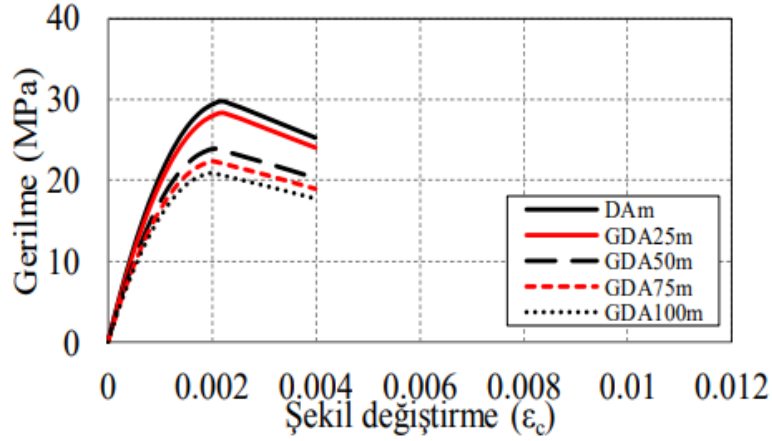
Şekil 1.8.3.1. 2018 TBDY (T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, 2018)

Zhao ve arkadaşlarının yaptığı çelik lif takviyeli hafif beton çalışmasında geleneksel betonun gerilme-birim şekil değiştirme grafiklerini (Şekil 1.8.3.2) elde etmiştir. %0 katkılı olarak diyagramda görülen geleneksel betonun çatlamadan önceki birim şekil değiştirme değerinin 0.002 ile 0.003 değerleri arasında olduğu görülmektedir (Zhao vd., 2019).



Şekil 1.8.3.2. Zhao ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadaki gerilme-birim şekil değiştirme değerleri (Zhao vd., 2019)

Sarıbaş İ'nin geri dönüşüm agregalarından elde ettiği betonlardaki gerilme-birim şekil değiştirme değerlerine bakıldığında geleneksel betonun çatlamadan önceki birim şekil değiştirme değerinin 0.002 ile 0.004 arasında olduğu Şekil 1.8.3.3'te görülmektedir (Sarıbaş 2019).



Şekil 1.8.3.3. Sarıbaş'ın yaptığı çalışmadaki gerilme-birim şekil değiştirme değerleri
(Sarıbaş 2019)

Emiroğlu ve arkadaşları yapmış olduğu çalışmada çeşitli oranlarda lastik agregalı betonlar üretmiş ve numunelerle hem basınç dayanımı hem de bu betonlara ait elastisite modüllerini hesaplamıştır. Kontrol numunesinin basınç dayanımı 45 MPa ve üç noktalı eğilmede çekme dayanımı 4,75 MPa çıkmıştır. Bu çalışmada beton gruplarına ait elastisite modülü değerleri Türk Standartları Enstitüsü (TSE), Amerikan Beton Enstitüsü (ACI), İngiliz Standart Enstitüsü (BSI) ve Avrupa Beton Komitesi (CEB) tarafından önerilmiş ve geleneksel beton için birbirine yakın sonuçlar veren formüllerle de hesaplanmıştır. Bu formüller Tablo 1.8.3.1'de, elde edilen elastisite modülleri ise Tablo 1.8.3.2'de verilmiştir (Emiroğlu vd., 2009). Tablo 1.8.3.2'den görüldüğü üzere kontrol numunesi elastisite modülüne göre beton içerisinde kullanılan lastik oranı arttıkça her bir formülle hesaplanan elastisite modülü değerleri azalmaktadır. Bu da içerisinde daha zayıf agregası ile oluşturulan betonun hafif betona dönüştüğü ve elastisite modülün düştüğü görülmektedir.

Tablo 1.8.3.1. Standartlara göre elastisite modülü formülleri (Emiroğlu vd., 2009)

TSE	ACI	BSI	CEB
$E = 14000 + 3250\sigma^{1/2}$	$E = 0.043\omega^{3/2}\sigma^{1/2}$	$E = 9100(\sigma)^{1/3}$	$E = 9500(\sigma + 8)^{1/3}$

E=Elastisite Modülü (MPa), ω = Birim Ağırlık (kg/m³), σ = Basınç Dayanımı (Mpa)

Tablo 1.8.3.2. Çeşitli oranlarda lastik kullanılan betonun elastisite modülleri (Emiroğlu vd., 2009)

Yöntem	Numune Adı	Elastisite Modülü (MPa)				
		Kontrol	%5	%10	%15	%20
TSE	İnce	35968	34990	32864	30169	29292
	İri		35185	33849	30875	29892
ACI	İnce	31186	28461	24363	19856	17826
	İri		28726	25635	20723	18525
BSI	İnce	32532	31559	29391	26520	25553
	İri		31754	30405	27287	26216
CEB	İnce	35839	34931	32941	30394	29565
	İri		35112	33865	31063	30132
Deneyssel	İnce	33630	34837	23002	16866	16494
	İri		27274	19972	17213	17079

Bu tez çalışmasında Tablo 1.8.3.1’de verilen formüllerden TSE’nün verdiği elastisite modülü formülü kullanılarak geleneksel ve hafif betonun elastisite modülleri bulunmuş ve ANSYS sonlu elemanlar yönteminde kullanılmıştır.

1.9. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Literatürde üzerine gelen yüklerden dolayı beton yol kaplamasında meydana gelen gerilmeleri hesaplamayabilmek için 3D-FE, Abaqus ve ABAS-PROGRAM gibi sonlu elemanlar programlarıyla analiz yapılabilmektedir. Bu programlar kullanılarak beton yol ve alt tabakalarında gerilme analizleri yapılırken yol boyutu, yük büyüklüğü gibi gerilmeleri etkileyen kriterlerin değiştirilmesiyle beton yol kaplamalarının gerilme analizleri yapılabilmektedir (Guo vd., 2007; Zdiri vd., 2009; Alwash, 2014).

Benzer şekilde literatürde IBM 360 programıyla tasarlanan bir sonlu elemanlar modeliyle ısı gerilmeleri elde edilmiştir. Program, uygulanan trafik yüklerinden veya ısı yüklerinden kaynaklanan kaplama gerilmelerini ve sapmaları belirlenmektedir (Darter & Barenberg, 1977).

Bu tez kapsamında sonlu elemanlar yöntemiyle çözümde program olarak ANSYS programı kullanılmıştır. Bu programla birlikte üzerindeki ısı ve trafik yükünden dolayı kaplamada meydana gelen çekme gerilmesi değerleri ile deformasyon değerleri elde edilmiştir.

1.10. Tezin Amaç ve Kapsamı

Gelişen dünya ile birlikte özellikle ağır trafik yüküne karşı direncinden dolayı karayollarında beton yol kaplaması kullanılmaktadır. Bunun yanında havaalanları, park alanları, limanlar, yürüyüş yolları gibi yerlerde de beton kaplama kullanılmaktadır. Ancak bu yerlerde kullanılan ve çok geniş yüzey alanına sahip betonun günlük sıcaklık farkı altında genişlemesinden dolayı kaplama uzama yapmakta betonun gevrek bir malzeme olmasından dolayı da kaplamada çatlaklar meydana gelmektedir.

Bu tez kapsamında öncelikle $\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T$ formülüne göre betonun literatürdeki ve laboratuvarından elde edilen elastisite modülü, ısı genleşme katsayısı ve eğilmede çekme dayanımı değerleri kullanılarak kaplamanın altı ile üstü arasında absorbe edebileceği maksimum sıcaklık farkı ve bu sıcaklık farkına göre derzsiz bir şekilde (tam derzli) yapılabilecek maksimum kaplama uzunluğunun bulunması amaçlanmıştır.

Ayrıca genel itibariyle altında 50 cm kalınlığında bir zemin bulunan %0 GP (geleneksel beton) içeren beton ve %15 GP (hafif beton) içeren betondan yapılan beton yol kaplamasının tekerlek yükü, sıcaklık yüklemesi ve her ikisi beraber varken meydana gelen maksimum çekme gerilmesi değerleri ANSYS sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Bu doğrultuda;

Derz kesim aralığı olan 4,5-6 m aralığında kalması için 5mx5mx20cm ebatlarındaki beton yol kaplaması üzerinde sadece tekerlek yükü olması durumunda meydana gelen maksimum çekme gerilmesi değerleri ve bu gerilmelerin kaplama üzerinde olduğu yerler ile deformasyon değerleri bulunmuştur. Yalnızca sıcaklık yüklemesi olması durumunda ise sıcak bölgelerde oluşabilecek olan yüksek sıcaklıklarda sıcaklık farkının az olduğu durum, genel itibariyle her yerde oluşabilecek olan normal sıcaklıklarda sıcaklık farkının fazla olduğu durum ve soğuk bölgelerde oluşabilecek olan negatif sıcaklık farkı olması durumunda kaplamada meydana gelen maksimum çekme gerilmesi değerleri ve bu gerilmelerin bulunduğu yerler ile deformasyon değerleri bulunmuştur. Ayrıca kaplamada tekerlek yükü, sıcaklık yüklemesi ve her ikisi beraber varken oluşan çekme gerilmesi değerleri ve birbirleriyle ilişkisi de incelenmiştir. Böylece kaplamada tekerlek yükü ve sıcaklık yüklemesi ayrı ayrı olması durumunda değişik kombinasyonlarda maksimum çekme gerilmesi değerleri, bu değerlerin olduğu yerler ile deformasyon değerlerinin bulunması ve birbirleriyle nasıl bir ilişkide bulunduğunun öğrenilmesi amaçlanmıştır.

5mx5mx20cm ebatlarındaki bir plakta plak merkezinde, kenar orta noktasında ve köşesinde kalınlık boyunca meydana çekme gerilmesi dağılımının bulunması amaçlanmıştır.

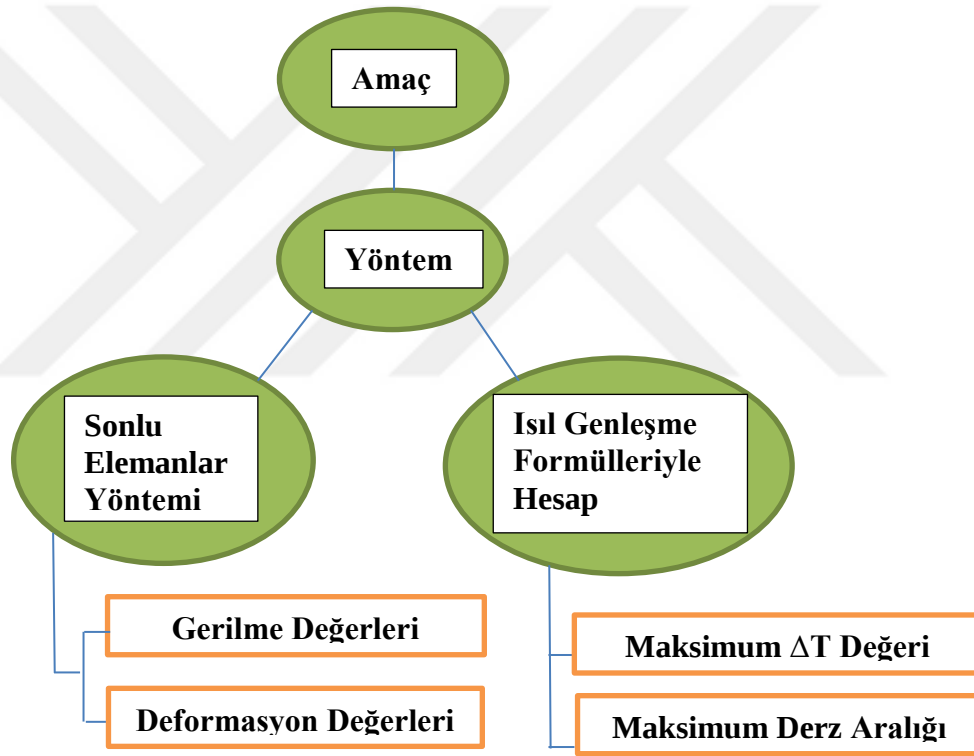
Sadece sıcaklık yüklemesi olması durumunda 5mx5m ebatlarındaki plakta kalınlığın 5 cm, 10 cm, 15 cm ve 20 cm olması durumuna göre oluşan maksimum çekme gerilmesi değerleri, bu değerlerin bulunduğu yerler, deformasyon değerleri ve termal şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir. Böylece sıcaklık yüklemesi altında kaplamanın kalınlık değişiminin maksimum çekme gerilmesi değerleri üzerine nasıl bir etkisinin olduğunun bilinmesi amaçlanmıştır.

5mx15mx20cm ebatlarındaki kaplamada tekerlek yükü, sıcaklık yüklemesi ve her ikisi beraber varken her 5 metrede bir 0,8 cm genişliğinde derz olması ve bu derzin 0 cm (derzsiz), 2,5 cm, 5 cm ve 7,5 cm derinliğinde yapılması durumunda meydana gelen maksimum çekme gerilmesi değerleri, bu gerilmelerin bulunduğu yerler ile deformasyon değerleri elde edilmiştir. Böylece beton yol kaplamasında derz yapılması durumunda derz derinliğinin tekerlek yükü, sıcaklık yüklemesi ve her ikisi beraber varken oluşan maksimum çekme gerilmesinin ve bu değerlerin bulunduğu yerlerin nasıl değiştiğinin bilinmesi amaçlanmıştır.

5mx18mx20cm ebatlarındaki bir kaplama üzerinde gerçek ebatlarda bir tır olması durumunda kaplamada tekerlek yükü, sıcaklık yüklemesi ve her ikisi beraber olması halinde maksimum çekme gerilmesi ve oluştuğu yer bulunmuştur. Bu analizde derz kesilmeden 18 metrelik uzun bir kaplama yapılması halinde kaplamada oluşacak maksimum çekme gerilmesinin ve bulunduğu yerlerin nasıl değiştiğinin bilinmesi amaçlanmıştır. Böylece derz kesim mesafesinin daha uzun yapılabileceği görülmüştür. Bu bulgu karayolu ve beton yol kaplaması teknik şartnamelerine katkı sağlayacaktır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tezin yöntem kısmı Şekil 2.1'deki akış diyagramına uygun şekilde yapılmıştır. Bu doğrultuda hafif beton (%15 GP içeren beton) ve geleneksel beton (%0 GP içeren beton) verileri kullanılarak ısı genleşme formülleriyle ve ANSYS sonlu elemanlar yöntemi ile beton yol kaplamasındaki gerilme analizleri yapılmıştır. Bu analizler ayrıca birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Diğer taraftan $\Delta L = \alpha \cdot \Delta T$ formülüne göre betonun laboratuvardan ve literatürden elde edilen mekanik değerlerine göre absorbe edebileceği maksimum sıcaklık farkı ile derz kesilmeden yapılabilecek maksimum plak uzunluğu hesaplanmıştır.

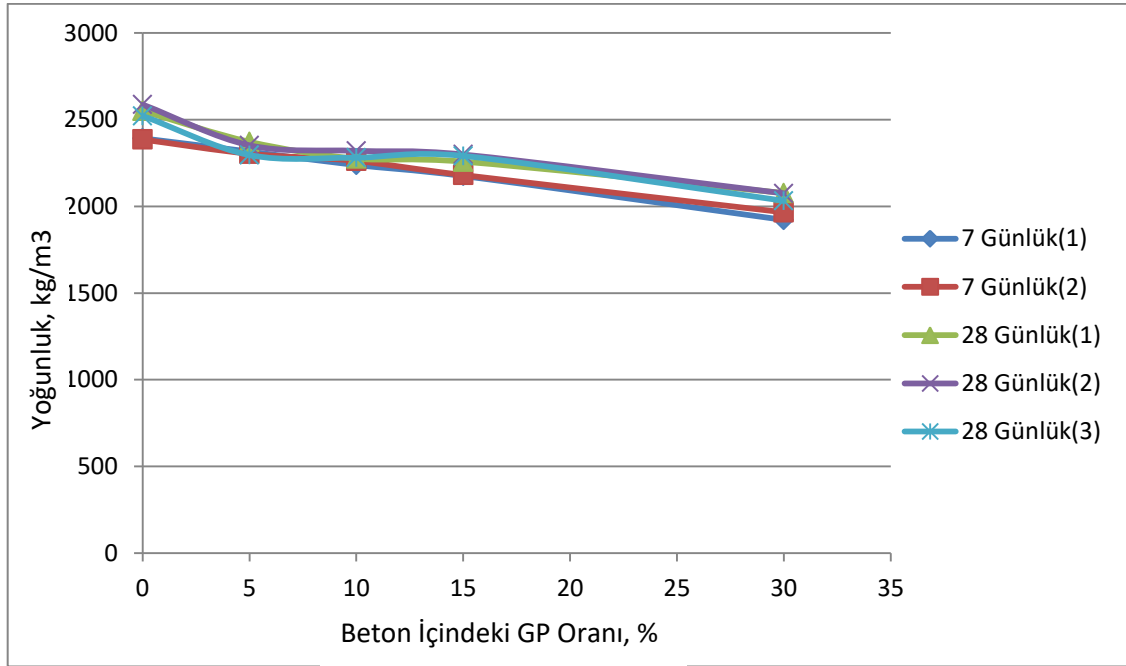


Şekil 2.1.Akış Diyagramı

Bu akış diyagramı doğrultusunda C30/37 sınıfındaki geleneksel beton ile bu betona %15 oranında GP eklenerek elde edilmiş hafif betonun elastisite modülü, ısı genleşme katsayısı, eğilmede çekme mukavemeti ve basınç mukavemeti değerleri, ısı genleşme formülüne koyularak ve ANSYS sonlu elemanlar yönteminde kullanılarak gerilme analizleri yapılmış ve derz mesafeleri elde edilmiştir. Bu değerler literatür ile karşılaştırılmıştır.

2.1. Geleneksel ve Hafif Betonun Yoğunluğu

Geleneksel betonun yoğunluğu literatürde 2400 kg/m^3 civarında olup hafif betonun yoğunluğu da $800\text{-}2000 \text{ kg/m}^3$ aralığındadır. Bu tezde kullanılan hafif beton, içerisinde %15 GP (genleştirilmiş perlit) agregası içeren betondur. %15 genleştirilmiş perlit agregalı hafif beton birim hacim ağırlığı laboratuvar çalışmasında 2178 kg/m^3 , %0 genleştirilmiş perlit içeren (geleneksel beton) betonun yoğunluğu ise 2561 kg/m^3 olarak bulunmuştur (Grafik 2.1). Bu değerler ANSYS programında girdi olarak kullanılmıştır.



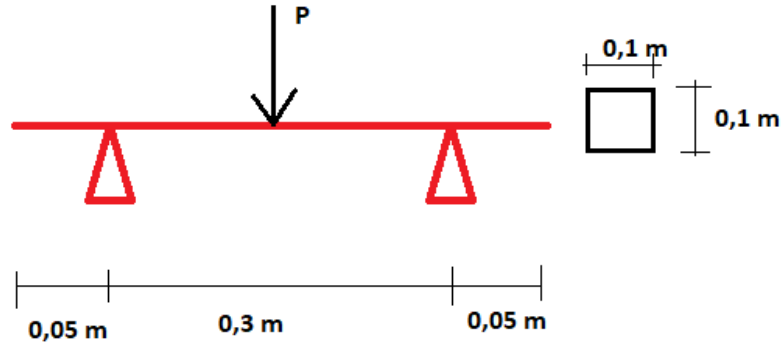
Grafik 2.1. Tezde kullanılan hafif betonun birim hacim ağırlıkları (Aktürk, 2024)

2.2. Geleneksel ve Hafif Betonun Çekme Dayanımı

Genellikle gevrek olan plastik, seramik, beton ve doğal taşlar gibi çeşitli malzemelere uygulanabilen üç noktalı eğilmede çekme testi bu tezde kullanılmıştır (Resim 2.2.1). İki mesnet üzerine koyulan $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 40\text{cm}$ boyutlarındaki numune eğilme gerilmesi oluşturacak şekilde yüklenerek meydana gelen maksimum moment değeri bulunmuştur. Sonrasında genleştirilmiş perlit agregası içeren hafif betondan ve geleneksel betondan yapılmış kirişin alt yüzeyinde çekme gerilmesi mukavemeti formül (1) kullanılarak bulunmuştur.



Resim 2.2.1. Üç noktalı eğilmede çekme deneyi

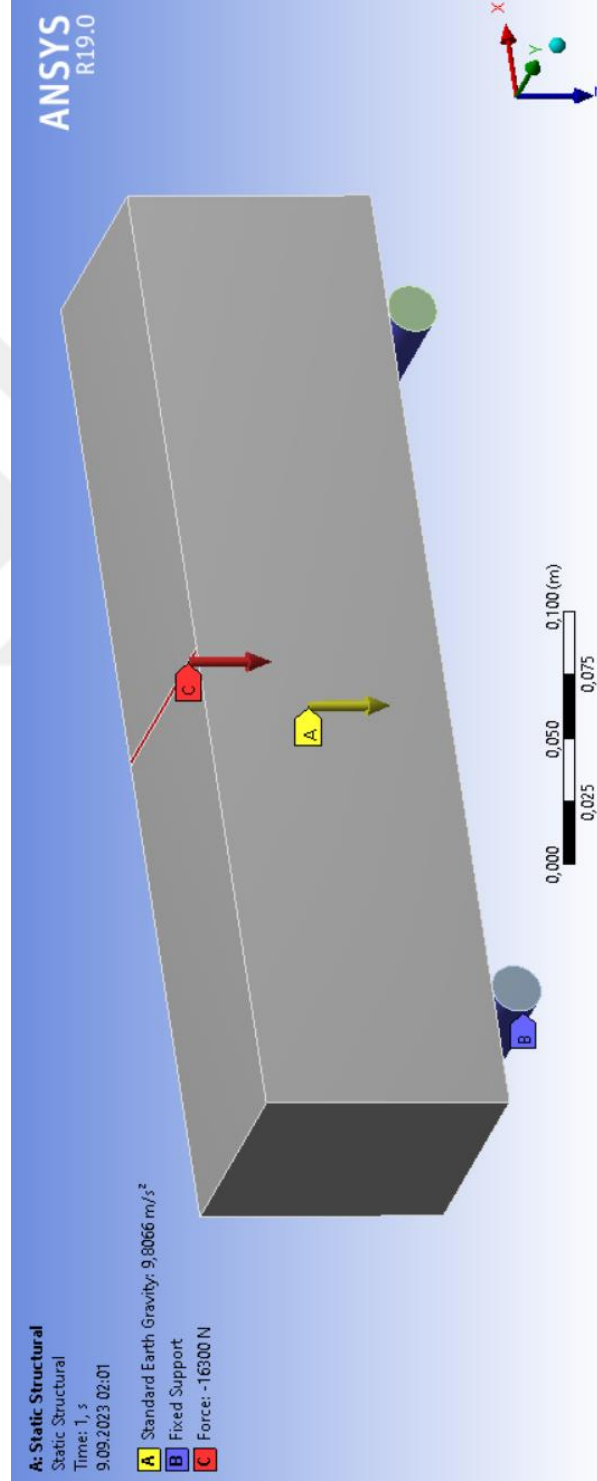


Resim 2.2.2a. Üç noktalı eğilmede çekme deneyi

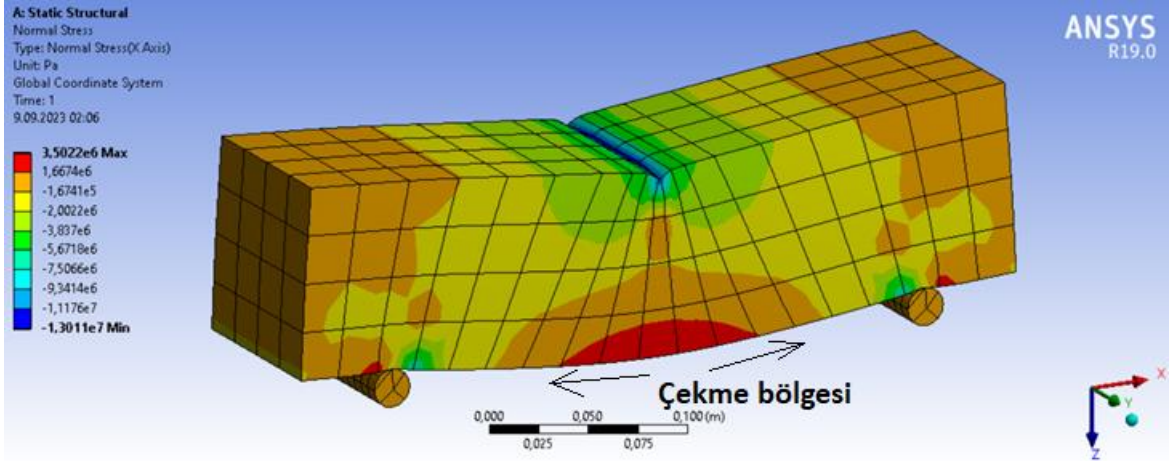
$$\sigma_e = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (1)$$

Burada; σ_e : eğilmede çekme gerilmesi, F: kırılma anındaki yük, L: iki mesnet arasındaki açıklık, b: numunenin genişliği, d: numunenin yüksekliğidir.

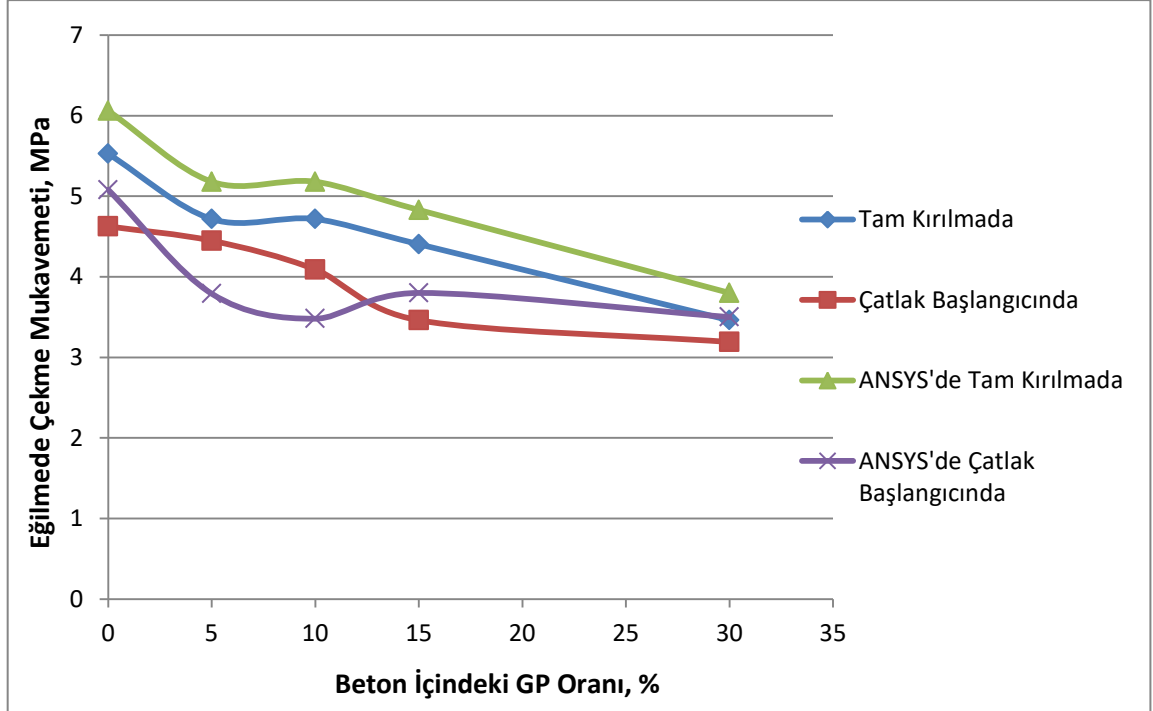
Resim 2.2.2a’da üç noktalı eğilmede çekme deneyi çizim ile gösterilmiştir. Resim 2.2.2b ve Resim 2.2.2c’de ANSYS sonlu elemanlar yöntemiyle düzeneği ve analizi görülen üç noktalı eğilmede çekme deneyi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Grafik 2.2.1’de verilmiştir.



Resim 2.2.2b. ANSYS’de üç noktalı eğilmede çekme deneyi



Resim 2.2.2c. ANSYS’de üç noktalı eğilmede çekme deneyi



Grafik 2.2.1. Eğilmede çekme deneyi sonuçları (Aktürk, 2024)

Grafik 2.2.1 değerlerine göre %0 genleştirilmiş perlit içeren ve basınç dayanımı 37 MPa olan betonun tam çatlamaya başladığı andaki üç noktalı eğilmede çekme deneyi formülasyon değerine göre 4,62 MPa olup bu da basınç dayanımının yaklaşık %12'sine karşılık gelmektedir. ANSYS sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuç ise beton basınç dayanımının yaklaşık %14'ü olmaktadır. Bu sonuçları literatürle karşılaştırdığımızda hemen hemen aynı sonuçlara karşılık gelmektedir. Bu sonuçlarının

uyumlu olması, diğer oranlardaki sonuçların güvenli bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

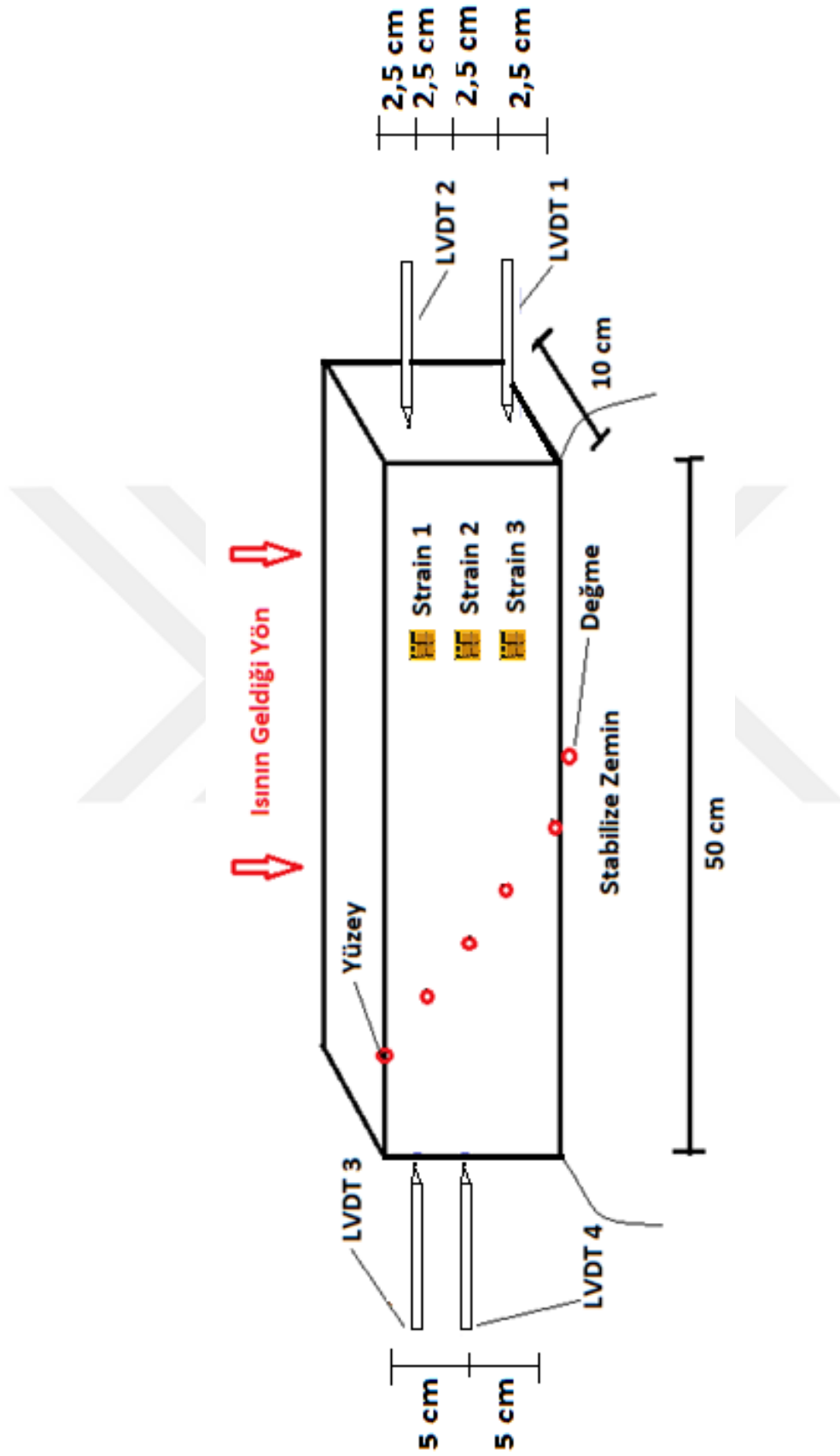
2.3. Geleneksel ve Hafif Betonun Isıl Genleşme Katsayısı

Literatürde ısı genleşme katsayısını hesaplamada net bir yöntem olmayıp çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Ayrıca betonda agrega türünün ısı genleşme katsayısı üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmektedir. Numune boyutu, suya doygunluk ve ısıtma soğutma durumları da ısı genleşme katsayısını etkilemektedir. Bu tez kapsamında laboratuvar çalışmasında hassas ölçüm sağlayan strain gauge pulları ile numunenin en sıcak olan üst bölgesindeki birim şekil değiştirme değerleri ve sonrasında da ısı genleşme katsayısı (2) formülü ile hesaplanmıştır. Ayrıca LVDT kullanarak numunenin yaptığı yer değiştirme bulunmuş sonrasında $\epsilon = \Delta L / L$ formülünden birim şekil değiştirme ve sonrasında da (2) formülüyle ısı genleşme katsayısı bulunmuştur.

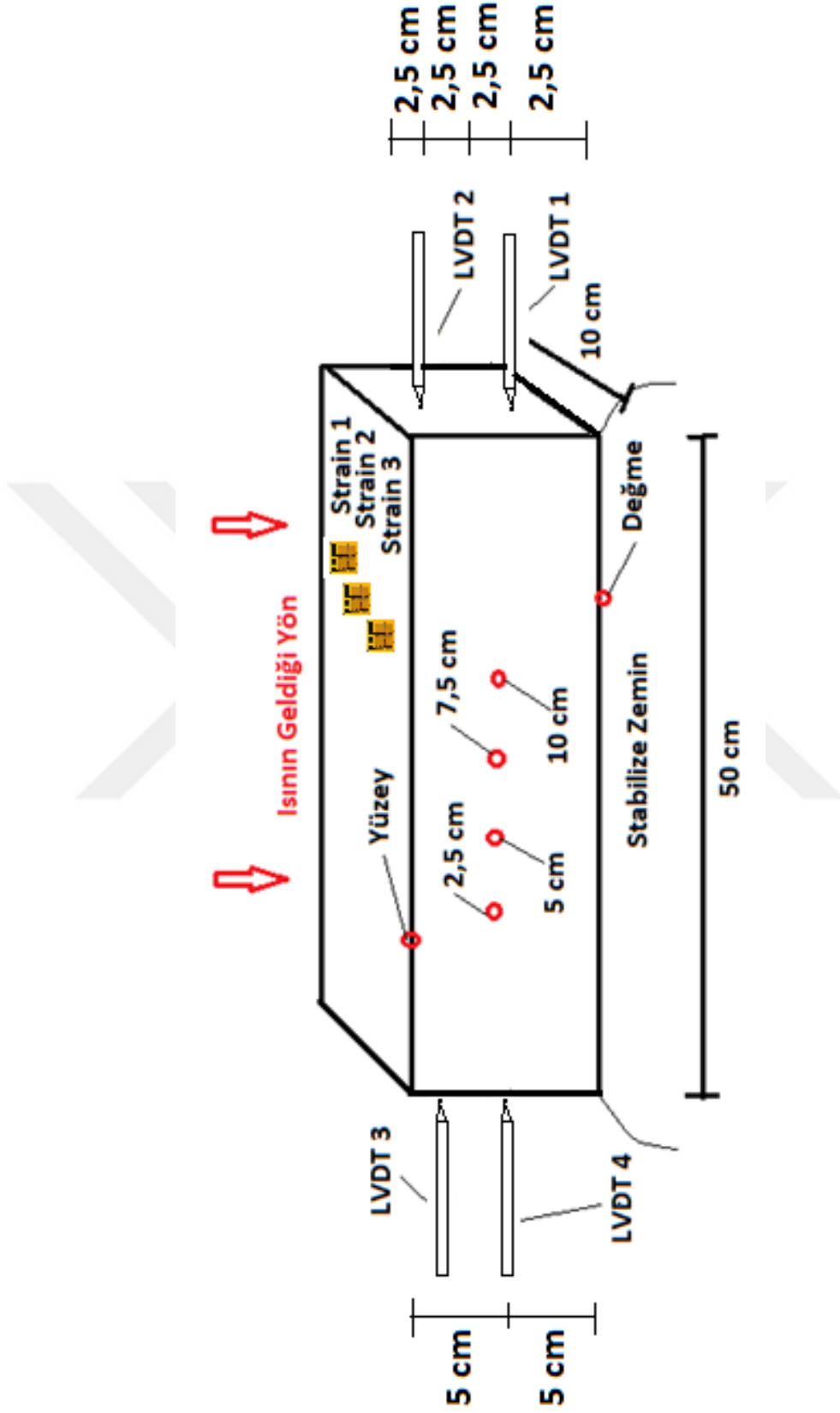
$$\epsilon = \alpha \cdot \Delta T \quad (2)$$

Burada; ϵ birim şekil değiştirme, α ısı genleşme katsayısı ($1/^\circ\text{C}$) ve ΔT ($^\circ\text{C}$) oluşturulan sıcaklık farkıdır.

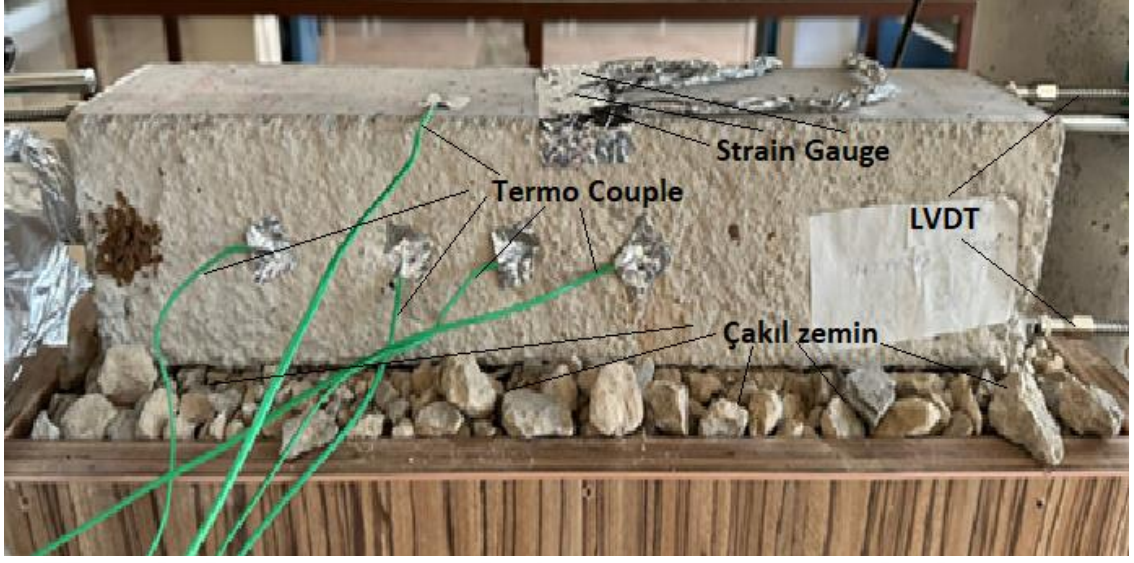
Laboratuvar ortamında sıcaklık, LVDT ve strain değerlerinin ölçümü Resim 2.3.1, Resim 2.3.2 ve Resim 2.3.3'te görülmektedir.



Resim 2.3.1. Numunenin sıcaklık ölçümleri düşey pozisyonda iken, sıcaklık, LVDT ve strain ölçümü (Aktürk, 2024)

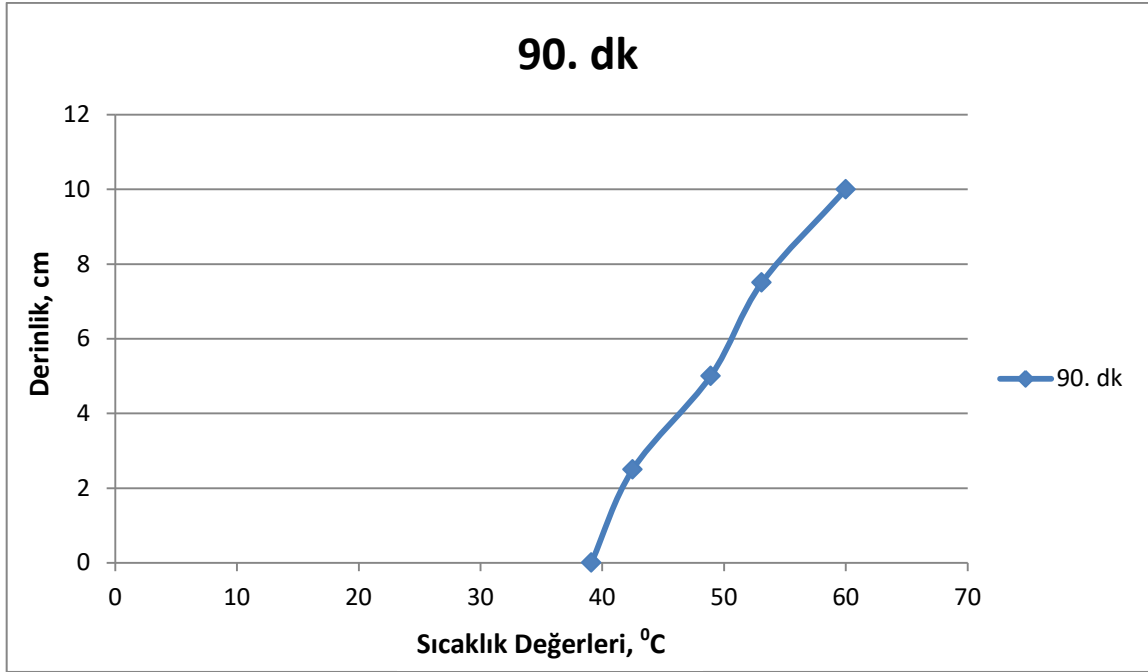


Resim 2.3.2. Kiriş numunenin sıcaklık ölçümleri yatay pozisyonunda iken, sıcaklık, LVDT ve strain ölçümü (Aktürk, 2024)

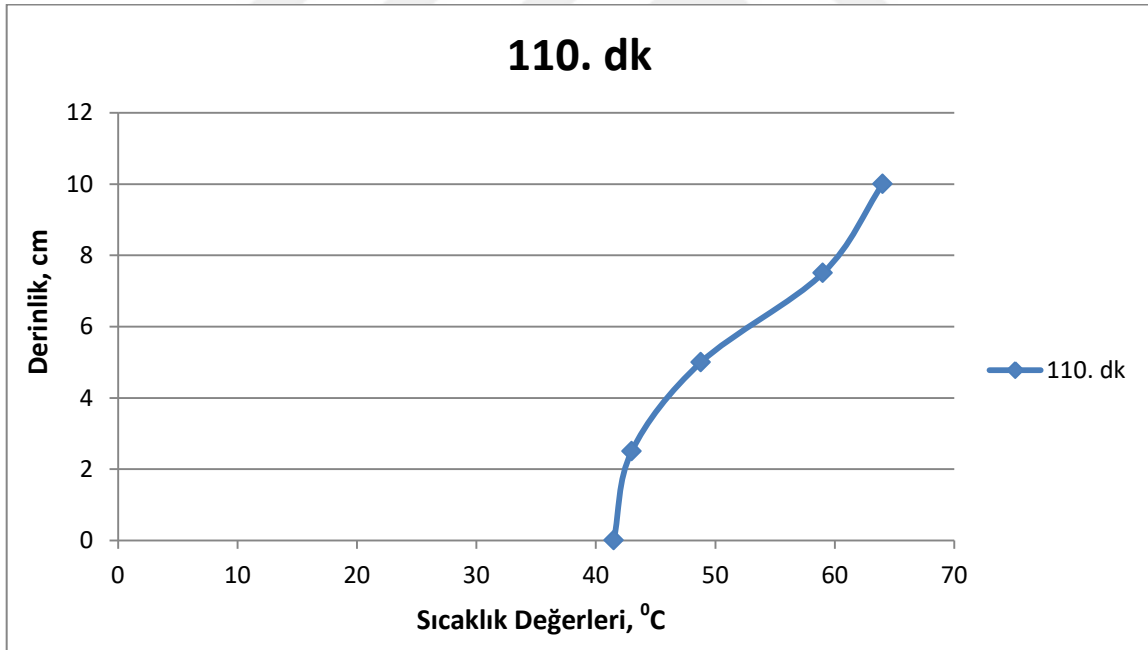


Resim 2.3.3. Numunenin sıcaklık ölçümleri yatay pozisyonda iken, termocouple, LVDT ve strain ölçümü (Aktürk, 2024)

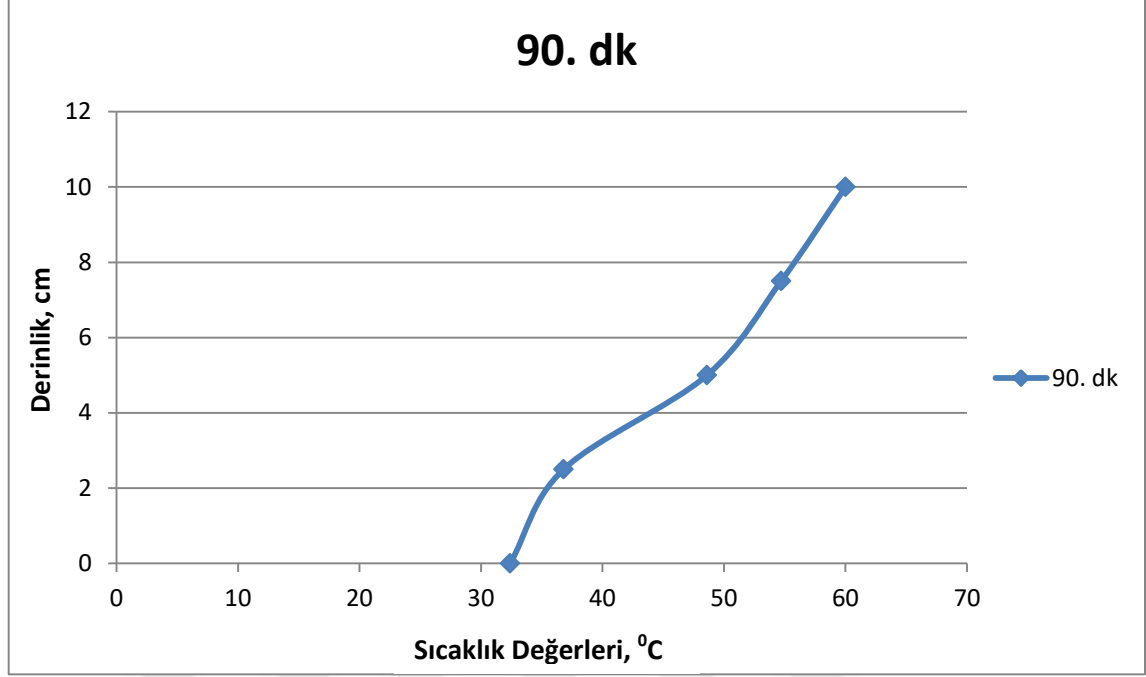
Numunelerin yüzeyleri ısınıp sıcaklıkları artarken numunenin üstten alta doğru her 2,5 cm'lik kısmı, numunenin ısıyı iletmesiyle birlikte daha yavaş bir şekilde ısınmış ve dolayısıyla sıcaklığı daha geç artmıştır. Benzer durum numune soğumaya bırakıldığında da oluşmuş ve hemen hemen aynı sıcaklığa kadar soğumuşlardır. Yüzey sıcaklıklarının maksimum değerinde olduğu durumdaki kirişin herhangi bir kesitindeki sıcaklık değerleri Grafik 2.3.1, Grafik 2.3.2 ve Grafik 2.3.3'te verilmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere her bir sıcaklık dağılımı nonlineer şekilde gerçekleşmiştir. Numunenin düşey pozisyonda olduğu bu düzenekte strain değerleri sağlıklı bir şekilde çalışamayacağından LVDT değerleriyle birlikte ısı genleşme katsayısı bulunmuştur. Her bir GP oranına ait ısı genleşme katsayıları Tablo 2.3.1 ve Tablo 2.3.2'de verilmiştir.



