

**MİKRONİZE KALSİT KATKILI ÜÇ BOYUTLU YAZDIRILABİLİR
ÇİMENTOLU KARIŞIMLARDA DENEYSEL VE SAYISAL MODELLEME
ÇALIŞMASI**

Ceyda AYGÜN

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Malzemesi Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Derya ÖVER KAMAN

(İkinci Danışman: Doç. Dr. Ahmet Ozan ÇELİK)

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Eylül 2021

ÖZET

MİKRONİZE KALSİT KATKILI ÜÇ BOYUTLU YAZDIRILABİLİR ÇİMENTOLU KARIŞIMLARDA DENEYSEL VE SAYISAL MODELLEME ÇALIŞMASI

Ceyda AYGÜN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Malzemesi Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eylül 2021

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Derya ÖVER KAMAN

(İkinci Danışman: Doç. Dr. Ahmet Ozan ÇELİK)

Gelişen teknoloji ile 3 boyutlu yazıcılar ve beton teknolojisi birleştirilerek beton üretimine farklı bir boyut getirilmiştir. 3 boyutlu yazıcı betonu normal betondan farklı olarak üretiminde birçok farklı disiplinin bir arada çalıştığı yerinde ön dökümlü beton uygulaması olarak tanımlanmaktadır. 3 boyutlu yazıcı ile üretilen beton herhangi bir kalıp desteği ve titreşim işlemi olmadan katman katman yerleştirilebilen bir beton türüdür. Günümüzde ABD ve Çin’de birçok firma ve akademik kurum üç boyutlu basılmış yapılarla ilgili çalışmalar yapmaktadır.

Bu çalışmada, Niğde bölgesinden temin edilen mikronize kalsitin 3 boyutlu yazıcı beton harcına ilave edilmesiyle numunelere uygulanan deney sonuçları ile Ansys programında yapılan yapısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Mikronize kalsit çimento ile %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında ikame edilerek toplam 6 karışım hazırlanmıştır. Karışımlar üzerinde taze ve sertleşmiş beton deneyleri yapılmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda mikronize kalsit ikamesinin numunelerin taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Mikronize kalsit katkısının numunelerin erken yaşlardaki basınç dayanımları referans betona oranla daha yüksek çıkmıştır. Ancak, ileri yaşlarda mikronize kalsit katkı betonların basınç dayanımının daha düşük olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Mikronize kalsit, 3 boyutlu yazıcı betonu, Ansys, Yapısal analiz.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL MODELING OF MICRONIZED CALCITE MIXED THREE DIMENSIONAL PRINTABLE CEMENT MIXTURES

Ceyda AYGÜN

Department of Civil Engineering

Programme in Building Materials

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, September 2021

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Derya ÖVER KAMAN

(Co-Supervisor: Assoc. Prof. Ahmet Ozan ÇELİK)

By combining 3D printers and concrete technology, a different dimension has been brought to the creation of concrete with the contribution of developing technology. The difference between 3D printer concrete and normal concrete is defined as the on-site pre-cast concrete application in which many different disciplines work together in its production. Concrete produced with a 3D printer does not require any formwork support, at the same time, there is no need for vibration process, it is a type of concrete that can be placed layer by layer. Today, many companies and academic institutions in the USA and China are working on structures produced with 3D concrete.

In this study, it is aimed to compare the results of the structural analysis made in the Ansys program with the test results applied to the samples by adding the micronized calcite obtained from the Niğde region to the 3D printer concrete mortar total of 6 mixtures were prepared by combining micronized calcite with cement at the rates of 0%, 10%, 20%, 30%, 40% and 50%. Fresh concrete and hardened concrete tests were carried out with the mixtures formed. As a result of the tests, it was observed that the addition of micronized calcite did not have a significant effect on the fresh and hardened concrete properties of the samples. In case of adding micronized calcite, the early compressive strengths were higher than the reference concrete. But it was observed that the compressive strength of concrete with micronized calcite was lower in the following process.

Keywords: Micronized calcite, 3D printer concrete, Ansys, Structural analysis.

TEŞEKKÜR

Sadece yüksek lisans tez çalışmasında değil, hayatım boyunca ilgi ve alakalarını eksik etmeyen, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, her zaman yanımda olan hayattaki en büyük değerlerim annem Nurhan AYGÜN, babam Rafet AYGÜN ve ablam Leyla AYGÜN'e teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim süresince, çalışmalarına güncel bilgisi, tecrübesi ve desteğiyle yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Derya ÖVER KAMAN'a saygılarımı ve teşekkürlerimi iletmek isterim. SEM analizi sonuçlarını almamda katkıları olan sevgili hocam Doç. Dr. Erhan AYAS'a teşekkürlerimi iletmek isterim. Yüksek lisans tez çalışmam boyunca tecrübelerine başvurduğum Sayın Doç. Dr. Ahmet Ozan ÇELİK'e ve değerli arkadaşım Burak ÖZDEMİR'e teşekkürlerimi iletmek isterim. Malzeme temini ve tez çalışmamda değerli yorumları için İSTON firması Ar-Ge Şefi sevgili Halit Dilşad YILMAZ'a teşekkürlerimi iletmek isterim.

Değerli yorumlarıyla tez çalışmamda büyük katkısı olup, büyük projelere imza atacağına emin olduğum meslektaşlarım Adem ATEŞ, Mert METİNER, Beyza BAĞCI ve her zaman yanımda olan değerli arkadaşım Buse YALABIK'a sonsuz teşekkür ve sevgilerimi belirtmek isterim.

Ceyda AYGÜN

01/09/2021

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Ceyda AYGÜN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI.....	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç ve Kapsam.....	1
1.2. İlgili Araştırmalar	2
2. LİTERATÜR BİLGİSİ	4
2.1. Beton.....	4
2.2. Betonu Oluşturan Malzemeler.....	5
2.2.1. Çimento.....	5
2.2.2. Agrega	5
2.2.3. Karışım suyu	5
2.2.4. Mineral katkı maddeleri.....	6
2.2.5. Kimyasal katkı maddeleri	6
2.3. Üç Boyutlu Yazıcı Beton	7
2.4. Üç Boyutlu Yazıcı Betonunun Avantajları ve Dezavantajları.....	8
2.5. Üç Boyutlu Yazıcı Betonunu Oluşturan Malzemeler.....	9
2.6. Üç Boyutlu Yazıcı Betonunun Kullanım Alanları	9
3. MALZEME ÖZELLİKLERİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR	10

3.1. Kullanılan Malzeme Özellikleri.....	10
3.1.1. Çimento.....	10
3.1.2. Agrega.....	12
3.1.3. Karışım suyu.....	14
3.1.4. Mikronize kalsit.....	15
3.1.4.1. <i>Kalsitin kullanım alanları</i>	16
3.1.5. Karışımında kullanılan kimyasal katkı maddeleri.....	16
3.1.5.1. <i>Yüksek oranda su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı</i>	16
3.1.5.2. <i>Viskozite düzenleyici katkı</i>	17
3.1.5.3. <i>Priz geciktirici katkı</i>	18
3.1.6. Karışımında kullanılan polipropilen lif katkısı.....	18
3.2. Karışım Tasarımı.....	19
3.3. Harç Üretimi.....	21
3.4. Kür Koşulları.....	21
3.4.1. Su kürü.....	21
3.4.2. Kimyasal kür uygulaması.....	21
3.5. Uygulanan Deneyler.....	22
3.5.1. Taze beton deneyleri.....	22
3.5.1.1. <i>Yayılma tablası deneyi</i>	23
3.5.2. Sertleşmiş beton deneyleri.....	24
3.5.2.1. <i>Basınç dayanımı deneyi</i>	24
3.5.2.2. <i>Eğilme dayanımı deneyi</i>	25
3.5.2.3. <i>Ultrases geçiş hızı deneyi</i>	27
3.5.2.4. <i>Özgül ağırlık deneyi</i>	28
3.5.2.5. <i>Su emme deneyi</i>	28
3.5.2.6. <i>Kuru birim hacim ağırlık deneyi</i>	30
3.5.3. İnşa edilebilirlik testi.....	31
3.5.4. Mikro analiz yapı deneyleri.....	39
3.5.4.1. <i>Taramalı elektron mikroskobu deneyi</i>	39
4. DENEY SONUÇLARI.....	46
4.1. Yayılma Tablası Deney Sonuçları.....	46
4.2. Eğilme Deneyi Sonuçları.....	48

