

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BETON YOL KAPLAMADAKİ GENLEŞMENİN PERLİT KULLANIMI İLE
AZALTILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yeternur Asena AKTÜRK

EKİM 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BETON YOL KAPLAMADAKİ GENLEŞMENİN PERLİT KULLANIMI İLE
AZALTILMASI

Yeternur Asena AKTÜRK

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09 / 09 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 07 /10 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Beton Yol Kaplamadaki Genleşmenin Perlit Kullanımı ile Azaltılması” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca destek veren ve araştırmalarımnda tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR’a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, 122M335 numaralı proje kapsamında destekleyen TÜBİTAK’a, eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarıma ve ortak olarak çalışmalar yürüttüğümüz tüm ekip arkadaşlarıma, deneylerim süresince yardımcı olan KTÜ Ulaştırma Laboratuvar Sorumlusu Hasan Tahsin SELİM’e çok teşekkür ederim.

Son olarak, bilimin ışığında gelişmemize zemin hazırlayan Cumhuriyetimize sonsuz şükranlarımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki bilimsel çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Yeternur Asena AKTÜRK

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Beton Yol Kaplamadaki Genleşmenin Perlit Kullanımı ile Azaltılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR'ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 07/10/2024

Yeternur Asena AKTÜRK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Beton Yollarda Genleşme	2
1.2. Beton Yollarda Genleşmenin Azaltılması	6
1.3. Beton İçeriğinin Genleşmeye Etkisi	8
1.4. Perlit Agregası ve Betonda Kullanımı.....	10
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	20
2.1. Perlit Agregası Deneyleri	20
2.1.1. Genleştirilmiş Perlit Elek Analizi	21
2.1.2. Genleştirilmiş Perlit Birim Hacim Ağırlığının Bulunması	26
2.1.3. Genleştirilmiş Perlit Su Emme Oranının Bulunması	28
2.1.4. Ham Perlit Elek Analizi	31
2.1.5. Ham Perlit Birim Hacim Ağırlığının Bulunması	35
2.1.6. Ham Perlit Su Emme Oranının Bulunması	36
2.2. Perlit İçeren Beton Numune Üretimi.....	37
2.2.1. Genleştirilmiş Perlit İçeren Beton Numune Üretimi.....	38
2.2.2. Ham Perlit İçeren Beton Numune Üretimi.....	42
2.3. Beton Numunelerin Dayanımlarının Belirlenmesi	45
2.3.1. Genleştirilmiş Perlit İçeren Numunelerin Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi	46
2.3.2. Genleştirilmiş Perlit İçeren Numunelerin Eğilmede Çekme Dayanımlarının Belirlenmesi	47
2.3.3. Ham Perlit İçeren Numunelerin Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi	49

2.3.4.	Ham Perlit İçeren Numunelerin Eğilmede Çekme Dayanımlarının Belirlenmesi	49
2.4.	Beton Numune Kesitinde Perlit Agregasının Dağılımı	51
2.5.	Beton Numunelerde Sıcaklık Ölçümleri	54
2.5.1.	Genleştirilmiş Perlitli Numunelerde Thermocouple Ölçümleri	55
2.5.2.	Ham Perlitli Numunelerde Thermocouple Ölçümleri	57
2.6.	Beton Numunelerde Uzama Ölçümleri	59
2.6.1.	Genleştirilmiş Perlitli Numunelerde LVDT Ölçümleri	61
2.6.2.	Ham Perlitli Numunelerde LVDT Ölçümleri	62
2.6.3.	Genleştirilmiş Perlit ve Ham Perlitli Numunelerde Straingauge Ölçümleri	65
2.6.4.	Datalogger ile Veri Alınması	66
2.7.	Perlit İçeren Beton Numunelerin Magnezyum Sülfatlı Ortama Maruz Bırakılması	69
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA	72
3.1.	Perlitin Basınç Dayanımına Etkisi	72
3.2.	Perlitin Çekme Dayanımına Etkisi	76
3.3.	Perlitin Birim Hacim Ağırlığa Etkisi	79
3.4.	Perlitin Betondaki Sıcaklık Dağılımına Etkisi	80
3.4.1.	GP Numunelerde Sıcaklık Dağılımı	85
3.4.2.	HP Numunelerde Sıcaklık Dağılımı	88
3.4.3.	GP Numunelerin Yataydaki Sıcaklık Dağılımı	91
3.4.4.	HP Numunelerin Yataydaki Sıcaklık Dağılımı	94
3.5.	LVDT Ölçümlerinin Değerlendirilmesi	97
3.6.	Straingauge Ölçümlerinin Değerlendirilmesi	102
4.	SONUÇLAR	108
5.	ÖNERİLER	110
6.	KAYNAKLAR	111
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

BETON YOL KAPLAMADAKİ GENLEŞMENİN PERLİT KULLANIMI İLE AZALTILMASI

Yeternur Asena AKTÜRK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR
2024, 116 Sayfa

Beton yol kaplamada sıcaklık etkisi ile oluşan genleşmelere bağlı çekme gerilmelerinin betonun çekme dayanımını aşması genleşme çatlaklarına neden olmaktadır. Bu çalışmada beton içeriğinde genleştirilmiş perlit ve ham perlit agregası kullanılarak genleşme miktarlarının azaltılması ve çatlak oluşmaması hedeflenmiştir. Perlit betonun toplam hacminin %0, 5, 10, 15, 30 ‘u oranında kullanılmıştır. Betonun basınç ve çekme mukavemetleri genleştirilmiş perlit kullanımında azalırken ham perlit kullanımında değişim olmamıştır. Beton numunelerin ısıtılması ile yapılan sıcaklık deneylerinde thermocouple ile sıcaklık değişimi, LVDT ve strain gauge sensörlerle genleşmenin neden olduğu uzama değerleri tespit edilmiştir. Beton numunelerin üst ve alt yüzey sıcaklığı arasındaki farkın en az ölçüldüğü karışım ham perlitli HP30 olmuştur. Isıtılma sürecinde beton numunelerin en çok uzama yaptığı yer ısı kaynağına yakın üst kısım olurken en az alt kısımda uzama olmuştur. En az uzama 0,02 mm ile GP30 numunesinde olurken diğer ham perlit ve genleştirilmiş perlit numunelerin tümünde en fazla 0,05 mm uzama olmuştur. Perlitli numunelerin sıcaklık deneylerindeki uzama miktarları kırıntı numunenin çatlamasına neden olacak 0,06 mm uzamadan az olmuştur ve hiçbir numunede çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Perlitli numunelerin mekanik ve ısı özellikleri değerlendirildiğinde GP5, GP10, HP5, HP10, HP15 ve HP30 karışımların beton yol kaplamada kullanılabilir olduğu söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Beton Yol, Çatlak, Isıl Genleşme, Perlit

Master Thesis

SUMMARY

REDUCTION OF EXPANSION IN CONCRETE ROAD PAVEMENT BY USING PERLITE

Yeternur Asena AKTÜRK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Muhammet Vefa AKPINAR
2024, 116 Pages

In concrete road pavement, tensile stresses due to expansions caused by the effect of temperature loads exceed the tensile strength of the concrete, causing expansion cracks. In this study, it was aimed to reduce the expansion amounts and prevent cracks by using expanded perlite and raw perlite aggregate in the concrete content. Perlite was used at the rate of 0, 5, 10, 15, and 30% of the total volume of the concrete. While the compressive and tensile strengths of the concrete decreased with the use of expanded perlite, there was no change with the use of raw perlite. In the temperature tests carried out by heating the concrete samples, the temperature change with thermocouple and the elongation values with LVDT and strain gauge sensors were determined. The mixture with the least measured difference between the upper and lower surface temperatures of the concrete samples was HP30. While the place where the concrete samples elongated the most during the heating process was the upper part close to the heat source, the least elongation was in the lower part. While the minimum elongation was 0.02 mm in the GP30 sample, the maximum elongation was 0.05 mm in all other raw and expanded perlite samples. The elongation amounts in the temperature tests of the perlite samples were less than the 0.06 mm elongation that would cause cracking in the beam sample, and no crack formation was observed in any sample. When the mechanical and thermal properties of the perlite samples were evaluated, it can be said that GP5, GP10, HP5, HP10, HP15 and HP30 mixtures can be used in concrete road pavement.

Key Words: Concrete Road, Crack, Thermal Expansion, Perlite

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Derz bölgesinde oluşan köşe çatlağı.....	2
Şekil 2. Beton kaplamada oluşan ısı genleşme çatlağı	2
Şekil 3. Günlük sıcaklık değişimine bağlı beton plağın farklı derinlikteki sıcaklıkları.....	3
Şekil 4. Gündüz ve gece sıcaklık değişiminde beton plakta oluşan maksimum gerilmeler	4
Şekil 5. Uzunluk ve sıcaklık farkına bağlı çekme gerilmesinin değişimi.....	7
Şekil 6. Sertleşmiş betonda kıvrılma ve derzlerin etkisi.....	7
Şekil 7. Isıl genleşmeye bağlı beton plakta çatlak oluşum yüzdesi	9
Şekil 8. Sıcaklık değişiminde normal ve hafif betonların hacimsel değişimi.....	10
Şekil 9. Perlit agregasının ham halden genleştirilmiş hale geçiş şeması	11
Şekil 10. Ham perlit ve genleştirilmiş perlit	11
Şekil 11. Türkiye'deki perlit yatakları	13
Şekil 12. K1 normal beton ile %20 genleştirilmiş perlit içeren betona sülfat etkisi.....	14
Şekil 13. Farklı genleştirilmiş perlit oranlarında basınç dayanımı	15
Şekil 14. Ham perlit ve ısı iletkenlik ilişkisi.....	16
Şekil 15. Genleştirilmiş perlit miktarının genleşmeye etkisi	17
Şekil 16. Ağırlıkça kullanılan genleştirilmiş perlitin 90 gün kür periyodunda basınç dayanımı	18
Şekil 17. GP1 ve GP2 Genleştirilmiş perlit agregaları	21
Şekil 18. Genleştirilmiş perlit agregası için kullanılan elekler	22
Şekil 19. Hassas terazi ile elekte kalan GP agregaların tartılması	22
Şekil 20. GP1 Gradasyon eğrisi	23
Şekil 21. GP2 Gradasyon eğrisi	24
Şekil 22. Beton numune üretiminde kullanılan agrega boyutu ve aralığı.....	24
Şekil 23. Genleştirilmiş perlit agregası GP3.....	25
Şekil 24. GP3 Gradasyon eğrisi	26
Şekil 25. Hacmi belli kapta genleştirilmiş perlit agregası	27
Şekil 26. Su emme deneyi için suda bırakılan GP agregası (2 ve 24 saat)	29
Şekil 27. Suda bekletilip süzildükten sonra GP3 agregası (2 ve 24 saat)	29
Şekil 28. GP agrega yüzeyindeki suyun uzaklaştırılması	30

Şekil 29.	Doygun kuru yüzey haline gelen GP3 agregası (2 ve 24 saat)	30
Şekil 30.	HP1 kalın ham perlit agregası.....	31
Şekil 31.	HP2 ince ham perlit agregası.....	32
Şekil 32.	Ham perlit elek analizi deneyi	32
Şekil 33.	HP1 Gradasyon eğrisi	33
Şekil 34.	HP2 Gradasyon eğrisi	34
Şekil 35.	Hacmi belli kapta gevşek halde HP2 agregasının tartılması	35
Şekil 36.	Doygun kuru yüzey ve kuru haldeki ham perlit agregası HP1	36
Şekil 37.	Doygun kuru yüzey ve kuru haldeki ham perlit agregası HP2	36
Şekil 38.	Beton numune için gerekli GP agregasının tartılması	38
Şekil 39.	GP agreganın suya doymun hale getirilmesi	38
Şekil 40.	GP deneylerinde maske ve eldiven kullanımı	39
Şekil 41.	Beton numune kalıplarının yağlanması	39
Şekil 42.	GP küp numuneler	40
Şekil 43.	Sıcaklık ölçümü için pipetle delik oluşturulması.....	40
Şekil 44.	Genleştirilmiş perlitli homojen beton karışımı elde etme aşamaları	41
Şekil 45.	Kür havuzunda 7, 28 ve 90 gün bekletilen GP numuneler	41
Şekil 46.	HP karışımlarında kullanılacak miktarda hazır edilen perlit agregaları	42
Şekil 47.	Hazır beton mikserinden C30 yaş betonun alınması	43
Şekil 48.	HP agregasının karışıma aşamalı olarak eklenmesi.....	43
Şekil 49.	Betoniye ile HP agreganın yaş betona homojen olarak karıştırılması.....	44
Şekil 50.	HP kiriş numunesinde pipet yerleşimi	44
Şekil 51.	Basınç düzeneğine yerleştirilen GP küp numune	46
Şekil 52.	Eğilme test düzeneğine yerleştirilen kiriş numune	47
Şekil 53.	Kiriş numunenin mesnetlere yerleştirilmesinin üstten görünüşü.....	48
Şekil 54.	Eğilme testi sonucu gevrek kırılan GP kiriş numunesi.....	48
Şekil 55.	Kür süresi dolan numunelerin havuzdan çıkarılması.....	49
Şekil 56.	Eğilmede çekme test düzeneğine yerleştirilen HP numune.....	50
Şekil 57.	Eğilme testi sonunda kırılan HP kiriş numune	50
Şekil 58.	Beton spiral ile numune kesilmesi	51
Şekil 59.	Geleneksel betonun kesim sonrası kesiti GP0 ve HP0	52
Şekil 60.	%5 Perlit içeren GP5 ve HP5 numunelerin kesim sonrası kesiti.....	52
Şekil 61.	%10 Perlit içeren GP10 ve HP10 numunelerin kesim sonrası kesiti.....	53
Şekil 62.	%15 Perlit içeren GP15 ve HP15 numunelerin kesim sonrası kesiti.....	53

Şekil 63.	%30 Perlit içeren GP30 ve HP30 numunelerin kesim sonrası kesiti.....	54
Şekil 64.	10×10×50 cm kiriş numunede thermocouple yerleşimi	55
Şekil 65.	10×10×50 cm kiriş numunede yatayda thermocouple yerleşimi.....	55
Şekil 66.	Thermocouple ile sıcaklık ölçümü düzeneği	56
Şekil 67.	Thermocouple veri toplama cihazı	57
Şekil 68.	Thermocouple ile sıcaklık ölçümü.....	58
Şekil 69.	Ham perlit kiriş numunesinde thermocouple yerleşimi.....	58
Şekil 70.	Sıcaklık ölçümünde yan yüzeylerin izole edilmesi	59
Şekil 71.	Yatayda sıcaklık ölçümü.....	59
Şekil 72.	10×10×50 cm kiriş numunede üst ve alt yüzeyde LVDT yerleşimi	60
Şekil 73.	10×10×50 cm kiriş numunede üst ve orta yüzeyde LVDT yerleşimi.....	60
Şekil 74.	LVDT sensörlerle sıcaklık deneyinde uzama ölçümü yapılması	61
Şekil 75.	LVDT sensörlerin sabitlenmesi	62
Şekil 76.	LVDT yerleşimi için kılavuz çizgiler	63
Şekil 77.	LVDT 1,2,3,4 sensörlerin yerleşimi	64
Şekil 78.	Numunede straingauge yerleşimi	65
Şekil 79.	Straingauge sensörlerin yapıştırılması ve ısıdan korunması.....	66
Şekil 80.	Sıcaklık deneyinde straingauge sensörleri ile ölçüm.....	66
Şekil 81.	Datalogger kanallarına bağlantı kablosu ile veri akışı.....	67
Şekil 82.	Deney sırasında datalogger yazılım programı arayüzü	68
Şekil 83.	Magnezyum sülfat çözeltisinin hazırlanması.....	70
Şekil 84.	MgSO ₄ çözeltisine bırakılan GP ve HP numuneler	70
Şekil 85.	180 günlük MgSO ₄ kürü sonunda GP ve HP numuneler	71
Şekil 86.	Genleştirilmiş perlitli beton numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları	74
Şekil 87.	Ham perlitli beton numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları.....	75
Şekil 88.	GP ve HP 28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması	75
Şekil 89.	Genleştirilmiş perlitli beton kiriş numunelerin 28 ve 90 günlük eğilmede çekme dayanımları	77
Şekil 90.	Ham perlitli beton kiriş numunelerin 28 ve 90 günlük eğilmede çekme dayanımları	78
Şekil 91.	GP ve HP 28 günlük eğilmede çekme dayanımlarının karşılaştırılması	78
Şekil 92.	GP ve HP karışımlarının yoğunlukları	80
Şekil 93.	GP ve HP numunelerin üst yüzey ile en derindeki 10 cm noktasının sıcaklık farkı grafiği.....	81

Şekil 94.	Genleştirilmiş perlit oranının sıcaklık dağılımına etkisi.....	83
Şekil 95.	Ham perlit oranının sıcaklık dağılımına etkisi.....	83
Şekil 96.	50°C üst yüzey sıcaklığında GP numunelerdeki sıcaklık dağılımı.....	84
Şekil 97.	50°C üst yüzey sıcaklığında HP numunelerdeki sıcaklık dağılımı.....	84
Şekil 98.	GP0 kırı ş numunesinde derinlik boyunca sıcaklık değ iş imi.....	85
Şekil 99.	GP5 kırı ş numunesinde derinlik boyunca sıcaklık değ iş imi.....	86
Şekil 100.	GP10 kırı ş numunesinde derinlik boyunca sıcaklık değ iş imi.....	86
Şekil 101.	GP15 kırı ş numunesinde derinlik boyunca sıcaklık değ iş imi.....	87
Şekil 102.	GP30 kırı ş numunesinde derinlik boyunca sıcaklık değ iş imi.....	87
Şekil 103.	HP0 kırı ş numunesinde derinlik boyunca sıcaklık değ iş imi.....	88
Şekil 104.	HP5 kırı ş numunesinde derinlik boyunca sıcaklık değ iş imi.....	89
Şekil 105.	HP10 kırı ş numunesinde derinlik boyunca sıcaklık değ iş imi.....	89
Şekil 106.	HP15 kırı ş numunesinde derinlik boyunca sıcaklık değ iş imi.....	90
Şekil 107.	HP30 kırı ş numunesinde derinlik boyunca sıcaklık değ iş imi.....	90
Şekil 108.	GP0 kırı ş numunesinin yatay kesitte sıcaklık değ iş imi	91
Şekil 109.	GP5 kırı ş numunesinin yatay kesitte sıcaklık değ iş imi	92
Şekil 110.	GP10 kırı ş numunesinin yatay kesitte sıcaklık değ iş imi	92
Şekil 111.	GP15 kırı ş numunesinin yatay kesitte sıcaklık değ iş imi	93
Şekil 112.	GP30 kırı ş numunesinin yatay kesitte sıcaklık değ iş imi	93
Şekil 113.	HP0 kırı ş numunesinin yatay kesitte sıcaklık değ iş imi	94
Şekil 114.	HP5 kırı ş numunesinin yatay kesitte sıcaklık değ iş imi	95
Şekil 115.	HP10 kırı ş numunesinin yatay kesitte sıcaklık değ iş imi	95
Şekil 116.	HP15 kırı ş numunesinin yatay kesitte sıcaklık değ iş imi	96
Şekil 117.	HP30 kırı ş numunesinin yatay kesitte sıcaklık değ iş imi	96
Şekil 118.	GP0 numunesinin LVDT deplasman grafi ğ i	97
Şekil 119.	GP5 numunesinin LVDT deplasman grafi ğ i	98
Şekil 120.	GP10 numunesinin LVDT deplasman grafi ğ i	98
Şekil 121.	GP15 numunesinin LVDT deplasman grafi ğ i	99
Şekil 122.	GP30 numunesinin LVDT deplasman grafi ğ i	99
Şekil 123.	HP0 numunesinin LVDT deplasman grafi ğ i	100
Şekil 124.	HP5 numunesinin LVDT deplasman grafi ğ i	100
Şekil 125.	HP10 numunesinin LVDT deplasman grafi ğ i	101
Şekil 126.	HP15 numunesinin LVDT deplasman grafi ğ i	101
Şekil 127.	HP30 numunesinin LVDT deplasman grafi ğ i	102

Şekil 128. Sıcaklık değişiminde beton numunenin genleşme modeli.....	103
Şekil 129. GP0 numunesinin strain gauge değerlerine göre uzaması.....	104
Şekil 130. GP5 numunesinin strain gauge değerlerine göre uzaması.....	104
Şekil 131. GP10 numunesinin strain gauge değerlerine göre uzaması.....	105
Şekil 132. GP30 numunesinin strain gauge değerlerine göre uzaması.....	105
Şekil 133. HP0 numunesinin strain gauge değerlerine göre uzaması.....	106
Şekil 134. HP10 numunesinin strain gauge değerlerine göre uzaması.....	106
Şekil 135. HP15 numunesinin strain gauge değerlerine göre uzaması.....	107
Şekil 136. HP30 numunesinin strain gauge değerlerine göre uzaması.....	107



TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Sıcaklık ve tekerlek yüklerine bağlı gerilme analizleri (Kayıpmaz, 2019).....	5
Tablo 2. Perlitin yüzdesel kimyasal bileşimi (URL-1)	12
Tablo 3. GP1 Elek analizi sonuçları.....	22
Tablo 4. GP2 Elek analizi sonuçları.....	23
Tablo 5. GP3 Elek analizi sonuçları.....	25
Tablo 6. GP1 için gevşek haldeki birim hacim ağırlığı (gram/santimetreküp).....	27
Tablo 7. GP2 için gevşek haldeki birim hacim ağırlığı (gram/santimetreküp).....	28
Tablo 8. GP3 için gevşek haldeki birim hacim ağırlığı (gram/santimetreküp).....	28
Tablo 9. GP3 agregasının su emmesi.....	31
Tablo 10. HP1 Elek analizi sonuçları.....	33
Tablo 11. HP2 Elek analizi sonuçları.....	34
Tablo 12. HP1 için gevşek haldeki birim hacim ağırlığı (gram/santimetreküp).....	35
Tablo 13. HP2 için gevşek haldeki birim hacim ağırlığı (gram/santimetreküp).....	35
Tablo 14. HP1 ve HP2 ham perlit agregalarının su emmesi	37
Tablo 15. C30 hazır betonun karışım tasarımı	37
Tablo 16. Magnezyum sülfata maruziyet öncesi numune kütleleri	69
Tablo 17. Perlit oranlarının ince agregaya göre yüzdeleri	73
Tablo 18. Genleştirilmiş perlit ortalama basınç dayanımı değerleri	74
Tablo 19. Ham perlit ortalama basınç dayanımı değerleri.....	74
Tablo 20. Genleştirilmiş perlit ortalama çekme dayanımı değerleri.....	76
Tablo 21. Ham perlit ortalama çekme dayanımı değerleri.....	77

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<i>GP</i>	: Genleştirilmiş perlit
<i>HP</i>	: Ham Perlit
<i>MPa</i>	: Mega Pascal
°C	: Santigrat derece
%	: Yüzde
MgSO ₄	: Magnezyum sülfat
<i>cm</i>	: Santimetre
<i>mm</i>	: Milimetre
<i>g</i>	: Gram
<i>D_{max}</i>	: En büyük tane boyutu
kN	: Kilo Newton
ε	: Birim uzama
ΔL	: Uzunluktaki değişim

1. GENEL BİLGİLER

Beton yol, zemin üzerinde alt temel ve temel tabakalarının oluşturulması sonrası uygulanan beton üstyapı kaplamasından oluşan rijit yol kaplamasıdır. Üstyapı kaplaması olarak beton yol uygulaması 19. yüzyıl sonunda başlayarak günümüze kadar artarak devam etmektedir (Heimans, 2002). Türkiye’de beton yol kaplamanın kullanımı belediye ve il özel idareleri tarafından son 10 yılda artış göstermektedir.

Beton yol kaplamanın üstyapı olarak avantajları; yerli malzemeler ile oluşturulması, tekerlek izi oluşumuna karşı dirençli olması, çevre dostu olması, daha az mevsimsel hasara uğrar olması, uzun ömürlü olması şeklinde sıralanabilir (Ağar vd., 1996). Günümüzde Türkiye’de beton yol için birim fiyat listesi yakın zamanda oluşturulmakta olup yapılan tahmini fiyat belirleme çalışmalarında ekonomik açıdan asfalt kaplamaya göre daha uygun olacağı bildirilmiştir (Akbelen & Yaman, 2022) (Kadioğlu, 2020). Beton yolların uzun kullanım ömürleri ile yerli malzeme kullanılması gibi nedenlerle ekonomik katkı sağlayacağı ve ülkemizde kullanımının artırılması gerektiği düşünülmektedir.

Beton yollarda tasarım hatası, uygulama hatası, aşırı yükleme, sıcaklık etkisi nedenleriyle problemler oluşmaktadır. Yatayda doğrudan güneşin verdiği ısıya maruz kalan en büyük yapı beton yollardır. Özellikle 12-14.00 saatleri arasında sıcaklık etkisiyle beton yollarda genleşme meydana gelmektedir. Bu genleşmelerin indirgenmesi için derz kesimi yapılmaktadır. Derz kesimi beton yol kesiti boyunca mukavemetin azalmasına neden olmaktadır. Derz kesimine bağlı olarak rastgele çatlaklar oluşabilmektedir (Şekil 1). Isıl genleşmelerin oluşturduğu gerilmelerin betonun çekme mukavemetini aşması halinde ısı çatlakları oluşmaktadır (Şekil 2).



Şekil 1. Derz bölgesinde oluşan köşe çatlağı (URL-2)



Şekil 2. Beton kaplamada oluşan ısı genleşme çatlağı (URL-5)

1.1. Beton Yollarda Genleşme

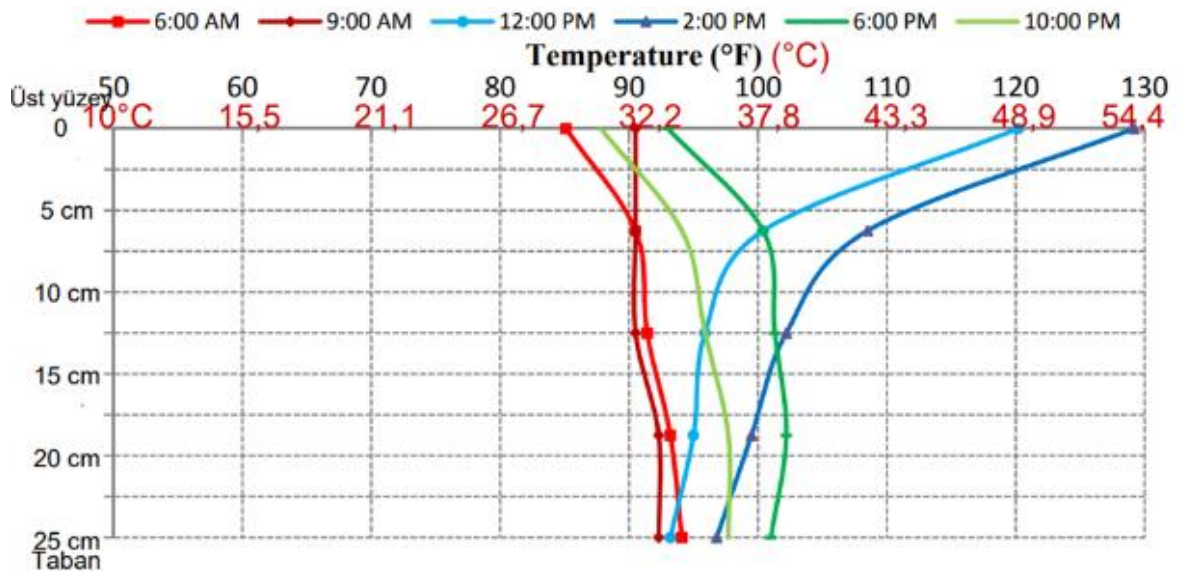
Beton yol kaplamasının kullanımının artmasıyla kaliteli, uzun ömürlü, ekonomik, dayanıklı ve güvenli beton yol için farklı tasarım, karışım ve üretim yöntemleri geliştirilmiştir. Beton yollarda karşılaşılan bozulmalar genel olarak uygun olmayan tasarım, trafik yükü, donma-çözülme kayıpları, kimyasal etkiler ve ısı genleşmeye bağlı çatlak oluşumu sonucu meydana gelmektedir.

Beton çimento, su ve agrega maddelerinin birleşimi ile oluşan bir yapı malzemesidir. Büyük boyutlarda kullanıldığında kütle betonu olarak adlandırılmakta olup geleneksel boyutlara göre farklı davranış sergilemektedir. Beton yol kaplama da bir tür kütle betonu olarak değerlendirilebilir. Geleneksel küçük boyutlu yapı elemanlarına kıyasla gerilme

oluşumu, gerilme aktarımı ve meydana gelebilecek deformasyonlar farklılık göstermektedir (ACI 207.1).

Bir kütlede sıcaklık değişimlerinden dolayı oluşan gerilmeler termal(ısıl) gerilmeler olarak adlandırılmaktadır (Callister & Rethwisch 2013). Isıl gerilmeler nedeniyle kütlelerin niteliğine göre değişebilen boyutlarda deformasyonlar oluşmaktadır. Özellikle kütlelerin dış ve iç bölgelerinin aynı oranda sıcaklık değişimi göstermemesi ısıl gerilmeleri artırmaktadır. Beton yol kaplaması gibi bir kütlelerin dış bölgelerinin sıcaklıktan daha hızlı etkilenip genişlemesinin yanında iç bölgelerinde bunun daha yavaş ve kısıtlı olması gerilme artışıyla deformasyon oluşumunu tetiklemektedir. Beton yollarda hasar oluşum mekanizması incelendiğinde trafik yükleri ve yük aktarımı kapasitesinin etkisinin yanı sıra sıcaklık değişiminin yadsınamaz rolü olduğu belirlenmiştir (Hiller & Roesler,2005).

Beton yol temel olarak rijit bir üstyapı kaplaması ile alt temel tabakasından oluşmaktadır. Günlük sıcaklık değişimi etkisiyle beton kaplamanın yüzeyi ile tabanı arasında sıcaklık farkları oluşmaktadır. Günlük sıcaklık değişimine bağlı olarak beton plaklarda yapılan sıcaklık ölçümlerinde iklim, mevsim, bölge farklılıkları oluşturmaktadır. Ekstrem hava şartları haricinde yapılan arazi çalışmalarında 25 cm kalınlıktaki beton plağın üst yüzeyi ile tabanı arasındaki maksimum sıcaklık farkı 20 °C derece mertebesinde ölçülmüştür (Şekil 3) (Chung 2012).



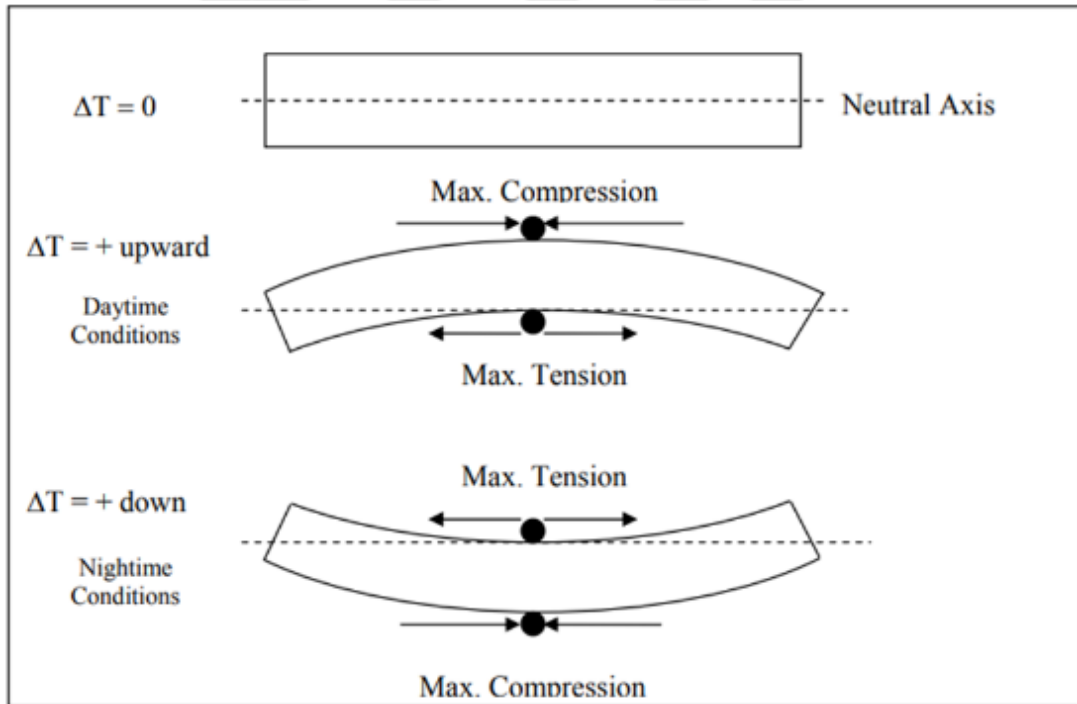
Şekil 3. Günlük sıcaklık değişimine bağlı beton plağın farklı derinlikteki sıcaklıkları (Chung 2012).

Gün içindeki sıcaklık değişimi beton üzerinde en etkili olduğu aralık öğle vakti 12.00 ile 14.00 arasındadır ve en yüksek sıcaklık değişimi günlük sıcaklıkların arttığı yaz aylarında olmaktadır (Yu vd.,1998) (Alawi & Helal, 2014).

Doğrusal olmayan sıcaklık dağılımı, beton plağın ağırlığı, alt temelle plak arasındaki sürtünme beton plak içinde gerilmeler oluşturmaktadır (Jeong vd.,2012).

Betonun ısı genleşme yapmasının engellenmesi betonda ısıl etkilere bağlı gerilmeler oluşturmaktadır (Juknevicius vd.,2006). Isıl gerilmeler çatlak benzeri bozulmalar meydana getirerek beton yolda deformasyona yol açmaktadır.

Gece ve gündüz sıcaklık değişimi beton plakta aşağı ve yukarı yönlü kıvrılmaya sebep olmaktadır (Şekil 4) (Timm & Barrett, 2005). Beton plakta maksimum çekme gerilmesi gündüz sıcaklık değişiminde beton plağın üst yüzey ve orta noktasında; gece sıcaklık değişiminde maksimum gerilme beton plağın taban ve orta noktasında meydana gelmektedir.



Şekil 4. Gündüz ve gece sıcaklık değişiminde beton plakta oluşan maksimum gerilmeler (Timm & Barrett, 2005)

Westergaard, Eisenmann ve Bradbury metotları kullanılarak beton plağın farklı kalınlıkları ve farklı sıcaklık koşulları için yapılan analizlerde plak kalınlığı az iken trafik yüklerinin daha fazla gerilme oluşturduğu ancak yaygın uygulamada kullanılan kalınlıklarda

sıcaklık etkisiyle oluşan gerilmelerin daha etkili olduğu görülmüştür (Tablo 1) (Kayıpmaz, 2019). Uygulamada yaygın olarak tercih edilen 200-250 mm plak kalınlıkları için yapılan analizde sıcaklık etkisiyle oluşan çekme gerilmelerinden %70 daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Yapılan analizlerde de görüleceği üzere beton yol tasarımında sıcaklık etkisinin dikkate alınması gerekliliği göz önünde bulundurulmalıdır. Sıcaklığın etkisi plak kalınlığı arttıkça artmaktadır. Beton plak kalınlığı azaldıkça gerilme değerleri de azalmaktadır (Klemczak & Zmij, 2021). Beton plağın derinlik boyunca benzer davranış sergilemesi, dış unsurlardan eşit etkilenmesi oluşacak alt ve üst yüzey farklarını indirgeyeceği için gerilmeler olmayacak veya etkisiz değerlerde kalacaktır.

Tablo 1. Sıcaklık ve tekerlek yüklerine bağlı gerilme analizleri (Kayıpmaz, 2019)

h (mm)	Eğilmede Çekme Gerilmeleri (MPa)			
	Tekerlek yükü kenar (Westergaard)	Tekerlek yükü merkez (Westergaard)	Sıcaklık kenar (Bradbury)	Sıcaklık merkez (Eisenmann)
100	3,97	3,20	2,2	2,625
150	2,44	1,80	2,2	2,625
200	1,64	1,16	2,27	3,15
250	1,17	0,81	2,26	2,24
300	0,88	0,60	2,15	1,78
350	0,67	0,46	1,99	1,46
400	0,53	0,36	1,74	1,22

Beton yol kaplamalarında sıcaklık değişimi, alkali-silika reaksiyonları, zararlı ortamlara maruziyet, donma-çözülme gibi etkilerle genleşme meydana gelmektedir. Beton plakta gerçekleşen genleşme çekme gerilmeleri oluşturmaktadır. Genleşmeye bağlı gelişen gerilmeler beton plakta çatlaklara ve bozulmalara sebebiyet vermektedir.

Betonun sıcaklığı, çevresel faktörler ve yapım sırasındaki işlemler nedeniyle değişebilir (Sun, 2016). Örneğin, betonun yapıldığı ortamın sıcaklığı, güneş ışığı, rüzgâr ve yağmur gibi faktörler, betonun sıcaklığını etkileyebilir. Sıcaklığa bağlı genleşmede, betonun sıcaklığı arttığında genleşir ve soğuduğunda küçülür. Bu genleşme ve küçülme, betonda gerilme oluşmasına neden olur. Bu gerilmeler, betonun dayanımını aşar ve çatlakların oluşmasına neden olabilir.

Beton yolların kullanımında sıcaklık etkisi oldukça önemli hale gelmektedir. Betonun sıcaklığı, beton yüzeyinin şeklini, genleşme-küçülme hareketlerini etkileme potansiyeline sahiptir. Beton yollar, yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında genleşebilir ve düşük

sıcaklıklarda ise büzülebilir. Bu genişleme ve büzülmenin oluşturacağı gerilme kuvvetleri, beton yolda çatlakların oluşmasına neden olarak yolun ömrünü ve dayanıklılığını olumsuz yönde etkiler. Bu nedenle, beton yolların tasarımında sıcaklık etkisi dikkate alınmalı ve betonun genişleme davranışı kontrol altında tutulmalıdır.

Beton plaklarda genişleme oluşturarak çatlak gelişimi yapan bir diğer neden de ASR olarak bilinen alkali silika reaksiyonudur. Alkali-silika reaksiyonu çimentodaki alkali hidroksitlerle aktif silis içeren agregaların yeterli nem ortamında tepkimeye girmesi ile gerçekleşmektedir (Malvar vd.,2002). Alkali silika reaksiyonu sonucu oluşan jeller zamanla su emerek şişer ve betonda bozulmaya neden olabilecek çatlak oluşturur. Beton yol plağında genişlemeye neden olan ASR açısından beton tasarımında seçilecek agreganın alkali silika reaksiyonu açısından zararsız olması önemli olmaktadır.

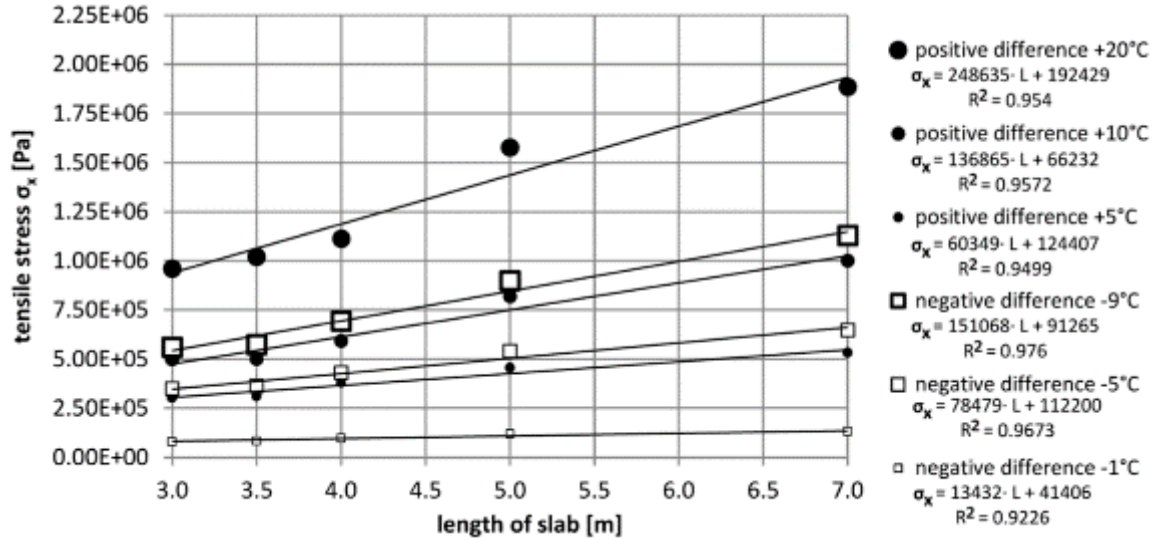
Beton yol kaplamasında ve kütle betonlarında erken dönemde de çatlak oluşumu olabilmektedir. Beton yaş halden priz aldığı hale geçerken çimento ve suyun reaksiyonu sonucu hidrasyon ısısı meydana gelmektedir. Beton kütlenin dış yüzeyleri bu süreçte dış ortamla teması sonucu sıcaklık açısından daha az iken iç bölgelerde sıcaklık artışı olmaktadır. Kütlenin bölgeleri arasında oluşan sıcaklık farkları gerilmeler bunlara bağlı da çatlaklar oluşmasına sebebiyet vermektedir. Erken dönemde çatlak oluşumunu önlemek için çimento türünün uygun seçilmesi, katkı kullanımı, kürün etkili gerçekleştirilmesi gibi üretim ve tasarım detaylarına dikkat etmek gerekmektedir. Yapılan çalışmada etkili kürleme için yeni bir otomatik sistem test edilerek dayanımı artırıcı ve çatlak gelişimini önleyici etkileri gösterilmiştir (Ha vd.,2014). Betonun erken dönemde oluşturduğu ısı etkileri, ilk 20 gün içinde gerçekleşmekte ve sonrasında kararlı hale gelmektedir (Cha & Jin,2020).

Beton yollarda meydana gelen çatlakların yolun kalitesini azalttığı bir gerçektir. Kullanım ömrü süresinde oluşan çatlakların düzeltilmesi için farklı onarım yaklaşımları bulunmaktadır (King & Taylor,2022). Beton yolda kısmi bozulmaların düzeltilmesinden aşırı deforme olmuş beton yol kaplamanın tamamen kaldırılmasına kadar ilerleyebilecek senaryolar mevcuttur. Geliştirebileceğimiz yeni tekniklerle çatlakların oluşumunu durdurmak, boyutunu azaltmak beton yol kaplamasının sağlığı için etkili olacaktır.

1.2. Beton Yollarda Genleşmenin Azaltılması

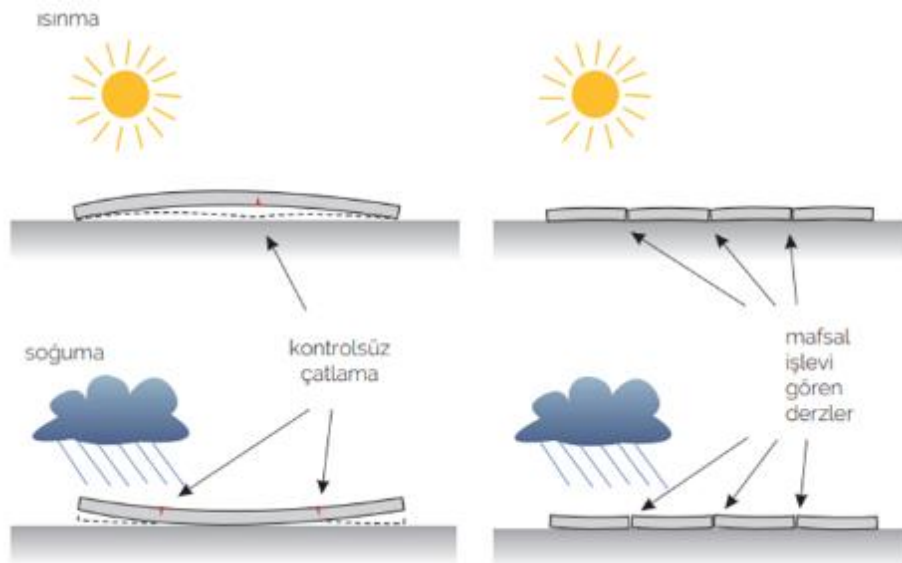
Beton yol plak kaplamanın uzunluğu arttıkça sıcaklık etkisi ile oluşan genişleme temelli ısı çekme gerilme değerleri artmaktadır. Beton plak kütlesinin boyutunun

küçültülmesiyle gerilme değerleri düşmektedir. Farklı beton yol plak uzunlukları için yapılan analizlerde uzunluk ve sıcaklık farkı artışıyla çekme gerilmelerinin yükseldiği gösterilmektedir (Mackiewicz & Szydao, 2020) (Şekil 5).



Şekil 5. Uzunluk ve sıcaklık farkına bağlı çekme gerilmesinin değişimi (Mackiewicz & Szydao, 2020)

Beton plak kesitinde nem ve sıcaklığa bağlı gelişen genleşme ve büzülmelerin sonucu çatlak oluşumunun etkilerinin azaltılması için enine derz kesimi yapılmaktadır (Puyan,2003). Sertleşmiş beton üzerindeki sıcaklık değişiminin etkisinin kısıtlanması amacıyla platform boyutları derzler ile sınırlandırılmaktadır (Şekil 6) (TÇMB,2020).