Grafik 2.3.1.%0 GP'li numunedeki kesit boyunca sıcaklık dağılımı



Grafik 2.3.2.%15 GP'li numunedeki kesit boyunca sıcaklık dağılımı



Grafik 2.3.3.%30 GP'li numunedeki kesit boyunca sıcaklık dağılımı

Tablo 2.3.1. LVDT okumalarıyla birlikte bulunan ısı genleşme katsayıları

Numunedeki GP Oranı, %	Isıl Genleşme Katsayısı, $1/^{\circ}\text{C}(\times 10^{-6})$, LVDT
0	3,27
5	3,92
10	9,93
15	3,67
30	13,9

Tablo 2.3.2. LVDT ve Strain Gauge okumalarıyla birlikte bulunan ısı genleşme katsayıları

Numunedeki GP Oranı, %	Isıl Genleşme Katsayısı, $1/^{\circ}\text{C}(\times 10^{-6})$, LVDT	Isıl Genleşme Katsayısı, $1/^{\circ}\text{C}(\times 10^{-6})$, Strain Gauge
0	9	3,5
5	8,69	3,2
10	9,07	2,66
15	3,66	1,6
30	3,1	4,3

Tablo 2.3.1 ve Tablo 2.3.2'den de anlaşılacağı üzere hassas ölçüm yapan stain gauge pulları dahi kullanılsa, farklı sonuçlar meydana gelebilmektedir. Ayrıca bu değerler LVDT okumalarına göre bulunan değerlerden de farklı olabilmektedir. Bunun sebebi ısıtıp

soğutma durumu, beton içerisindeki agrega ve GP'in homojenlik durumu, düşey sıcaklık ölçümlerinde numunelerin tamamıyla kuru hale gelip ertesi gün yapılan yatay pozisyonundaki sıcaklık ölçümü ve bir sonraki ölçümün daha kuru numuneler üzerinde yapılıyor olması söylenebilir. Literatür çalışmasında da farklı durumların ortaya çıktığı görülmektedir.

2.4. Gelenkesel ve Hafif Betonun Elastisite Modülü ve Basınç Dayanımı

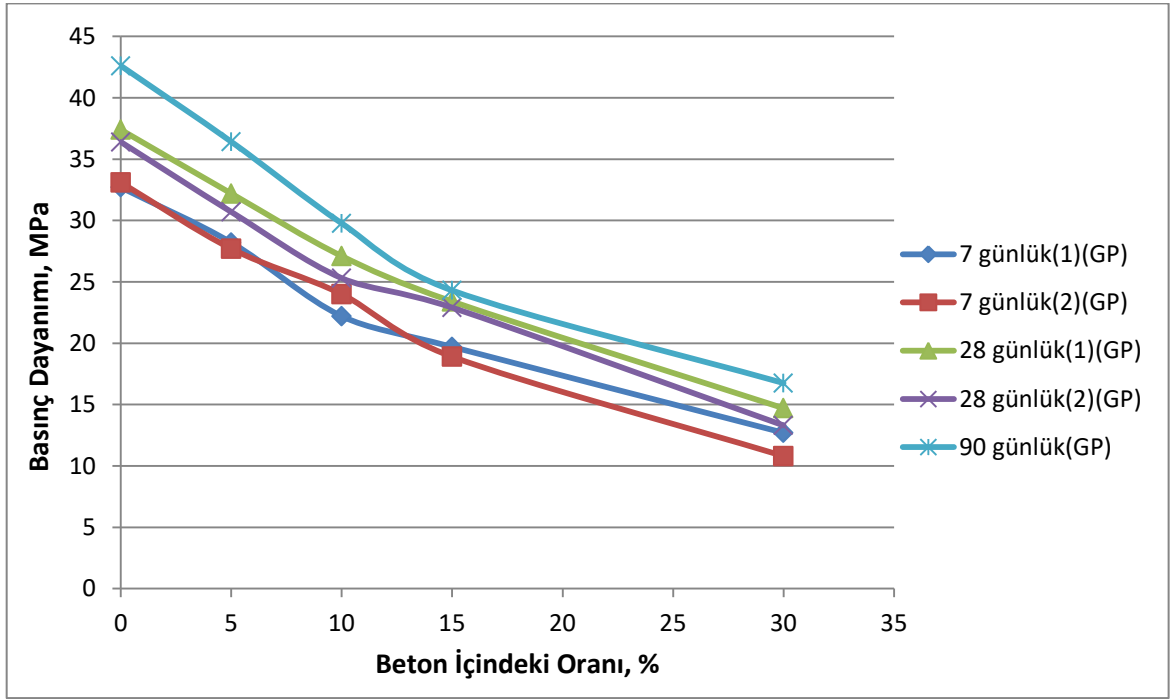
Bu tez kapsamında genişletilmiş perlit agregalı hafif betondan alınan numune örnekleri ve kontrol numunesi örneği basınç deneyine tabi tutulmuştur (Resim 2.4.1).



Resim 2.4.1. Tek eksenli basınç deneyi düzeneği

Bu doğrultuda başlangıçta %0, %5, %10, %15 ve %30 oranlarında hacimce genişletilmiş perlit içeren betondan 15cmx15cmx15cm boyutlarında ikisi 7 günde ikisi 28 günde ve biri de 90 günde kırılmak üzere toplam 25 adet küp numune alınmıştır. Kırılma

sonucunda çıkan değerler Grafik 2.4.1’de verilmiştir. Grafikteki eğrilere bakıldığında neredeyse doğrusal bir değer azalışının olduğu görülmektedir. Genleştirilmiş perlit oranı arttıkça aynı orana ait numuneler arasındaki gerilme değerlerinin küçük de olsa farklı çıkmasının sebebi oran arttıkça numune içindeki homojenliğin sağlanmasındaki güçlülüdür. Bu tezde ANSYS sonlu elemanlar programında kullanılmak üzere %15 oranında genleştirilmiş perlit içeren beton karışımının kullanılmıştır.



Grafik 2.4.1. Değişik oranlardaki GP değerlerine göre basınç dayanımları (Aktürk, 2024)

Laboratuvar çalışmasında %0, %5, %10, %15 ve %30'luk genleştirilmiş perlit içeren beton numunelerinin basınç dayanımı ve yoğunlukları göz önüne alındığında standartlara göre elastisite modülleri Tablo 2.4.1’de verilmiştir.

Tablo 2.4.1. Standartlara göre elastisite modülü değerleri

Standartlar	Elastisite Modülü Değerleri(MPa)				
	Beton içerisindeki hacimce genleştirilmiş perlit oranı(%)				
	0	5	10	15	30
TSE	33742	32212	30635	29620	26160
ACI	33635	27275	24151	22544	15054
BSI	30296	28709	27028	25917	21932
CEB	33765	32326	30837	29875	26619

2.5.Termal Şartlardaki Malzeme Özellikleri

2.5.1. Isıl Genleşme

Bir cisim içerisinde bulunan atomların titreşimleri, cismin ısıtılmasıyla artmaktadır. Bu artış sonucunda cismin x, y ve z doğrultusundaki boyutlarında da artış meydana gelmektedir. Sıcaklığın 1°C değerindeki artışı sonucu cismin birim boyutunda yapmış olduğu artış o cisme ait doğrusal ısı genleşme katsayısı olarak nitelendirilir. Isıl genleşme katsayısı denklemleri (3), (4) ve (5)'te verilmiştir (URL-5, 2023);

$$\Delta L = L.\alpha(T_2-T_1) \quad (3)$$

$$\Delta S = S.2\alpha(T_2-T_1) \quad (4)$$

$$\Delta V = V.3\alpha(T_2-T_1) \quad (5)$$

Burada; ΔL , ΔS ve ΔV ; cismin sıcaklığın T_1 değerinden T_2 değerine çıkması durumundaki malzemede meydana gelen boyca, alanca ve hacimce değişme miktarıdır. α ; ısı genleşme katsayısı, L ; ilk sıcaklıktaki cismin uzunluğu, S ve V ; ilk sıcaklıktaki cismin yüzey alanı ve hacmidir. Betonun çekme dayanımı, basınç dayanımının %10'u olarak alınmıştır. Betonun ısı genleşme katsayısı ve mekanik özellikleri Tablo 2.5.1.1'de verilmiştir.

Tablo 2.5.1.1. Geleneksel betonun mekanik özellikleri ve ısı genleşme katsayısı

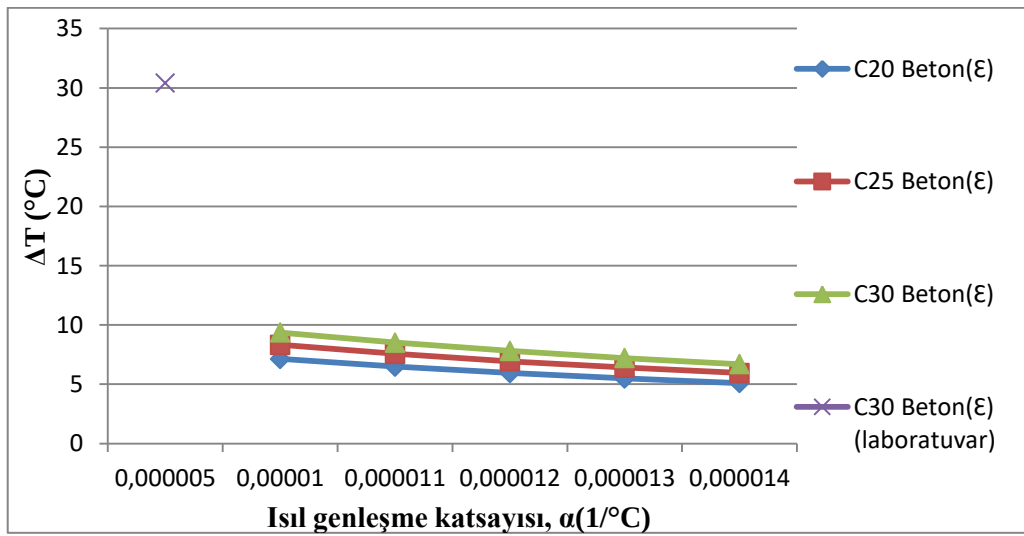
Beton Sınıfı	Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı(MPa)	Birim Hacim Ağırlık(kg/m ³)	Elastisite Modülü(MPa)	Isıl Genleşme Katsayısı, $\alpha(1/^{\circ}\text{C})$
C20	20	2	2400	28000	$(1-1,4)\times 10^{-5}$
C25	25	2,5	2400	30000	$(1-1,4)\times 10^{-5}$
C30	30	3	2400	32000	$(1-1,4)\times 10^{-5}$

Tek doğrultuda ısı genleşme katsayısı ve beton sınıflarına göre oluşan sıcaklık değerleri $\Delta L/L = \epsilon = \alpha(T_2 - T_1)$ denklemine göre Tablo 2.5.1.2’de bulunmuştur ve Grafik 2.5.1.1’de verilmiştir.

Tablo 2.5.1.2. Beton sınıfları ve ısı genleşme katsayılarına göre betonun dayanabileceği sıcaklık değerleri

Beton sınıfı	Isıl Genleşme Katsayısı				
	0,00001	0,000011	0,000012	0,000013	0,000014
C20 Beton(ε)	7,14	6,49	5,95	5,49	5,1
C25 Beton(ε)	8,33	7,57	6,94	6,41	5,95
C30 Beton(ε)	9,37	8,52	7,81	7,21	6,69

Beton yol kaplamasının herhangi iki noktası arasındaki sıcaklık farkı, ısı genleşme katsayısı ve betonun birim şekil değiştirme değerleri, $\epsilon = \alpha(T_2 - T_1)$ formülünde yerine koyulursa Tablo 2.5.1.2’deki değerler bulunmaktadır. Böylece sınır değerler formüle girildiği için oluşacak çekme gerilmesinden dolayı çatlama meydana gelmeyecektir. Kaplamada 2 cm’lik tam derz yapılması halinde betonun ısı genleşme katsayısı ve absorbe edebileceği sıcaklık farkı $\Delta L = L \cdot \alpha(T_2 - T_1)$ formülünde yerine yazılırsa C30 beton için 213 m, C25 beton için 240 m ve C20 beton için 280 m uzunluğunda derzsiz bir beton yol kaplaması yapılabilecektir (Tablo 2.5.1.3).



Grafik 2.5.1.1. Beton sınıfları ve ısı genleşme katsayılarının değişimine göre betonun absorbe edebileceği sıcaklık değerleri

Tablo 2.5.1.3. Beton sınıfının maksimum absorbe edebileceği sıcaklık değerine göre maksimum uzunluktaki kaplama mesafesi

Beton Sınıfı	Maksimum Beton Kaplama Uzunluğu(m)
C20	280
C25	240
C30	213
C30(Laboratuvar Çalışması)	146

Tablo 2.5.1.3'den görüldüğü gibi laboratuvar çalışmasından elde edilen C30 beton sınıfının verileriyle yapılan hesaptan elde edilen maksimum derz mesafesi, C30 betonun literatür verileriyle hesaplanan derz mesafesinden 67 metre daha az çıkmıştır.

$\Delta L/L = \epsilon = \alpha(T_2 - T_1)$ formülüne laboratuvar çalışmasındaki C30 betonun değerlerini koyacak olursak maksimum sıcaklık farkı 30,42 °C olur. Bu değer literatür verileriyle yapıldığında $\alpha = 1,1 \times 10^{-5}$ alınması halinde 9,37 °C olup bu değer yaklaşık üçte biri olduğu görülmektedir.

2.5.2. Özgül Isı

Özgül ısı, bir maddenin sıcaklığını 1 °C arttırmak amacıyla tüketilmesi gereken ısı miktarı olarak tanımlanır. Beton üretiminde kullanılan su miktarının artması betonun özgül ısının artışına neden olmaktadır. Beton özgül ısı 0,26 kcal/kg°C dir. Özgül ısı aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır (URL-6, 2023).

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (6)$$

Burada; Q: tüketilmesi gereken ısı (kcal), m: malzemenin ağırlığı (kg), c: malzemenin özgül ısı (kcal/kg°C), ΔT : malzemede oluşan sıcaklık farkıdır (°C).

Betonun 1 m²'sinin sıcaklığını ΔT °C arttırmak için gerekli olan ısı miktarı aşağıda bulunmuştur;

Beton yol kaplamasının kalınlığı 0,2 m alınması halinde yolun 1 m²'sinin ağırlığı, geleneksel beton için 1x1x0,2x2400=480 kg ve hafif beton için 1x1x0,2x1500=300 kg olur.

C20 beton için $\Delta T=5,1$ °C olarak alınırsa $Q=480 \times 0,257 \times 5,1=629,14$ kcal veya saatte 731,69 W olarak bulunur. C25 beton için $\Delta T=5,95$ °C alınırsa $Q=480 \times 0,257 \times 5,95=733,99$ kcal veya saatte 853,63 W olarak bulunur. C30 beton için $\Delta T=6,69$ °C alınırsa $Q=480 \times 0,257 \times 6,69=825,28$ kcal veya saatte 959,80 W olarak bulunur. C20 hafif beton için $\Delta T=16,67$ °C alınırsa $Q=300 \times 0,257 \times 16,67=1285,28$ kcal veya saatte 1494,75 W olarak bulunur.

Buradan hafif beton yol kaplamasının sıcaklığını ve dolayısıyla da sıcaklık farkını artırmak için daha yüksek bir ısı enerjisine ihtiyaç duyduğu görülmektedir. Hafif beton kullanılması kaplamada oluşabilecek sıcaklık farkını azalttığından meydana gelebilecek çekme gerilmesini de azaltmış olacaktır.

2.5.3. Isı İletim Katsayısı

Isı transferi kondüksiyon, konveksiyon ve radyasyon ile maddeler arasında gerçekleşmektedir. Isı aktarımı, sıcaklıkları farklı iki veya daha fazla nesne arasında iletim, taşınım ya da ışıyım yoluyla veya bu yolların birbiri ile olan birleşimleri yoluyla gerçekleşen enerji aktarımıdır (URL-7, 2022). Betonda ısı iletimi ısı iletim katsayısı ile olmakla birlikte, beton yol kaplamasında kullanılacak betonun ısı iletim katsayısı ne kadar yüksek ise üst yüzeyi ile alt yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı o kadar düşük olmaktadır. Dolayısıyla da sıcaklık farklarından dolayı oluşan gerilmeler azalmaktadır.

Isı iletim katsayısı, kalınlığı 1 m olan bir cismin her iki tarafında ölçülen sıcaklık değişimi 1 °C iken bu cismin 1 m²'lik alanından 1 saat sürede geçen ısı miktarına ısı iletim katsayısı denir ve birimi kcal/mh°C'dir. Betonun ısı iletim katsayısı 2-2,5 W/m°C aralığındadır. Hafif betonun ısı iletim katsayısı; 0,25-0,55 kcal/mh°C'dir. Isı iletim katsayısı aşağıdaki formülle hesaplanır (URL-8, 2023).

$$Q=(\lambda \ t \ A \ \Delta T)/d \quad (7)$$

Burada; Q: ısı miktarı, λ : ısı iletim katsayısı(k), A: Alan, ΔT : sıcaklık farkı, d: malzemenin kalınlığı t: geçen süreyi (1 saat) ifade etmektedir.

Bir beton yol kaplamasında ısı iletim katsayısı ne kadar yüksek ise çevresel faktörlerden gelen ısıyı o derece beton yol kaplamasının alt yüzeyine ileteceğinden

kaplamanın üstü ile altı arasındaki sıcaklık farkı o derecede azalmış olacaktır. Dolayısıyla daha büyük sıcaklık farkı oluşmayacak ve beton yol kaplamasının daha homojen kıvrılmasına dolayısıyla da daha düşük gerilme değerleri oluşmasına neden olacaktır. Ayrıca konveksiyon katsayısı, beton içerisinde meydana gelen sıcaklık dağılımının nonlineer olarak dağılım göstermesinde oldukça etkilidir.

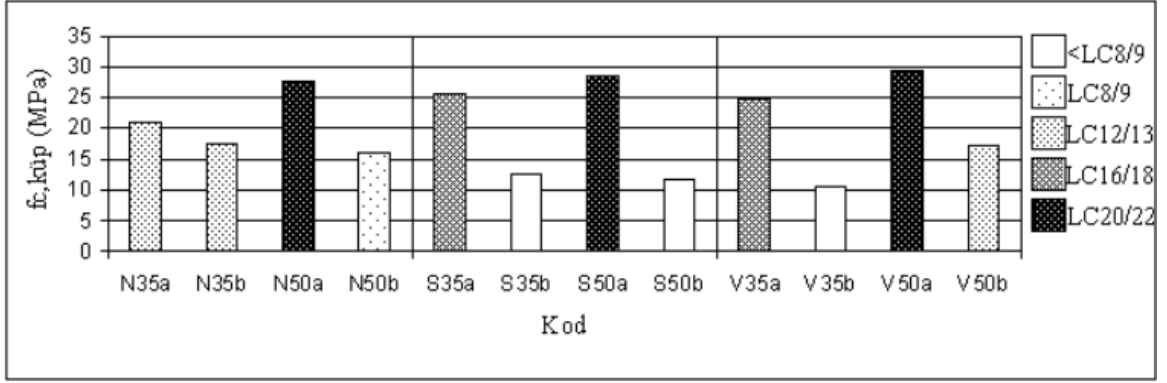
2.6. Hafif Beton Termal Özellikleriyle Gerilme Hesabı

Hafif betonun yaklaşık %50 oranında düşük elastisite modülüne ve %20 oranında düşük ısı genleşme katsayısına sahip olmasından dolayı ısı şartlarında meydana gelen çekme gerilmesinin düşük olmasına sebep olmaktadır. Isıl genleşmedeki uzama miktarı ve gerilme ile şekil değiştirme arasındaki ilişki (2) ve (8) formüllerinde verilmiştir. Kabay yapmış olduğu çalışmada 350 ve 500 dozlu çimento ve ponza agregasıyla oluşturduğu hafif betonu Tablo 2.6.1’de isimlendirmiştir. Basınç dayanımları Grafik 2.6.1’de, elastisite modülleri Grafik 2.6.2’de ve eğilmede çekme dayanımları da Grafik 2.6.3’te verilmiştir (Kabay, 2009).

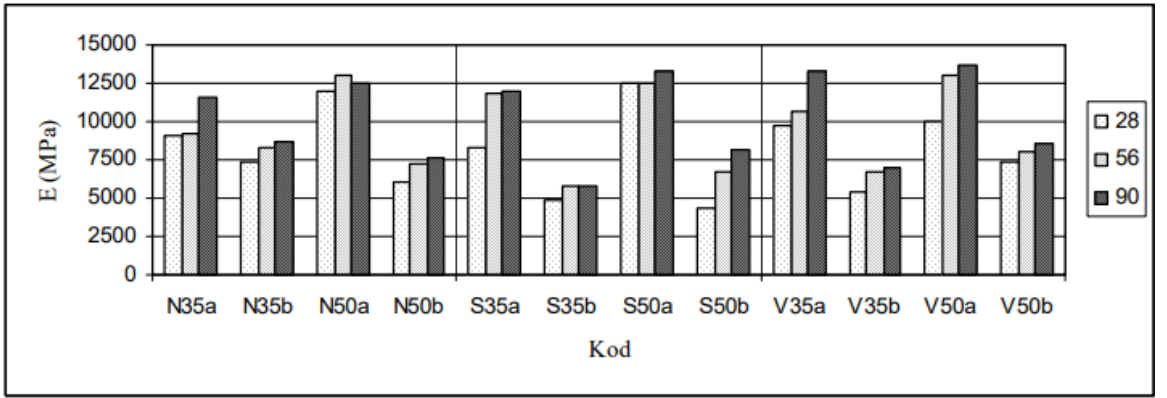
$$\varepsilon = \sigma_c / E \quad (8)$$

Tablo 2.6.1.Kabay’ın çalışmasına göre hafif betonun adlandırılması (Kabay, 2009)

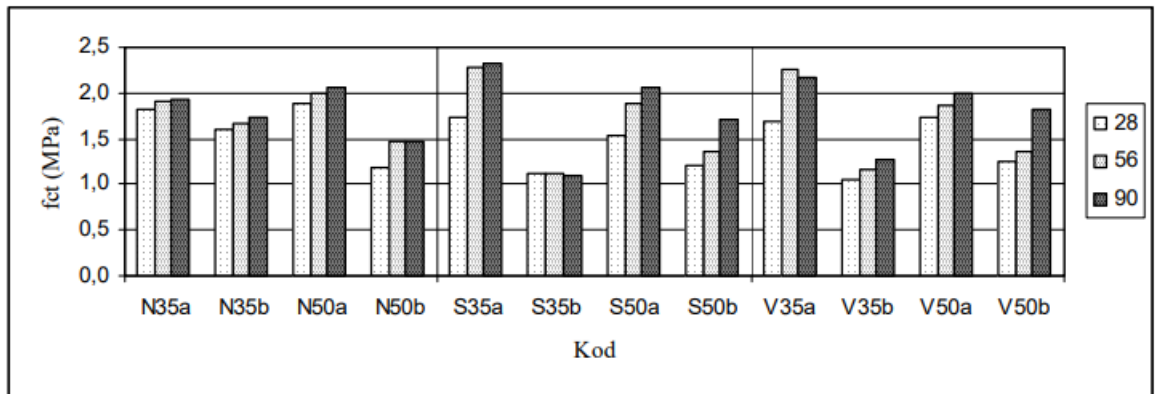
Kod	Açıklama
N35a	Laboratuvar nemliliğinde ponza agregalı, 350 dozlu, hava sürükleyicisiz
N35b	Laboratuvar nemliliğinde ponza agregalı, 350 dozlu, hava sürükleyicili
N50a	Laboratuvar nemliliğinde ponza agregalı, 500 dozlu, hava sürükleyicisiz
N50b	Laboratuvar nemliliğinde ponza agregalı, 500 dozlu, hava sürükleyicili
S35a	Suya doymuş ponza agregalı, 350 dozlu, hava sürükleyicisiz
S35b	Suya doymuş ponza agregalı, 350 dozlu, hava sürükleyicili
S50a	Suya doymuş ponza agregalı, 500 dozlu, hava sürükleyicisiz
S50b	Suya doymuş ponza agregalı, 500 dozlu, hava sürükleyicili
V35a	Vakum ile suya doyurulan ponza agregalı, 350 dozlu, hava sürükleyicisiz
V35b	Vakum ile suya doyurulan ponza agregalı, 350 dozlu, hava sürükleyicili
V50a	Vakum ile suya doyurulan ponza agregalı, 500 dozlu, hava sürükleyicisiz
V50b	Vakum ile suya doyurulan ponza agregalı, 500 dozlu, hava sürükleyicili



Grafik 2.6.1. Kabay'ın çalışmasına göre hafif betonun basınç dayanımları (Kabay, 2009)



Grafik 2.6.2. Kabay'ın çalışmasına göre hafif betonun elastisite modülleri (Kabay, 2009)



Grafik 2.6.3. Kabay'ın çalışmasına göre hafif betonun yarmada çekme dayanımları (Kabay, 2009)

Tablo 2.6.1 ve grafiklerden görüldüğü üzere S35a isimli hafif betonun seçilmesi durumunda basınç dayanımı 26 MPa, Elastisite modülü 12000 MPa ve yarmada çekme dayanımı da 2,25 MPa'dır. Bu betonun birim hacim ağırlığı 1700 kg/m³ civarındadır. Isıl genleşme katsayısını 1×10^{-5} 1/°C değerleri alınıp formül (2) ve (8)'e girilirse;

$\frac{2,25}{12 \times 10^3} = 1 \times 10^{-5} \times \Delta T$, $\Delta T = 18,8$ °C olarak bulunur. Yani beton yol kaplaması bu betondan yapılması halinde 18,8 °C'lık sıcaklık farkına kadar deforme olmadan ısı yükleri taşıyabilecektir. Beton yol kaplaması boyunca 2 cm (0,02 metre) genişliğinde bir derz yapılması halinde; $0,02 = L_{hafif} \cdot 1 \times 10^{-5} \cdot 18,8$ formülünden kaplamanın derz mesafesi $L_{hafif} = 106$ metre olarak bulunur. Laboratuvar çalışmasından elde edilen verilere göre yukarıdaki işlemler yapıldığında Tablo 2.6.2'deki değerler elde edilir.

Tablo 2.6.2. Laboratuvar çalışmasından elde edilen verilerle bulunan kaplama uzunluğu ve sıcaklık farkı değerleri

Genleştirilmiş perlit(GP) oranları, %	Maksimum Beton Kaplama Uzunluğu, m	Maksimum absorbe edebileceği sıcaklık farkı, °C
0	146	30,42
5	144	25,06
10	150	24,09
15	171	44,91
30	164	34,84

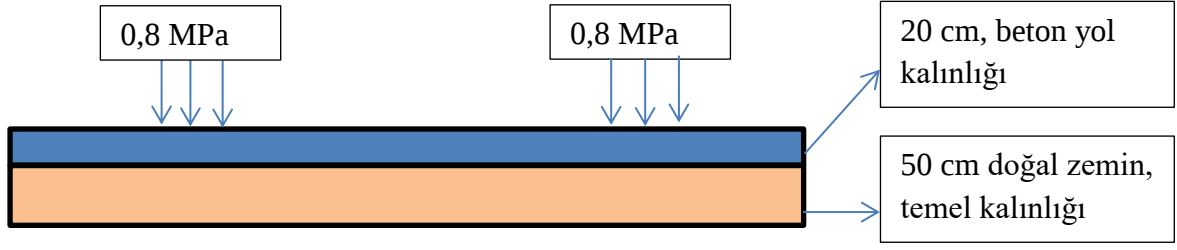
Tablodan görüldüğü gibi beton içerisindeki GP oranı %15 ve %30 değerlerinde kullanıldığında kaplamanın absorbe edebileceği sıcaklık değerleri artmaktadır (%15 GP için 14,5 °C ve %30 GP için 4,4 °C). Benzer şekilde geleneksel betona kıyasla %15 GP içeren beton kaplama uzunluğu 25 m, %30 GP içeren beton kaplama uzunluğu da 18 m daha uzun çıkmaktadır.

2.7. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Beton Yol Kaplamasının Analizi

Bu tezde basınç dayanımı, çekme dayanımı, ısı genleşme katsayısı ve elastisite modülü laboratuvar çalışmasında bulunmuş olan geleneksel beton (%0 GP içeren beton veya şahit beton) ve hafif beton (%15 GP içeren beton) verileri kullanılarak ANSYS sonlu elemanlar programı içerisinde modelleme yapılmış ve sıcaklık değişimlerine göre analizleri yapılmıştır. Analizlerden çekme gerilmesi, deplasman ve basınç gerilmesi değerleri bulunmuştur. Bulunan sonuçlar literatür çalışmasıyla karşılaştırılmıştır.

2.7.1. Analiz Parametreleri

Bu tezde sonlu elemanlar analiz programı olarak Workbench 19.0'da çalışan ANSYS programı kullanılmıştır. Beton yol tabakası farklı genişliklerde (genellikle 5x5 metre) ve farklı plak kalınlıklarında (genellikle 20 cm) seçilerek analiz yapılmıştır. Beton yol tabakasının altında kalınlığı 50 cm olan bir zemin tabakası alınmıştır (Şekil 2.7.1.1). Zemin tabakasının farklı çalışmalarda programa girilen değerleri Tablo 2.7.1.1'de verilmiştir. Bu çalışmada zemin tabakasının poisson oranı 0,3 ve birim hacim ağırlığı da 1800 kg/m^3 olarak alınmıştır. Uçlarında 2 adet 30x20 cm büyüklüğünde yan yana iki tekerden oluşan dingilde her bir tekere 0,8 MPa'lık yük alınmıştır. Sıcaklık farkı olarak 0 °C'den 25 °C'ye kadar çeşitli değerler alınmıştır. Laboratuvar çalışmasından elde edilen veriler Tablo 2.7.1.2'de verilmiştir. Geleneksel beton ve hafif betonun diğer verileri ile literatür çalışmalarındaki değerleri Tablo 2.7.1.3'te verilmiştir. Literatür araştırmasından sıcaklık dağılımı nonlineerdir (Choubane & Tia, 1992; Siddique vd., 2005; Maitra vd., 2013; Shreenath & Jeffery, 2005; Yukitomo vd., 2011; Andrew & Jeffery, 1999; Richardson & Armaghani, 1990; Piotr & Antoni, 2020; Cui vd., 2022; Piotr, 2014). Bu doğrultuda beton yol kaplamasının konveksiyon katsayısı $20 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ alınarak kaplamada nonlineer bir sıcaklık dağılımıyla analiz yapılmıştır. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen tüm analizlerde mesh aralığı 20 cm alınmıştır. Mesh aralığının değiştirilmesiyle birlikte oluşan gerilme değerlerinin değişeceği gerçeği de göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 2.7.1.1. Ansys programına girilen yol

Tablo 2.7.1.1. Zemin tabakasının farklı çalışmalardaki mekanik değerleri

Kaynaktaki Analiz Parametreleri	Çalışmanın Olduğu Kaynak		
	Cui vd., 2022	Piotr, 2014	Anno vd., 2023
Elastisite Modülü (MPa)	50	120	0,04
Poisson Oranı	0,35	0,35	0,3
Isıl Genleşme Katsayısı($1/^{\circ}C$)	$4,5 \times 10^{-6}$	-	-
Birim Hacim Ağırlık(kg/m^3)	1920	2050	1780

Tablo 2.7.1.2. Laboratuvar deneylerinden elde edilen beton ve hafif beton mekanik değerleri

Laboratuvar Deneylerinden Elde Edilen Veriler					
Numunedeki GP Oranı, %	Yoğunluk, kg/m^3	Basınç Dayanımı, MPa	Eğilmede Çekme Dayanımı,	Isıl Genleşme Katsayısı, $1/^{\circ}C(10^{-5})$	Elastisite Modülü, MPa(TSE)
0	2568	36,9	4,62	0,37-0,62	33742
5	2362	31,4	4,44	0,32-0,87	32212
10	2298	26,2	4,09	0,27-0,91	30635
15	2278	23,15	3,46	0,16-0,37	29629
30	2076	14	3,19	0,31-0,43	26160

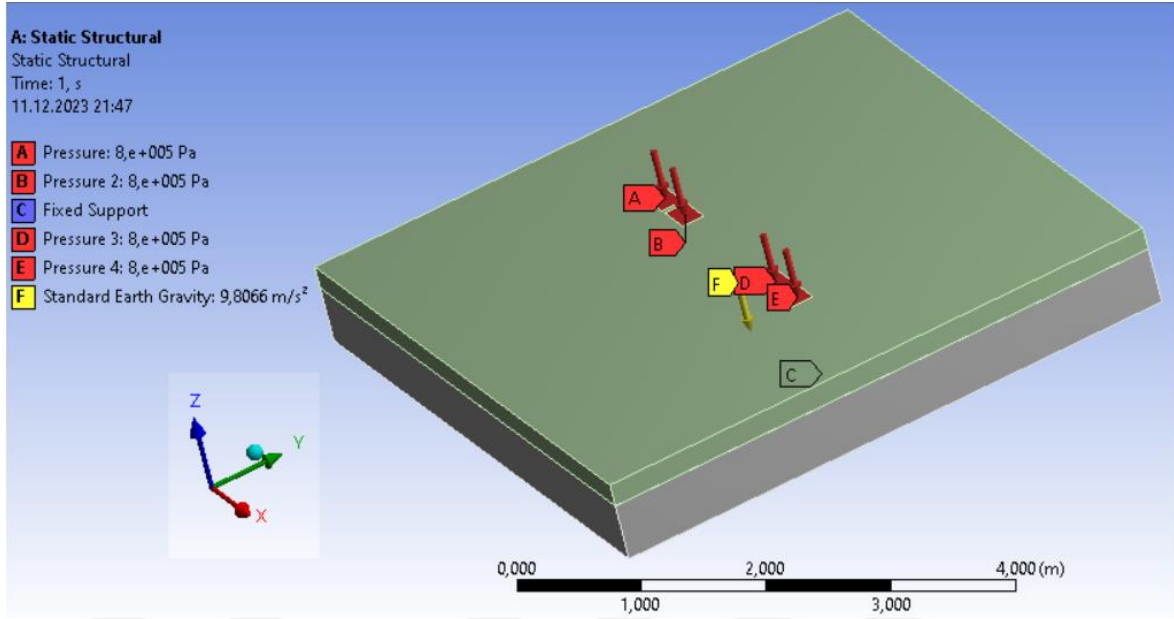
Tablo 2.7.1.3.Beton ve Hafif beton mekanik değerleri

Analiz Parametreleri	Çalışmanın Olduğu Kaynak		
	Cui vd., 2022	Piotr, 2014	Anno vd., 2023
Elastisite Modülü(MPa)	32500	$2,5 \times 10^4$	$3,2 \times 10^4$
Poisson Oranı	0,2	0,2	0,25
Isıl Genleşme Katsayısı($1/^\circ C$)	6×10^{-6}	1×10^{-5}	$1,2 \times 10^{-5}$
Birim Hacim Ağırlık (kg/m^3)	2390	2400	2400

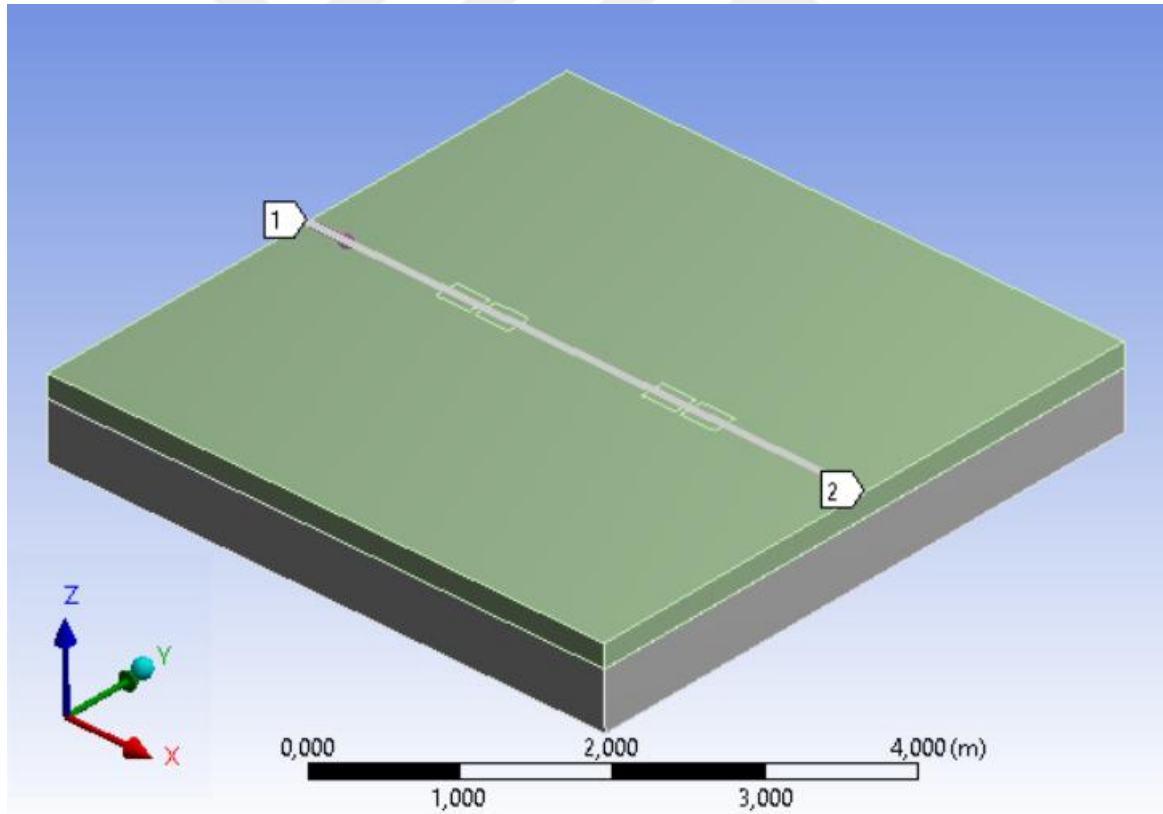
Bu tez kapsamında karşılaştırma yapmak için %0 genleştirilmiş perlit (GP) içeren geleneksel beton ile %15 GP içeren hafif betonun mekanik ve fiziksel değerleri alınarak sonlu elemanlar yönteminde gerilme analizleri yapılmıştır. Tezdeki tüm analizlerde bu değerler kullanılmıştır.

2.7.2. Tekerlek Yüğü Olması Durumu

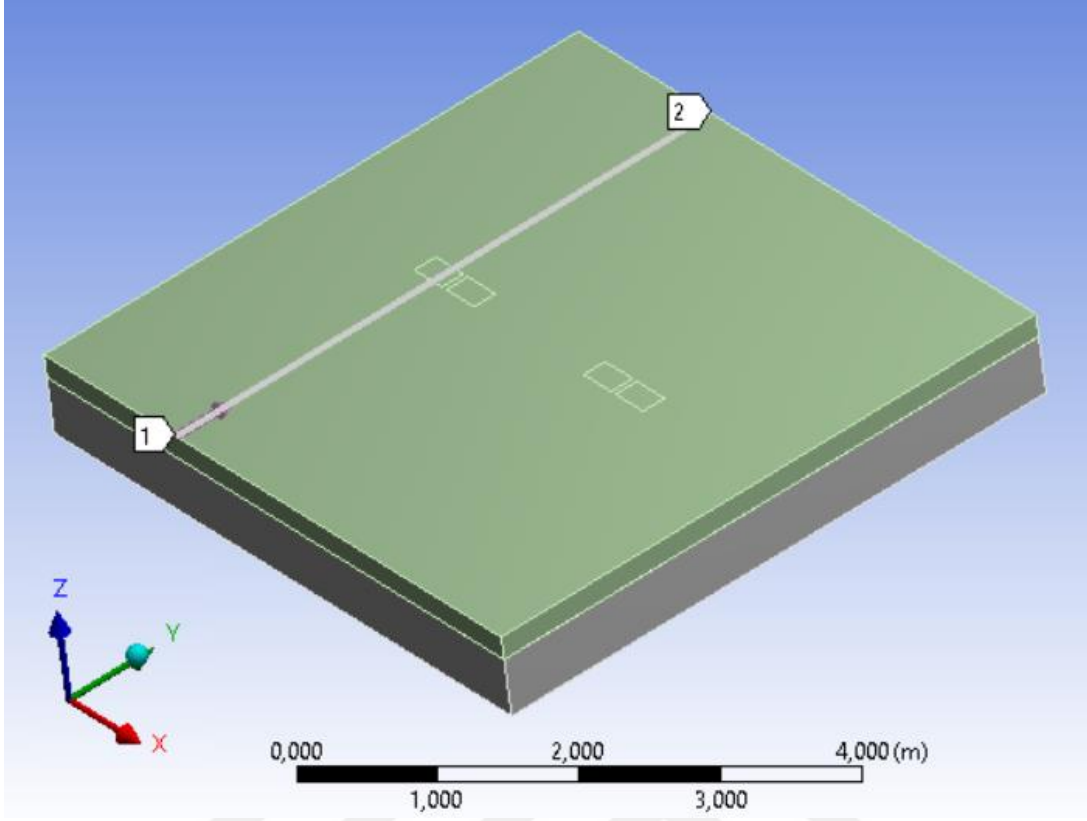
Beton yol kaplaması, üzerine gelen trafik yüğü, kendi ağırlığı ve sıcaklıktan dolayı oluşan gerilmelere maruz kalmaktadır. Bu analizde %0 GP (geleneksel beton) içeren beton ve %15 GP içeren hafif betonla yapılmış kaplamanın sadece tekerlek yük varken meydana gelen maksimum çekme gerilmesi ve deformasyon değerlerinin büyüklüğü bulunmuştur. Bu analizle birlikte kaplamada sadece tekerlek yüğü olması durumunda kaplamanın davranışı ve çatlama oluşup oluşmayacağıyla alakalı sonuçlara varılmıştır. Kaplamaya gelen tekerlek yükleme durumu Resim 2.7.2.1'de ve kritik gerilmelerin elde edildiğı 1-2 hat çizgisi x ve y doğrultularında Resim 2.7.2.2 ve Resim 2.7.2.3'te görölmektedir.