4.3. Basınç Deneyi Sonuçları.....	49
4.4. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi Sonuçları	51
4.5. Özgül Ağırlık Deney Sonuçları.....	52
4.6. Su Emme Deneyi Sonuçları.....	53
4.7. Kuru Birim Hacim Ağırlık Deneyi Sonuçları	54
5. ANSYS PROGRAMINDA YAPISAL ANALİZ	56
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE SAYISAL YAKLAŞIM.....	63
7. SONUÇLAR	79
KAYNAKÇA	81
ÖZGEÇMİŞ	

TABLolar DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3. 1. Çimento kimyasal, fiziksel ve dayanım özellikleri.....	11
Tablo 3. 2. Silis kumu fiziksel özellikleri.....	14
Tablo 3. 3. Mikronize kalsit fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	15
Tablo 3. 4. Yüksek oranda su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı teknik özellikleri.....	17
Tablo 3. 5. Viskozite düzenleyici katkı teknik özellikleri.....	17
Tablo 3. 6. Priz geciktirici / akışkanlaştırıcı beton katkısı teknik özellikleri.....	18
Tablo 3. 7. Polipropilen lif teknik özellikleri.....	19
Tablo 3. 8. Karışım tasarımı.....	20
Tablo 3. 9. Yüzeysel beton kürü teknik özellikleri.....	21
Tablo 3. 10. Karışımların yayılma değerleri.....	32
Tablo 3. 11. Karışımların 3 noktasından alınan yükseklik değerleri.....	32
Tablo 4. 1. Numunelerin yayılma değerleri.....	46
Tablo 4. 2. Serilere 1. Kür işlemi uygulanan numunelerin yayılma değerleri.....	47
Tablo 4. 3. Serilere 2. Kür işlemi uygulanan numunelerin yayılma değerleri.....	47
Tablo 4. 4. 1.Kür işlemi uygulanan serilerin eğilme deneyi sonuçları.....	48
Tablo 4. 5. 2.Kür işlemi uygulanan serilerin eğilme deneyi sonuçları.....	49
Tablo 4. 6. 1.Kür işlemi uygulanan serilerin basınç deneyi sonuçları.....	50
Tablo 4. 7. 2.Kür işlemi uygulanan serilerin basınç deneyi sonuçları.....	50
Tablo 4. 8. 1.Kür işlemi uygulanan serilerin ultrases geçiş hızı deneyi sonuçları.....	51
Tablo 4. 9. 2.Kür işlemi uygulanan serilerin ultrases geçiş hızı deneyi sonuçları.....	52
Tablo 4. 10. Özgül ağırlık deneyi sonuçları.....	52
Tablo 4. 11. Serilere uygulanan özgül ağırlık deneyi sonuçları.....	53
Tablo 4. 12. Su emme deneyi sonuçları.....	54
Tablo 4. 13. Serilere uygulanan su emme deneyi sonuçları.....	54
Tablo 4. 14. Numunelerin kuru birim hacim ağırlık deneyi sonuçları.....	55
Tablo 4. 15. Serilere uygulanan kuru birim hacim ağırlık deneyi sonuçları.....	55
Tablo 6. 1. Referans karışım 2 günlük eğilme dayanımı sonuçları.....	64
Tablo 6. 2. Referans 2 günlük ansys equivalent stress sonuçları.....	64
Tablo 6. 3. Referans karışım 7 günlük eğilme dayanımı sonuçları.....	66
Tablo 6. 4. Referans 7 günlük ansys equivalent stress sonuçları.....	67
Tablo 6. 5. Referans karışım 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları.....	69

Tablo 6. 6. Referans 28 günlük ansys equivalent stress sonuçları	69
Tablo 6. 7. Referans karışım 2 günlük basınç dayanımı sonuçları.....	72
Tablo 6. 8. Referans 2 günlük ansys equivalent stress sonuçları, basınç cihazı	72
Tablo 6. 9. Referans karışım 7 günlük basınç dayanımı sonuçları.....	74
Tablo 6. 10. Referans 7 günlük ansys equivalent stress sonuçları, basınç cihazı	75
Tablo 6. 11. Referans 28 günlük basınç dayanımı sonuçları	77
Tablo 6. 12. Referans 28 günlük ansys equivalent stress sonuçları, basınç cihazı	77



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2. 1. Beton baskı kurulum şeması (Kazemian vd., 2017).....	8
Şekil 2. 2. İston firmasının ürettiği şehir mobilyaları (Özalp vd.,2018)	10
Şekil 3. 1. CEM I 52,5 R Çimento	11
Şekil 3. 2. 0,5mm silis kumu	13
Şekil 3. 3. 1,5mm silis kumu	13
Şekil 3. 4. Doğal mikronize öğütülmüş kalsiyum karbonat (MRT100).....	15
Şekil 3. 5. 6 mm uzunluğunda polipropilen lif	19
Şekil 3. 6. Kimyasal kür uygulanan numuneler.....	22
Şekil 3. 7. Çimento yayılma tablası	23
Şekil 3. 8. Çimento yayılma tablası tokmak ve kalıp.....	24
Şekil 3. 9. Basınç dayanımı deney cihazı.....	25
Şekil 3. 10. Eğilme dayanımı deney cihazı	26
Şekil 3. 11. Ultrases geçiş hızı ölçüm cihazı	27
Şekil 3. 12. Arşimet suda tartım	28
Şekil 3. 13. Numunelerin bekletildiği kür havuzu	29
Şekil 3. 14. Numunelerin bekletildiği etüv cihazı.....	30
Şekil 3. 15. Numune Tartımı	31
Şekil 3. 16. Prototip sıkma aletiyle inşa edilebilirlik testi uygulaması	32
Şekil 3. 17. Referans karışımı inşa edilebilirlik testi	33
Şekil 3. 18. K10 karışımı inşa edilebilirlik testi	34
Şekil 3. 19. K20 karışımı inşa edilebilirlik testi	35
Şekil 3. 20. K30 karışımı inşa edilebilirlik testi	36
Şekil 3. 21. K40 karışımı inşa edilebilirlik testi	37
Şekil 3. 22. K50 karışımı inşa edilebilirlik testi	38
Şekil 3. 23. Referans karışım 100x sem görüntüsü.....	39
Şekil 3. 24. Referans karışım 1000x sem görüntüsü.....	40
Şekil 3. 25. K10 100x sem görüntüsü	40
Şekil 3. 26. K10 1000x sem görüntüsü	41
Şekil 3. 27. K20 100x sem görüntüsü	41
Şekil 3. 28. K20 1000x sem görüntüsü	42
Şekil 3. 29. K30 100x sem görüntüsü	42