Şekil 6. Sertleşmiş betonda kıvrılma ve derzlerin etkisi (TÇMB,2020)

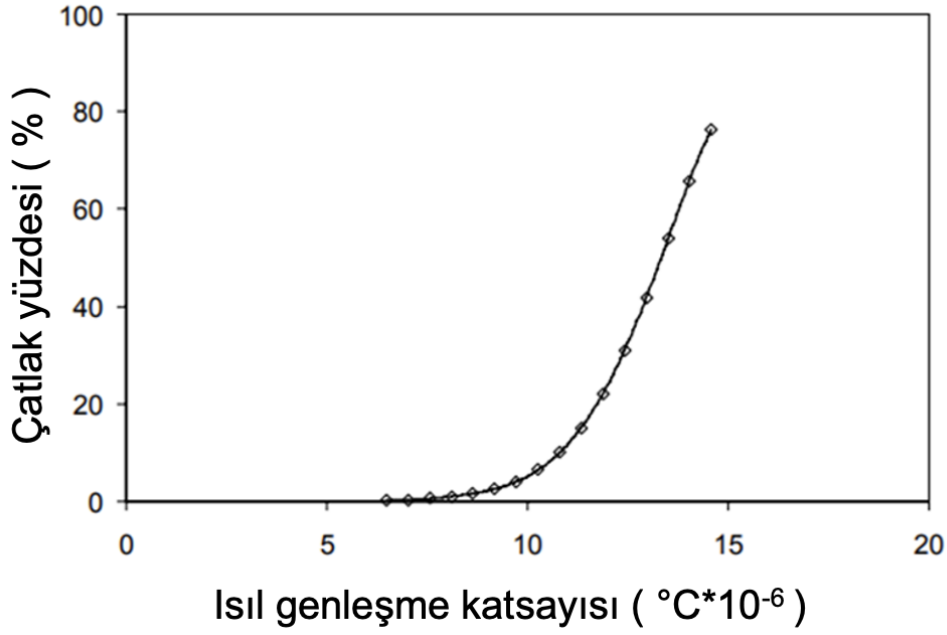
Derz kesiminde çatlakların oluşumunu engellemek yerine kontrol altında tutmak ve derz boşluğuna yönlendirmek temel prensiptir. Derz kesimi yapıldığında beton yol plağının yük aktarımında ve mukavemetinde kayıp olmaktadır. Derz kesimi uygulamada zamanın ve ekonomik kaynakların harcanmasını beraberinde getirmektedir. Beton yollarda genleşme etkisini azaltmak için yaygın kullanılan yöntem derz kesimi, beton yolda dayanım ve sürüş konforu kaybına neden olabilmektedir. Beton yol yapımında derz kesimi ekstra zaman ve maliyet oluşturması, dayanım kaybı, konforu azaltması nedeniyle geliştirilmesi veya alternatifi bulunması gereken bir uygulama olmaktadır.

Beton elemanda çatlak oluşumunun alt ve üst yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı temelli olduğu bilinmektedir. Beton eleman yüzeyinde farklı kalınlıklarda izolasyon malzemesi kullanıldığında üst yüzey ile alt yüzey arasındaki sıcaklık farkı izolasyon malzemesinin kalınlığına bağlı değişerek yalın betona oranla %75 mertebesine kadar azalabildiği gösterilmiştir (Nguyen vd.,2018).

1.3. Beton İçeriğinin Genleşmeye Etkisi

Agrega, çimento ve sudan oluşan kompozit bir malzeme olan betonun termal özellikleri çimento ve agreganın termal özelliklerine bağlı şekillenmektedir (Mindess vd.,2002). Beton bileşiminde kullanılacak agreganın değiştirilmesi ile betonun ısı davranışında değişim gözlemlenebilecektir. Beton yapımında kullanılan agreganın türü değiştiğinde ısı genleşme katsayısı değişmektedir (Chung & Shin, 2011). Isıl genleşme katsayısı, sıcaklık etkisiyle malzemenin hacminde meydana gelen uzamanın bir ölçüsüdür. Isıl genleşme katsayısı fazla olan malzemelerde çatlak oluşumu kolaylaşmaktadır. Yüksek genleşme davranışı gösterecek agreganın kullanımı betonun sıcaklık karşısındaki davranışını etkileyeceği için kütlenin sınırlandırılması, beton plak uzunluğunun ve tasarımının malzemeye uygun seçilmesi gerekmektedir. Isıl genleşme katsayısı arttıkça oluşabilecek çatlakları azaltmak adına derz mesafesinin kısaltılması buna bağlı ek işçilik, süre ve maliyet harcanması gerekmektedir (FHWA-HIF-09-015) (Kayıpmaz, 2019).

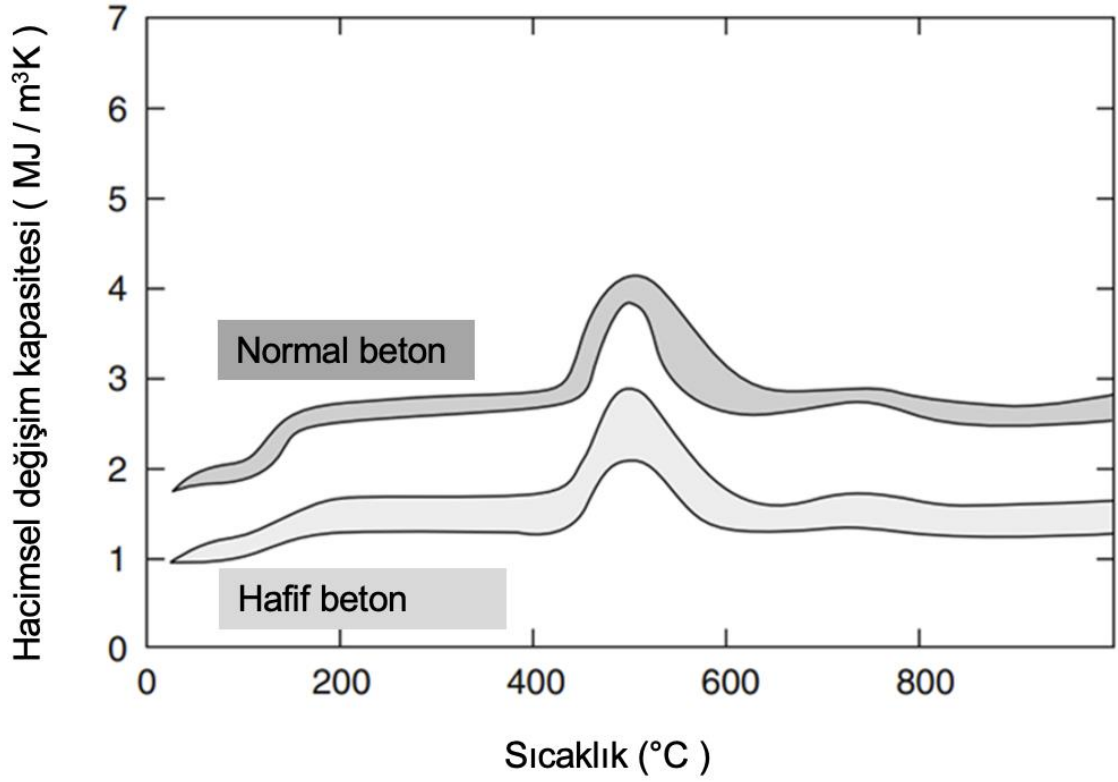
Beton plaklarda çatlak oluşumunda ısı genleşme katsayısının etkisi incelendiğinde ısı genleşme katsayısının fazla olduğu hallerde beton plaktaki çatlak miktarının daha fazla olduğu bildirilmiştir (Şekil 7) (Tanesi & Meininger,2007).



Şekil 7. Isıl genleşmeye bağlı beton plakta çatlak oluşum yüzdesi (Tanesi & Meininger, 2007)

Betonu oluşturan çimento matrisi ve agregadır. Genleşme, ısı gerilme oluşturma davranışları açısından ince ve kalın agreganın karakteristik özellikleri etkili olmaktadır. Farklı agregalar ile oluşturulan beton karışımlarda genleşme sonucu oluşan gerilme değerleri değişiklik göstermektedir (Wang vd., 2022).

Beton birim hacim ağırlığına göre ağır, normal(geleneksel) ve hafif olarak sınıflandırılmaktadır. Geleneksel beton için birim hacim ağırlık 2400 kg/m³ mertebesinde. Beton yoğunluğu 2600 kg/m³'ten fazla ise ağır beton, 2000 kg/m³'ten az ise hafif beton olarak değerlendirilmektedir (TS EN 206). Hafif beton genellikle yalıtım amacıyla kullanılmakta ve ısı özellikleri önemli olmaktadır. Yapı malzemesi olarak betonun termal özellikleri incelendiğinde hafif betonların ısı genleşmesinin normal betonlara kıyasla %50 kadar daha az olduğu görülmüştür (Şekil 8) (Kodur & Harmathy, 2016). Hafif agrega seçimiyle genleşmenin azaltılabileceği düşünülmektedir.



Şekil 8. Sıcaklık değişiminde normal ve hafif betonların hacimsel değişimi (Kodur & Harmathy, 2016)

Beton yol plağında genişlemeye neden olan ASR açısından beton tasarımında seçilecek agreganın alkali silika reaksiyonu bakımından zararsız olması önemli olacaktır. Beton bileşiminde puzolanik özellik gösteren malzeme kullanımının alkali silika reaksiyonunu azaltıcı etki göstereceği öngörülmektedir (Çullu vd.,2010).

1.4. Perlit Agregası ve Betonda Kullanımı

Perlit, ham halde kullanılması dışında ısıya tabi tutularak genişletilmiş halde de kullanılmakta olan volkanik bir kayadır (Şekil 10). Perlit yapısında %2 ile %5 arasında su içermektedir (Mladenovic vd., 2004). Perlit, 750-1200 °C arasında ani olarak ısıtıldığında bünyesinde bulunan suyun buharlaşmasının etkisiyle genişerek bir köpük agregası olan genişletilmiş perlite dönüşür (Şekil 9). Perlit genişleme işlemi sonunda hacmini 10-20 kat kadar artırır ve beyaz renge kavuşur (URL-1,2022).



Şekil 9. Perlit agregasının ham halden genleştirilmiş hale geçiş şeması



Şekil 10. Ham perlit ve genleştirilmiş perlit

Genleştirilmiş perlitin 24 °C’de ısı iletim katsayısı 0,04-0,06 W/mK aralığındadır (TSE EN 14316-1,2006). Perlit saf ve kararlı yapıda olup kimyasal olarak nötr özellik gösterdiğinden başka maddelerle reaksiyonu ile zararlı yabancı madde oluşturmamaktadır. Doğal olarak oluşan gözenekli yapısı sayesinde zamanla ısı özelliklerinde değişim olmamakta, ısı özelliklerini korumaktadır.

Perlit yapısında yüksek oranda silisyum oksit ve alüminyum oksit içermektedir (Tablo 2). Bu sayede perlit kullanımının puzolanik potansiyeli bulunmaktadır. Ham perlit ve genleştirilmiş perlit geleneksel betonda kullanılan agregalara oranla yoğunluk açısından daha hafiftir. Perlit malzemesinin betonda kullanımı betonun birim hacim ağırlığını azaltmakta, hafif beton olmaya yaklaştırmaktadır. Hafif betonda birim hacim ağırlık değerinin azalması ısı iletkenlik ve ısı genleşme katsayılarının düşmesini de beraberinde getirmektedir.

Tablo 2. Perlitin yüzdesel kimyasal bileşimi (URL-1)

SiO ₂	71,0-75,0
AlO ₃	12,5-18,0
Na ₂ O ₃	2,9-4,0
K ₂ O	0,5-5,0
CaO	0,2-0,5
Fe ₂ O ₃	0,1-1,5
MgO	0,02-0,5
TiO ₂	0,03-0,2
MnO ₂	0,0-0,01
SO ₃	0,0-0,2
FeO	0,0-0,1
Cr	0,0-0,1
Ba	0,0-0,05

Dünyanın perlit toplam rezervi 7700 milyon ton olup bu 5700 Türkiye, 300 Yunanistan, 200 ABD ve diğer ülkelerde bulunmaktadır (MCS 2009). 2021 yılı verilerine göre perlit üretiminde %36 Çin, %29 Türkiye, %17 Yunanistan, %12 ABD rol almıştır. Çin 1500, Türkiye 1200, Yunanistan 710, ABD 500 bin ton perlit üretmiştir. Çin üretimde ilk sırada olmasına rağmen dünya perlit ihracatında Türkiye ve Yunanistan önde gelmektedir (MCS 2022). Türkiye'nin en önemli perlit yatakları Manisa, İzmir, Eskişehir, Kütahya, Konya ve Erzincan çevrelerinde yer almaktadır (Madencilik Politikaları, 2018) (Şekil 11).

Ham perlit

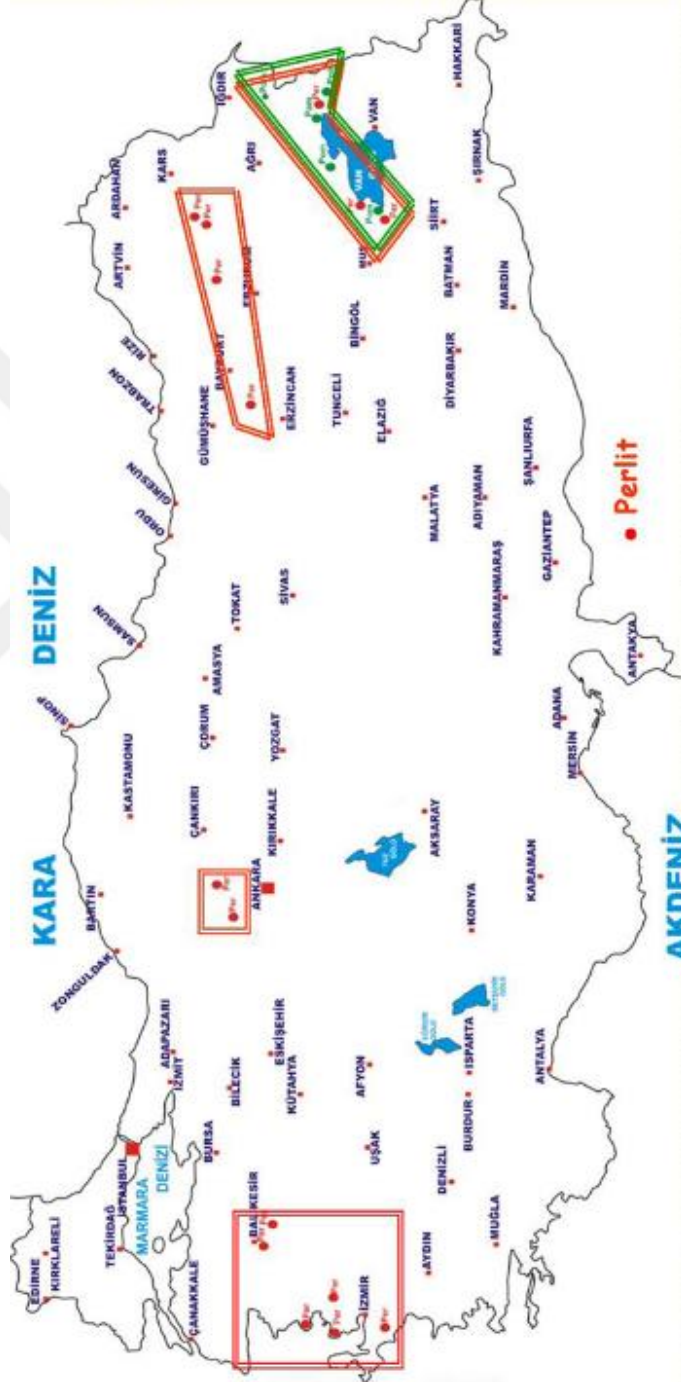
- Asit ve bazlara karşı dayanıklı olduğu için kanalizasyon borularının üretiminde
- Dona karşı dayanıklı olduğundan su maruziyeti olan yapı inşaatlarında
- Isı izolasyonu ve hafif yapı elemanı üretiminde
- Filtre kumu olarak su arıtma tesislerinde

kullanılmaktadır (Madencilik ÖİK).

Genleştirilmiş perlit

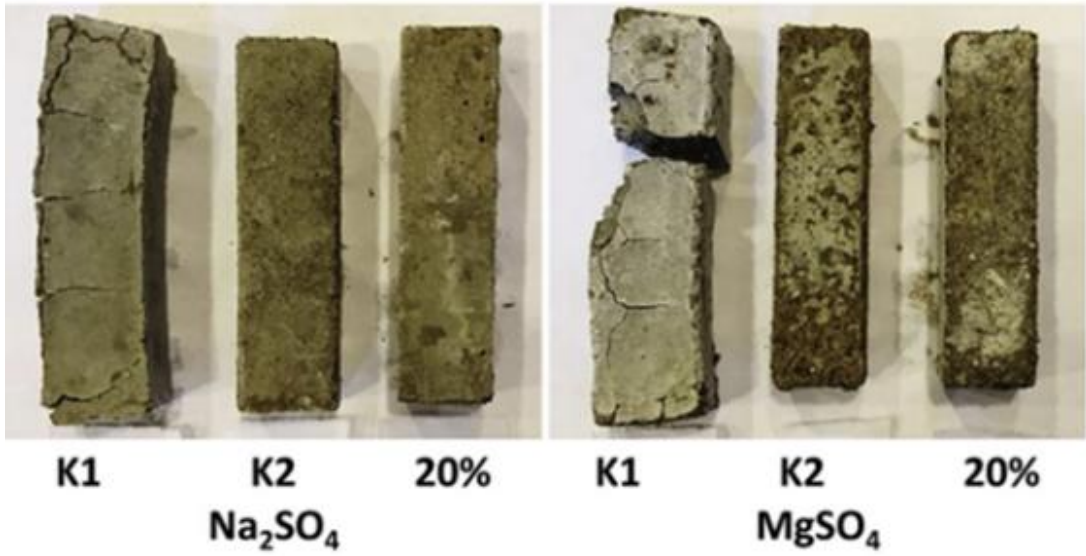
- İnşaat sektöründe ısı ve ses izolasyonu sağlayan hafif agrega olarak
- Su emme davranışı sayesinde tarımda nem tutucu olarak
- Gıda, ilaç ve kimya sanayiinde süzücü olarak
- Hafif plastik mobilya yapımında dolgu maddesi olarak

- Yangına dayanıklı çelik konstrüksiyonlarda yalıtım katmanı olarak
- Yağ bazlı atıkların oluşturduğu su kirliliğini gidermede kullanılmaktadır (Madencilik ÖİK).



Şekil 11. Türkiye'deki perlit yatakları (URL-3,2022)

Kapeluszna vd. (2020) yaptıkları çalışmada genleştirilmiş perlit kullanımı ile basınç dayanımının gelişimini ve sülfatlı ortamdaki dayanıklılığını araştırmıştır. 720 gün sodyum klorürlü ortama maruz bırakılan genleştirilmiş perlit içermeyen kontrol numunesinin basınç dayanımı %30 azalırken %20 genleştirilmiş perlit içeren numunedeki azalış %2 olmuştur. Genleştirilmiş perlit içeren numuneler ve kontrol numunesi sodyum ve magnezyum sülfatlı ortamlara maruz bırakıldığında genleştirilmiş perlit içerenlerin genleşme yok sayılacak düzeyde iken normal betonda %1,5 ve %2,2 kadar genleşme yaptığı bulunmuştur (Şekil 12). Korozyon ve ASR reaksiyonlarına karşı perlitin olumlu etkisi görülmüştür.



Şekil 12. K1 normal beton ile %20 genleştirilmiş perlit içeren betona sülfat etkisi (Kapeluszna vd. 2020)

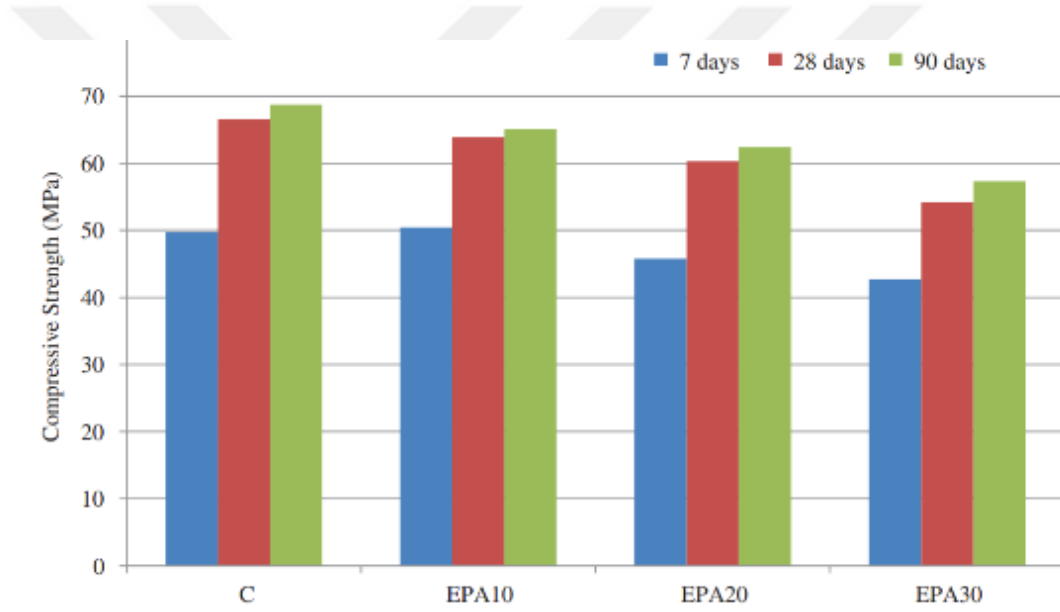
Şengül vd. (2011) genleştirilmiş perlitin hafif betonda agrega olarak kullanımını araştırmışlardır ve sonuçlara göre perlit kullanımı ile ısı yalıtım özelliklerinin geliştiği ancak agreganın %20 üzerinde kullanımında dayanım kaybına neden olduğu belirlenmiştir.

Othman (2020) yapılan deneysel çalışma sonucunda bildirdiği basınç dayanımlarına göre genleştirilmiş perlitin ince agrega yerine hacimce %25 seviyelerine kadar kullanımının dayanım açısından uygun olacağı görülmüştür.

Balun (2013), 0-2 mm tane boyutundaki genleştirilmiş perlit agregasını ince agrega yerine hacimce %0,10,20,30 oranlarında kullandığı çalışmada geleneksel betona göre çekme dayanımının %10 ve %20 genleştirilmiş perlit içeren numunelerde %10 oranında daha fazla olduğunu kaydetmiştir. Wang vd. (2021), ultra yüksek performanslı beton üretiminde

genleştirilmiş perlit kullandıkları çalışmada ince agrega yerine hacimce %0, 25, 50 ve 75 oranda genleştirilmiş perlit olduğunda dayanım kaybının en fazla %15 olduğunu göstermişlerdir.

Polat vd. (2018), 0-2 mm boyutlu genleştirilmiş perlit agregası toplam agrega hacminin %0,10,20,30 kısmı ile yer değiştirdiğinde %10 ikamede geleneksel beton ile benzer sonuçlar elde ederken; en fazla basınç dayanımı kaybını %20 ‘den az bulmuştur (Şekil 13). 90 gün sonunda kontrol numunesine göre basınç dayanımı değerlerinin %20 genleştirilmiş perlit içeren numunede %5 azaldığını, %30 genleştirilmiş perlit içeren numunede %9 azaldığını belirlemiştir. İlk 48 saatte hidratasyon ısısında %7 kadar artış ölçmüştür (Polat vd. 2018).

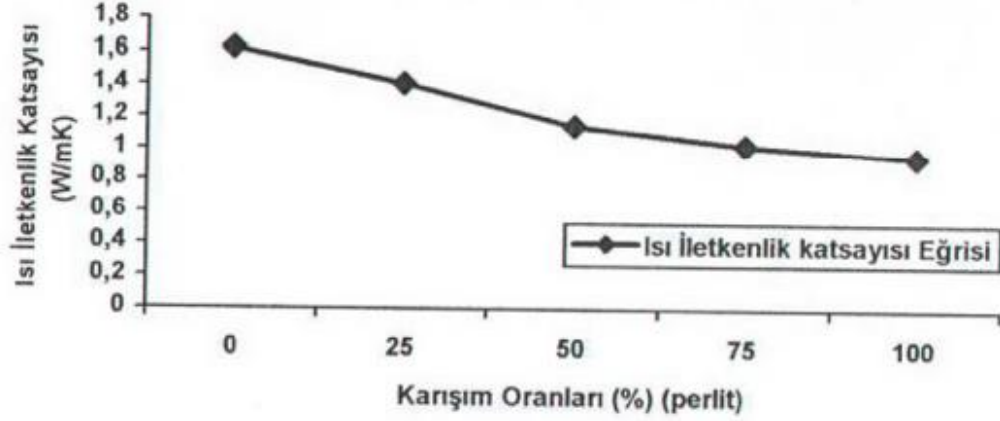


Şekil 13. Farklı genleştirilmiş perlit oranlarında basınç dayanımı (Polat vd. 2018)

Rozycka & Pichor (2016) kum yerine genleştirilmiş perlit kullanarak ısı iletkenlik katsayısının değişimini ve basınç dayanımını incelemiştir. Kum yerine ağırlıkça %40 genleştirilmiş perlit içeren karışım 0,07-0,08; geleneksel karışım 0,12-0,14 W/mK aralığında ısı iletkenlik değerleri ölçülmüştür. %20 ve %30 genleştirilmiş perlit içeren numunelerin kontrol numunesine göre ısı iletkenlik katsayısını %15 ve %32 azalttığı; basınç dayanımını %17 ve %14 düşürdüğü bildirilmiştir.

Yıldırım (2004) ham perlitin agreganın tamamı yerine hacimce %0, 25, 50, 75, 100’ü kadar kullanıldığı betonda ısı iletkenlik değişimini incelediğinde %50 ve sonrasında ısı

değerlerde değişimin %25 ve %50 oranlarına kıyasla fazla olmadığını; agreganın tamamının ham perlit seçiminde %40'a yakın basınç dayanımı kaybı olduğunu göstermiştir (Şekil 14).

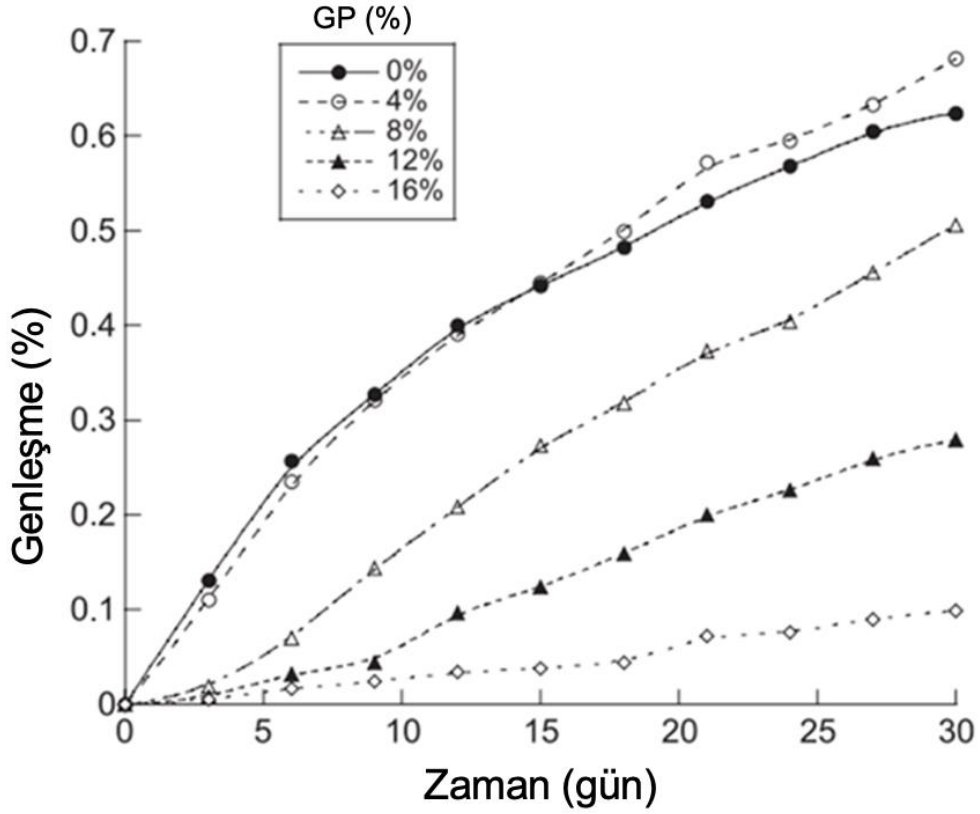


Şekil 14. Ham perlit ve ısı iletkenlik ilişkisi (Yıldırım, 2004)

Oktaç vd. (2015), agrega ile hacimsel olarak %0, 10, 20, 30, 40 ve 50 oranlarında geliştirilmiş perlit yer değiştirerek elde ettikleri numunelerde ısı iletkenlik değerlerinin azalmasıyla birlikte basınç dayanımında da kayıp yaşandığını; %20 ve üzeri oranlarda dayanımda yarı yarıya düşüş olduğunu göstermiştir.

Agrega yerine ağırlıkça %10, 20 ve 30 ham perlit veya geliştirilmiş perlit ikamesi ile üretilen beton karışımları alkali silika reaksiyonu açısından değerlendirildiğinde; ham perlit etkisiz kalırken, geliştirilmiş perlitin genleşme oranını %0,3'ten %0,06 mertebesine düşürdüğü kaydedilmiştir (Kılıçer, 2018).

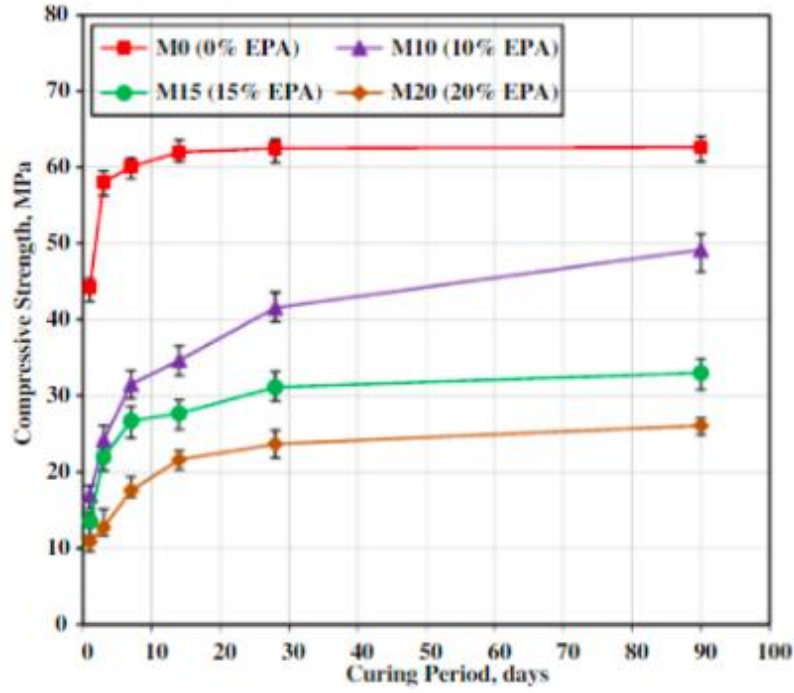
Bektaş vd. (2005) yaptıkları çalışmada ASR azaltıcı etki sağlamak amacıyla geliştirilmiş perlit çimento yerine %4, 8, 12, 16 oranlarda kullanarak genleşme değişimini ölçmüştür. Geliştirilmiş perlitin boşluklu yapısının da etkisiyle genleşme miktarını azalttığı belirlenmiştir (Şekil 15).



Şekil 15. Genleştirilmiş perlit miktarının genleşmeye etkisi (Bektaş vd. 2005)

Boşluklu yapısı nedeniyle hafif agregaların beton harç içinde su dengesini bozmaması adına doygun hale getirilmesi gerekmektedir (Kabay,2009). Hafif agregaların emdiği suyu sonrasında yavaş bir hızda dışarı vermesi betonun dayanım kazandığı hidrasyon süreçlerinde ek bir katalizör görevi alabilmektedir. Hafif agreganın bünyesinde tutup verdiği su bir iç kürlenme mekanizması oluşturmakta ve dayanım gelişimine katkı sağlamaktadır (Yolcu& Girgin 2017).

İbrahim vd. (2020), toplam agreganın ağırlıkça %0, 10, 15 ve 20 oranında 2,36 mm tane büyüklüğünde genleştirilmiş perlit agregası kullandıkları çalışmada dayanım kazanımının geleneksel betonda il 30 günde tamamlandığını; genleştirilmiş perlit içeren beton karışımlarında 90 gün boyunca dayanımda artışın devam ettiğini göstermişlerdir (Şekil 16).



Şekil 16. Ağırılıkça kullanılan genişletilmiş perlitin 90 gün kür periyodunda basınç dayanımı (İbrahim vd. 2020)

Bozkurt (2013), perlit tozunun puzolanik özelliğini temel alarak çimento yerine kullanımında silisyum ve alüminyum oksit içeriğinin yüksek olmasının katkısı ile dayanım açısından %15'e kadar tercih edilebilir olduğunu; dayanım gelişiminin geleneksel çimentoya göre daha uzun süre aldığını göstermiştir.

Kotwica vd. (2017), bağlayıcı olarak çimento yerine(ikame) veya ilave olarak genişletilmiş perlit tozu kullanımının dayanımı arttırdığını; %35 ikamede dayanımda %20 artış, %35 ilave perlit kullanımında dayanımda %55 artış gösterdiğini aktarmıştır.

Agrega tümü maksimum tane büyüklüğü 12,5 mm olan ham perlit kullanılarak yüksek dayanımlı hafif beton üretiminin gerçekleştirildiği çalışmada dayanım artırma amacıyla yüksek dozajda çimento (400, 450, 500, 550, 600 ve 650 kg/m³), işlenebilirlik için akışkanlaştırıcı katkı kullanılmış geleneksel betona göre daha yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir. Yapılan çalışmada geleneksel karışım 28 gün sonrasında dayanım gelişimi göstermezken perlit içeren numuneler 28 gün sonrasında da puzolanik etkiye bağlı dayanım geliştirmiştir (Ulus, 2007).

Betonun içeriğinde kullanılan perlit agregasının boyutu küçüldükçe; boşluk azalır, ısı iletkenlik artar, dayanım artar ve birim hacim ağırlık artar (Tapan & Engin, 2019).

İnce agregaya yerine hacimce %0, 20, 40, 60, 80 ve 100 oranında 2-4 mm tane boyutu aralığında genişletilmiş perlit agregası kullanılarak yapılan çalışmada %20 üzerinde genişletilmiş perlit kullanımında dayanımda %50'den fazla kayıp olduğu ancak yalıtım amaçlı kullanılabileceği tespit edilmiştir (Topçu & Işıkdag,2008).

Genleştirilmiş perlit kırma taş ile %0, 5,10, 15, 20 ve 25 ikame edildiğinde %0-15 oranlarında basınç ve çekme dayanım değerleri benzer aralıkta gelirken en iyi dayanımı %10 genişletilmiş perlit vermiştir ve ince agregaya özellikleri sağlanmıştır. %20 ve üzeri kullanımda %25 kadar kayıp olmuştur (Sinchana & Prakash, 2018).

Genleştirilmiş perlit agregası toplam hacimce %40, 50 ve 60 oranda kullanıldığı numunelerde perlit miktarı arttıkça ısı iletkenlik azalırken; bu oranlar arasındaki çekme dayanımına etki farklılık oluşturmamıştır (Kabay & Kızılkant, 2019).

Numan vd. (2019), perlitin iri agregaya yerine hacimce %10, 20, 30, 40, 50 oranda kullanılması durumunda geleneksel beton karışımına kıyasla yoğunlukta %40 'a varan azalma elde ederken basınç dayanımı ikame oranı arttıkça %25 'ten %75'e kadar düşüş göstermiştir. Genleştirilmiş perlit agregasının yapısı ve dayanım özellikleri açısından beton üretiminde iri agregaya boyutlarında kullanılması uygun olmamaktadır.

Farklı granülometriye sahip genişletilmiş perlit agregalarının %10 olarak kullanıldığı ham perlit agregalı betonda, az iri agregaya sahip karışımın dayanım ve su emme değerleri karşılaştırma numunesinin değerlerine göre kullanımda uygun bulunmuştur, 28 günlük dayanımda yalnızca %5 düşüş olmuştur (Gökçe vd.,2010).

Yapılan çalışmalarda da görüldüğü gibi genişletilmiş perlit kullanımı genişleme için olumlu sonuçlar vermektedir. Perlit ile puzolanik katkı sağlanıp alkali silika için dayanıklılık elde edilmektedir. Genleştirilmiş perlitin hafif agregaya olmasının dayanım açısından değerlendirilmesi yapıldığında beton bileşimindeki miktarının sınırlandırılması gerekliliği göz önüne alınmalıdır.

Yapılan literatür taraması ışığında beton yolda genişlemeyi azaltmak için beton içeriğinde perlit kullanılması araştırılacaktır. Perlitin boşluklu yapısı, düşük ısı genişmesi, alkali-silika reaksiyonu azaltıcı puzolanik aktivitesi, sülfatlı ortamlara dayanıklılığı özelliklerinin beton yol kaplamasına pozitif etkisi olacağı düşünülmektedir. İncelenen çalışmalarda en verimli boyutun ince agregaya olduğu görülmüş olup beton karışım içinde ince agregaya boyutuna denk gelen 0-4 mm aralığında perlit agregası kullanılacaktır (BS EN 12620).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Beton üretiminde kullanılan agrega olan genleştirilmiş perlit ve ham perlit yığınlarında tane boyutu belirlenmesi için elek analizi, karışım hesabı için birim hacim ağırlık tayini, yapılarındaki boşluklarda tutacakları su miktarının belirlenmesi için su emme testi yapılmıştır.

%0, 5, 10, 15 ve 30 genleştirilmiş perlit ve ham perlit agregası içeren beton karışımlar oluşturulmuştur. Beton karışımların her birinden basınç dayanımı testinde kullanılması için 5 adet 15×15×15 cm boyutlu küp numune, eğilmede çekme testinde kullanılması için 3 adet 10×10×40 cm boyutlu kiriş numune, sıcaklık deneyinde kullanılması için 1 adet 10×10×50 cm boyutlu kiriş numune olmak üzere toplam 90 tane numune alınmıştır. 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerini tamamlayan küp ve kiriş numunelerde dayanım testleri uygulanmıştır. 28 günlük su kürü sonrası ortam nemine gelmesi beklenen 10×10×50 cm boyutlu sıcaklık testi numuneleri kullanılarak thermocouple ile sıcaklık ölçümü, LVDT ve strain gauge sensörlerle deplasman ölçümü yapılmıştır.

2.1. Perlit Agregası Deneyleri

Beton numune üretiminde kullanılacak perlit agregasının seçimi ve özelliklerinin belirlenmesi için agrega üzerinde elek analizi, birim hacim ağırlık ile su emme deneyleri yapılmıştır. Perlitin ince agrega ile ikamesi için uygun tane büyüklüğünde olup olmadığının belirlenmesi amacıyla elek analizi yapılarak maksimum tane boyutu (D_{max}) 4 mm olacak yığınlar seçilmiştir. Hafif agregaların boşluk içermesi su emmede artışa neden olduğundan beton karışımındaki su oranını etkilemesinin önüne geçilmesi için perlit agregalarının su emme oranları belirlenmiştir. Karışımında kullanılacak perlit agregası miktarlarının belirlenmesi için gerekli birim hacim yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Genleştirilmiş perlit ve ham perlit agregasına ait deneylerde kolaylık olması açısından genleştirilmiş perlit “GP”, ham perlit “HP” olarak kısaltmalarıyla etiketlenmiştir.

2.1.1. Genleştirilmiş Perlit Elek Analizi

Genleştirilmiş perlit agregası iki farklı yığın olarak temin edilmiştir. 1 numaralı yığın GP1 ve 2 numaralı yığın GP2 olarak adlandırılıp genleştirilmiş perlit yığınlarından alınan örnekler test edilmiştir (Şekil 17).



Şekil 17. GP1 ve GP2 Genleştirilmiş perlit agregaları

GP1 numunesi için agrega yığınının tane boyutuna uygun olacak şekilde elek göz açıklığı 0-4,75 mm arasında değişen elekler en üstte en büyük elek açıklığına sahip olan elek olacak şekilde dizilmiştir (Şekil 18). Elek analizi yapılacak numune hassas terazi ile tartılmıştır (Şekil 19). Genleştirilmiş perlit agrega yığını en üstten dökülerek sırasıyla küçülen eleklerden geçmesi için hafifçe sarsılmıştır. Her bir elek üzerinde kalan agrega miktarları tartılmıştır (Tablo 3). Yapılan elek analizi sonuçlarına uygun olarak gradasyon grafiği elde edilmiştir (Şekil 20). GP1 agregasının en büyük tane boyutunun 4 mm olduğu, yığının %80'inin 2 – 4 mm boyut aralığında olduğu belirlenmiştir. GP1, ince agrega boyutlarına uygundur.



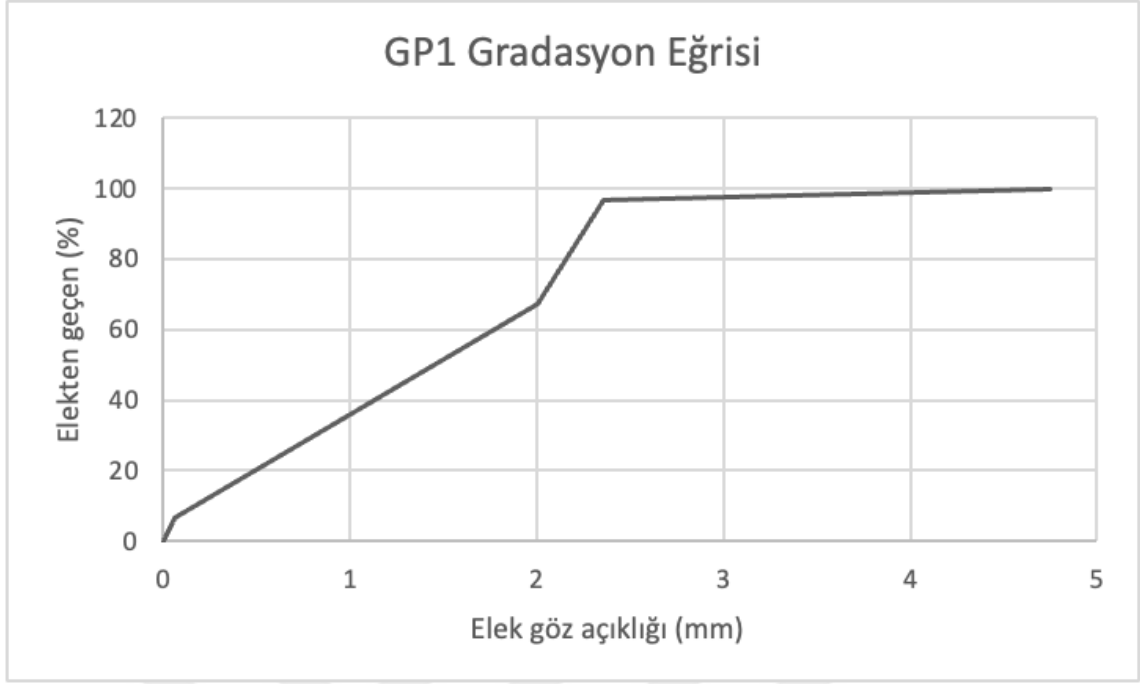
Şekil 18. Genleştirilmiş perlit agregası için kullanılan elekler



Şekil 19. Hassas terazi ile elekte kalan GP agregaların tartılması

Tablo 3. GP1 Elek analizi sonuçları

Elek göz boyutu (mm)	Kalan (gram)	Yığılımlı kalan (gram)	% Geçen GP1
4,75	0	0	$\frac{45,3-0}{45,3} \times 100 = 100$
2,36	26,2	26,2	42,2
2	5	31,2	31,1
0,06	11,6	42,8	5,5
0	2,5	45,3	0

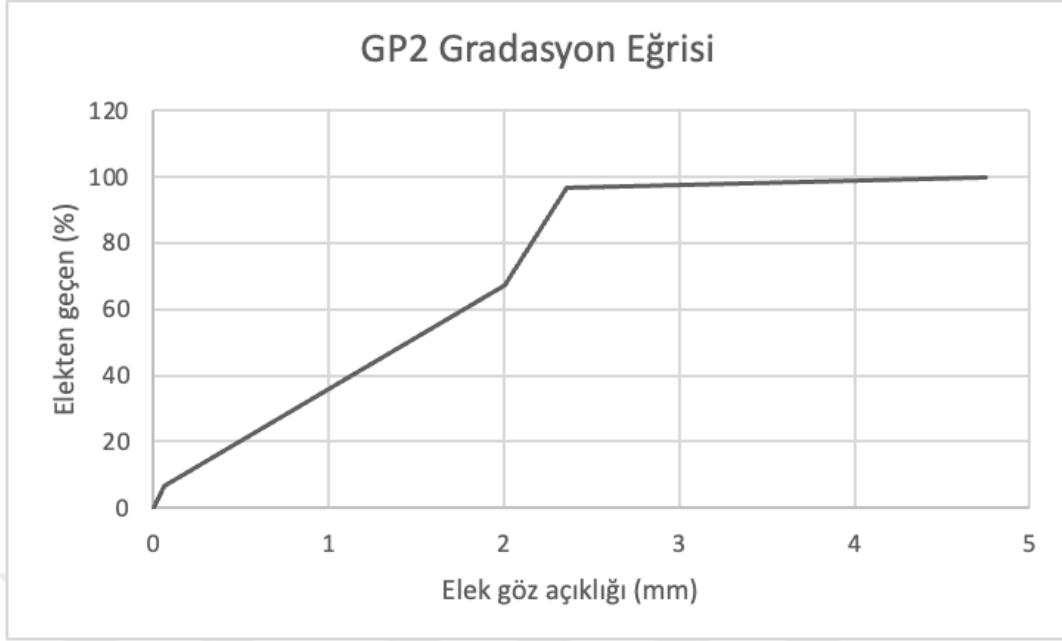


Şekil 20. GP1 Gradasyon eğrisi

GP2 numunesi için de uygun elek boyutları GP1'deki ile aynı olduğundan aynı işlemler GP2 yığını için de tekrarlanmıştır. GP2 numunesine ait elek analizi ve gradasyon eğrisi elde edilmiştir (Tablo 4) (Şekil 21). GP2 yığınının en büyük tane boyutu 3 milimetredir. GP2 agregasının %80'i 2- 3 mm boyutları arasındadır. GP1 ve GP2 kıyaslandığında GP2 yığını daha ince agregaya içermektedir. GP1 ve GP2 yığınlarının ikisi de ince agregaya boyutlarına uymaktadır.