Resim 2.7.2.1. Sadece yük varken beton yol kaplaması yükleme durumu



Resim 2.7.2.2. Sadece tekerlek yükü varken x doğrultusunda gerilmelerin olduğu hat

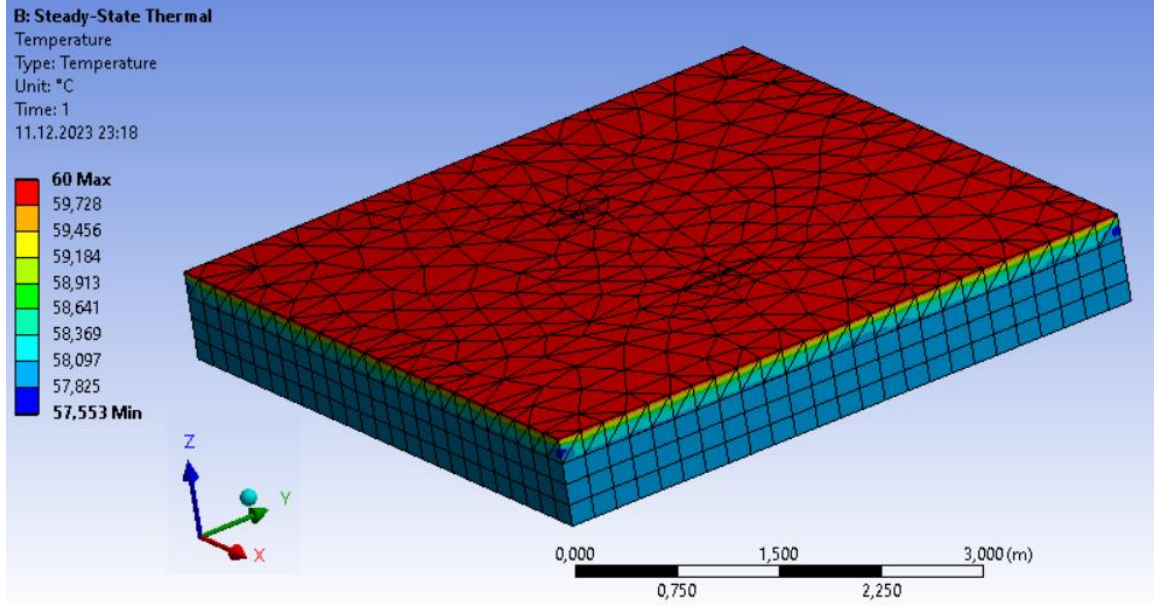


Resim 2.7.2.3.Sadece tekerlek yükü varken y doğrultusunda gerilmelerin oluştuğu hat

2.7.3. Yüzey Sıcaklığının Fazla, Üst-Alt Sıcaklık Farkının Az Olduğu Durum

Beton yol tabakasının üst ve alt yüzeyine sıcaklıklar verilerek oluşturulan sıcaklık farkından dolayı meydana gelen gerilmeler ve bu gerilmelere bağlı olarak oluşan deformasyonlar ve şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir. Böyle bir analiz yapılmasının amacı, yüksek sıcaklıklarda kaplama altı ile üstü arasındaki sıcaklık farkının düşürülmesi halinde, kaplamanın soğuk bölgelerde yapılıp negatif sıcaklık farkı oluşması durumunda ve aynı pozitif sıcaklık farkı oluşması halinde gerilme dağılımının görülmek istenmesidir.

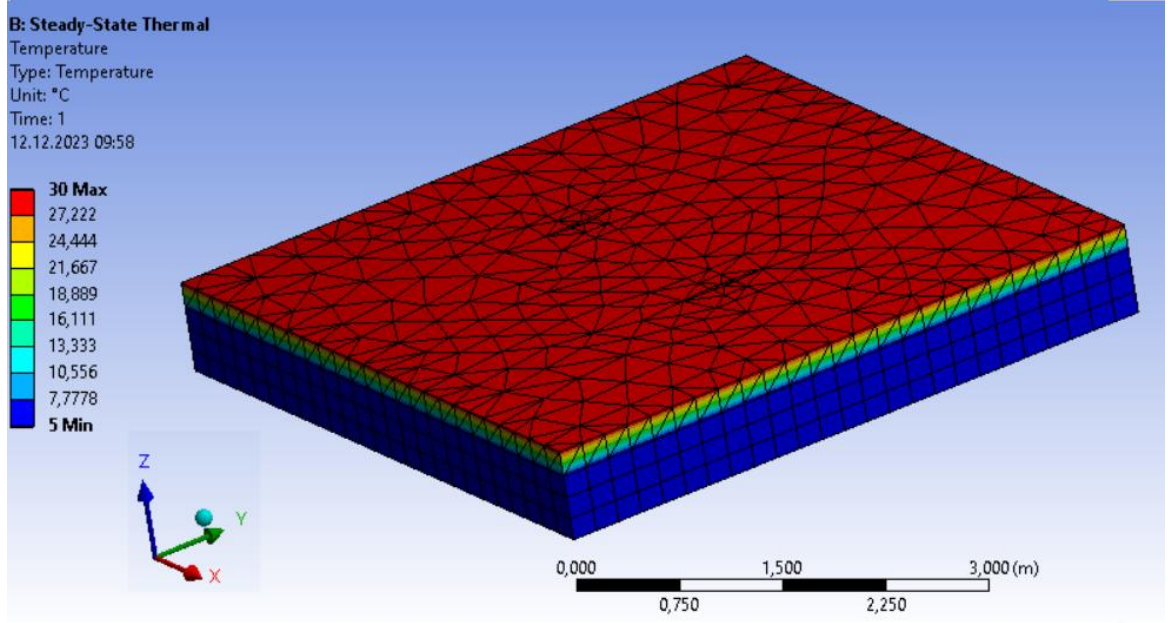
Bu başlık altındaki analizde çok sıcak bölgelerde yapılan bir beton yol kaplamasında meydana gelen gerilme ve deformasyonlar bulunmuştur. Beton yol tabakasının üst yüzeyinin 60°C ve alt yüzeyinin de 58°C olduğu durum düşünülerek analiz yapılmıştır (Resim 2.7.3.1). Yalnızca sıcaklık varken meydana gelen gerilme değerleri elde edilmiştir. Beton içerisine eklenecek malzemeye betonun ısı iletim katsayısının artması sonucu alt-üst arasındaki sıcaklık farkı değerinin küçük olması durumu düşünülmüştür.



Resim 2.7.3.1. Betonun üstü 60°C altı 58°C iken oluşan sıcaklık dağılımı

2.7.4. Sıcaklık Farkının Yüksek Olması Durumu

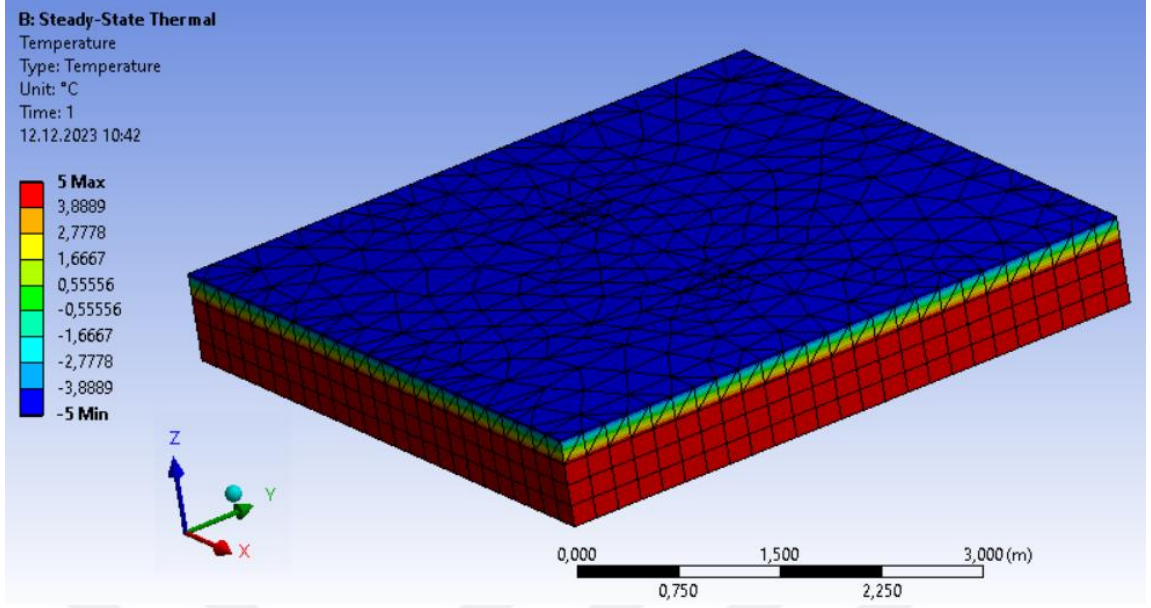
Bu analizde beton yol kaplamasının üst yüzeyinin 30 °C ve alt yüzeyinin 5 °C olduğu sıcaklık farkının yüksek olması durumuna göre meydana gelen gerilme değerleri ile deformasyon değerleri bulunmuştur. %0 GP içeren beton ve %15 GP içeren hafif beton verilerine göre analiz edilmiştir. Sıcaklık farkı fazla (25 °C) iken kaplamada oluşan sıcaklık dağılımı Resim 2.7.4.1’de görülmektedir.



Resim 2.7.4.1. Kaplamanın üstü 30 °C, altı 5 °C iken oluşan sıcaklık dağılımı

2.7.5. Soğuk Bölgelerdeki Sıcaklık Durumu

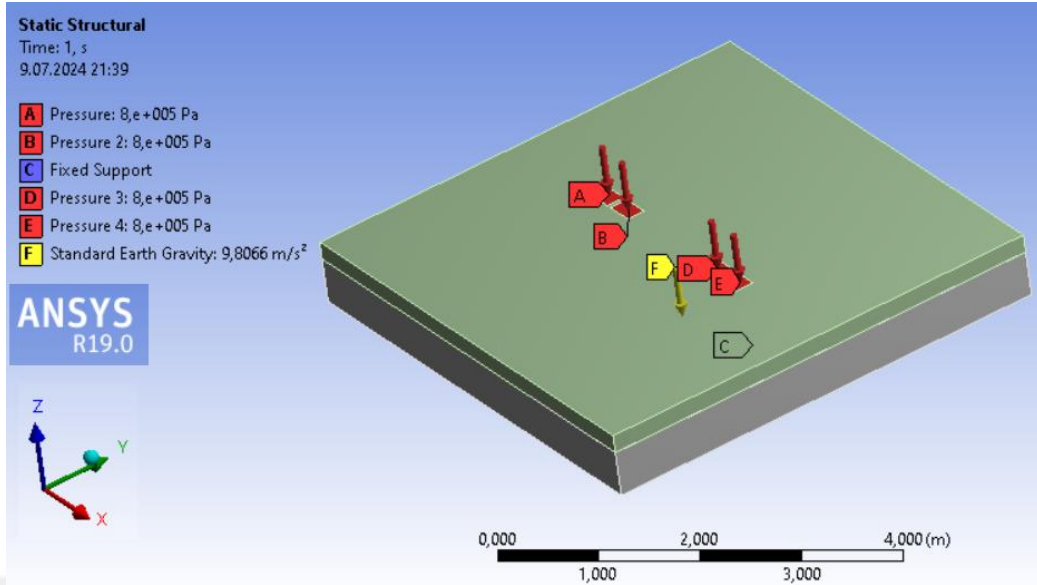
Soğuk bölgelerde de beton yol kaplamasıyla yol yapılmaktadır. Kaplamanın üstünün altından daha soğuk olduğu durumlarda negatif sıcaklık farkı oluşmaktadır. Bu durum soğuk bölgelerde olabildiği gibi kış mevsiminde ve günün özellikle gece saatlerinde de meydana gelmektedir. Beton yol kaplamasının üst yüzey sıcaklığının -5°C ve alt yüzey sıcaklığının 5°C (Resim 2.7.5.1) olduğu durumda %0 GP ve %15 GP içeren beton yol kaplamalarında gerilme analizi yapılmıştır. Negatif sıcaklık farkı olması durumunda kaplamada oluşan gerilme değerleri ile kaplamanın alacağı iç bükey şekli bu analizde görülmek istenmiştir.



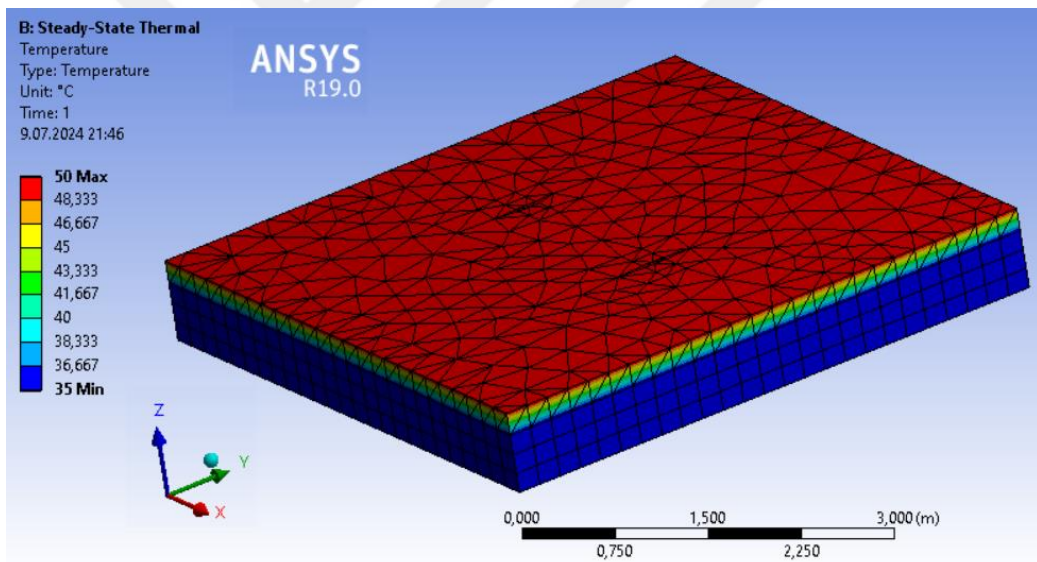
Resim 2.7.5.1. Kars, Erzurum gibi soğuk bölgelerde negatif sıcaklık farkı varken meydana gelen sıcaklık dağılımı

2.7.6. Tekerlek Yüğü ve Sıcaklık Yüğü Olması Halinde Kaplamada Oluşan Çekme Gerilmelerinin Birbirleriyle İlişkileri

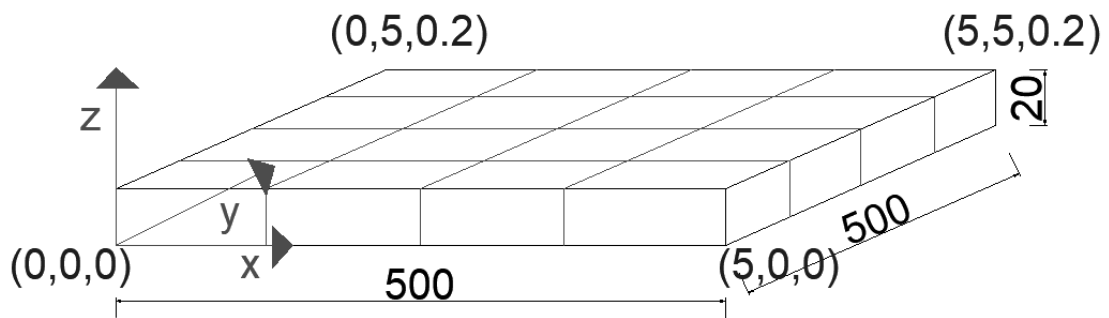
Bu çalışmada %0 GP içeren 5x5x0,2 m ebatlarındaki beton kaplamada tekerlek yükü (Resim 2.7.6.1), sıcaklık yükü (Resim 2.7.6.2) ve her ikisi beraberken y doğrultusunda oluşan gerilme değerleri bulunmuştur. Gerilme değerleri, kaplamanın x ve y doğrultusunda 1,25 m aralıklarda, kalınlık boyunca da 10 cm aralıklarda ızgaralara bölünmesiyle elde edilmiştir (Resim 2.7.6.3). Kaplamadaki her bir ızgaranın kesiştiği koordinatlara karşılık gelen gerilme değerleri, tekerlek yükü varken sıcaklık yükü varken ve her ikisi varken elde edilmiştir. Burada elde edilen gerilme değerlerinin birbirleriyle ilişkileri incelenmiştir.



Resim 2.7.6.1. 5x5x0,2 m ebatlarındaki kaplamada tekerlek yükü ve analiz parametreleri



Resim 2.7.6.2. 5x5x0,2 m ebatlarındaki kaplamada sıcaklık yükü ve analiz parametreleri



Resim 2.7.6.3. 5x5x0,2 m ebatlarındaki kaplamanın ızgaralara bölünmüş hali

2.7.7. Beton Yol Kaplamasının Kalınlık Değişimi Durumu

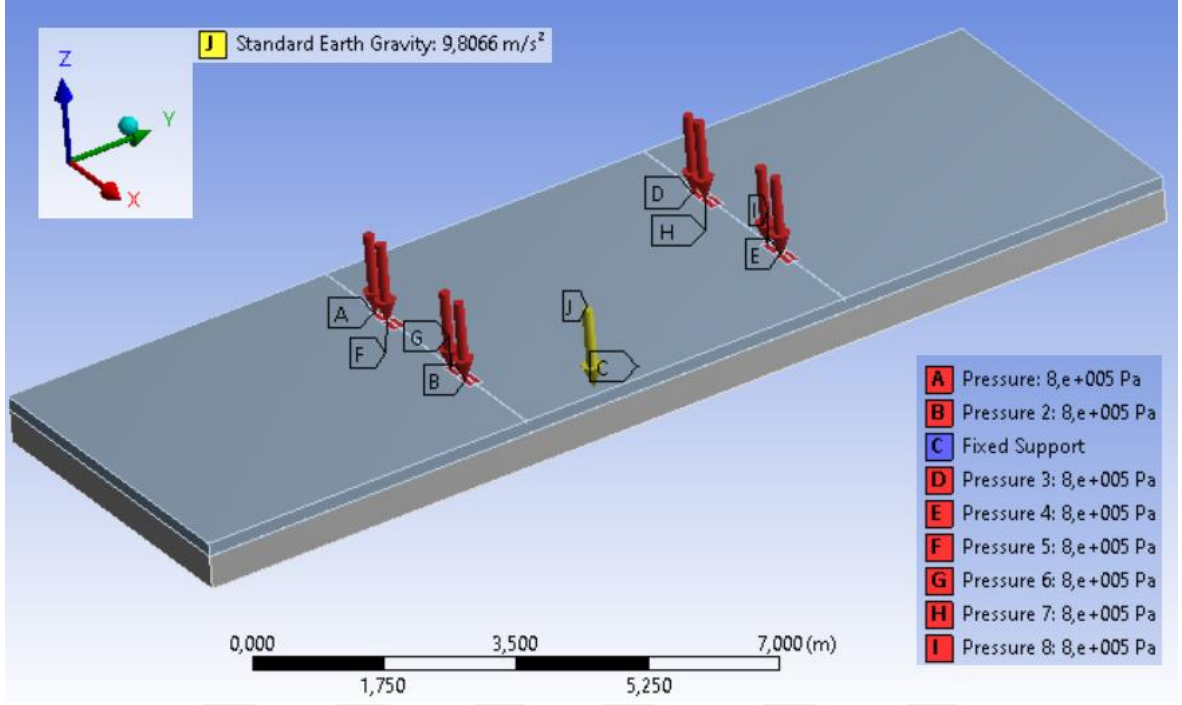
Yol ebatları olarak 5mx5mxh cm ve laboratuvar deneylerinden elde edilen %0 GP (geleneksel beton: C30/37) ve %15 GP içeren beton verileri programa girilmiştir. Sadece sıcaklık yüklemesinin olması durumunda farklı beton yol kaplaması kalınlıklarında meydana gelen çekme gerilmesi, deformasyonlar ve termal birim şekil değiştirme değerleri bu analizden elde edilmiştir. Kaplamanın alt-üst sıcaklık farkının sıfır olduğu (kaplamanın tamamı 35 °C ve 50 °C) durum ile kaplamanın alt yüzeyi 35 °C ve üst yüzeyinin de 50 °C olması durumunda ($\Delta T=15$ °C) yukarıdaki analizlerde kullanılan parametrelerle analiz yapılmıştır. Kalınlığın ve sıcaklığın değişimine göre kaplamada oluşabilecek gerilme değerleri incelenmiştir.

2.7.8. Beton Yol Kaplamasında Derz Olması Durumu

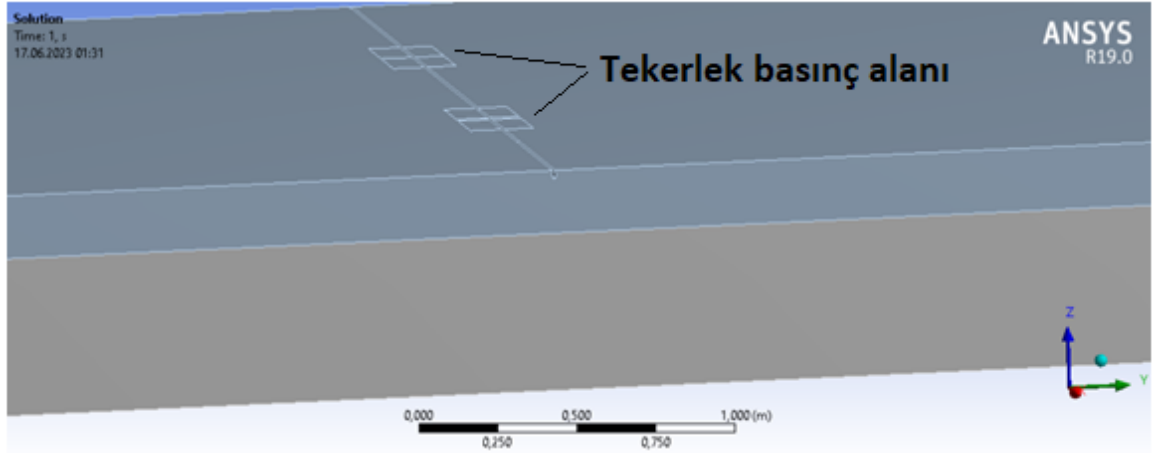
Bu analizde 5mx15mx20cm ebatlarındaki beton yol kaplaması ve altında 50 cm kalınlığında bir zemin olması durumu ele alınmıştır. Her 5 metrede bir 0,8 cm genişliğinde derz bırakılmıştır. Derz derinlikleri 0 cm (derzsiz), 2.5 cm, 5.0 cm ve 7.5 cm alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Kaplamada sadece tekerlek yükü varken, sadece sıcaklık yükü varken ve ikisi beraber varken analizler yapılmıştır (Resim 2.7.8.1, Resim 2.7.8.2). Tekerlek yükü olarak her tekere ayrı ayrı 0,8 MPa'lık basınç yükü alınmıştır. Sıcaklık yüklemesinde yol üst yüzeyi 35 °C ve alt yüzeyi 20 °C olacak şekilde 15 °C'lik bir pozitif sıcaklık farkı beton yol kaplamasına uygulanmıştır. Diğer tüm veriler önceki analizlerde kullanılan analiz verileriyle aynı alınmıştır. %0 GP (şahit beton) içeren beton ve %15 GP içeren hafif beton ile kaplama ANSYS programında simüle edilmiştir. x doğrultusunda A hattında, B hattında ve C hattındaki gerilme değerleri ile y doğrultusunda D hattında ve E hattındaki gerilme değerleri elde edilmiştir.

x doğrultusundaki gerilme değerleri için 1-2 hat çizgileri ile bu hat çizgilerinin isimleri Resim 2.7.8.3'te, y doğrultusundaki gerilme değerleri için 1-2 hat çizgileri ile bu hat çizgilerinin isimleri Resim 2.7.8.4'te, verilmiştir. Her bir hatta hem yolun üst yüzeyinde (0 cm'de) ve hem de yolun alt yüzeyinde (-20 cm'de) olmak üzere iki adet veri alınmıştır. Veriler, başlangıç noktası 1 ve bitiş noktası da 2 olan hat boyunca alınmıştır. C hattında yol üst yüzeyinde derzin 1 cm solunda ve yol alt yüzeyi olarak da derz

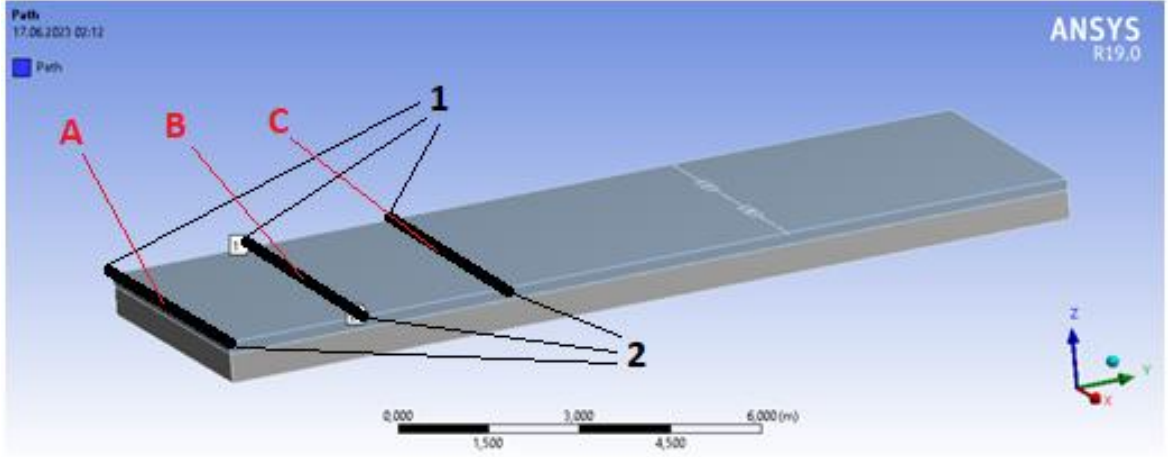
derinliğinde (2,5 cm, 5cm ve 7,5 cm) veriler elde edilmiştir. C hattında derzsiz (0 cm derzli) yol kaplamasında yol alt yüzeyinden veriler alınmıştır.



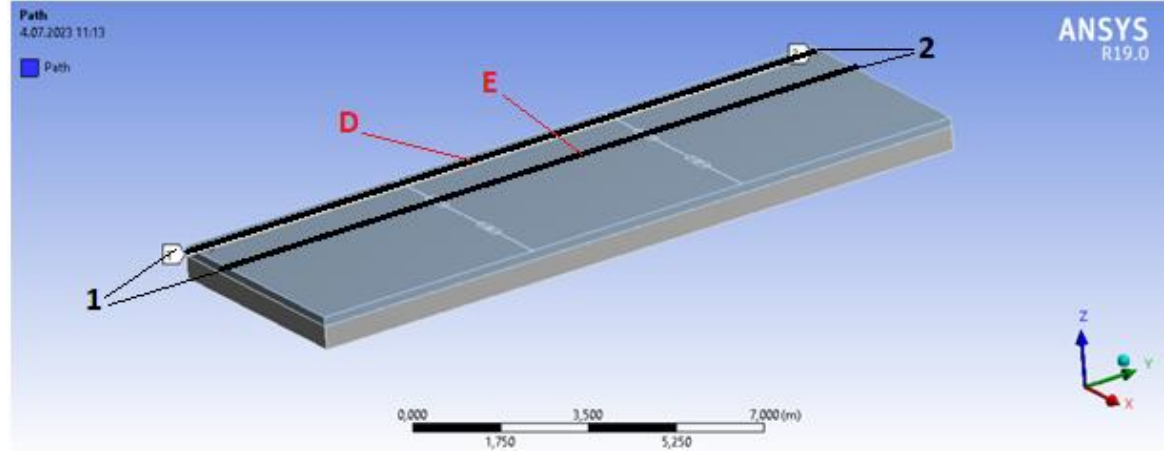
Resim 2.7.8.1. 5mx15mx20cm kalınlığında her 5 metrede bir derz kesilen beton yol kaplaması ve yüklerin uygulandığı yerler



Resim 2.7.8.2. 5mx15mx20cm ebatlarında her 5 metrede bir derz kesilen beton yol kaplaması



Resim 2.7.8.3. x doğrultusunda beton kaplamasından verilerin alındığı 1-2 hatları ve bu hatların isimleri



Resim 2.7.8.4. y doğrultusunda beton kaplamasından verilerin alındığı 1-2 hatları ve bu hatların isimleri

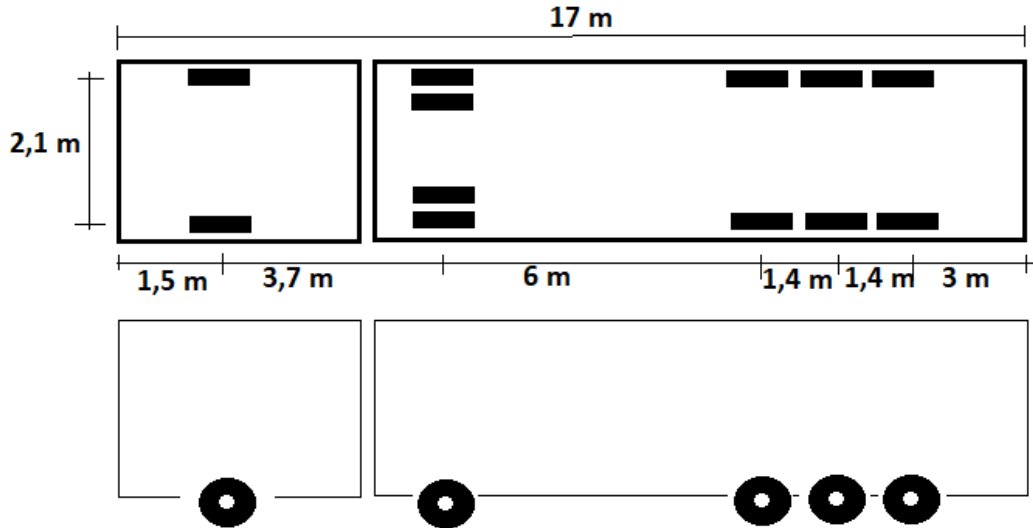
2.7.9. Kaplama Üzerinde Tır Olması Durumu

Bu başlık altında 5mx18mx20cm ebatlarında %0 GP (C30/37) içeren beton ve %15 GP içeren beton yol kaplaması üzerinde tır olması durumunda alt yüzeyin 35 °C ve üst yüzeyin 50 °C olduğu ve her bir tekere 0,8 MPa'lık yük geldiği durumda analiz yapılmıştır. Programa girilen değerler yukarıda yapılan analizlerdeki değerler ile aynıdır. Tırın resmi Resim 2.7.9.1'de, görünüşleri Resim 2.7.9.2'de, analizin ANSYS programındaki görüntüsü Resim 2.7.9.3'te ve analizde alınan hatların başlangıç ve bitiş noktaları ile isimleri Resim 2.7.9.4'te verilmiştir.

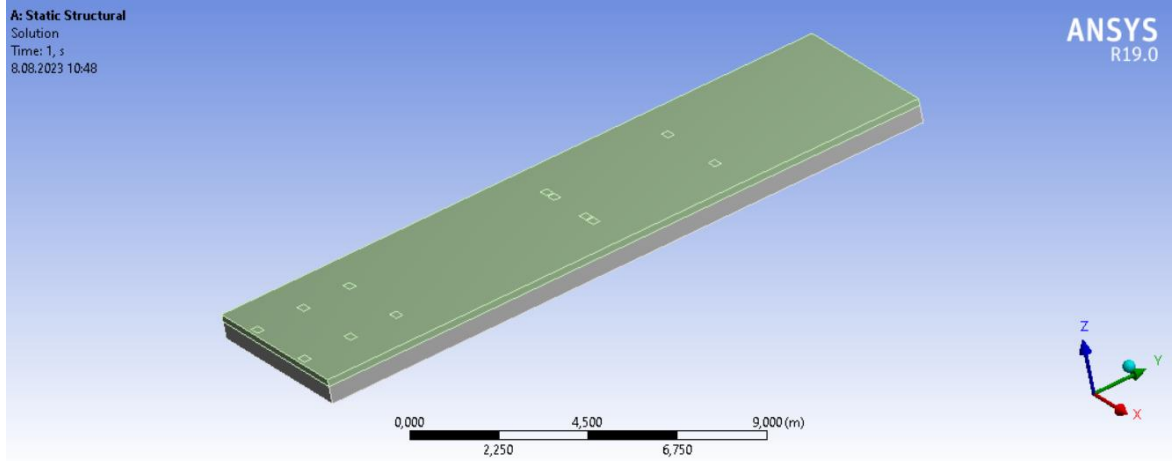
Bu analizle 18 m uzunluğundaki bir kaplama üzerinde tır olması durumunda sıcaklık ve tekerlek yüklemesiyle beraber oluşan maksimum çekme gerilmesi değerleri elde edilmiştir. x doğrultusundaki A hattındaki, B hattındaki ve C hattındaki gerilme değerleri ile y doğrultusundaki D hattındaki gerilme değerleri bulunmuştur.



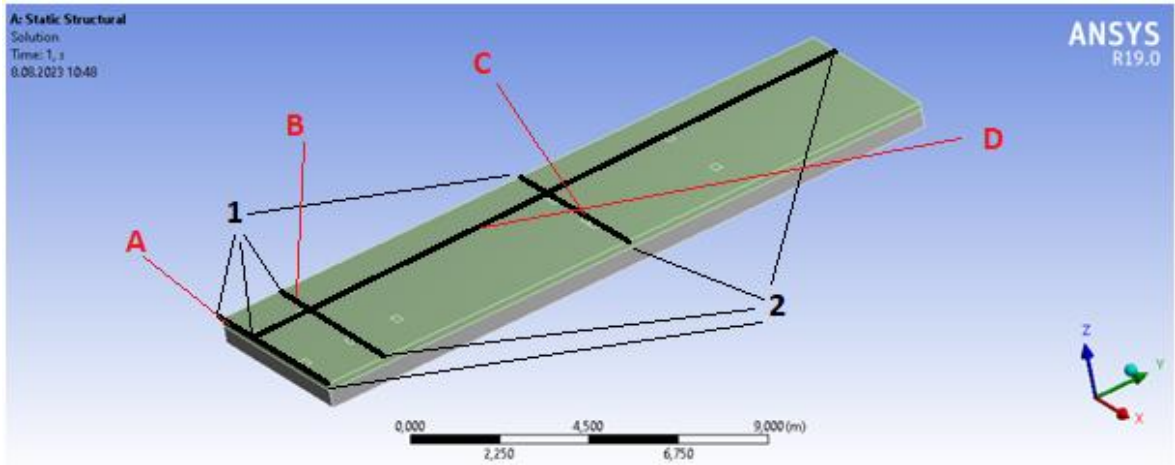
Resim 2.7.9.1. Tırın görünüşü



Resim 2.7.9.2. Tırın plandan ve yandan görünüşü



Resim 2.7.9.3. Analizin ANSYS programındaki görünüşü



Resim 2.7.9.4. Analizde alınan hatların başlangıç bitiş noktaları ve isimleri

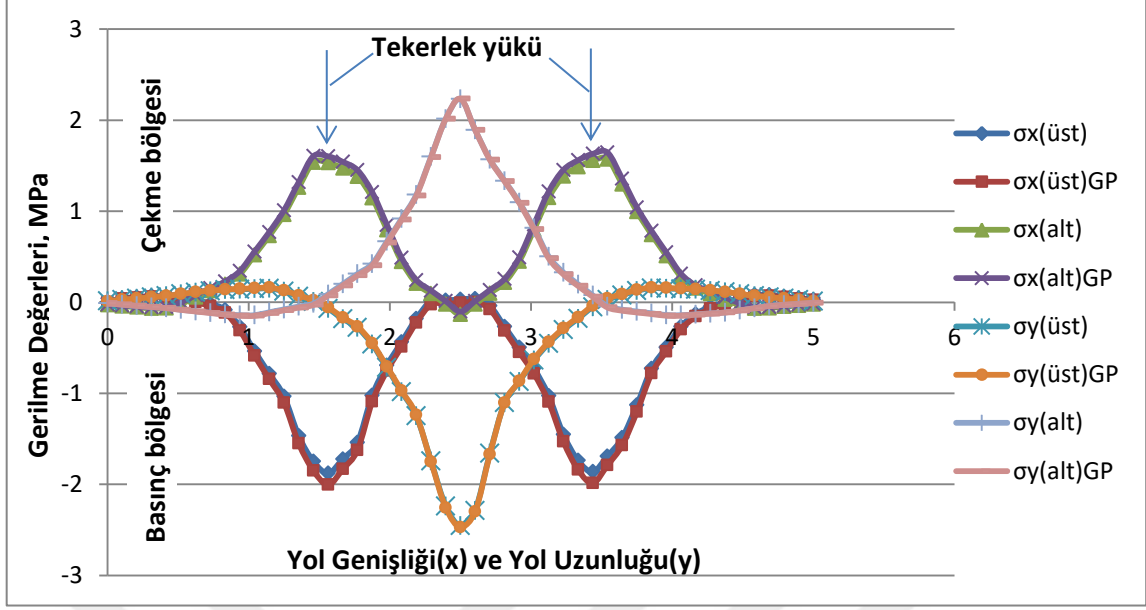
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Genleşme Formülü Kullanılması Halinde

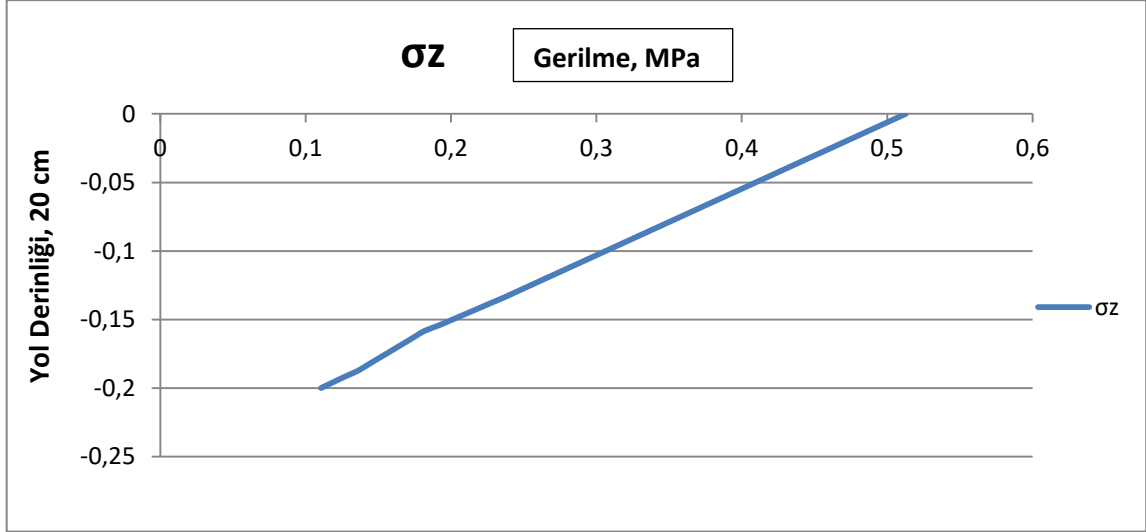
Bir beton yol kaplamasında kullanılan betonun elastisite modülü, ısı genleşme katsayısı ve betonun absorbe edebileceği maksimum sıcaklık değerleri (Tablo 2.4.1.2) $\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T$ formülünde yerine yazılırsa, kaplamanın 2 cm'lik bir derz yapabilmesi için C30 betonda 213 m, C25 betonda 240 m ve C20 betonda 280 m uzunluğunda derzsiz bir şekilde yapılabileceği görülmektedir. Kaplamanın hafif beton ile yapılması durumunda betonun elastisite modülü, ısı genleşme katsayısı ve eğilmede çekme mukavemeti ısı genleşme formülünde yerine yazılırsa hafif betonun 18,8 °C'lik sıcaklık farkına kadar deforme olmadan ısı yükleri taşıyabileceği görülmektedir. Hafif beton ile yapılan bir beton yol kaplaması, 2 cm (0,02 metre) genişliğinde bir derz yapılması halinde 106 metre uzunluğunda derzsiz bir kaplama yapılabileceği görülmektedir. Laboratuvar çalışmasından elde edilen verilerle %15 GP içeren betonun elastisite modülü, eğilmede çekme mukavemeti ve ısı genleşme katsayısı ısı genleşme formülünde yerine koyulursa kaplamanın üstü ile altı arasındaki absorbe edebileceği sıcaklık farkı 45 °C ve derzsiz yapılabileceği mesafe de 171 m olarak bulunmaktadır.

3.2. Kaplamada Sadece Tekerlek Yükü Olması Halinde

5mx5mx20cm ebatlarındaki beton kaplamada sadece tekerlek yükü olması durumunda %0 GP ve %15 GP içeren beton sınıfları için maksimum çekme gerilmesi, y doğrultusunda lastiğin altında yol alt yüzeyinde 2,23 MPa olarak meydana gelmiştir (Grafik 3.2.1). %0 GP içeren betonda y doğrultusundaki maksimum yer değiştirme değeri de 0,55 mm ve tam lastiğin altında yol alt yüzeyindedir. x doğrultusunda maksimum çekme gerilmeleri her bir lastik yükünün altında beton yol kaplamasının alt yüzeyinde meydana gelmektedir. z doğrultusunda yol kaplama yüzeyinde 0,51 MPa'lık bir basınç gerilmesi oluşurken yol alt yüzeyinde bu gerilme değeri 0,11 MPa düşmüştür (Grafik 3.2.2). Yalnızca tekerlek yükü olması durumunda her iki beton sınıfında da aynı gerilme değerleri oluşmuştur.



Grafik 3.2.1. 5x5x0,2 m ebatlarındaki beton yol kaplamasında sadece yük varken meydana gelen x ve y doğrultusundaki normal gerilmeler (+:çekme, -:basınç)

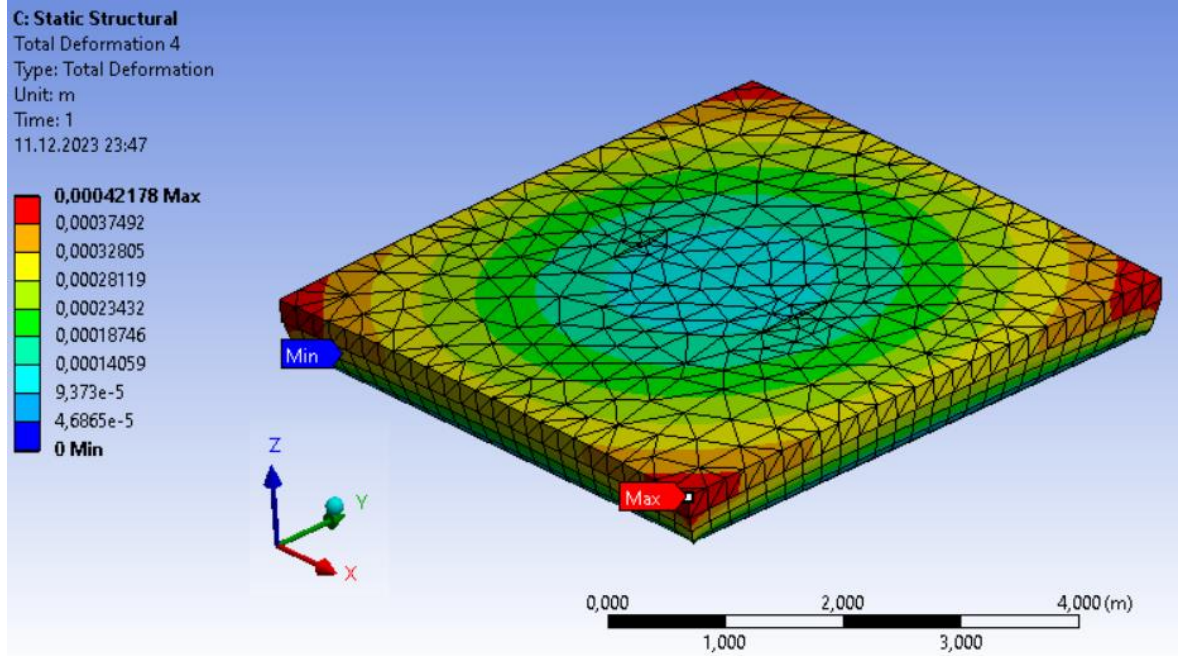


Grafik 3.2.2. 5x5x0,2 m ebatlarındaki beton yol kaplamasında sadece yük varken yol kalınlığında (z doğrultusu) meydana gelen normal gerilme (+:çekme, -:basınç)

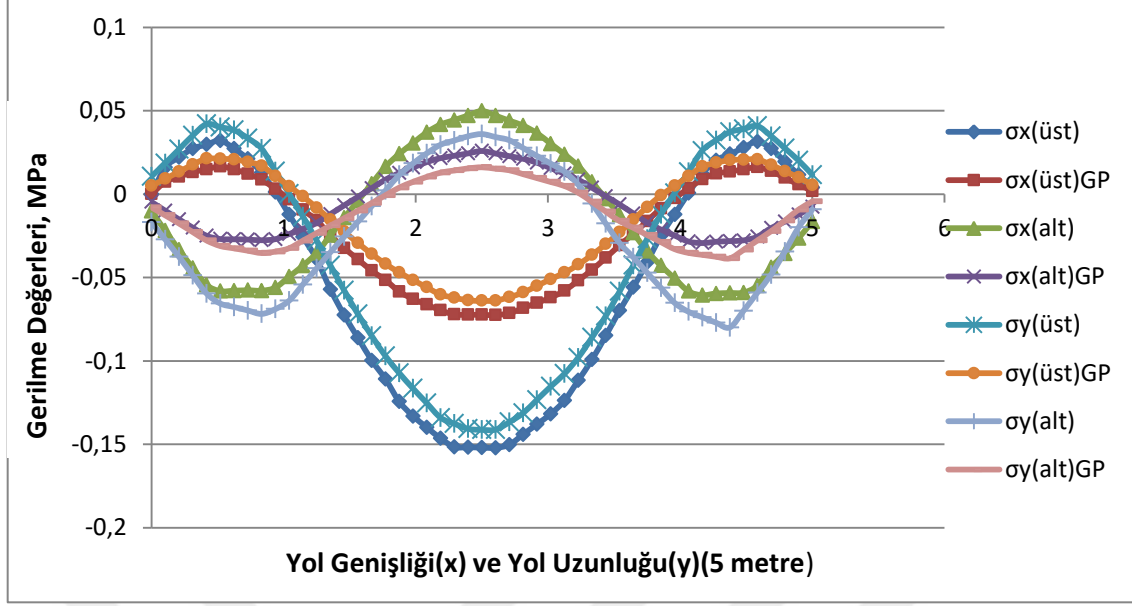
Sonuç olarak beton yol kaplaması geleneksel veya hafif beton olması halinde yalnızca tekerlek yükü ile yüklenmiş ise gerilmeler ve deformasyonlar aynı çıkmaktadır. 2,23 MPa'lık bir çekme gerilmesi değeri her iki betonun eğilmede çekme mukavemetinden küçük olduğundan kaplamada bir çatlama meydana gelmeyecektir.