Şekil 3. 30. K30 1000x sem görüntüsü	43
Şekil 3. 31. K40 100x sem görüntüsü	43
Şekil 3. 32. K40 1000x sem görüntüsü	44
Şekil 3. 33. K50 100x sem görüntüsü	44
Şekil 3. 34. K50 1000x sem görüntüsü	45
Şekil 3. 35. K50 200x kristaller sem görüntüsü.....	45
Şekil 3. 36. K50 320x kristaller sem görüntüsü.....	46
Şekil 5. 1. İston firması şehir mobilyası ölçüleri	57
Şekil 5. 2. İston firması şehir mobilyası ölçüleri	57
Şekil 5. 3. İston bank malzeme bilgileri, beton	58
Şekil 5. 4. İston bank malzeme bilgileri, polietilen	58
Şekil 5. 5. İston bank malzeme tanımlama, beton	59
Şekil 5. 6.İston bank malzeme tanımlama, polietilen	59
Şekil 5. 7.İston bank mesh atma	60
Şekil 5. 8. İston bank yapısal analiz.....	60
Şekil 5. 9. İston bank kuvvet tanımlama	61
Şekil 5. 10. İston bank deformasyon (18 katman)	61
Şekil 5. 11. İston bank gerilme (18 katman).....	62
Şekil 5. 12. İston bank deformasyon (tek parça)	62
Şekil 5. 13. İston bank gerilme (tek parça).....	63
Şekil 6. 1. Eğilme dayanımı test cihazı ve numune geometrisi	63
Şekil 6. 2. Ref 1-2 günlük numune sonuçları	65
Şekil 6. 3. Ref 2-2 günlük numune sonuçları	65
Şekil 6. 4. Ref 3-2 günlük numune sonuçları	66
Şekil 6. 5. Ref 1-7 günlük numune sonuçları	67
Şekil 6. 6. Ref 2-7 günlük numune sonuçları	68
Şekil 6. 7. Ref 3-7 günlük numune sonuçları	68
Şekil 6. 8. Ref 1-28 günlük numune sonuçları	70
Şekil 6. 9. Ref 2-28 günlük numune sonuçları	70
Şekil 6. 10. Ref 3-28 günlük numune sonuçları	71
Şekil 6. 11. Basınç dayanımı test cihazı ve numune geometrisi.....	71
Şekil 6. 12. Ref 1-1 2 günlük numune sonuçları	73
Şekil 6. 13. Ref 2-1 2 günlük numune sonuçları	73

Şekil 6. 14. Ref 3-1 2 günlük numune sonuçları	74
Şekil 6. 15. Ref 1-1 7 günlük numune sonuçları	75
Şekil 6. 16. Ref 2-1 7 günlük numune sonuçları	76
Şekil 6. 17. Ref 3-1 7 günlük numune sonuçları	76
Şekil 6. 18. Ref 1-1 28 günlük numune sonuçları	78
Şekil 6. 19. Ref 2-1 28 günlük numune sonuçları.....	78
Şekil 6. 20. Ref 3-1 28 günlük numune sonuçları	79



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

μ	: Mikron
A	: Kesit alanı
σ	: Gerilme
ASTM	: Amerikan Deney ve Malzeme Birliği
MPa	: Mega Pascal
BPÇ	: Beyaz Portland Çimento
TS EN	: Türk Standartları Enstitüsü
K10	: %10 Mikronize Kalsitli Karışım
K20	: %20 Mikronize Kalsitli Karışım
K30	: %30 Mikronize Kalsitli Karışım
K40	: %40 Mikronize Kalsitli Karışım
K50	: %50 Mikronize Kalsitli Karışım
kN	: Kilonewton

1. GİRİŞ

İnsanoğlunun en temel gereksinimlerinden biri barınma ihtiyacıdır. Bu ihtiyaçlardan kaynaklı doğada bulunan malzemelerin işlenmesiyle birlikte çeşitli yapılar ortaya çıkmıştır. Günümüzde kullanılan en önemli yapı malzemelerinden biri betondur. İnsanların yaşam alanlarının büyük bir bölümü betondan yapılmaktadır. Agregası, çimento, su ve kullanım alanına göre gerek duyulan bazı mineral ve kimyasal katkı maddelerinin eklenmesiyle oluşan bu yapı malzemesi ilk karıldığı anda plastik kıvamda olup zaman geçtikçe sertleşip dayanım kazanan kompozit bir malzemedir. Bu malzemenin olumsuz özelliği çimento üretimi sırasında karbondioksit salınımı sonucu ortaya çıkan çevre kirliliği sorunlarını beraberinde getirmesidir. Beton çeşitleri, birim ağırlıklarına, basınç dayanımlarına, üretildikleri ve uygulandıkları yere göre isimlendirilir. 3 boyutlu beton yazdırma yöntemi geleneksel beton döküm yönteminin yanı sıra kalıp kullanılmadan, malzeme israfını önleyen ve zamandan tasarruf edilmesini sağlayan bilgisayar destekli bir baskı türüdür. Bu baskı türü hem ekonomik açıdan hem de estetik açıdan karmaşık yapıların tasarımında önemli bir rol oynamaktadır.

3 boyutlu beton yazıcı uygulaması, günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır. Tıp, otomotiv, endüstriyel aletler, oyuncaklar ve mühendislik alanında yerini almıştır. Çimento ve çeşitli malzemelerle katmanlar halinde eklemeli üretim teknolojisinde son zamanlarda gelişmeler yaşanmaktadır. 3 boyutlu beton yazıcı teknolojisi, püskürtme beton ve kendiliğinden yerleşen betonun avantajlarını kullanarak malzeme bilimi, robotik kodlama ve mimari tasarım çalışmalarının ortak ürünü olarak ortaya çıkmıştır. Bu baskı türünde taze betonun pompalanabilmesi, işlenebilmesi, çalışılabilirlik süresi ve inşa edilebilmesi, sertleşmiş betonun ise dayanımı büyük önem taşımaktadır. Viskozite, akma gerilimi, tiksotropi gibi reolojik özellikler de yazıcı betonunun yazdırılabilir özelliğini kontrol etmek için kritik özellikler olarak kabul edilmektedir. Karışım tasarımında belirli bir standart olmaması ve yapılan çalışmaların sayıca yetersiz olması bu özellikleri olumsuz etkilemektedir.

1.1. Amaç ve Kapsam

Yapılan çalışmada harç, taze ve sertleşmiş beton özelliklerinin uygunluğu açısından prototip bir sıkma aletiyle, katman katman sıkılarak inşa edilebilirliği sağlanıp referans bir karışım tasarımı elde edilmiştir. Harç katmanlar halinde döküm yapıldığından

malzemenin reolojik özellikleri üzerinde araştırmalar sonuçları olumlu yönde etkilemiştir.

Bu çalışmada kimyasal özelliği %95-97 oranında kalsiyum karbonat (CaCO_3) içeren bağlayıcı mikronize kalsit katkısı, referans karışımda bulunan imento ile ağırlıkça %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında yer değiştirilmesiyle referans karışım dahil 6 farklı seri hazırlanmıştır. Üretilen bu numunelere, mikronize kalsit katkısının etkisini incelemek için mekanik ve dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. İki farklı kür koşulları uygulanıp, sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çalışmada deneysel sonuçlarla karşılaştırma yapılması amacıyla ANSYS programında 'Static Structural Analysis' bölümünde yapısal analiz yani dış yüklerin (kuvvet, moment, basınç vb.) etkisinde olmasına karşın statik dengede kalan durağan halde katı cisimleri, sistemleri incelediğimiz analiz tipinde modelleme yapılacaktır. Sistemdeki gerilme ve şekil değiştirmeleri hesaplayıp deneysel sonuçlarla karşılaştırdıktan sonra genel bir sonuç çıkarılacaktır.

1.2. İlgili Araştırmalar

Zou vd. (2021) yaptıkları deneysel çalışmada kullanılan doğal kum yerine tamamen geri dönüştürülmüş kumun kullanılması yazıcının ağzından ekstrüzyon işleminin zorlaşmasına sebep olmuş ve akışkanlık derecesinin düşmesine sebep olmuştur. Geri dönüştürülmüş kumun olduğu harca uygun oranlarda sodyum glukonat eklendiğinde malzemenin yazdırılabilirliği sağlanmış ve ek olarak erken yaşlardaki dayanımı arttırarak alt katmanların sertleşmesi ve kısa sürede daha fazla yük taşıması açısından önemli bir sonuçtur (Zou vd., 2021). Ma vd. (2020), inşaat sektöründe 3 boyutlu yazıcı betonunun en büyük sorunlarından biri olan birbirine yapışık katmanlar arasındaki uyumun yetersizliği üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada bu sorunu ele almak için katkılı bir imento harcı geliştirilmiş ve bu harcın içerisinde selüloz lifi bulunmaktadır. Kullanılan karışım pompalandığında basılı tabakalar yüzeyinde nem miktarı maksimum seviyededir. Selüloz lifi yüzeydeki fazla suyu tutup i kütleme ajanı olarak katkı sağlamaktadır. Reolojik özellikleri optimize etmek için az miktarda kil ve süperplastikleştirici katkı kullanımı görülmektedir. Su tutmayı iyileştirmek için ise silis dumani, malzeme yoğunluğunu arttırmak ve mikro gözenekleri doldurmak için silis tozu kullanılmıştır. Katkı harcının kırılma yüzeylerinden alınan SEM görüntülerinde selüloz lifinin etkileri incelenerek, 3 boyutlu yazıcı betonunun önemli problemlerinden biri olan

katmanlar arası uyumun önemli derecede iyileştirebileceği sonucuna varılmıştır (Ma vd., 2020).