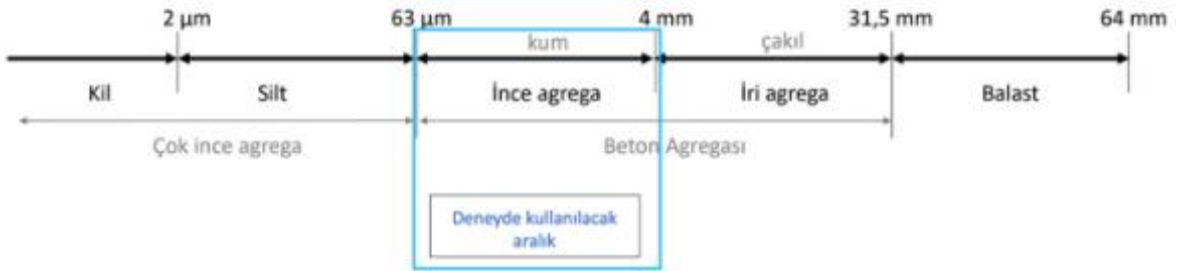
Tablo 4. GP2 Elek analizi sonuçları

Elek göz boyutu (mm)	Kalan (gram)	Yığılımlı kalan (gram)	% Geçen GP2
4,75	0	0	100
2,36	1,1	1,1	$\frac{35-1,1}{35} \times 100 = 96,7$
2	10,3	11,4	67,4
0,06	21,3	32,7	6,57
0	2,3	35	0



Şekil 21. GP2 Gradasyon eğrisi

Üretilcek beton numunelerde maksimum tane boyutu 4 mm olarak seçilmiştir (Şekil 22). GP1 ve GP2 yığınları uygun tane büyüklüğünde olduğundan ikisinin de kullanımına karar verilmiştir. GP1 ve GP2 genişletilmiş perlit yığınları eşit oranda karıştırılarak 3 numaralı genişletilmiş perlit “GP3” oluşturulmuştur (Şekil 23).



Şekil 22. Beton numune üretiminde kullanılan agrega boyutu ve aralığı



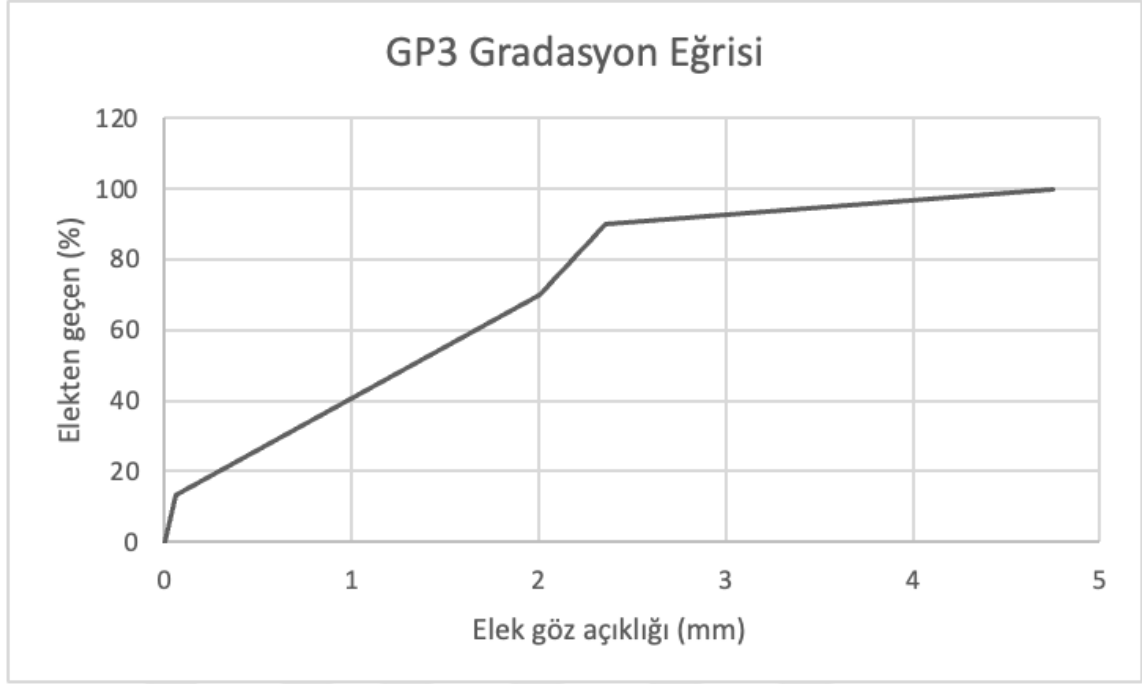
Şekil 23. Genleştirilmiş perlit agregası GP3

GP3 yığınınından alınan numune eleklerden geçirilerek elek üstünde kalan kütleler hassas terazi ile tartılmıştır (Tablo 5). Elek analizi sonucu GP3 için gradasyon eğrisi çizilmiştir (Şekil 24). GP3 agregası içim maksimum tane boyutu 4 mm'dir. GP3 agreganın %80'i 2-4 mm aralığında olup %60'ı 2- 3 mm aralığında bulunmaktadır ve ince agrega sınıfındadır.

1 ve 2 numaralı genleştirilmiş için yapılan elek analizinde tepside kalan ince toz malzeme dahil edilmezken GP3 için karışımın tamamı deneylerde kullanılmıştır. Uygulamada agreganın fabrikadan çıkışı, taşınması aşamalarında oluşabilecek ince malzemenin karışıma katılmasını doğru yansıtmak adına tümü dahil edilmiştir.

Tablo 5. GP3 Elek analizi sonuçları

Elek göz boyutu (mm)	Kalan (gram)	Yığılımlı kalan (gram)	% Geçen GP3
4,75	0,4	0,4	99,8
2,36	24,1	24,5	$\frac{245-24,5}{35245} \times 100 = 90$
2	48,8	73,3	70,1
0,06	139,3	212,6	13,2
0	32,4	245	0



Şekil 24. GP3 Gradasyon eğrisi

2.1.2. Genleştirilmiş Perlit Birim Hacim Ağırlığının Bulunması

Hafif agregalar ile beton karışımı yapıldığında mutlak hacim hesabı kullanılmaktadır. Hafif agregalar boşluklu yapıları nedeniyle düşük birim hacim ağırlığa sahip olmaktadır. Birim hacim ağırlık sıkıştırılmış ya da gevşek halde hesaplanabilmektedir. Beton numune üretiminde kullanılacak genleştirilmiş perlit agregası için gevşek halde birim hacim ağırlık (gram/santimetreküp) hesaplanmıştır. Gevşek birim hacim ağırlık belirli kütledeki agreganın belirli hacimdeki ölçü kabına sıkılama yapmadan yerleştirilmesi suretiyle yapılır. Hacmi belirli numune kabı genleştirilmiş perlit agregası ile sıkılama yapmadan doldurulmuştur. Kabin boş ve dolu hallerdeki kütleleri hassas terazi tartılmıştır. Boş ve dolu hallerdeki kütlelerin farkı agreganın bu hacimdeki kütlelerini vermektedir. Agreganın ağırlığının kabin hacmine oranlanması ile gevşek birim hacim ağırlık elde edilir.

$$\frac{W_{dolu} - W_{kap}}{V_{kap}} \quad (1)$$

GP1, GP2 ve GP3 karışımlarından alınan numuneler ile belirli hacimdeki kap sıkılama olmaksızın genleştirilmiş perlit agregası ile doldurulmuştur (Şekil 25). Ölçümde için 1 mililitre hacim 1 cm³ 'e denk olduğundan mililitre çizgileri olan beher kullanılmıştır. Her

karışım için öncelikle beherin ağırlığı terazi ile ölçülerek kaydedilmiştir. 400 santimetreküp hacme eş 400 mililitrelik alan agregası ile doldurulup dolu halde ağırlığı ölçülmüştür. Dolu ve boş farkından elde edilen agregası ağırlığı hacme bölünerek GP1, GP2 ve GP3'e ait gevşek birim hacim ağırlık değerleri hesaplanmıştır (Tablo 6) (Tablo 7) (Tablo 8). Beton numune üretiminde kullanılan GP3 genişletilmiş perlit agregasının birim hacim ağırlığı yaklaşık $0,18 \text{ g/cm}^3$ bulunmuştur.



Şekil 25. Hacmi belli kapta genişletilmiş perlit agregası

Tablo 6. GP1 için gevşek haldeki birim hacim ağırlığı (gram/santimetreküp)

V_{kap}	400 ml = 400 cm ³	Birim hacim ağırlık GP1 0,169 g / cm ³
W_{kap}	177,8 g	
W_{dolu}	245,3 g	

Tablo 7. GP2 için gevşek haldeki birim hacim ağırlığı (gram/santimetreküp)

V_{kap}	400 cm ³	Birim hacim ağırlık GP2 0,141 g / cm ³
W_{kap}	177,9 g	
W_{dolu}	234,4 g	

Tablo 8. GP3 için gevşek haldeki birim hacim ağırlığı (gram/santimetreküp)

V_{kap}	400 ml = 400 cm ³	Birim hacim ağırlık GP3 0,178 g / cm ³
W_{kap}	177,9 g	
W_{dolu}	249,1 g	

2.1.3. Genleştirilmiş Perlit Su Emme Oranının Bulunması

Genleştirilmiş perlit agregası yapısının çok boşluklu olması nedeniyle yüksek su emme oranına sahip bir hafif agregadır. Yapılan literatür taramasında suya doymun hale getirilmeyen genleştirilmiş perlit agregalarının karışımdaki su/çimento oranını etkilediği görülmüştür. Yeterli su olmayan beton karışımında hidrasyon reaksiyonları gerçekleşemeyeceği için düşük dayanım kaçınılmaz olacaktır. Üretilecek beton numunelerde karışımın susuz kalmaması için genleştirilmiş perlit agregaları suya doymun hale getirilmiştir. Karışımın susuz kalması gibi çok sulu olması da tehlikeli olduğundan agreganın su emme kapasitesi belirlenmiştir.

Beton üretiminde kullanılacak GP3 agregası için TS EN 1097-6 standardı temel alınarak su emme kapasitesi deneyi yapılmıştır. Genleştirilmiş perlit agregası etüv kurusu haline getirilip 24 saat ve 2 saat olmak üzere iki ayrı sürede suda bekletilmiştir (Şekil 26). Su kürü süresi dolduktan sonra en küçük tane çapından küçük olan elek yardımıyla su süzölmüştür (Şekil 27). Etüv kurusu ile suda bekletildikten sonra doymun kuru yüzey haline getirildiği durumlarda agrega tartılıp su emme oranı hesaplanmıştır. Doymun kuru yüzey içi nemli dış yüzeyi kuruya yakın agregayı temsil etmektedir. Doymun kuru yüzey sağlanması için bezle kurulama, kurutucu makine, doğal havada bekletme gibi yöntemler bulunmaktadır. Kullanılan genleştirilmiş perlit agregası ince taneli ve hafif olduğu için doymun kuru yüzey elde etmek için kurulama yöntemi uygun olmamıştır. GP tanelerin birbirine tutunması ve karışımın eşit kurumaması nedeniyle doğal havada bekletmek de homojen dağılım açısından işlevsiz olmuştur. Su kürü yapıp süzölen genleştirilmiş perlit agregaları bir tepsiye alınıp kurutucu fön makinesi ile doymun kuru yüzey sağlanacak şekilde kurutulmuştur (Şekil 28). Bu işlem sırasında madde kaybı olmaması amacıyla çok hafif olan

genleştirilmiş perlit yığımı bir elek altında tutularak kurutulmuştur. Agregataneleri birbirine yapışıp dağılmayacak ıslakla birbirinden tamamen ayrıldıkları kuruluk arasındaki seviyeye geldiğinde doygun kuru yüzey sağlanmıştır (şekil 29).



şekil 26. Su emme deneyi için suda bırakılan GP agregası (2 ve 24 saat)



şekil 27. Suda bekletilip süzüldükten sonra GP3 agregası (2 ve 24 saat)



Şekil 28. GP agregası yüzeyindeki suyun uzaklaştırılması



Şekil 29. Doygun kuru yüzey haline gelen GP3 agregası (2 ve 24 saat)

Doygun kuru yüzey anındaki agregası ağırlığı ile etüv kurusu agregası ağırlıkları terazi yardımıyla ölçülmüştür. Kuru haldeki ağırlık ile doymuş kuru yüzey (DKY) haldeki ağırlık arasındaki fark genişletilmiş perlit agregasının boşluklarında tuttuğu suya eşittir. Bulunan

suyun kuru ağırlığa oranlanması ile GP3 -beton numune üretiminde kullanılacak genleştirilmiş perlit- için su emme oranı hesaplanmıştır (Tablo 9).

$$Su\ emme\ oranı = \frac{W_{DKY} - W_{KURU}}{W_{KURU}} \times 100 \quad (2)$$

Tablo 9. GP3 agregasının su emmesi

Suda bekleme süresi	W_{KURU}	W_{DKY}	Su emme oranı
2 saat	73 gram	176,8 gram	%142,2
24 saat	61 gram	163,5 gram	%168

Su emme oranı agreganın yüzde kaç kadar bünyesinde su tutacağını göstermektedir. Hesaplanan su emme oranına göre 100 gram GP3 agregası 24 saat suda bekletildiğinde 168 gram su tutacaktır.

2.1.4. Ham Perlit Elek Analizi

Ham perlit agregası iki farklı yığın olarak temin edilmiştir. 1 numaralı kalın taneli yığın "HP1" ve 2 numaralı ince taneli yığın "HP2" olarak adlandırılıp ham perlit yığınlarından alınan örnekler test edilmiştir (Şekil 30) (Şekil 31).



Şekil 30. HP1 kalın ham perlit agregası



Şekil 31. HP2 ince ham perlit agregası

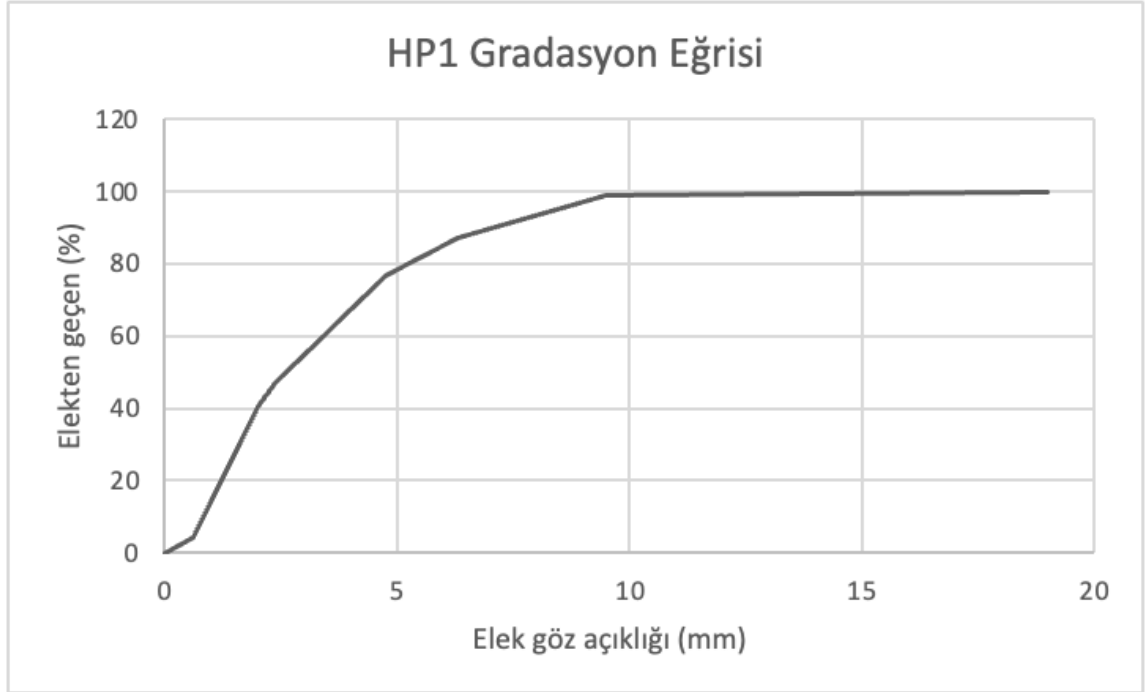
HP1 numunesi için agrega yığınının tane boyutuna uygun olacak şekilde elek göz açıklığı 0-19 mm arasında değişen elekler en üstte en büyük elek açıklığına sahip olan elek olacak şekilde dizilmiştir (Şekil 32). En üst elekte en büyük taneli agregalar kalacak şekilde eleklerden perlitlerin geçmesi sağlanmıştır. Eleklerden geçen agrega oranları hesaplanarak elek analizi yapılmıştır (Tablo 10). Elek analizine uygun olarak HP1 ham perlit yığınının ait gradasyon eğrisi oluşturulmuştur (Şekil 33).



Şekil 32. Ham perlit elek analizi deneyi

Tablo 10. HP1 Elek analizi sonuçları

Elek göz boyutu (mm)	Kalan (gram)	Yığılımlı kalan (gram)	% Geçen HP1
19	0	0	100
9,5	7,5	7,5	99
6,3	88,4	95,9	87
4,75	75	170,9	76,8
2,36	220,4	391,3	47
2	47,9	439,2	40,5
0,6	268,4	707,6	4,1
Tepsi	30,4	738	0



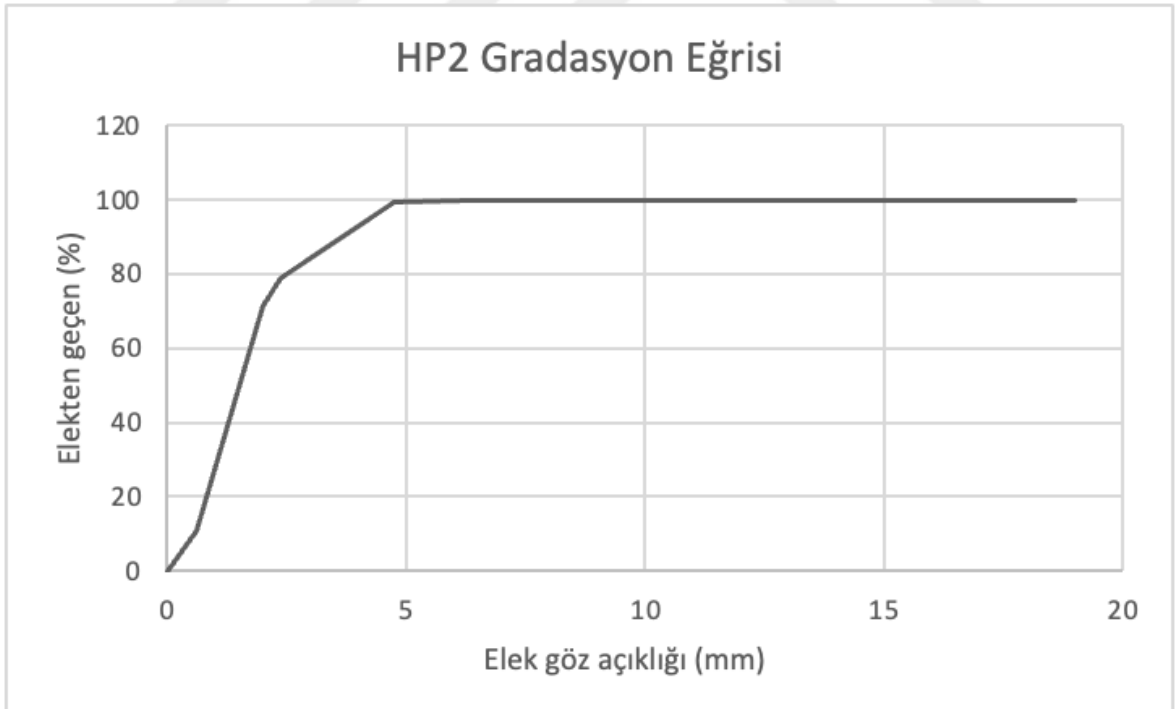
Şekil 33. HP1 Gradasyon eğrisi

HP2 numunesi ince agregası boyutlarında bir ham perlit yığını temsil etmektedir. HP2 için tane boyutuna uygun olacak şekilde elek göz açıklığı 0-4,75 mm arasında değişen elekler ile HP1 karşılaştırması için daha büyük göz açıklığına sahip elekler kullanılarak eleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ham perlit agregası yığını en üstten dökülerek eleklerden geçmesi için sağlanmıştır. Her bir elek üzerinde kalan agregası miktarları hassas terazi ile ölçülerek eleklerden geçen agregası yüzdeleri hesaplanmıştır (Tablo 11). Yapılan elek analizi sonuçlarına uygun olarak ham perlite ait gradasyon grafiği elde edilmiştir (Şekil 34).

HP1 ham perlit agreganın %75'i 2-7 mm boyutlarında ve ince ile iri agregaya karışık haldedir. HP1 agregasının %25'inin 4 mm tane çapından büyük olması iri agregaya sınıfına girmesine neden olduğundan beton üretimi için uygun değildir. HP2 ham perlit agregada ise D_{max} maksimum tane boyutu 4 mm ve %70'i 2- 2,5 mm boyut aralığındadır. Beton numune üretiminde ince agregaya yerine kullanılan ham perlit agregası için HP2 agregaya yığını uygun bulunmuştur.

Tablo 11. HP2 Elek analizi sonuçları

Elek göz boyutu (mm)	Kalan (gram)	Yığılımlı kalan (gram)	% Geçen HP2
19	0	0	100
9,5	0	0	100
6,3	0	0	100
4,75	4,9	4,9	$\frac{650,4-4,9}{650,4} \times 100 = 99,3$
2,36	133	137,9	78,8
2	48,3	186,2	71,4
0,6	394	580,2	10,8
Tepsi	70,2	650,4	0



Şekil 34. HP2 Gradasyon eğrisi

2.1.5. Ham Perlit Birim Hacim Ağırlığının Bulunması

Ham perlit agregası için gevşek halde birim hacim ağırlık hesaplanmıştır. Hacmi belirli numune kabı sıkılama yapılmadan HP1 ve HP2 agregaları ile doldurulup dolu ve boş hallerdeki kütle tartılmıştır (Şekil 35). Ham perlit agregasının gevşek halde belli hacimde ne kadar ağırlığı olduğu belirlenmiştir (Tablo 12), (Tablo 13).

$$\frac{W_{dolu} - W_{kap}}{V_{kap}} \quad (3)$$



Şekil 35. Hacmi belli kaptaki gevşek halde HP2 agregasının tartılması

Tablo 12. HP1 için gevşek haldeki birim hacim ağırlığı (gram/santimetreküp)

V_{kap}	400 ml = 400 cm ³	Birim hacim ağırlık HP1 1,35 g / cm ³
W_{kap}	178 g	
W_{dolu}	717,4 g	

Tablo 13. HP2 için gevşek haldeki birim hacim ağırlığı (gram/santimetreküp)

V_{kap}	400 cm ³	Birim hacim ağırlık HP2 1,23 g / cm ³
W_{kap}	177,9 g	
W_{dolu}	670,8 g	

Genleştirilmiş perlit ve ham perlit agregalarının birim hacim ağırlıkları belirlenirken beton karışıma ekleneceği haldeki sıkılığına uygun olacak gevşek birim hacim ağırlık tercih

edilmiştir. Üretilen beton karışımlarda %0, 5, 10, 15, 30 hacimce eklenen perlit agregası ve gerekli doyma suyu miktarları birim hacim ağırlık değerlerine göre hesaplanmıştır.

2.1.6. Ham Perlit Su Emme Oranının Bulunması

Ham perlit agregası (kalın ve ince karışım) etüv kurusu haline getirilip 24 saat ve 2 saat olmak üzere iki ayrı sürede suda bekletilmiştir. Etüv kurusu ile suda bekletildikten sonra doymun kuru yüzey haline getirildiği durumlarda agregası tartılıp su emme oranı hesaplanmıştır (Şekil 36) (Şekil 37) (Tablo 14).



Şekil 36. Doymun kuru yüzey ve kuru haldeki ham perlit agregası HP1



Şekil 37. Doymun kuru yüzey ve kuru haldeki ham perlit agregası HP2

$$Su\ emme\ oranı = \frac{W_{DKY} - W_{KURU}}{W_{KURU}} \times 100 \quad (4)$$

Tablo 14. HP1 ve HP2 ham perlit agregalarının su emmesi

Ham Perlit	Suda bekleme süresi	W_{KURU}	W_{DKY}	Su emme oranı
HP1	2 saat	216,8 gram	217,4 gram	%0,28
HP1	24 saat	120 gram	120,2 gram	%1,8
HP2	2 saat	138,2 gram	138,7 gram	%0,36
HP2	24 saat	160 gram	161,1 gram	%0,69

Ham perlit agreganın su emme değerleri geleneksel betonda kullanılan agregalarla benzer aralıktadır. Beton karışıma katılmadan önce ham perlit agregasının suya doygun hale getirilmesi gerekmemektedir. Genleştirilmiş perlit agregası için su emme oranı 24 saat sonunda %168 olduğundan GP numunelerinin üretiminden önce suya doygun hale getirilmesi gerekmektedir.

2.2. Perlit İçeren Beton Numune Üretimi

Geleneksel beton içerisinde hacimce % 0, 5, 10, 15 ve 30 olacak şekilde genleştirilmiş perlitli veya ham perlitli beton numune üretilmiştir. Ön çalışmalarda incelenen GP3 karışımı GP olarak; HP2 karışımı HP olarak kullanılmıştır. Birim hacim ağırlık değerleri kullanılarak numune başına düşen perlit miktarı belirlenmiştir. Numune kalıplarının hacmi hesaplanıp örneğin %5 HP için toplam hacmin %5'i referans alınarak hata payı %10 olacak şekilde artırılarak malzemeler hazırlanmıştır. Perlit agregası C30 yaş betonun tamamına oranla ikame olarak karışımlar üretilmiştir. Geleneksel beton karışımı olarak hazır beton santralinden temin edilen C30 sınıfı beton kullanılmıştır (Tablo 15).

Tablo 15. C30 hazır betonun karışım tasarımı

Karışım	İnce agregası (kg/m ³)	Toplam agregası (kg/m ³)	D_{max} (mm)	Su/Çimento Oranı	Çimento tipi	Çimento (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Hiper Akışkanlaştırıcı (%)
C30	505,53	1982,13	31,5	0,48	CEM I 42,5 R	320	148	1,30

2.2.1. Genleştirilmiş Perlit İçeren Beton Numune Üretimi

Genleştirilmiş perlitli numuneler hazır beton santralinde geleneksel C30 beton karışımı içerisinde 24 saat süre suda bekletilerek suya doymun hale getirilmiş genleştirilmiş perlit eklenerek üretilmiştir. Genleştirilmiş perlit beton hacminin %0, %5, %10, %15 ve %30 olacak miktarda tartılarak kullanılmıştır (Şekil 38). Bu karışımlar sırasıyla GP0, GP5, GP10, GP15 ve GP30 olarak adlandırılmıştır. Suya doymun hale getirilmesi için gerekli su miktarı su emme oranı yardımıyla hesaplanmıştır. Gerekli su tartılarak genleştirilmiş perlite eklendikten sonra buharlaşma kaybı olmaması adına kapalı poşetlerde muhafaza edilmiştir (Şekil 39).



Şekil 38. Beton numune için gerekli GP agregasının tartılması



Şekil 39. GP agreganın suya doymun hale getirilmesi

Genleştirilmiş perlit agregası ile yapılan deney çalışmalarında tozdan etkilenmemek için maske; cilt tahrişini onlemek için eldiven ekipmanlarının kullanılması iş sağlığı açısından daha emniyetli olacaktır (şekil 40).



şekil 40. GP deneylerinde maske ve eldiven kullanımı

Beş farklı karışımın her birinden 5 adet 15×15×15 cm kp, 4 adet 10×10×40 cm kiriş olmak üzere toplam 45 adet numune almıştır. Küp numuneler basınç dayanımının belirlenmesinde, kiriş numunelerin  adeti eğilmede çekme dayanımının belirlenmesinde, bir adet kiriş numunesi de sıcaklık testinde kullanılmak üzere alınmıştır (şekil 42). Beton karışımları hazırlanmadan önce yağ tabancası ile numune kalıpları yağlanmıştır (şekil 41).



şekil 41. Beton numune kalıplarının yağlanması



Şekil 42. GP küp numuneler

Sıcaklık testi uygulanacak kiriş numunelere yaş beton prizini almadan önce thermocouple yerleşimini kolaylaştırmak amacıyla 2,5 cm, 5 cm, 7 cm ve 10 cm olarak dört farklı seviyede pipet batırılmıştır (Şekil 43). Yapılan ön çalışmalarda beton sertleştikten sonra matkap vb. delici ile ölçüm için delik açılmasında betonda çatlaklar meydana gelmiştir. Plastik pipetler priz sonrası kolaylıkla çıkmaktadır. Pipetlerin hacmini kaybetmemesi için içlerine çöp şişler yerleştirilmiştir ve ölçülecek derinliğe uygun olarak batırma çizgisi oluşturulmuştur.



Şekil 43. Sıcaklık ölçümü için pipetle delik oluşturulması

Geleneksel beton yaş halde iken numune kalıplarının 1/3'ü beton ile doldurulup üzerine genleştirilmiş perlit eklenmiş ancak numune kalıbında homojen karıştırma başarılı olmamıştır. Numuneler için gerekli yaş beton ile genleştirilmiş perlit agregası daha geniş bir kapta karılarak numune kalıplarına şişleme yaparak yerleştirilmiştir (Şekil 44).



Şekil 44. Genleştirilmiş perlitli homojen beton karışımı elde etme aşamaları

Beton numune kalıpları deney aşamalarında tanınması için gerekli bilgileri içerecek şekilde etiketlenerek priz alması için arazi şartlarında bekletilmiştir. 24 saat sonunda priz alan beton numuneler kür havuzuna yerleştirilmiştir (Şekil 45).



Şekil 45. Kür havuzunda 7, 28 ve 90 gün bekletilen GP numuneler

2.2.2. Ham Perlit İçeren Beton Numune Üretimi

Aşkale Hazır Beton Tesisi'nden temin edilen C30 dayanım sınıfına ait yaş betona ham perlit agregası katılarak ham perlit içeren beton numuneler elde edilmiştir (Şekil 47). HP2 olarak adlandırılan ve maksimum tane boyutu (D_{max}) 4 mm olan ham perlit agregası HP olarak kullanılmıştır. Ham perlit betonun toplam hacminin %0, 5, 10, 15 ve 30 'u oranında ikame edilerek karışımlar oluşturulmuştur. %15 ham perlit içeren beton numunesi 'HP15' olacak şekilde üretilen numuneler HP0, HP5, HP10, HP15 ve HP30 olarak adlandırılmıştır.

Karışım setleri için gerekli ham perlit agregaları numune kaplarının toplam hacminin %10 fazlası olacak şekilde hata payı verilerek tartılıp hazırlanmıştır (Şekil 46). Numuneler hazırlanırken taşıma, şişleme, tokmaktama, tesviye aşamalarında meydana gelebilecek kayıpların üretimi aksatmaması için bu artırma işlemi yapılmıştır. Küp ve kiriş numuneler priz sonrası kolay ayrılması için yağlanmıştır. C30 yaş betonun içine gerekli miktarda ham perlit aşamalı olarak eklenerek karıştırılmıştır (Şekil 48). El ile karılması zor olduğu için hacimce %10, 15 ve 30 ham perlit içeren karışımlarda betoniyer kullanılmıştır (Şekil 49). Elde edilen beton numune kalıplarına 3 aşamada şişleme ve tokmaktama yapılarak yerleştirilmiştir. Yüzey tesviyesi mala yardımıyla yapıldıktan sonra etiketleri yapıştırılmıştır. Yapılacak sıcaklık ölçümü deneyinde thermocouple yerleştirilmesi için gerekli boşluklar pipet yardımıyla sağlanmıştır. Pipetler 2,5; 5; 7 ve 10 cm derinliklere aralarında eşit mesafe olmasına özen gösterilerek priz almadan önce batırılmıştır (Şekil 50). Priz alması için arazi şartlarında bırakılan numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra su kürü havuzuna koyulmuştur.



Şekil 46. HP karışımlarında kullanılacak miktarda hazır edilen perlit agregaları



Şekil 47. Hazır beton mikserinden C30 yaş betonun alınması



Şekil 48. HP agregasının karışıma aşamalı olarak eklenmesi



Şekil 49. Betoniyer ile HP agreganın yaş betona homojen olarak karıştırılması



Şekil 50. HP kiriş numunesinde pipet yerleşimi

2.3. Beton Numunelerin Dayanımlarının Belirlenmesi

Beton kalitesini değerlendirmede basınç dayanımı en ön sıralarda gelmektedir. Genelde beton döküm aşamasında numuneler alınır ve bu numunelerin 28 günlük basınç dayanımları göz önüne alınarak beton kalitesi belirlenir.

Üretilen beton karışımından silindir veya küp numuneler alınarak priz ve kür sonrasında yapılan kırma testleri ile betonun basınç dayanımı elde edilmektedir (TSEN12390-3), (ASTM C39), (BSEN12390), (ASTMC330). Hafif agregalı betonun basınç dayanımının belirlenmesi ASTM C330/C330M standardına göre, sertleşmiş geleneksel betonun basınç dayanımının belirlenmesi ASTM C39/C39M standardına göre yapılır. Yaş haldeki betondan numune alınarak elde edilen sertleşmiş betonun basınç dayanımının bulunması TS EN 12390-3 ile standarda bağlanmıştır.

Genleştirilmiş perlit ve ham perlit içeren beton küp numuneler 7, 28 ve 90 günlük su kürü sonrasında basınç testine tabi tutulmuştur. Perlitin uzun dönemde dayanım gelişimini izlemek için 90 gün su kürü tercih edilmiştir. Beton karışımlarından alınan 15×15×15 cm küp numunelerin 2 tanesi 7 günlük, 2 tanesi 28 günlük ve 1 tanesi 90 günlük basınç dayanımının belirlenmesi için kullanılmıştır.

Betonda çatlak oluşumu büyük oranda çekme gerilmeleri ile ilişkilidir. Betonun çekme dayanımının belirlenmesi için standart haline gelmiş deneyler mevcuttur (BSEN12390-6), (TSEN12390-5), (ASTMC78), (ASTMC293). Betonun çekme dayanımı doğrudan veya dolaylı yükleme (yarmada çekme ya da eğilmede çekme) deneyleri ile bulunmaktadır. BS EN 12390-6 Avrupa Standardı, sertleştirilmiş betonun silindirik test numunelerinin çekme yarma mukavemetinin belirlenmesini içerir ve Türk Standardı ile paralellik gösterir. ASTM C496 standardı silindirik beton numunelerin yarmada çekme dayanımının belirlenmesi olup elde edilen değerler yapısal hafif beton elemanların tasarımında kullanılmaktadır. ASTM C78-09 standardı ile verilen yöntem üç nokta yüklemeli basit bir kiriş kullanılarak betonun eğilme dayanımının belirlenmesini kapsar. ASTM C293/C293M-16 betonun eğilmede çekme dayanımını merkez nokta yüklemeli basit bir kiriş kullanılarak belirlemektedir.

Genellikle gevrek olan plastik, seramik, beton ve doğal taşlar gibi çeşitli malzemelere uygulanabilen eğilmede çekme testi perlit içeren beton numunelerin eğilmede çekme dayanımını belirleme kullanılacaktır. Üç noktalı eğilme testi düzeneğinde, iki mesnet üzerine koyulan numune orta noktasından yüklenerek meydana gelen moment bulunur. Sonrasında çekme dayanımını veren bağıntı yardımıyla ölçüleri belli olan beton kirişin alt

yüzeyinde oluşan moment ile betonun çekme gerilmesi mukavemeti bulunur. Perlit içeren beton karışımlarından alınan 10×10×40 cm boyutlu kiriş numunelerin 2 tanesi 28 günlük ve 1 tanesi 90 günlük çekme dayanımını bulmak için kullanılmıştır.

2.3.1. Genleştirilmiş Perlit İçeren Numunelerin Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi

GP0, GP5, GP10, GP15 ve GP30 karışımlarına ait 15×15×15 cm küp beton numuneler priz aldıktan sonra su kürüne bırakılmıştır. Sırasıyla 7, 28 ve 90 günün sonunda su havuzundan çıkarılan numuneler ıslaklığını kaybetmesi için oda şartlarında bekletilmiştir. Küp numuneler basınç testi aletine uygun eksenlerde olacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 51). Numunelerin üretimde üstte kalan pürüzlü yüzeyleri yatayda kalacak şekilde yerleştirilmesine dikkat edilmiştir. Yapılan yükleme sonucu basınç mukavemeti değerleri Mega Paskal (MPa) cinsinden elde edilmiştir.



Şekil 51. Basınç düzeneğine yerleştirilen GP küp numune

2.3.2. Genleştirilmiş Perlit İçeren Numunelerin Eğilmede ekme Dayanımlarının Belirlenmesi

GP0, GP5, GP10, GP15 ve GP30 karışımlarına ait 10×10×40 cm beton kiriş numuneler iki sabit mesnet üzerinde ortalananak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 52). Uzunluk boyunca kenar noktalarından 5 cm içeride olacak şekilde işaretleterek bu noktalar mesnetlere denk getirilmiştir (Şekil 53). Kuvvet numunenin tam orta noktasından dikey olarak etki edecek şekilde sabitlenen sistemin yükleme mekanizması çalıştırılarak eğilmede çekme deneyi gerçekleştirilmiştir (Şekil 54).

Üç noktalı eğilmede çekme testinde numunenin eğilmeye karşı durabildiği maksimum kuvvet değeri F kilo Newton (kN) cinsinden elde edilmiştir. Eğilmede ekme dayanımının ‘σ’ ile sembollendiği denklemde ‘L’ mesnet açıklığını, ‘b’ kiriş numunenin enini ve ‘h’ yüksekliğini göstermektedir. 40 cm uzunluktaki kiriş numune kenarlarından 5 cm içeride mesnete yerleştirildiği için ‘L’ 30 cm alınmıştır. 28 ve 90 günlük eğilmede çekme dayanımları denkleme uygun olarak hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{3 \times F \times L}{2 \times b \times h^2} \quad (5)$$



Şekil 52. Eğilme test düzeneğine yerleştirilen kiriş numune



Şekil 53. Kiriş numunenin mesnetlere yerleştirilmesinin üstten görünüşü



Şekil 54. Eğilme testi sonucu gevrek kırılan GP kiriş numunesi

2.3.3. Ham Perlit İçeren Numunelerin Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi

7,28 ve 90 günlük kür sürelerini tamamlayan 15×15×15 cm küp HP0, HP5, HP10, HP15 ve HP30 numuneleri su dolu havuzdan çıkarılmıştır (Şekil 55). Yüzey ıslaklığı gidene dek oda sıcaklığı ortamında kurumaya bırakılmıştır. Test için hazır numuneler basınç test makinasına eksenel olarak kayma olmaksızın yerleştirilmiştir. Basınç yüklemesi yapılarak karışımlara ait basınç mukavemeti değerleri bulunmuştur.



Şekil 55. Kür süresi dolan numunelerin havuzdan çıkarılması

2.3.4. Ham Perlit İçeren Numunelerin Eğilmede Çekme Dayanımlarının Belirlenmesi

HP0, HP5, HP10, HP15 ve HP30 karışımlarına ait kiriş beton numuneleri üzerinde üç noktalı eğilme testi yapılmıştır. Ham perlit agregalı betonlara ait 28 ve 90 günlük eğilmede çekme dayanımları hesaplanmıştır.

Eğilme test düzeneği iki adet sabit mesnet ve bir adet yükleme kolundan oluşmaktadır. Kiriş numune mesnetlere olan uzaklığı eşit olacak şekilde ortalanarak düzeneğe yerleştirilir (Şekil 56). Numunenin ortalanması için önceden kenarlardan 5 cm içeride olacak şekilde mesnet açıklığını belirleyen işaretlemeler yapılmıştır. Yükleme kolunun başlığı yeterince sıkıştırıldıktan sonra makine bilgisayar programı yardımıyla çalıştırılır. Yükleme sonucu eğilmede çekme dayanımının aşılması ile kiriş numuneler genellikle ortadan ikiye ayrılmaktadır (Şekil 57). Kırılmaya neden olan maksimum kuvvet değeri ve numune boyutları kullanılarak çekme dayanımı hesaplanmıştır.



Şekil 56. Eğilmede çekme test düzeneğine yerleştirilen HP numune



Şekil 57. Eğilme testi sonunda kırılan HP kiriş numune

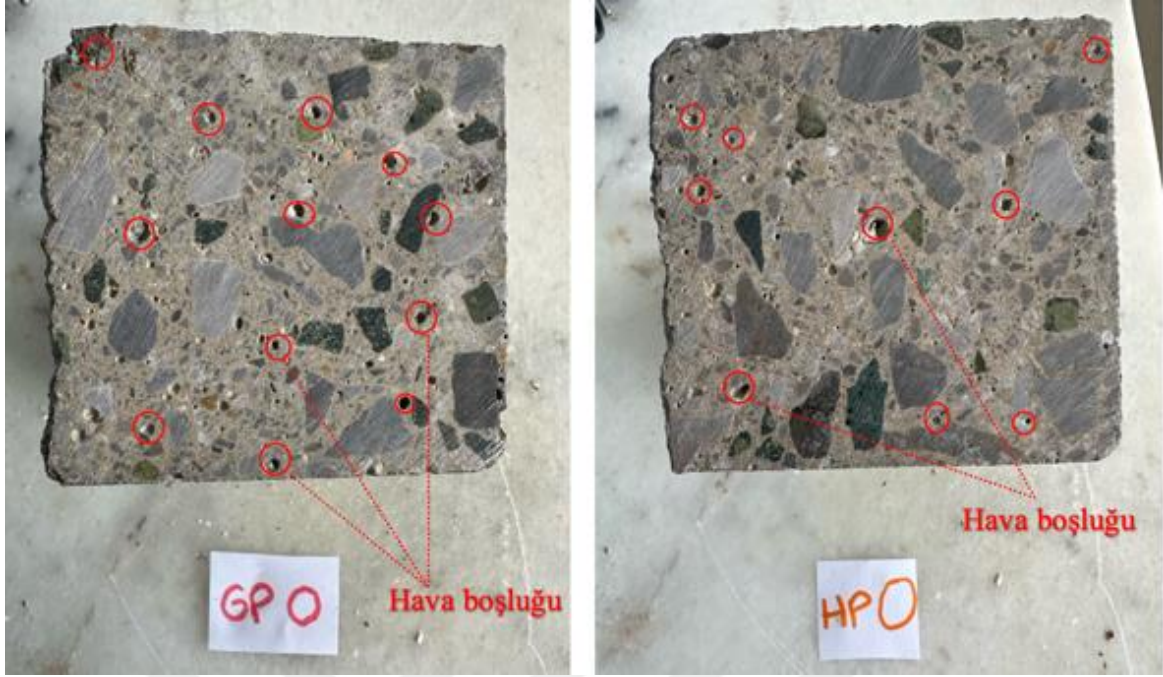
2.4. Beton Numune Kesitinde Perlit Agregasının Dağılımı

Beton kesiti boyunca agregaların dağılımının incelenmesi için eğilme testi sonrası âtıl hale gelen kiriş numunelerden beton spirali yardımıyla düz yüzeyli parçalar oluşturulmuştur (Şekil 58). Elde edilen yüzeylerdeki tane dağılımının daha belirgin görülmesi için yüzey nemli bezle silinerek incelenmiştir. GP0, GP5, GP10, GP15, GP30; HP0, HP5, HP10, HP15, HP30 beton numunelerdeki tane dağılımını, boşluk miktarını ve perlitli içeren kesit görüntüsü alınmıştır (Şekil 59, 60, 61, 62 ve 63).