3.3. Kaplamada Yüksek Sıcaklık Olması Halinde

5mx5mx20cm ebatlarındaki kaplamada yüzey sıcaklığının yüksek, üst-alt sıcaklık farkının az olduğu durumda, kaplamanın üst yüzeyinin 60 °C ve alt yüzeyinin 58 °C sıcaklıktayken x ve y doğrultusunda aynı gerilme değerleri ve aynı deformasyonlar oluşmaktadır. Maksimum deformasyon, %0 GP içeren betonda 0,42 mm olup beton yol kaplamasının köşelerinde meydana gelmektedir (Resim 3.3). Maksimum çekme gerilmesi %0 GP içeren betonda x doğrultusunda yolun üst yüzeyinde 0,152 MPa olurken %15 GP içeren beton kaplamada bu değer yarıya düşüp 0,072 MPa olmuştur. Kaplamanın her iki doğrultusunda da kenar ortalarındaki gerilme değerleri neredeyse sıfır olurken maksimum çekme kaplamanın üst yüzeyinde ve maksimum basınç kaplamanın alt yüzeyinde olacak şekilde her iki doğrultuda merkezde meydana gelmiştir. Kaplamanın her iki kenar merkezden 50 cm içeride her iki doğrultuda üst yüzeyde basınç gerilmesi, alt yüzeyde de çekme gerilmesi meydana gelirken 1 metre içeride gerilme değeri sıfır olup yön değiştirmektedir (Grafik 3.3.1). Sıcaklığın yüksek ve farkın düşük olduğu kaplamada basınç gerilme değeri kullanılan betona göre oldukça düşüktür (0,05 MPa).



Resim 3.3. Yüksek sıcaklık varken %0 GP içeren beton yol kaplamasında meydana gelen deformasyon değerleri



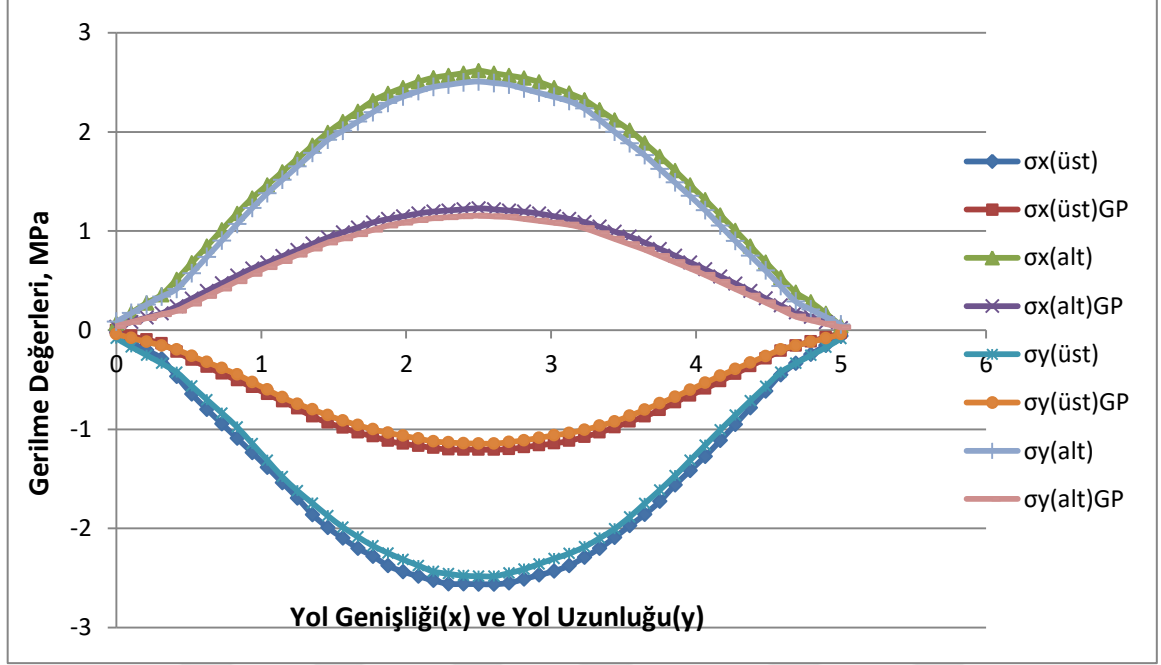
Grafik 3.3.1. 5x5x0,2 m ebatlarındaki beton yol kaplamasında yüzey sıcaklığının yüksek, üst-alt sıcaklık farkının az olduğu durumda meydana gelen gerilmeler (+: basınç, -:çekme)

Burada bulunan çekme gerilmesi değerleri, Cui ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada 3,12 MPa (Cui vd., 2022) olduğundan literatürdeki gerilme değerlerinden oldukça küçüktür. Kaplamanın altı ile üstü arasındaki sıcaklık değerlerini birbirine yaklaştırmamanın yalnızca sıcaklık yüklemesi altında oluşturacağı maksimum çekme gerilmesi değerlerini oldukça düşürdüğü görülmektedir ($\Delta T = 2^{\circ}\text{C}$ iken 0,15 MPa ve $\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$ iken 2,56 MPa).

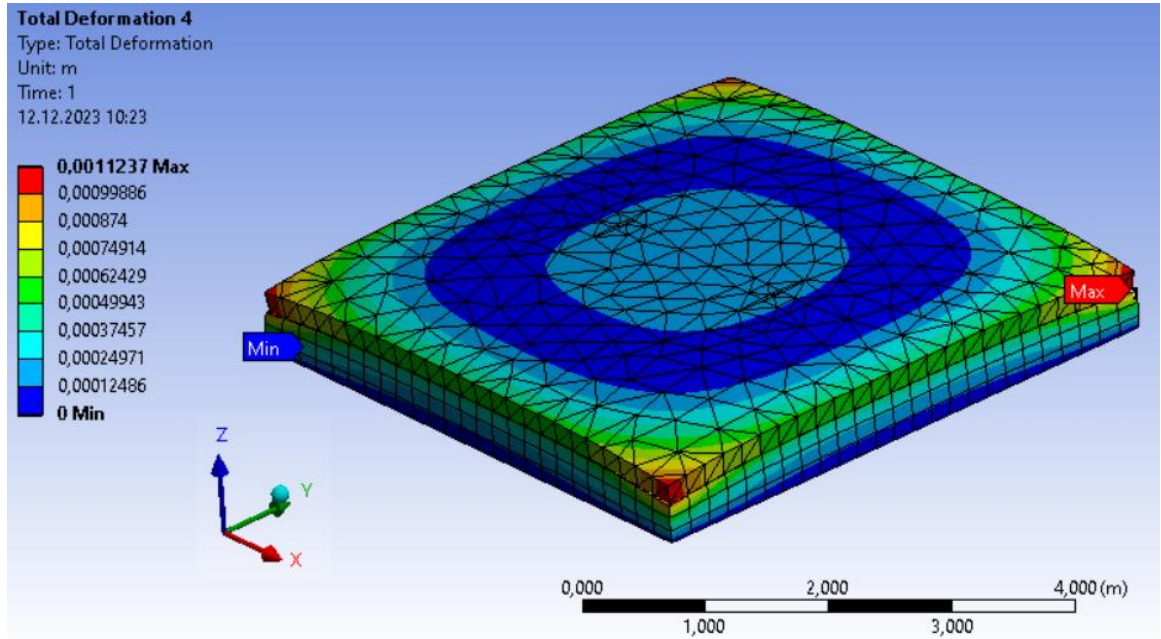
3.4. Kaplamada Yüksek Sıcaklık Farkı Olması Halinde

5mx5mx20cm ebatlarındaki kaplamada sıcaklık farkının yüksek olması durumunda, üst yüzey 30°C ve alt yüzey 5°C sıcaklıktayken meydana gelen maksimum çekme gerilmesi %0 GP içeren beton kaplamada x doğrultusunda beton yol tabakasının üst yüzeyinde yolun ortasında 2,56 MPa olarak oluşurken bu değer %15 GP içeren beton yol kaplamasında 1,21 MPa olmaktadır (Grafik 3.4). Beton yol kaplamasının kenar ortasında her iki doğrultuda da gerilme değerleri sifıra yakın olmaktadır. Kaplamanın üst yüzey ortasında her iki doğrultuda maksimum çekme gerilmesi meydana gelirken, alt yüzey ortasında ise maksimum basınç gerilmesi meydana gelmiştir. Meydana gelen maksimum basınç gerilmesi kullanılan beton sınıfının dayanımının oldukça altındadır (2,5 MPa). Sıcaklık farkının büyük olmasının sıcaklığın yüksek ama farkın az olduğu duruma göre

daha kritik olduğunu göstermektedir. Maksimum uzama %0 GP içeren beton kaplamada 1,12 mm, %15 GP içeren beton kaplamada ise 0,58 mm olup yol tabakasının köşe bölgelerinde oluşmaktadır (Resim 3.4).



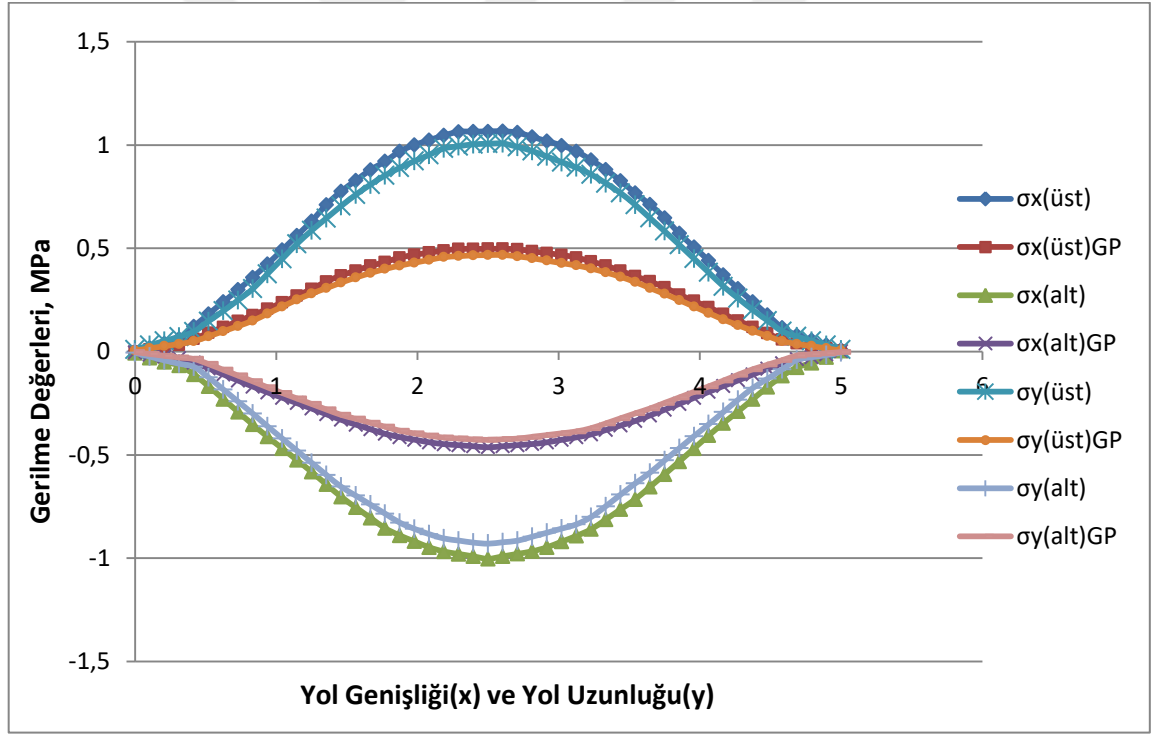
Grafik 3.4. 5x5x0,2 m ebatlarındaki beton yol kaplamasında sadece sıcaklık varken meydana gelen gerilmeler (+:basınç, -:çekme)



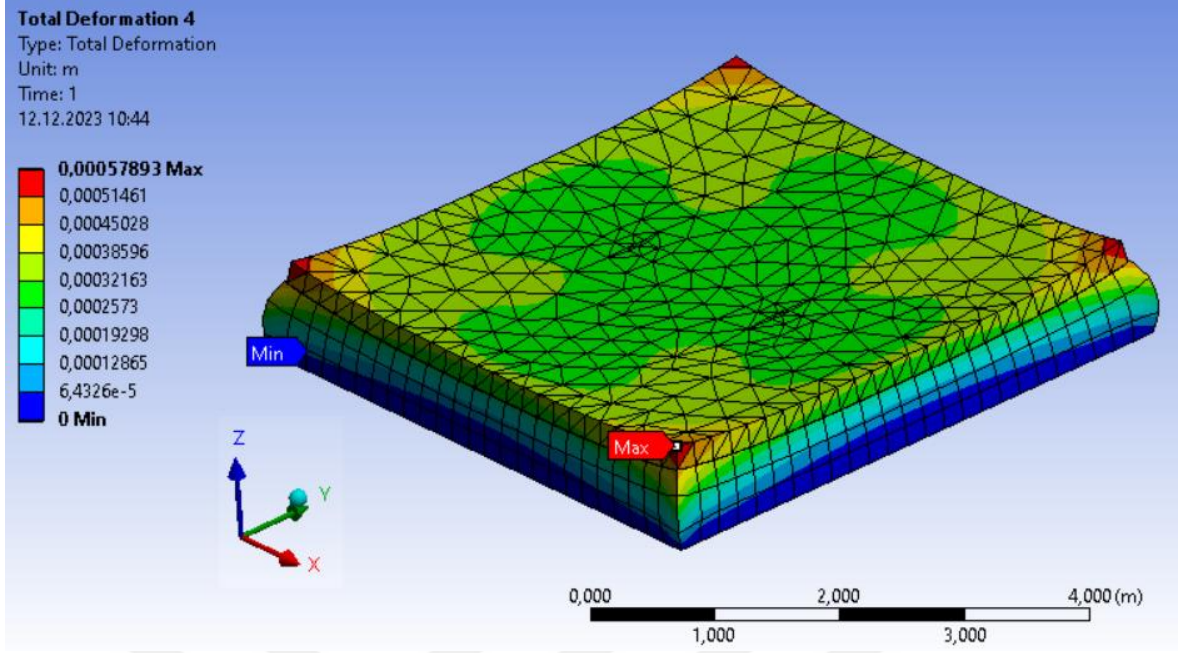
Resim 3.4. Sıcaklık farkı 25 °C'iken %0 GP içeren beton kaplamada meydana gelen deformasyon değerleri

3.5. Kaplamanın Soğuk Bölgede Olması Halinde

5mx5mx20cm ebatlarındaki kaplamada soğuk bölgelerdeki duruma göre üst yüzeyin -5°C ve alt yüzeyin 5°C sıcaklıktayken meydana gelen maksimum çekme gerilmesi %0 GP içeren betonda x doğrultusunda yol alt yüzeyinde 1,07 MPa değerinde iken bu değer %15 GP içeren beton yol kaplamasında 0,46 MPa olmaktadır (Grafik 3.5). Maksimum yer değiştirme değeri %0 GP içeren betonda 0,58 mm olurken %15 GP içeren beton yol kaplamasında 0,23 mm ve yolun köşelerinde meydana gelmektedir (Resim 3.5). Kaplama kenar ortalarındaki gerilme değerleri sıfıra yakın olurken maksimum çekme gerilmesi yol kaplamasının alt yüzey ortasında ve maksimum basınç gerilmesi de kaplamanın üst yüzey ortasında meydana gelmektedir. Oluşan basınç gerilme değerleri, beton sınıfının basınç dayanımının oldukça altındadır (1,07 MPa).



Grafik 3.5. 5x5x0,2 m ebatlarındaki beton yol kaplamasında sadece negatif sıcaklık varken meydana gelen gerilmeler (+:basınç, -:çekme)



Resim 3.5. Soğuk bölgelerde %0 GP içeren beton kaplamada meydana gelen deformasyon

3.6. Kaplamada Yük ve Sıcaklık Durumu Değerlendirmesi

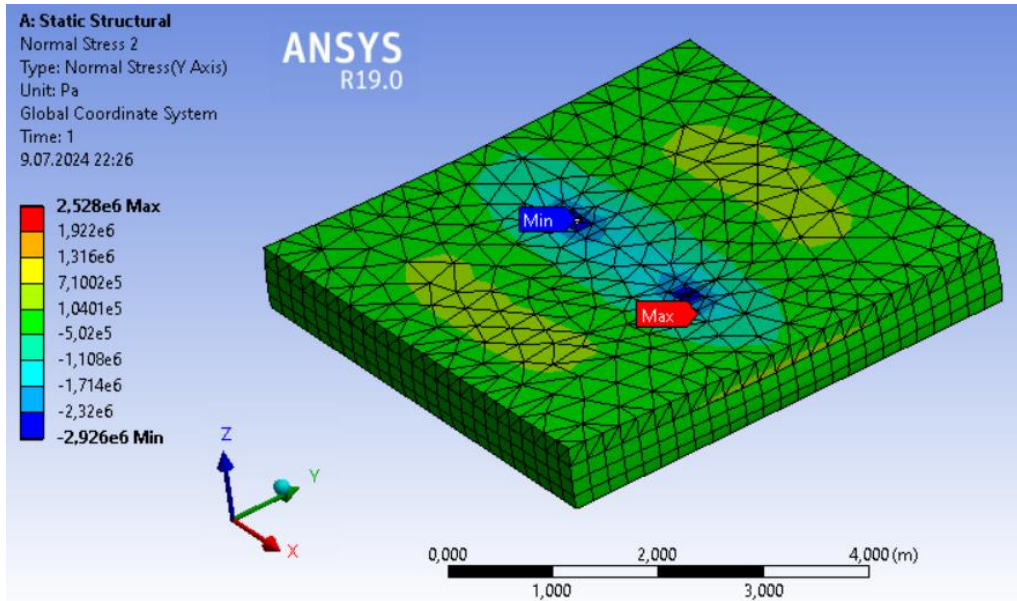
Grafik 3.2.1’de görüldüğü üzere 5mx5mx20cm ebatlarındaki kaplamada sadece yük varken meydana gelen çekme gerilmesi değerleri yol alt yüzeyindeki tekerlek yüküne denk gelen yerlerde oluşmaktadır. Sadece sıcaklık varken oluşan çekme gerilmesi değerleri, gündüz ve yaz vakti yolun üst yüzeyinde oluşurken, gece ve kış vakitlerinde yolun alt yüzeyinde meydana gelmektedir. Kaplama yüzeyinin 60 °C ve sıcaklık farkı 2 °C iken çekme gerilmesi değerleri, yolun üst yüzeyinde oluşurken yolun kenardan dörtte bir mesafesinde yön değiştirerek yolun kenar bölgesinde alt bölgesinde oluşmaktadır. 50 cm zemin üzerine 5x5x0,2 m ebatlarında beton yol kaplaması yapılması ve 0,8 MPa’lık tekerlek yükü veya kaplama üst ve altı arasında sıcaklık farkı varken yapılan analizden elde edilen maksimum çekme gerilmeleri, oluştuğu yerler ve deformasyonlar Tablo 3.6’da verilmiştir. Buradaki en olumsuz değerler, %0 GP (geleneksel beton) içeren betonda meydana geldiği için %15 GP (hafif beton) içeren beton değerleri yazılmamıştır. Analizden elde edilen maksimum çekme gerilmesi ve deformasyon değerleri, %15 GP içeren betonda %0 GP içeren betondan elde edilen değerlere göre yaklaşık yarısı kadar çıkmıştır.

Tablo 3.6. Sadece yük ve sadece sıcaklık varken beton yol kaplamasındaki gerilme ve deformasyon değerleri

	Sıcaklık Yokken (Yük varken)	Üst 30 °C, alt 5 °C (Yük yok)	Üst 60 °C, alt 58 °C (Yük yok)	Üst -5 °C, alt 5 °C (Yük yok)
Maksimum Deformasyon (mm)	0,55	1,12	0,42	0,59
Max. kritik çekme gerilmesi (Mpa)	2,23	2,56	0,15	1,07
Kritik gerilme bölgesi	Lastik altı (kaplama altı)	Yol üst ortası	Yol üst ortası	Yol alt ortası

3.7. Kaplamada Yük ve Sıcaklık Etkisi

%0 GP içeren 5x5x0,2 m ebatlarındaki beton kaplamada tekerlek yükü, sıcaklık yükü ve her ikisi beraberken yapılan analizde, kaplamada sadece tekerlek yükü varken y doğrultusunda oluşan gerilme değerleri Resim 3.7.1 ve Resim 3.7.2’de verilmiştir. Kaplamada sadece sıcaklık yükü varken y doğrultusunda oluşan gerilme değerleri Resim 3.7.3 ve Resim 3.7.4’te verilmiştir. Kaplamada tekerlek yükü ve sıcaklık yükü beraber varken y doğrultusunda oluşan gerilme değerleri de Resim 3.7.5 ve Resim 3.7.6’da verilmiştir.



Resim 3.7.1. Kaplamada tekerlek yükü varken oluşan gerilme değerleri (+: çekme, -: basınç)

y=2,5 iken oluşan gerilme değerleri, MPa						
x koordinatı,m						
z koordinatı,m		0	1,25	2,5	3,75	5
	0,2	-0,45	-1,87	-1,35	-1,97	-0,48
	0,1	0,009	-0,12	-0,031	-0,15	0,006
	0	0,43	1,56	1,28	1,59	0,44

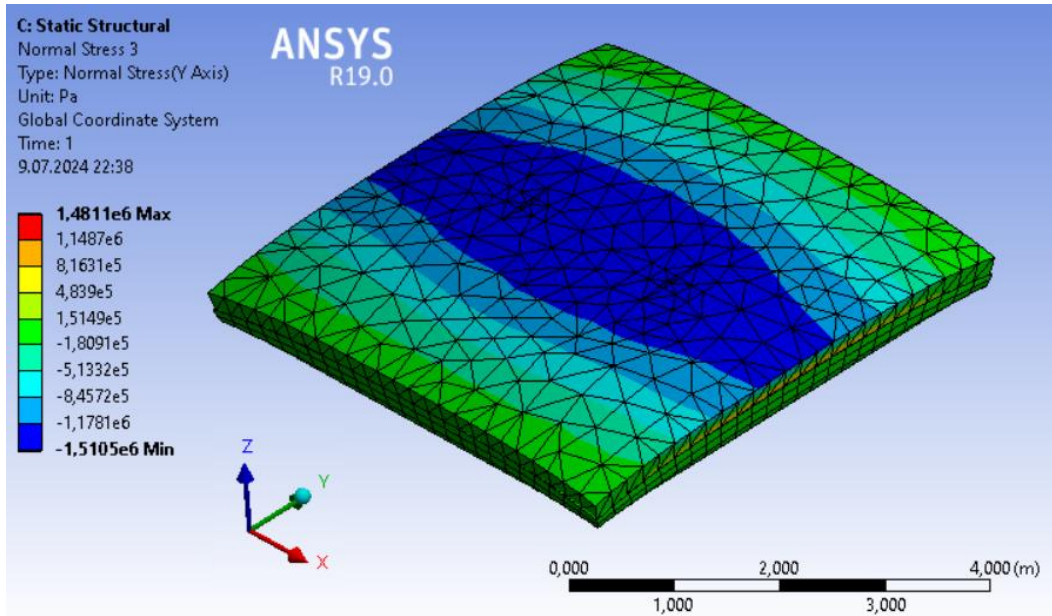
y=3,75 iken oluşan gerilme değerleri, MPa						
x koordinatı,m						
z koordinatı,m		0	1,25	2,5	3,75	5
	0,2	-0,067	0,11	0,1	0,1	-0,066
	0,1	-0,0002	-0,021	-0,004	0,002	0,018
	0	0,081	-0,083	-0,093	-0,063	0,084

y=1,25 iken oluşan gerilme değerleri, MPa						
x koordinatı,m						
z koordinatı,m		0	1,25	2,5	3,75	5
	0,2	-0,08	0,11	0,09	0,11	-0,69
	0,1	0,007	0,0097	-0,02	-0,02	-0,0002
	0	0,07	-0,057	-0,09	-0,081	0,083

y=5 iken oluşan gerilme değerleri, MPa						
x koordinatı,m						
z koordinatı,m		0	1,25	2,5	3,75	5
	0,2	-0,011	0,006	0,011	0,003	-0,01
	0,1	0,003	-0,0003	0,0008	-0,0004	-0,0005
	0	0,013	-0,005	-0,008	-0,007	0,007

y=0 iken oluşan gerilme değerleri, MPa						
x koordinatı,m						
z koordinatı,m		0	1,25	2,5	3,75	5
	0,2	-0,012	0,006	0,019	0,008	-0,006
	0,1	-0,005	0,0009	0,007	0,0005	0,003
	0	0,007	-0,008	-0,012	-0,005	0,011

Resim 3.7.2. Kaplamada tekerlek yükü varken oluşan gerilme değerleri



Resim 3.7.3. Kaplamada sıcaklık yükü varken oluşan gerilme değerleri (-: çekme, +:basınç)

y=2,5 iken oluşan gerilme değerleri, MPa						
x koordinatı,m						
z koordinatı,m		0	1,25	2,5	3,75	5
	0,2	-1,28	-1,42	-1,51	-1,42	-1,26
	0,1	0,014	-0,02	-0,014	-0,022	0,01
	0	1,28	1,36	1,47	1,36	1,27

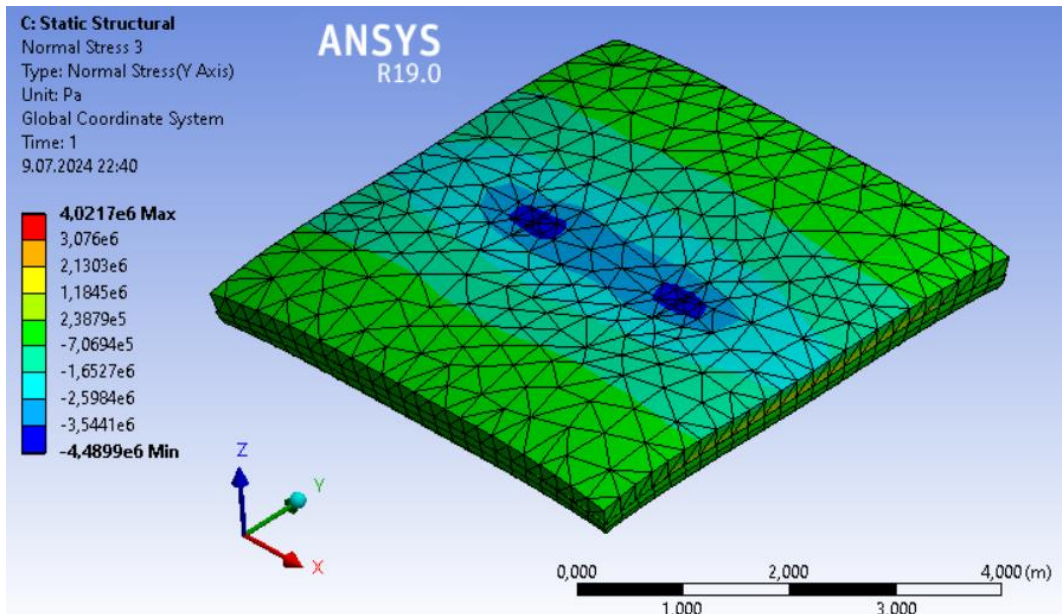
y=3,75 iken oluşan gerilme değerleri, MPa						
x koordinatı,m						
z koordinatı,m		0	1,25	2,5	3,75	5
	0,2	-0,68	-0,88	-0,96	-0,85	-0,73
	0,1	-0,002	-0,031	-0,014	-0,019	0,027
	0	0,73	0,83	0,94	0,86	0,69

y=1,25 iken oluşan gerilme değerleri, MPa						
x koordinatı,m						
z koordinatı,m		0	1,25	2,5	3,75	5
	0,2	-0,71	-0,87	-0,98	-0,87	-0,68
	0,1	0,036	-0,004	-0,046	-0,04	-0,006
	0	0,71	0,86	0,94	0,83	0,73

y=5 iken oluşan gerilme değerleri, MPa						
x koordinatı,m						
z koordinatı,m		0	1,25	2,5	3,75	5
	0,2	0,002	-0,022	-0,028	-0,017	-0,007
	0,1	-0,068	0,002	-0,005	-0,0004	-0,003
	0	-0,012	0,017	0,015	0,026	-0,003

y=0 iken oluşan gerilme değerleri, MPa						
x koordinatı,m						
z koordinatı,m		0	1,25	2,5	3,75	5
	0,2	-0,003	-0,02	-0,047	-0,025	-0,0007
	0,1	-0,003	-0,003	-0,017	-0,052	-0,008
	0	-0,033	0,024	0,031	0,011	-0,015

Resim 3.7.4. Kaplamada sıcaklık yükü varken oluşan gerilme değerleri



Resim 3.7.5. Kaplamada tekerlek ve sıcaklık yükü varken her bir ızgarada oluşan gerilme değerleri (-: çekme, +:basınç)

y=2,5 iken oluşan gerilme değerleri, MPa						
x koordinatı,m						
z koordinatı,m		0	1,25	2,5	3,75	5
	0,2	-1,77	-3,36	-2,97	-3,47	-1,74
	0,1	0,019	-0,15	-0,052	-0,17	0,012
	0	1,75	2,99	2,83	3,01	1,75

y= 3,75 iken oluşan gerilme değerleri, MPa						
x koordinatı,m						
z koordinatı,m		0	1,25	2,5	3,75	5
	0,2	-0,77	-0,8	-0,9	-0,78	-0,81
	0,1	-0,066	-0,056	-0,024	-0,021	0,044
	0	0,83	0,77	0,88	0,82	0,79

y=1,25 iken oluşan gerilme değerleri, MPa						
x koordinatı,m						
z koordinatı,m		0	1,25	2,5	3,75	5
	0,2	-0,81	-0,79	-0,94	-0,8	-0,77
	0,1	0,04	0,003	-0,077	-0,067	-0,01
	0	0,79	0,82	0,89	0,77	0,83

y= 5 iken oluşan gerilme değerleri, MPa						
x koordinatı,m						
z koordinatı,m		0	1,25	2,5	3,75	5
	0,2	-0,008	-0,012	-0,011	-0,01	-0,017
	0,1	-0,004	0,0012	-0,005	0,0004	-0,008
	0	-0,003	0,007	0,00005	0,0013	0,00002

y=0 iken oluşan gerilme değerleri, MPa						
x koordinatı,m						
z koordinatı,m		0	1,25	2,5	3,75	5
	0,2	-0,015	-0,013	-0,022	-0,013	-0,007
	0,1	-0,008	-0,002	-0,009	-0,005	-0,005
	0	0,002	0,013	0,014	0,004	-0,004

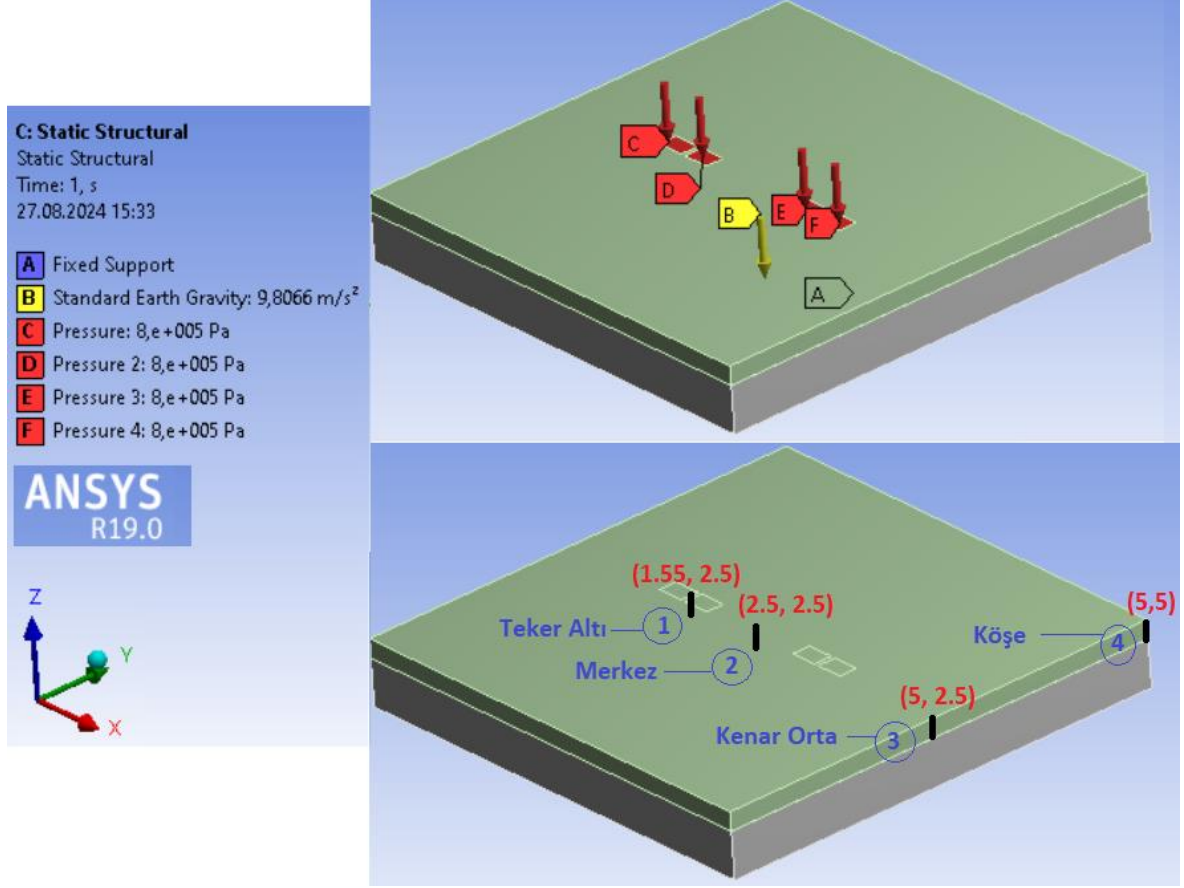
Resim 3.7.6. Kaplamada tekerlek ve sıcaklık yükü varken oluşan gerilme değerleri

Resim 3.7.1, Resim 3.7.2, Resim 3.7.3, Resim 3.7.4, Resim 3.7.5 ve Resim 3.7.6 incelendiğinde yalnızca tekerlek yükü olması durumunda kaplamanın yüzeyinde tekerlek yükü ve çevresinde basınç gerilmeleri oluşurken kenarlara doğru gidildikçe çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Yalnızca sıcaklık olması durumunda ise kaplamanın üst yüzeyinde çekme gerilmesi ve alt yüzeyinde de basınç gerilmesi oluşmaktadır. Tekerlek yükü ve sıcaklık beraber varken oluşan çekme gerilmesi karakteri üzerinde sadece sıcaklık varken oluşan çekme gerilmesi karakteri gibi olmaktadır.

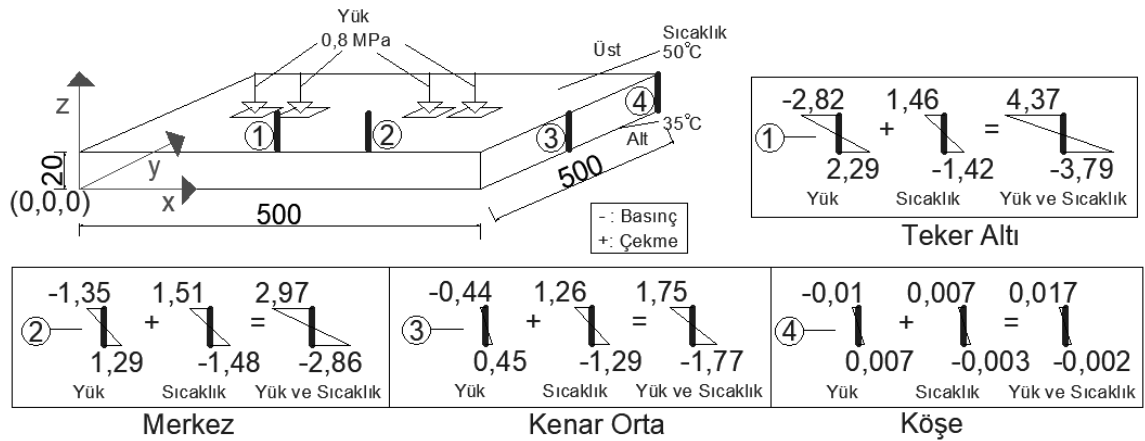
3.8. Kaplamada Kalınlık Boyunca Kritik Gerilme Değerleri

5mx5mx20cm ebatlarındaki kaplama üzerinde her tekere 0,8 Mpa basınç yükü, 15 °C'lık (üst 50 °C ve alt 35 °C) sıcaklık yüklemesi ve her ikisi beraber olması durumunda

tekerlek altı, merkez, kenar orta ve köşe gibi kritik yerlerde kalınlık boyunca meydana gelen gerilme değerleri bulunmuştur (Resim 3.8.1, Resim 3.8.2 ve Resim 3.8.3).

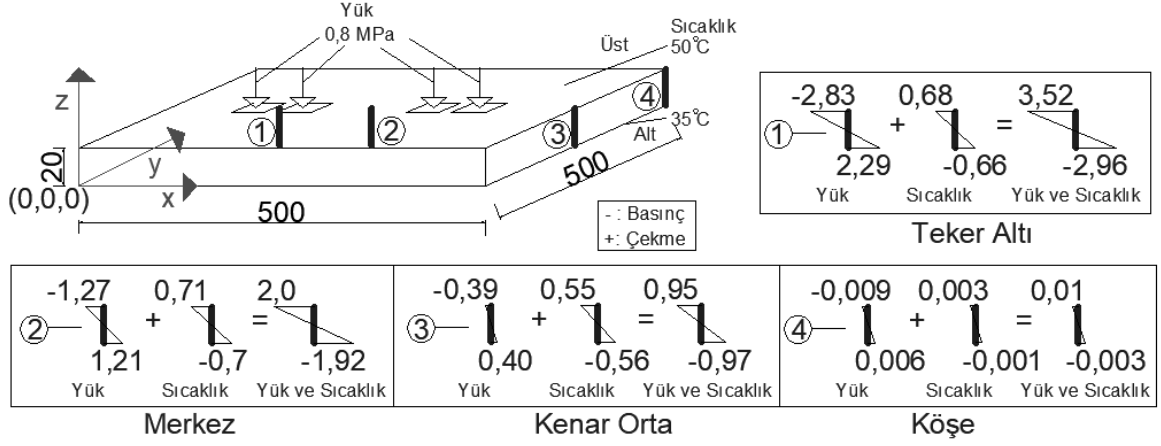


Resim 3.8.1. Kaplamada yükleme durumu ve kritik gerilme değerlerinin bulunduğu yerler



Resim 3.8.2. %0 GP içeren kaplamada kritik kesitlerde meydana gelen gerilme değerleri

%0 GP içeren kaplamada tam tekerlek yükünün altında sadece tekerlek yükünün olmasından dolayı yüzeyde 2,8 MPa'lık basınç gerilmesi oluşurken kaplamanın alt yüzeyinde aynı bölgede 2,29 MPa'lık çekme gerilmesi oluşmaktadır. Sadece sıcaklık yüklemesi olması durumunda kaplamanın üst yüzeyinde tam merkezde 1,5 MPa'lık çekme gerilmesi oluşurken alt yüzeyinde aynı bölgede 1,48 MPa'lık basınç gerilmesi meydana gelmektedir. Kaplamada sıcaklık ve tekerlek yükü beraber varken üst yüzeyde tekerlek altında 4,37 MPa'lık çekme gerilmesi oluşurken aynı bölgede alt yüzeyde 3,79 MPa'lık basınç gerilmesi oluşmaktadır. %0 GP içeren betonun eğilmede çekme mukavemeti 4,62 MPa olduğundan kaplamada herhangi bir deformasyon oluşmayacaktır.



Resim 3.8.3. %15 GP içeren kaplamada kritik kesitlerde meydana gelen gerilme değerleri

%15 GP içeren kaplamada ise lastiğin altında sadece tekerlek yükünden dolayı yüzeyde 2,8 MPa'lık basınç gerilmesi oluşurken kaplamanın alt yüzeyinde aynı bölgede 2,29 MPa'lık çekme gerilmesi oluşmaktadır. Sadece sıcaklık yüklemesi olması durumunda kaplamanın üst yüzeyinde tam merkezde 0,71 MPa'lık çekme gerilmesi oluşurken alt yüzeyinde aynı bölgede 0,7 MPa'lık basınç gerilmesi meydana gelmektedir. Kaplamada sıcaklık ve tekerlek yükü beraber varken üst yüzeyde tekerlek altında 3,52 MPa'lık çekme gerilmesi oluşurken aynı bölgede alt yüzeyde 2,96 MPa'lık basınç gerilmesi oluşmaktadır. %15 GP içeren betonun eğilmede çekme mukavemeti 3,66 MPa olduğundan kaplamada herhangi bir deformasyon oluşmayacaktır.

%0 GP içeren beton ve %15 GP içeren 5mx5mx0,2m ebatlarındaki kaplamada laboratuvar verileri kullanılarak yapılan ANSYS sonlu elemanlar gerilme analizinde meydana gelen çekme gerilmesi değerleri ile literatürdeki çalışmalardan elde edilen çekme

gerilmesi değerlerini karşılaştırma yapmak için Tablo 3.8 oluşturulmuştur. Literatürde oluşturulan şartlar ile bu tezdeki şartlar bire bir aynı olmadığı için sonuçların birbirinden farklı çıkması durumu meydana gelmektedir.

Tablo 3.8. Literatürde yapılan çalışmalardan elde edilen gerilme değerleri

Çalışmayı Yapan	Gerilme Değeri (MPa)	Sıcaklık Farkı ($^{\circ}\text{C}$)	Oluştugu Yer
Piotr & Antoni	1,24	20	Üst
Piotr & Antoni	1,11	20	Alt
Piotr & Antoni	0,69	-9	Üst
Piotr & Antoni	0,7	-9	Alt
Cui vd.	3	65 (yüzey)	Üst
Cui vd.	3,3	65 (alt)	Alt
Cui vd.	3,3	40 (yüzey)	Alt
Cui vd.	3,3	40 (alt)	Alt
Anno vd.	2,3-3,17	16,5	
Anno vd.	2,2-2,27	-8,25	
Anno vd.	1,3	0 (tekerlek yükü)	Kenar
Richardson & Armaghani	0,779	13,4	

Tablodan görüleceği üzere maksimum çekme gerilmesi değeri Cui vd.’nin yaptığı çalışma olup değeri 3,3 MPa’dır. Anno vd.’nin yaptığı çalışmada 16,5 $^{\circ}\text{C}$ ’lik bir sıcaklık farkında meydana gelen çekme gerilmesi kaplamadaki değişik doğrultulara göre 2,3-3,17 MPa arasında değişmektedir. Bu tezde %0 GP içeren beton ile yapılan 15 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklık farkındaki analizdeki merkezde 1,51 MPa değerinde bir çekme gerilmesi meydana gelmiştir. -10 $^{\circ}\text{C}$ ’lik bir negatif sıcaklık farkında ise 1 MPa’lık çekme gerilmesi oluşmaktadır. Aynı durumda Anno vd. -8,25 $^{\circ}\text{C}$ ’lik sıcaklık farkı için değişik doğrultulara göre 2,2-2,27 Mpa arasında değerler bulmuştur. Anno vd.’nin yaptığı çalışmada tekerlek yükü varken 1,3 Mpa’lık bir çekme gerilmesi oluşurken bu tezde üzerinde 0,8 MPa’lık basınç yüklesi olan tekerlek yükünden dolayı oluşan çekme gerilmesi değeri 2,29 Mpa olmaktadır.

3.9. Sadece Sıcaklık Yüğü Varken Kaplamada Kalınlık Etkisi

5mx5mxh cm (h; 5cm, 10cm, 15cm ve 20cm) ebatlarındaki kaplamada sadece sıcaklık olması durumunda kaplama kalınlığının değişimine göre yapılan analizde Tablo 3.9'daki veriler elde edilmiştir.