Marchment ve Sanjayan (2020), yaptıkları çalışmada 3 boyutlu yazıcı betonunun dezavantajlarından biri haline gelen katmanlar arası aderansı etkileyen sorunları ele almışlardır. Baskı malzemesinin pompalama işlemi için akıcı olması gerektiğini fakat oluşturulan karışım reçetesinin de kıvamı etkilerken aynı zamanda dayanımı düşürmemesi gerektiğini belirtmişlerdir. 3 boyutlu yazıcı betonunun döküm işlemi açısından katman üstüne katman gelmesi, ara yüzlerin önemli ve zayıflık noktası olarak kabul edildiğini ve bunun için yazıcı başlığının özel olarak tasarlandığını belirtmişlerdir. Elyaf takviyesi yaptıklarında bu yöntemin betonun çekme dayanımını bir dereceye kadar arttırmada etkili olduğu görülmüştür. Testler ve hesaplamalar sonucunda üst üste binmiş ağ takviyesinin sürekli bir donatı olarak işlev görmesinde etkili olduğunu göstermektedir. 3 boyutlu yazıcı betonunun inşaat şirketlerinin potansiyel olarak ikna edebilecekleri faydalarına bakıldığında malzeme tedarik zincirini ve israfı en aza indirmesi, yerinde inşaat yapma olasılığı, birçok tehlikeli işçiliğinin yüksekte çalışma gibi durumlar ön plana çıkmaktadır (Marchment ve Sanjayan, 2020).

Durmuş ve Bekem (2015) yaptıkları çalışmada kalsiti çimentoya ikame olarak kullanılması yerine ince agregaya ikame olarak kullanmayı tercih etmişlerdir. Referans beton dışında kalsiti %3, %5 ve %10 oranlarında kullanıp 4 farklı seri oluşturmuşlardır. Beton örnekleri üzerinde su emme, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmişlerdir. En yüksek fiziksel ve mekanik özelliklerin %5 kalsit ikameli betonda olduğu sonucuna ulaşmışlardır (Durmuş ve Bekem, 2015).

Kara (2020), kalsiti %0, %3, %5 ve %10 oranlarında ağırlıkça çimentoya ikame olarak kullandığı çalışmasında taze betonlar üzerinde çökme testi, sertleşmiş betonlar üzerinde ise ultrases geçiş hızı testi, su emme deneyi, Schmidt çekici ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Uygulanan bu deneyler sonucunda ise %10 kalsit katkılı betonun basınç dayanımını arttırdığı sonucuna ulaşmıştır (Kara, 2020).

Hojati vd. (2018), yaptıkları çalışmada 3 boyutlu yazıcı betonunun çökme özelliği, basınç ve eğilme mukavemetini araştırarak, uygun yazıcı başlığı tasarımında ise karışımın reolojik özelliklerini göz önünde bulundurmışlardır. Yazıcı başlığının çapına uygun olarak karışıma dahil edilecek lifin uzunluğu, katmanlar arası bağlanmanın arasındaki

ilişkiyi incelemektedirler. Çalışmada kullanılan 3 boyutlu yazıcı makinesi malzemenin düzgün bir şekilde ekstrüde edilebilmesi için 15 mm çaplı bir yazıcı başlığı olan sabit bir pompa ve farklı eksenlerde çeşitli hareketleri sağlayabilen 6 eksenli robotik bir koldan oluşmaktadır. Metakaolin jeopolimerinin Mars'ta 3D baskı için bir yapı malzemesi olarak kullanılmak üzere büyük bir potansiyele sahip olduğu, malzemenin sertleşme hızının baskı için iyi ayarlanması gerektiği, 3 boyutlu yazıcı başlığı genişliğinin kullanılacak lifle uyumlu olması gerektiği aksi takdirde pompada ekstrüde işlemi sırasında tıkanma olması veya pompaya zarar vermesi açısından kullanılacak lif boyutunun dijital teknolojide sınırlı olduğu, katmanların üstüne gelecek olan katmanı taşıyabilmesi için sağlam olması gerektiği sonucuna varılmıştır (Hojati vd., 2018).

2. LİTERATÜR BİLGİSİ

2.1. Beton

Eski uygarlıkların eserlerinin günümüze kadar gelip tarihi ayakta tutmasında betonun büyük bir payı vardır. Bu eserlerin yapımında hidrolik bağlayıcı, kireç bazlı bağlayıcı ve horasan harcı gibi bağlayıcı malzeme çeşitleri kullanılmıştır (Karakule vd.,2004). Yapılan araştırmalarda eski taş çağında, aletlerin ve heykelciklerin yapımında killi toprak kullanımı bu toprağın bağlayıcılık özelliğinden yararlanılmaya başladığını göstermektedir (Erdoğan ve Erdoğan,2007). 1800'lü yılların başında günümüzde inşa edilen betonarme yapıların temeli, Joseph Aspdin tarafından portland çimentosu için patent alınması ile atılmıştır.1900'lü yıllarda ise hazır beton patenti alınarak betonun ilerlemesinde önemli bir gelişme izlenmiştir. Beton kendini her anlamda güncelleyebilen bir yapı malzemesidir. Kullanılmayan atık malzemeler işlenerek betona dahil edilebilir.

Betonu oluşturan malzemelerden çimentonun bağlayıcılık, iri agreganın iskelet, ince agreganın dolgu, karışım suyunun hidrasyon ve işlenebilirlik, mineral katkının puzolanik reaksiyon ve kimyasal katkıların ise istenen beton özelliklerine katkısı bulunmaktadır.

Betonun diğer yapı malzemelerine göre maliyetinin düşük olması, zor döküm şartlarına rağmen kalitesinin artırılabilmesi, eklenen kimyasal katkılarla priz süresinin azaltılmasıyla inşaat süresini kısaltması, yüzey kalitesinin iyileştirilebilmesi gibi artı yönleri vardır. Betonun zor döküm şartlarına çözüm olarak vibrasyon işlemi olmadan kendiliğinden yerleşen beton, püskürtme beton gibi beton çeşitleri kullanılmaya başlanmıştır (Gaimster ve Dixon, 2003). Bu beton çeşitlerine ek olarak kalıp işçiliği

gerektirmeyen, kullanılan malzemeden ve zamandan tasarruf sağlayan 3 boyutlu yazıcı betonunun dünyada ve Türkiye’de uygulamaları görülmeye başlanmıştır.

2.2. Betonun Oluşturan Malzemeler

2.1.1. Çimento

Portland çimento, kalker (CaCO_3) ve kilin karıştırılıp, $1350 - 1450^\circ\text{C}$ sıcaklıkta döner fırınlarda işlem görmesiyle ortaya çıkan klinkere, çimentonun priz süresini düzenlemek amacıyla %3-%6 oranlarında ilave edilen alçı taşıyla öğütülmesi sonucu ortaya çıkan bir hidrolik bağlayıcıdır. Portland çimentosunun ana bileşenlerinden C_3S ($3\text{CaO}.\text{SiO}_2$) hızlı ve erken dayanıma, C_2S ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$) yavaş ve sürekli dayanıma, C_4AF ($4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$) priz sıcaklığına, C_3A ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$) ise kimyasal reaksiyonlara etkisi bulunmaktadır. Çimentoya ihtiyaç halinde eklenen mineral katkıları (cüruf, uçucu kül, kalker tozu vb.) ile farklı türlerde çimentolar elde edilebilir. TS EN 197-1:2012 standardı genel çimento tiplerindeki bileşimlerin özelliklerini, tanımlarını içeren bir standarttır. Ve bu standarda göre iki çimento türünde klinker ve yüksek fırın cürufu yüzdeleri revize edilmiştir ve yeni çimento sınıfları eklenmiştir (Engin ve Tarhan, 2012).