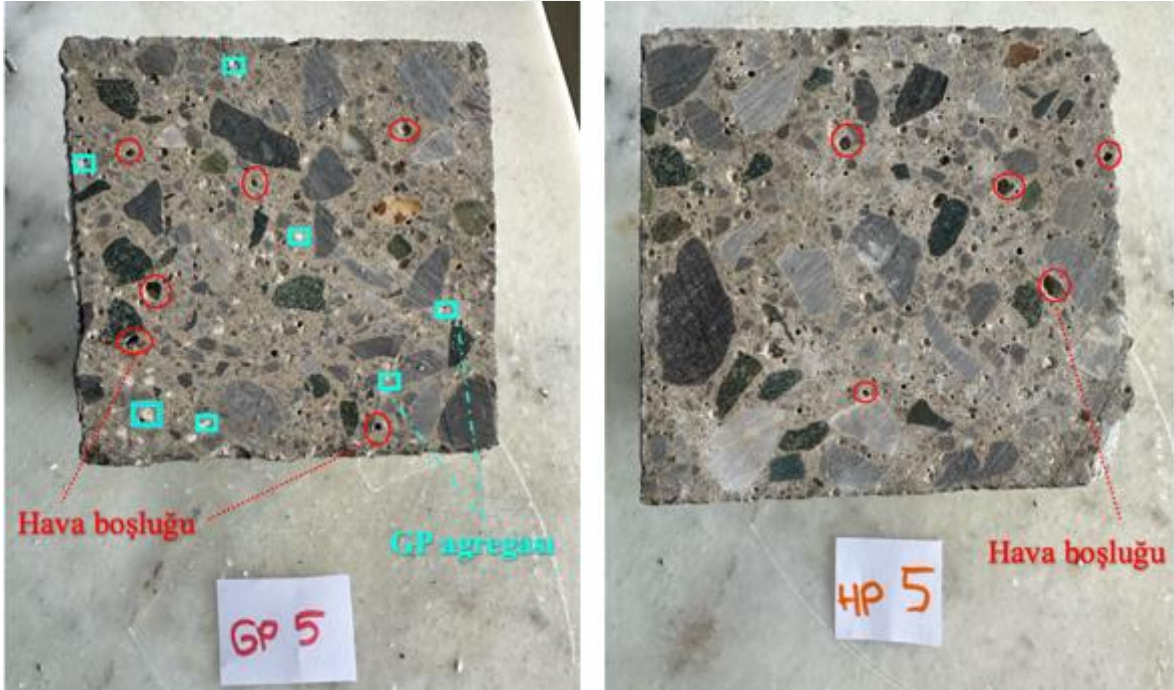


Şekil 58. Beton spiral ile numune kesilmesi

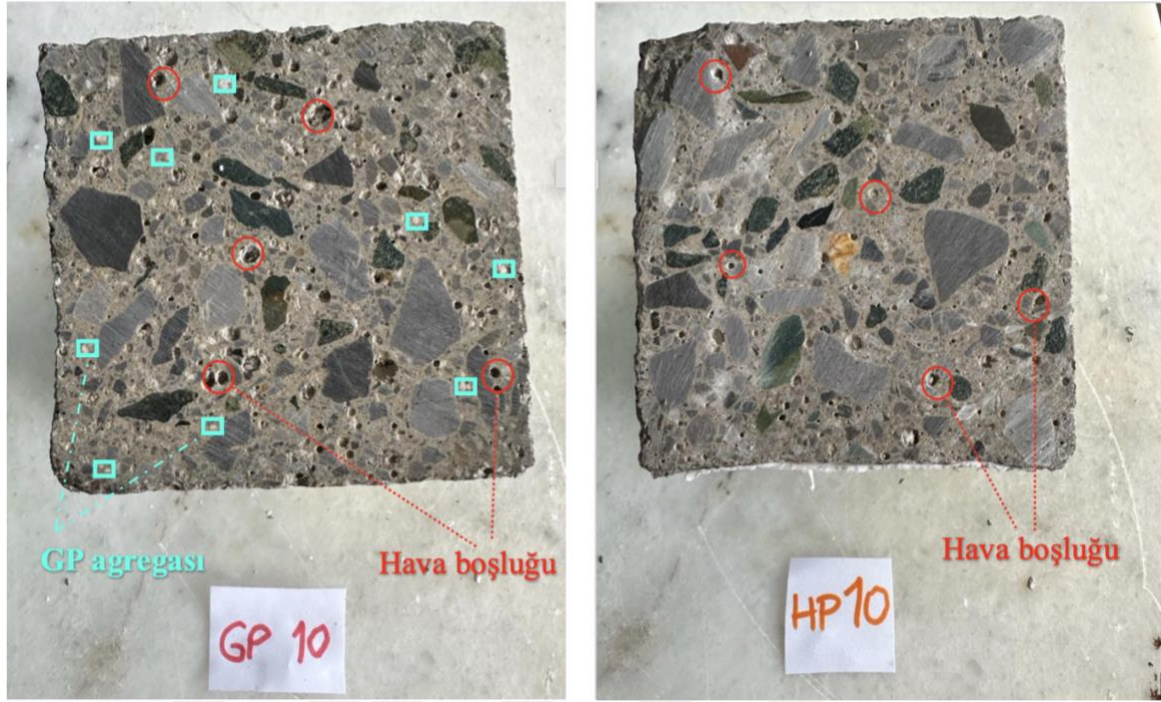
Genleştirilmiş perlit agregası beyaz renkli olduğu için kesitteki dağılımı rahatlıkla gözlenmektedir. Ham perlit agregası, geleneksel beton karışımındaki agregalar ile benzer gri renkte olduğu için kesitteki dağılımı görülmemektedir. GP oranı arttıkça beton numune kesitindeki beyaz genleştirilmiş perlit görüntüsü artmaktadır. GP30 numunesi en açık renkli beton olmuştur. GP agregalar kesit boyunca homojen dağılmıştır. GP ve HP numunelerin hepsinde en çok iri agregaların dışlarına yakın olan bölgelerde olacak şekilde hava boşlukları meydana gelmiştir.



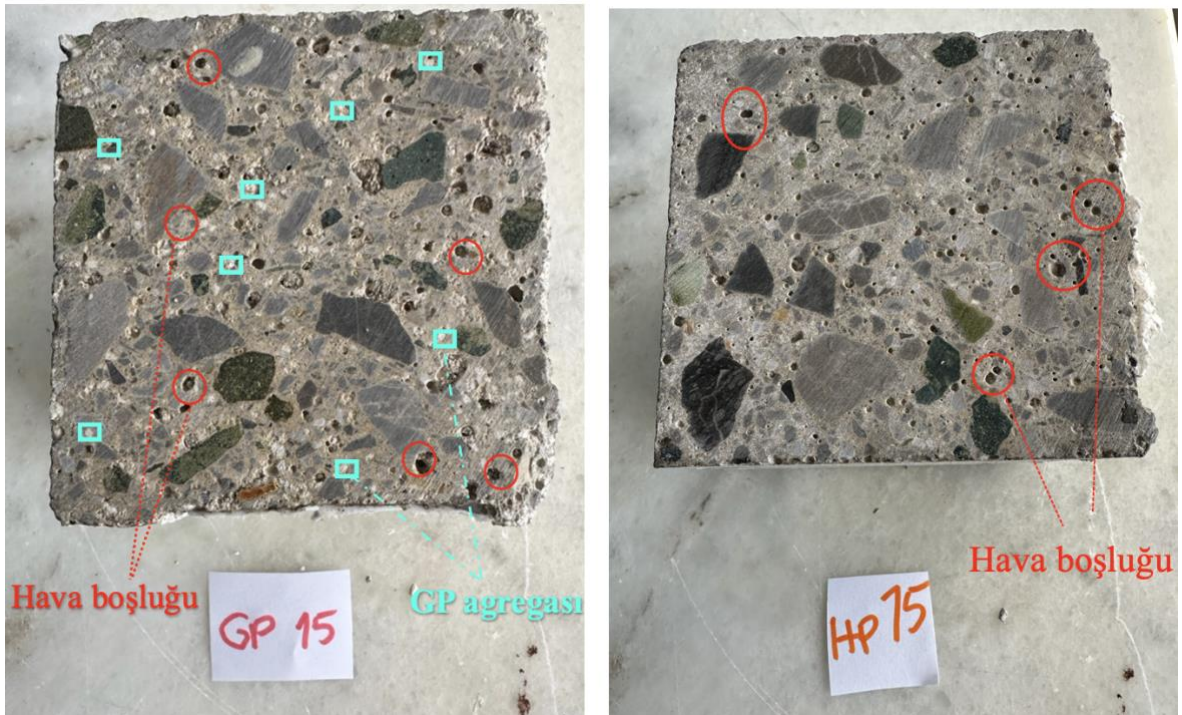
Şekil 59. Geleneksel betonun kesim sonrası kesiti GP0 ve HP0



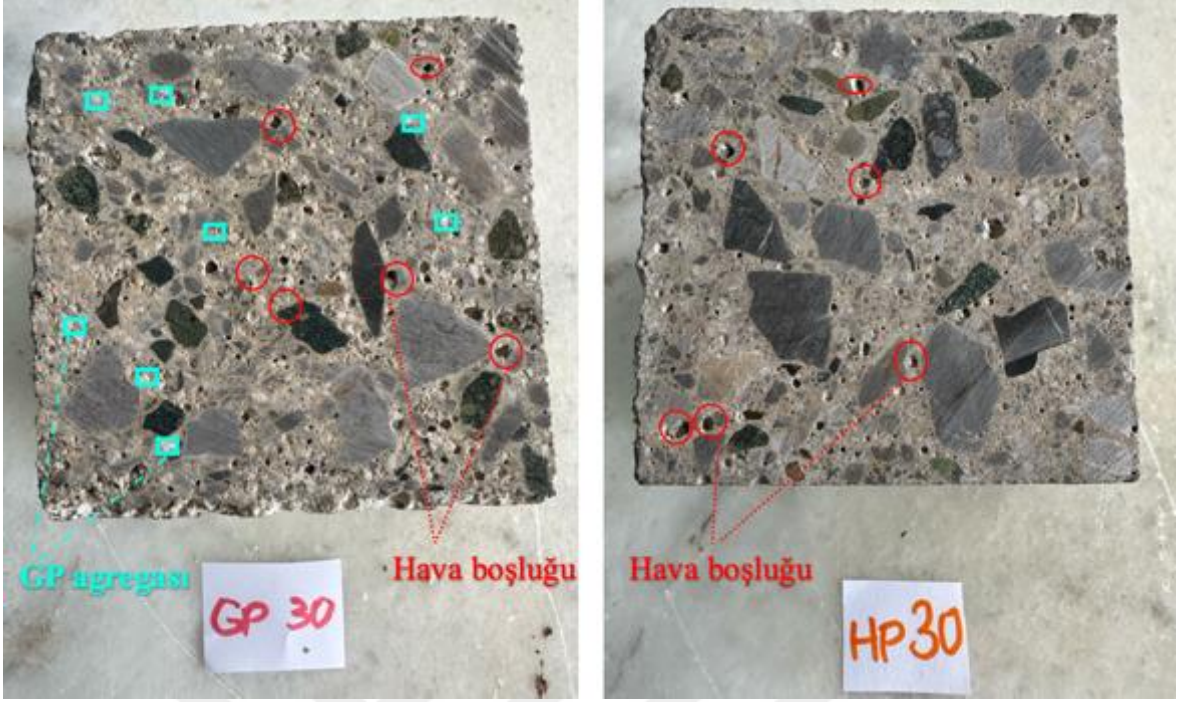
Şekil 60. %5 Perlit içeren GP5 ve HP5 numunelerin kesim sonrası kesiti



Şekil 61. %10 Perlit içeren GP10 ve HP10 numunelerin kesim sonrası kesiti



Şekil 62. %15 Perlit içeren GP15 ve HP15 numunelerin kesim sonrası kesiti



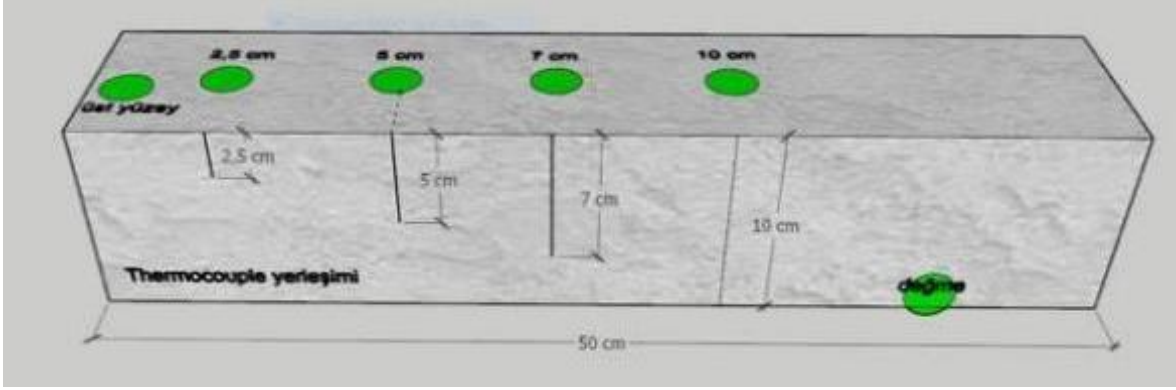
Şekil 63. %30 Perlit içeren GP30 ve HP30 numunelerin kesim sonrası kesiti

2.5. Beton Numunelerde Sıcaklık Ölçümleri

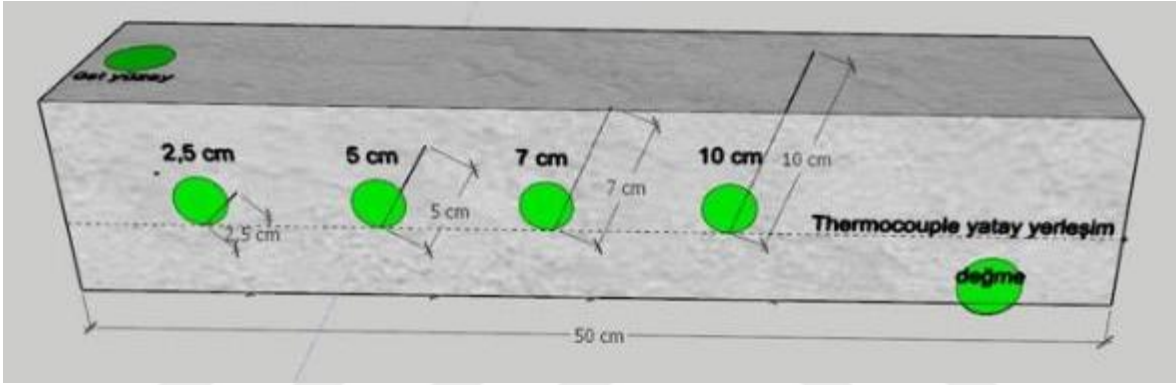
Perlit içeren 10×10×50 cm boyutlu kiriş numunelere üretim aşamasında seviyesi belli pipetlerle thermocouple yerleşimi için boşluk oluşturulmuştur. Thermocouple yerleşimi üst yüzeyden başlanarak agrega zeminle değme noktasına kadar 2,5 cm, 5 cm, 7 cm ve 10 cm derinliklerde yapılmıştır (Şekil 64). Stabilize zemini temsil edecek düzeneğin üzerine kiriş numune yerleştirilip her bir numune için eşit düzeyde olacak şekilde ısı verilmiştir.

Beton numunenin üst yüzeyi 60 °C ‘ye ulaşana kadar ısıtma işlemi yapılmıştır. Türkiye’de görülen ortalama maksimum sıcaklık değerlerine bağlı olarak 60 °C üst yüzey sıcaklığına ulaşılması tercih edilmiştir. Türkiye’de 2023 yılında yaz mevsiminde maksimum sıcaklık değeri 49,5°C ölçülmüştür (URL-4). Soğumaya bırakılan numunelerde derinliklerdeki sıcaklıklar dengelendiğinde deney sonlandırılmıştır.

Beton numunenin sıcaklık değişiminin aynı derinlikte eşit olup olmadığının tespiti için kiriş numuneler 90 ° döndürülerek yatay konumda sıcaklık deneyi tekrarlanarak thermocouple ile sıcaklık ölçümü yapılmıştır (Şekil 65). Yatay haldeki deneyler ‘‘Numune adı (Yatay) ‘’ olarak belirtilmiştir.



Şekil 64. 10×10×50 cm kiriş numunede thermocouple yerleşimi



Şekil 65. 10×10×50 cm kiriş numunede yatayda thermocouple yerleşimi

2.5.1. Genleştirilmiş Perlitli Numunelerde Thermocouple Ölçümleri

GP0, GP5, GP10, GP15 ve GP30 karışımlarından alınan kiriş numunelerde sıcaklık deneyi yapılmıştır. 28 günlük kür sonrasında sıcaklık numuneleri kürden çıkarılıp oda ortamında kurumaya bırakılmıştır. Numuneler, gerçek uygulama durumunu temsil etmesi ve numuneler arası karşılaştırmada nem oranı etkili olduğundan oda ortamında kararlı hale gelene dek bekletilmiştir. Test amaçlı yapılan ön deneylerde nemliliği yüksek betonların daha yavaş ısındığı görülmüştür.

Kiriş numuneler zeminin beton yol plağın hareketini kısıtlamasını modelleyecek şekilde agrega dolu kutunun üzerine yerleştirilmiştir. İki yönde sıcaklık deneyi yapılmıştır. Betonun ısı altında kesiti boyunca ısı değişimi dikey ve yatay yönde yapılan deneylerde kaydedilmiştir. Dikey yerleşimde beton numunenin pürüzlü yüzeyi ısı kaynağına bakacak şekilde; üst yüzey, 2,5 cm, 5 cm, 7 cm, 10 cm ve değme noktası olarak 6 noktada termal kablolar (thermocouple) yerleştirilmiştir. Termal kabloların yerleştirildiği pipetle

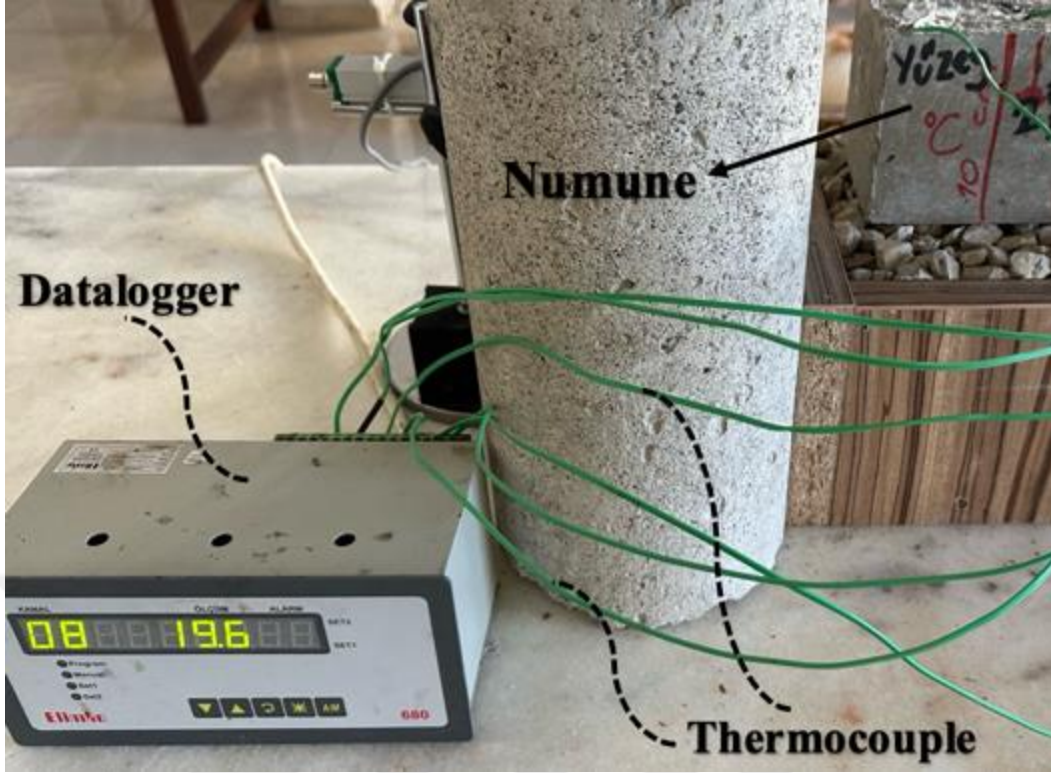
oluşturulmuş delikler ısınnın direkt etki etmemesi için alüminyum bant ile kapatılmıştır. Betonun sadece üst yüzeyden ısı alması için numunenin yan yüzeyleri alüminyum folyo yardımıyla izole edilmiştir. Beton oda sıcaklığındaki kararlı dağılımından üst yüzeyi 60 °C olana kadar ısıya maruz bırakılmıştır (Şekil 66). Üst yüzey 60 °C olduktan sonra ısı kaynağı kapatılarak soğuma hali incelenmiştir. Katı taneleri arası iletim ile sıcaktan soğuğa ısı aktarıldığından derinlikler arasında sıcaklık değerleri aynı olduğu anda veya kararlı hale geldiğinde deney sonlandırılmıştır.

Thermocouple betona yerleştirildikten sonra diğer ucu ile veri toplama cihazındaki girişlere bağlanmıştır (Şekil 67). Sıcaklık deneyi süresince 10 dakika aralıkla sıcaklık okumaları manuel olarak kaydedilmiştir.

Yatay ölçümde pürüzlü yüzey yana bakacak şekilde üst yüzeyde, aynı derinlikteki kesitteki dağılımda (2,5;5;7;10 cm) ve değme noktasında thermocouple yerleştirilmiştir. Isıtma ve soğuma süresince aynı derinliğin farklı noktalarına ait sıcaklık değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 66. Thermocouple ile sıcaklık ölçümü düzeneği



Şekil 67. Thermocouple veri toplama cihazı

2.5.2. Ham Perlitli Numunelerde Thermocouple Ölçümleri

HP0, HP5, HP10, HP15 ve HP30 kiriş numuneler 28 günlük kür sonunda kuruması için oda ortamına alınmıştır. Uygun kuruluğa gelen numuneler sıcaklık deneyine tabi tutulmuştur.

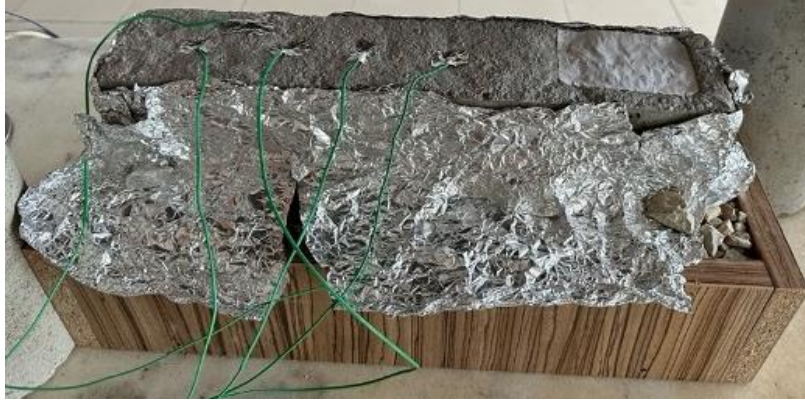
Ham perlitli kiriş numunelerde sıcaklık ölçümleri geliştirilmiş perlitli numunelerdeki düzeneğe aynı olacak şekilde yapılmıştır (Şekil 68). Altta stabilize zemin malzemesi dolu kutu üstte ısı cihazı olacak şekilde deney düzeneği kurulmuştur. HP kiriş numuneleri üretilirken pipet yardımıyla oluşturulan deliklere termal kablolar yerleştirilip veri toplama cihazına bağlanmıştır (Şekil 69). Numune yan yüzeyleri alüminyum folyo ile kaplanarak ısıdan etkilenmemesi sağlanmıştır (Şekil 70). Beton numunenin pürüzlü üst yüzeyi ısıyı direkt alacak şekilde stabilizenin üzerine koyulmuştur. Üst yüzey, 2,5 cm, 5 cm, 7 cm, 10 cm ve stabilize ile değme noktasında thermocouple ile sıcaklık ölçümleri zamana bağlı olarak kaydedilmiştir. GP setlerinde olduğu gibi yatay yönde de ölçüm yapılmıştır (Şekil 71). Yatay ölçümde aynı derinlikteki farklı noktalara ait sıcaklık değişimi kaydedilmiştir. Üst yüzeyde, stabilize malzemeyle değme noktasında ve aynı derinlikteki 2,5 cm, 5 cm, 7 cm, 10 cm noktalarında thermocouple yerleştirilmiştir.



Şekil 68. Thermocouple ile sıcaklık ölçümü



Şekil 69. Ham perlit kiriş numunesinde thermocouple yerleşimi



Şekil 70. Sıcaklık ölçümünde yan yüzeylerin izole edilmesi



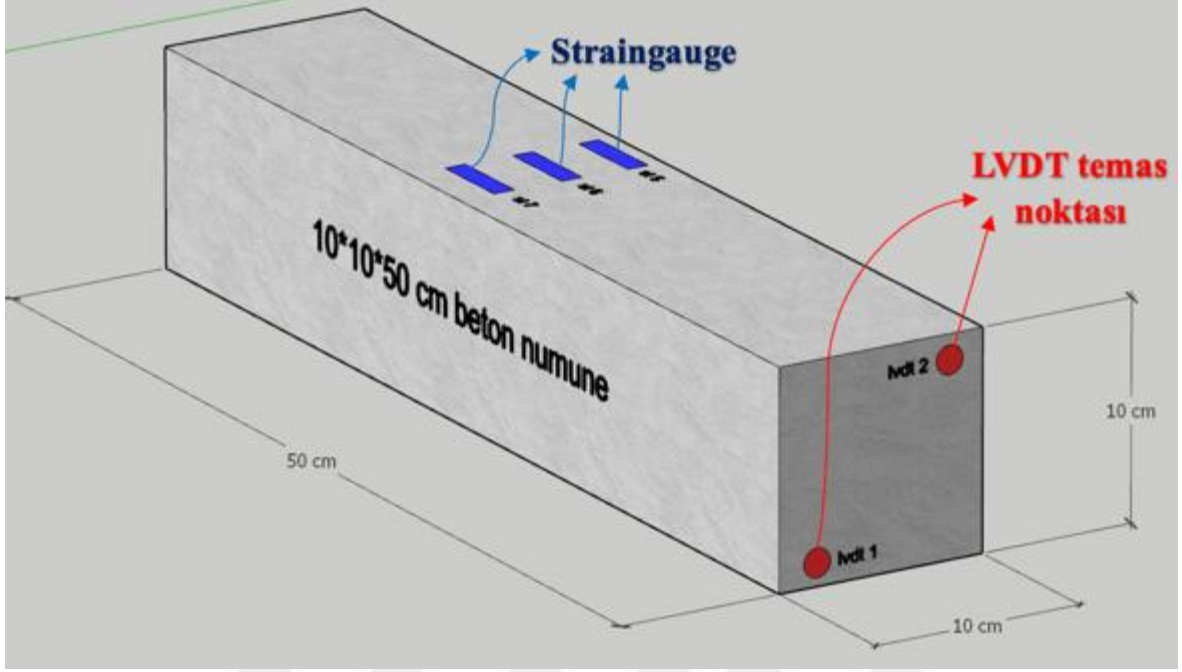
Şekil 71. Yatayda sıcaklık ölçümü

2.6. Beton Numunelerde Uzama Ölçümleri

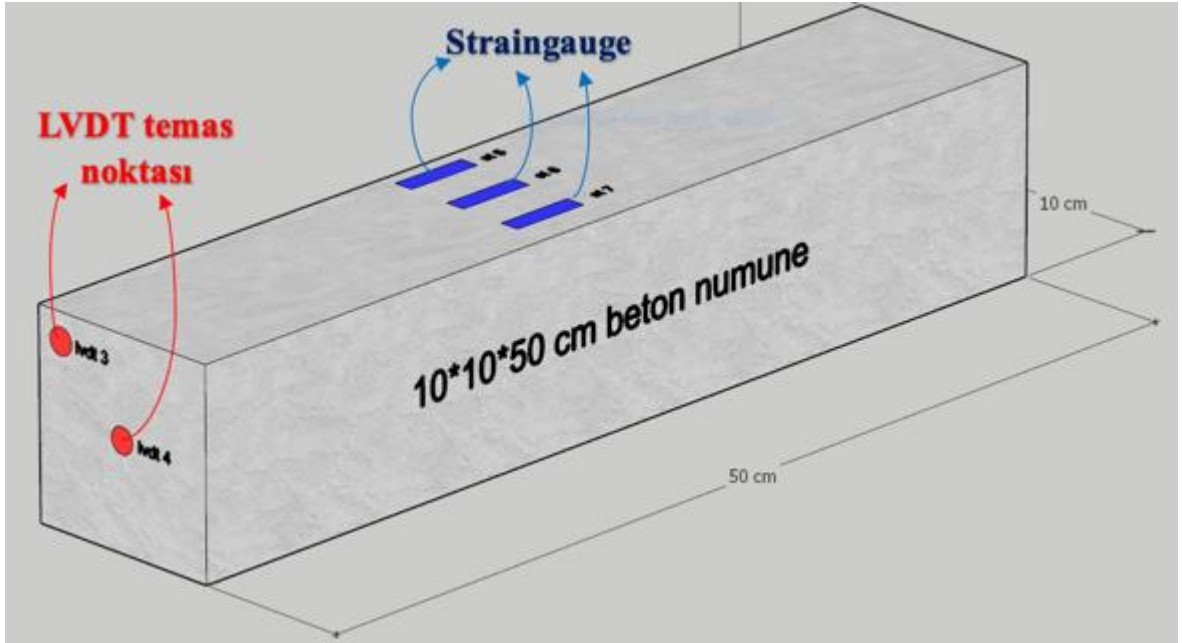
GP0, GP5, GP10, GP15, GP30; HP0, HP5, HP10, HP15, HP30 genişletilmiş perlit ve ham perlit içeren beton numunelerin ısı yükü altında meydana getirecekleri genişlemenin ölçümü için sıcaklık test düzeneğinde yatay doğrultuda LVDT ve strain gauge sensörlerle uzama veya kısalma ölçümü yapılmıştır.

10×10×50 cm boyutlu beton kiriş numune üzerinde LVDT (Linear Variable Differential Transformer) sensörler modelde gösterildiği şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 72). LVDT doğrusal deplasmanı ölçmek için kullanılmaktadır. Deneylerde kullanılan LVDT sensörlerin çalışma aralığı -30°C ile +125°C arasındadır. 10×10×50 cm kiriş numunelerin 10×10 cm yüzeylerinde belirlenen noktalarda LVDT yerleşimi yapılmıştır (Şekil 73).

Sıcaklık artışı durumunda en fazla etki görülecek üst yüzeyde sağ ve solda birer adet LVDT, orta ve alt yüzeyde birer LVDT olarak dört adet LVDT yerleşimi yapılmıştır.



Şekil 72. 10×10×50 cm kiriş numunede üst ve alt yüzeyde LVDT yerleşimi



Şekil 73. 10×10×50 cm kiriş numunede üst ve orta yüzeyde LVDT yerleşimi

2.6.1. Genleştirilmiş Perlitli Numunelerde LVDT Ölçümleri

GP0, GP5, GP10, GP15 ve GP30 kiriş numuneleri sıcaklık testi düzeneğine yerleştirildikten sonra LVDT sensörlerin konumlandırılması ve datalogger ile veri alınması gerçekleştirilmiştir (Şekil 74). LVDT sensörler, manyetik tutuculara plastik kelepçeler yardımıyla sabitlenmiştir. Sabitlenen sensörler manyetik tutucuların boy ayarlamasıyla kiriş numunede istenilen noktalara denk getirilip manyetik sistemin çalıştırılması ile sabit pozisyon verilmiştir (Şekil 75).

LVDT sensörlerin mevcut sıcaklık deneyinden etkilenmemesi amacıyla üst kısımlarında alüminyum folyo olacak şekilde koruma sağlanmıştır. Beton numunenin üst yüzeyinin sıcaklığı 60 °C oluncaya kadar ısıtma halinde sonrasında soğuma halinde LVDT okumalarına devam edilmiştir. LVDT 1 ile alt yüzeye yakın, LVDT 4 ile orta noktada, LVDT 2 ve LVDT 3 ile üst yüzeye yakın olan bölgede ölçüm alınmıştır. Sıcaklık deneyi süresince datalogger ile LVDT sensörlerin ilettiği Volt değerleri okunmuştur. Elde edilen Volt verisine karşılık gelen uzama mm cinsinden hesaplanmıştır. Deney süresince hiçbir genleştirilmiş perlit numunesinde çatlak oluşmamıştır.



Şekil 74. LVDT sensörlerle sıcaklık deneyinde uzama ölçümü yapılması

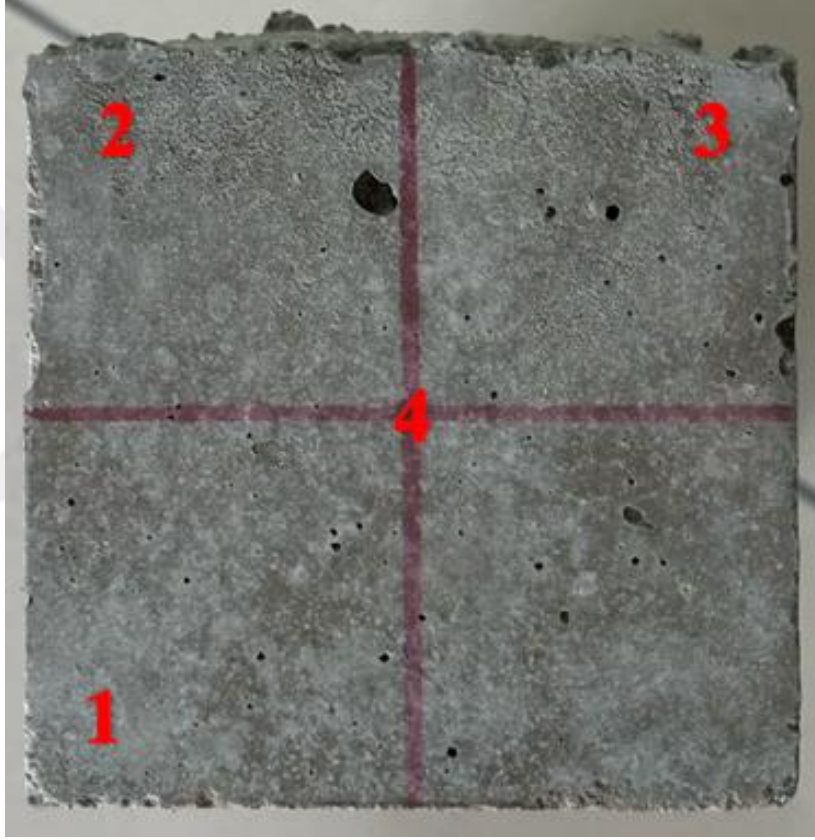


Şekil 75. LVDT sensörlerin sabitlenmesi

2.6.2. Ham Perlitli Numunelerde LVDT Ölçümleri

HP0, HP5, HP10, HP15 ve HP30 ham perlitli kiriş numunelerinin sıcaklık deneyi sırasında ısı nedeniyle oluşturdukları genleşme LVDT sensörler aracılığı ile ölçülmüştür. LVDT sensörün yayının tam açık ve tam kapalı durumdaki Volt değerleri farklıdır. Beton numunenin yatay doğrultuda uzama veya kısılması LVDT sensörlerin yayının açılıp kapanmasına neden olmaktadır. LVDT yayının değişimine bağlı datalogger ile Volt değerleri saniyede bir veri olacak şekilde sıcaklık testi sürelerince okunmuştur. Volt değerlerinin karşılığı olan uzama milimetre cinsinden hesaplanmıştır.

Kiriş numunelerde LVDT sensörlerin yerleştirileceği noktaların belirlenmesi için orta noktayı gösteren kılavuz işaretlemeleri yapılmıştır (şekil 76). Kılavuz çizgilerin yardımıyla yerleştirilen LVDT 1 ile alt yüzeye yakın, LVDT 4 ile orta noktada, LVDT 2 ve LVDT 3 ile üst yüzeye yakın olan bölgede ölçüm alınmıştır (şekil 77). Sıcaklık deney düzeneğine yerleştirilen kiriş numuneye tam değecek şekilde konumlandırılan LVDT sensörler manyetik tutucular yardımıyla sabitlenmiştir. Sıcaklık testinden etkilenmeyecek şekilde izole edildikten sonra ısıtma başlatılmıştır. Isıtma ve soğuma boyunca ölçümler alınmıştır.



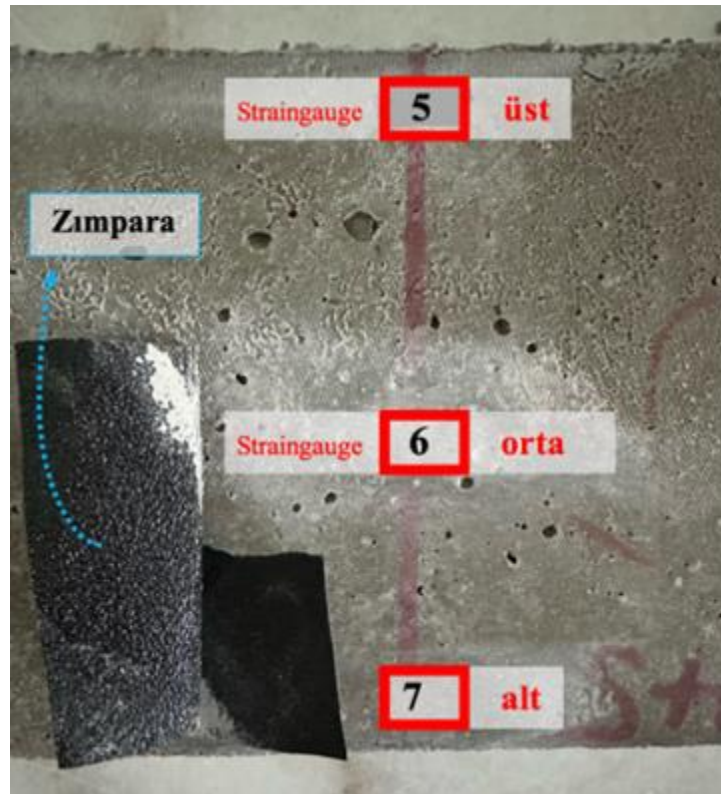
şekil 76. LVDT yerleşimi için kılavuz çizgiler



Şekil 77. LVDT 1,2,3,4 sensörlerin yerleşimi

2.6.3. Genleştirilmiş Perlit ve Ham Perlitli Numunelerde Straingauge Ölçümleri

GP0, GP5, GP10, GP15, GP30 ve HP0, HP5, HP10, HP15, HP30 perlit içeren beton 10×10×50 cm boyutlu kiriş numunelerinin sıcaklık testi sırasında ısıtma ve soğuma süresince birim yer değiştirme miktarları straingauge sensörler ile ölçülmüştür. Datalogger ile bağlantısı yapılacak kanal adı Channel 5, 6, 7 ile uyumlu olarak straingaugeler Strain5, Strain6 ve Strain7 şeklinde adlandırılmıştır. Isının geldiği üst yüzeyden numunenin çakıl ile değdiği noktaya doğru üst, orta ve alt bölgede kiriş numunenin 25 cm ortasında straingauge yerleşimi yapılmıştır (Şekil 78). Straingaugelerin verileri düzgün alabilmesi için beton yüzeyi zımpara ile pürüzsüz hale getirilmiştir. Straingauge sensörler numunede belirlenen yerlerine lehimleri üstte kalacak şekilde yapıştırılıp ısıdan etkilenmemesi için önce epoksi tabaka ile ikinci olarak alüminyum bant ile korumaya alınmıştır (Şekil 79). Straingauge sensörler 80°C, epoksi tabaka 160 °C'ye dayanıklı olarak seçilmiştir. Sıcaklık deneyi başladığı andan soğumaya kadar bağlantı kablosu ile dataloggera mV değerleri aktarılıp kaydedilmiştir (Şekil 80). Datalogger yazılımından alınan mV değerleri ile numunelerin başlangıç boyundaki değişim oranı olan strain (ϵ) hesaplanmıştır.



Şekil 78. Numunede straingauge yerleşimi



Şekil 79. Straingauge sensörlerin yapıştırılması ve ısıdan korunması

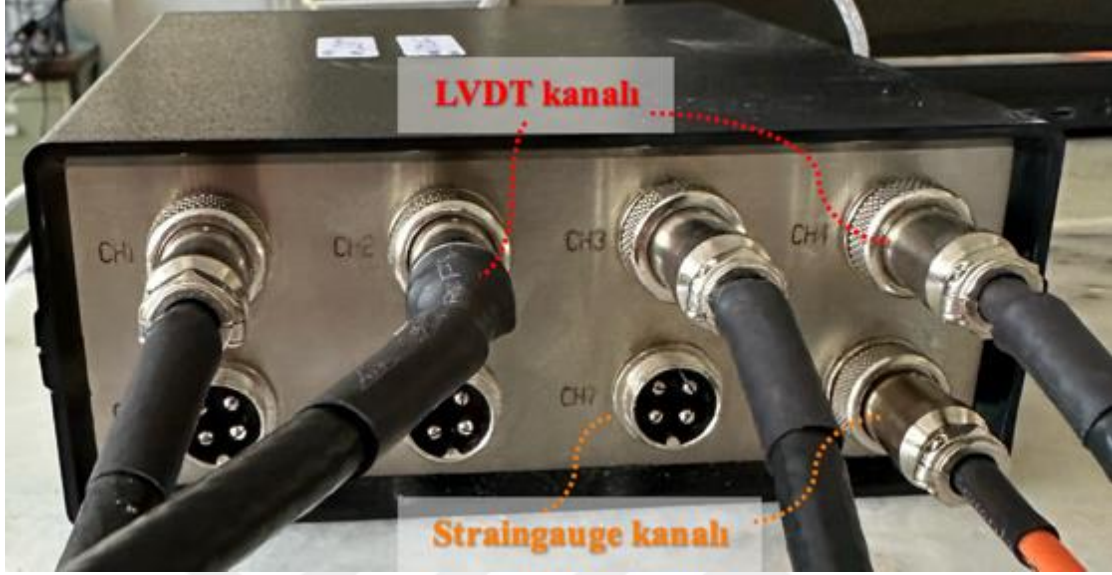


Şekil 80. Sıcaklık deneyinde straingauge sensörleri ile ölçüm

2.6.4. Datalogger ile Veri Alınması

Beton numuneler üzerinde yapılacak deneylere uygun sensörler yerleştirildikten sonra veri akışını sağlamak için veri toplama cihazı olan datalogger ile bağlantı kablosu ile uygun

girişlere bağlanır (Şekil 81). Sıcaklık deneylerinde 4 kanallı LVDT, 4 kanallı straingauge sensöre uyumlu 8 kanallı ve saniyede 8 veri toplayan datalogger kullanılmıştır.



Şekil 81. Datalogger kanallarına bağlantı kablosu ile veri akışı

Dataloggerdaki veri USB kablo ile bilgisayardaki yazılıma aktarılır. Bilgisayardaki yazılım açılıp öncelikle dataloggerdan veri alınan USB portu ‘Scan Port’ ile belirlenip veri akışının olup olmadığı kontrol edilir (Şekil 82). İstenilen veri sıklığı seçilip ‘Connect’ seçeneği ile bağlantı sağlanır. LVDT sensörlerin yayı açılıp kapatılarak Volt değerlerinde değişim olup olmadığı gözlemlenir. Ölçüm alınacak sensöre uygun olarak veri kanalları düzenlenir. Straingauge ölçümü alınacak olan kanallar için ‘Configure Channels’ ile Volt yerine mV okuması tercih edilir. Deney başladığında ‘Start recording’ ile veri kaydedilmeye başlanıp deney sonlandığı zaman ‘Stop recording’ ile veri toplanması tamamlanır. Elde edilen veriler ham Volt verileri olup uygun işlemler için kaydedilir.

Beton kırış numuneler üzerinde LVDT sensörler ile uzama değişimi ölçülürken Channel 1, Channel 2, Channel 3, Channel 4 kanalları sırasıyla LVDT1, LVDT2, LVDT3, LVDT4 numaralı sensörlere denk gelecek şekilde bağlanmıştır. Straingauge sensörlerden mV akışı sırasıyla Channel 5, Channel 6, Channel 7 kanalları ile dataloggera aktarılmıştır.

Connection Scan Port COM3 Record Interval 1 data / second Automatic Backup ☐ Record Current Reading View Clear

Control Start Recording Stop Recording Clear Data Grid View and Graph

Status : Connected ☒ Recording

Allowing automatic backup can slow down datalogger after long-term use!

No	Hour	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
1728	14:54:38	27348	26698	26228	27310	0.2617	0.0681	0.2532	-9356
1729	14:54:39	27348	26698	26228	27307	0.2618	0.0681	0.2532	-9992
1730	14:54:40	27348	26697	26227	27309	0.2619	0.0681	0.2532	-9185
1731	14:54:41	27348	26696	26229	27312	0.2619	0.0682	0.2532	-9256
1732	14:54:42	27346	26697	26229	27311	0.262	0.0682	0.2532	-9118
1733	14:54:43	27347	26698	26230	27310	0.2621	0.0682	0.2532	-8986
1734	14:54:44	27348	26697	26228	27310	0.2623	0.0682	0.2532	-9510
1735	14:54:45	27349	26699	26225	27311	0.2626	0.0682	0.2532	-9353
1736	14:54:46	27349	26695	26227	27312	0.2628	0.0682	0.2532	-9112
1737	14:54:47	27349	26696	26228	27312	0.2628	0.0682	0.2532	-9644

☒ Auto Scroll

View Calibrated Data Calibration Panel View

Export Export Raw Data Export Calibrated Data

Configure Channels

Channel 1 27349 **Channel 2** 26696 **Channel 3** 26228 **Channel 4** 27312

Channel 5 0.2628 **Channel 6** 0.0682 **Channel 7** 0.2532 **Channel 8** -9644

View Charts

Şekil 82. Deney sırasında datalogger yazılım programı arayüzü

2.7. Perlit İçeren Beton Numunelerin Magnezyum Sülfatlı Ortama Maruz Bırakılması

GP0, GP5, GP10, GP15, GP30 ve HP0, HP5, HP10, HP15, HP30 beton numuneler hazırlanan magnezyum sülfatlı çözeltide 6 ay süre ile oda sıcaklığında kürlenmiştir. Magnezyum sülfata maruz bırakılacak numunelerin kuru haldeki kütleleri kaydedilip başlangıç görüntüleri alınmıştır (Tablo 15). Magnezyum sülfat çözeltisi $MgSO_4$ tuzu ve su kullanılarak hazırlanmıştır. Çözelti hacim-ağırlıkça yüzde karışım hesabıyla oluşturulmuştur. Hacim-ağırlıkça %20 $MgSO_4$ tuzu içeren çözeltide 1000 mililitre çözücü suya karşılık 200 gram çözünen magnezyum sülfat kullanılmıştır. Karışım için gerekli $MgSO_4$ tuzu hassas terazi ile tartılıp suda iyice çözünene kadar karıştırılmıştır (Şekil 83). Etiketlenen genleştirilmiş perlit ve ham perlit numuneleri çözeltiye bırakılmıştır (Şekil 84). 180 gün sonunda çözelti dolu kaptan çıkarılan numunelerde bozulma çok az olup toplam kayıp madde 15 gramı geçmemiştir (Şekil 85). Magnezyum sülfata karşı dayanıklılığın gözlenmesi için deney süresinin daha uzun periyotta gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Tablo 16. Magnezyum sülfata maruziyet öncesi numune kütleleri

Genleştirilmiş Perlit Numune	GP Başlangıç Kütlesi (gram)	Ham Perlit Numune	HP Başlangıç Kütlesi (gram)
GP0	2276	HP0	2368
GP5	2140	HP5	2270
GP10	2130	HP10	2266
GP15	2030	HP15	2227
GP30	1801	HP30	2144



Şekil 83. Magnezyum sülfat çözeltisinin hazırlanması



Şekil 84. $MgSO_4$ çözeltisine bırakılan GP ve HP numuneler



Şekil 85. 180 günlük $MgSO_4$ kürü sonunda GP ve HP numuneler

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, genişletilmiş perlit ve ham perlit kullanılarak üretilen beton numuneler üzerinde yapılan deneylerin sonuçları değerlendirilmiştir. İlk olarak beton kalitesi hakkında genel bilgi veren basınç dayanımı sonuçları irdelenmiştir. GP0, GP5, GP10, GP15 ve GP30 genişletilmiş perlitli beton karışımları ile HP0, HP5, HP10, HP15 ve HP30 ham perlitli beton karışımları numunelerine ait basınç mukavemetleri kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Betonun çatlama davranışında kritik olan çekme dayanımı değerleri geleneksel beton değerleri ile karşılaştırılarak verilmiştir. Genleştirilmiş perlitli ve ham perlitli kırış beton numunede yapılan sıcaklık deneyi çıktıları; sıcaklık dağılımı, LVDT ve strain gauge sensörlerle elde edilen birim şekil değiştirme değerleri yorumlanmıştır.