Tablo 3.9. C30/37 beton verileriyle yapılan yol kaplamasının kalınlık ve sıcaklık değişimlerine göre maksimum çekme gerilmesi, şekil değiştirme ve deformasyon değerleri (5mx5mxh cm)

Beton Kalınlığı (cm)	Sıcaklık (°C)	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa) (x doğrultusunda)		Toplam Deformasyon (mm)		Termal Birim Şekil Değiştirme (tamamında)
5	Alt 35	0,057	Yol üstü	0,27	Köşelerde	$5,85 \times 10^{-5}$
	Üst 35		ortasında			
	Alt 35	1,54	Yol üstü	0,55	Köşelerde	$12,6 \times 10^{-5}$
	Üst 50		ortasında			
10	Alt 50	0,13	Yol üstü	0,51	Köşelerde	$12,6 \times 10^{-5}$
	Üst 50		ortasında			
	Alt 35	0,028	Yol üstü	0,27	Köşelerde	$5,85 \times 10^{-5}$
	Üst 35		ortasında			
15	Alt 35	1,58	Yol üstü	0,63	Köşelerde	$12,6 \times 10^{-5}$
	Üst 50		ortasında			
	Alt 50	0,065	Yol üstü	0,51	Köşelerde	$12,6 \times 10^{-5}$
	Üst 50		ortasında			
20	Alt 35	0,0027	Yol üstü	0,28	Köşelerde	$5,85 \times 10^{-5}$
	Üst 35		ortasında			
	Alt 35	1,49	Yol üstü	0,57	Köşelerde	$12,6 \times 10^{-5}$
	Üst 50		ortasında			
20 (%15 GP)	Alt 50	0,0072	Yol üstü	0,51	Köşelerde	$12,6 \times 10^{-5}$
	Üst 50		ortasında			
	Alt 35	0	Yok	0,33	Köşelerde	$7,15 \times 10^{-5}$
	Üst 35					
20	Alt 35	1,5	Yol üstü	0,93	Köşelerde	$15,4 \times 10^{-5}$
	Üst 50		ortasında			
	Alt 50	0	Yok	0,61	Köşelerde	$15,4 \times 10^{-5}$
	Üst 50					
20	Alt 35	0	Yol üstü	0,21	Köşelerde	$3,38 \times 10^{-5}$
	Üst 35		ortasında			
	Alt 35	0,71	Yol üstü	0,49	Köşelerde	$7,28 \times 10^{-5}$
	Üst 50		ortasında			
20	Alt 50	0	Yok	0,33	Köşelerde	$7,28 \times 10^{-5}$
	Üst 50					

Tablo 3.9'dan görüldüğü üzere, 15 °C'lik sıcaklık farkında beton yol kaplamasının kalınlığı 5 cm'den 10 cm'e çıkartıldığında %2'lik bir çekme gerilme artışı meydana gelirken 15 cm'den 20 cm'e çıkartıldığında maksimum çekme gerilmesi değeri aynı kalmaktadır. 15 °C'lik sıcaklık farkında kaplamanın kalınlığı 10 cm'den 15 cm'e çıkartıldığında çekme gerilmesi değeri %6 oranında azalmaktadır. 15 °C'lik sıcaklık farkında hafif beton ile yol kaplaması yapıldığında çekme gerilmesi değerleri %53 oranında azalmaktadır. Sıcaklık farkı 15 °C olduğu durumda 5 cm'lik kaplamada 10 cm'lik kaplamaya göre %15 daha az deformasyon meydana gelmiştir. Sıcaklık farkı 15 °C iken her bir kaplamada yaklaşık 1,5 MPa'lık bir çekme gerilmesi oluşurken %15 GP içeren beton kaplamada bu değerin yarısı kadar çekme gerilmesi oluşmuştur. Alt-üst yüzeyi sıcaklık farkının eşit olduğu 5 cm, 10 cm ve 15 cm kalınlığındaki kaplama tabakalarında çekme gerilmesi değerleri yaklaşık sıfır olmaktadır. Alt-üst yüzeyi sıcaklık farkının eşit olduğu 20 cm kalınlığındaki %0 GP ve %15 GP içeren beton kaplamada çekme gerilmesi oluşmamaktadır.

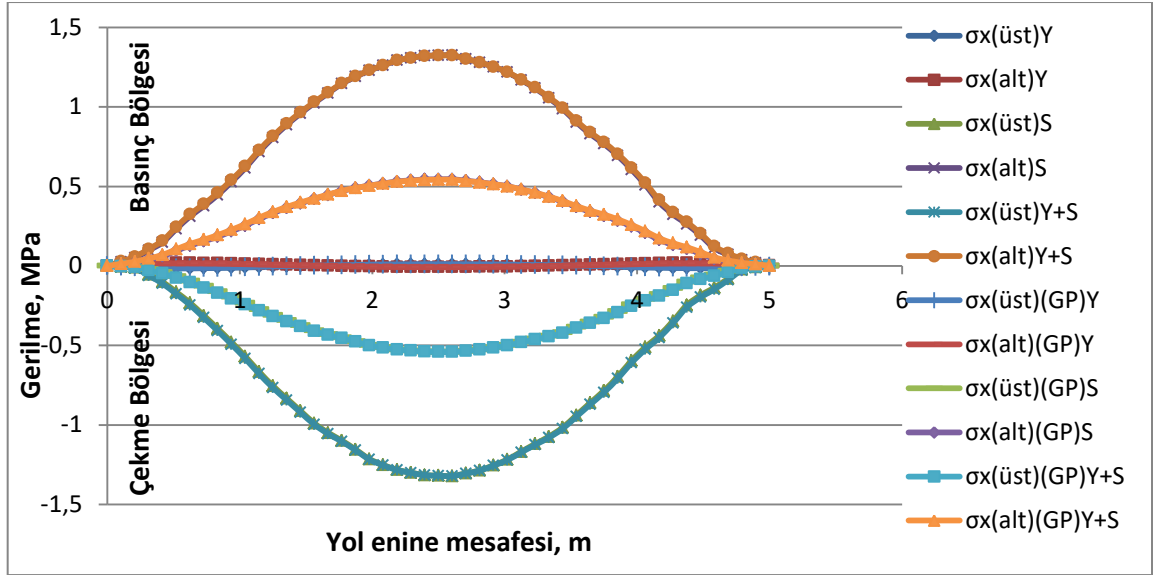
3.10. Kaplamada Derz Olması Halinde

5mx15mx20cm ebatlarındaki kaplamada sıcaklık ve tekerlek yükü varken her 5 m'de bir 0,8 cm genişliğinde derz olması durumunda analiz yapılmıştır. Kaplamada derz derinliğinin (2,5 cm, 5 cm, 7,5 cm ve derzsiz) değişmesiyle birlikte gerilme değerlerinde değişimler oluşmaktadır. Bu analizden elde edilen tüm grafiklerde; Y: Yalnızca yük varken, S: Yalnızca sıcaklık varken, Y+S: Yük ve sıcaklık varken, derz: derz derinliğinin üstünde, GP: İçerisinde %15 oranında genleştirilmiş perlit bulunan hafif beton olması halinde ve GP yazmayan beton ise içerisinde %0 GP (geleneksel beton) bulunan beton anlamlarına gelmektedir.

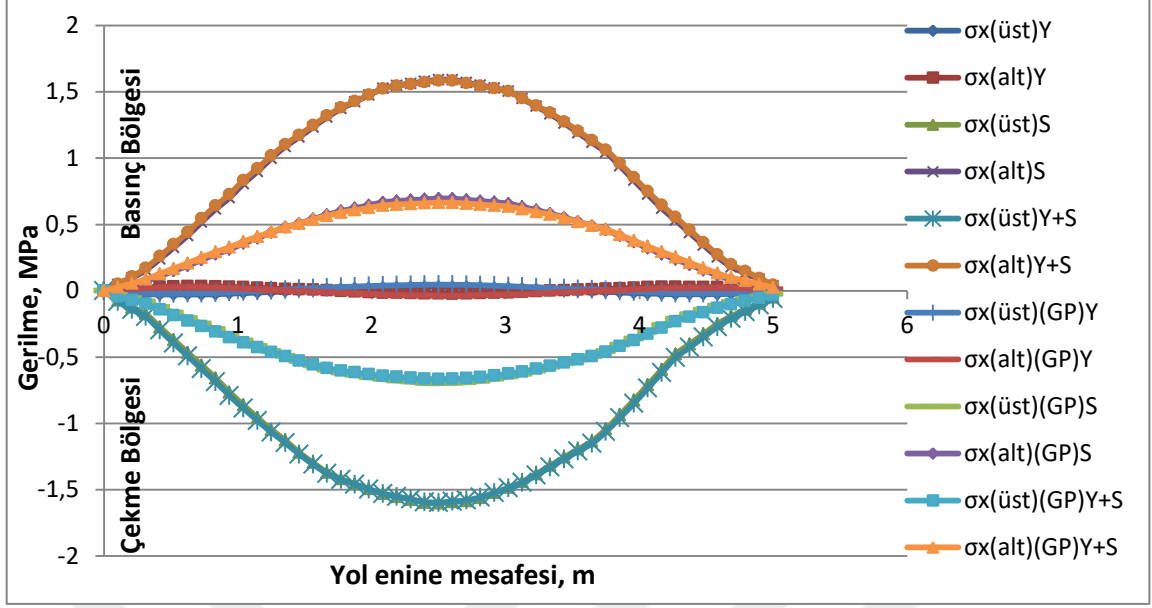
3.10.1. 2,5 cm Derz Derinliği Olan Kaplamadan Elde Edilen Bulgular

A ve B hattında tekerlek yükünden dolayı meydana gelen x doğrultusundaki gerilme değerleri sıfıra yakın olmaktadır. Sıcaklık gradyanı pozitifken (15 °C) x doğrultusunda kenarlarda gerilme değerleri sıfıra çok yakınken yol merkezinde bu değerler

maksimuma çıkmaktadır. A hattında %0 GP içeren beton yolda 1,32 MPa’lık çekme gerilmesi oluşurken %15 GP içeren yolda 0,54 MPa oluşmaktadır. B hattında %0 GP içeren beton yolda 1,6 MPa’lık çekme gerilmesi meydana gelirken bu değer %15 GP içeren yolda 0,67 MPa olmuştur. Bu hatlarda lastik olmadığından etkin olarak sıcaklık gradyanından dolayı gerilmeler oluşmuştur. Sıcaklıktan dolayı oluşan çekme gerilmesi değerleri, %15 GP içeren betonda %0 GP içeren betona göre neredeyse yarısı çıkmıştır. Basınç gerilmesi değerleri, A hattında 1,32 MPa ve B hattında da 1,58 MPa çıkmıştır. Bu değerler kullanılan beton sınıfının basınç dayanımının yanında önemsiz denecek kadar küçüktür (Grafik 3.10.1.1 ve Grafik 3.10.1.2).

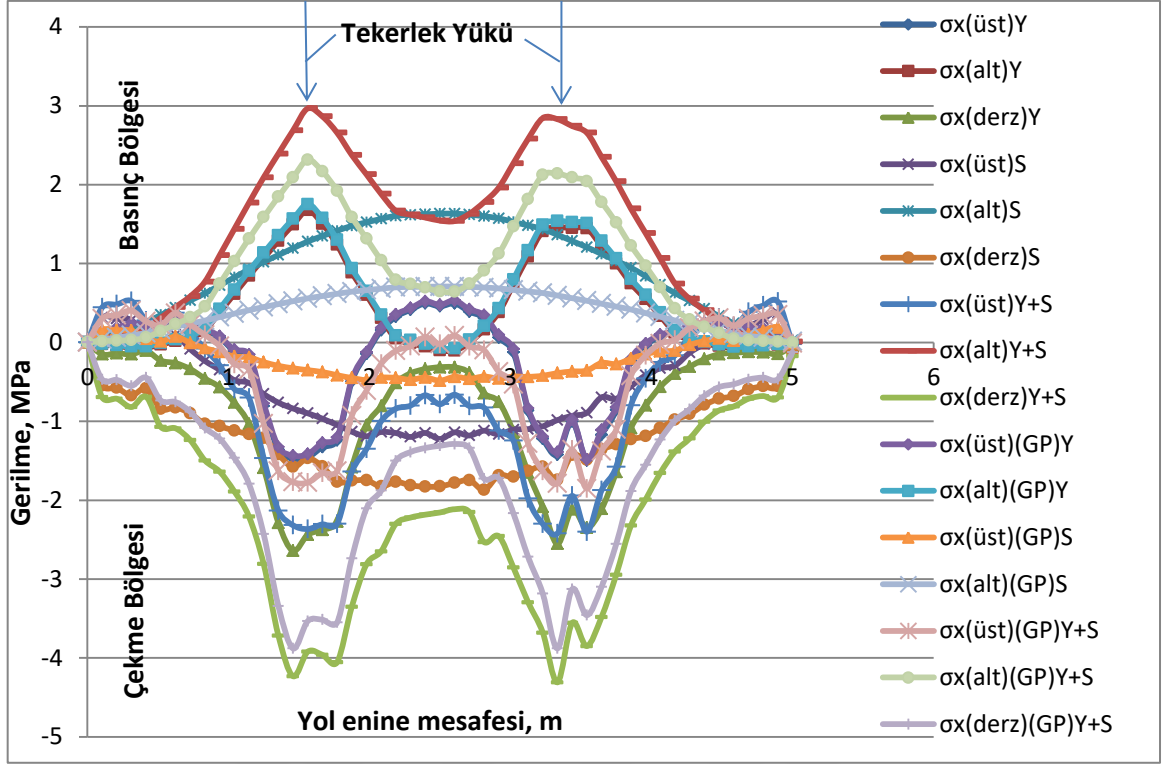


Grafik 3.10.1.1. x doğrultusunda A hattında yol kaplamasında yük, sıcaklık ve ikisi bir arada varken meydana gelen gerilme değerleri (2,5 cm derzli)



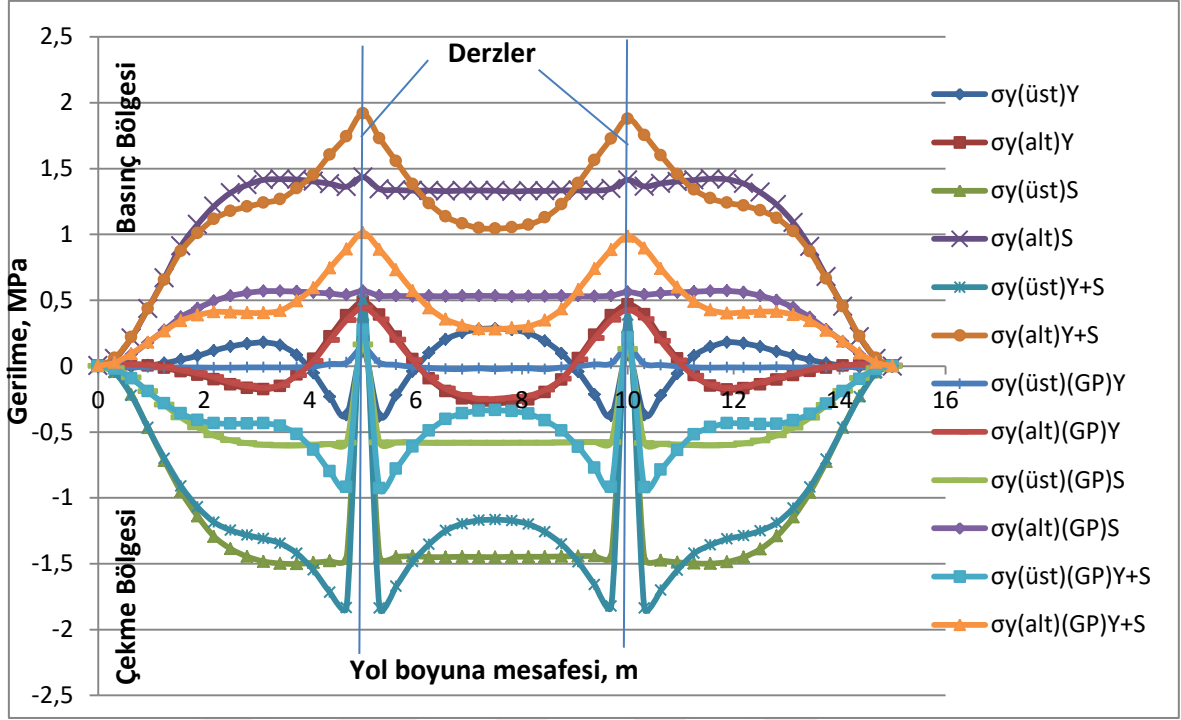
Grafik 3.10.1.2. x doğrultusunda B hattında yol kaplamasında yük, sıcaklık ve ikisi bir arada varken meydana gelen gerilme değerleri (2,5 cm derzli)

C hattı ise x doğrultusundaki en kritik hat olup maksimum çekme gerilmesi lastik altında ve derzin üzerinde (kaplama yüzeyinden 2,5 cm aşağıda) %0 GP içeren beton kaplamada 4,23 MPa olurken %15 GP içeren beton yolda 3,88 MPa değerinde meydana gelmiştir. Derzin üzerinde (derz boşluğunun 1 cm yanı) lastik altında %0 GP içeren betonda 2,42 MPa'lık bir çekme gerilmesi meydana gelirken %15 GP içeren beton kaplamada 1,85 MPa'lık çekme gerilmesi yük ve sıcaklıktan dolayı lastiklerin altında meydana gelmiştir. Meydana gelen basınç gerilmesi (2,97 MPa) değerleri beton kaplama sınıfının basınç mukavemetinin oldukça altındadır (Grafik 3.10.1.3). C hattında maksimum çekme gerilmesi y doğrultusunda meydana gelmektedir. %0 GP içeren kaplamada 11,9 MPa ve %15 GP içeren kaplamada da 9,42 MPa olarak ortaya çıkmaktadır (Resim 3.10.1.1 ve Resim 3.10.1.2).



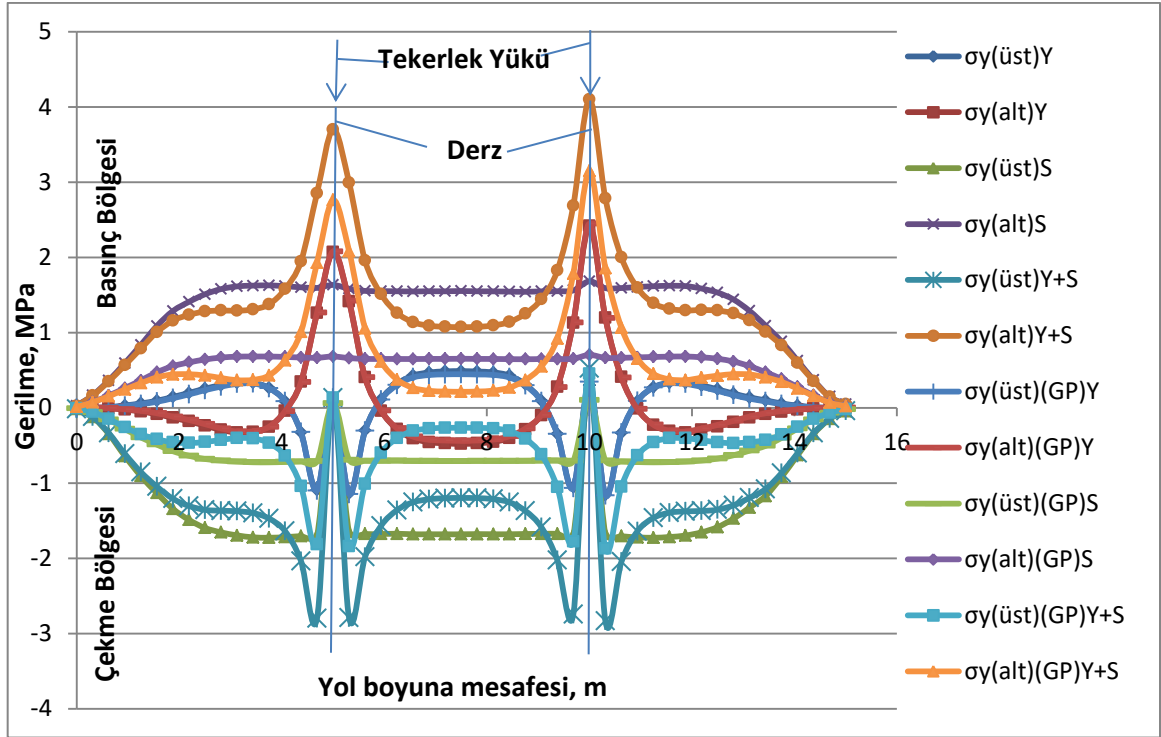
Grafik 3.10.1.3. x doğrultusunda C hattında yol kaplamasında yük, sıcaklık ve ikisi bir arada varken meydana gelen gerilme değerleri (2,5 cm derzli)

D hattında lastik yükünden dolayı y doğrultusunda meydana gelen çekme gerilmesi değerleri, %0 GP ve %15 GP içeren betonlar için 0,2 MPa civarında olup C30/37 (%0 GP içeren şahit beton) ve %15 GP içeren betonun eğilmede çekme dayanımlarına göre oldukça düşüktür. 15 °C pozitif sıcaklık farkı altında %0 GP içeren betonda 1,45 MPa ve %15 GP içeren beton kaplamada ise 0,58 MPa'lık çekme gerilmesi yol kaplama üzerinde oluşmaktadır. Yük ve sıcaklık farkı beraber olması halinde %0 GP içeren betonda 1,84 MPa ve %15 GP içeren beton kaplamada ise 0,92 MPa'lık çekme gerilmesi derz yanında oluşmaktadır. Sıcaklıktan dolayı oluşan çekme gerilmesi değerleri, %15 GP içeren betonda %0 GP içeren betona göre neredeyse yarısı çıkmıştır. Bu değerler betonun eğilmede çekme mukavemetleri yanında oldukça küçük değerlerdir. Meydana gelen basınç gerilmesi değerleri(yaklaşık 2 MPa ve 1 MPa) ise betonun basınç mukavemetinin oldukça altındadır (Grafik 3.10.1.4).

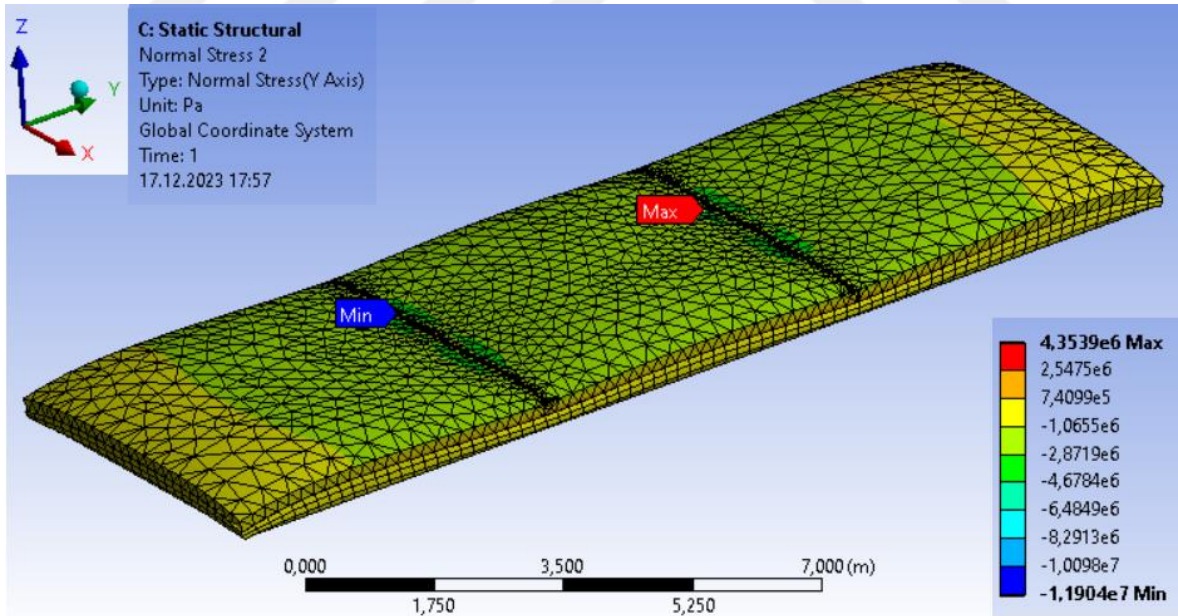


Grafik 3.10.1.4. y doğrultusunda D hattında yol kaplamasında yük, sıcaklık ve ikisi bir arada varken meydana gelen gerilme değerleri (2,5 cm derzli)

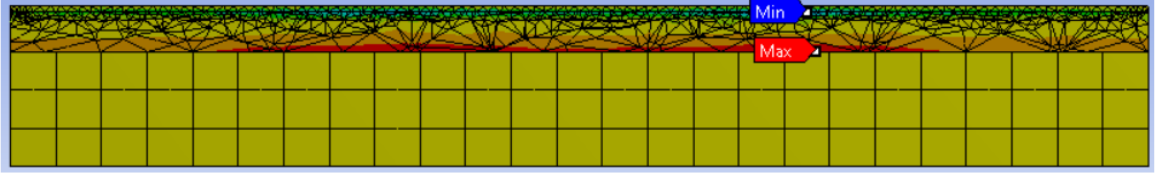
E hattında ise 15°C sıcaklık farkı ve 0,8 MPa tekerlek yükü varken %0 GP içeren kaplamada y doğrultusunda 2,83 MPa'lık çekme gerilmesi oluşurken, %15 GP içeren beton kaplamada bu değer 1,78 MPa'a düşmektedir. Meydana gelen basınç gerilmeleri (yaklaşık 4 MPa ve 3 MPa) beton basınç mukavemetlerinin oldukça altındadır (Grafik 3.10.1.5).



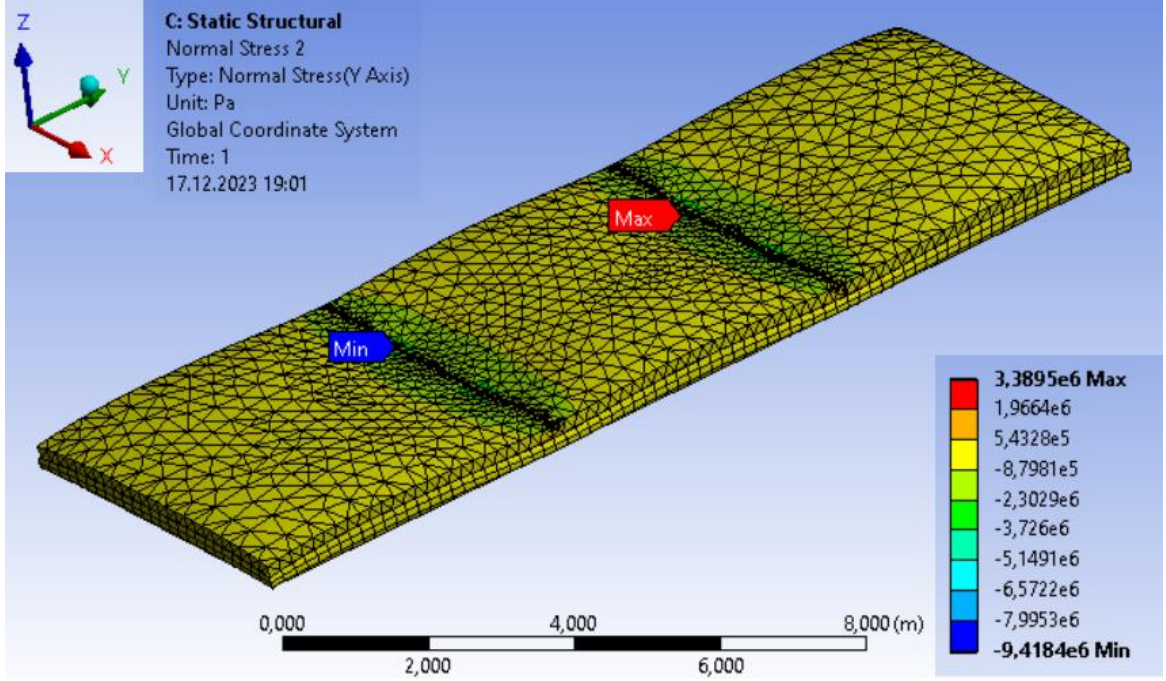
Grafik 3.10.1.5. y doğrultusunda E hattında yol kaplamasında yük, sıcaklık ve ikisi bir arada varken meydana gelen gerilme değerleri (2,5 cm derzli)



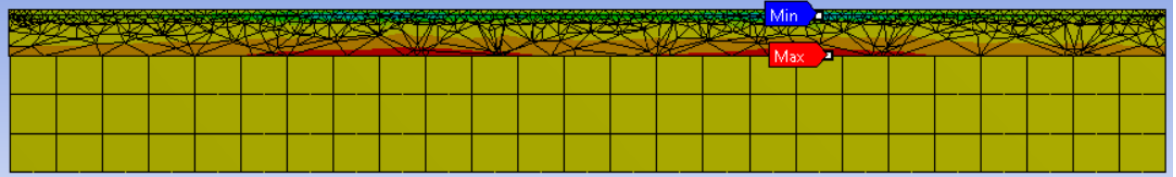
Resim 3.10.1.1a. 2,5 cm derz derinliğiyle yapılmış %0 GP içeren beton yol kaplamasında y doğrultusunda derz içerisinde 11,9 MPa'lık çekme gerilmesi meydana gelmektedir.



Resim 3.10.1.1b. 2,5 cm derz derinliğiyle yapılmış %0 GP içeren beton yol kaplamasında y doğrultusunda derz içerisinde 11,9 MPa’lık çekme gerilmesi meydana gelmektedir.



Resim 3.10.1.2a. 2,5 cm derz derinliğiyle yapılmış %15 GP içeren beton yol kaplamasında y doğrultusunda derz içerisinde 9,42 MPa’lık çekme gerilmesi meydana gelmektedir.



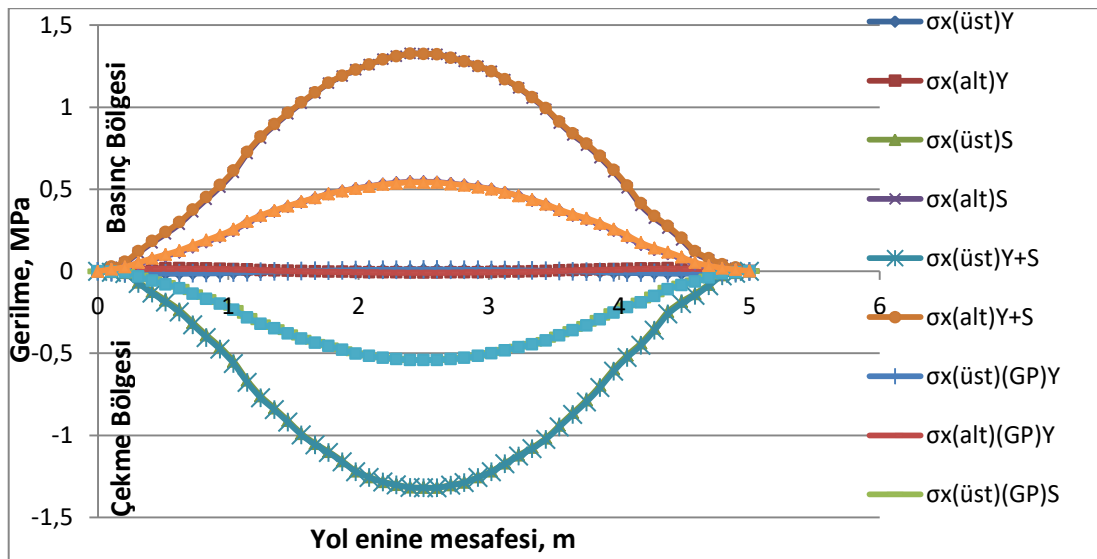
Resim 3.10.1.2b. 2,5 cm derz derinliğiyle yapılmış %15 GP içeren beton yol kaplamasında y doğrultusunda derz içerisinde 9,42 MPa’lık çekme gerilmesi meydana gelmektedir.

Resim 3.10.1.1a, Resim 3.10.1.1b, Resim 3.10.1.2a ve Resim 3.10.1.2b’den görüldüğü gibi maksimum çekme gerilmesi değerleri derz içerisinde y doğrultusunda meydana gelmektedir. Yüksek değerlerden dolayı derz kesildikten sonra derz çatlayarak yolun altına kadar inmektedir.

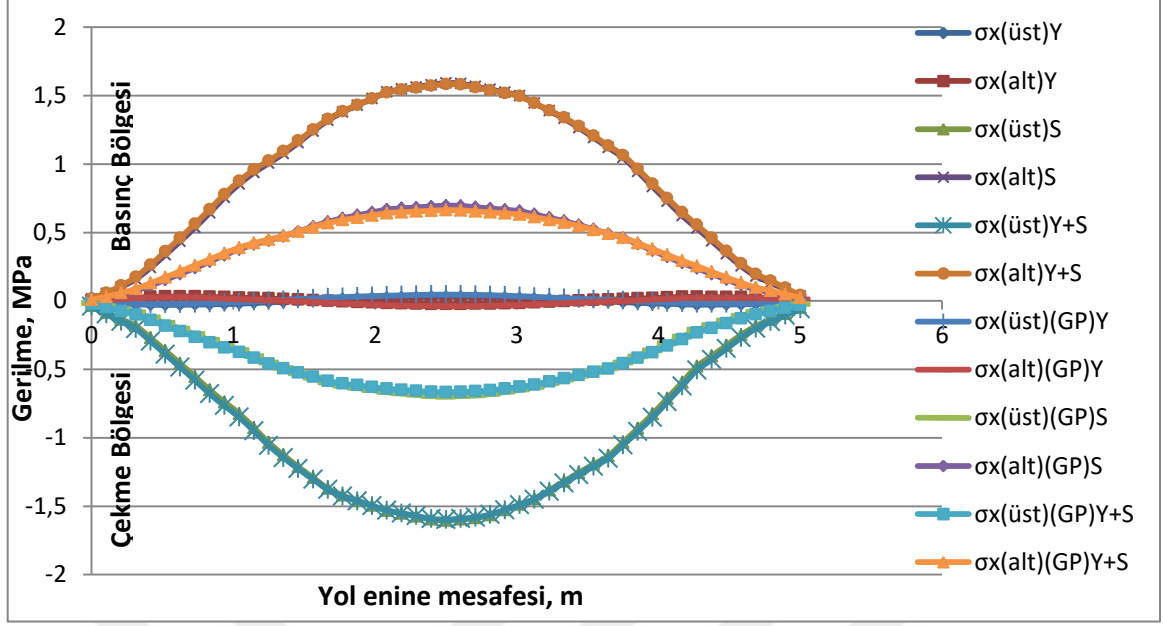
%0 GP kullanılan beton yol kaplamasına göre %15 GP kullanılan kaplamada yol doğrultusunda %21 oranında çekme gerilmesi azalmış olmasına rağmen oluşan çekme gerilmesi, %0 GP ve %15 GP içeren betonun eğilmede çekme dayanımlarına göre çok yüksek değerlerde olduğundan kaplamanın deforme olmasına neden olmaktadır.

3.10.2. 5,0 cm Derz Derinliği Olan Kaplamadan Elde Edilen Bulgular

A ve B hattında tekerlek yükünden dolayı meydana gelen x doğrultusundaki gerilme değerleri sıfıra yakın olmaktadır. Sıcaklık gradyanı varken (15°C) x doğrultusunda kenarlarda gerilme değerleri sıfıra çok yakınken yol merkezinde bu değerler maksimuma çıkmaktadır. A hattında %0 GP içeren beton yolda 1,32 MPa'lık çekme gerilmesi oluşurken %15 GP içeren yolda 0,54 MPa oluşmaktadır. B hattında %0 GP içeren beton yolda 1,6 MPa'lık çekme gerilmesi meydana gelirken bu değer %15 GP içeren yolda 0,67 MPa olmuştur. Bu hatlarda lastik olmadığından etkin olarak sıcaklık gradyanından dolayı gerilmeler oluşmuştur. Sıcaklıktan dolayı oluşan çekme gerilmesi değerleri, %15 GP içeren betonda %0 GP içeren betona göre neredeyse yarısı çıkmıştır. Basınç gerilmesi değerleri (1,5 MPa ile 0,75 MPa civarı) de kullanılan beton sınıfının basınç dayanımının (37 MPa ve 23,15 MPa küp numune) yanında önemsiz değerler almıştır (Grafik 3.10.2.1 ve Grafik 3.10.2.2).

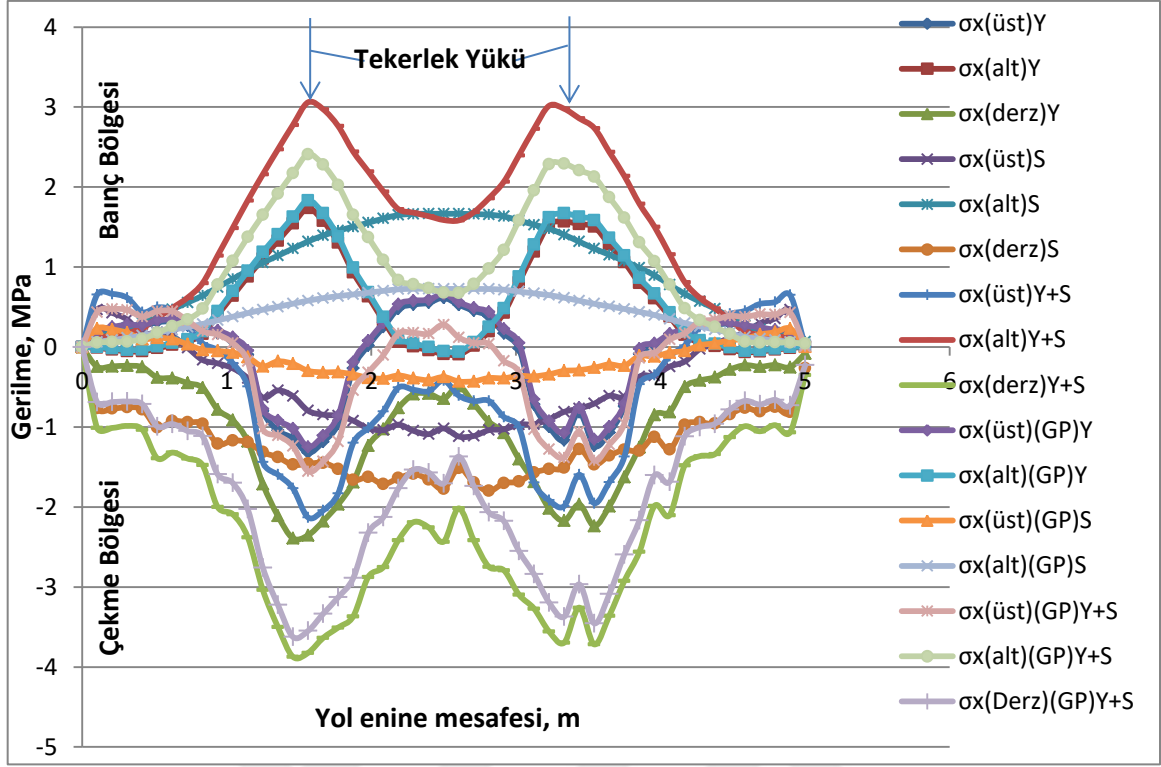


Grafik 3.10.2.1. x doğrultusunda A hattında yol kaplamasında yük, sıcaklık ve ikisi bir arada varken meydana gelen gerilme değerleri (5 cm derzli)



Grafik 3.10.2.2. x doğrultusunda B hattında yol kaplamasında yük, sıcaklık ve ikisi bir arada varken meydana gelen gerilme değerleri (5 cm derzli)

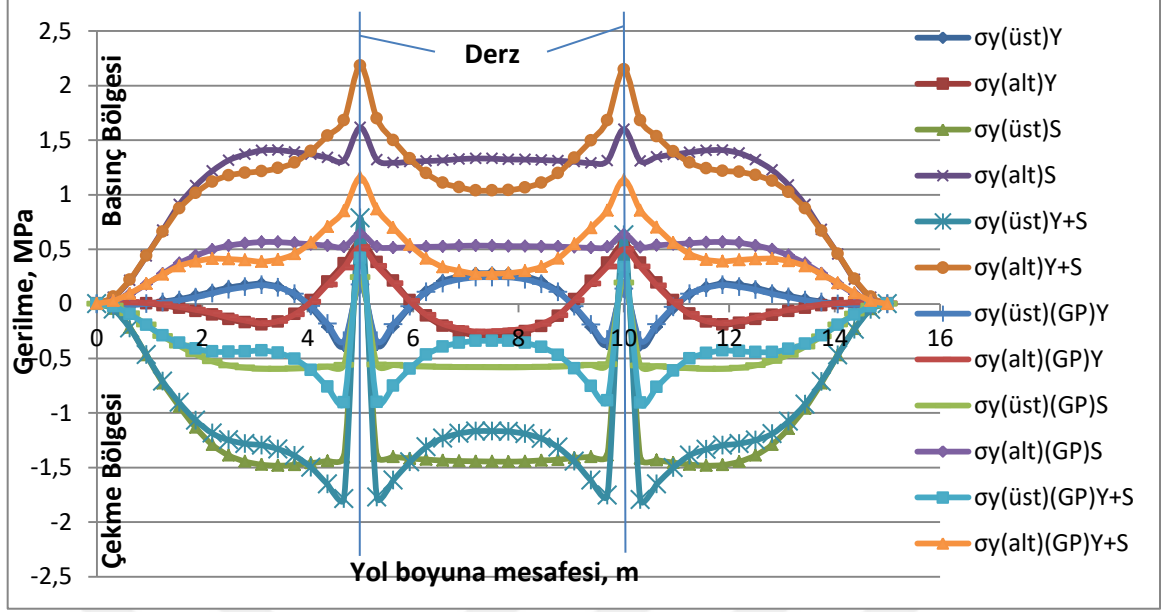
C hattı ise x doğrultusundaki en kritik hat olup maksimum çekme gerilmesi lastik altında %0 GP içeren beton kaplamada 3,87 MPa olurken %15 GP içeren beton yolda 3,62 MPa değerinde derzin üzerinde(kaplama yüzeyinden 5 cm aşağıda) meydana gelmiştir. Derzin üzerinde (derzin 1 cm solunda) lastik altında %0 GP içeren betonda 2,13 MPa'lık bir çekme gerilmesi meydana gelirken %15 GP içeren beton kaplamada 1,55 MPa'lık çekme gerilmesi yük ve sıcaklıktan dolayı lastiklerin altında meydana gelmiştir. Meydana gelen basınç gerilmesi değerleri (3 MPa ve 2,5 MPa civarı) beton kaplama sınıfının basınç mukavemetinin oldukça altındadır (Grafik 3.10.2.3). C hattında maksimum çekme gerilmesi y doğrultusunda meydana gelmektedir. %0 GP içeren kaplamada 11,9 MPa ve %15 GP içeren kaplamada da 9,27 MPa olarak ortaya çıkmaktadır (Resim 3.10.2.1a, Resim 3.10.2.1b, Resim 3.10.2.2a ve Resim 3.10.2.2b). Yüksek değerlerden dolayı derz kesiminden sonra çatlak, derz bölgesinden aşağıya doğru devam ederek yolun altına kadar inmektedir.



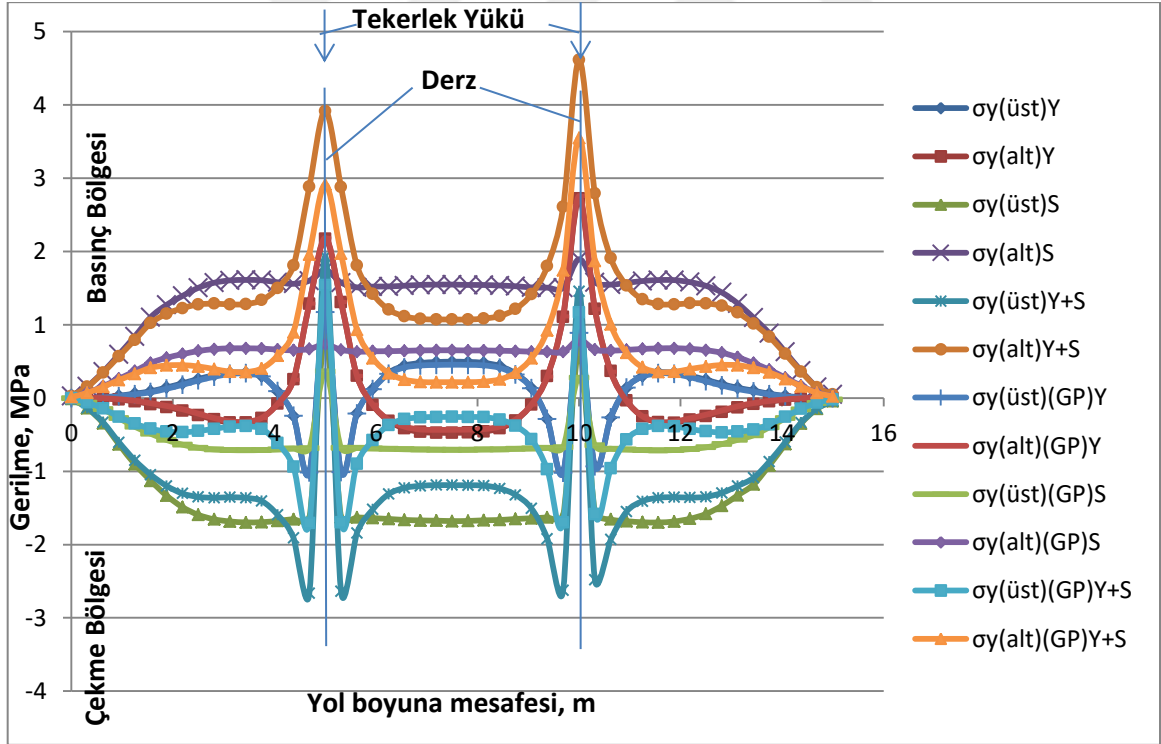
Grafik 3.10.2.3. x doğrultusunda C hattında yol kaplamasında yük, sıcaklık ve ikisi bir arada varken meydana gelen gerilme değerleri (5 cm derzli)

D hattında lastik yükünden dolayı y doğrultusunda meydana gelen çekme gerilmesi değerleri her iki beton için 0,2 MPa civarında olup oldukça düşüktür. Sıcaklık gradyanı altında %0 GP içeren betonda 1,45 MPa ve %15 GP içeren beton kaplamada ise 0,58 MPa'lık çekme gerilmesi yol kaplama üzerinde oluşmaktadır. Hem yük hem de sıcaklık gradyanı olması halinde %0 GP içeren betonda 1,9 MPa ve %15 GP içeren beton kaplamada ise 0,91 MPa'lık çekme gerilmesi derz yanında oluşmaktadır. Meydana gelen basınç gerilmesi değerleri (2,5 MPa ve 1,6 MPa civarı) ise betonun basınç mukavemetinin oldukça altındadır (Grafik 3.10.2.4).