2.2.2. Agregalar

Beton hacminin yaklaşık %70’ini oluşturan agregalar, betonun maliyetini düşürmek amacıyla yapımında kullanılan temel malzemelerden biridir. Çimento hamurunun hacmindeki değişimi engelleyerek buna bağlı oluşacak çatlakların miktarını azaltmaktadır. Agregaların sert ve dayanımının yüksek olması ise doğrudan betonun dış etkenlere karşı daha dayanıklı ve dayanımının yüksek olmasını sağlamaktadır. Agreganın betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi büyüktür (Baradan vd., 2015).

Kullanılan agreganın en büyük tane boyutunun, en küçük tane boyutuna oranı 3’ü aşmamalıdır. Betonun prizini geciktirmesi, sertleşmesini engellemesi, boşluk oluşturmaya neden olacak maddelerin olmaması agregaların temiz olmasıyla ilgili önemli özelliklerdir. Çimentonun kumda oluşacak boşlukları, çakılda oluşacak boşlukları ise kumun doldurması kullanılacak agregaların granülometrisiyle uygun bir şekilde sağlanmalıdır (Şimşek, 2019).

2.2.3. Karışım suyu

TS EN 1008 (2003) Standardı’na göre beton üretiminde, karışım suyu olarak içilebilir şebeke suyu kullanılması uygun görülmüştür. Beton karışım suyunun temel

görevlerinden biri işlenebilirlik, diğeri ise çimento hamurundaki hidrasyon olarak adlandırılan kimyasal reaksiyonu sağlamaktır (Popovics,1992). Taze ve sertleşmiş haldeki betonun tüm özelliklerine etki etmesinden dolayı beton için karışım suyu büyük bir önem taşımaktadır.

2.2.4. Mineral katkı maddeleri

Mineral katkı maddeleri beton içerisinde, çok ince taneli, dolgu malzemesi olarak, puzolanik reaksiyona ve dayanım özelliklerine katkı sağlar. ASTM C 618 (1991) Standardı'na göre puzolan kendi başına bağlayıcılık özelliği olmayan ya da çok az bağlayıcılık özelliği olan, normal sıcaklıkta ve sulu ortamlarda kalsiyum hidroksitle birleştirildiğinde hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip bileşikler oluşturan silisli veya silis ve alüminli malzemeler olarak ifade edilmektedir. Mineral katkı maddeleri boyut olarak çimentoya yakınlığından dolayı çimento malzemesine ikame olarak kullanıldığında ekonomik açıdan avantaj sağlamaktadır.

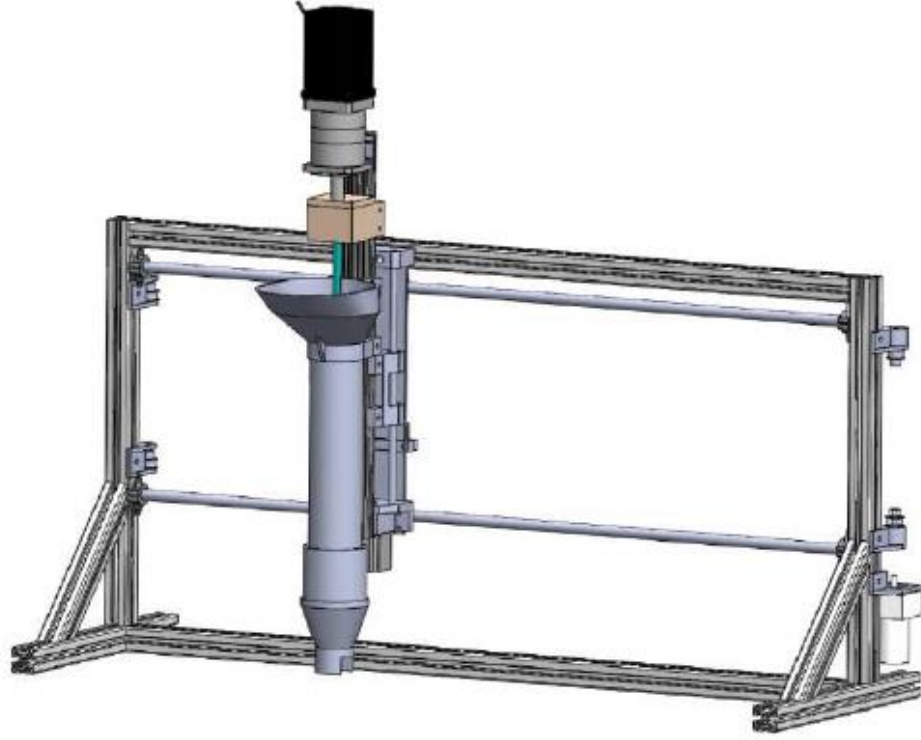
Mineral katkı maddelerinin kullanımında dikkat edilmesi gereken özelliklerden biri soğuk hava şartlarında prize olan etkisidir. Ve katkı kullanımı genel olarak erken dayanımı düşürebilmektedir. Bu açıdan kür koşullarına önem verilmelidir. Ek olarak betonun içerisinde optimum seviyede sürüklenmiş havanın olması gerektiğinden, mineral katkılı betonlarda hava sürükleyici katkı miktarı, daha yüksek seviyede kullanılması önerilmektedir. (Erdoğan ve Erdoğan,2007).

2.2.5. Kimyasal katkı maddeleri

Beton teknolojinin gelişmesiyle birlikte betonun uzun yıllar boyunca ayakta kalabilmesi yani durabilitesine bakıldığında kimyasal katkıların kullanımı ön plana çıkmaktadır. Betonun çevre koşullarına karşı etkilerini azaltan veya olumlu yönde etkileyen kimyasal katkıları, TS EN 934-2+A1 Kimyasal Katkılar- Beton, Harç ve Şerbet için-Bölüm 2: Beton Kimyasal Katkıları- Tarifler, Gereklere, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme Standardı'nda ayrıntılı şekilde açıklanmaktadır. TS EN 934-2 (Nisan,2013) Standardına göre betonun taze veya sertleşmiş haldeki özelliklerini değiştirmek amacıyla, çimentonun ağırlıkça %5'ini geçmemek koşuluyla, karıştırma işlemi uygulanırken eklenen madde olarak tanımlanmıştır ve 12 çeşit katkı sınıfı bulunmaktadır.

2.3. Üç Boyutlu Yazıcı Beton

Üç boyutlu yazıcı beton, teknolojinin en önemli gelişmelerinden biridir. Her alanda uygulamaya koyulmuş olan 3 boyutlu baskı teknolojisinin çeşitli beton malzeme sınıfları, baskı hızı ve geometrideki karmaşıklığa çözüm olarak çok yönlü yazıcılar geliştirilerek, bu teknolojinin inşaat alanında ortaya çıkması sağlanmıştır. Beton baskısında 3 çeşit yazıcı kullanılmaktadır. Bu yazıcıların olumlu ve olumsuz özelliklerine bakıldığında hem ekonomik açıdan hem de inşa edilmesi daha kolay olduğundan dolayı portal tipi yazıcı en çok kullanılan yazıcı tipidir (Cho vd.,2019). Mimari tasarımları 3 boyutlu yapılara dönüştürmek için bilgisayar programları kullanılarak katman katman inşa edilebilen bu teknolojiye çimento, agrega, kimyasal katkılar, mineral katkılar ve özel lifler ile bir karışım oluşturularak yazıcının başlığından pompalanabilmesi ve istenilen koordinatlarda yazılımın gücüyle yazdırılabilmesi en temel ilkelerindedir. Bu yeni teknolojiyle basınçlı döküm işlemi yerine kalıpsız, bilgisayar tarafından kontrolü sağlanabilen, zamandan tasarruf sağlayan, beton yapılar inşa edilebilir hale gelmektedir. 3 boyutlu beton baskı işleminde malzeme içerikleri, bu malzemelerin gösterecekleri performanslar ve baskı işleminin kontrolü konusunda yapılan çalışmaların eksikliği hala devam etmektedir (Liu vd., 2019). Contour Crafting, 3 boyutlu baskı betonunun öncü firmalarından biri olup çimentolu karışımı katman katman ekstrüde etmiş, ekstrüde edilme işlemi uygulanırken yüzeyde oluşan pürüzler mala ile düzeltilmiştir. Sistemde yerinde döküm yapıldığından 3D yazıcı başlığı hareketli bir vinç üzerine sabitlenerek işlem uygulanmıştır. Yapılan işlemlerde kullanılan sistemdeki olumsuz özelliklerden biri betonun, dikey ekstrüde ediliyor olmasıydı. Basılan nesnenin şeklinin karmaşıklığı ve boyutunun önemi bu aşamada önem kazanmaktadır (Khoshnevis,2004). Ekstrüde edilme sırasında betonun katman katman basılması relojik özelliklere paralel gitmekte olup Le ve diğerlerinin yaptıkları çalışmada baskı işleminde 9 mm ağız genişliği olan bir yazıcı kullanılarak yüksek dayanımlı elyaf içerikli, ince agrega ile hazırlanan bir beton karışımının sertleşmiş özellikleri incelenmiştir. Yapılan çalışmada katmanlar arasındaki bağ mukavemeti, basınç mukavemeti, eğilme mukavemeti, yoğunluk gibi özellikler hazırlanan karışım reçetesine bakılarak karşılaştırma yapılmıştır ve kullanılan katkıların ekstrüzyon işleminde malzemelerin yüksek performansını etkilediği gözlemlenmiştir (Le vd., 2012).