3.1. Perlitin Basınç Dayanımına Etkisi

Genleştirilmiş perlit yüzdesi arttıkça beton basınç dayanımı azalış gösterirken ham perlit kullanımının basınç dayanımına etkisi olmamıştır. Literatür taramasında farklı boyut ve miktarlarda kullanılan perlit agregalarının basınç dayanımı üzerindeki etkilerine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Genleştirilmiş perlit miktarının agregaya yerine %10 ve üzerinde kullanılmasının dayanımda %20'den fazla kayba neden olduğu literatür çalışmalarında tespit edilmiştir (Rozycka&Pichor, 2016) (İbrahim vd., 2020) (Othman, 2020) (Numan vd., 2019) (Polat vd., 2018) (Şengül vd., 2011).

Üretilen beton numunelerin basınç dayanımları sonuçlarına göre genişletilmiş perlit agregasının %10 veya %15 kritik değerinden fazla kullanılmasının basınç dayanımını düşürdüğünden uygun olmadığı görülmüştür (Şekil 86). Ham perlitte yüksek basınç mukavemetine sahip beton üretilebilir, ham perlit agregası %5, 10, 15 ve 30 oranlarında basınç dayanımını olumsuz etkileyecek davranış oluşturmamıştır (Şekil 87). Belediyeler, il özel idareleri ve karayolları beton yol kaplamasında aranan minimum 30 MPa basınç dayanımı değerini GP0, GP5, HP0, HP5, HP10, HP15, HP30 karışımları sağlamıştır (KGM, 2016). 90 günlük basınç dayanımı göz önüne alınırsa GP10 karışımının da uzun dönemde basınç dayanımı açısından yeterli olacaktır.

Genleştirilmiş perlitin uzun dönemde dayanım gelişimini sürdürdüğü, geleneksel betona göre daha fazla arttırdığını gösteren çalışmalar olsa da 7, 28 ve 90 günlük basınç

dayanımı değerleri karşılaştırıldığında böyle bir değişim gözlenmemiştir (İbrahim vd., 2020) (Bozkurt, 2013) (Ulus, 2007). 28 günlük basınç dayanımı ile 90 günlük basınç dayanımı arasındaki değişim GP0 için %15, GP5 için %16, GP10 için %13, GP15 için %1 ve GP30 için %20 artış olarak gerçekleşmiştir.

28 günlük basınç mukavemetlerinde C30 geleneksel beton ile karşılaştırıldığında GP5, GP10, GP15, GP30 karışımlarında sırasıyla %15, %28, %37, %62 kayıp olmuştur (Tablo 17). Beton üretiminde tüm hacme oranla genişletilmiş agreganın kullanılması, literatürdeki yalnız ince agregaya ile ikame edilen çalışmalarda aynı yüzdelere kıyasla daha fazla düşüş olmasına neden olmuştur (Sinchana&Prakash, 2018) (Rozycka&Pichor, 2016) (Wang vd., 2021) (Balun, 2013) (Othman, 2020). Geleneksel betonda ince agreganın hacmi %40 mertebesinde olduğu göz önüne alındığında toplam hacimce %5 değişim aslında ince agregaya oranla %12,5 ikameye denk gelmektedir. Aynı şekilde toplam hacimce %10, %15, %30 sırasıyla ince agreganın hacmine oranla %25, %37,5, %75 ikameye eşit olmaktadır (Tablo 16). Toplam hacimce % 0, 5, 10, 15, 30 oranları sırasıyla ağırlıkça GP agregası için %0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.3 HP agregası için %0, 3, 6, 9, 18 oranına eşit olmaktadır.

Tablo 17. Perlit oranlarının ince agregaya göre yüzdeleri

Numune	Toplam Hacimce %	İnce Agregaya Hacimce %
GP5, HP5	5	12,5
GP10, HP10	10	25
GP15, HP15	15	37,5
GP30, HP30	30	75

HP5, HP10, HP15, HP30 karışımları HP0 geleneksel beton karışımına oranla 28 günlük basınç dayanımında sırasıyla %5, %4, %6, %4 azalış gösterirken 90 günlük basınç dayanımı değerlerinde en büyük mukavemeti HP15 54,6 MPa verirken sonrasında HP30 52,8 MPa ve HP0 52,6 MPa olarak birbirine eşdeğer dayanıma ulaşmıştır (Tablo 18). Ham perlitli numunelerdeki dayanım farklılıkları numune üretimindeki karıştırma, yerleştirme, sıkılama işlemlerinin değişkenliğine neden olan insan faktöründen kaynaklanmaktadır.

GP ve HP serileri karşılaştırıldığında GP0 ve HP0 geleneksel betonları arasında 10 MPa fark olduğu görülmektedir (Şekil 88). Şahit numune olarak kullanılan geleneksel beton karışımı GP0 ve HP0 numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları 36,9 MPa ve 47,8 MPa değerindedir. Ham perlitli ve genişletilmiş perlitli setlerin farklı zamanlarda üretilmesi,

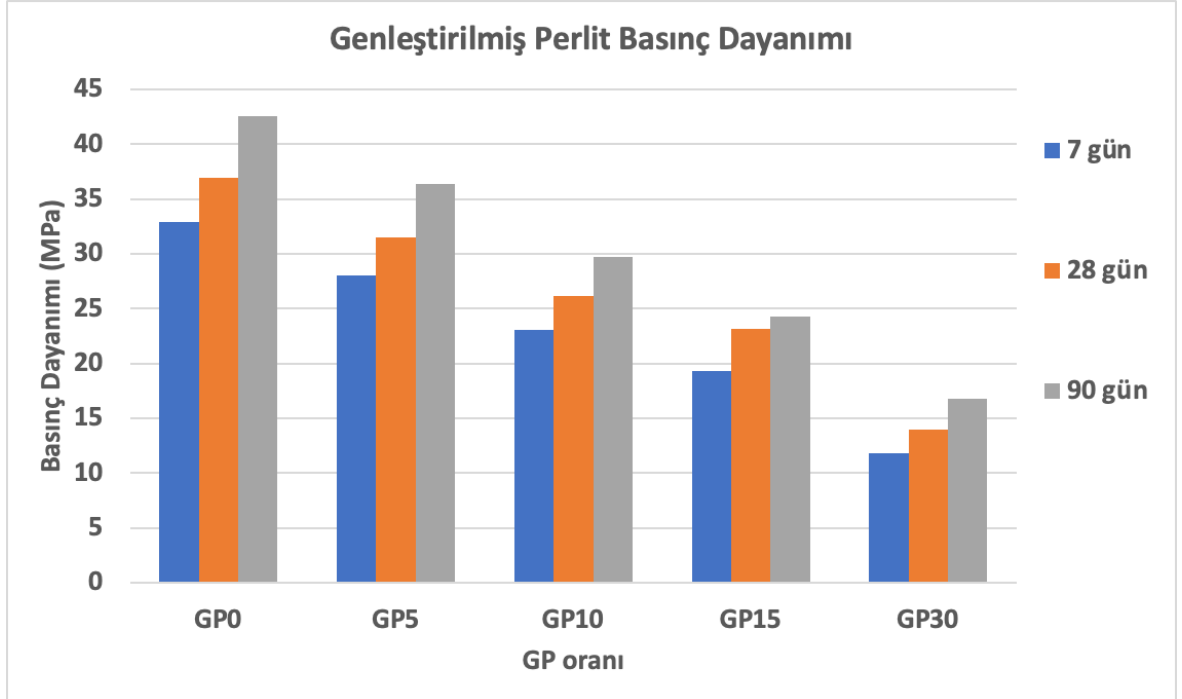
hazır beton santralinin farklı agrega kullanması, farklı çimento ve katkı kullanımı bu değişimde etkili olmuştur (Şekil 87).

Tablo 18. Genleştirilmiş perlit ortalama basınç dayanımı değerleri

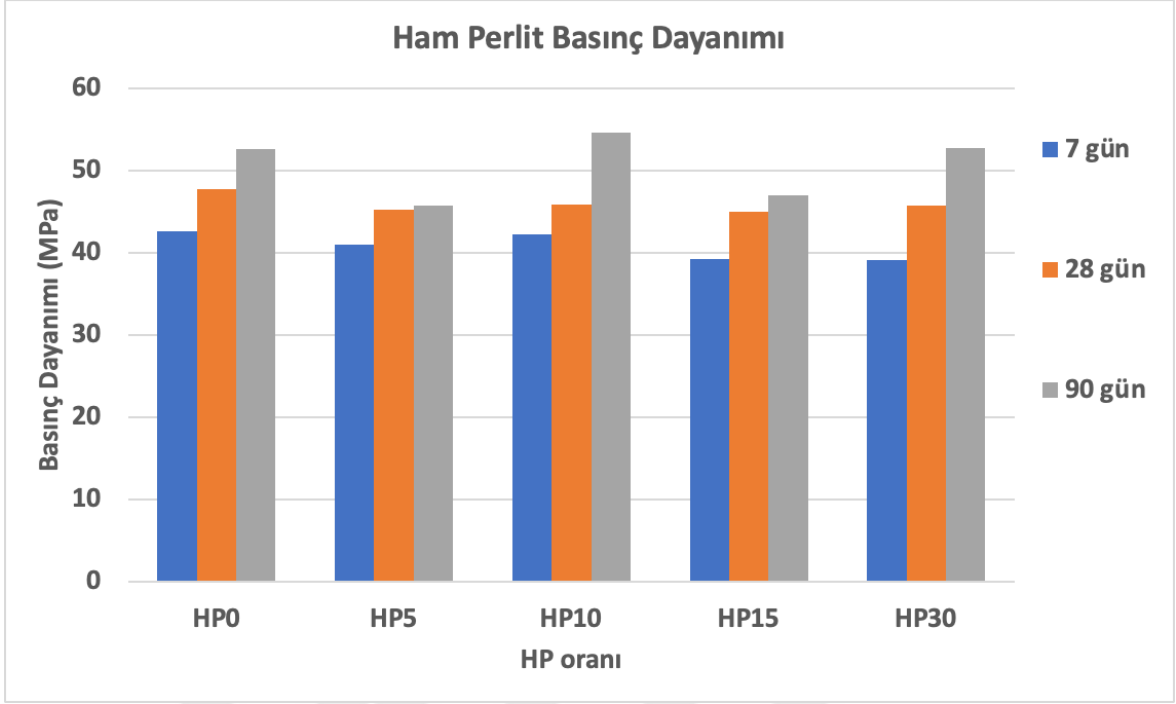
Numune adı	7 günlük basınç dayanımı (MPa)	28 günlük basınç dayanımı (MPa)	90 günlük basınç dayanımı (MPa)
GP0	32,9	36,9	42,6
GP5	28	31,5	36,4
GP10	23,1	26,2	29,7
GP15	19,3	23,2	24,3
GP30	11,8	14	16,8

Tablo 19. Ham perlit ortalama basınç dayanımı değerleri

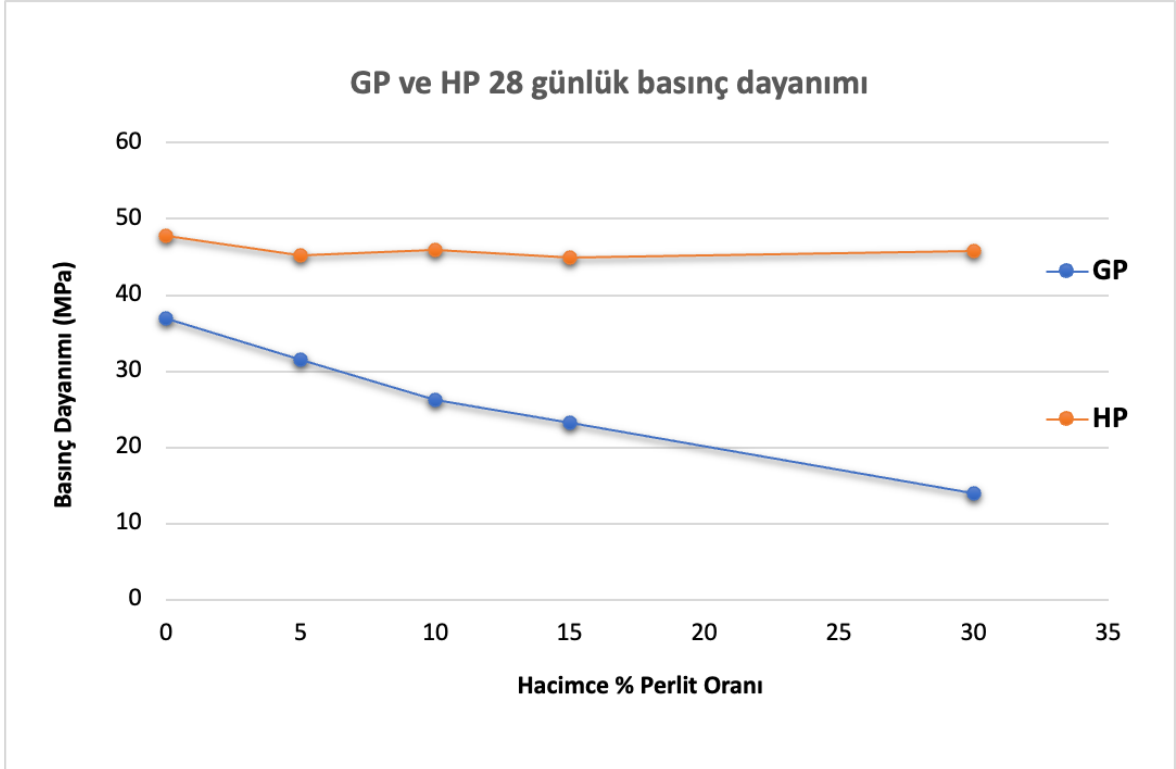
Numune adı	7 günlük basınç dayanımı (MPa)	28 günlük basınç dayanımı (MPa)	90 günlük basınç dayanımı (MPa)
HP0	42,6	47,8	52,6
HP5	41	45,2	45,8
HP10	42,2	45,9	54,6
HP15	39,3	45	47
HP30	39,1	45,8	52,8



Şekil 86. Genleştirilmiş perlitli beton numunelerinin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları



Şekil 87. Ham perlitli beton numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları



Şekil 88. GP ve HP 28 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması

3.2. Perlitin Çekme Dayanımına Etkisi

Betonun çatlak oluşturma davranışında etkili faktör çekme dayanımıdır. Çekme dayanımı değerinin tekerlek yükü ve sıcaklık etkisine bağlı gelişen çekme gerilmeleri tarafından aşılması durumunda beton yol plakta çatlak oluşur.

Genleştirilmiş perlitli numunelerde yapılan eğilmede çekme deneyi sonuçları göre en büyük çekme dayanımı geleneksel beton olan GP0 karışımında, en küçük dayanım ise en fazla genleştirilmiş perlit içeren karışım GP30' elde edilmiştir (Şekil 89). 28 günlük çekme dayanımı değerleri GP0 geleneksel betona kıyasla GP5, GP10, GP15, GP30 karışımlarında sırayla %10, 13, 23, 35 azalmıştır. %15, 28, 37, 62 azalma gösteren basınç dayanımına göre çekme dayanımında daha az kayıp olmuştur. Çekme dayanımındaki azalış basınç dayanımına oranla ortalama %43 daha az ölçülmüştür. En iyi çekme dayanımı değerleri 90 günlük kür sonunda GP0, GP5 ve GP10 için sırasıyla 4,4 MPa, 4,3 MPa ve 4,1 MPa hesaplanmıştır (Tablo 19).

Ham perlit içeren karışımlarda çekme dayanımı açısından şahit geleneksel beton numunesi ile HP oranları arasında belirgin bir fark olmamıştır. En iyi çekme mukavemeti değerini 5,7 MPa olarak HP15 karışımı vermiştir (Tablo 20). 90 günlük HP küp numuneleri ile yapılan eğilmede çekme deneyinde en iyi eğilmede çekme dayanımı değerini HP10 ve HP15 karışımları elde etmiştir (Şekil 90). Her iki kür süresinde yapılan deneyler göz önüne alındığında çekme açısından optimum karışım HP15 olmuştur.

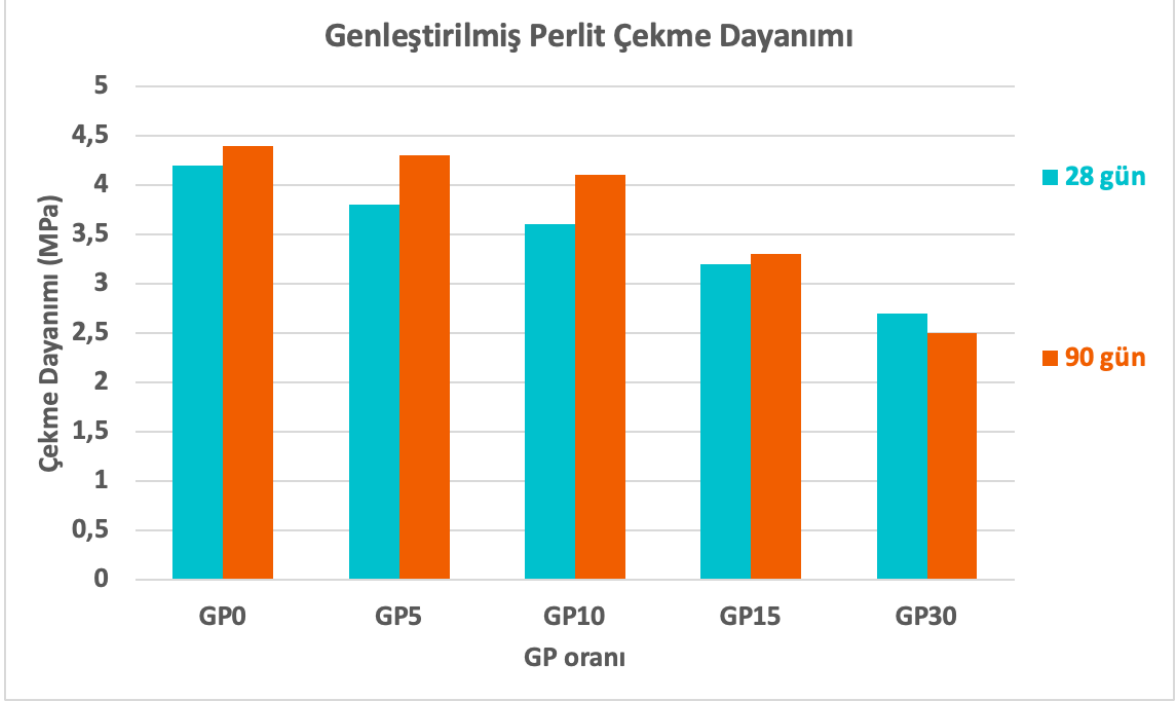
Beton yol kaplaması tasarımında eğilmede çekme dayanımlarının 4- 5 MPa aralığında olması istenmektedir (KGM, 2016). Genleştirilmiş perlitli GP5 ve GP10; ham perlitli HP5, HP10, HP15 ve HP30 karışımları eğilmede çekme dayanımı için yeterli aralıktadır (Şekil 91).

Tablo 20. Genleştirilmiş perlit ortalama çekme dayanımı değerleri

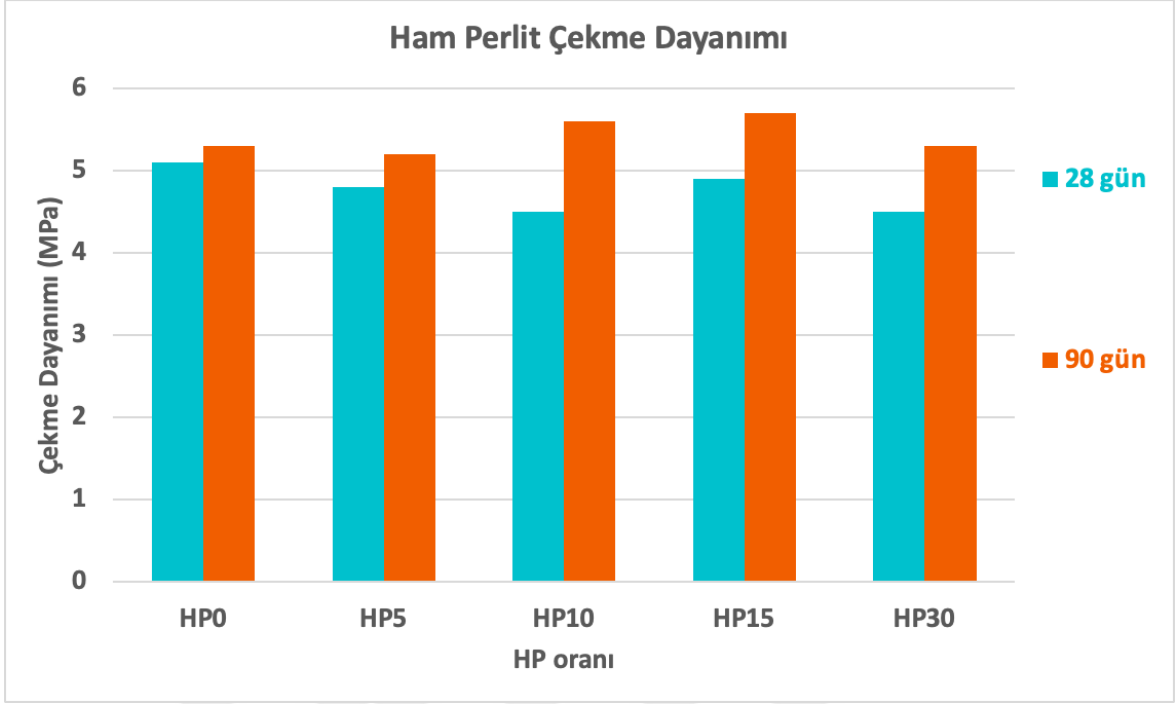
Numune adı	28 günlük çekme dayanımı (MPa)	90 günlük çekme dayanımı (MPa)
GP0	4,2	4,4
GP5	3,8	4,3
GP10	3,6	4,1
GP15	3,2	3,3
GP30	2,7	2,5

Tablo 21. Ham perlit ortalama çekme dayanımı değerleri

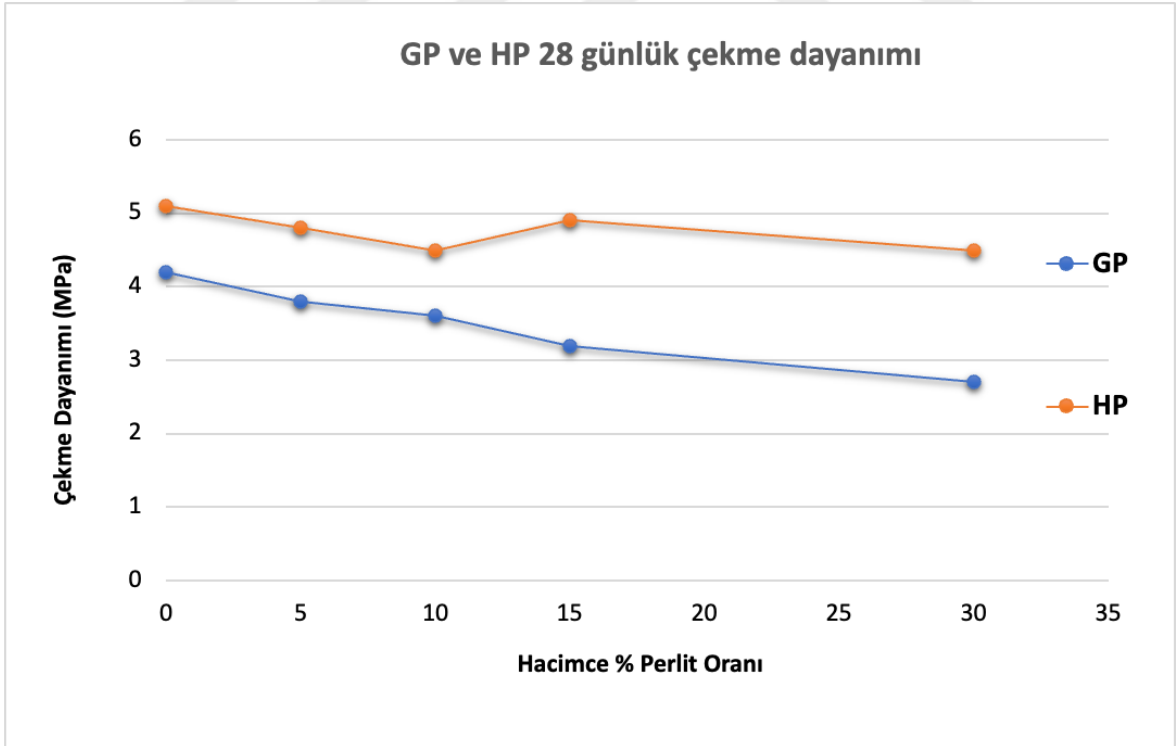
Numune adı	28 günlük çekme dayanımı (MPa)	90 günlük çekme dayanımı (MPa)
HP0	5,1	5,3
HP5	4,8	5,2
HP10	4,5	5,6
HP15	4,9	5,7
HP30	4,5	5,3



Şekil 89. Genleştirilmiş perlitli beton kiriş numunelerin 28 ve 90 günlük eğilmede çekme dayanımları



Şekil 90. Ham perlitli beton kiriş numunelerin 28 ve 90 günlük eğilmede çekme dayanımları



Şekil 91. GP ve HP 28 günlük eğilmede çekme dayanımlarının karşılaştırılması

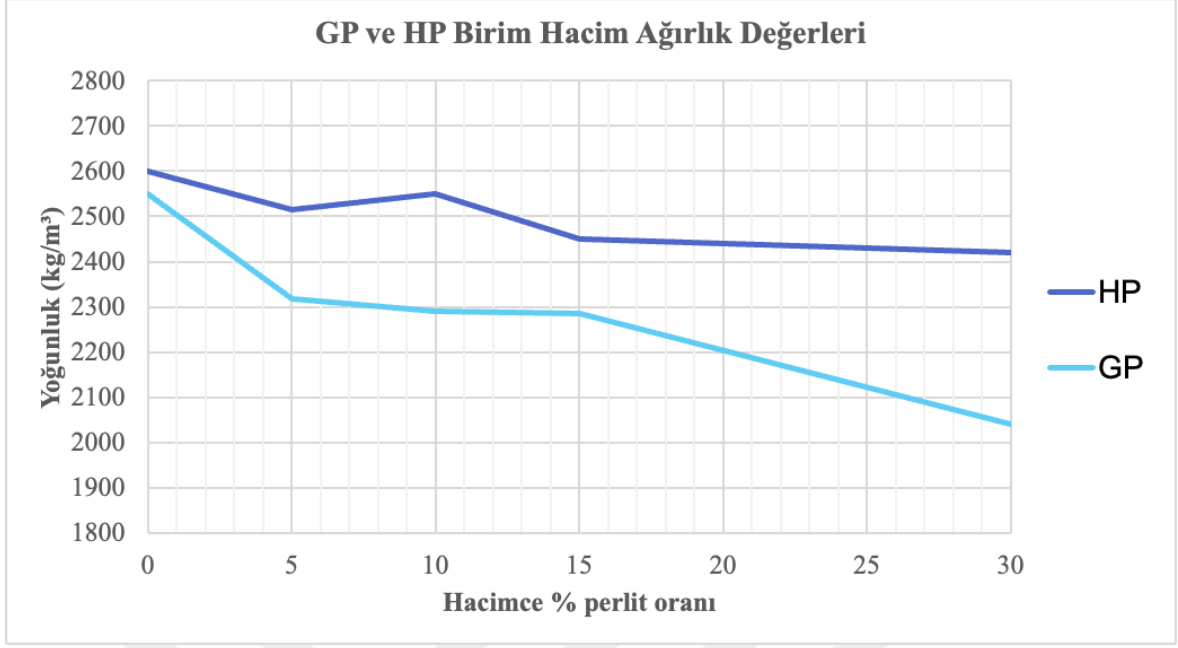
3.3. Perlitin Birim Hacim Ağırlığa Etkisi

Genleştirilmiş perlitli ve ham perlitli beton numuneler dayanım testleri öncesinde suya doygun halde iken tartılarak yoğunluk değerleri elde edilmiştir. GP ve HP oranının yoğunluğa olan etkisini görmek için yapılan bu işlemde elde edilen değerler grafik olarak sunulmuştur (Şekil 92).

Genleştirilmiş perlit ve ham perlit serileri farklı zamanlarda üretildiği için GP0 ve HP0 geleneksel beton numuneleri aynı yoğunlukta gelmemiştir. Maksimum tane boyutu (D_{max}) 4 mm olduğu için ham perlit ve genleştirilmiş perlit agregaları beton karışımındaki kaba agregalar arasındaki boşlukları doldurmuştur. Boşluklara yerleşmeleri nedeniyle %5,10 ve 15 oranları arasında büyük bir değişim olmamıştır. Her iki sette de perlit içermeyen geleneksel C30 beton GP0 ve HP0 en yüksek birim hacim ağırlık değerine sahiptir.

Hacimce %30 genleştirilmiş perlit içeren GP30 birim hacim ağırlığın %20 azalmısını sağlarken %30 ham perlitli HP30 karışımında %7 azalış olmuştur. Beton karışımlarda kullanılan genleştirilmiş perlit agregası ham perlite göre 7 kat daha hafif olmasına rağmen yoğunluğu azaltmadaki etkisi 3 kat olmuştur. GP agreganın betona eklenirken kırılması, boşluklara ezilerek yerleşmesi ve boşluklarında ekstra su tutması HP agregası ile arasında bu orana neden olmuştur.

Karışım hesabına göre GP30 numune geleneksel beton numuneye oranla %27 kadar hafif olması gerekirken üretilen GP30 %20 hafiftir. Burada genleştirilmiş perlit agregasının eksiltilemeyen beton karışımındaki agregası boyutundan küçük olması, beton içindeki boşluklara yerleşmesi etkili olmuştur. HP30 numune karışım hesabına göre C30 geleneksel betona oranla %15 hafif olmalı iken gerçekte %7 hafif olmuştur. Ham perlit agregasının D_{max} değerinin geleneksel karışımındaki maksimum tane büyüklüğünden küçük olması, daha ince taneli karışım agregası ikame edilmesi, sıkılama ve yerleştirmenin iyi yapılması hesaba göre yoğunlukta daha az azalış sağlamıştır.



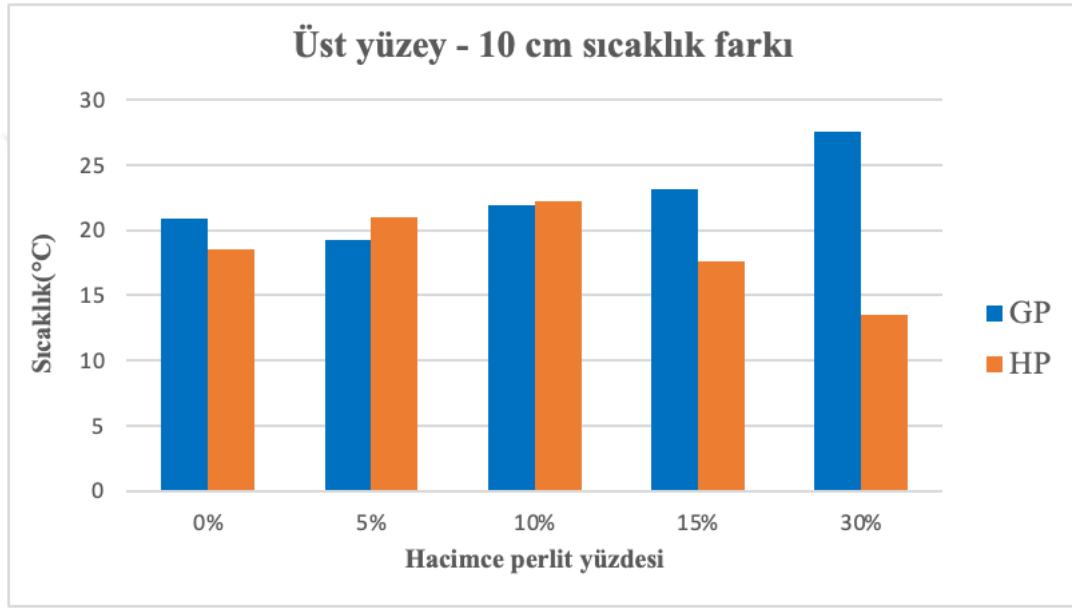
Şekil 92. GP ve HP karışımlarının yoğunlukları

3.4. Perlitin Betondaki Sıcaklık Dağılımına Etkisi

Kiriş beton numuneleri kullanılarak yapılan sıcaklık deneylerinde, beton numunenin üst yüzeyi 60°C'ye gelene dek ısıtma yapılmıştır. Üst yüzey 60°C olduğunda ısıtma tamamlanıp oda sıcaklığı ortamında soğuması ve derinliklerdeki sıcaklıkların dengelenmesi beklenmiştir. Üst yüzeyin 60°C'ye ulaşma süresi ile soğumada dengelenme süresi numunelerin nem içeriğine ve hava sıcaklığına bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Üst yüzey sıcaklığının 60 °C'ye ulaşması için en uzun süre ısıtılan numune kürden sonra kuruması için en az bekletilen GP15 olmuştur (Şekil 101).

Beton kiriş numunelerde thermocouple ölçümünde üst yüzeyin maksimum sıcaklığa geldiği andaki üst yüzey ve 10 cm derinlikteki değerler oluşacak sıcaklık farkı açısından değerlendirilmiştir. Beton plakta sıcaklık farkının fazla olması daha yüksek gerilme oluşumu dolayısıyla ısıl çatlak oluşturmaya daha yatkın olma olarak görülmektedir. Genleştirilmiş perlit yüzdesinin artışına bağlı olarak sıcaklık farkı da artmış olup en fazla fark GP30 numunesinde 27,6 °C olarak kaydedilmiştir (Şekil 102). Ham perlitli beton numunelerde ise en az farklar HP15 numunesinde 17,6 °C ve HP30 numunesinde 13,5 °C olmuştur (Şekil 106), (Şekil 107). Hacimce %15 genleştirilmiş perlit içeren GP15 ile hacimce %15 ham perlit içeren HP15 numuneleri sırasıyla 21,9 ve 22,2 °C 'lik sıcaklık farkları ile birbirine yakın değerler vermiştir.

Yüzey sıcaklığının yüksek olmasından daha fazla etkiyi, üst yüzey ve alt yüzey arasındaki sıcaklık farkının fazla olması oluşturmaktadır. Üst yüzey ve alt yüzey arasındaki sıcaklık farkının kalınlığa oranı olan sıcaklık gradyanı parametresi bu sıcaklık dağılımı farkını değerlendirmek için kullanılmaktadır. Sıcaklık gradyanının ve sıcaklık farkının en fazla olduğu durum kritik haldir. Sıcaklık farkını düşürmek açısından en verimli numune HP30 olmuştur (Şekil 93). HP30 karışımın beton yolda kullanılması sıcaklık farkını azaltması nedeniyle oluşacak çekme gerilmeleri açısından daha elverişli olacaktır.



Şekil 93. GP ve HP numunelerin üst yüzey ile en derindeki 10 cm noktasının sıcaklık farkı grafiği

Aynı ısı kaynağından eşit kapasite ve eşit uzaklıktan verilen ısıнын aynı süredeki etkisini belirlemek için sıcaklık deneyinin 60. dakikasındaki sıcaklık dağılımları incelenmiştir (Şekil 94), (Şekil 95). Numunelerin nem oranları ısınmada etkili olmaktadır.

Sıcaklık testi en son yapılan en uzun süre oda sıcaklığında bekleyen ve nemini kaybeden %10 genleştirilmiş perlit içeren GP10 numunesinin üst yüzey sıcaklığı 60. dakikada 55 °C'yi aşarken; ilk test edilen GP0 ve GP30 numunelerinde bu değer 52 ve 51 °C olmuştur. Beton numunelerin en derin noktası ile üst yüzeyi arasındaki fark GP0, GP5, GP10, GP15 ve GP30 karışımlarında sırasıyla 20,1 °C; 20,5 °C; 22,3 °C; 23,6 °C ve 25,5 °C olmuştur.

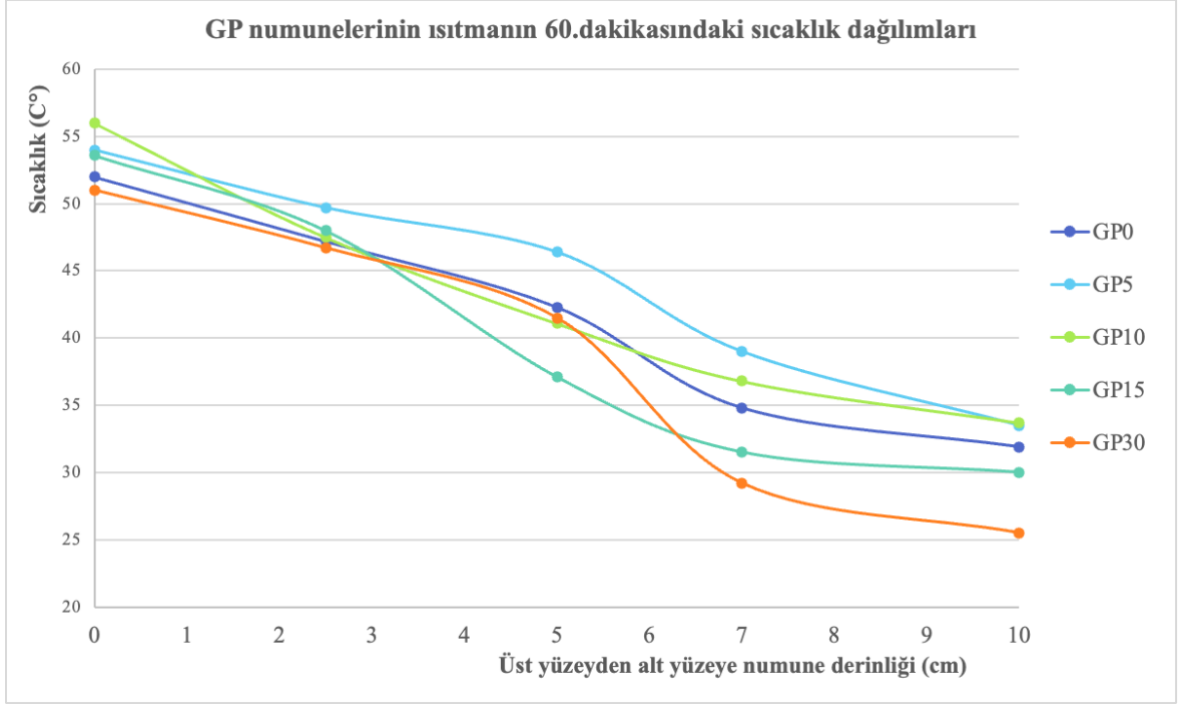
Sıcaklık testi benzer süre bekledikten sonra yapılan HP5, HP10 ve HP15 numunelerinin aynı süredeki ısıtma sonucu üst yüzeylerinde meydana gelen sıcaklık

değerleri eşdeğer olurken daha önce daha fazla neme sahip iken test edilen HP0 ve HP30 numunelerinin üst yüzeyindeki sıcaklıklar eşdeğer ve az nemli halde yapılan ölçümlere göre 5 °C daha az olmuştur. Beton numunelerin üst yüzeyi ile 10 cm derinliği arasındaki sıcaklık farkı HP0, HP5, HP10, HP15 ve HP30 için sırasıyla 18 °C; 20,7 °C; 22,5 °C; 18,6 °C ve 17 °C olmuştur.

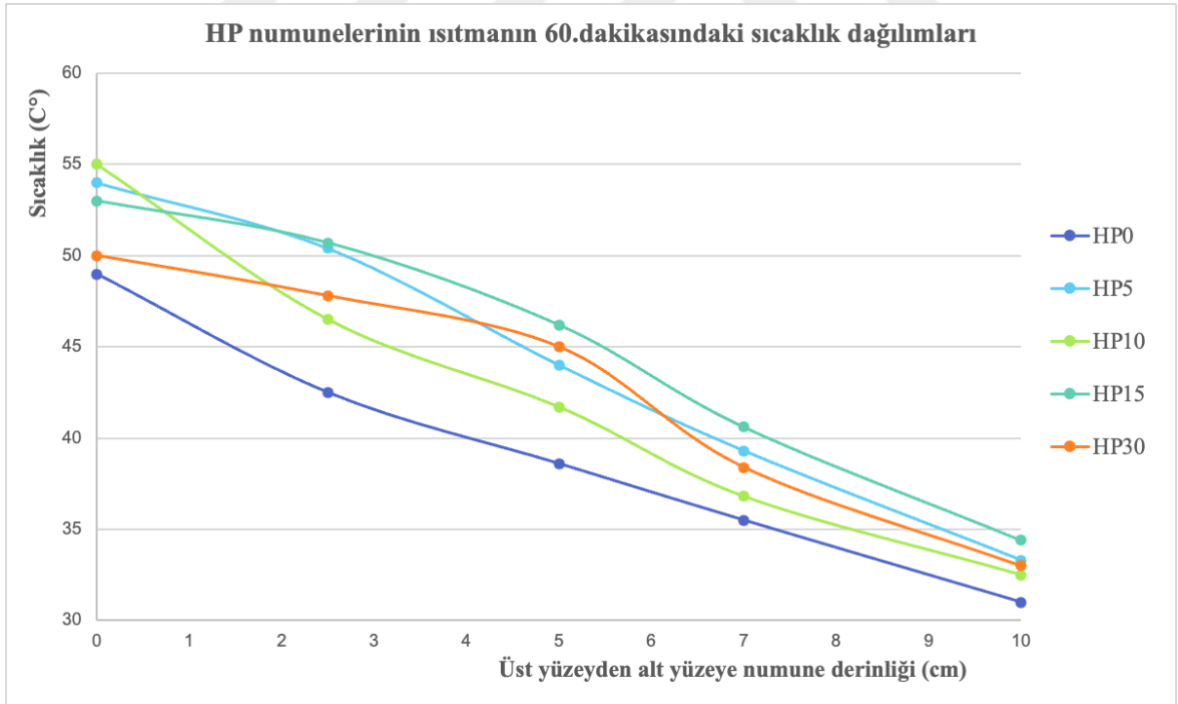
GP ve HP sıcaklık dağılımları karşılaştırıldığında GP numunelere kıyasla HP numunelerde derinlik boyunca sıcaklık değişiminin daha doğrusal olduğu görülmektedir. Genleştirilmiş perlitli numunelerde numune kalınlığını ilk yarısında doğrusala yakın bir değişim olurken derinlik arttıkça değişim parabol haline gelmektedir. GP için üst yüzey ile 5 cm arasının ısınması 5 cm ile 10 cm arasının ısınmasından daha fazla olmaktadır. Burada genleştirilmiş perlit agregalarının yalıtım malzemesi olarak davranması etkili olmaktadır.

Aynı derinlikteki farklı noktalardaki sıcaklık değişiminin görülmesi için kiriş numuneler yan çevrilerek yatayda sıcaklık ölçümü değerleri elde edilmiştir. Betonun ısıyı aldığı üst yüzeyi ile değme noktasındaki sıcaklık değerleri dikey halde yapılan ölçümle denktir. Diğer deliklerde alınan ölçümlerde aynı derinlikte beton elemanın kenar bölgelerine yakın veya iç bölgesinde kalan noktalarda birbiriyle eş sıcaklıklar kaydedilmiştir. Bu durum yalnız 10 cm deliğinin kenara çok yakın olduğu HP5 numunesinde üst yüzey ile 10 cm noktasının ısıyı kolayca alması sonucu yakın sıcaklık değerlerine ulaşması ile değişmiştir.

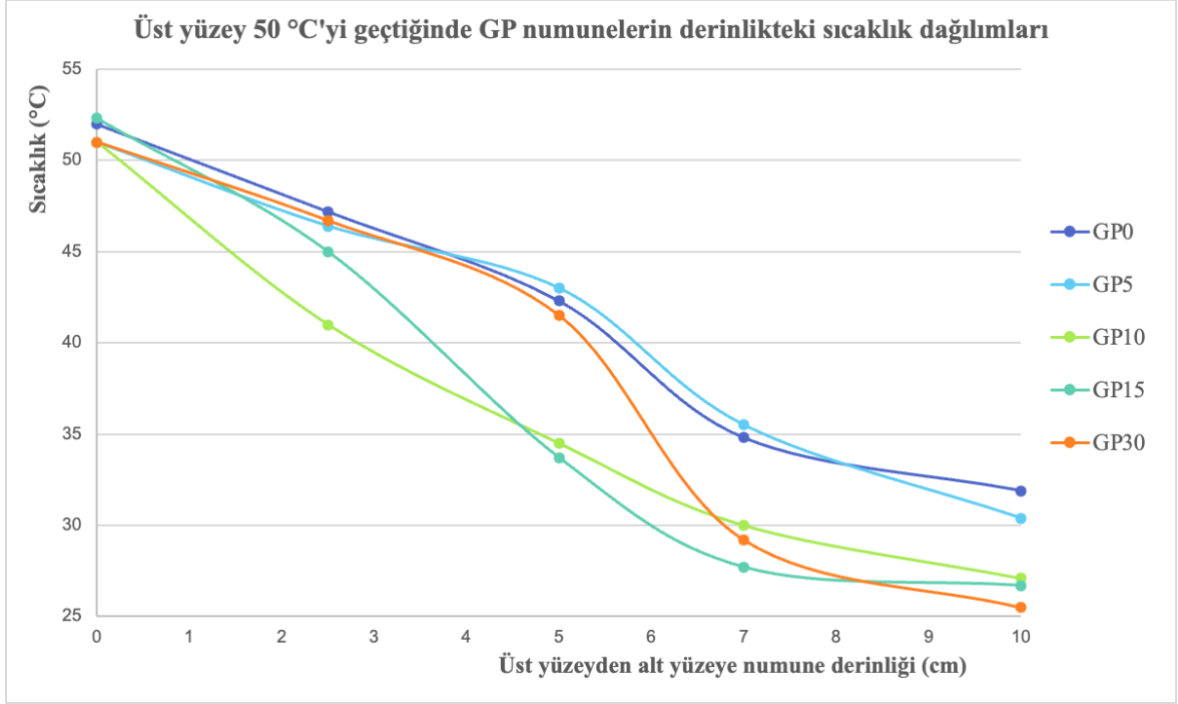
Beton kiriş numunelerin ortalama sıcaklık durumundaki davranışını görmek için üst yüzeyin 50°C olduğu andaki üst yüzey ve derinlik boyunca değişim incelenmiştir (Şekil 96), (Şekil 97). Üst yüzey 50°C seviyesinde iken ham perlit oranı arttıkça üst yüzey ve 10 cm derinlikteki ölçüm noktası arasındaki sıcaklık farkı düşüş göstermiştir. HP0, HP5, HP10, HP15, HP30 için sırayla 20, 17, 14, 11, 11°C'lik sıcaklık farkı oluşmuştur. Üst yüzey 50°C seviyesinde iken genleştirilmiş perlit oranı arttıkça üst yüzey ve 10 cm derinlikteki ölçüm noktası arasındaki sıcaklık farkı değişmiştir. GP0 ve GP5 için 20°C, GP10 için 24 °C, GP15 ve GP30 için 25,5°C üst yüzey ve 10 cm derinlik arası sıcaklık farkı olmuştur.