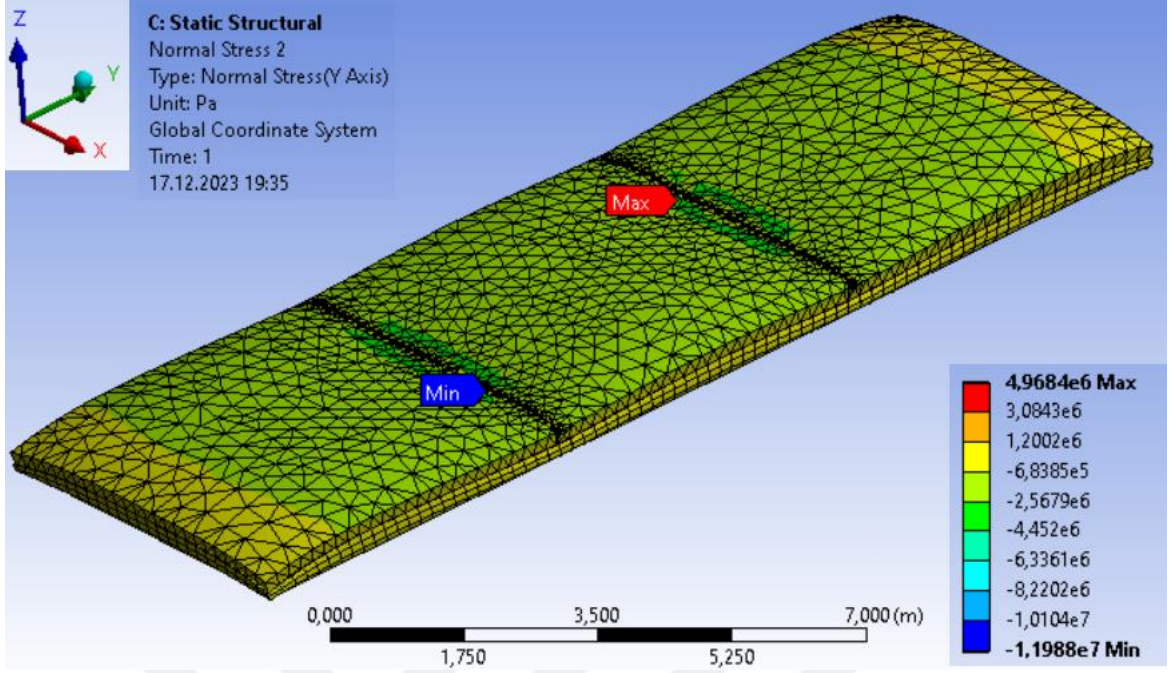
E hattında sıcaklık gradyanı ve lastik yükü varken %0 GP içeren kaplamada y doğrultusunda 2,64 MPa'lık çekme gerilmesi oluşurken, %15 GP içeren beton kaplamada bu değer 1,7 MPa'a düşmektedir. Meydana gelen basınç gerilmeleri (4,5 MPa ve 3,5 MPa civarı) beton basınç mukavemetlerinin oldukça altındadır (Grafik 3.10.2.5).



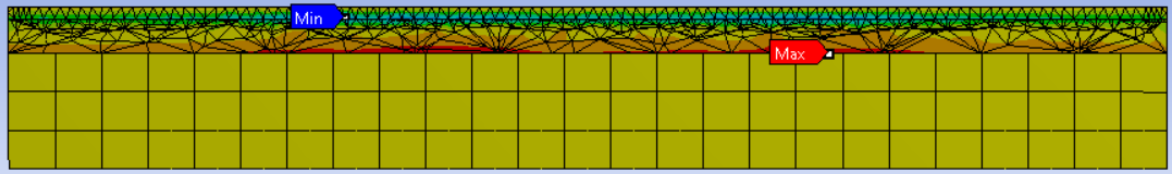
Grafik 3.10.2.4. y doğrultusunda D hattında yol kaplamasında yük, sıcaklık ve ikisi bir arada varken meydana gelen gerilme değerleri (5 cm derzli)



Grafik 3.10.2.5. y doğrultusunda E hattında yol kaplamasında yük, sıcaklık ve ikisi bir arada varken meydana gelen gerilme değerleri (5 cm derzli)

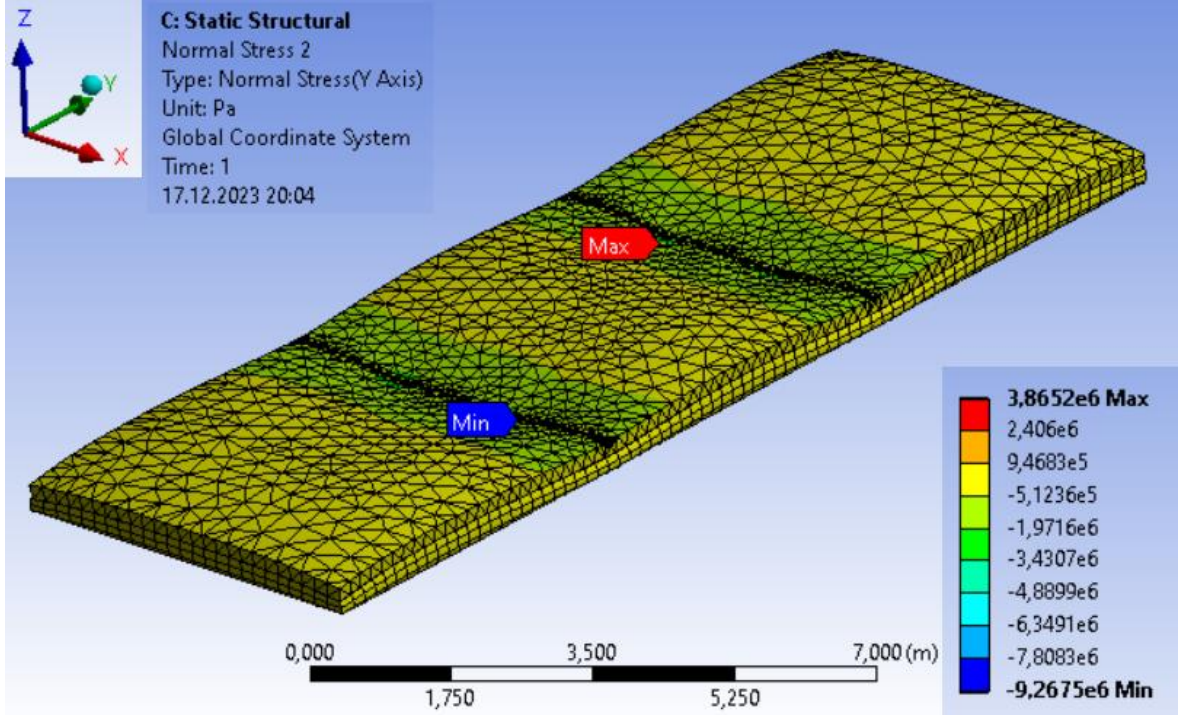


Resim 3.10.2.1a. 5 cm derz derinliğiyle yapılmış %0 GP içeren beton yol kaplamasında y doğrultusunda derz içerisinde 11,9 MPa’lık çekme gerilmesi meydana gelmektedir.

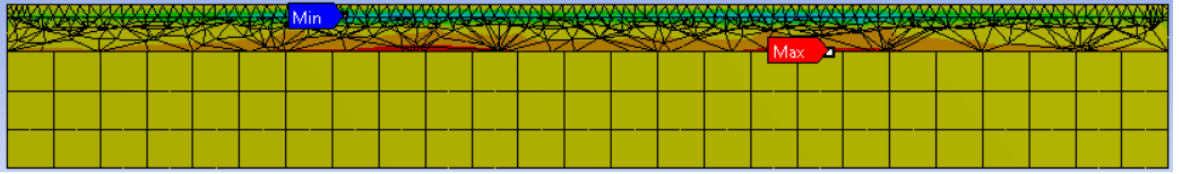


Resim 3.10.2.1b. 5 cm derz derinliğiyle yapılmış %0 GP içeren beton yol kaplamasında y doğrultusunda derz içerisinde 11,9 MPa’lık çekme gerilmesi meydana gelmektedir.

%0 GP kullanılan beton yol kaplamasına göre %15 GP kullanılan kaplamada yol doğrultusunda (y doğrultusu) %22 oranında çekme gerilmesi azalmış olmasına rağmen oluşan çekme gerilmesi, %0 GP ve %15 GP içeren betonun eğilmede çekme mukavemetine göre çok yüksek değerde olduğundan kaplamanın deforme olmasına neden olmaktadır.



Resim 3.10.2.2a. 5 cm derz derinliğiyle yapılmış %15 GP içeren beton yol kaplamasında y doğrultusunda derz içerisinde 9,27 MPa’lık çekme gerilmesi meydana gelmektedir.

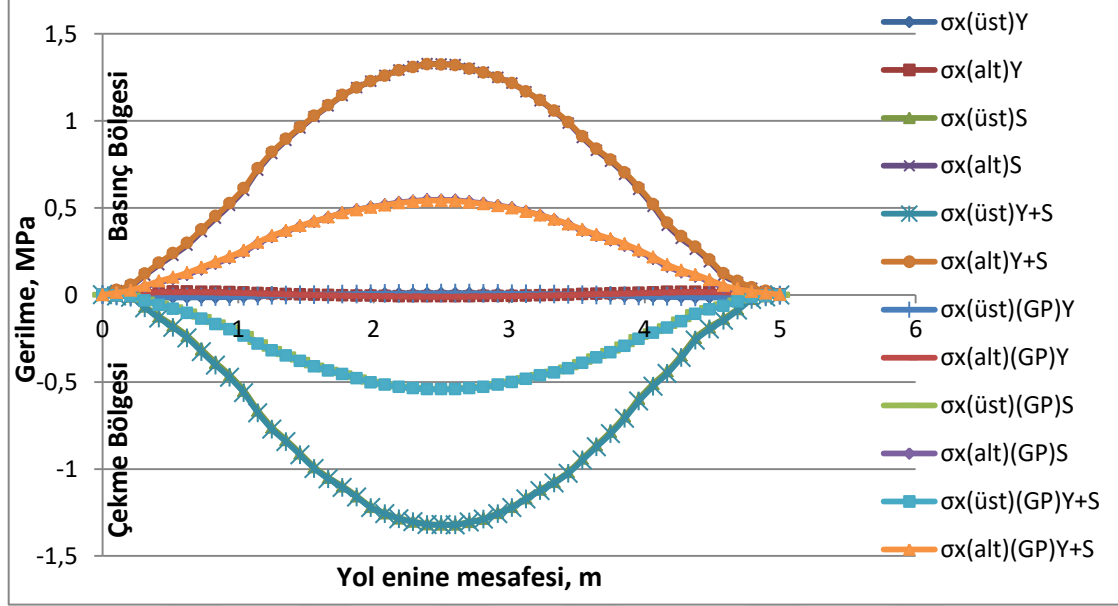


Resim 3.10.2.2b. 5 cm derz derinliğiyle yapılmış %15 GP içeren beton yol kaplamasında y doğrultusunda derz içerisinde 9,27 MPa’lık çekme gerilmesi meydana gelmektedir.

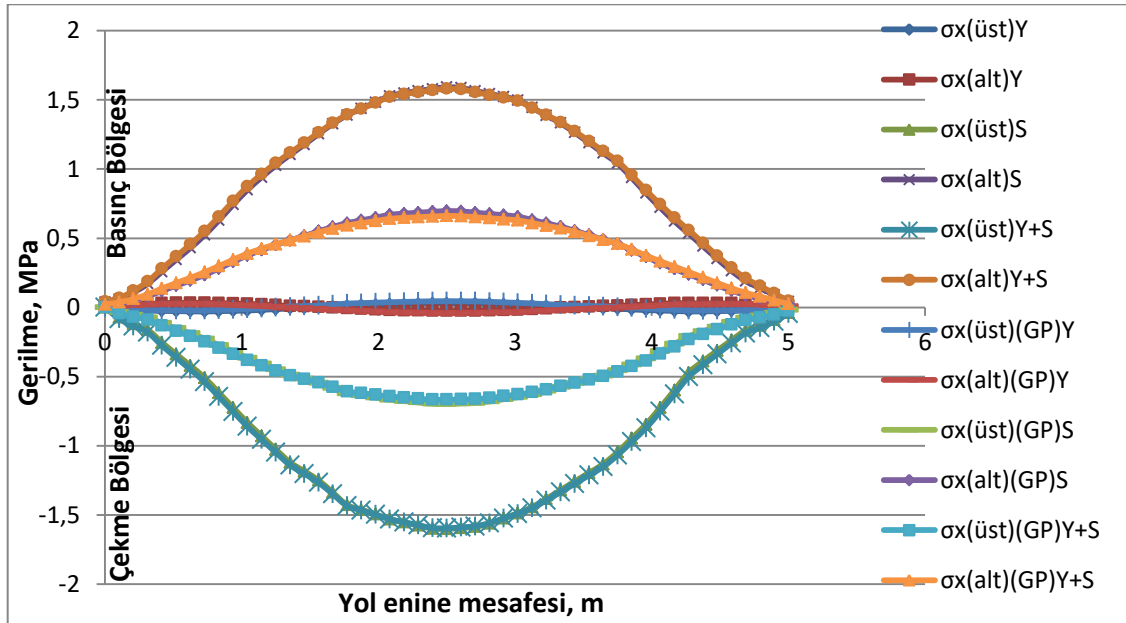
3.10.3. 7,5 cm Derz Derinliği Olan Kaplamadan Elde Edilen Bulgular

A ve B hattında tekerlek yükünden dolayı meydana gelen x doğrultusundaki gerilme değerleri sıfıra yakın olmaktadır. Sıcaklık farkı varken (15°C) x doğrultusunda kenarlarda gerilme değerleri sıfıra çok yakınken yol merkezinde bu değerler maksimuma çıkmaktadır. A hattında %0 GP içeren beton yolda 1,32 MPa’lık çekme gerilmesi oluşurken %15 GP içeren yolda 0,54 MPa oluşmaktadır. B hattında %0 GP içeren beton yolda 1,6 MPa’lık çekme gerilmesi meydana gelirken bu değer %15 GP içeren yolda 0,67 MPa olmuştur. Bu hatlarda lastik olmadığından etkin olarak sıcaklık farkından dolayı

gerilmeler oluşmuştur. Sıcaklıktan dolayı oluşan çekme gerilmesi değerleri, %15 GP içeren betonda %0 GP içeren betona göre neredeyse yarısı çıkmıştır. Basınç gerilmesi değeri de %0 GP kullanılan kaplamada 1,5 MPa civarında çıkmış olup kullanılan beton sınıfının basınç dayanımının yanında önemsizdir (Grafik 3.10.3.1 ve Grafik 3.10.3.2).

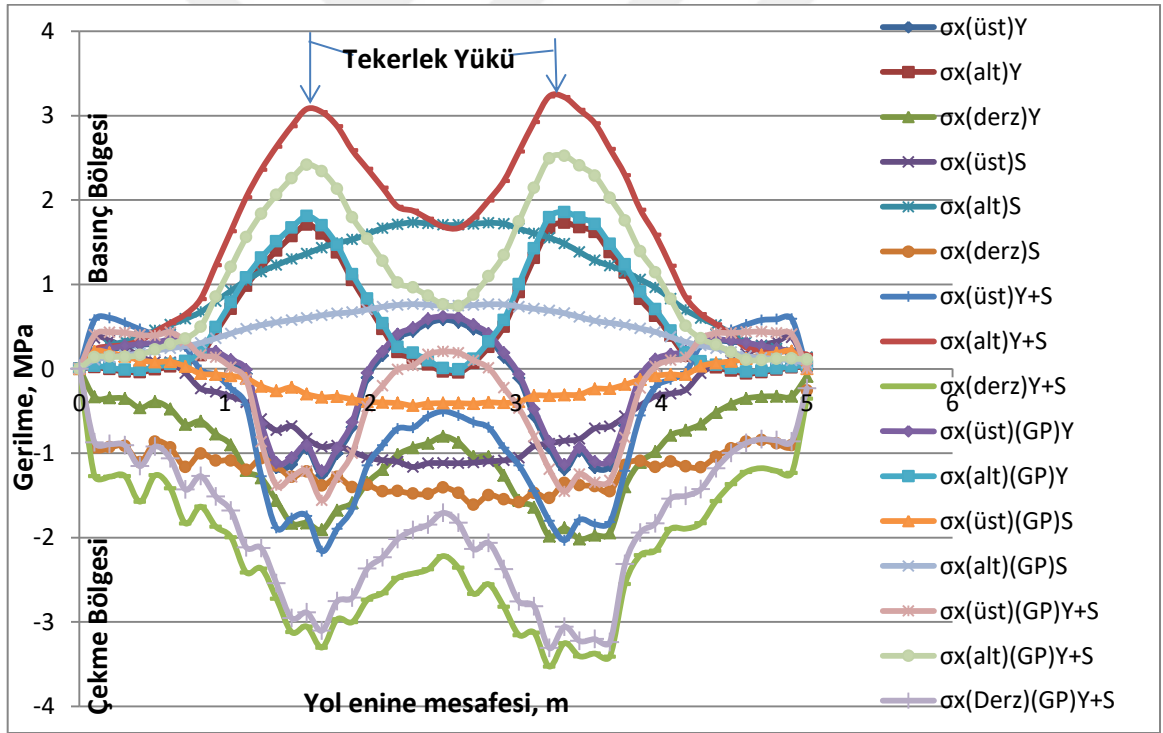


Grafik 3.10.3.1. x doğrultusunda A hattında yol kaplamasında yük, sıcaklık ve ikisi bir arada varken meydana gelen gerilme değerleri (7,5 cm derzli)



Grafik 3.10.3.2. x doğrultusunda B hattında yol kaplamasında yük, sıcaklık ve ikisi bir arada varken meydana gelen gerilme değerleri (7,5 cm derzli)

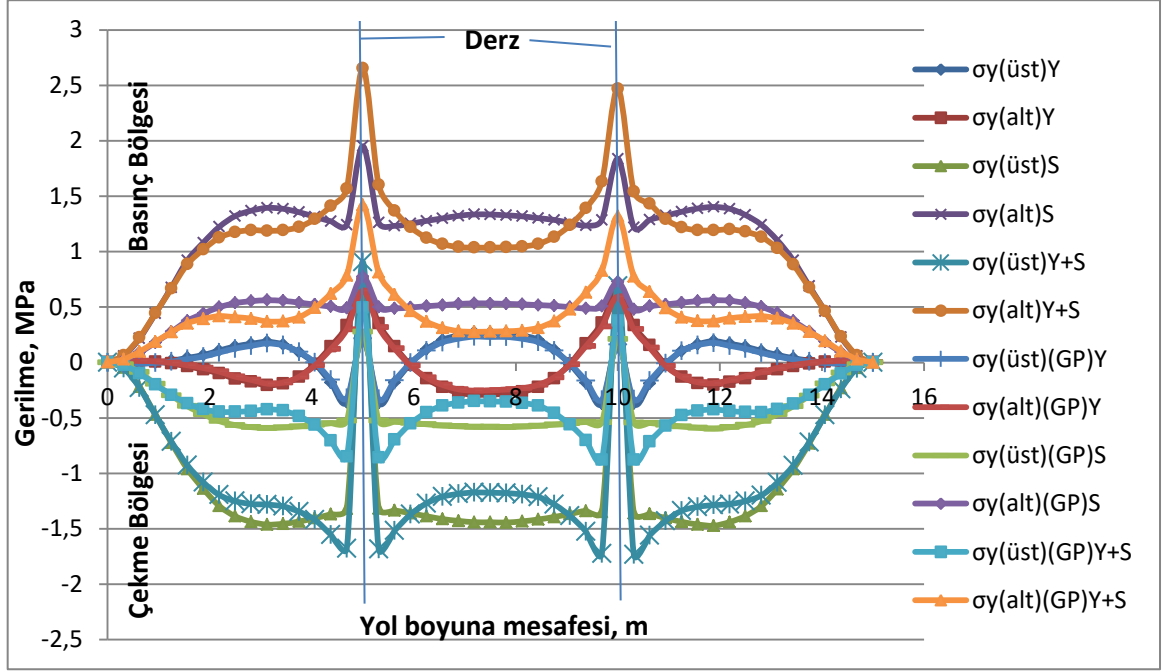
C hattı ise x doğrultusundaki en kritik hat olup maksimum çekme gerilmesi lastik altında %0 GP içeren beton kaplamada 3,53 MPa olurken %15 GP içeren beton yolda 3,31 MPa değerinde derzin üzerinde(kaplama yüzeyinden 7,5 cm aşağıda) meydana gelmiştir. Derzin üzerinde lastik altında %0 GP içeren betonda 2,16 MPa’lık bir çekme gerilmesi meydana gelirken %15 GP içeren beton kaplamada 1,56 MPa’lık çekme gerilmesi yük ve sıcaklıktan dolayı lastiklerin altında meydana gelmiştir. Meydana gelen basınç gerilmesi değerleri (3 MPa ve 2,4 MPa civarı) beton kaplama sınıfının basınç mukavemetinin oldukça altındadır (Grafik 3.10.3.3). C hattında maksimum çekme gerilmesi y doğrultusunda meydana gelmektedir. %0 GP içeren kaplamada 12,6 MPa ve %15 GP içeren kaplamada da 9,56 MPa olarak ortaya çıkmaktadır (Resim 3.10.3.1a, Resim 3.10.3.1b, Resim 3.10.3.2a ve Resim 3.10.3.2b). Yüksek değerlerden dolayı yol kaplaması, derz kesildikten sonra derzden aşağıya doğru çatlamaktadır.



Grafik 3.10.3.3. x doğrultusunda C hattında yol kaplamasında yük, sıcaklık ve ikisi bir arada varken meydana gelen gerilme değerleri (7,5 cm derzli)

D hattında lastik yükünden dolayı y doğrultusunda meydana gelen çekme gerilmesi değerleri her iki beton için 0,35 MPa civarında olup oldukça düşüktür. Sıcaklık farkı altında %0 GP içeren betonda 1,44 MPa ve %15 GP içeren beton kaplamada ise 0,58

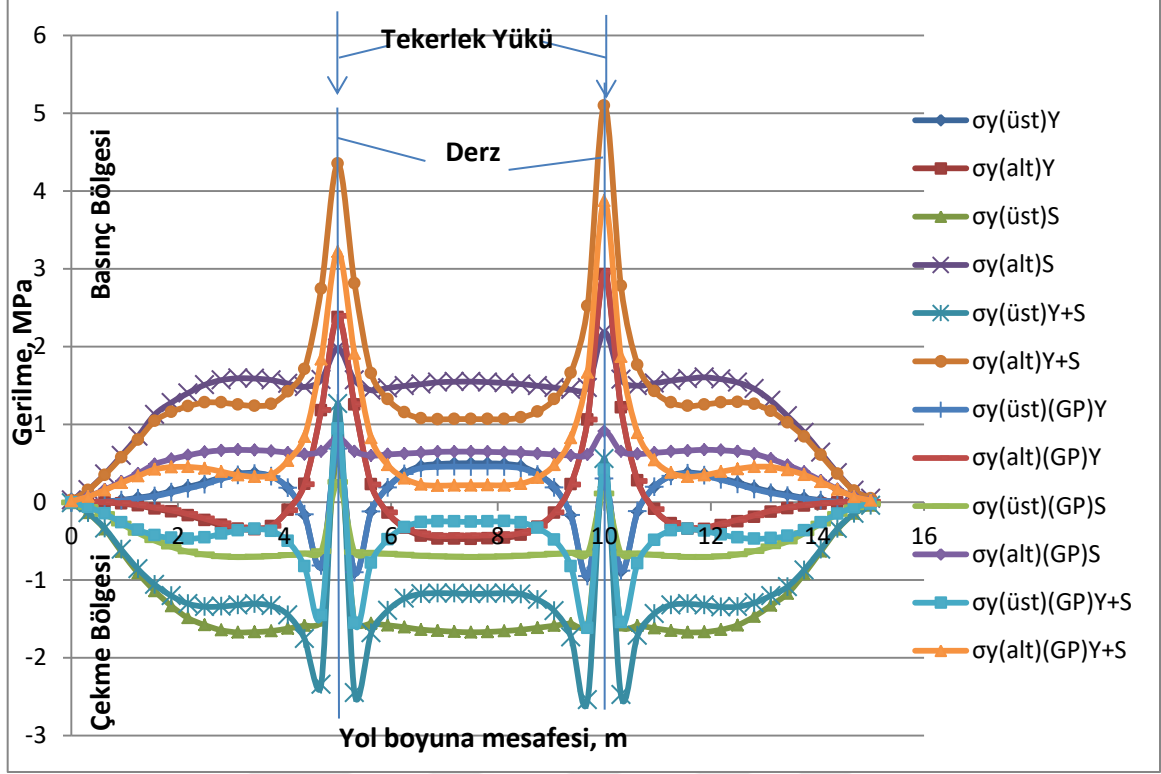
MPa'lık çekme gerilmesi yol kaplama üzerinde oluşmaktadır. Hem yük hem de sıcaklık gradyanı olması halinde %0 GP içeren betonda 1,68 MPa ve %15 GP içeren beton kaplamada ise 0,86 MPa'lık çekme gerilmesi derz yanında oluşmaktadır. Meydana gelen basınç gerilmesi değerleri ise betonun basınç mukavemetinin oldukça altındadır (Grafik 3.10.3.4).



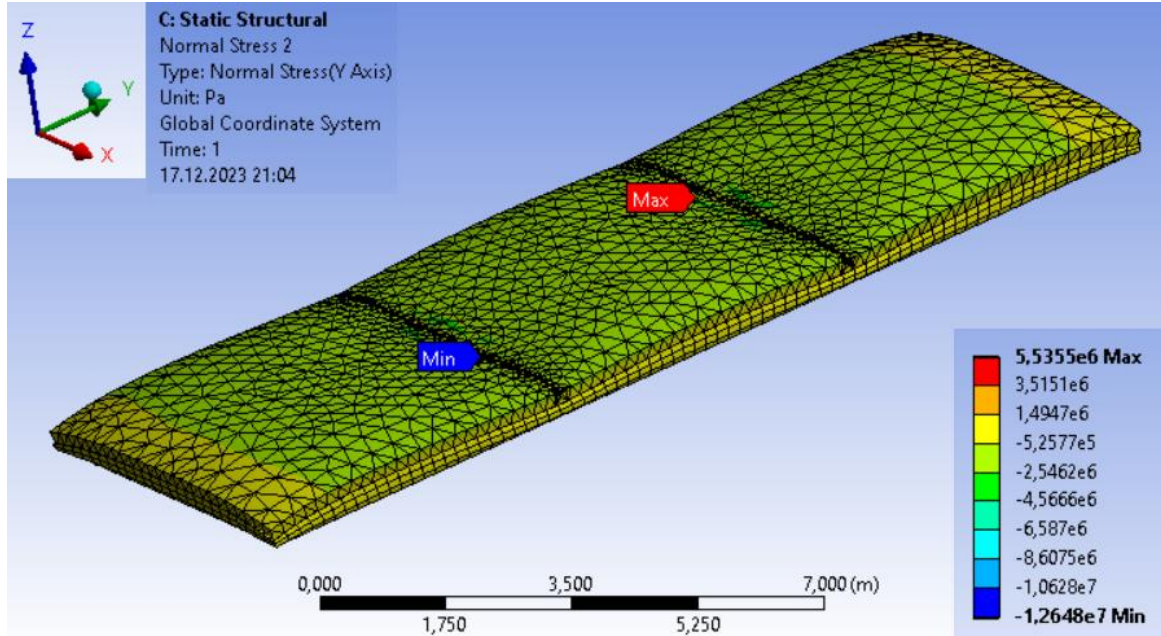
Grafik 3.10.3.4. y doğrultusunda D hattında yol kaplamasında yük, sıcaklık ve ikisi bir arada varken meydana gelen gerilme değerleri (7,5 cm derzli)

E hattında ise hem sıcaklık gradyanı hem de lastik yükü varken %0 GP içeren kaplamada y doğrultusunda 2,45 MPa'lık çekme gerilmesi oluşurken, %15 GP içeren beton kaplamada bu değer 1,55 MPa'a düşmektedir. Meydana gelen basınç gerilmesi değerleri (3,8 MPa ve 5,1 MPa civarında) beton basınç mukavemetlerinin oldukça altındadır (Grafik 3.10.3.5).

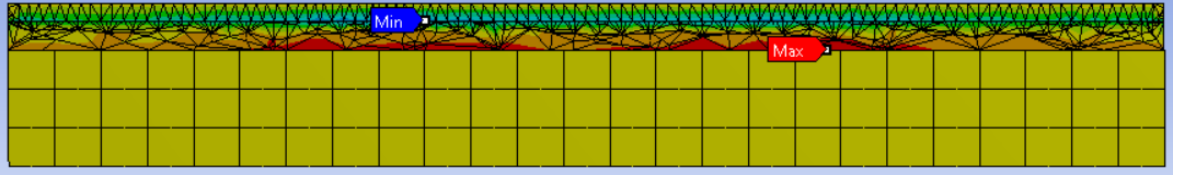
%0 GP kullanılan beton yol kaplamasına göre %15 GP kullanılan kaplamada yol doğrultusunda %24 oranında çekme gerilmesi azalmış olmasına rağmen oluşan çekme gerilmesi, %0 GP ve %15 GP içeren betonun eğilmede çekme dayanımına göre çok yüksek değerde olduğundan kaplamanın deforme olmasına neden olmaktadır.



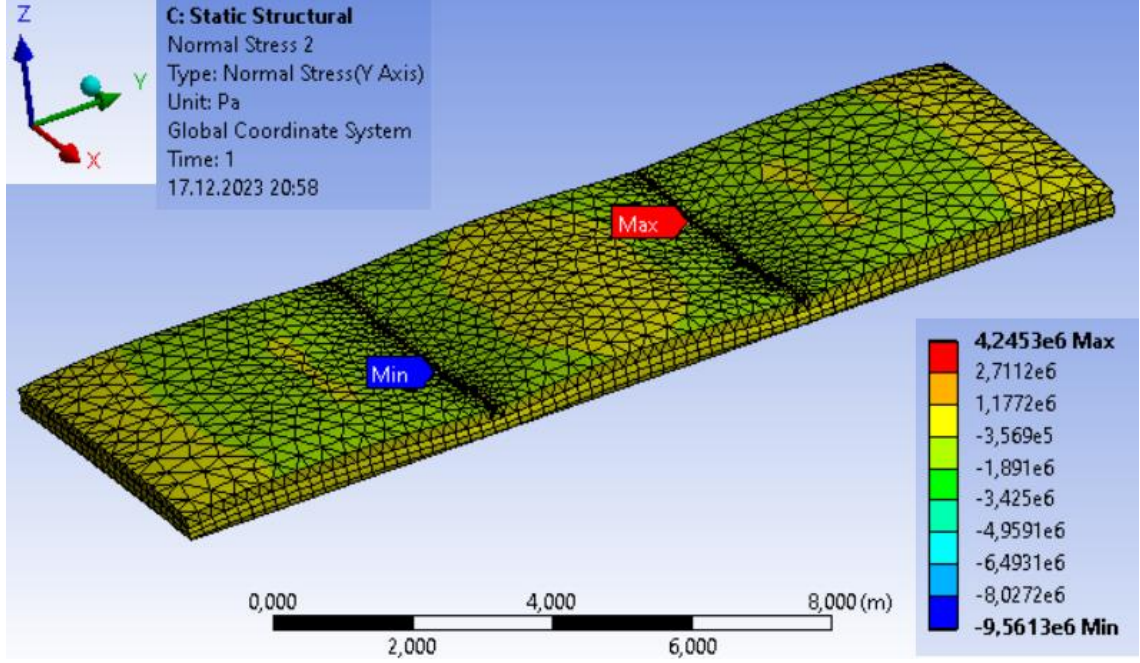
Grafik 3.10.3.5. y doğrultusunda E hattında yol kaplamasında yük, sıcaklık ve ikisi bir arada varken meydana gelen gerilme değerleri (7,5 cm derzli)



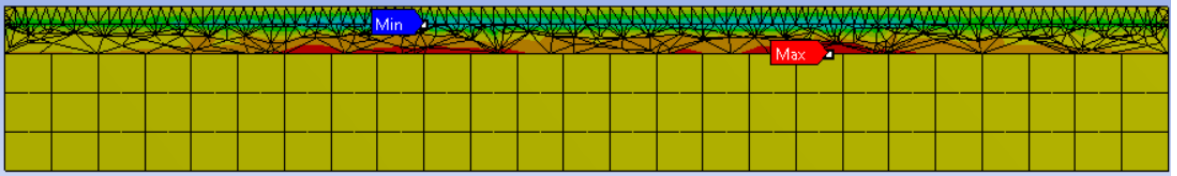
Resim 3.10.3.1a. 7,5 cm derz derinliğiyle yapılmış %0 GP içeren beton yol kaplamasında y doğrultusunda derz içerisinde 12,6 MPa'lık çekme gerilmesi meydana gelmektedir.



Resim 3.10.3.1b. 7,5 cm derz derinliğiyle yapılmış %0 GP içeren beton yol kaplamasında y doğrultusunda derz içerisinde 12,6 MPa'lık çekme gerilmesi meydana gelmektedir.



Resim 3.10.3.2a. 7,5 cm derz derinliğiyle yapılmış %15 GP içeren beton yol kaplamasında y doğrultusunda derz içerisinde 9,56 MPa'lık çekme gerilmesi meydana gelmektedir.

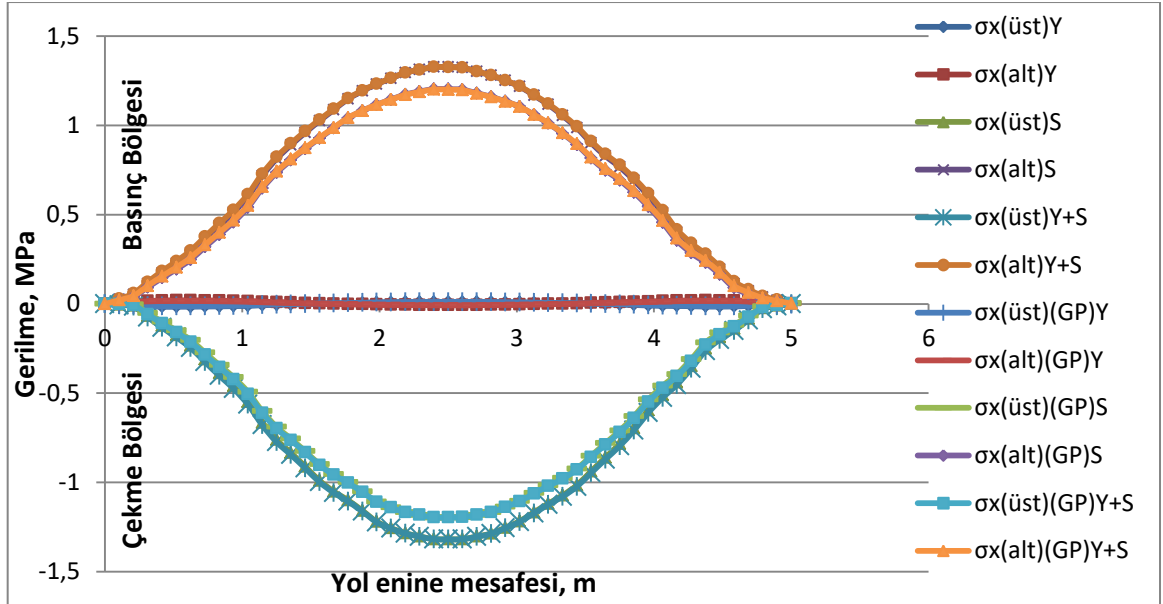


Resim 3.10.3.2b. 7,5 cm derz derinliğiyle yapılmış %15 GP içeren beton yol kaplamasında y doğrultusunda derz içerisinde 9,56 MPa'lık çekme gerilmesi meydana gelmektedir.

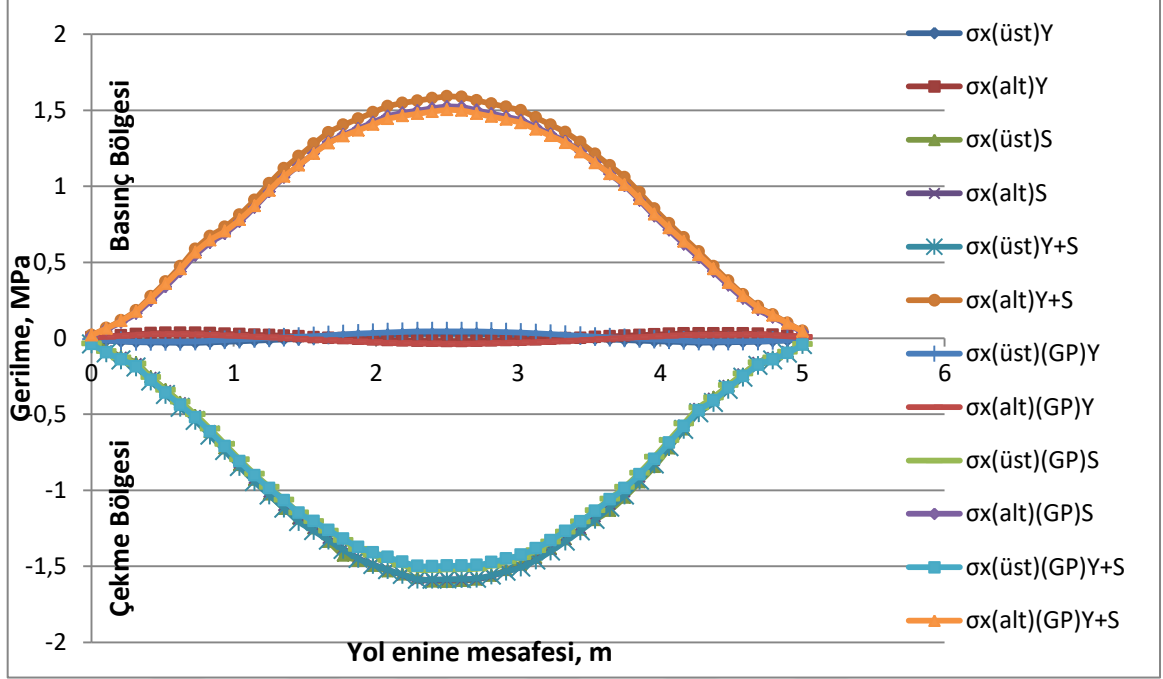
3.10.4. Derzsiz (0 cm derz) Beton Yol Kaplamasından Elde Edilen Bulgular

A ve B hattında tekerlek yükünden dolayı meydana gelen x doğrultusundaki gerilme değerleri sıfıra yakın olmaktadır. Sıcaklık gradyanı varken (15°C) x doğrultusunda

kenarlarda gerilme değerleri sıfıra çok yakinken yol merkezinde bu değerler maksimuma çıkmaktadır. A hattında %0 GP içeren beton yolda 1,32 MPa'lık çekme gerilmesi oluşurken %15 GP içeren yolda 1,2 MPa oluşmaktadır. B hattında %0 GP içeren beton yolda 1,6 MPa'lık çekme gerilmesi meydana gelirken bu değer %15 GP içeren yolda 1,5 MPa olmuştur. Bu hatlarda lastik olmadığından gerilmeler, etkin olarak sıcaklık farkından dolayı oluşmuştur. Basınç gerilmesi değeri (1,3 MPa ve 1,6 MPa civarı) kullanılan beton sınıfının basınç dayanımının yanında önemsiz değerlerdedir (Grafik 3.10.4.1 ve Grafik 3.10.4.2). Ayrıca sıcaklık farkından dolayı oluşan gerilme değerleri, yük ve sıcaklıktan dolayı oluşan gerilme değerleriyle aynı değeri almaktadır.

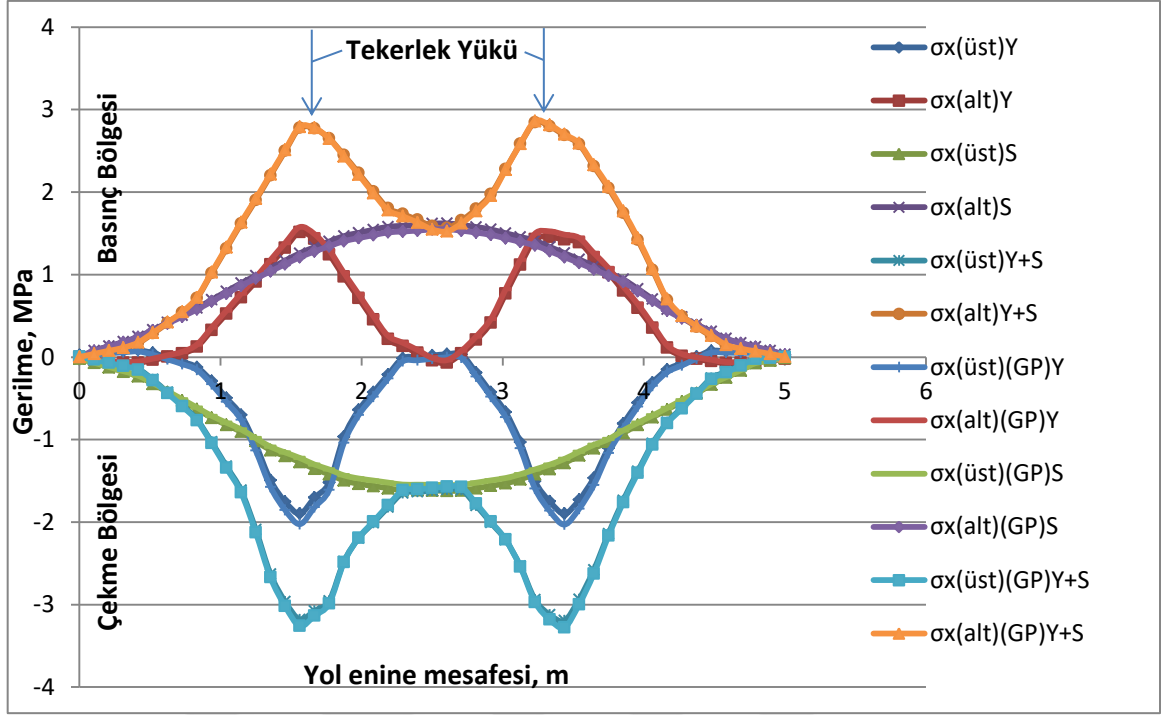


Grafik 3.10.4.1. x doğrultusunda A hattında yol kaplamasında yük, sıcaklık ve ikisi bir arada varken meydana gelen gerilme değerleri (derzsiz)



Grafik 3.10.4.2. x doğrultusunda B hattında yol kaplamasında yük, sıcaklık ve ikisi bir arada varken meydana gelen gerilme değerleri (derzsiz)

C hattı, x doğrultusundaki en kritik hat olup maksimum çekme gerilmesi lastik altında %0 GP içeren beton kaplamada 3,18 MPa ve %15 GP içeren beton yolda 3,26 MPa değerinde meydana gelmiştir. Meydana gelen basınç gerilmesi değerleri (2,8 MPa civarı) beton kaplama sınıfının basınç mukavemetinin oldukça altındadır (Grafik 3.10.4.3). C hattında maksimum çekme gerilmesi y doğrultusunda meydana gelmektedir. %0 GP içeren kaplamada 4,66 MPa ve %15 GP içeren kaplamada da 4,53 MPa olarak ortaya çıkmaktadır (Resim 3.10.4.1a, Resim 3.10.4.1b, Resim 3.10.4.2a ve Resim 3.10.4.2b). %0 GP içeren betonun eğilmede çekme mukavemeti 4,62 ve %15 GP içeren betonun eğilmede çekme mukavemetinin 3,46 MPa olmasından dolayı kaplama deformasyona uğrayacağı düşünülmektedir. Derz içeren beton yol kaplamalarında meydana gelen maksimum çekme gerilmelerinin yaklaşık 3'te biri büyüklüğünde çekme gerilmeleri oluşmuştur. %0 GP ve %15 GP içeren beton yol kaplamalarında gerilme değerleri hemen hemen aynı çıkmıştır. Burada elastisite modülünün, yoğunluğun ve ısı genleşme katsayısının birbirine yakın olması, bu sonucu oluşturmuştur.