Şekil 2. 1. Beton baskı kurulum şeması (Kazemian vd., 2017)

2.4. Üç Boyutlu Yazıcı Betonunun Avantajları ve Dezavantajları

3 boyutlu beton baskı teknolojisinde avantaj ve dezavantajlara bakıldığında ilk olarak teknik açıdan karşılaşılan zorluklar ön plana çıkmaktadır. İnşaat alanında yaygın olarak kullanılan malzeme seçenekleri kısıtlı olmakla birlikte kaliteli malzemelerin maliyeti açısından tercih sebebi olmaması önemli bir sorundur. Çökme olmadan, üst üste katmanlar inşa edebilmek, büzülme çatlakları olmadan 3 boyutlu baskı işlemi gerçekleştirebilmek için uygun karışım oranları elde edilerek beton reçetesi hazırlanmalıdır. Uygulanan kür koşulları da malzemelerin verimliliği açısından önemlidir. Kalıpsız bir üretim olduğundan betonun sertleşmesi, uygun oranlarda kimyasal katkıları eklenerek ayarlanmalıdır (Schutter vd.,2018). Test prosedürlerine bakıldığında yapılan karışım tasarımının optimum olması için beş önemli kriter belirlenmiştir. Bu kriterler ekstrüde edilebilirlik, akışkanlık, inşa edilebilirlik, basınç dayanımı ve açık zaman (çalışılabilirlik süresi) olarak belirlenmiştir. Ekstrüde edilebilmesi betonun yazıcı ağızından kolay bir şekilde sıkılarak çıkması olarak değerlendirildiğinde karışımın akışkanlığıyla doğrudan ilişkili olduğu beton karışım tasarımında kuru bileşenlerin, kullanılan diğer malzemelerin özellikle mineral ve kimyasal katkıların dağılımı ve

miktarları gibi birçok etken bulunmaktadır. Bu özellikler dışında ekstrüde edilebilir parametresi için uygulamada herhangi bir deney tanımı bulunmamaktadır. Akışkanlık parametresi için ise betonun akma kolaylığına yayılma testi ile bakılarak optimum değer elde edilebilir. İnşa edilebilirlik yani katmanların kalıp olmadan birbirini taşımasını test etmek için ise prototip bir sıkma aletiyle döküm yapılarak sistemdeki deformasyona (çökmeye) bakılarak, katman sayısına göre inşa edilebilirliği kıyas yapılabilir. Çalışılabilirlik süresi için geleneksel döküm yönteminde değerlendirdiğimiz koşullara bakılmadığından betonun yazıcı ağızından sıkılan ilk katman ve daha sonra üzerine gelecek katmanlar arasındaki zamandan dolayı priz süresi büyük önem taşımaktadır. Betonun hedeflenen basınç dayanımı döküm işlemi geleneksel betondan olduğu gibi tek seferde değil katmanlar halinde olduğundan yüksek olması gerekir. Standartlara göre belirlenen ölçülerde dökülen numunelere eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri yapılabilir (Malaeb vd., 2015).

2.5. Üç Boyutlu Yazıcı Betonunu Oluşturan Malzemeler

3 boyutlu yazıcı harcını oluşturan malzemelerden agregalar, harcın ekstrüde edilebilmesi açısından tıkanma olmaması için yazıcı başlığının genişliği ile orantılı olmalıdır, yüzeydeki düzgün görünüm için iri agrega kullanımı yerine ince agrega tercih edilmelidir. Su/çimento oranına bakıldığında dökülen katmanın üzerine gelecek olan katmanı taşıyabilmesi için erken dayanım kazanması ve aynı zamanda yazıcı başlığından akıcı bir şekilde geçmesi için kıvamının iyi ayarlanması gerekmektedir. Yapılan çalışmalar sonucu bu oranın 0,25-0,44 aralığında olması harcın ekstrüde edilebilir olmasını sağlamaktadır. Kimyasal ve mineral katkılara bakıldığında ise harca eklenen katkıların yoğunluğunun düşük seviyelerde olmasının harcın yoğunluğunu ve ağırlığını etkileyeceğinden katman üstüne katman döküm yöntemi uygulanan 3 boyutlu yazıcı betonunun altta kalan katmanların çökmesine veya çatlamasına olumlu yönde bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir (Uygunoğlu ve Özgüven, 2019).

2.6. Üç Boyutlu Yazıcı Betonunun Kullanım Alanları

3 boyutlu yazıcının kullanım alanları teknolojinin gelişmesiyle paralel olarak artmaktadır. Mühendislik ve mimarlık sektöründe, otomotiv sektöründe, tıpta ve medikalde, havacılık sektöründe, eğitim sektöründe ve kuyumculuk sektöründe parçaları bulunmayan veya ulaşılması zor olan ürünlerin pratik olarak üretiminde avantaj sağlamaktadır. Mühendislik alanında tasarımları karmaşık olan yapıların ve küçük

ölçekte çeşitli ürünlerin üretimi sağlanmıştır. İnşaat alanında bina inşa edilmesini mümkün kılmak için büyük ölçekli yazıcılar üretilmiştir. Dünyada örneklerine bakıldığında Belçika, Amerika, Çin, Meksika, Dubai gibi ülkelerde tamamen 3 boyutlu yazıcıyla, tek veya iki katlı binalar inşa edilmiştir. Dünyanın en uzun köprülerinden biri de 3 boyutlu yazıcı betonuyla üretilerek Çin’de kullanıma açılmıştır. Türkiye’de İSTON firması 3 oda 1 salon ev ve küçük ölçekli şehir mobilyaları üretimi yapmaktadır.