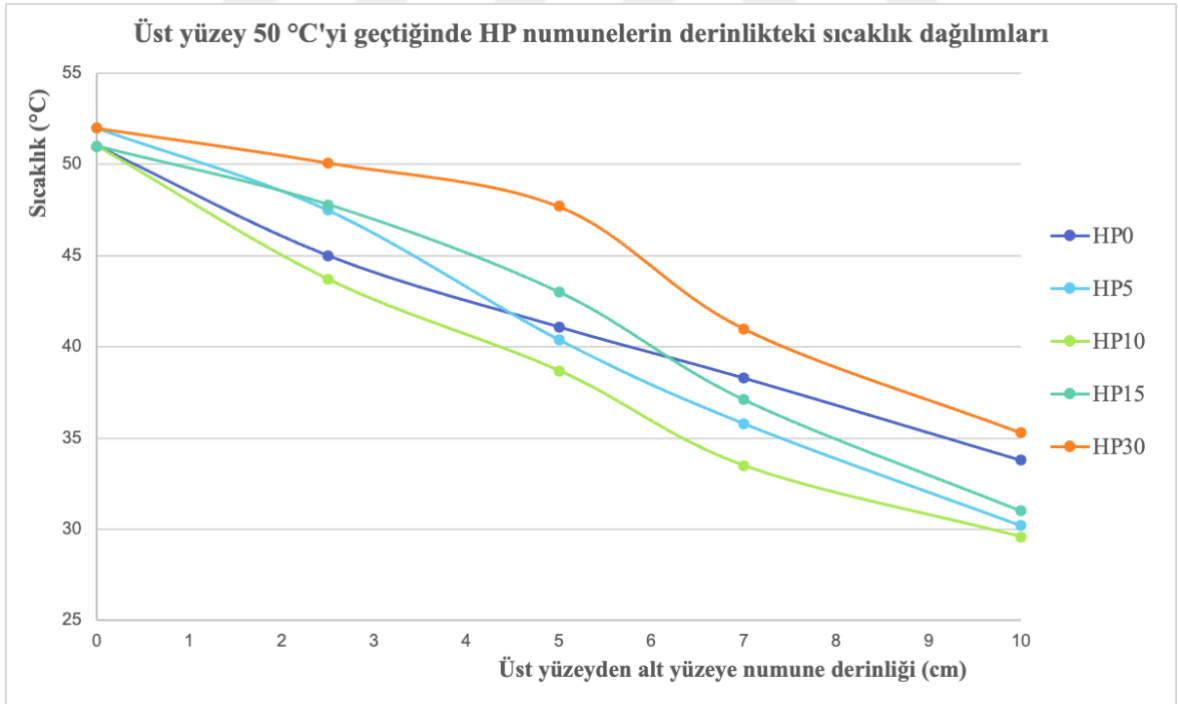
Şekil 94. Genleştirilmiş perlit oranının sıcaklık dağılımına etkisi



Şekil 95. Ham perlit oranının sıcaklık dağılımına etkisi



Şekil 96. 50°C üst yüzey sıcaklığında GP numunelerdeki sıcaklık dağılımı



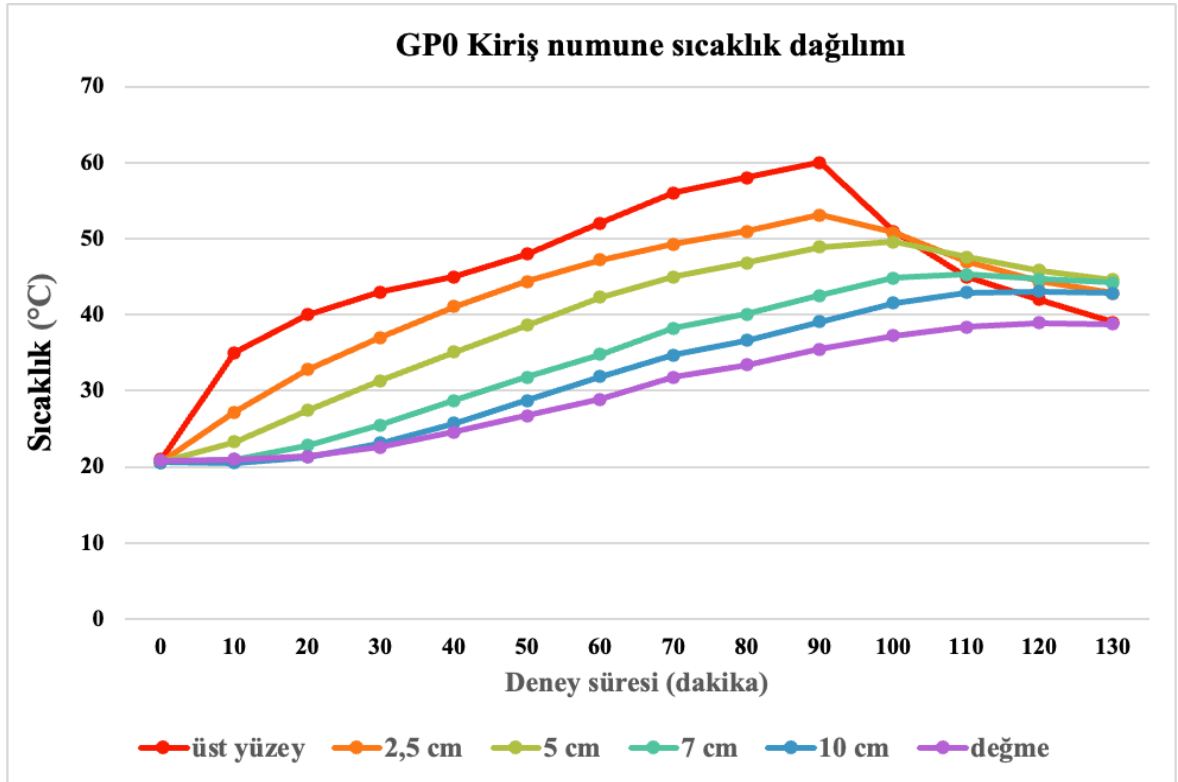
Şekil 97. 50°C üst yüzey sıcaklığında HP numunelerdeki sıcaklık dağılımı

3.4.1. GP Numunelerde Sıcaklık Dağılımı

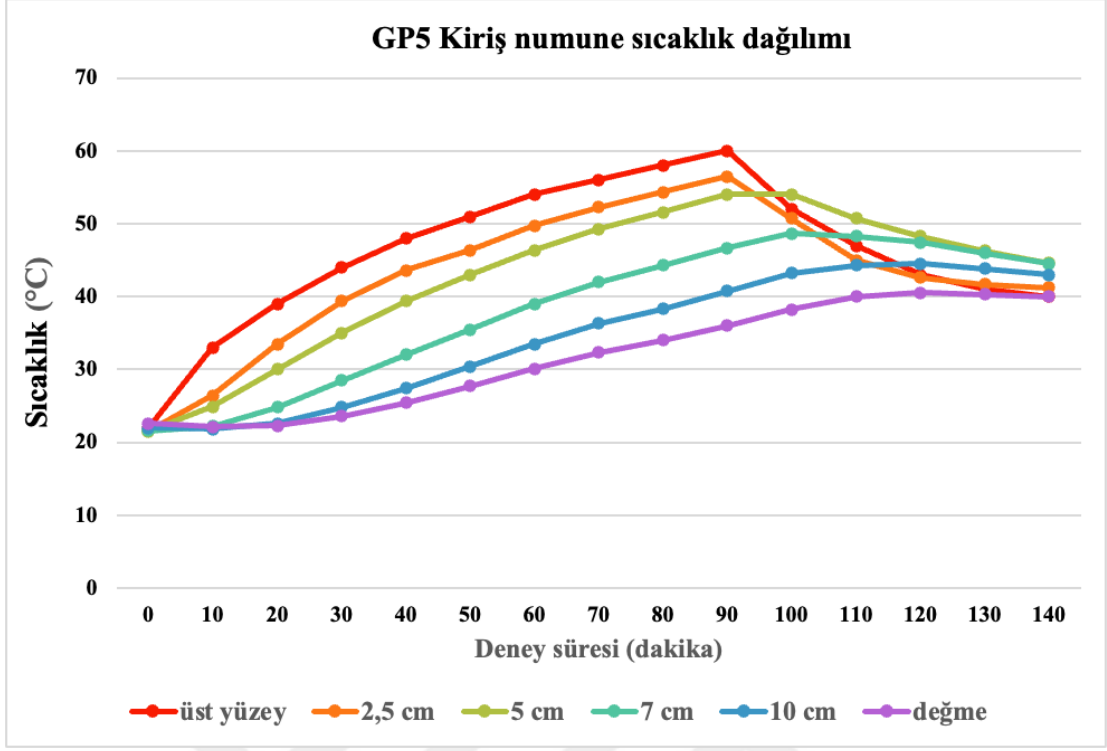
Genleştirilmiş perlitli numunelerde sıcaklık deneyinin ısıtılma süresinde parabolik bir sıcaklık değişimi olurken soğuma bölgesinde doğrusal değişim olmuştur. Üst yüzey sıcaklığının 60°C'ye ulaşması numunenin nem durumuna ve ortam sıcaklığına bağlı olarak ısıtılma işleminin 80 – 90 dakika arasında gerçekleşmiştir. GP kırıntı numuneler soğumaya alındığında dikeydeki derinliklerdeki sıcaklık değerlerinin dengelenmesi 40-45 dakika sürmüştür.

GP kırıntı numunelerin 10 cm derinliği boyunca yapılan sıcaklık değişimi ölçümlerinde GP0, GP5, GP30 numunelerinin üst yüzey ile 5 cm arasındaki ilk yarısı ve 5 cm ile 10 cm arasındaki ikinci yarısı arasında bir ayrılma görülmüştür (Şekil 98), (Şekil 99), (Şekil 102). İlk 5 cm ve ikinci 5 cm arasında 7 °C kadar sıcaklık farkı oluşmuştur. Bu davranış genleşmiş perlitin ısı yalıtım özelliği ile açıklanabilir. Genleştirilmiş perlit agregası ısıyı daha fazla tutarak alt bölgelere geçmesine engel olmuştur.

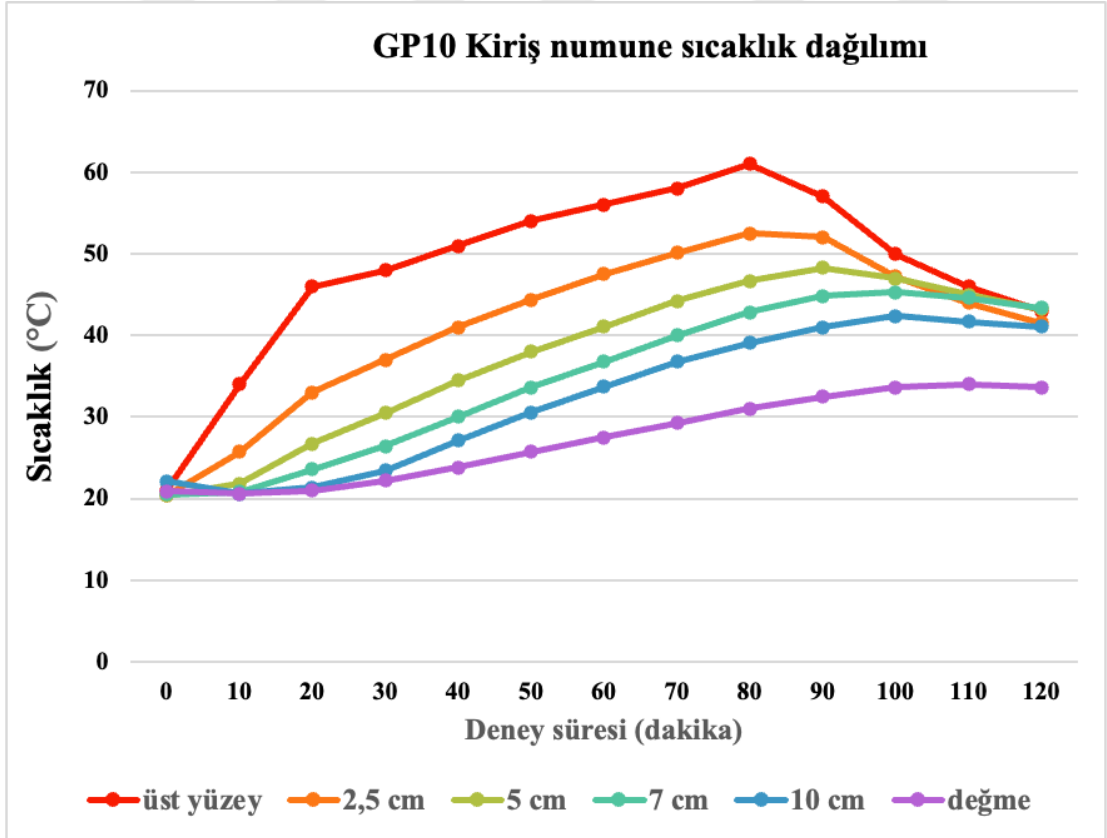
Geleneksel beton GP0 şahit numunesinin üst yüzeyi 60°C olduğunda numunenin en derin noktası 10 cm ile sıcaklık farkı 20,9 °C olurken GP5, GP10, GP15, GP30 karışımları için sırayla 19,2 °C; 21,4 °C; 23,1 °C; 26,2°C ölçülmüştür (Şekil 98, 99, 100, 101, 102).



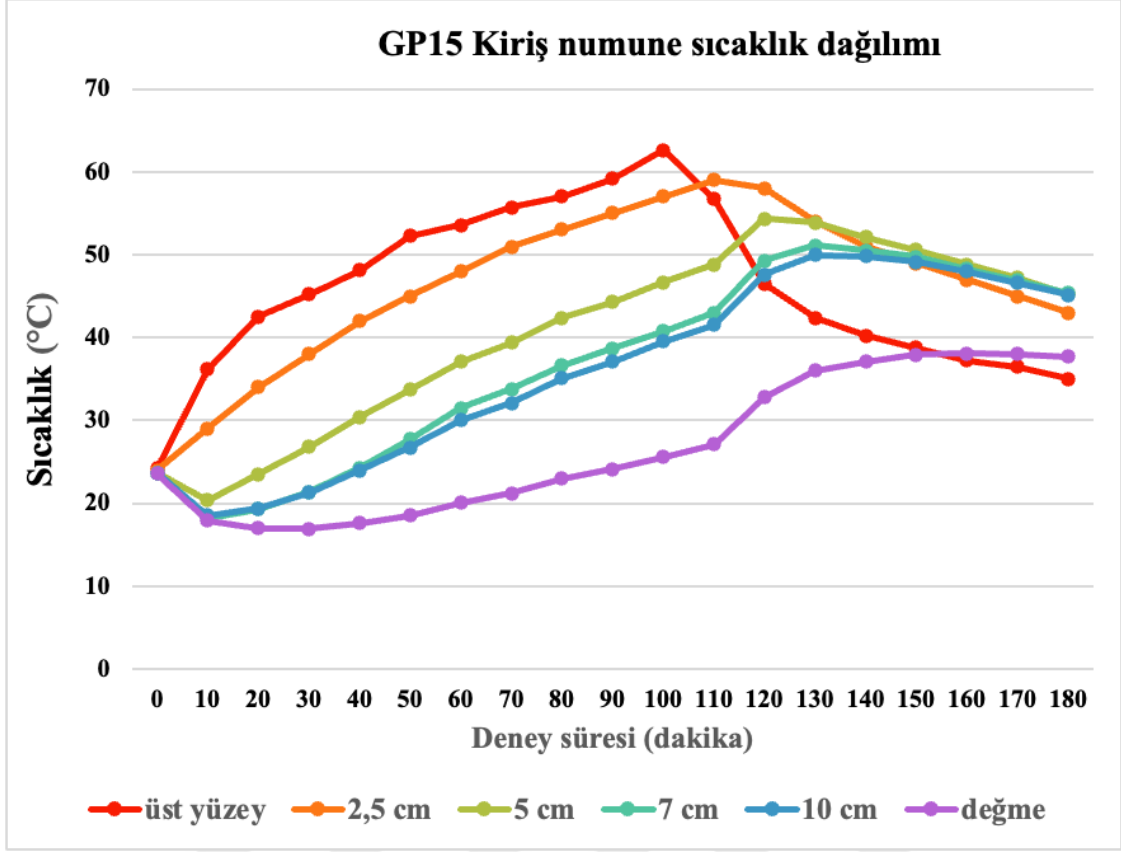
Şekil 98. GP0 kırıntı numunesinde derinlik boyunca sıcaklık değişimi



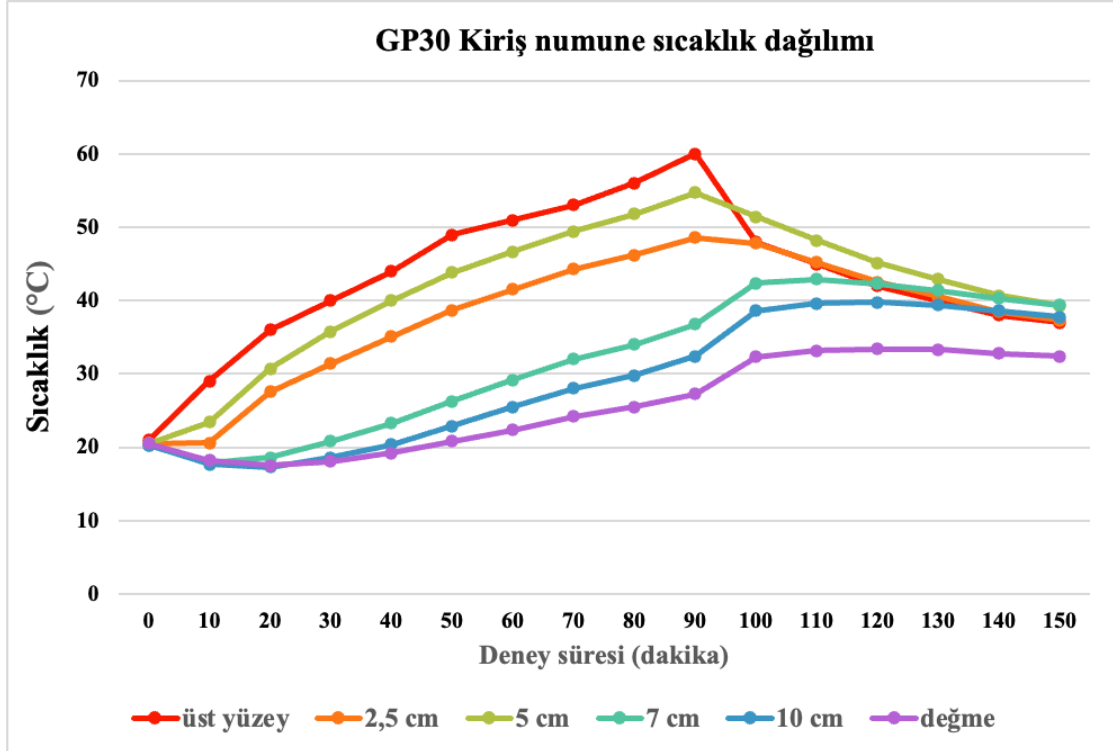
Şekil 99. GP5 kiriş numunesinde derinlik boyunca sıcaklık değişimi



Şekil 100. GP10 kiriş numunesinde derinlik boyunca sıcaklık değişimi



Şekil 101. GP15 kiriş numunesinde derinlik boyunca sıcaklık değişimi

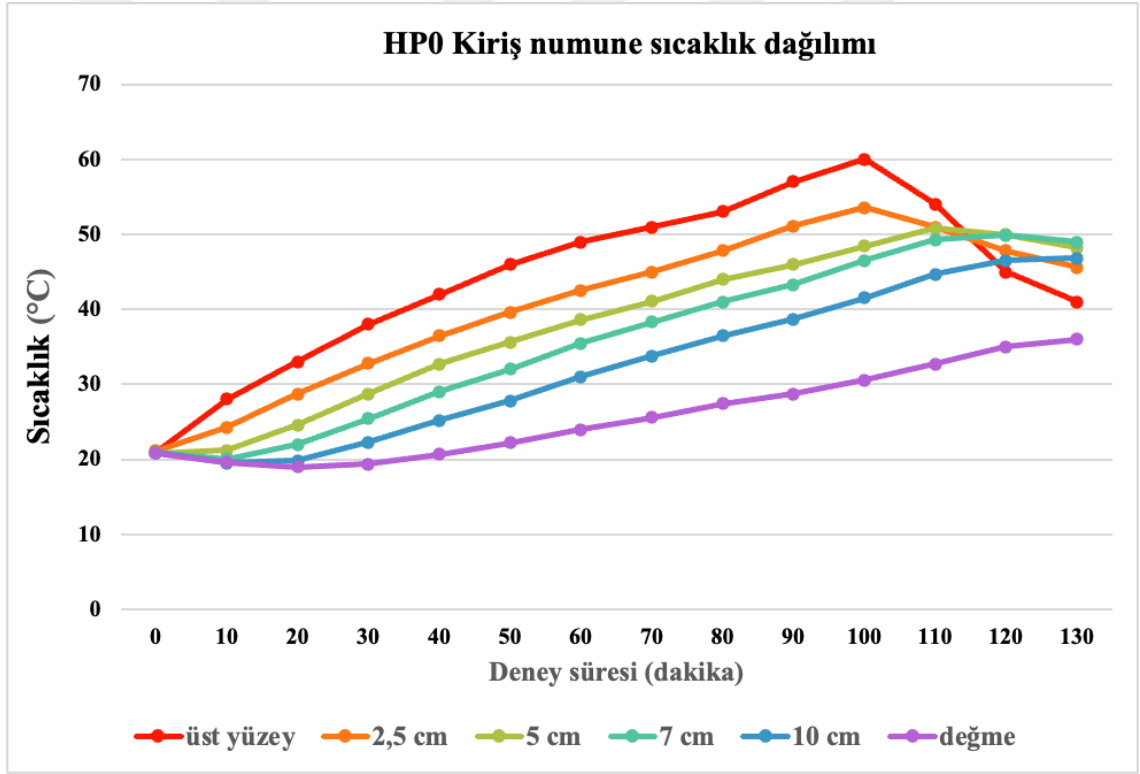


Şekil 102. GP30 kiriş numunesinde derinlik boyunca sıcaklık değişimi

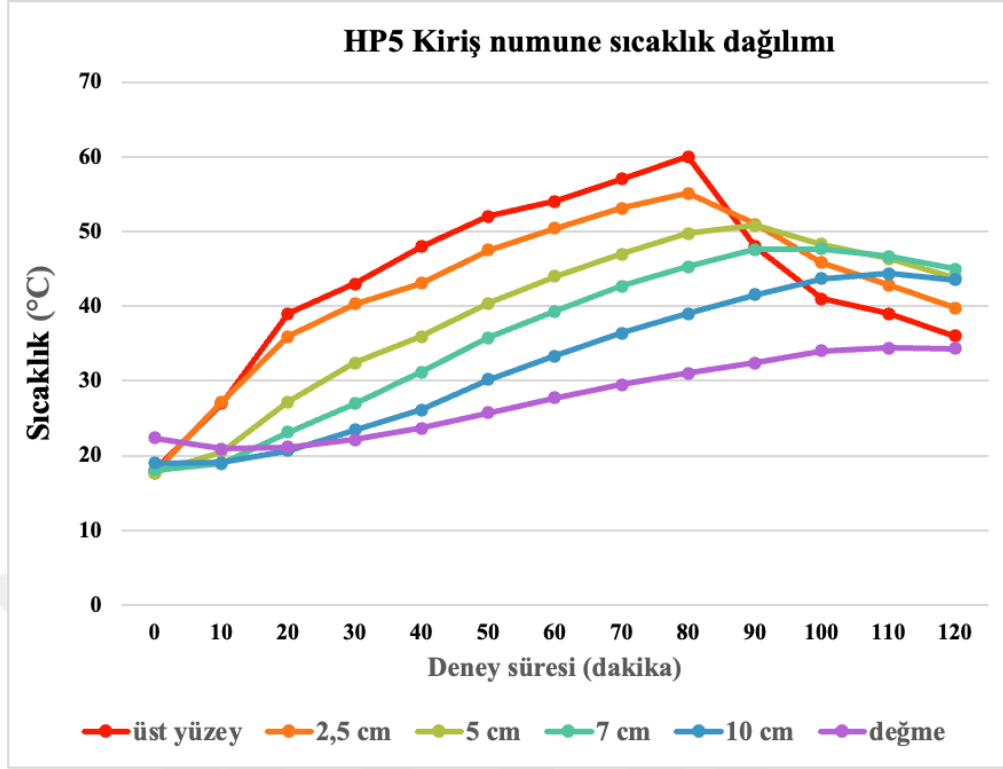
3.4.2. HP Numunelerde Sıcaklık Dağılımı

Ham perlitli numunelere ısı uygulanan sıcaklık deneyi boyunca üst yüzeyden 10 cm numune derinliğine doğru dikey olarak termal kablolar ile ölçüm alınmıştır. Numunenin dikey doğrultudaki sıcaklık değişimi en üst en sıcak en alt en soğuk olacak şekilde derinlikler arasında eşit olarak gerçekleşmiştir.

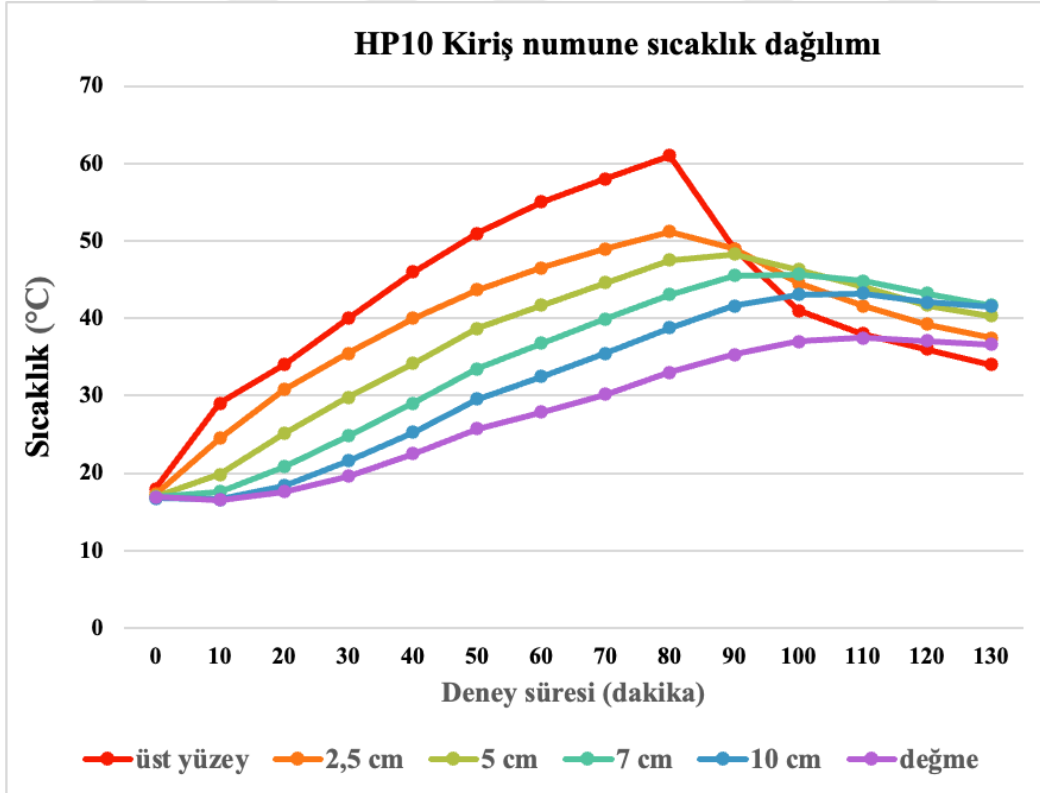
HP numunelerin üst yüzey sıcaklığının 60°C seviyesine çıkması nemliliği az olan HP5 ve HP10 numunelerinde 80 dakikalık, nemi yüksek numunelerde 100 dakikalık ısıtma gerektirmiştir. Numunelerin üst yüzeyi ile 10 cm derinliği arasındaki sıcaklık farkı en fazla HP0, HP5, HP10, HP15, HP30 için sırasıyla 18,5°C; 20,6°C; 22,2°C; 17,6°C; 15,6°C olmuştur (Şekil 103, 104, 105, 106, 107).



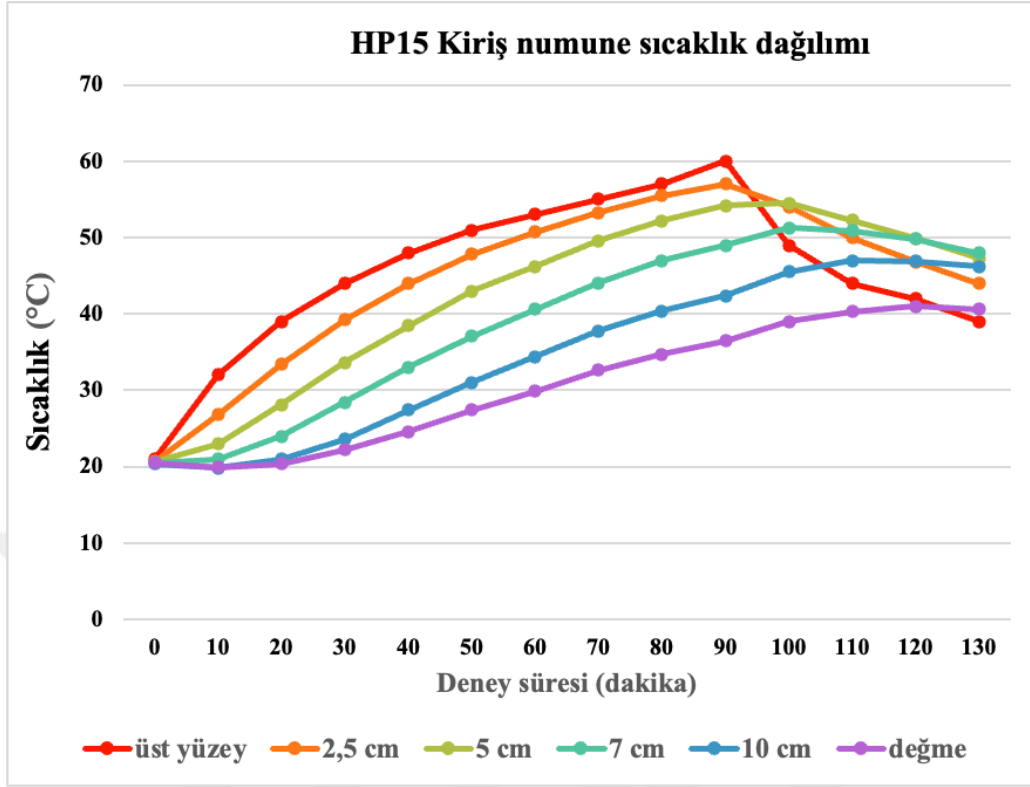
Şekil 103. HP0 kiriş numunesinde derinlik boyunca sıcaklık değişimi



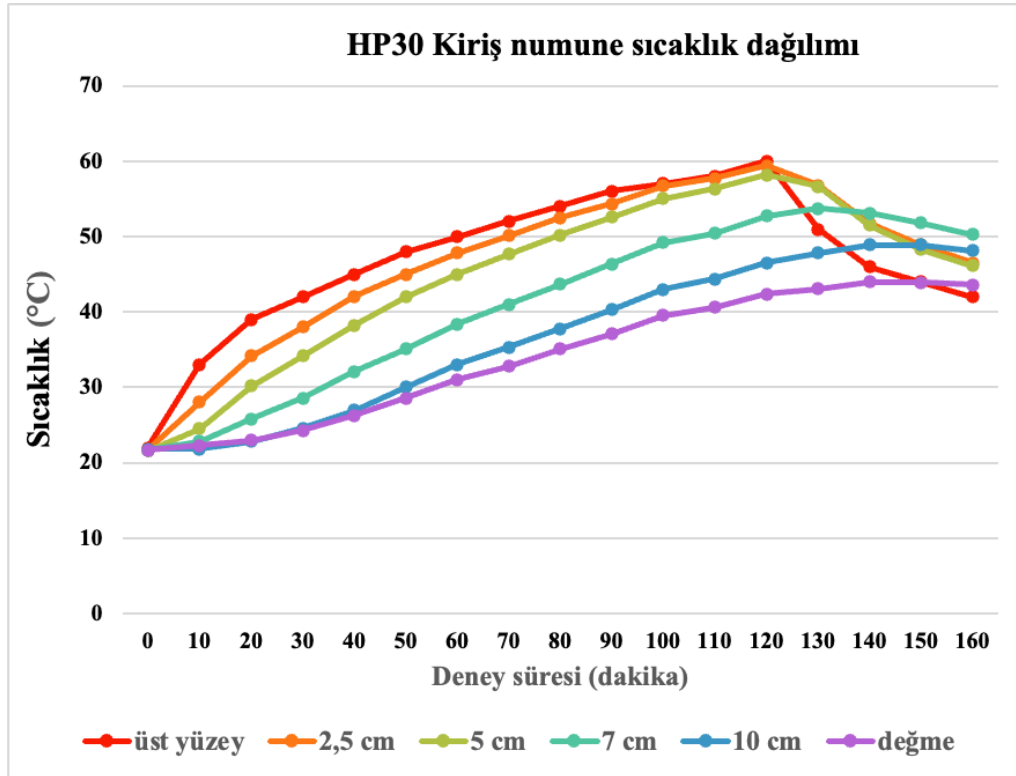
Şekil 104. HP5 kiriş numunesinde derinlik boyunca sıcaklık değişimi



Şekil 105. HP10 kiriş numunesinde derinlik boyunca sıcaklık değişimi



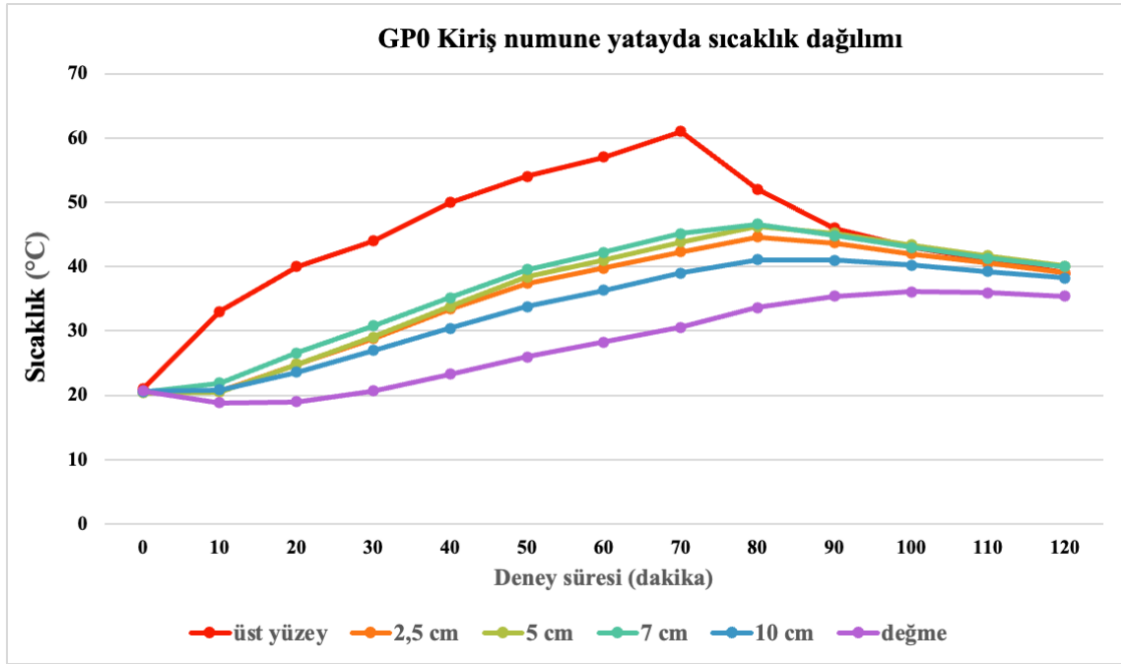
Şekil 106. HP15 kiriş numunesinde derinlik boyunca sıcaklık değişimi



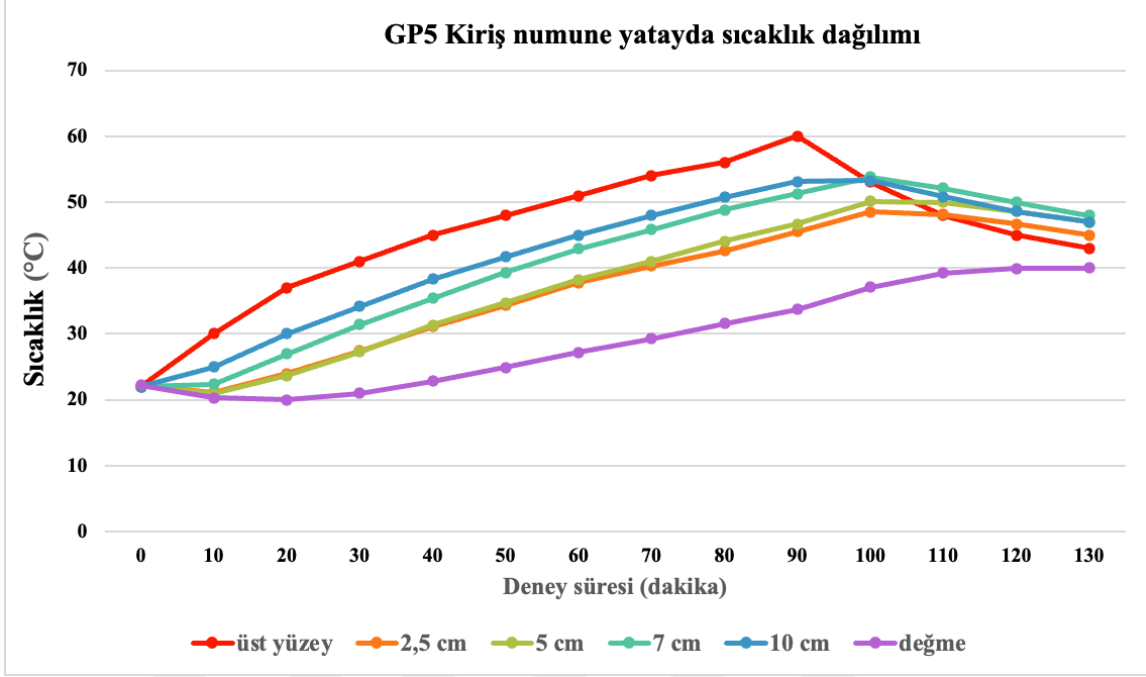
Şekil 107. HP30 kiriş numunesinde derinlik boyunca sıcaklık değişimi

3.4.3. GP Numunelerin Yataydaki Sıcaklık Dağılımı

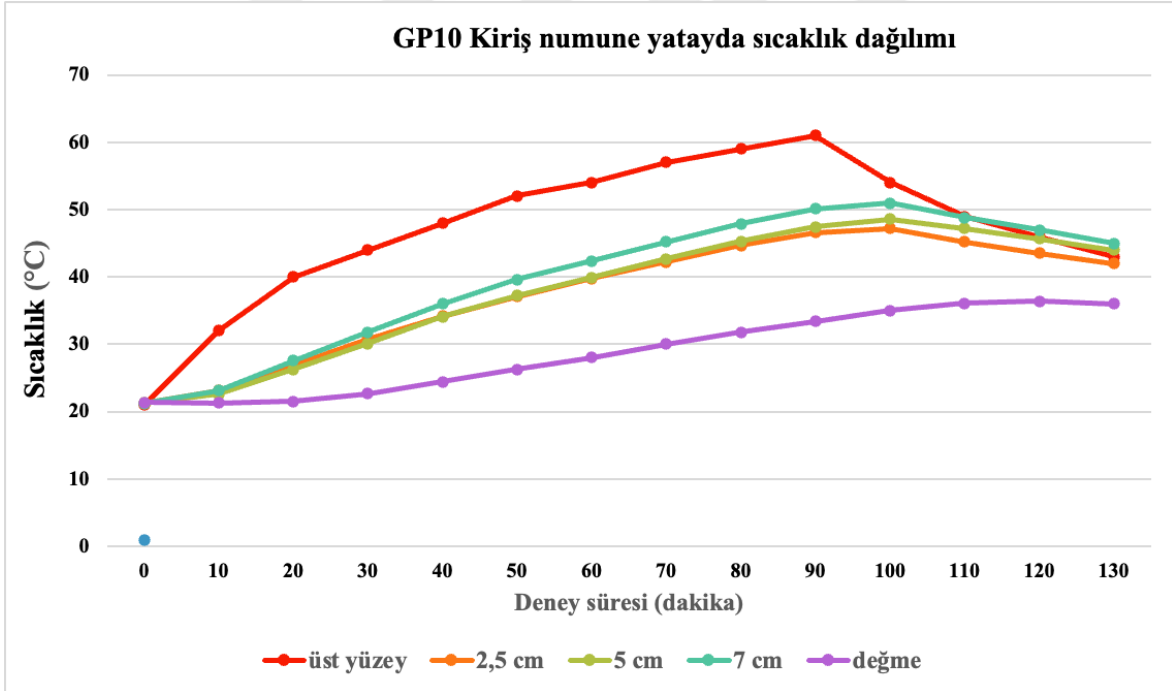
Genleştirilmiş perlit içeren beton kiriş numunelerin aynı derinlikteki sıcaklık dağılımını görmek için yapılan yataydaki sıcaklık deneylerin sonucunda kesitin kenarlardan 1 cm iç kısımlarında sıcaklığın eşit dağıldığı görülmüştür (Şekil 108, 109, 110, 112). GP15 numunesinin 10 cm ölçüm noktası tabana diğer ölçüm noktalarına göre daha uzak olduğu için çakıl ile numunenin değme noktasından alınan sıcaklık değeri ile paralellik göstermiştir (Şekil 111).