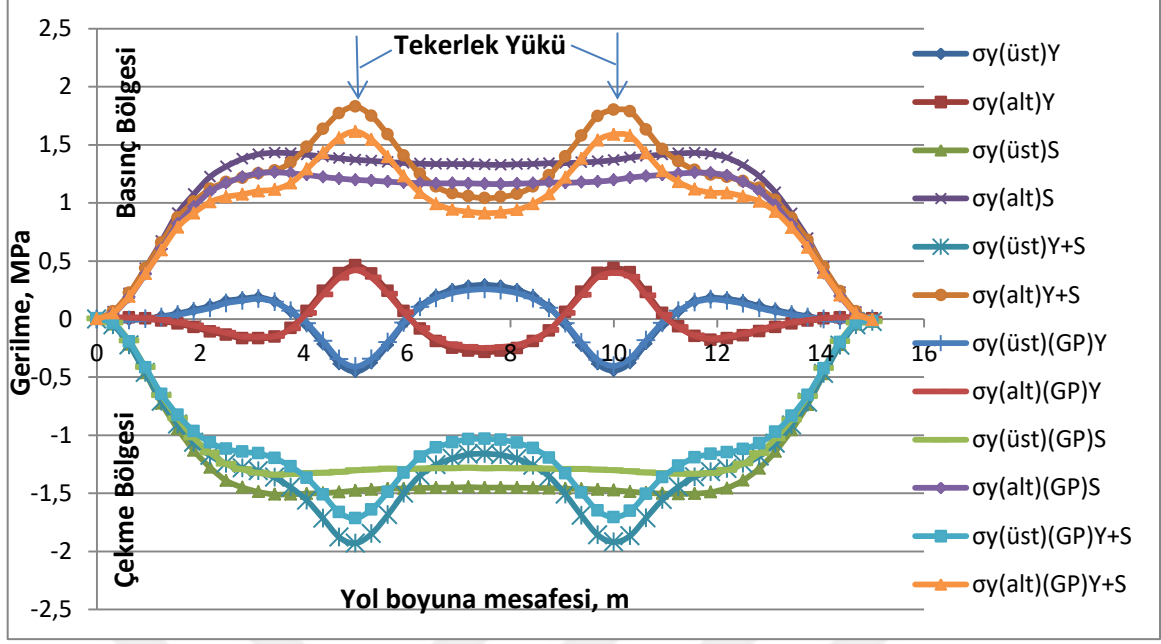


Grafik 3.10.4.3. x doğrultusunda C hattında yol kaplamasında yük, sıcaklık ve ikisi bir arada varken meydana gelen gerilme değerleri (derzsiz)

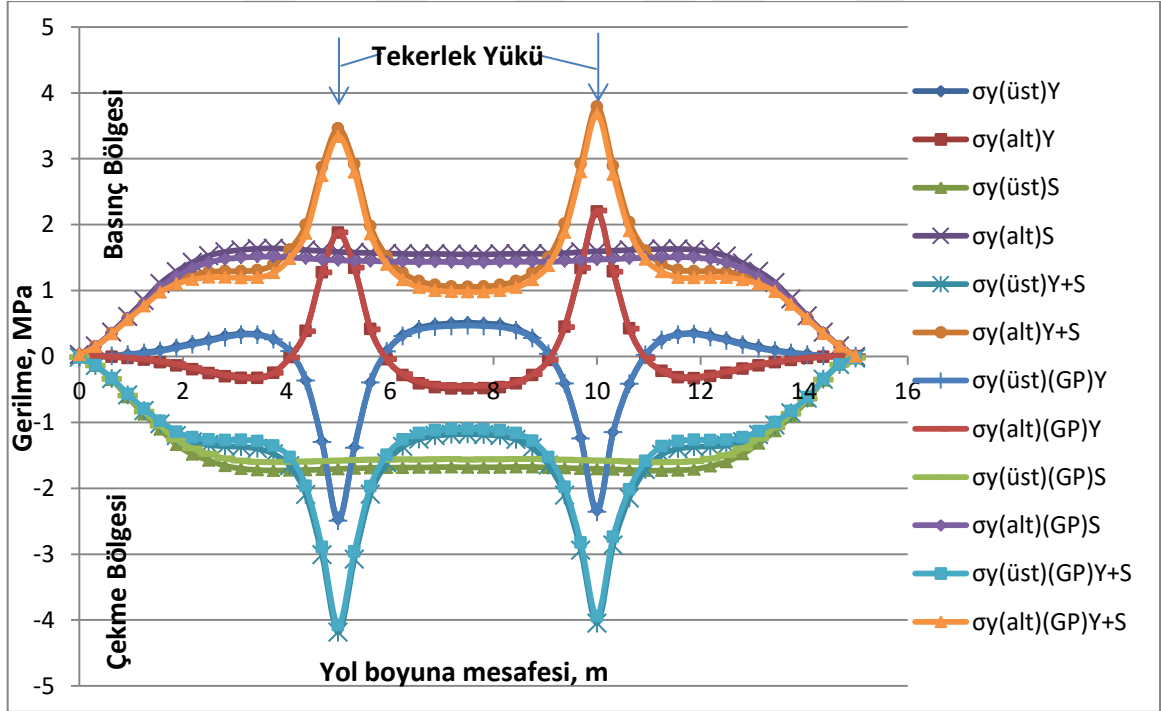
D hattında lastik yükünden dolayı y doğrultusunda meydana gelen çekme gerilmesi değerleri her iki beton için 0,4 MPa civarında olup oldukça düşüktür. Sıcaklık gradyanı altında %0 GP içeren betonda 1,48 MPa ve %15 GP içeren beton kaplamada ise 1,3 MPa'lık çekme gerilmesi yol kaplama üzerinde oluşmaktadır. Hem yük hem de sıcaklık gradyanı olması halinde %0 GP içeren beton kaplamada 1,93 MPa ve %15 GP içeren beton kaplamada ise 1,71 MPa'lık çekme gerilmesi lastik altında oluşmaktadır. Meydana gelen basınç gerilmesi değerleri (1,8 MPa ve 1,6 MPa civarı) betonun basınç mukavemetinin oldukça altındadır (Grafik 3.10.4.4).

E hattında sıcaklık ve lastik yükü varken %0 GP içeren kaplamada 4,19 MPa ve %15 GP içeren beton kaplamada 4,08 MPa'lık çekme gerilmesi y doğrultusunda oluşmaktadır. Meydana gelen basınç gerilmeleri (3,4 MPa ve 3,3 MPa civarı) beton basınç mukavemetlerinin oldukça altındadır (Grafik 3.10.4.5).

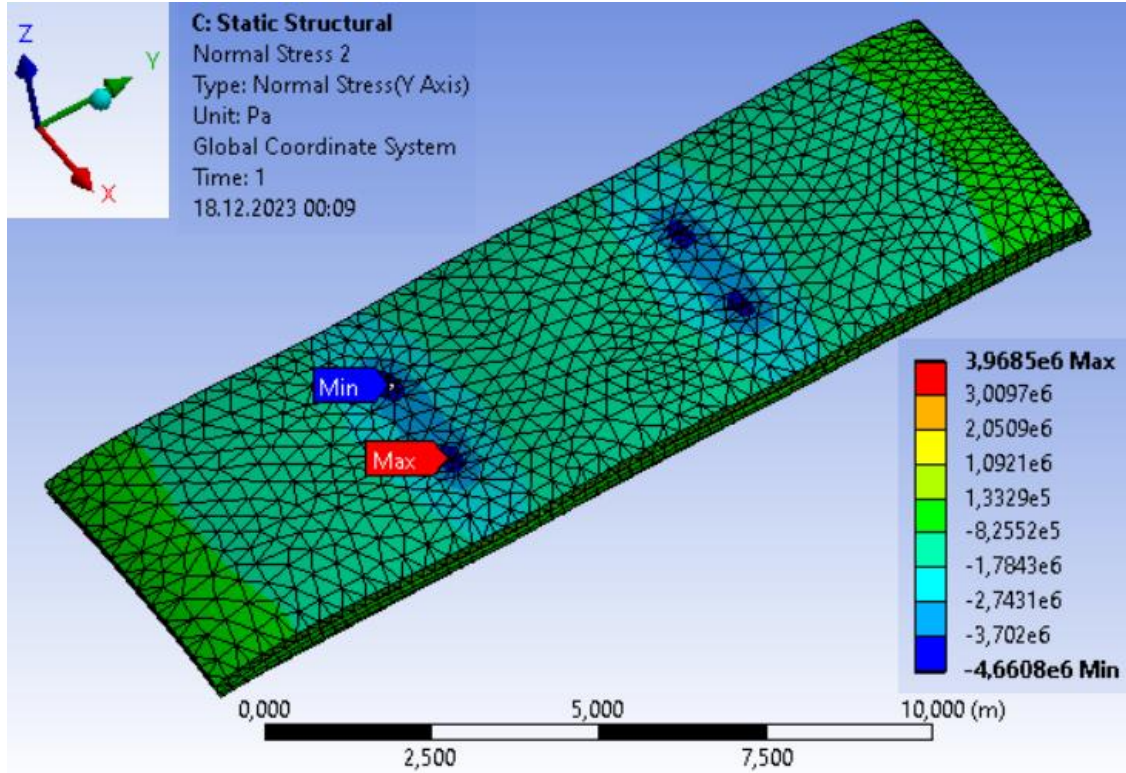
%0 GP kullanılan beton yol kaplamasına göre %15 GP kullanılan kaplamada yol doğrultusunda %2,7 oranında çekme gerilmesi azalmış olmasına rağmen oluşan çekme gerilmesi sınır değerlerde olup kaplamanın deforme olmasına neden olmaktadır.



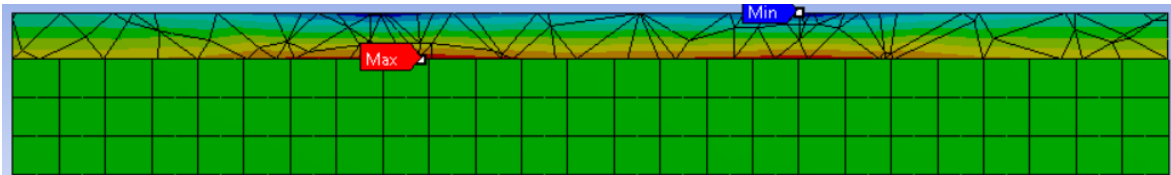
Grafik 3.10.4.4. y doğrultusunda D hattında yol kaplamasında yük, sıcaklık ve ikisi bir arada varken meydana gelen gerilme değerleri (derzsiz)



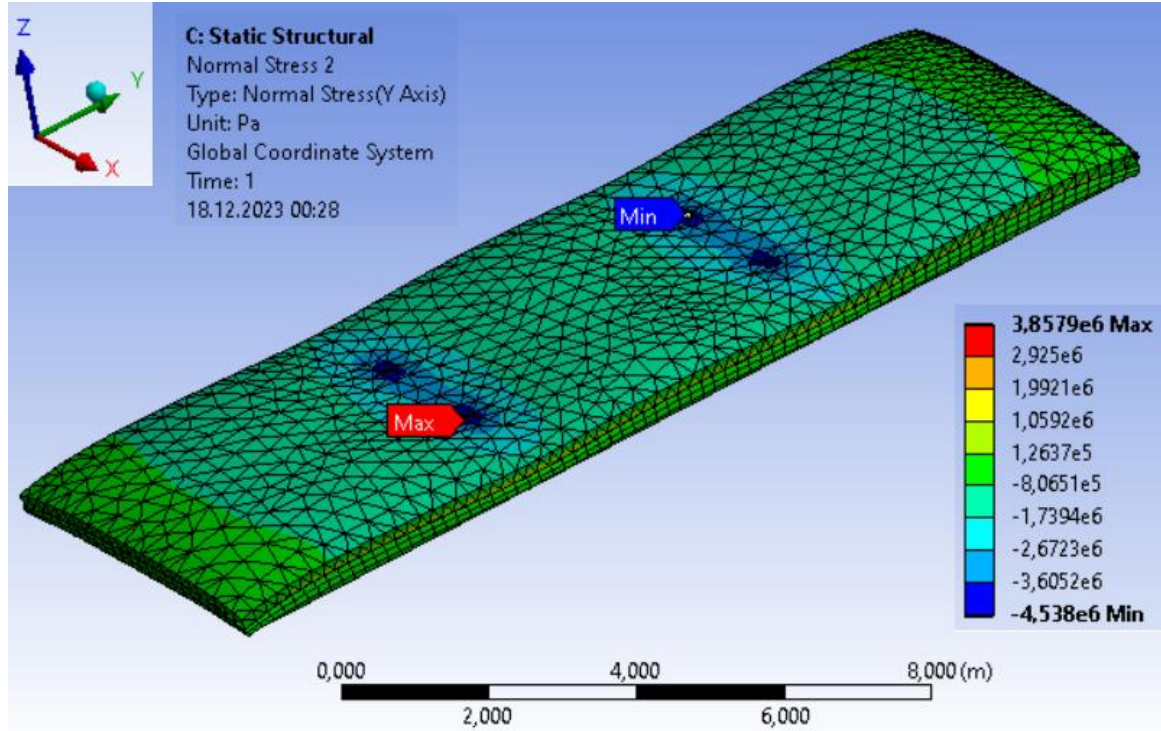
Grafik 3.10.4.5. y doğrultusunda E hattında yol kaplamasında yük, sıcaklık ve ikisi bir arada varken meydana gelen gerilme değerleri (derzsiz)



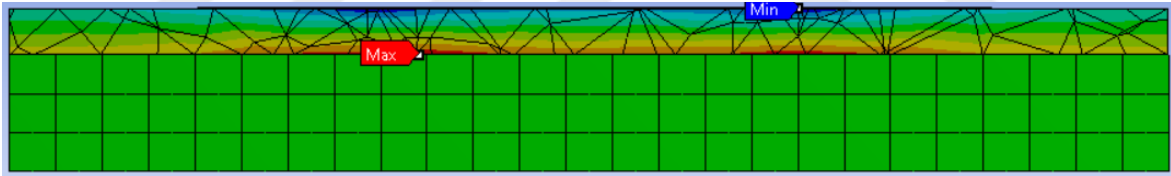
Resim 3.10.4.1a. Derzsiz yapılmış %0 GP içeren beton yol kaplamasında y doğrultusunda yol içerisinde 4,66 MPa’lık çekme gerilmesi meydana gelmektedir.



Resim 3.10.4.1b. Derzsiz yapılmış %0 GP içeren beton yol kaplamasında y doğrultusunda yol içerisinde 4,66 MPa’lık çekme gerilmesi meydana gelmektedir.



Resim 3.10.4.2a. Derzsiz yapılmış %15 GP içeren beton yol kaplamasında y doğrultusunda yol içerisinde 4,53 MPa’lık çekme gerilmesi meydana gelmektedir.



Resim 3.10.4.2b. Derzsiz yapılmış %15 GP içeren beton yol kaplamasında y doğrultusunda yol içerisinde 4,53 MPa’lık çekme gerilmesi meydana gelmektedir.

5mx15mx20cm ebatlarındaki kaplamada her 5 metrede bir 0,8 cm genişliğinde derz olması (2,5 cm, 5 cm, 7,5 cm ve derzsiz) durumunda meydana gelen gerilme değerleri Tablo 3.10.1 ve Tablo 3.10.2’de verilmektedir.

Tablo 3.10.1. 5mx15mx20cm ebatlarındaki %0 GP(C30/37) ve %15 GP içeren beton yol kaplamasında $\Delta T=15^{\circ}\text{C}$ ve 5 m’de bir derz yapılmasıyla C hattında x doğrultusunda meydana gelen maksimum gerilme değerleri (MPa, -:çekme, +:basınç)

Gerilme Durumu	DERZ DURUMU (0,8 cm genişliğindeki derz derinlikleri)							
	0 cm derz		2,5 cm derz		5 cm derz		7,5 cm derz	
	Değer	Yeri	Değer	Yeri	Değer	Yeri	Değer	Yeri
$\sigma_x(\text{üst})Y$	-1,75	Lastik altı	-1,46	Lastik altı	-1,32	Lastik altı	-1,26	Lastik altı
$\sigma_x(\text{üst})Y(\text{GP})$	-2,02	Lastik altı	-1,43	Lastik altı	-1,25	Lastik altı	-1,21	Lastik altı
$\sigma_x(\text{derz})Y$	-	Lastik altı	-2,64	Lastik altı	-2,35	Lastik altı	-1,91	Lastik altı
$\sigma_x(\text{üst})S$	-1,62	Yol üst merkezi	-1,22	Yol üst merkezi	-1,12	Yol üst merkezi	-1,12	Yol üst merkezi
$\sigma_x(\text{üst})S(\text{GP})$	-1,55	Yol üst merkezi	-0,49	Yol üst merkezi	-0,43	Yol üst merkezi	-0,41	Yol üst merkezi
$\sigma_x(\text{derz})S$	-	Derz üstü	-1,82	Derz üstü	-1,77	Derz üstü	-2,65	Derz üstü
$\sigma_x(\text{üst})Y+S$	-3,18	Lastik altı	-2,36	Lastik altı	-2,13	Lastik altı	-1,38	Lastik altı
$\sigma_x(\text{üst})Y+S(\text{GP})$	-3,26	Lastik altı	-1,78	Lastik altı	-1,55	Lastik altı	-1,56	Lastik altı
$\sigma_x(\text{derz})Y+S$	-	Lastik altı	-4,23	Derz üstü	-3,87	Derz üstü	-3,30	Derz üstü
$\sigma_x(\text{derz})Y+S(\text{GP})$	-	Lastik altı	-3,88	Derz üstü	-3,62	Derz üstü	-3,10	Derz üstü

Tablo 3.10.2. 5mx15mx20cm ebatlarındaki %0 GP(C30/37) ve %15 GP içeren beton yol kaplamasında $\Delta T=15^{\circ}\text{C}$ ve 5 m’de bir derz yapılmasıyla E hattında y doğrultusunda meydana gelen maksimum gerilme değerleri (MPa, -:çekme, +:basınç)

Gerilme Durumu	DERZ DURUMU (0,8 cm genişliğindeki derz derinlikleri)							
	0 cm derz		2,5 cm derz		5 cm derz		7,5 cm derz	
	Değer	Yeri	Değer	Yeri	Değer	Yeri	Değer	Yeri
$\sigma_y(\text{üst})Y$	-2,47	5 ve 10 metre	-1,14	Derz Yanı	-1,01	Derz Yanı	-0,90	Derz Yanı
$\sigma_y(\text{üst})Y(\text{GP})$	-2,49	5 ve 10 metre	-1,15	Derz Yanı	-1,01	Derz Yanı	-0,90	Derz Yanı
$\sigma_y(\text{üst})S$	-1,71	3,75 ve 11,3 m	-1,73	3,75 ve 11,3 m	-1,70	3,75 ve 11,3 m	-1,61	3,75 ve 11,3 m
$\sigma_y(\text{üst})S(\text{GP})$	-1,58	3,75 ve 11,3 m	-0,71	3,75 ve 11,3 m	-0,71	3,75 ve 11,3 m	-0,70	3,75 ve 11,3 m
$\sigma_y(\text{üst})Y+S$	-4,19	5 ve 10 metre	-2,80	Derz	-2,66	Derz	-2,45	Derz
$\sigma_y(\text{üst})Y+S(\text{GP})$	-4,08	5 ve 10 metre	-1,84	Derz	-1,71	Derz	-1,55	Derz
$\sigma_y(\text{max})Y+S$	-4,66	Lastik altı	-11,9	Derz üstü	-11,9	Derz üstü	-12,6	Derz üstü
$\sigma_y(\text{max})Y+S(\text{GP})$	-4,53	Lastik altı	-9,42	Derz üstü	-9,27	Derz üstü	-9,56	Derz üstü

Tablo 3.10.1 ve Tablo 3.10.2’den görüldüğü üzere derz derinliği arttıkça yol kaplamasında C ve E hatlarında meydana gelen çekme gerilmesi değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Ancak derz derinliği arttıkça derzin üzerinde yol doğrultusunda çok büyük çekme gerilmeleri oluşmaktadır (%0 GP içeren betonda yaklaşık 12 MPa, %15 GP içeren betonda yaklaşık 9,2 MPa). Sanıldığı gibi aksine derz kesimi kaplamadaki çekme gerilmesi değerlerini özellikle derz derinliğinde aşırı yükseltmekte olup kaplamanın aşağıya doğru çatlamasına neden olmaktadır. Bu durum esasında derz kesildikten sonra derzin aşağıya doğru çatlamasını açıklamaktadır. Derzsiz kaplama yapılması halinde sıcaklık ve tekerlek yükü varken yol doğrultusunda maksimum çekme gerilmesi değeri lastik altında oluşmakla birlikte derz kesilmiş hale göre bu değer yarısı civarında çıkmaktadır (%0 GP içeren betonda yaklaşık 4,66 MPa, %15 GP içeren betonda yaklaşık 4,53 MPa). Bu durum da son yıllarda sıklıkla kullanılmakta olan sürekli boyuna donatılı

beton yol kaplaması kullanılması gerektiğini göstermektedir. Bunun yanında %15 GP içeren beton kaplamaların tamamında çekme gerilmesi değerleri, %0 GP içeren kontrol numunesine göre daha düşük değerlerde çıkmıştır. Oluşan basınç gerilmesi değerleri, beton mukavemetinin çok aşağısında çıktığı için herhangi bir sorun oluşturmamaktadır.

Bu çalışmayla literatürde derz kesimi için; derz derinliği, kaplamanın 1/3 veya 1/4'ü oranında olması gerektiği durumu esasında 1/8 oranında olması durumunda da sağlanmakta olduğu görülmektedir.

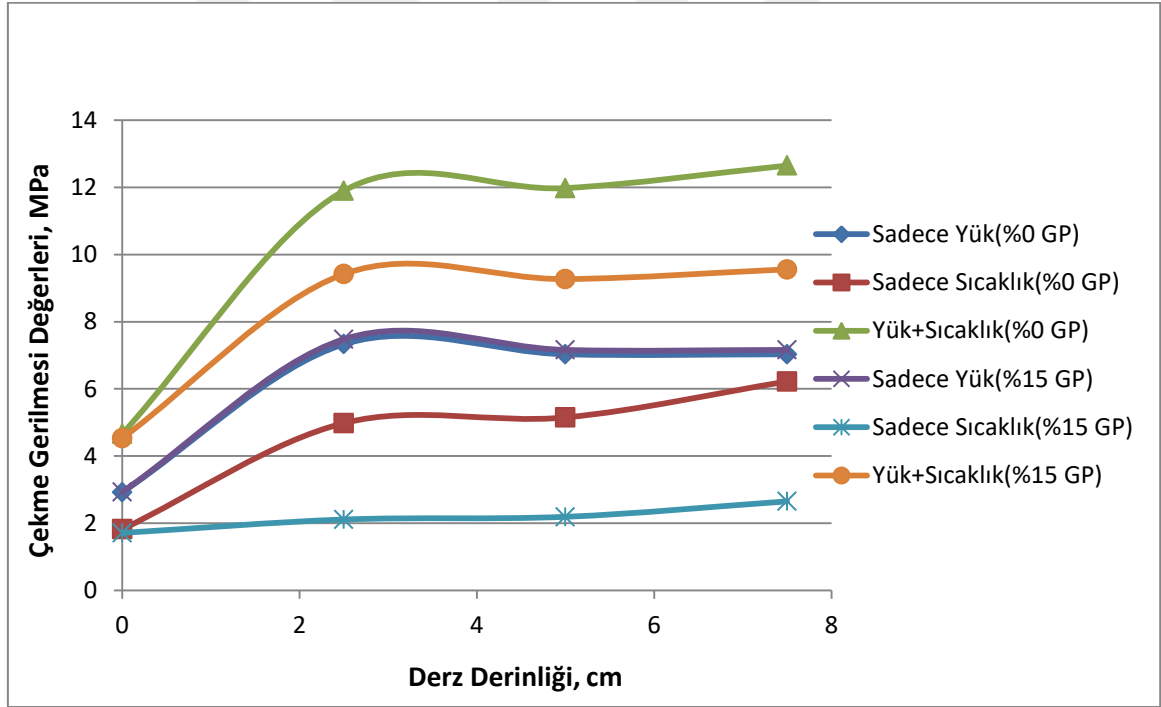
%0 GP (geleneksel beton) içeren beton ve %15 GP içeren beton ile yapılmış 5x5x0.2 m ebatlarındaki yolda 0 cm (derzsiz), 2.5 cm, 5 cm ve 7.5 cm derinliğinde derz olması durumunda; her tekerde 0.8 MPa yük ve plağın altı ile üstü arasındaki pozitif sıcaklık farkı da 15 °C olarak alınarak analiz yapılmıştır. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında derzin üzerinde (kaplamanın yüzeyinden derz derinliği kadar aşağısında) meydana gelen maksimum çekme gerilmesi değerleri Tablo 3.10.3'te verilmektedir.

Tablo 3.10.3. Derz üzerinde meydana gelen maksimum çekme gerilmesi değerleri (MPa)

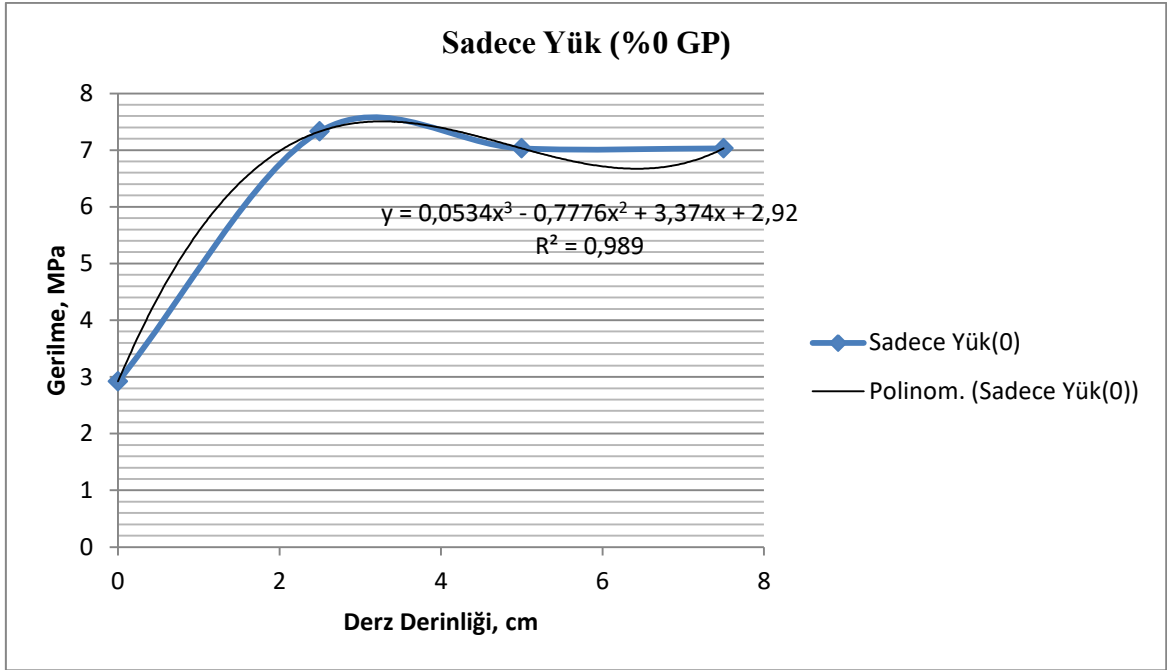
Beton Sınıfı (%GP)	Derz Derinliği (cm)	Sadece Yük (0,8 MPa)	Sadece Sıcaklık ($\Delta T=15$ °C)	Yük ve Sıcaklık
%0 GP (C30/37)	0	2,92	1,82	4,66
	2,5	7,33	4,98	11,90
	5	7,03	5,15	11,98
	7,5	7,03	6,22	12,65
%15 GP	0	2,93	1,71	4,53
	2,5	7,48	2,11	9,42
	5	7,16	2,19	9,27
	7,5	7,16	2,65	9,56

Tablo 3.10.3 incelendiğinde tekerlek yükü olması durumunda %0 GP içeren kaplama ile %15 GP içeren kaplamada meydana gelen maksimum çekme gerilmesi değerleri hemen hemen aynı çıkmıştır (%0 GP ve %15 GP içeren betonda 3 MPa ve 7 MPa civarı). Derz olmaması durumunda oluşan çekme gerilmesi değerleri derz olması durumuna göre oldukça küçük değer (3 MPa civarı) almaktadır. Sadece sıcaklık yükü

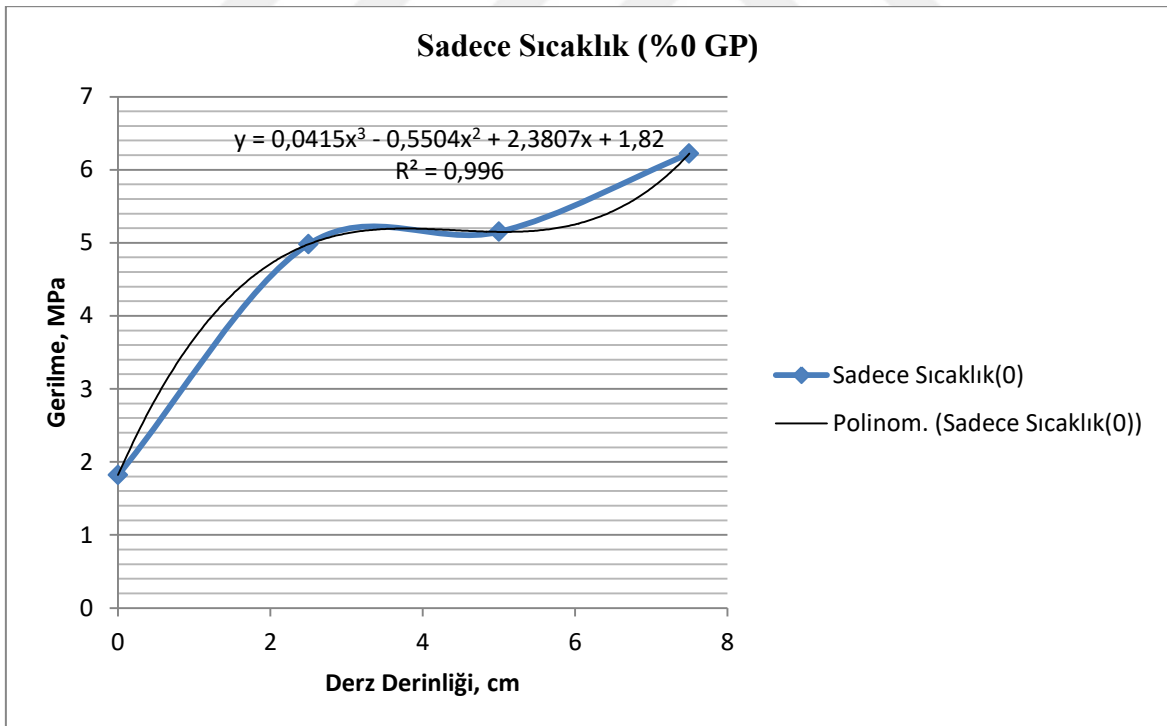
olması durumunda da derzsiz kaplamada meydana gelen çekme gerilmesi değerleri oldukça küçüktür (1,8 MPa civarı). Derz derinliği arttıkça kaplamada meydana gelen çekme gerilmesi değerleri artmaktadır. Ayrıca derz olması durumunda %15 GP içeren kaplamada meydana gelen çekme gerilmesi değerleri, %0 GP içeren beton kaplamada meydana gelen değerlerin yaklaşık yarısı çıkmaktadır (derz varken %0 GP içeren kaplamada 5-6 MPa, %15 GP içeren beton kaplamada 2-2,5 MPa civarı). Yük ve sıcaklık beraber olması durumunda da oldukça yüksek değerlerde çekme gerilmesi meydana gelmektedir (12 MPa ve 9,5 MPa civarı). Tablo 3.10.3'teki verilerin ilişkisi Grafik 3.10.1'de verilmektedir. Grafikte; 0:%0 GP, 15:%15 GP ifade etmektedir. Bu ilişkiler daha detaylı incelendiğinde derz derinliği ile çekme gerilmeleri arasındaki ilişkiler Grafik 3.10.2, Grafik 3.10.3, Grafik 3.10.4, Grafik 3.10.5, Grafik 3.10.6 ve Grafik 3.10.7'de verilmiştir.



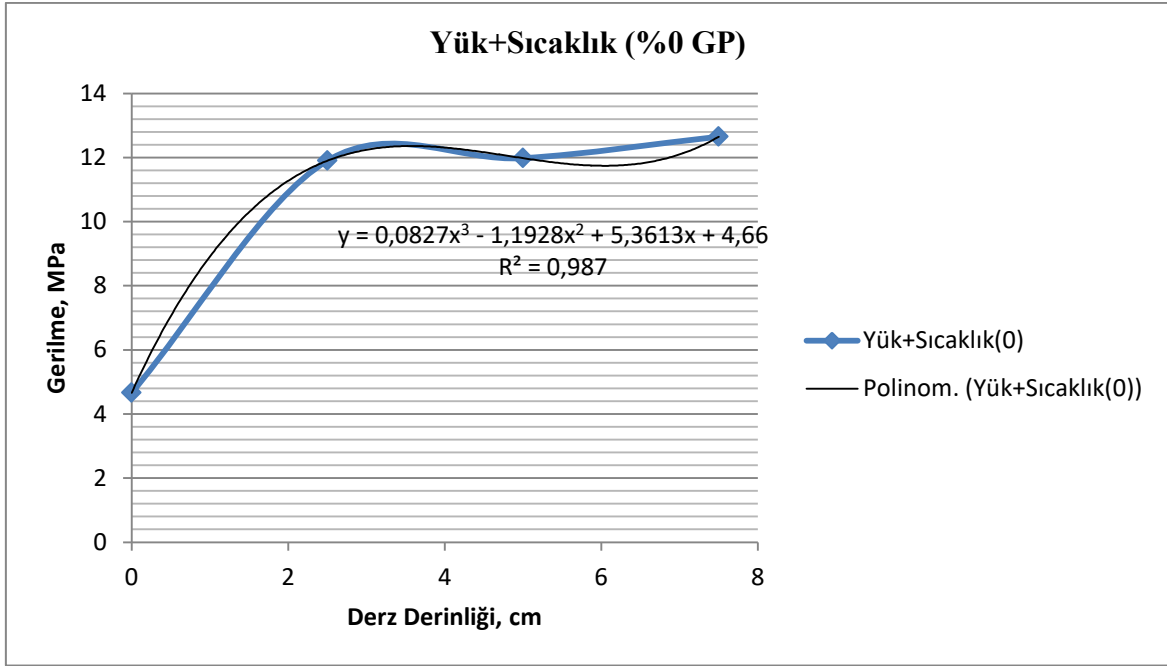
Grafik 3.10.1. %0 GP ve %15 GP içeren kaplamada derz derinliğine göre oluşan maksimum çekme gerilmesi ilişkisi



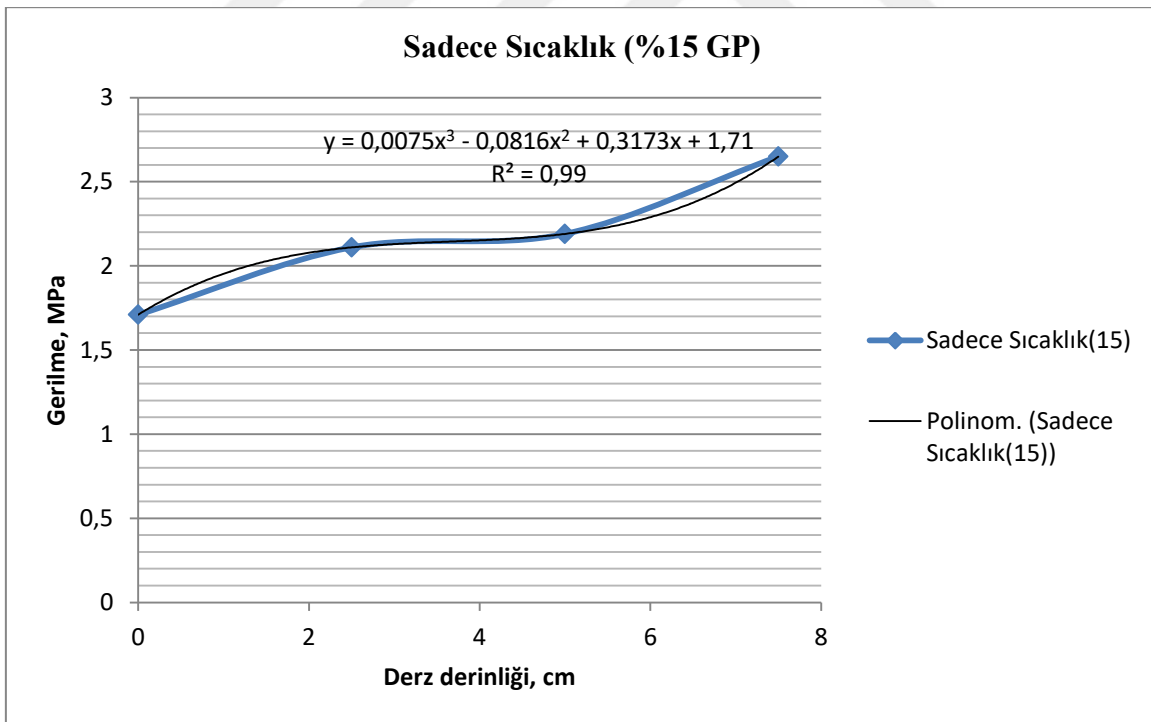
Grafik 3.10.2. %0 GP içeren kaplamamdaki yük varken derz derinliği ile çekme gerilmesi ilişkisi



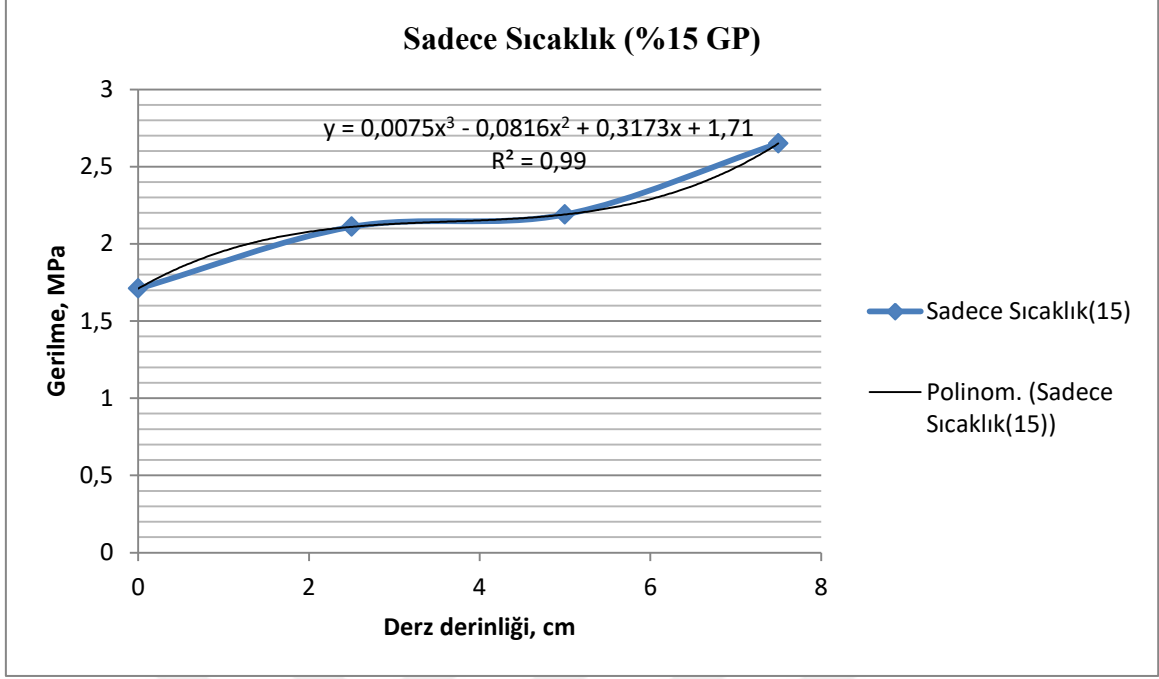
Grafik 3.10.3. %0 GP içeren kaplamamdaki sıcaklık varken derz derinliği ile çekme gerilmesi ilişkisi



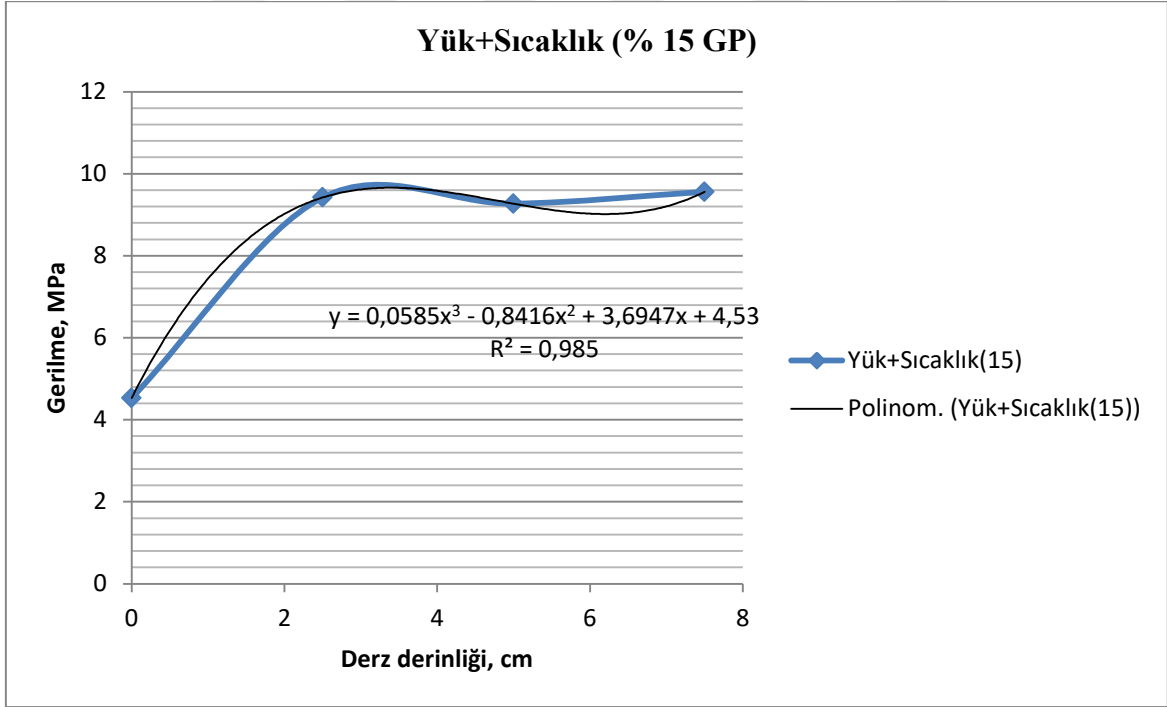
Grafik 3.10.4. %0 GP içeren kaplamamdaki sıcaklık ve yük varken derz derinliği ile çekme gerilmesi ilişkisi



Grafik 3.10.5. %15 GP içeren kaplamamdaki yük varken derz derinliği ile çekme gerilmesi ilişkisi



Grafik 3.10.6. %15 GP içeren kaplamamdaki sıcaklık varken derz derinliği ile çekme gerilmesi ilişkisi

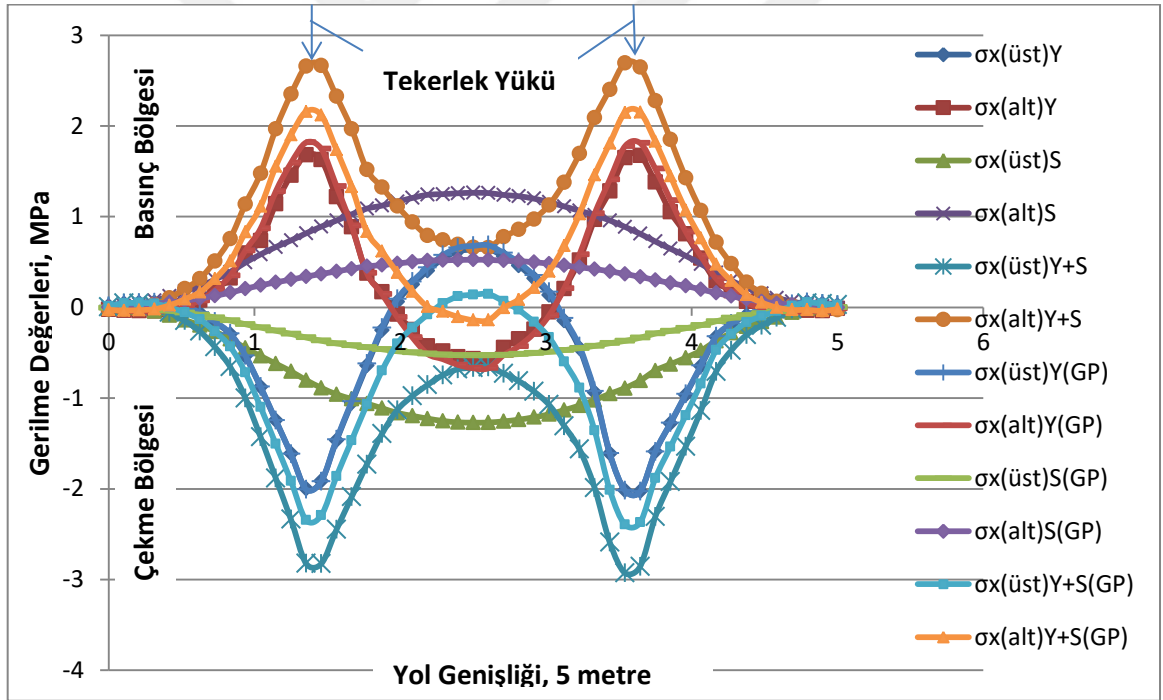


Grafik 3.10.7. %15 GP içeren kaplamamdaki sıcaklık ve yük varken derz derinliği ile çekme gerilmesi ilişkisi

Grafik 3.10.2, Grafik 3.10.3, Grafik 3.10.4, Grafik 3.10.5, Grafik 3.10.6 ve Grafik 3.10.7 göz önüne alındığında derz derinliğinin en uygun değerinin 4-5 cm civarında olması gerektiği çıkarılabilir.

3.11. Kaplamada Tır Olması Halinde

5mx18mx20 cm ebatlarındaki kaplamada 30 ton kapasiteli bir tır (Resim 2.6.5.1) olması durumunda her bir lastik altında 0,8 MPa'lık yük ve 15 °C'lık pozitif sıcaklık farkı varken yapılan analizlerden A, B, C ve D hattındaki gerilme değerleri bulunmuştur. Elde edilen tüm grafiklerde Y:yük, S:sıcaklık, Y+S:yük(+)sıcaklık, a:alt, ü:üst, GP:%15 GP içeren manasına gelmektedir.