Şekil 2. 2. İston firmasının ürettiği şehir mobilyaları (Özalp vd.,2018)

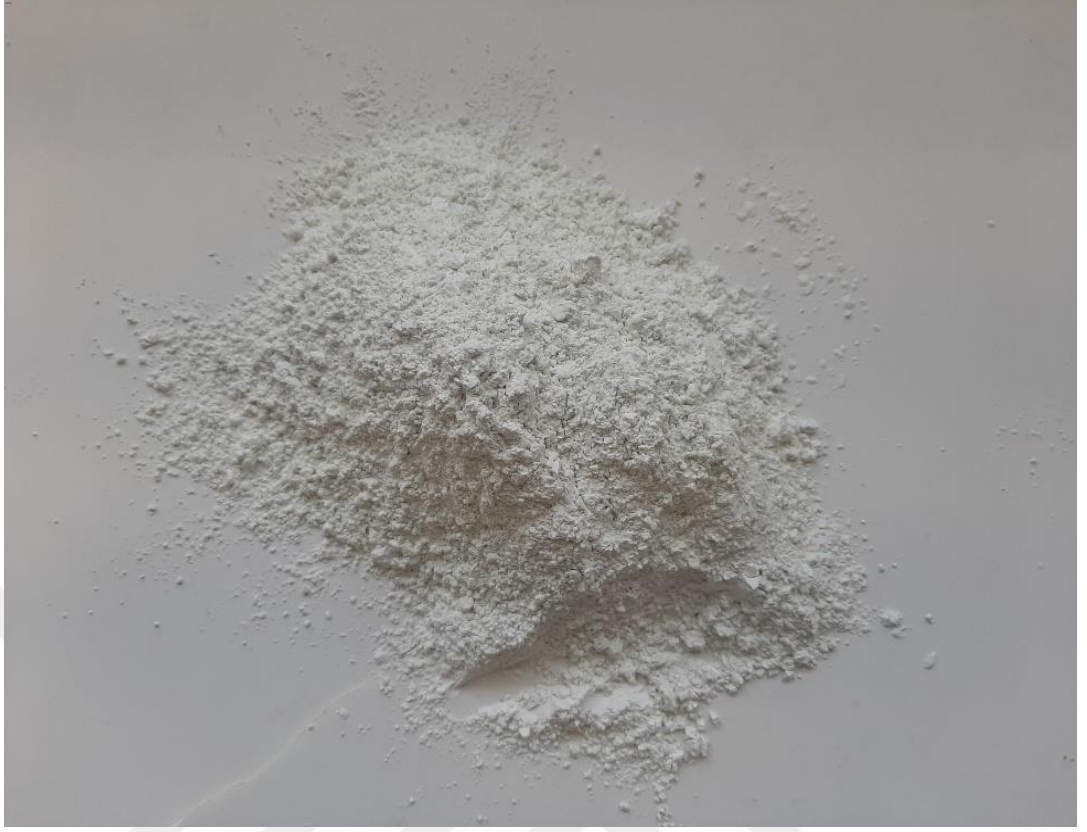
3. MALZEME ÖZELLİKLERİ VE DENEYSSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Kullanılan Malzeme Özellikleri

3 boyutlu yazıcı betonu üretimlerinde, çimento, silis (kuvars) kumu, yüksek saflık ve beyazlıkta doğal mikronize öğütülmüş kalsiyum karbonat (MRT100), polipropilen lif ve kimyasal katkı olarak süper akışkanlaştırıcı katkı, viskozite düzenleyici katkı ve priz geciktirici katkı kullanılmıştır.

3.1.1. Çimento

3 boyutlu yazıcı beton karışımlarında kullanılan çimento Adana Çimento firmasından CEM I 52,5 R (TS EN 197-1:2012)- BPC 52,5 R / 85 (TS 21:2015) temin edilmiş ve laboratuvar ortamında depolanmıştır. Kullanılan BPC 52,5 R tipi çimentoya ait bazı kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 3.1’de verilmiştir. Bu değerler üretici firmadan temin edilmiştir.



Şekil 3. 1. CEM I 52,5 R Çimento

Tablo 3. 1. Çimento kimyasal, fiziksel ve dayanım özellikleri

Kimyasal Özellikler	Elde Edilen Değerler	TS EN 197-1 Sınır Değerleri	Deney Metotları
Kükürt Trioksit (%)	3,34	Max. 4,0	TS EN 196-2
Klorür (%)	0,0098	Max. 0,1000	TS EN 196-2
Kızdırma Kaybı (%)	3,90	Max. 5,0	TS EN 196-2
Çözünmeyen Kalıntı (%)	0,10	Max. 5,0	TS EN 196-2
Sodyum Oksit (%)	0,70	-	TS EN 196-2

Potasyum Oksit (%)	0,33	-	TS EN 196-2
Toplam Alkali (%)	0,92	-	TS EN 196-2
Beyazlık (%)	85,36	Min. 85	TS 21
Fiziksel Özellikler			
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	3,08	-	TS EN 196-6
Özgül Yüzey (cm ² /g)	4490	-	TS EN 196-6
Priz Başlangıcı (dakika)	98	Min.45	TS EN 196-3
Hacim Genleşmesi (mm)	2	Max.10	TS EN 196-3
2 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	36,5	Min. 30,0	TS EN 196-1
28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)		Min. 52,5	TS EN 196-1

3.1.2. Agrega

Beton karışım tasarımında yapılan literatür araştırmalarına bakılarak 0-1,5 mm aralığında dayanımı yüksek silis kumu kullanılmıştır. Silis kumu malzeme içeriği olarak temiz ve agregaya dayanımının yüksek olması nedeniyle tercih edilmiştir. Kullanılan silis kumuna ait fiziki özellikler Tablo 3.2’de verilmiştir. Bu değerler üretici firmadan temin edilmiştir.



Şekil 3. 2. *0,5mm silis kumu*



Şekil 3. 3. *1,5mm silis kumu*

Tablo 3. 2. Silis kumu fiziksel özellikleri

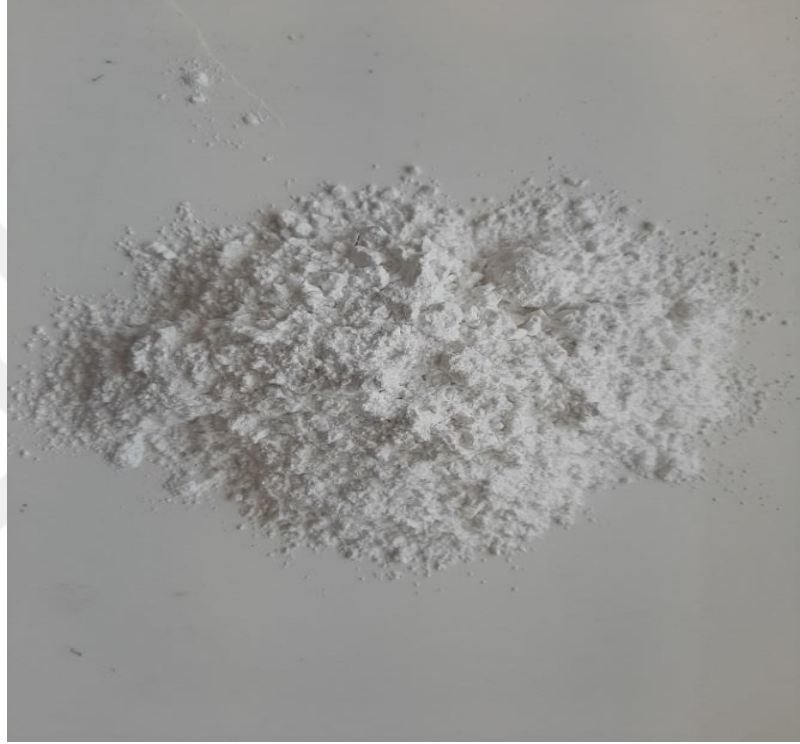
Fiziksel Özellikler	Deney	Şartname
Gevşek Yığın Yoğunluğu (Mg/m ³)	1,57	≥1350 kg/m ³
Sıkı Yığın Yoğunluğu (Mg/m ³)	1,64	≥1350 kg/m ³
Su İçeriği (%)	*	≤ %0,5
Kum Eşdeğeri (%)	*	*
Metilen Mavisi (ml/g)	*	1,5 ml/gr
Boşluk Yüzdesi (%)	39,14	*
Doğun ve Yüzeyi Kurutulmuş Esasta Tane Yoğunluğu (Mg/m ³)	2,62	*
Görünür Tane Yoğunluğu (Mg/m ³)	2,66	≥2500 kg/m ³
Etüvde Kurutulmuş Esasta Tane Yoğunluğu (Mg/m ³)	2,59	*
Su Emme Oranı (%)	1,00	≤ %1
İncelik Modülü	3,05	*
Çok İnce Malzeme Muhtevası (%)	0,4	≤ %3
Organik Madde	*	*
Agrega Yüzeyindeki Serbest Klorür Yüzdesi (%)		

3.1.3. Karışım suyu

Karışım suyu beton içinde en temel bileşenlerden biridir. Su ve çimento birleşerek çimento pastasını oluşturmaktadır ve oluşan çimento pastası agregaların birbirine yapışmasını sağlamaktadır. TS EN 1008 no.lu Türk standartında uygunluğu belirtilen içilebilir nitelikteki su karışımında kullanılmıştır. Kullanılan suyun içerisinde betonun prizine, dayanımına ve dayanıklılığına, görünümüne olumsuz yönde etki edebilecek yabancı maddeler içermemesine dikkat edilmiştir.