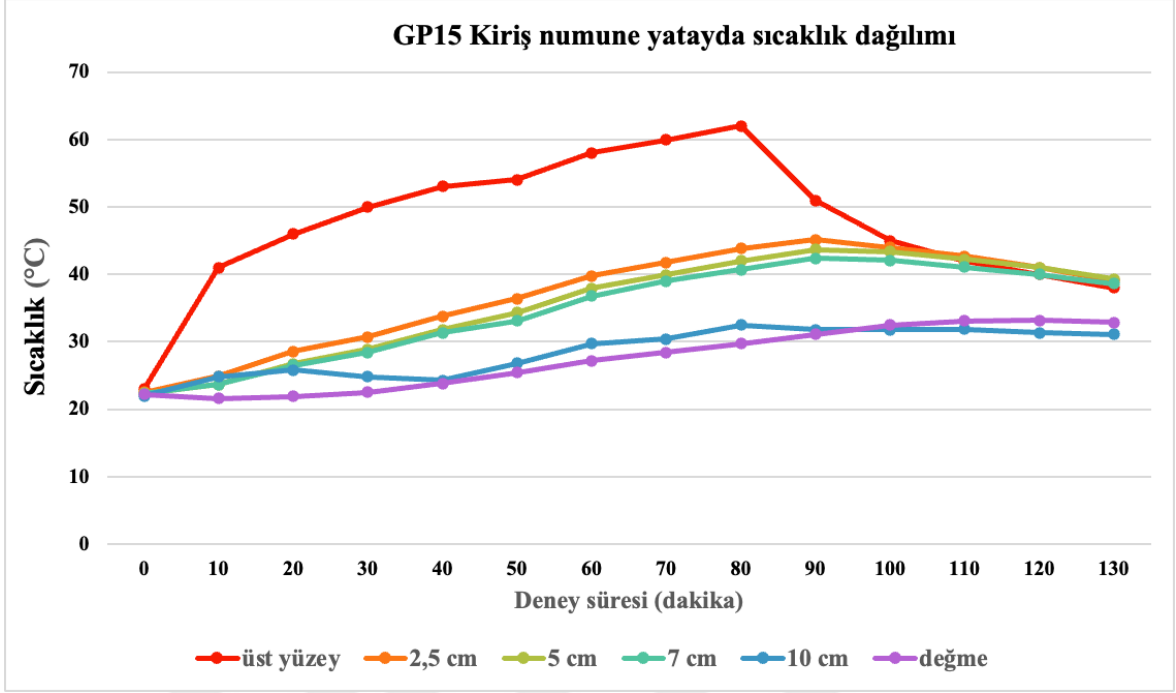
Şekil 108. GP0 kiriş numunesinin yatay kesitte sıcaklık değişimi



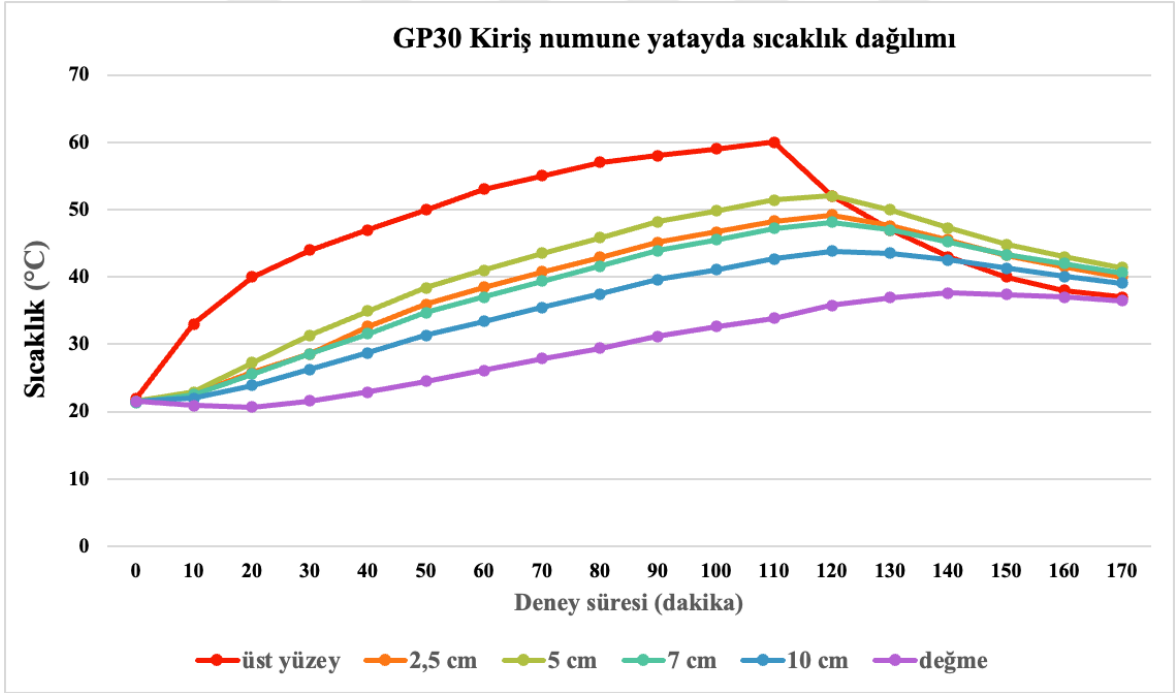
Şekil 109. GP5 kiriş numunesinin yatay kesitte sıcaklık değişimi



Şekil 110. GP10 kiriş numunesinin yatay kesitte sıcaklık değişimi



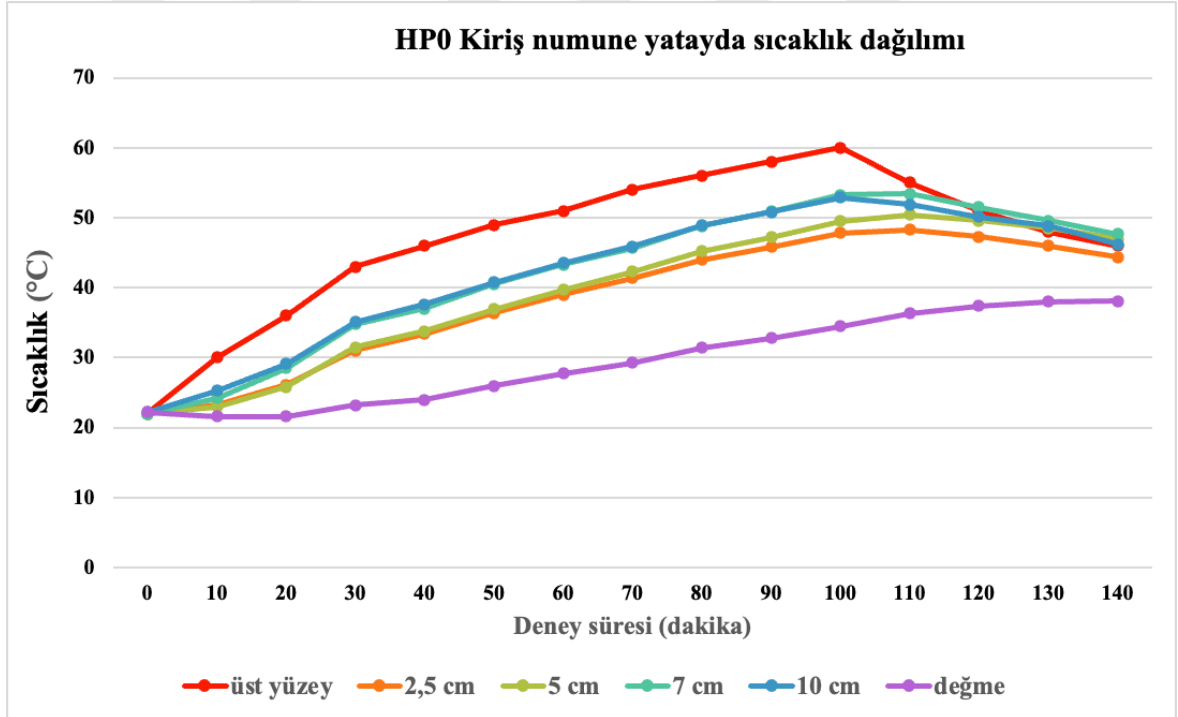
Şekil 111. GP15 kiriş numunesinin yatay kesitte sıcaklık değişimi



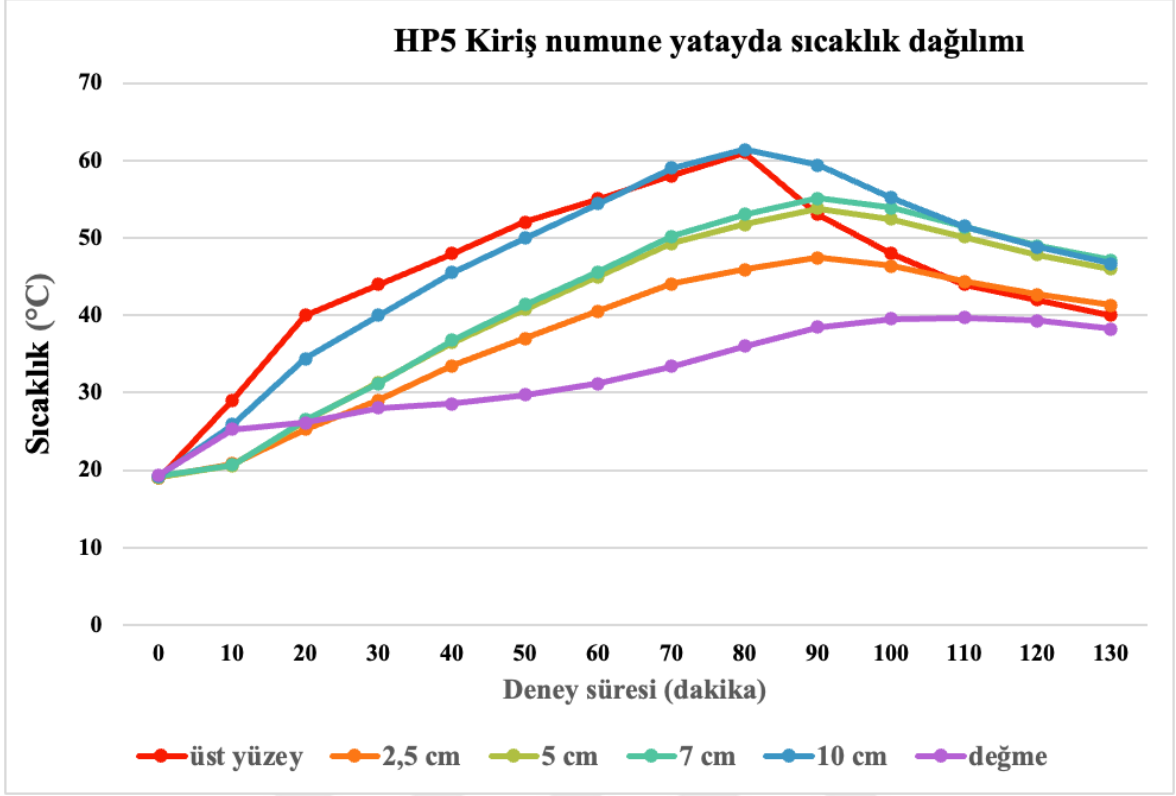
Şekil 112. GP30 kiriş numunesinin yatay kesitte sıcaklık değişimi

3.4.4. HP Numunelerin Yataydaki Sıcaklık Dağılımı

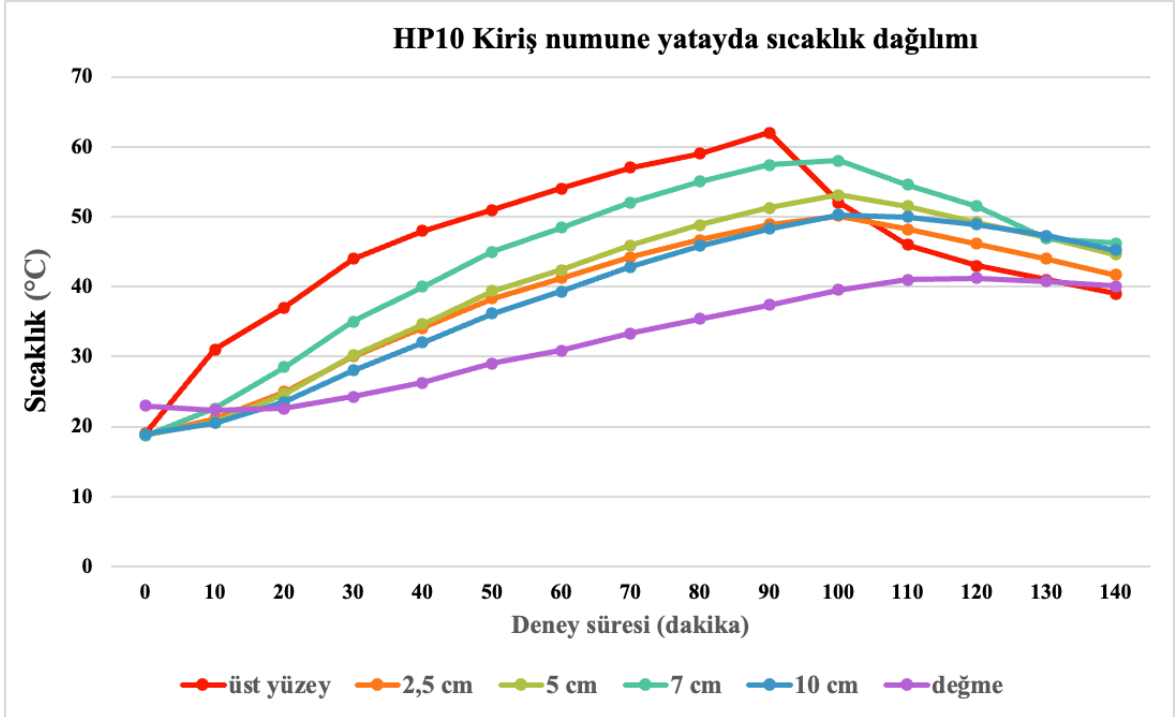
Ham perlitli kiriş numunelerin yatayda aynı derinlikte sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. Sıcaklığın yatayda eşit değerler verdiği görülmüştür (Şekil 113, 114, 115, 116, 117). Numunelerin 10 cm ölçüm noktasının dış yüzeye çok yakın olduğu durumda dış yüzey sıcaklığından etkilenerek derinlikten bağımsız olarak üst yüzey sıcaklığına yakın değerler aldığı ölçülmüştür. HP5 ve HP15 kiriş numunelerinin 10 cm ölçüm noktasının dış yüzeye 1 cm'den yakın olması ısıdan daha fazla etkilenmelerine neden olmuştur (Şekil 114) (Şekil 116). Bu durum beton plakta ısınma etkisiyle üst yüzey ve kenarlarda daha fazla gerilme oluşmasını açıklamaktadır. Kütlenin iç kısmı ile ısıyı aldığı dış yüzeyleri farklı sıcaklık değerleri vermektedir.



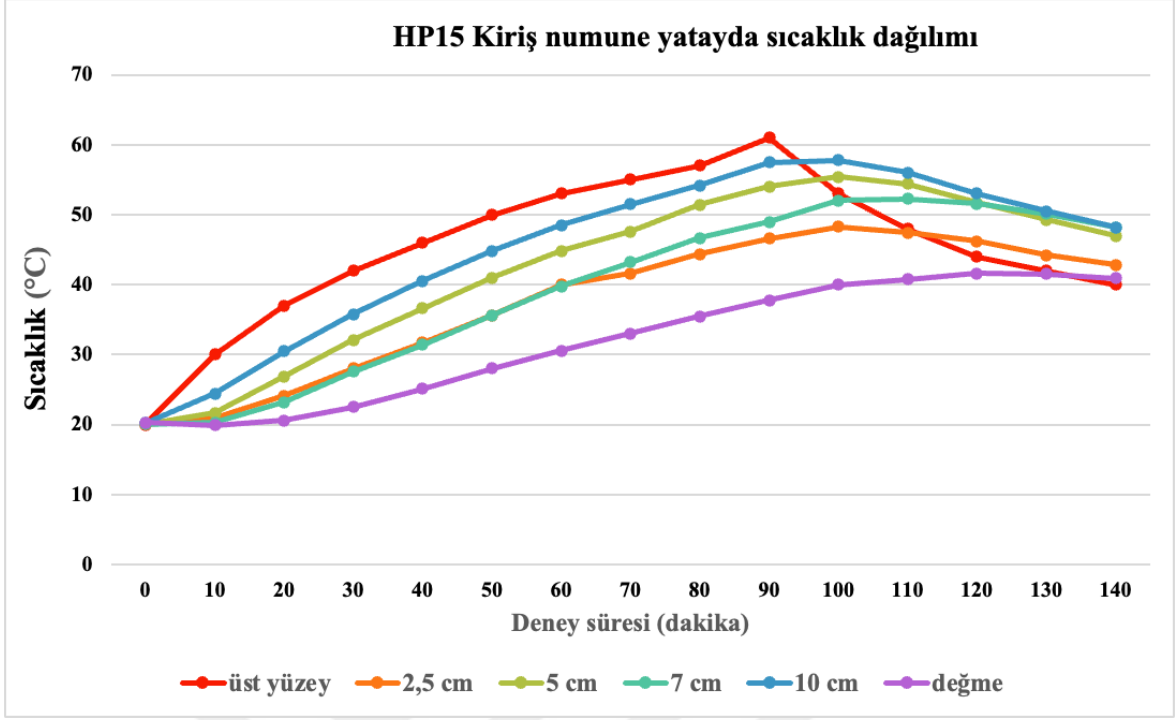
Şekil 113. HP0 kiriş numunesinin yatay kesitte sıcaklık değişimi



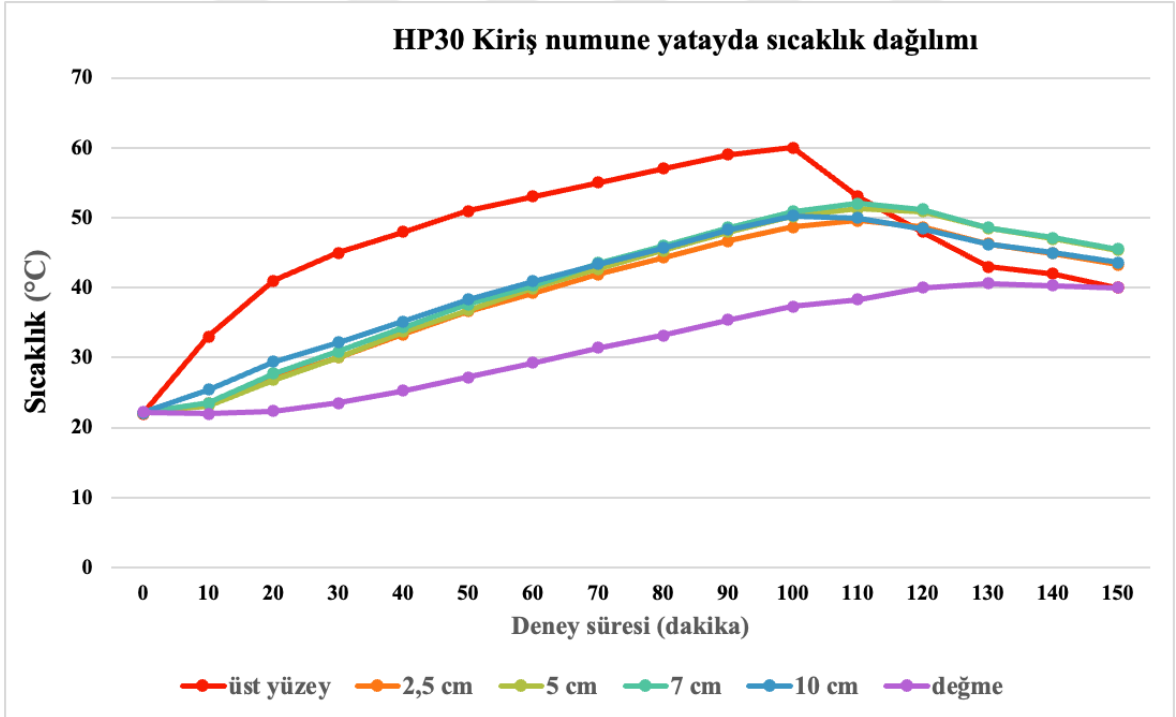
Şekil 114. HP5 kiriş numunesinin yatay kesitte sıcaklık değişimi



Şekil 115. HP10 kiriş numunesinin yatay kesitte sıcaklık değişimi



Şekil 116. HP15 kiriş numunesinin yatay kesitte sıcaklık değişimi



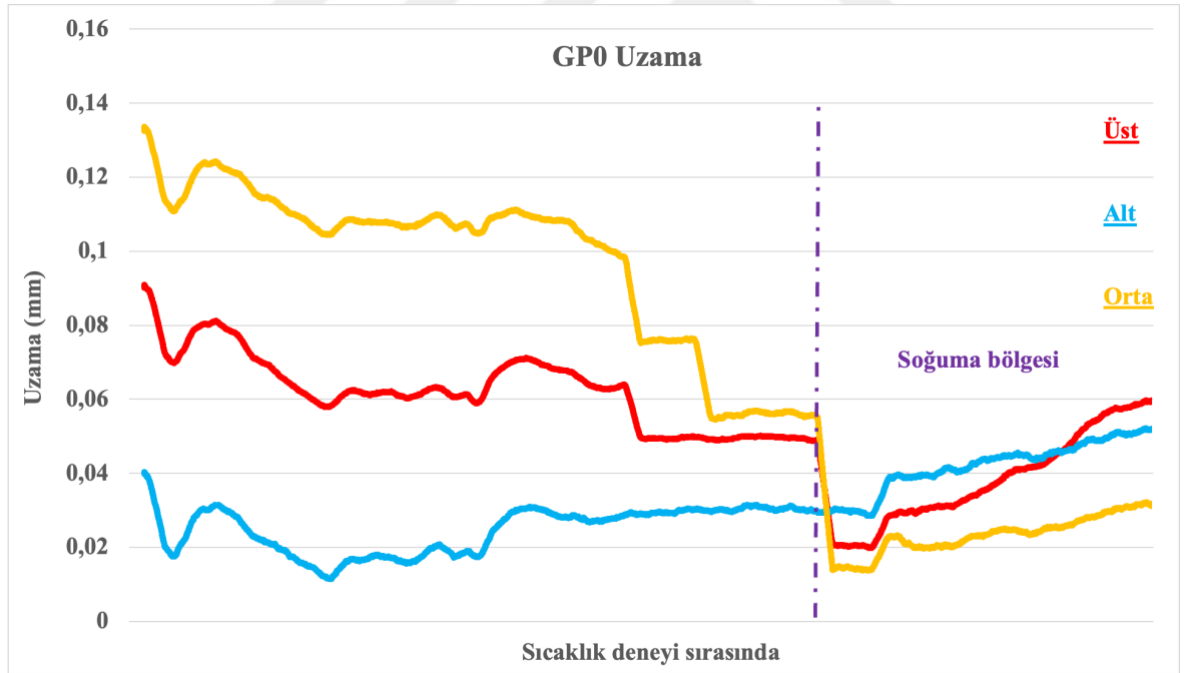
Şekil 117. HP30 kiriş numunesinin yatay kesitte sıcaklık değişimi

3.5. LVDT Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

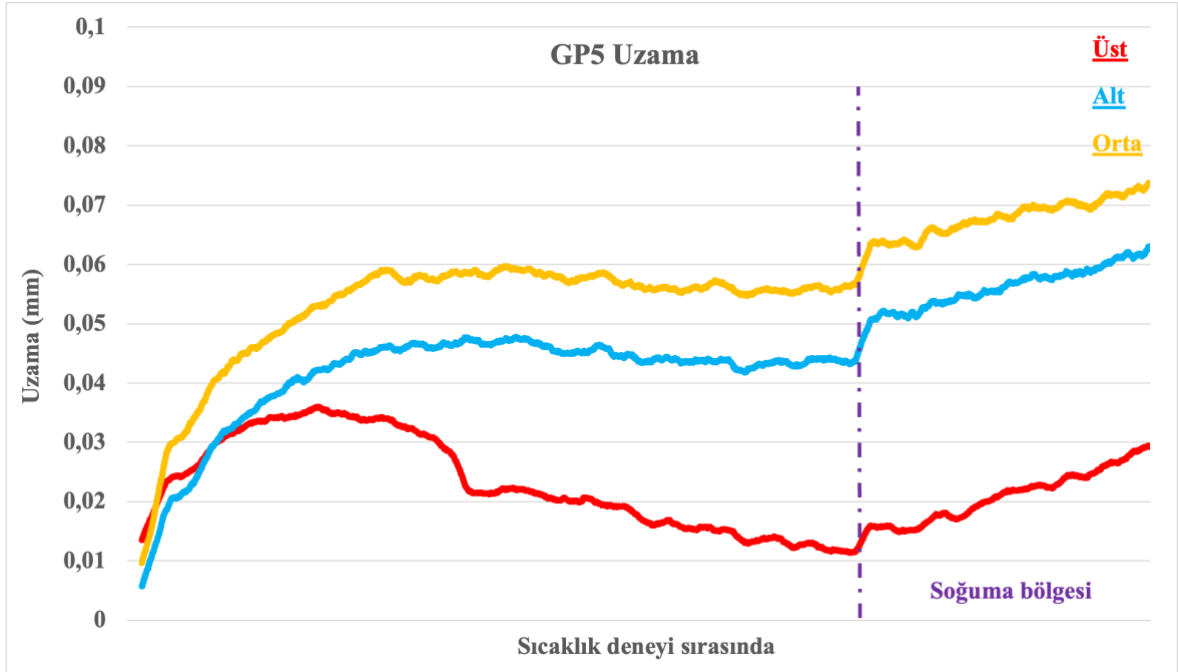
Perlitli beton karışımlarından alınan 10×10×50 cm boyutlu kiriş numunelerin sıcaklık deneylerinde ısıtma ve soğuma süresince kaydedilen LVDT verileri ile kirişin üst, orta ve alt bölgelerinde meydana gelen uzama miktarları ölçülmüştür.

Deneyde elde edilen verilerle hazırlanan uzama grafiklerinde tutarlı bir dağılım gözlenmemiştir. LVDT hassasiyetinin 10×10×50 cm boyutlu beton elemanın sıcaklık nedeniyle genleşmesini, uzamasını ölçmede yetersiz olduğu görülmüştür.

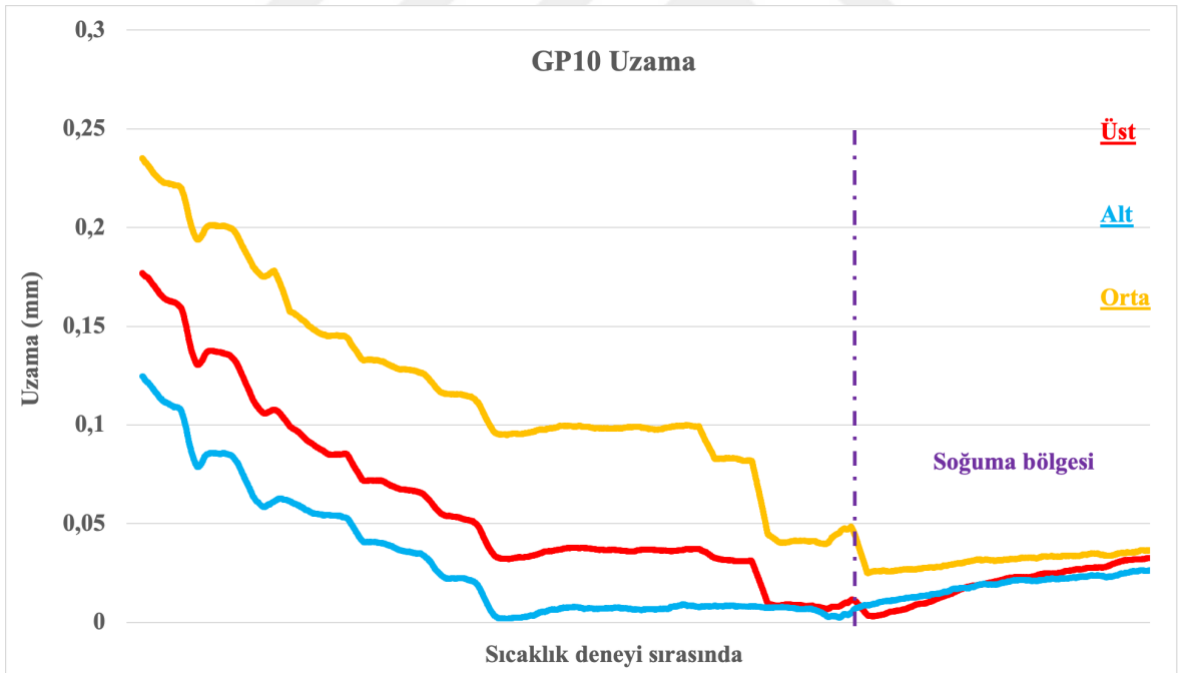
GP ve HP numunelerin tamamında ısıtmadan soğumaya geçişte ölçülen LVDT değerleri değişime uğramıştır (Şekil 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127). Bu durum manyetik tutucuların titreşime karşı yetersiz kalması veya LVDT yayının sıcaklık değişimine verdiği tepki nedeniyle ortaya çıkmıştır. Sıcaklık deneyi süresince GP ve HP numunelerin hiçbirinde uzunluk değişimi ya da genleşme nedeniyle çatlak oluşumu gözlenmemiştir.



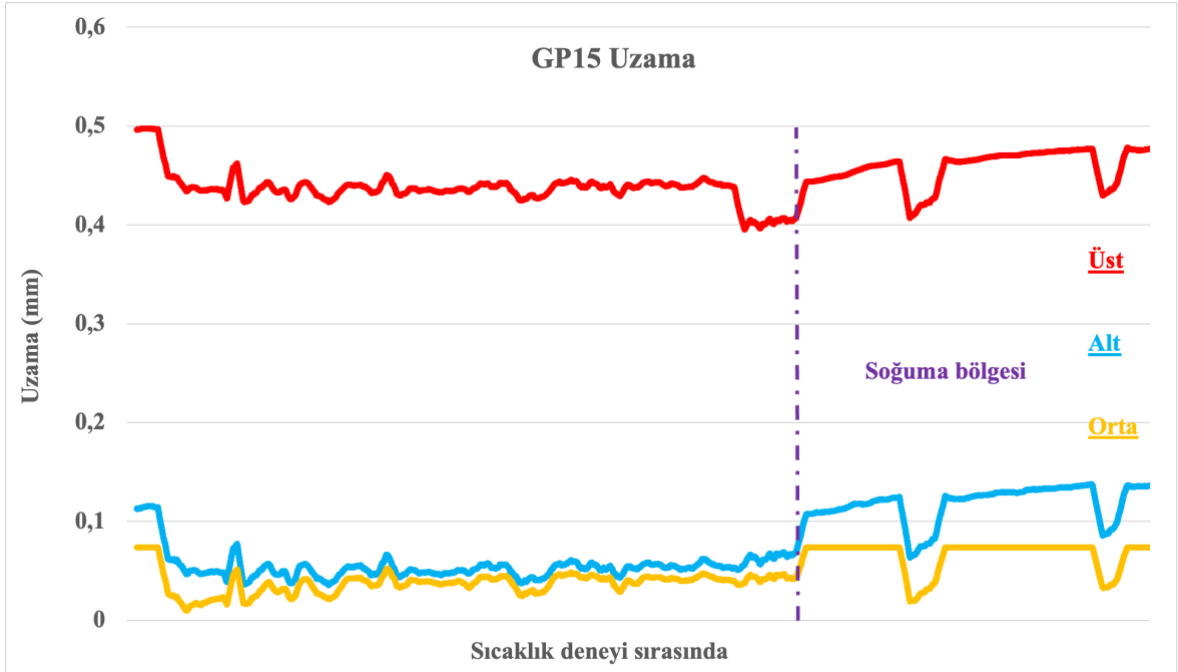
Şekil 118. GP0 numunesinin LVDT deplasman grafiği



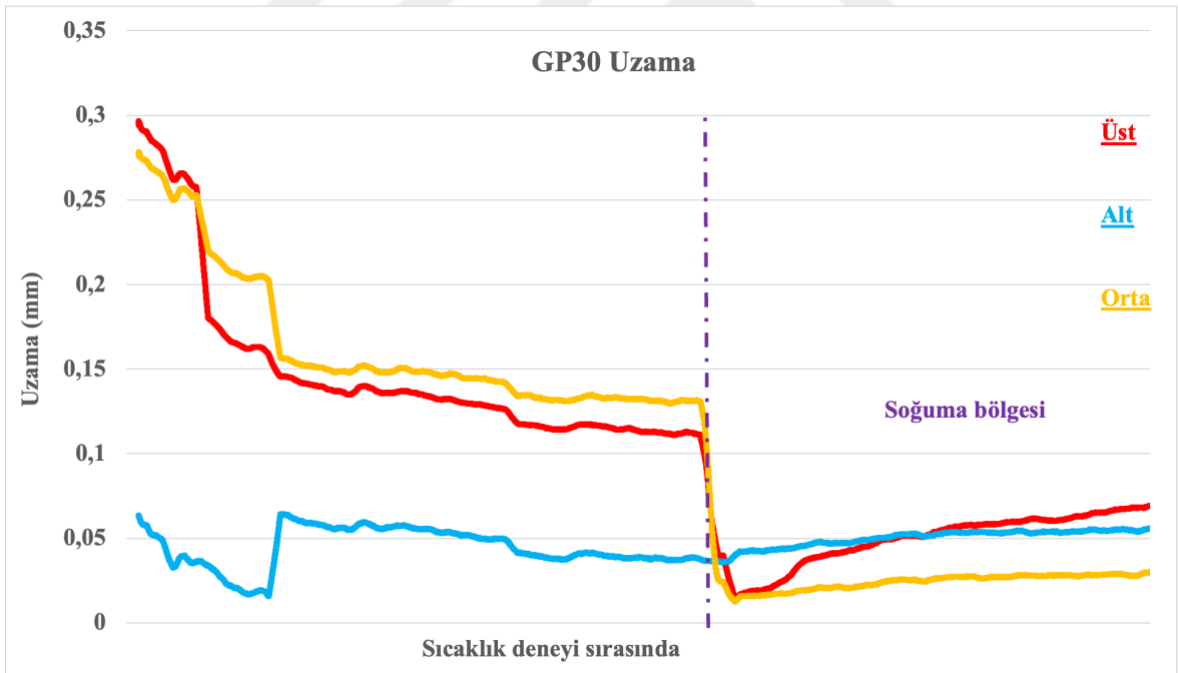
Şekil 119. GP5 numunesinin LVDT deplasman grafiği



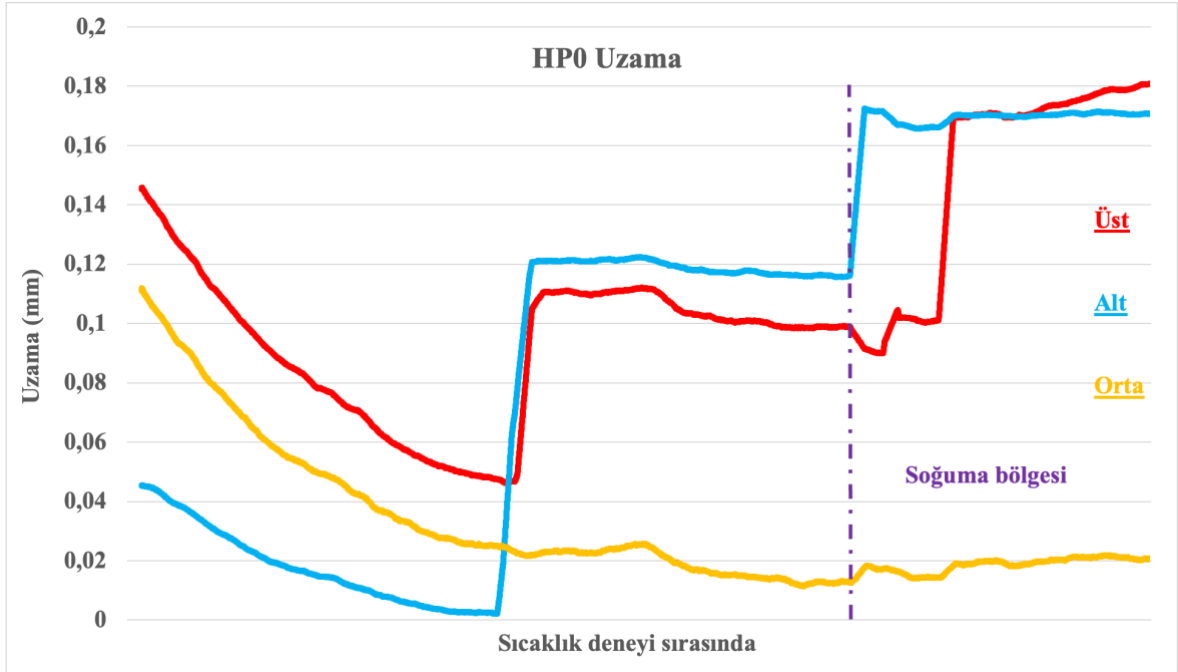
Şekil 120. GP10 numunesinin LVDT deplasman grafiği



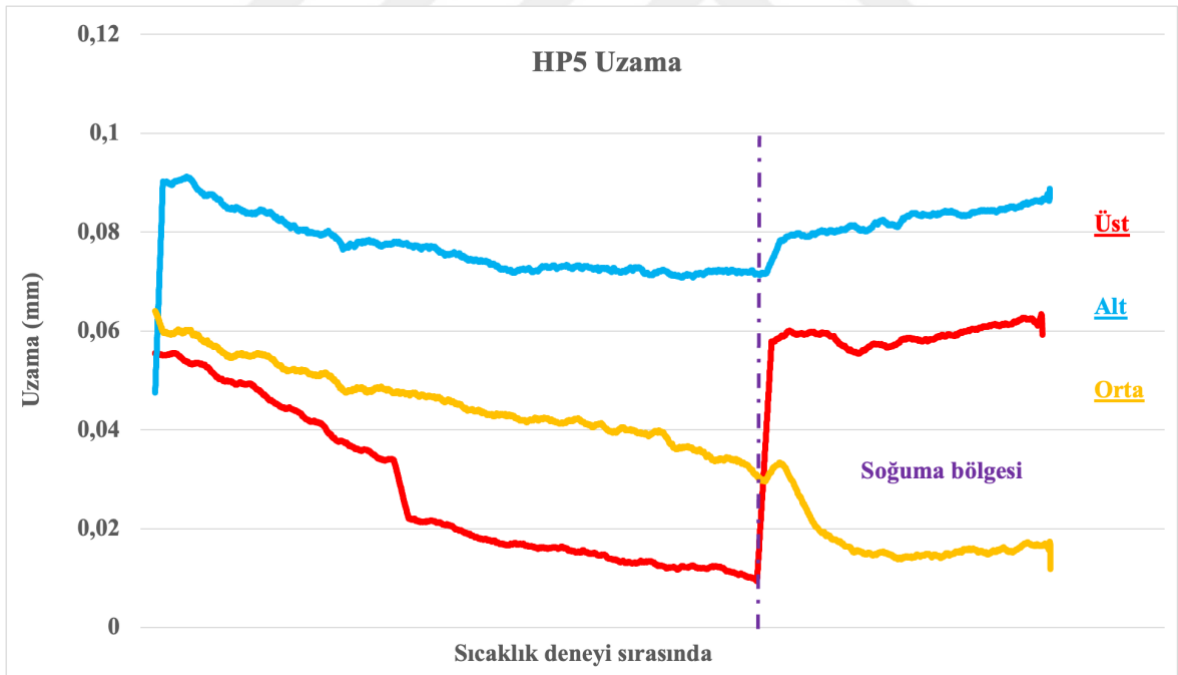
Şekil 121. GP15 numunesinin LVDT deplasman grafiği



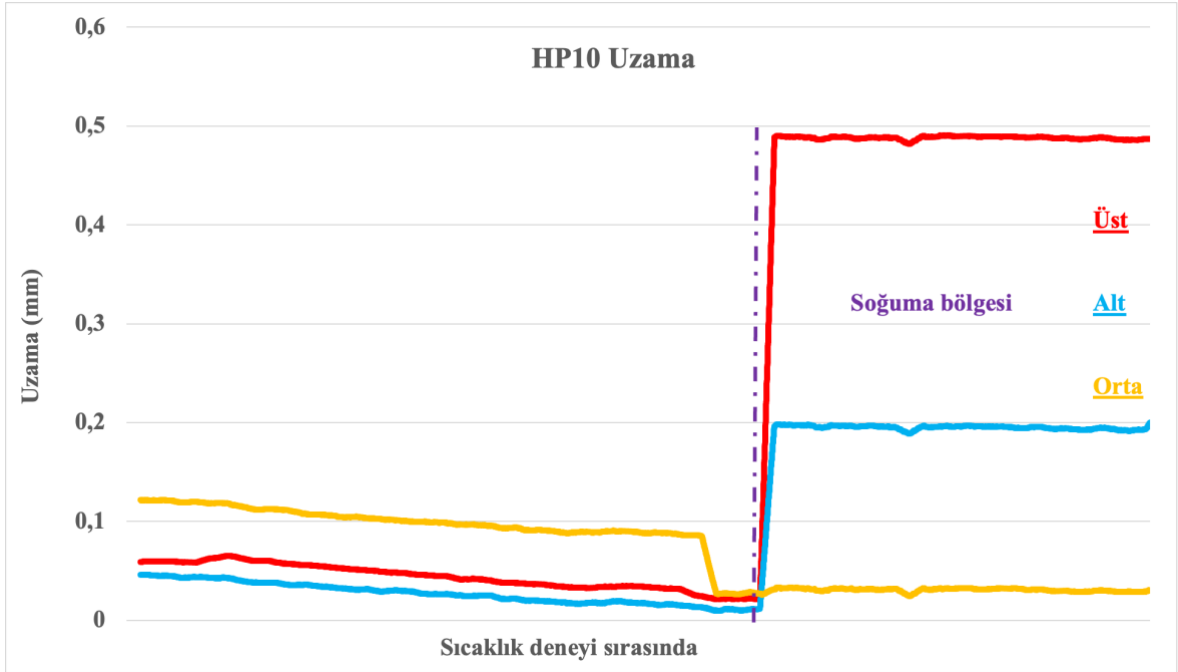
Şekil 122. GP30 numunesinin LVDT deplasman grafiği



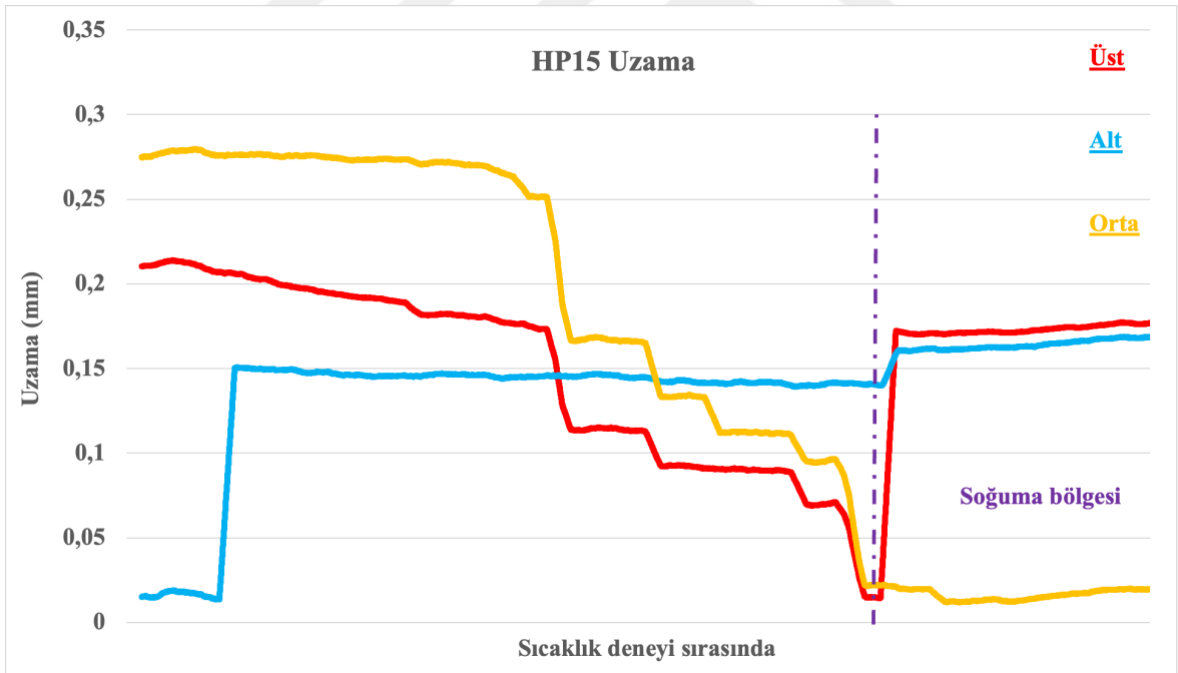
Şekil 123. HP0 numunesinin LVDT deplasman grafiği



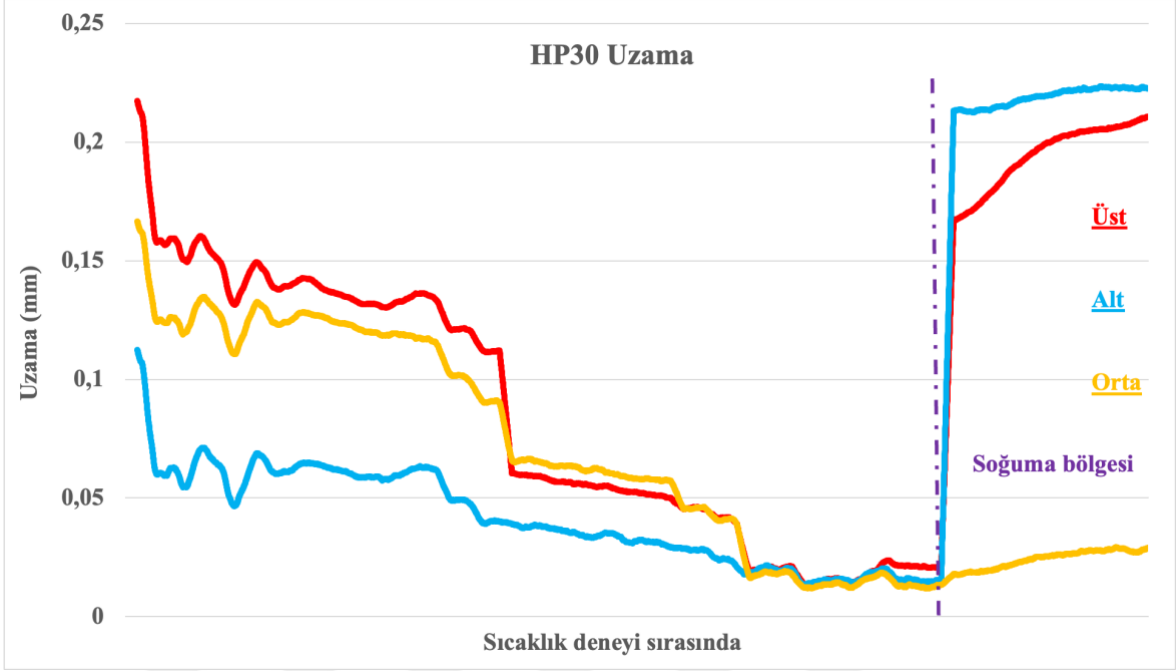
Şekil 124. HP5 numunesinin LVDT deplasman grafiği



Şekil 125. HP10 numunesinin LVDT deplasman grafiği



Şekil 126. HP15 numunesinin LVDT deplasman grafiği



Şekil 127. HP30 numunesinin LVDT deplasman grafiği

3.6. Strain gauge Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

Sıcaklık deneyi sırasında kiriş numunenin yan yüzüne yerleştirilen strain gauge pullar ile elde edilen boy değişimi değerleri grafiklerde sunulmuştur (Şekil 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136). Beton kiriş numunenin üst yüzeyi 60 °C sıcaklığa ulaştığında ısıtma işlemi sonlandırılmıştır. Isıtmanın sonlandığı andan itibaren strain gauge verilerinde kırılma meydana gelmiştir. Başlangıç sıcaklığından 60 °C' ye kadar strain (gerinim) değerleri sürekli artış halindedir (Şekil 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136).

C30 sınıfı 10×10×50 cm boyutlu beton için teorik olarak çatlamaya neden olacak uzama miktarı yaklaşık olarak 0,06 mm'dir. Teorik olarak çekme dayanımı (σ) 3,5 MPa ve elastisite modülü (E) 31 GPa mertebesinde kabul edilirse Hooke eşitliği yapılırsa birim yer değiştirme miktarı (ϵ) $0,000113 \cong 1,1 \times 10^{-4}$ olmaktadır. Buradan 50 cm uzunluk için çatlamaya neden olacak boy değişimi (ΔL), birim uzama (ϵ) değerine bağlı olarak hesaplanır.