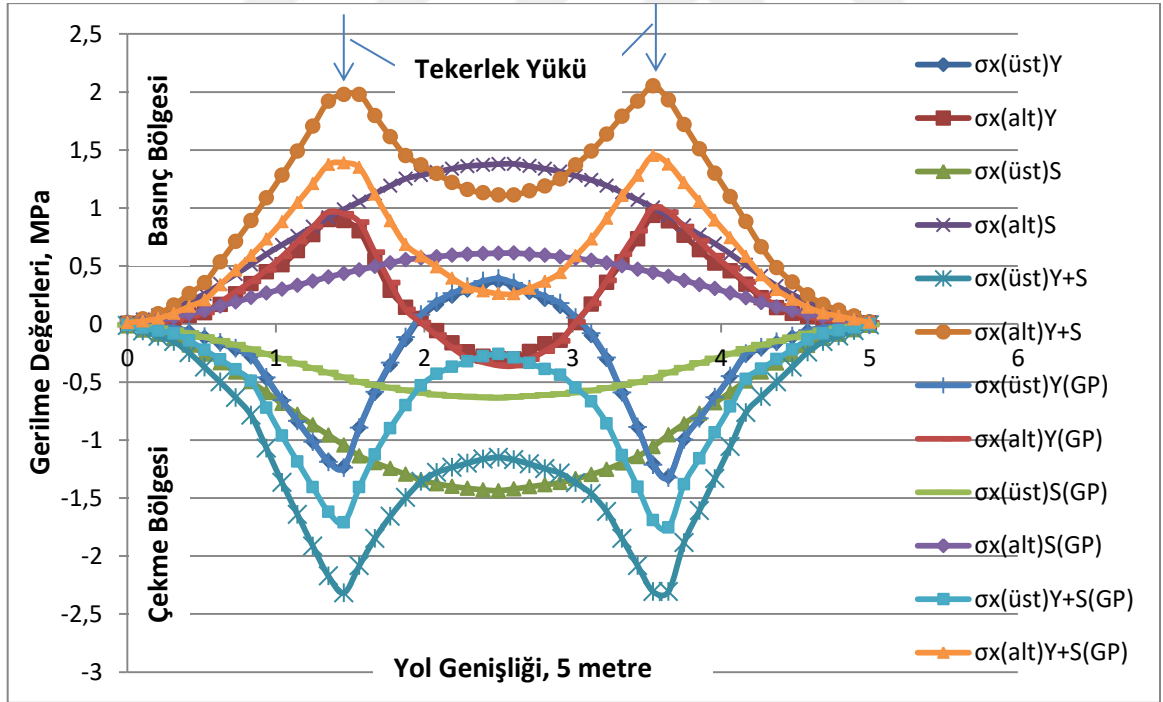


Grafik 3.11.1. A hattındaki gerilme değerleri

A hattında sadece tırın tekerlek yükü olması durumunda maksimum çekme gerilmesi kaplamanın altında 1,68 MPa değerinde %0 GP içeren beton kaplamada oluşmaktadır. Aynı yerde %15 GP içeren betonla yapılmış kaplamada %8'lik bir artışla 1,82 MPa değerinde çekme gerilmesi oluşmaktadır. Sadece sıcaklık yüklemesi olması durumunda %0 GP içeren kaplamada maksimum çekme gerilmesi kaplama yüzeyinde 1,27

MPa değerinde oluşurken %15 GP içeren betonla yapılmış kaplamada aynı yerde bu değer %58'lik azalışla 0,53 MPa olmaktadır. Tekerlek yükü ve sıcaklık beraber varken oluşan maksimum çekme gerilmesi tekerlek altında %0 GP içeren kaplamada 2,83 MPa olurken bu değer aynı yerde %15 GP içeren kaplamada %19'luk bir azalışla 2,29 MPa olmaktadır (Grafik 3.11.1).

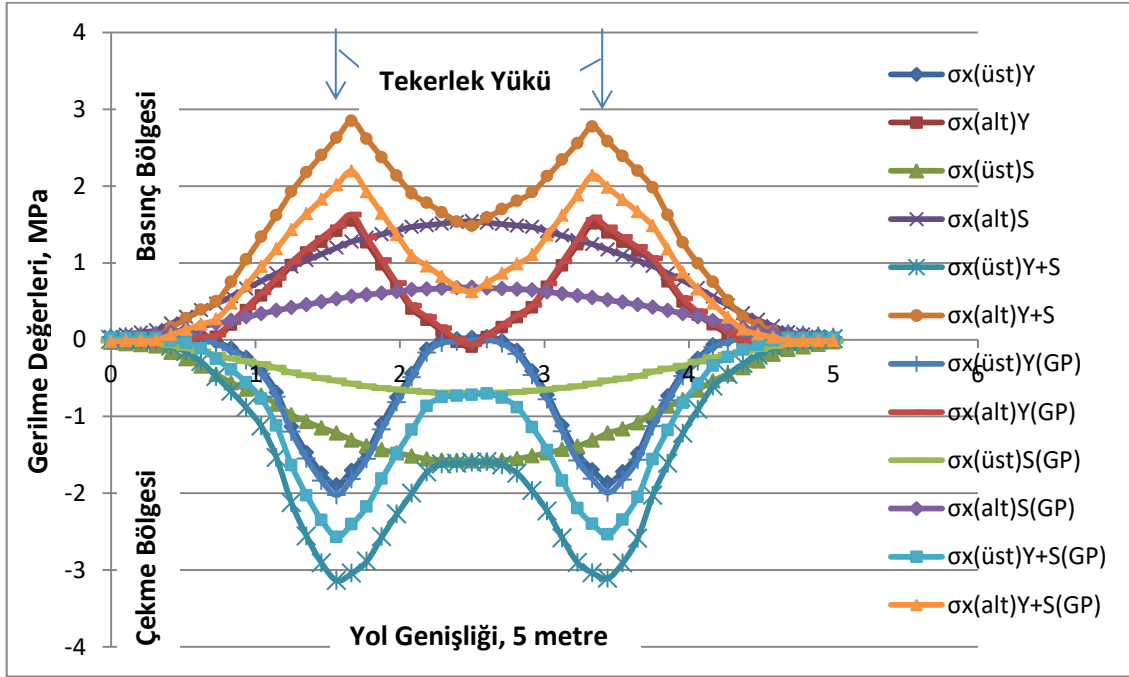
B hattında sadece tekerlek yükü olması durumunda %0 GP içeren kaplamada tekerlek hizasında kaplama altında 0,9 MPa'lık çekme gerilmesi oluşurken aynı yerde %15 GP içeren kaplamada bu değer %7'lik artışla 0,97 MPa'a çıkmaktadır. Sadece sıcaklık yüklemesi altında %0 GP içeren kaplamada kaplama merkezinde yol yüzeyinde 1,44 MPa'lık çekme gerilmesi oluşurken %15 GP içeren kaplamada bu değer aynı yerde %56'lık azalışla 0,64 MPa olmaktadır. Tekerlek yükü ve sıcaklık yüklemesi beraber varken oluşan maksimum çekme gerilmesi, %0 GP içeren kaplamada tekerlek altında yol yüzeyinde 2,17 MPa olarak meydana gelmektedir. Aynı yerde bu değer %15 GP içeren kaplamada %25'lik azalışla 1,62 MPa olmaktadır (Grafik 3.11.2).



Grafik 3.11.2. B hattındaki gerilme değerleri

C hattında (çift tekerleğin olduğu hat) en kritik çekme gerilmesi değerleri meydana gelmektedir. Sadece tekerlek yükü olması durumunda %0 GP içeren kaplamada tekerlek hizasında kaplama altında 1,55 MPa çekme gerilmesi oluşurken %15 GP içeren kaplamada

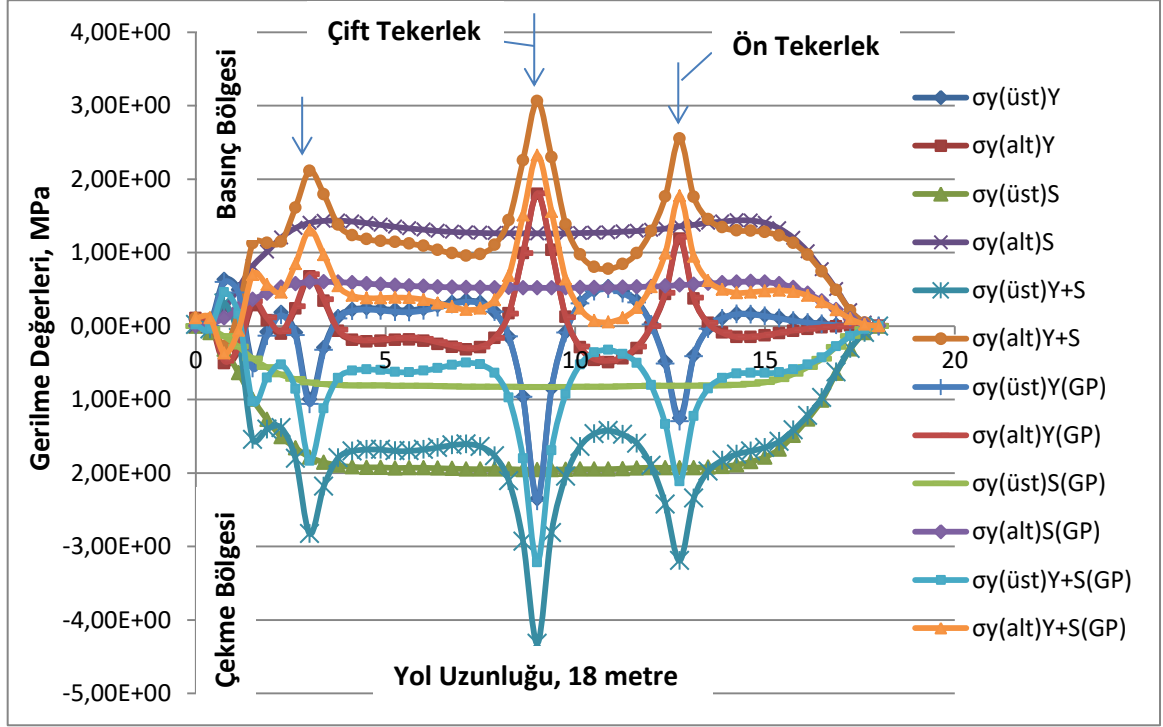
aynı yerde bu değer %5'lik artışla 1,63 MPa olmaktadır. Sadece sıcaklık yüklemesi olması durumunda oluşan maksimum çekme gerilmesi değeri kaplama ortasında ve yüzeyde %0 GP içeren kaplamada 1,58 MPa olmaktadır. Aynı yerde %15 GP içeren kaplamada bu değer, %56'lık azalışla 0,7 MPa olmaktadır. Tekerlek yükü ve sıcaklık yüklemesi beraber olması durumunda oluşan maksimum çekme gerilmesi, tekerlek altında kaplama yüzeyinde %0 GP içeren (geleneksel betonda) betonda 3,14 MPa olurken bu değer %15 GP içeren betonda (hafif betonda) %18'lik azalışla 2,57 MPa olmaktadır (Grafik 3.11.3).



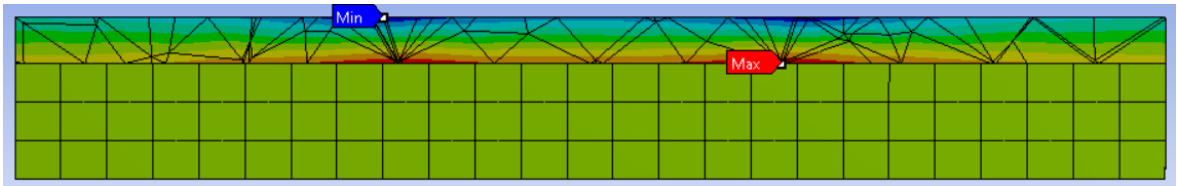
Grafik 3.11.3. C hattındaki gerilme değerleri

y doğrultusunda D hattında ise maksimum çekme gerilmesi değerleri çift lastiğin olduğu kaplamanın başlangıcından 9 m uzaklıkta olan tekerleklerin altında kaplamanın üst yüzeyinde olmaktadır. Burada %0 GP içeren beton kaplamada 4,32 MPa'lık çekme gerilmesi oluşurken bu değer, kaplamanın %15 GP içeren betonla yapılması halinde %25 azalarak 3,22 MPa olmaktadır (Grafik 3.11.4). Buradan tekerlek ve sıcaklık yükü altında %15 GP içeren beton ile yapılan kaplamaların geleneksel betonla yapılan kaplamalara göre daha düşük çekme gerilmesi değeri oluşturduğu görülmektedir. Ayrıca gerilme değerlerinin elde edildiği tüm hatlarda oluşan basınç gerilmesi değerlerinin %0 GP içeren ve %15 GP içeren betonların basınç mukavemetleri yanında ihmal edilecek kadar düşük olduğu da görülmektedir (D hattı da %0 GP için 2,84 Mpa ve %15 GP için 2,19 MPa).

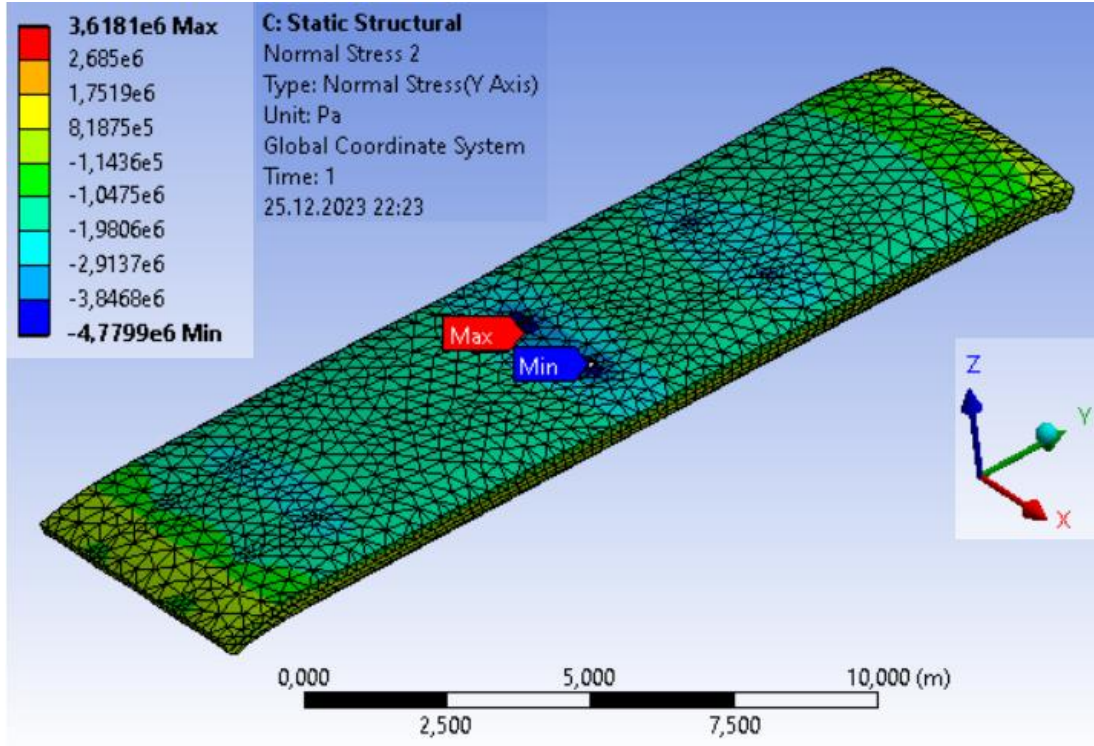
Tüm analizler göz önüne alındığında meydana gelen maksimum çekme gerilmesi değeri, yol doğrultusunda (y doğrultusu) meydana gelmektedir. Tekerlek ve sıcaklık yüklemesi varken oluşan bu değer, %0 GP içeren beton kaplamada 4,78 MPa ve %15 GP içeren kaplamada ise 3,66 MPa olmaktadır (Resim 3.11.1a, Resim 3.11.1b, resim 3.11.2a ve Resim 3.11.2b).



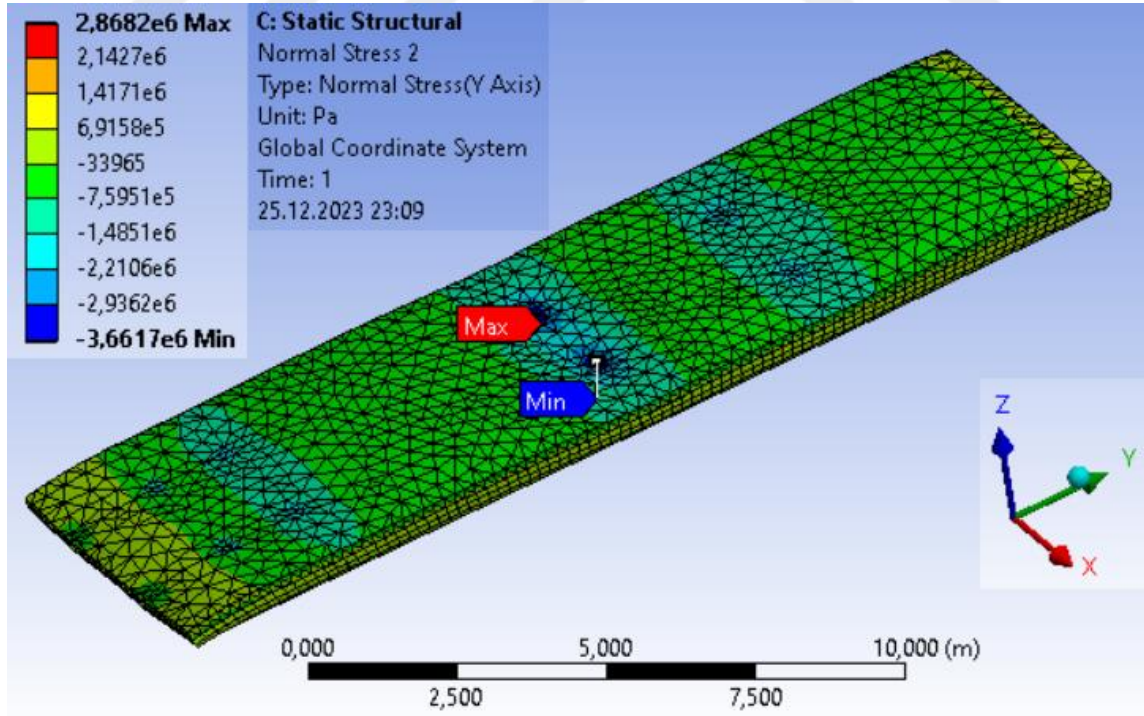
Grafik 3.11.4. D hattındaki gerilme değerleri



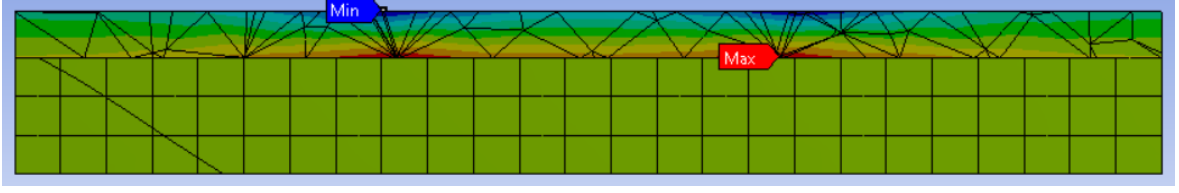
Resim 3.11.1b. Sıcaklık gradyanı ve tekerlek yükü varken %0 GP içeren beton kaplamada meydana gelen y doğrultusundaki gerilmeler (maksimum çekme 4,78 MPa)



Resim 3.11.1a. Sıcaklık gradyanı ve tekerlek yükü varken %0 GP içeren beton kaplamada meydana gelen y doğrultusundaki gerilmeler (maksimum çekme 4,78 MPa)



Resim 3.11.2a. Sıcaklık gradyanı ve tekerlek yükü varken %15 GP içeren beton kaplamada meydana gelen y doğrultusundaki gerilmeler (maksimum çekme 3,66 MPa)



Resim 3.11.2b. Sıcaklık gradyanı ve tekerlek yükü varken %15 GP içeren beton kaplamada meydana gelen y doğrultusundaki gerilmeler(maksimum çekme 3,66 MPa)

%0 GP kullanılan beton yol kaplamasına göre %15 GP içeren beton kullanılan kaplamada yol doğrultusunda %23 oranında çekme gerilmesi azalmış olmasına rağmen oluşan çekme gerilmesi halen sınır (%15 GP içeren beton eğilmede çekme mukavemeti 3,46 MPa, %0 GP içeren betonun eğilmede çekme mukavemeti 4,66 MPa) değerlerde olup kaplamanın deforme olmasına neden olacağı ve kaplamada çatlak oluşacağı ön görülmektedir.

4. SONUÇLAR

Beton yol kaplaması, özellikle son yıllarda karayolu üst yapısı kaplaması olarak tercih edilmektedir. Ülke öz kaynaklarıyla üretilebilmesi, hazır beton tesislerinin hızlı beton üretimi yapabilmesi, her mevsim beton dökümü yapılabilmesi ve ağır trafik yükleri altında yükü geniş bir alana yayarak taşıdığı için uzun yıllar bozulmadan hizmet edebilmesi gibi özelliklerinden dolayı beton yol kaplaması, gittikçe artan bir kullanım alanına sahip olmaktadır. Beton yol kaplamalarının kullanımının artmasıyla birlikte özellikle nem ve sıcaklık faktörüyle birlikte malzemenin genişmesi ve büzülmesinden dolayı kaplamada çatlakların oluştuğu görülmektedir. Bu çatlaklar, kaplama yapım aşamasında rötre ve oturma çatlakları olarak karşımıza çıkarken sertleşmiş betonda nem ve günlük sıcaklık farkından dolayı kaplamanın eğilmesiyle karşımıza çıkmaktadır. Özellikle günlük sıcaklık farkından dolayı meydana gelen çatlakların büyümemesi ve yüzey alanının küçültülerek genişlemenin güvenli bir şekilde sağlanması için kaplamada derz kesilmektedir. Derz kesilmesiyle birlikte beton yol kaplamasında derz bölgesinde tekerlek yükünden dolayı çok büyük çekme gerilmesi meydana gelmekte ve kaplama derz bölgesinde düşey yönde çatlamaktadır.

Bu tez kapsamında; $\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T$ formülü esas alınarak literatür ve laboratuvarından elde edilen beton verileriyle beton yol kaplamasının absorbe edebileceği maksimum sıcaklık farkı ile kaplamada 2 cm tam derz yapılması halinde yapılabilecek maksimum derz aralığı elde edilmiştir. Bu hesaplamayla birlikte tezin esasını oluşturan üzerinde tekerlek yükü, sıcaklık yüklemesi ve her ikisi beraber varken literatürde 4,5-6 m aralığında kesilmesi önerilen derz aralığıyla uyumlu olacak şekilde 5mx5m ebatlarındaki beton yol kaplamasının gerilme analizleri ANSYS programında yapılmıştır. Bu analizlerde kullanılan beton yol kaplamasının malzemesi, %0 GP içeren beton (geleneksel beton, şahit beton) ve %15 GP içeren beton (hafif beton) olarak programa girilmiştir. ANSYS programına girilen beton malzemelerin verileri, laboratuvarında numuneler alınarak elde edilmiştir. Değişik sıcaklık farkında ve kaplama kalınlığında, kaplamada meydana gelen çekme gerilmesi değerleri ve bu değerlerin oluştuğu yerler ile deformasyon değerleri elde edilmiştir. Ayrıca beton yol kaplamasında her 5 m'de bir derz kesilmesi durumunda 5mx15mx20cm ebatlarındaki yolda meydana gelen çekme gerilmesi değerleri ve bu değerlerin derz derinliğinin değişmesiyle nasıl değiştiği ANSYS programında analiz edilmiştir. Bunlara ek olarak üzerine 30 tonluk bir tırın sığabileceği 5mx18mx20cm

ebatlarındaki bir beton yol kaplamasında çekme gerilmesinin olduğu kritik yerler ve bu çekme gerilmelerinin değerleri elde edilmiştir. Gerçekleştirilen tüm analizlerden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Beton yol kaplamasının altı ile üstü arasındaki sıcaklık farkı sabit bir değerde tutulduğu takdirde oluşacak çekme gerilmesi değeri betonu çatlatacak değere ulaşmadığı görülmüştür (Laboratuvar verilerine göre hafif beton için 45°C). Bu durumda kaplamada derz kesmeden daha uzun mesafede kaplama yapılabileceği bulunmuştur (Laboratuvar verilerine göre hafif beton için 171 m).
- Kaplamada sıcaklık farkı belli değerler içerisinde tutulabilirse %0 GP (geleneksel beton) içeren beton ile yapılmış kaplamada derz kesilmeden yapılabilecek kaplama uzunluğu, %15 GP içeren betonla yapılmış kaplamadan daha uzun mesafe çıktığı görülmüştür (C30 beton için 213 m). Ancak Isıl genleşme formülü kullanıldığında 2 cm'lik tam derz mesafesi için %15 GP içeren beton (hafif beton) ile yapılan beton kaplama, %0 GP içeren beton (geleneksel beton) kaplamaya göre daha yüksek sıcaklık farkını absorbe edebileceği saptanmıştır.
- Beton numunelerden alınan sıcaklık verilerine göre numune kesitinde oluşan sıcaklık dağılımının lineer değil nonlinear olarak meydana geldiği görülmüştür. ANSYS programında bu durumun sağlanması için konveksiyon katsayısı kullanılmış olup konveksiyon katsayısının kullanılmasıyla analizde nonlinear bir sıcaklık dağılımının meydana geldiği görülmüştür.
- Beton yol kaplamasında kullanılan betona ilave edilecek bir malzeme ile kaplamanın ısı iletim katsayısı artırılabilirse, ısı kaplamada daha iyi iletileceğinden kaplamanın üstü ile altı arasındaki sıcaklık farkının azalacağı, böylece kaplamada oluşacak gerilme değerlerinin sıcaklık farkının azalmasına paralel olarak azalacağı görülmüştür.
- 5mx5mx20cm ebatlarındaki kaplamada sadece tekerlek yükü olması durumunda meydana gelen gerilme değerleri, %0 GP ve %15 GP içeren betonda aynı değerde çıkmaktadır. Sadece sıcaklık yüklemesi olması durumunda ise genel itibariyle %15 GP içeren kaplamada meydana gelen ısı gerilme değerleri, %0 GP içeren kaplamada meydana gelen gerilme değerlerinin yaklaşık yarısı çıkmaktadır. Sıcaklık ve tekerlek yüklemesi beraber varken %15 GP içeren kaplamada meydana gelen çekme gerilmesi değerleri, %0 GP içeren betonla yapılmış kaplamada

meydana gelen çekme gerilmelerinden genel itibariyle daha düşük olduğu görülmüştür.

- 5mx5mx20cm ebatlarındaki bir kaplamada sıcaklık farkı ne kadar yüksek ise oluşacak gerilme değerleri de o derecede yüksek olduğu, sıcaklığın yüksek ama farkın az olduğu durumlarda gerilme değerlerinin azaldığı görülmüştür. Kaplamada sıcaklık yükseldikçe kaplamanın kıvrılma şekli de değişmektedir. Bu tezdeki analizde kenarlardan içeriye doğru geldikçe 1 metrelik mesafede gerilme yön değiştirmektedir. Halbuki sıcaklığın düşük ama farkın büyük olduğu kaplamada maksimum çekme gerilmesi kaplamanın tam merkezinde meydana geldiği, maksimum basınç gerilmesinin ise kaplamanın alt yüzey merkezinde olduğu görülmüştür. Sıcaklık farkının negatif olduğu soğuk olduğu bölgelerde maksimum çekme gerilmesi kaplamanın alt yüzeyinde ve maksimum basınç gerilmesinin de kaplamanın üst yüzey merkezinde meydana geldiği görülmüştür.
- Kaplamada sıcaklık yükü ve tekerlek yükü beraber varken meydana gelen çekme gerilmesi değerleri maksimum değerlere çıktığı, sıcaklıktan dolayı negatif çekme gerilmesi, tekerlek yükünden dolayı da pozitif çekme gerilmesi meydana geldiği görülmüştür. Her iki yükleme beraber varken oluşan çekme gerilmesi değeri hangisinin etkisi daha büyük ise onun tarafında gerçekleştiği, bu tez kapsamında alınan yükler göz önüne alındığında sıcaklık gerilmesinin etkisiyle negatif bir çekme gerilmesinin meydana geldiği saptanmıştır.
- 5mx5mxh cm ebatlarındaki kaplamada kalınlığın 5 cm, 10 cm, 15 cm ve 20 cm olması durumunda 15 °C'lik bir sıcaklık yüklemesi altında oluşan maksimum çekme gerilmesi değeri, malzemenin eğilmede çekme dayanımının oldukça altında çıkmaktadır. 20 cm kalınlığındaki kaplamada %0 GP içeren betonla ve %15 GP içeren betonla yapılan kaplamada sıcaklık farkının oluşmaması durumunda çekme gerilmesinin oluşmadığı saptanmıştır.
- 5mx15mx20cm ebatlarındaki kaplamada her 5 metrede bir derz kesilmesi durumunda, derz derinliği arttıkça kaplamada kritik bölgelerde meydana gelen çekme gerilmesi değerlerinde azalma olduğu görülmektedir. Halbuki beklenen durum derz derinliğinin artmasıyla birlikte çekme gerilmesi değerlerinin de artması şeklindeydi. %15 GP içeren betonla yapılmış kaplamada meydana gelen çekme gerilmesi değerleri, %0 GP içeren kaplamada meydana gelen çekme gerilmelerinden daha düşük çıktığı da görülmüştür.

- 5mx15mx20cm ebatlarındaki kaplamada açılan derzle birlikte sıcaklık ve tekerlek yükü olması durumunda derzin altında yol boyuna doğrultusunda aşırı çekme gerilmesi değerleri meydana gelmekte olup kaplamanın derz açıldıktan sonra aşağıya doğru çatlamasını açıklamaktadır. Bu çatlama 2,5 cm'lik derz açılan kaplamada da meydana geleceğinden derz derinliği 1/3 ve 1/4 olmasının yanında 1/8 olması durumunda da meydana geleceğini görülmüştür.
- 5mx15mx20cm ebatlarındaki kaplamada derz açılmadığı takdirde kritik bölgelerde meydana gelen maksimum çekme gerilmesi değerleri %0 GP ve %15 GP içeren kaplamalarda neredeyse aynı çıkmaktadır.
- 5mx18mx20cm ebatlarındaki kaplama üzerinde bir tır olması durumunda meydana gelen maksimum çekme gerilmesi değeri çift lastiğin altında kaplama yüzeyinden 5 cm aşağıda hem tekerlek hem de sıcaklık yüklemesi olması durumunda meydana geldiği saptanmıştır. %15 GP içeren beton kaplamada meydana gelen çekme gerilmesi değeri, %0 GP içeren kaplamada meydana gelen çekme gerilmesinden daha düşük çıktığı görülmüştür. Ancak %15 GP içeren beton kaplamada çıkan maksimum çekme gerilmesi değeri, bu betonun eğilmede çekme dayanımı sınır değerine büyük olduğundan kaplamanın çatlayacağı görülmüştür.

5. ÖNERİLER

Beton yol kaplamasında çatlama meydana gelmemesi için kaplamanın altı ile üstü arasında oluşacak sıcaklık farkı, betonun literatürde bulunan elastisite modülü, ısıl genleşme katsayısı ve eğilmede çekme dayanımı göz önüne alındığında C30 beton için 7,81 °C, C25 beton için 6,94 °C ve C20 beton için 5,95 °C'den daha küçük değerde tutulmalıdır. Bu değer, literatürde yapılan bir çalışmadaki hafif beton verileriyle yapıldığında 18,8 °C ve laboratuvarından elde edilen %15 GP içeren beton verileriyle hesaplandığında 45 °C'dir. Sıcaklık farkı bu şekilde tutulduğu sürece kaplamada çatlama meydana gelmeyecektir.

Beton yol kaplamasının altı ile üstü arasındaki sıcaklık farkının azalması çekme gerilmelerinde azalmaya sebep olduğundan bu farkı düşürmek için kaplamada kullanılacak beton içerisine ısı iletim katsayısını büyüten malzeme koyulmalıdır. Böylece ısı daha hızlı bir şekilde kaplamanın altına iletileceğinden kaplamanın altı ile üstü arasındaki sıcaklık farkı ve dolayısıyla oluşacak olan çekme gerilmesi değerleri azalacaktır.

Beton yol kaplamasında üzerine gelen sıcaklık yüklemesi altında oluşacak çekme gerilmesi değerlerini azaltmak için daha küçük ısıl genleşme katsayısı ve elastisite modülü içeren beton kaplama kullanılmalıdır. Bunun için literatürde ısıl genleşme katsayısı $1,0 \times 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ olan geleneksel betona göre ısıl genleşme katsayısı $0,8 \times 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ 'lük değeriyle %20 daha düşük olan hafif beton kullanılmalıdır. Bununla birlikte kaplamada elastisite modülü 30.000-40.000 MPa aralığında olan geleneksel beton yerine elastisite modülü 15.000-20.000 MPa aralığında olan yaklaşık % 50 daha düşük elastisite modülüne sahip hafif beton kullanılmalıdır. Bu tez kapsamında %15 GP ile hafif beton oluşturulmuş olup %15 GP içeren betonun verileri ANSYS programına girilmiştir. Gerçek uygulamada betona eklenen GP'in hafif agrega olmasından dolayı beton içerisinde homojen olmama durumuna karşı su/çimento oranı mümkün mertebe azaltılmalıdır.

20 cm kalınlığındaki kaplamada derz kesimi yapılacaksa maliyet göz önüne alındığında kaplama kalınlığının 1/3'ü veya 1/4'ü oranında kesmek yerine kaplama kalınlığının 1/8'i oranında kesilmelidir. Bu şekilde yapılan bir kesimde de kaplama derz bölgesinden aşağıya doğru çatlayacak ve böylece kullanılan dowel barlar devreye girecektir.

6.KAYNAKLAR

- Aktürk, Y.A. (2024). Beton Yol Kaplamadaki Genleşmenin Perlit Kullanımı İle Azaltılması, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans, Trabzon.
- Alungbe, G. D., Tia, M. & Bloomquist, D. G. (1992). Effects of Aggregate, Water/Cement Ratio, and Curing on the Coefficient of Linear Thermal Expansion of Concrete, Transportation Research Record 1335, Department of Engineering Technology, Central Connecticut State University, New Britain.
- Alwash, A. A. (2024, Mart 10). Non Linear Analysis by Finite Element Method of Rigid Slab Pavements in local Airports, Department of Civil Engineering, University of Babylon: https://www.academia.edu/34115214/Non_Linear_Analysis_by_Finite_Element_Method_of_Rigid_Slab_Pavements_in_local_Airports adresinden alınmıştır.
- Andrew, C. H. & Jeffery, R. R. (1999). Shrinkage and Thermal Cracking of Fast Setting Hydraulic Cement Concrete Pavements in Palmdale, California Department of Transportation.
- Anno, M., Suprpto, S. & Bambang, S. (2023). The Influence of Temperature Variations on Rigid Pavement Concrete Slabs, Journal of the Civil Engineering Forum, 9(2):139-150, Yogyakarta, Indonesia.
- Ashtiani, M. A. Z., Carrasco, C. & Nazarian, S. (2013). Effect of Nonlinear Temperature Gradient on Responses of Jointed Concrete Pavements, Department of Civil Engineering, University of Texas at El Paso, El Paso, Texas, USA.
- Bayraktarova, K., Eberhardsteiner L., Zhou, D. & Blab, R. (2022). Characterisation of the climatic temperature variations in the design of rigid pavements, International Journal of Pavement Engineering, Vol. 23, No. 9, 3222–3235, Avusturya.
- Byrum, C.R. & Hansen, W. (1994). Influence Function Approach to Analysis of Jointed Portland Cement Concrete Pavement, Transportation Research Record, No 1449.
- Choubane, B. & Tia, M. (1992). Pavement Design and Rehabilitation, Transportation Research Record No. 1370, Nonlinear Temperature Gradient Effect on Maximum Warping Stresses in Rigid Pavements, National Academy Press, Washington.
- Cui, C., Lu, Q., Guo, C., & Wang, F. (2022). Analysis of the Coupling Effect of Thermal and Traffic Loads on Cement Concrete Pavement with Voids Repaired with Polymer Grout, Hindawi, Advances in Materials Science and Engineering.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, (2023). Köy Yolları İstatistikleri, Haber Bülteni, Sayı:1.

- Darter, M. I., & Barenberg, E.J. (1977). Design of Zero-Maintenance Plain Jointed Concrete Pavement, Report No. FHWA-RD-77-111, Vol.1, Federal Highway Administration.
- Emiroğlu, M., Yıldız, S. & Özgan, E. (2009). Lastik Agregalı Betonlarda Elastisite Modülünün DeneySEL ve Teorik Olarak İncelenmesi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi, Cilt 24, No 3, 469-476, Ankara.
- Gao, X., Wei, Y. & Huang, W. (2016). Road Materials and Pavement Design, Strain-Based Equivalent Temperature Gradient In Concrete Pavement And Comparison With Other Quantification Methods.
- Gemi, L. & Köroğlu, M.A. (2018). Çekme Bölgesi Lifli Beton Olan Cam Fiber Takviyeli Polimer (GFRP) ve Çelik Donatılı Etriyesiz Kirişlerin Eğilme Etkisi Altındaki Davranışı ve Hasar Analizi, Selçuk Üniversitesi, Müh. Bilim ve Tekn. Derg., c.6, s.4, ss. 654-667, Konya.
- Guo, E., Ricalde, L. & Kawa, I. (2007). FAA Finite Element Design Procedure For Rigid Pavements, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration Air Traffic Organization Operations Planning Office of Aviation Research and Development Washington, DC 20591, DOT/FAA/AR-07/33.
- Hoogeveen, T. & Cusson, D. (2006). Measuring Early-age Coefficient of Thermal Expansion in HighPerformance Concrete, International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation, Lyngby, Denmark.
- Kabay N. (2009). Hafif Agregalı Betonun Boşluk Yapısının Mekanik ve Fiziksel Özelliklere Etkisi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Doktora, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kayıpmaz M. (2019). Beton Yollarda Isıl Genleşme ve Gerilmelerin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Kim, S., Gopalakrishnan, K., Ceylan, H., & Wang K. (2010). Early-Age Response of Concrete Pavements to Temperature and Moisture Variations, Civil, Construction and Environmental Engineering Publication, Iowa State University, Ames, USA.
- Kumar, B. & Mathur, R. (2023, Nisan 15). Early Cracking of Concrete Pavement - causes and repairs, Rigid Pavements Division, CRRI, Yeni Delhi: <https://www.nbmcw.com/article-report/infrastructure-construction/roads-and-pavements/early-cracking-of-concrete-pavement-causes-and-repairs.html> adresinden alınmıştır.
- Lederle, R. E. (2011). Accounting for Warping and Differential Drying Shrinkage Mechanisms in the Design of Jointed Plain Concrete Payments, Master of Science, Michigan Technological University.

- Maitra, S. R., Reddy, K. S. & Ramachandra, L. S. (2013). Estimation of Critical Stress in Jointed Concrete Pavement, 2nd Conference of Transportation Research Group of India, Procedia - Social and Behavioral Sciences 104, India.
- Ongel, A. & 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.
- Piotr, M. & Antoni, S. (2020). Thermal Stress Analysis in Concrete Pavements, J. Transp. Eng., Part B: Pavements, American Society of Civil Engineers.
- Piotr, M. (2014). Thermal stress analysis of jointed plane in concrete pavements, Wroclaw University of Technology, Institute of Civil Engineering, Wyb. Wyspińskiego, 50-370 Wroclaw, Poland.
- Rens, L. (2020). “Derzli Donatısız Beton Yollar” için Tasarım Klavuzu, European Concrete Paving Association, Belçika.
- Richardson, M. & Armaghani, J. M. (1990). Stress Caused by Temperature Gradient in Portland Cement Concrete Pavements, Transportation Research Record, No 1121.
- Sarıbaş, İ. (2019). Geri Dönüşümlü Agrega Katkılı Beton için Gerilme-Şekil Değiştirme Modeli, El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, Vol: 6, No: 1, 156-165.
- Seferoğlu, M. T., Seferoğlu, A. G. & Akpınar M. V. (2015). Beton Yollarda Günlük Meydana Gelen Sıcaklık Değişiminin Oluşturduğu Gerilmelerin 3-D Sonlu Elemanlar Yardımıyla Mekanistik Ampirik Analizi, XIX. Ulusal Mekanik Kongresi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Shreenath, R. & Jeffery, R. (2005). Characterization of Effective Built-in Curling and Concrete Pavement Cracking on the Palmdale Test Sections, University of Illinois at Urbana-Champaign Urbana, Illinois.
- Siddique, Z. Q., Hassain, M. & Meggers, D. (2005). Temperature and Curling Measurements on Concrete Pavement, Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa.
- Subaşı, S., Beycioğlu, A. & Emiroğlu, M., (2009). Genleştirilmiş Kil Agregalı Hafif Betonlarda Bulanık Mantık Yöntemiyle Yarmada Çekme Dayanımı Tahmin Modeli Geliştirilmesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Cilt:XXII, Sayı:3, Eskişehir.
- T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı. (2018). TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Ankara.
- T.C. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, (2016). Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, KGM-ArGe-17-02.

- URL-1. (2023, Ağustos 18). https://www.turkcimento.org.tr/tr/beton_yol adresinden alınmıştır.
- URL-2. (2023, Temmuz 28). <https://www.insaatim.com/beton-yol-catlaklarinin-incelenmesi> adresinde alınmıştır.
- URL-3. (2023, Temmuz 28). <https://www.linkedin.com/pulse/betonarme-yapilarda-çatatlakların-tanımlanması-ve-onarımı-hakan-kara> adresinden alınmıştır.
- URL-4. (2022, Mayıs 16). <https://insapedia.com/hafif-beton-nedir-siniflari-ozellikleri-ve-avantajlari> adresinden alınmıştır.
- URL-5. (2023, Ağustos 23) . <https://webders.net/852/genlesme.html> adresinden alınmıştır.
- URL-6. (2023, Ağustos 23). <https://bursay.com.tr/ozgul-isi> adresinden alınmıştır.
- URL-7. (2022, Aralık 24). <https://tr.wikipedia.org>. Isı transferi adresinden alınmıştır.
- URL-8. (2023, Ağustos 23). https://tr.wikipedia.org/wiki/Isı_iletkenliği adresinden alınmıştır.
- Uzbaş, B. (2014). Beton İçin Geliştirilen Gerilme-Şekil Değiştirme Modellerinin Karşılaştırılması, Politeknik Dergisi, Cilt:17 Sayı: 3 115-126.
- Wang, J., Wang, S. & Jin, F. (2013). Measurement and Evaluation of the Thermal Expansion Coefficient of Rock-Filled Concrete, Article in Journal of Testing and Evaluation.
- Yang, S., Kim, N., Kim, J. & Park J. (2003). Experimental Measurement of Concrete Thermal Expansion, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.5.
- Yeğinobalı, A. (2010). Türkiye'nin İlk Beton Karayolları, TÇMB/Ar-Ge Enstitüsü, Ankara.
- Yıldırım, H. (2022, Eylül 25). Betonarme Yapılarda Karşılaşılan Çatlaklar, Oluşma Nedenleri ve Onarılması, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul: <http://imoistanbul.org/imoarsiv/seminer-notlari-nisan-2017/hasan-yildirim/notlar.pdf> adresinden alınmıştır.
- Yoonseok, C. (2012). Thermal Stress Analysis of Jointed Plain Concrete Pavements Containing Fly Ash and Slag, Doctora, Louisiana State University, A.B.D.
- Yu, H. T., Khazanovich, L. & Darter, M. I. (2004). Consideration of JPCP Curling and Warping in the 2002 Design Guide, 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington.
- Yukitomo, T., Junichi, M. & Yutaka, S. (2011). Study on Effects of Nonliniar Distribution and Slab Thickness on Thermal Stress of Airport Concrete Pavement, Airport

Department, National Institute for Land and Infrastructure Management,
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism 3-1-1, Nagase,
Yokosuka, Kanagawa, 2390826, Japan.

- Zdiri, M. Abriak, N., Neji, J. & Ouezdou, M. B. (2009). Modelling of the Stresses and Strains Distribution in an RCC Pavement Using the Computer Code "Abaqus", *Electronic Journal of Structural Engineering*.
- Zhao, M., Zhang, B., Shang, P., Fu, Y., Zhang, X. & Zhao, S. (2019). Complete Stress–Strain Curves of Self-Compacting Steel Fiber Reinforced Expanded-Shale Lightweight Concrete under Uniaxial Compression, *Materials*, 2979.



ÖZGEÇMİŞ

İlkokulu Çiçeklidüz İlköğretim Okulu'nda, ortaokulu Mevlüt Selami Yardım İlköğretim Okulu'nda ve liseyi de Akçaabat Lisesi'nde okudu. 2005-2006 eğitim öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünü kazandı. 2009-2010 eğitim öğretim yılında İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun oldu ve aynı yıl, aynı bölümde yüksek lisansına başladı. Orta derecede İngilizce bilmektedir. 2012 yılının Şubat ayında yapı denetim firmasında işe başladı ve Aralık ayında işten ayrıldı. 2013 yılında yüksek lisansını bitirdi. Aynı yıl askerliğini bitirdi ve tekrar yapı denetimde çalıştı. Sonrasında 2015 yılında kendi proje ve danışmanlık ofisini açarak piyasada sekiz yıl boyunca yüze yakın statik proje çizimi, şantiye şefliği ve danışmanlık hizmetinde bulundu. Aynı zaman zarfında Karabük, Ordu, Rize, Trabzon, Tunceli ve Adıyaman illerinde şantiye şefliği yaptı. 2020 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde doktora eğitimine başladı. 2023 yılında Adana Meslek Yüksek Okulu'da öğretim görevlisi oldu. Aynı yıl Adana'da yüzyılın faciası olan depreme yakalandı. Yine aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde danışman hocasıyla birlikte 122M335 isimdeki TÜBİTAK'lı projeye başladı ve tez konusuyla paralel devam eden çalışmalarda bulundu.