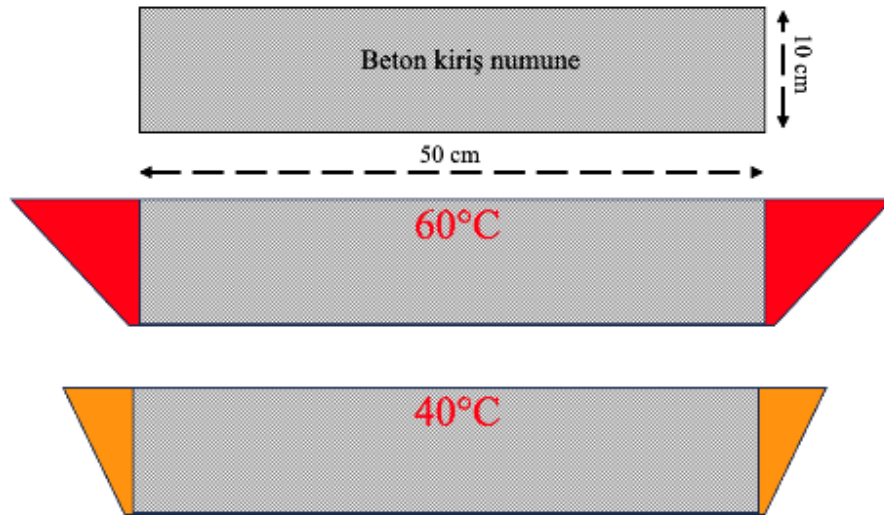
$$\frac{\sigma}{E} = \epsilon \quad (6)$$

$$\Delta L = \epsilon \times L \quad (7)$$

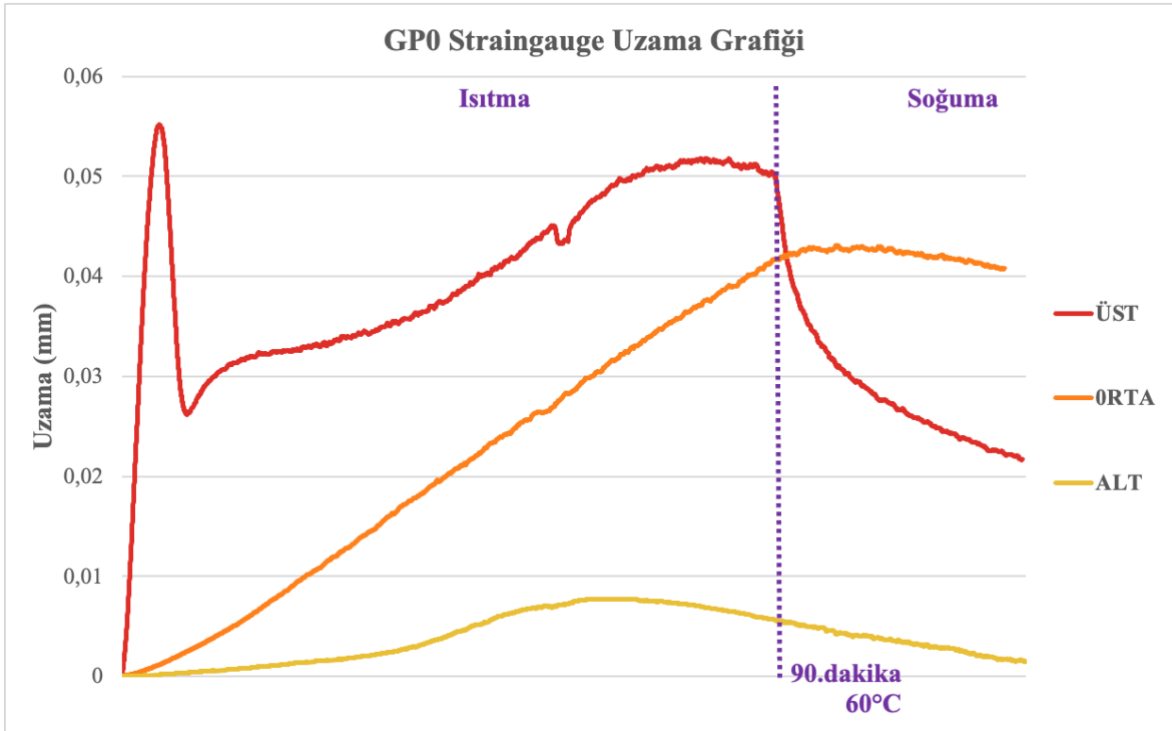
Straingauge ölçümlerinde elde edilen uzama değerleri 0,06 mm mertebesinden küçük olmuştur. GP ve HP setlerin hiçbirinde beton kiriş numunelerinde sıcaklık deneyi sonucu çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Maksimum uzama miktarı ortalama olarak 0,05 mm kadar gerçekleşmiştir. GP0, GP5, GP30 ve HP10 numunelerinin sıcaklık deneylerinin ilk dakikalarında deney düzeneğindeki düzeltmeler ve ani ısınmalar kaynaklı pik değerler oluşmuştur, bu değerler değerlendirilmeye alınmamıştır (Şekil 129, 130, 132, 134).

GP0 grafiğinde görüldüğü gibi beton kiriş numunede en fazla uzama üst yüzeye yakın bölgede ve en sıcak anda kaydedilmiştir. Kiriş numunelerin ısı kaynağından uzak alt bölgesinde genleşme sifıra yakın mertebede kalmıştır. Beton kirişin sıcaklık karşısındaki uzaması başlangıç, en sıcak an ve soğuma halinde modellenmiştir (Şekil 128). Üst yüzeyin 60°C olduğu en sıcak halde iken üst yüzeyde genleşme en fazla olup sıcaklık düştükçe uzama azalmaktadır. Orta bölgede yapılan strain ölçümünde soğuma evresinde de uzamanın devam ettiği görülmüştür. Bu beton kiriş numunenin soğumaya bırakıldığında üst yüzey sıcaklığında sert bir düşüş olurken iç bölgelerde ısı artmaya devam etmesiyle açıklanır. Beton numunenin orta seviyesinde ısı artışı genleşmeye devam etmesine neden olmuştur.

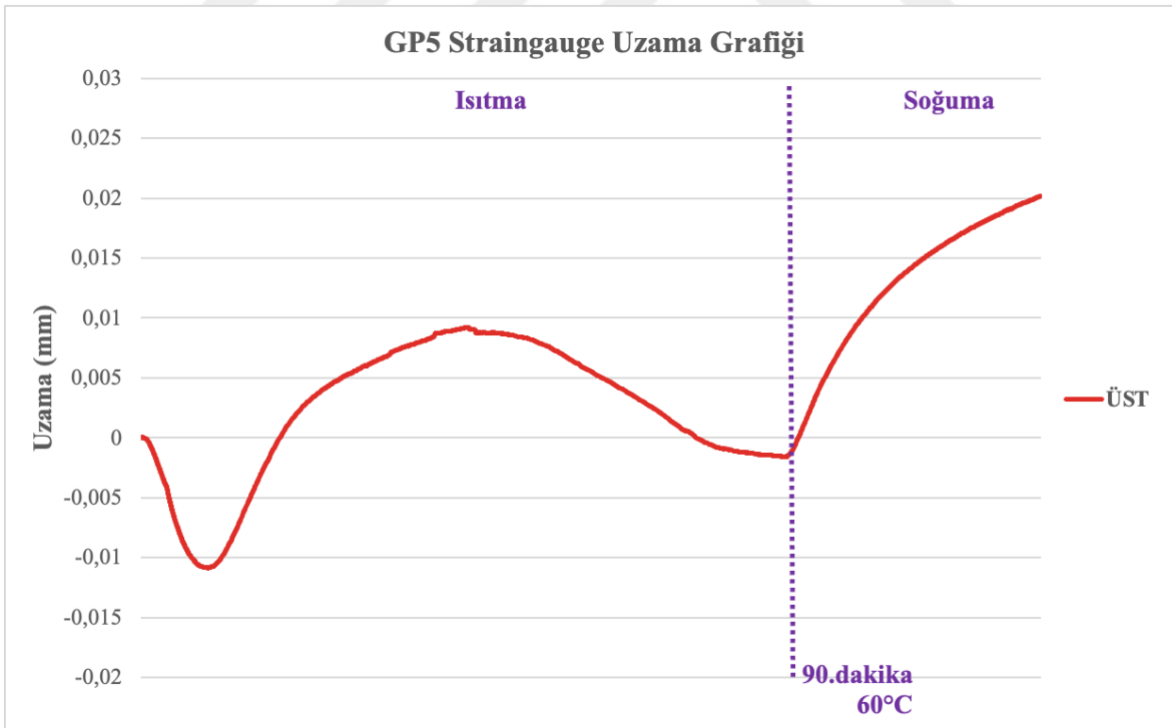
Beton kirişin en fazla uzama değişimi yaptığı zaman betonun en çok ısındığı an olmuştur. Bu durum beton plağın gün içinde en çok genleştiği zamanın güneş ışınlarının en dik açıyla geldiği 12.00 yerine sıcaklığın en çok olduğu 14.00 civarında olması ile paralellik göstermektedir.



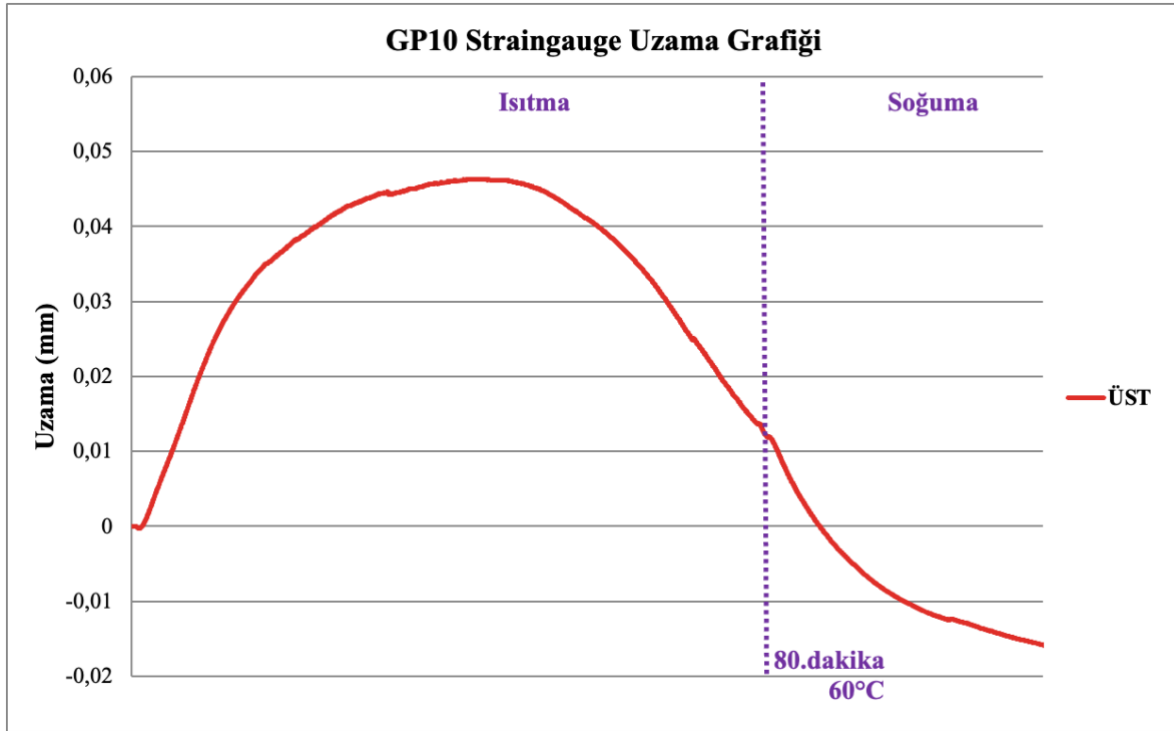
Şekil 128. Sıcaklık değişiminde beton numunenin genleşme modeli



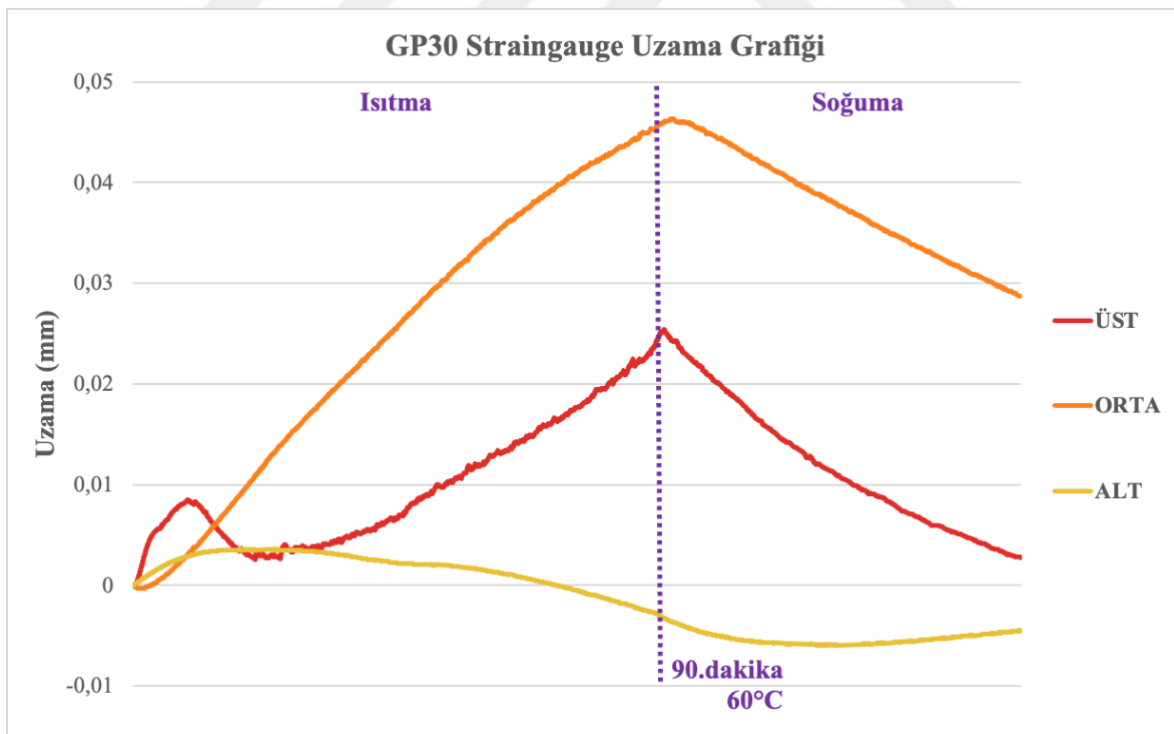
Şekil 129. GP0 numunesinin straingauge değerlerine göre uzaması



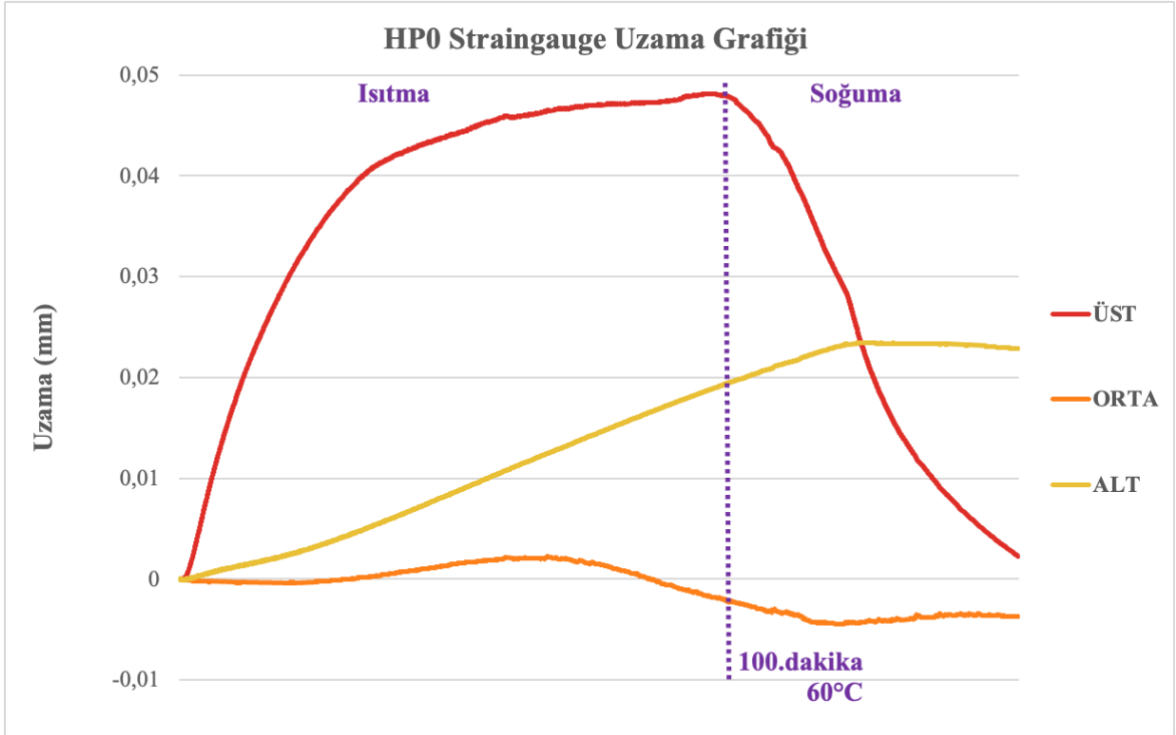
Şekil 130. GP5 numunesinin straingauge değerlerine göre uzaması



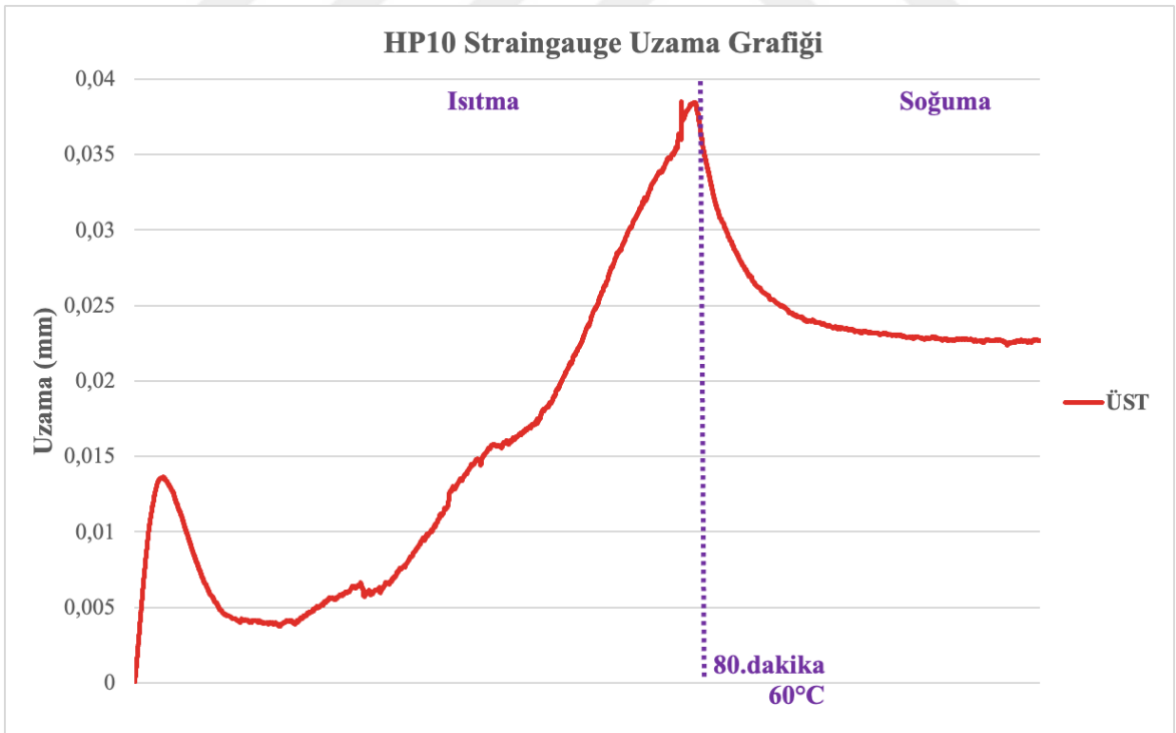
Şekil 131. GP10 numunesinin strain gauge değerlerine göre uzaması



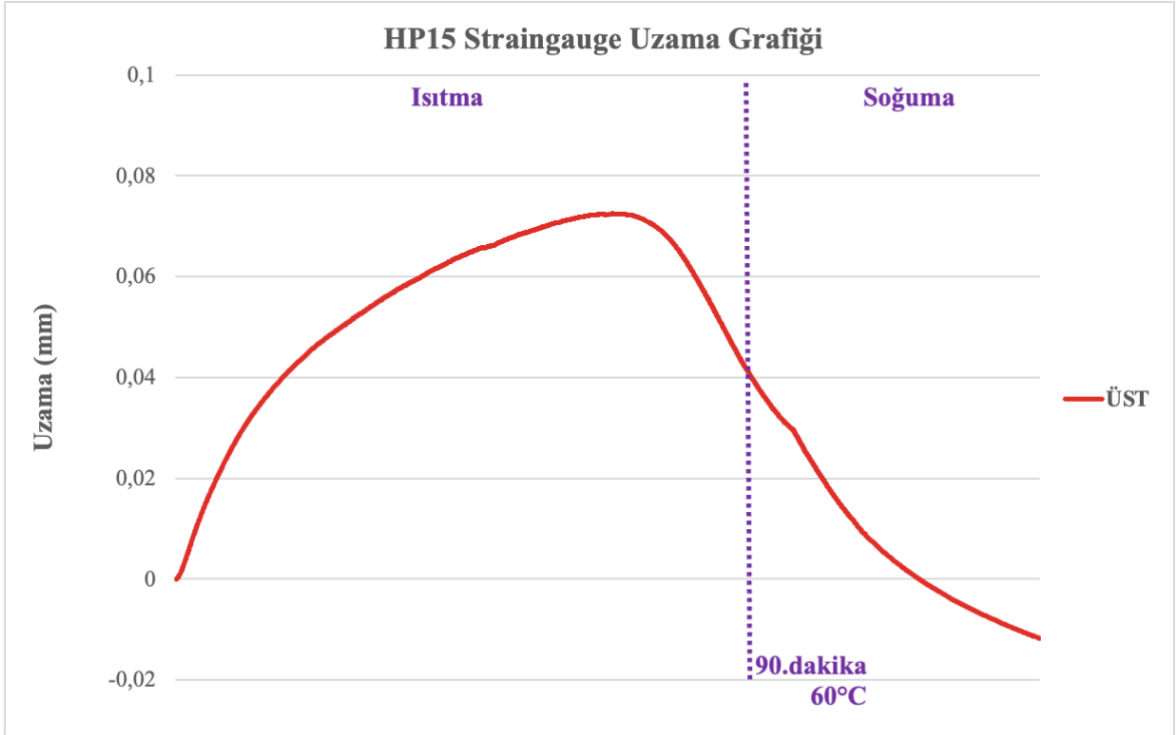
Şekil 132. GP30 numunesinin strain gauge değerlerine göre uzaması



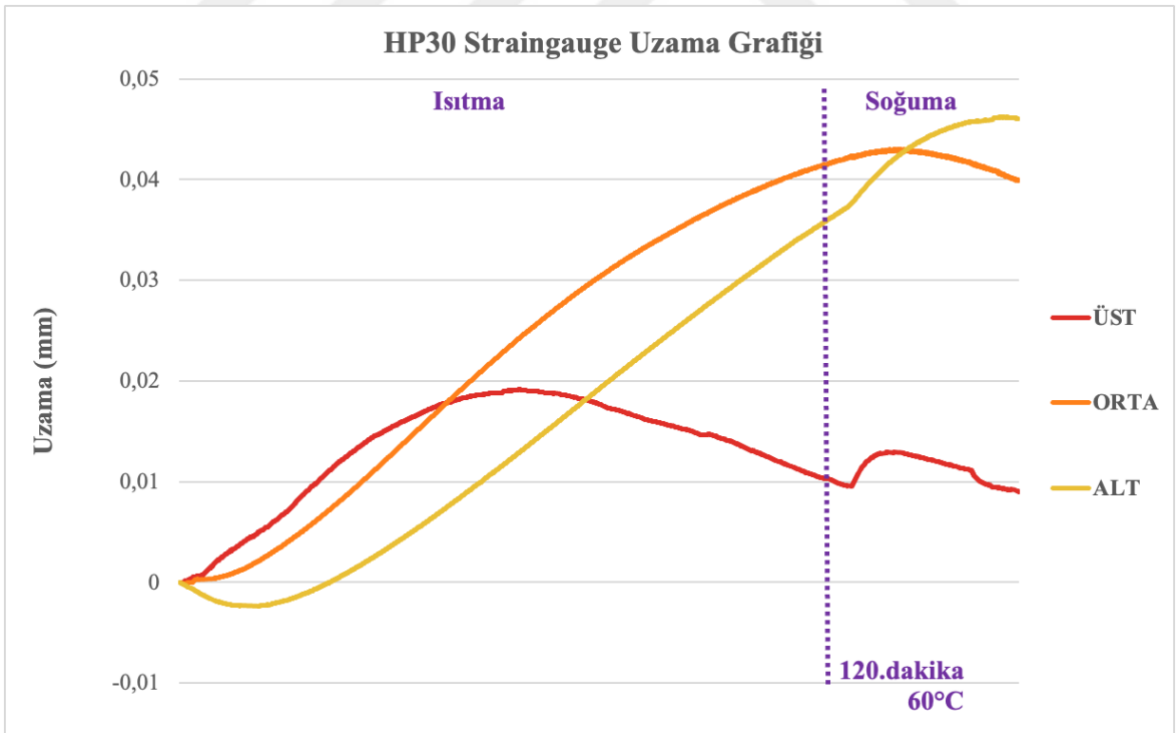
Şekil 133. HP0 numunesinin straingauge değerlerine göre uzaması



Şekil 134. HP10 numunesinin straingauge değerlerine göre uzaması



Şekil 135. HP15 numunesinin straingauge değerlerine göre uzaması



Şekil 136. HP30 numunesinin straingauge değerlerine göre uzaması

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, beton yol plağında oluşan ısııl çatlakların önlenmesi gayesiyle beton içeriğinde perlit kullanılarak genleşmenin azaltılması amaçlanmıştır. Genleştirilmiş perlit ve ham perlit içeren 2 ayrı beton karışım seti üretilmiştir. Betonun toplam hacmine oranla %0, 5, 10, 15, 30 perlit ikame edilmiştir. Laboratuvar ortamında beton numuneler ile gerçekleştirilen deney çıktıları değerlendirilmiştir.

Beton küp numunelerde elde edilen basınç dayanımı değerlerine göre %5'ten fazla genleştirilmiş perlitin beton yol plağında agregas olarak seçimi uygun olmadığı görülmüştür. Ham perlit agregası basınç dayanımı açısından beton yolda kullanıma uygun bulunmuştur.

Beton kırış numunelerin eğilmede çekme dayanımları incelendiğinde GP0, GP5, GP10 karışımları sırasıyla 4,4 MPa, 4,3 MPa, 4,1 MPa olmuştur. Beton yol kaplamada eğilmede çekme dayanımı açısından genleştirilmiş perlit agregasının %10 oranına kadar kullanılabileceği söylenebilir. Ham perlit agregası içeren beton kırış numunelerin eğilmede çekme dayanımları geleneksel beton numune ile benzer değerlerde bulunmuştur. HP0 geleneksel beton karışımı için 5,1 MPa olan 28 günlük eğilmede çekme mukavemeti HP15 için 4,8 MPa olmuştur. Ham perlit içeren numunelerin 90 günlük eğilmede çekme dayanım değerleri geleneksel betona göre daha fazla artmıştır. Nihai eğilmede çekme dayanımlarında en yüksek değer HP10 ve HP15 karışımlarında 5,6 ve 5,7 MPa olmuştur. Eğilmede çekme dayanımı değerlerine göre ham perlit beton yol plakta kullanılmaya uygun bir agregas olarak tespit edilmiştir.

Betonun birim hacim ağırlık değerlerine göre yalnız GP30 numunesi hafif beton özelliği göstermiştir. Genleştirilmiş perlit ve ham perlit agregası 0- 4 mm aralığındaki boyutları nedeniyle yaş betondaki boşluklara yerleşmiştir. Beton içindeki hafif agregas miktarının artışı ile boşlukların hafif agregalarla dolarak boşlukların azalışı beraber gerçekleşmiştir. Bu nedenle perlit agregalarının yoğunluk üzerinde tasarım hesabında beklenenden daha az etkisi olmuştur.

GP ve HP setleri sıcaklık açısından karşılaştırıldığında beton numunenin üst ve alt yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı en fazla GP30 numunesinde 27,6°C, en az HP30 numunesinde 13,5°C olmuştur. Genleştirilmiş perlit izolasyon malzemesi gibi davranarak ve boşluklu yapı oluşturarak ısıının daha yavaş iletilmesini sağlamıştır. Ham perlit betonda sıcaklığın homojen dağılmasında etkili olmuştur. Beton yol kaplamasında üst yüzey ve alt

yüzey arasında oluşacak sıcaklık farkının indirgenmesi yönünden ham perlit kullanımı avantaj sağlayacaktır.

Magnezyum sülfatlı çözeltide 180 gün kür edilen GP ve HP numunelerde %1 mertebesinden daha az madde kaybı olmuştur. Numunelerin hiçbirinde yapısal bozulma olmamıştır. Genleştirilmiş perlit ve ham perlit içeren karışımlar arasında bir fark gözlenmemiştir. $MgSO_4$ tuzunun dayanıklılık üzerindeki etkisinin belirgin olarak gözlenmesi için daha uzun süre gerekmektedir.

Beton numunelerin sıcaklık etkisiyle oluşturdıkları genleşme sonucu oluşan uzama değerleri bakımından GP30 ve HP10 en iyi sonuçları vermiştir. GP ve HP setlerin tamamında uzama değerleri benzer mertebede ve 0-0,05 mm aralığında ölçülmüştür. Numuneler en fazla 0,05 mm uzama yapmıştır. $10 \times 10 \times 50$ cm kiriş numunelerin oluşturulan deney düzeneği koşullarında sıcaklık etkisiyle yaptıkları deplasmanlar sonucu çatlak oluşumu gözlenmemiştir.

Sonuç olarak, beton yol kaplamasında çatlak oluşumu açısından kritik eğilmede çekme dayanımı dikkate alındığında GP5, GP10, HP5, HP10, HP15, HP30 karışımlarının kullanılabilir olduğu düşünülmektedir. Sıcaklık davranışı bakımından değerlendirildiğinde GP5, HP15 ve HP30 beton yolda uygulanabilir bulunmuştur.

5. ÖNERİLER

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada, perlit agregasının beton yollarda genleşmeyi azaltma amacıyla kullanılması araştırılmıştır. Benzer konularda çalışma yapmak isteyen araştırmacılara ve uygulayıcılara iletmek istenen öneriler aşağıdaki gibi belirtilmiştir:

- Bu tezde genişletilmiş perlit ve ham perlit agregası maksimum tane boyutu (D_{max}) 4 mm olarak kullanılmıştır. Yeni çalışmalarda daha ince boyutlarda agrega denenebilir.
- Ham perlit en fazla toplam hacimce %30 kullanılmıştır. Agreganın tamamı ham perlitten oluşturulacak bir beton karışımı için genleşme değişimleri incelenebilir.
- ASR reaksiyonlarına karşı yapılan magnezyum sülfat deneyi daha uzun periyotta gerçekleştirilebilir.
- Farklı agregaların genleşme açısından incelenebilir.
- Yapılan çalışmalarda C30 sınıfı beton kullanılmıştır. Beton sınıflarının sıcaklık karşısındaki davranışının değişiminin araştırılması için farklı beton sınıfları için deneyler tekrarlanabilir.
- Sıcaklık testleri yapılırken oda ortamından etkilenildiği için testler benzer sıcaklık olan günlerde gerçekleştirilmeli, mümkün olmadığında ortamın etkisi göz önünde tutulmalıdır.
- Beton numunenin gerçek yol plağını daha iyi temsil etmesi açısından özelleştirilmiş boyutlu yeni numuneler hazırlanabilir.

6. KAYNAKLAR

- Ağar, E., Süttaş, İ. & Öztaş, G. (1996). Asfalt Kaplama ile Beton Yol Karşılaştırılması, THBB Hazır Beton Dergisi- Beton Yollar Özel Eki.
- ACI 207.1R-05, (2012). Guide to Mass Concrete, ACI Committee.
- Akbelen B. & Yaman İ.Ö. (2022). Rijit Kaplamaların Birim Fiyatlarının Oluşturulması ve Türkiye Devlet Yolları Ağında Esnek ve Rijit Kaplamaların İlk Yapım Maliyetlerinin Karşılaştırılması, 2. Beton Yollar Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı, 171-193.
- Alawi, M. H. & Helal, M. M. (2014). A mathematical model for the distribution of heat through pavement layers in Makkah roads. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 26(1), 41–48.
- ASTM C78-09, Standard Test Method for Flexural Strength Of Concrete (Using Simple Beam With Third-Point Loading), ASTM International.
- ASTM C293/C293M-16, Standard Test Method for Flexural Strength Of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading), ASTM International.
- ASTM C330/C330M, (2017). Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete, ASTM International.
- ASTM C39/C39M-01, (2017). Standard Test Method For Compressive Strength Of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International.
- Balun, B. (2013). *Hafif Agregalı Kendiliğinden Yerleşen Harçların Mekanik ve Durabilite Özellikleri*. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elâzığ.
- Bektas, F., Turanlı, L., & Monteiro, P. J. M. (2005). Use of Perlite Powder to Suppress the Alkali–Silica Reaction, Cement and Concrete Research, 35,10, 2014–2017.
- Bozkurt, N. (2013). The Effect Of High Temperature On Concrete Containing Perlite Powder, SDU International Journal of Technologic Sciences ,5(1),87-93.
- BS EN 12620:2002+A1, (2008). Aggregates for concrete, British Standards Institution.
- BS EN 12390-3, (2019). Testing hardened concrete Compressive strength of test specimens, British Standards Institution.
- BS EN 12390-6, (2009). Testing hardened concrete Tensile splitting strength of test specimens, British Standards Institution.
- Callister, W.D., & Rethwisch D. (2013). Materials Science and Engineering: An Introduction (Malzeme Bilimi ve Mühendisliği), 8. Basım.

- Cha, S.L. & Jin, S.S. (2020). Prediction of thermal stresses in mass concrete structures with experimental and analytical results, *Construction and Building Materials*, 258, 120367.
- Chung, Y. (2012). Thermal Stress Analysis of Jointed Plain Concrete Pavements Containing Fly Ash and Slag, *LSU Doctoral Dissertations*, 2608.
- Chung, Y. & Shin, H.C. (2011). Characterization of the coefficient of thermal expansion and its effect on the performance of Portland cement concrete pavements. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38(2), 175–183.
- Çullu, M., Subaşı, S. & Bolat, H. (2010). Beton Kanseri-Alkali Silika Reaksiyonu, *e-Journal of New World Sciences Academy Engineering Sciences*, 1A0103, 5, 3, 526-540.
- FHWA-HIF-09-015, (2011). Coefficient of Thermal Expansion in Concrete Pavement Design, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.
- Gökçe, H.S., Şimşek, O., Durmuş. & Demir, İ. (2010). Ham Perlit Agregalı Hafif Beton Özelliklerine Alternatif Genleştirilmiş Perlit Kullanımının Etkisi, *Politeknik Dergisi*, 13(2), 159-163.
- Ha, J.H., Jung, Y. S. & Cho, Y. (2014). Thermal crack control in mass concrete structure using an automated curing system, *Automation in Construction*, 45, 16–24.
- Hagelia, P. (2004). Origin of Map Cracking in View of the Distribution of Air Voids-Strength and ASR-Gel, 12. International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Beijing, China, 2, 870-881.
- Heimans, F. (2002). Developments in Concrete Pavements Summary Report, NSW Roads and Traffic Authority, Surry Hills, 1-4.
- Hiller J.E. & Roesler J.R. (2005). Determination of Critical Concrete Pavement Fatigue Damage Locations Using Influence Lines, *Journal of Transportation Engineering*, 131, 8, 599-607.
- Ibrahim, M., Ahmad, A., Barry, M. S., Alhems, L. M., & Mohamed Suhoothi, A. C. (2020). Durability of Structural Lightweight Concrete Containing Expanded Perlite Aggregate, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 14(1).
- Jeong, J.-H., Zollinger, D. G., Lim, J.-S., & Park, J.-Y. (2012). Age and Moisture Effects on Thermal Expansion of Concrete Pavement Slabs, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24, 1, 8–15.
- Juknevičius, L., Marciukaitis, G., & Valivonis, J. (2006). Influence of Technological Factors on The State of Stress and Strain in Three-layer Reinforced Concrete Structures, *Journal of Civil Engineering and Management*, 12, 3, 195–204.
- Kabay, N. (2009). *Hafif Agregalı Betonun Boşluk Yapısının Mekanik ve Fiziksel Özelliklere Etkisi*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.

- Kabay, N. & Kızılkant, A.B. (2019). Mekanik ve Fiziksel Özellikleri Bakımından Genleştirilmiş Perlit Agregalı Hafif Blok, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(3), 47-58.
- Kadioğlu, T. (2020). *Beton ve Asfalt Yolların Dayanım, Dayanıklılık (Durabilite) ve Maliyet Değişimlerinin Karşılaştırılması: Trabzon Örneği*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Kapeluszna, E., Kotwica, L., Pichór, W., & Nocuń-Wczelik, W. (2020). Cement-based Composites with Waste Expanded Perlite- Structure, Mechanical Properties and Durability in Chloride and Sulphate Environments, *Sustainable Materials and Technologies*, 24,160.
- Kayıpmaz M., T. (2019). *Beton Yollarda Isıl Genleşme ve Gerilmelerin Araştırılması*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- King, D. & Taylor, P. (2022). Rehabilitation and Repair of Concrete Overlays, *MATEC Web of Conferences*, 364, 1-8.
- KGM, (2016). Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Daire Başkanlığı, Aralık, 2016.
- Kılıçer, A. (2018). Van Gölü Havzasındaki Perlit Madeninin Alkali-Silika Reaktivitesi (ASR) Üzerine Etkileri, *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi/ Journal of the Institute of Natural & Applied Sciences*, 23 (3), 286-290.
- Klemczak, B. & Zmij, A. (2021). Insight into Thermal Stress Distribution and Required Reinforcement Reducing Early-Age Cracking in Mass Foundation Slabs, *Materials*, 14(3), 477.
- Kodur, V. K. R., & Harmathy, T. Z. (2016). Properties of Building Materials, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 277–324.
- Kotwica, L. Pichor, W., Kapeluszna, E. & Rozycka, A. (2017). Utilization of waste expanded perlite as new effective supplementary cementitious material, *Journal of Cleaner Production*, 140, 1344-1352.
- Mackiewicz, P., & Szydao, A. (2020). Thermal Stress Analysis in Concrete Pavements. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 146(3), 06020002.
- Madencilik ÖİK Raporu, (2001). Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu, Yapı Malzemeleri III (Pomza-Perlit-Vermikülit-Flogopit-Genleşen Killer) Çalışma Grubu Raporu, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Ankara.
- Madencilik Politikaları, (2018). Özel İhtisas Komisyonu Raporu, On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023), Ankara.
- Malvar, L.J., Cline G.D., Burke D.F., Rollings R., Sherman T.W., & Greene J.L. (2002). Alkali- Silica Reaction Mitigation: State of the art and Recommendations, *ACI Materials Journal*, 99, 480-489.

- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2002). Concrete, 2nd Ed., Pearson Education, Inc., New Jersey.
- Mineral Commodity Summaries 2009, US Geological Survey, Washington.
- Mineral Commodity Summaries 2022, US Geological Survey, Reston, Virginia.
- Mladenovic, A., Suput, J.S., Ducman, V. & Skapin, A.S. (2004). Alkali-silica reactivity of some frequently used lightweight aggregates, Cement Concrete Research, 34 (10), 1809–1816.
- Nguyen, T.C., Thoan, P.V. & Bui, K.A. (2018). The Effects of Insulation Thickness on Temperature Field and Evaluating Cracking in the Mass Concrete, Electronic Journal of Structural Engineering, 18(2).
- Numan, H., Yaseen, M.H. & AlJuboori, H. (2019). Comparison Mechanical Properties of Two Types of Light Weight Aggregate Concrete, Civil Engineering Journal, 5(5), 1105-1118.
- Oktay, H., Yumrutaş, R., & Akpolat, A. (2015). Mechanical and Thermophysical Properties of Lightweight Aggregate Concretes, Construction and Building Materials, 96, 217-225.
- Othman, M.L. (2020). Experimental Study on Lightweight Concrete Using Lightweight Expanded Clay Aggregate (LECA) and Expanded Perlite Aggregate (EPA), Journal of Engineering Science and Technology, 15,2, 1186-1201.
- Polat, R., Demirboğa, R. & Karagöl, F. (2018). The influence of expanded perlite aggregate on compressive strength, linear autogenous shrinkage, restrained shrinkage, heat of hydration of cement-based materials, International Federation for Structural Concrete Structural Concrete, 1–11.
- Puyan, M. S. (2003). *Beton Yollarında Çatlak Denetimi*. Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Edirne.
- Rózycka, A., & Pichór, W. (2016). Effect of Perlite Waste Addition on the Properties of Autoclaved Aerated Concrete, Construction and Building Materials, 120, 65-71.
- Sinchana, H.K. & Prakash, K.E. (2018). To Study the Suitability and Performance of Expanded Perlite Aggregate with Partial Replacement of Crushed Rock Fines as Fine Aggregate, International Research Journal of Engineering and Technology, 05(10), 881-888.
- Sun, L. (2016). Distribution of the temperature field in a pavement structure, Structural Behavior of Asphalt Pavements, 61–177.
- Şengül, O., Azizi, S., Karaosmanoğlu, F., & Taşdemir, M. A. (2011). Effect of Expanded Perlite on the Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Lightweight Concrete, Energy and Buildings, 43,2-3, 671–676.

- Tanesi, J. & Meininger, R., (2007). Coefficient of Thermal Expansion – Its Role in Concrete Pavement Performance, International Workshop on Best Practices for Concrete Pavements, IBRACON-ISCP.
- Tapan, M. & Engin, C. (2019). Effect of Expanded Perlite Aggregate Size on Physical and Mechanical Properties of Ultra Lightweight Concrete Produced with Expanded Perlite Aggregate, Periodica Polytechnica Civil Engineering, 63(3), 845–855.
- TÇMB, (2020). Derzli Donatısız Beton Yollar için Tasarım Kılavuzu, EUPAVE (Avrupa Beton Kaplama Birliği), TÇMB (Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği), Ankara.
- Timm, D. H., & Barrett III, W., (2005). Analysis of the 2002 Design Guide for Rigid Pavement, Final Report ALDOT Project 930-554 Rigid Pavement Design Portion, Highway Research Center, Harbert Engineering Center, Auburn, Alabama.
- Topçu, İ.B. & Işıkdag, B. (2008). Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete, Journal of Materials Processing Technology, 204, 34–38.
- TS EN 206, (2021). Beton- Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-6, (2022). Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler- Bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3, (2021). Beton-Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-5, (2019). Sertleşmiş Beton Deneyleri Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TSE EN 14316-1, (2006). Isı Yalıtım Malzemeleri (Binalar için) Genleşmiş Perlitten Yerde Yapılan Isı Yalıtımı, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Ulus, İ. (2007). *Ham Perlit Agregası Kullanılarak Yüksek Dayanımlı Hafif Beton Üretilirliğinin Araştırılması*. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Erzurum.
- URL-1.(2022, Kasım 23). [www.mta.gov.tr/Endüstriyel Hammaddeler/ Perlit](http://www.mta.gov.tr/EndüstriyelHammaddeler/Perlit) adresinden alınmıştır.
- URL-2.(2023, Mayıs 26). pavementinteractive.org/structural-design/joint-design adresinden alınmıştır.
- URL-3.(2022, Kasım 28). [www.mta.gov.tr/ v3.0/sayfalar/hizmetler/maden-yataklari](http://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/maden-yataklari) adresinden alınmıştır.
- URL-4.(2023, Eylül 26). www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/sicaklik-analizi adresinden alınmıştır.
- URL-5.(2023, Nisan 12). epod.usra.edu/expansioncracks adresinden alınmıştır.

- Yıldırım, S. (2004). *Sarıkamış Ham Perlit Agregasının Taşıyıcı Hafif Beton Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum.
- Yolcu, C. & Girgin, Z.C. (2017). Dünyada Yapay Hafif Agregalı Yapısal Beton Uygulamaları ve Doğal Pomza Agreganın Kullanılabilirliği, AURUM Mühendislik Sistemleri ve Mimarlık Dergisi, Kış 2017, 1(2), 59-67.
- Yu, H., Khazanovich, L., Darter, M., & Ardani, A. (1998). Analysis of Concrete Pavement Responses to Temperature and Wheel Loads Measured from Instrumented Slabs, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1639, 94–101.
- Wang H., Yuan Y., Mang, H.A., Ai Q., Huang,X. & Pichler,B. (2022). Thermal stresses in rectangular concrete beams, resulting from constraints at microstructure, cross-section, and supports, European Journal of Mechanics, A Solids 93,104495, 1-15.
- Wang, X., Wu, D., Geng, Q., Hou, D., Wang, M., Li, L., Wang,P., Chen,D., & Sun,Z.,(2021). Characterization of Sustainable Ultra-High Performance Concrete (UHPC) including Expanded Perlite, Construction and Building Materials,303, 124245.

ÖZGEÇMİŞ

Yeternur Asena AKTÜRK, ilköğrenimini Hasan Ali Yücel İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2014 yılında Kanuni Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2015-2016 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2019 yılında bu bölümden mezun oldu. 2021 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2022-2024 yıllarında 122M335 numaralı TÜBİTAK 1001 projesinde yüksek lisans bursiyeri olarak görev aldı. 2022 yılında Atatürk Üniversitesi İş Sağlığı ve Güvenliği ön lisans programından, 2023 yılında Anadolu Üniversitesi İşletme lisans programından mezun oldu.