3.1.4. Mikronize kalsit

3 boyutlu yazıcı beton karışımlarında çimentoya ikame olarak kullanılan mikronize kalsit MERTAŞ Mikronize A.Ş. tarafından temin edilmiştir. Dökülen serilerde referans karışım hariç çimentoya ağırlıkça %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında ikame olarak kullanılan MRT100 mineral katkısına ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 3.3'te verilmiştir. Bu değerler üretici firma tarafından temin edilmiştir.



Şekil 3. 4. Doğal mikronize öğütülmüş kalsiyum karbonat (MRT100)

Tablo 3. 3. Mikronize kalsit fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler	
CaCO ₃	> %99
MgCO ₃	<%0,20
Fe ₂ O ₃	<%0,02
SiO ₂	<%0,01
Al ₂ O ₃	<%0,02
HCl de çözünmeyen	<%0,02
Fiziksel Özellikler	

Yoğunluk (ISO787-10)	2,7 gr/cm ³
Sertlik	3 mohs
Kırılma İndeksi	1,5

3.1.4.1. Kalsitin kullanım alanları

Kimyasal formülü CaCO₃ olan kalsit, karbonatlı kayaları oluşturan, yüksek saflıkta ve renksiz saydam yapıda olan bir mineraldir. Bu mineral öğütülüp toz haline geldiğinde beyaz bir toz haline gelmektedir. Öğütülmüş kalsit endüstriyel bir mineral olarak geniş bir kullanım alanına sahiptir. Türkiye’de Çanakkale, Balıkesir ve Niğde bölgesinde kalsit ocakları bulunmaktadır. Ege bölgesi ve Niğde’de bulunan kalsit oluşumları daha yüksek beyazlıktadır. Kalsitin beyazlık derecesi kalitesiyle paralel gösterilmektedir. Fakat üretim sırasında belli boyutlarda kırılan kalsit cevherinin daha sonra elle triyaj işleminin şartlarını gerçekleştirememesi nedeniyle işletmelerde kalsit ürünlerinde beyazlık dereceleri değişim göstermektedir. Gelişen teknolojiyle optik ayırıcıların bu sektöre girmesi kalsitin kalitesi ve rezervlerin daha iyi değerlendirilmesi açısından önemlidir (Uçurum, 2015). Mikron boyutlu üretilen kalsit tamir işlemlerinde, sıva alanında dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Beton karışımında çimentoya veya agregaya ikame olarak inşaat alanında da kullanılabilir. Kalsitin işlenebilirlik, viskozite ve rötre üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır (Akkaya ve Kesler, 2012). Kalsit sadece inşaat sektöründe değil kâğıt, plastik, boya, gıda ve yem, seramik gibi birçok sektörde kullanılmaktadır.

3.1.5. Karışımda kullanılan kimyasal katkı maddeleri

3 boyutlu yazıcı betonu üretimlerinde betonun reolojik özellikleri ve döküm yönteminin geleneksel betona göre kalıp kullanılmadan uygulanması göz önünde bulundurularak 3 çeşit kimyasal katkı kullanılmıştır. Yüksek oranda su azaltıcı/süperakışkanlaştırıcı, viskozite düzenleyici ve priz geciktirici kimyasal katkılardır. Beton kürü için ise beton yüzeyi kimyasal kür katkısı kullanılmıştır.

3.1.5.1. Yüksek oranda su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı

3 boyutlu yazıcı beton karışımlarında kullanılan Yüksek Oranda Su Azaltıcı / Süper Akışkanlaştırıcı Beton Katkısı TS EN 934-2 Ç.3.1 / 3.2 CHRYSO firması tarafından temin edilmiştir. Bu katkı yeni nesil polikarboksilat destekli bir süper akışkanlaştırıcıdır. Düşük Su/Bağlayıcı oranlarında beton üretiminin gerçekleşmesini sağlamaktadır. Bu

sayede betonun geçirimsizliğini ve dayanıklılığını arttırmaktadır. Kullanılan yüksek oranda su azaltıcı süperakışkanlaştırıcıya ait teknik özellikler Tablo 3.4'te verilmiştir. Bu değerler üretici firmadan temin edilmiştir.

Tablo 3. 4. *Yüksek oranda su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı teknik özellikleri*

Teknik Özellikler	
Görünüm	Sıvı
Renk	Açık Sarı
Yoğunluk	1,055 ± 0,02 gr/cm ³
pH	6,00±1
Klorür İçeriği	<%0,1

3.1.5.2. Viskozite düzenleyici katkı

3 boyutlu yazıcı beton karışımlarında kullanılan viskozite düzenleyici katkı CHRYSO firması tarafından temin edilmiştir. Beton çökme durumu / çökme akışı üzerinde sınırlı bir etki ile çimento hamurunun viskozitesini arttırmaktadır. Karışımında kullanılan beton suya veya ince içerik tutarsızlığına karşı daha az hassas olma özelliği kazanmaktadır. Reolojik özellikler büyük ölçüde daha tutarlı hale gelmektedir. Sızma, ayrışma ve beton yüzeyinde tanelenmeyi engellemektedir. Dozajı 100 kg çimento başına 0.2 ile 0,6 kg arasında öngörülmektedir. Yaygın olarak çimento ağırlığının %0,4 oranında ürün dozajı ile kullanılmaktadır. Kullanılan viskozite düzenleyici katkıya ait teknik özellikler Tablo 3.5'te verilmiştir. Bu değerler üretici firmadan temin edilmiştir.

Tablo 3. 5. *Viskozite düzenleyici katkı teknik özellikleri*

Teknik Özellikler	
Görünüm	Sıvı
Renk	Sarı
Özgül Ağırlık (20°C)	1,000 ± 0,010
pH	10,00±1

Na ₂ O değeri	<1,00%
Cl- ions içeriği	<0,10%

3.1.5.3. Priz geciktirici katkı

3 boyutlu yazıcı beton karışımlarında kullanılan Priz Geciktirici / Su Azaltıcı / Akışkanlaştırıcı Beton Katkısı TS EN 934-2 Ç.10 CHRYSO firması tarafından temin edilmiştir. Bu katkı priz geciktirici ve su azaltıcı bir akışkanlaştırıcıdır. Priz geciktirici etkisiyle çimentonun hidrasyon reaksiyonlarını yavaşlatıp; hidrasyon ısısını zamana yayarak betonun maksimum sıcaklığını düşürüp; kıvam kaybını yavaşlatarak minimuma indirip, nihai dayanımını arttırmaktadır. Kullanılan katkıya ait teknik özellikler Tablo 3.6'da verilmiştir. Bu değerler üretici firmadan temin edilmiştir.

Tablo 3. 6. Priz geciktirici / akışkanlaştırıcı beton katkısı teknik özellikleri

Teknik Özellikler	
Görünüm	Sıvı
Renk	Kahverengi
Yoğunluk	1,165 ± 0,03 gr/cm ³
pH	7,00±1
Klorür İçeriği	<%0,1

3.1.6. Karışımda kullanılan polipropilen lif katkısı

3 boyutlu yazıcı beton karışımlarında kullanılan polipropilen lif katkısı POLYFIBERS firmasından temin edilmiştir. Polipropilen elyaflar beton içinde 3 boyutlu dağılarak çatlakların oluşumunu engellemektedir. Rötire çatlaklarını önleyerek betonun dayanımına katkı sağlamaktadır. Kullanılan polipropilen life ait teknik özellikler Tablo 3.7'de verilmiştir. Bu değerler üretici firmadan temin edilmiştir.



Şekil 3. 5. 6 mm uzunluğunda polipropilen lif

Tablo 3. 7. Polipropilen lif teknik özellikleri

Teknik Özellikler	
Standart	EN 14889 Part II Type 1.A. and ASTM C1116 Type III, ASTM D7508.
Lif uzunluğu	6 mm \pm 1 mm
Kalınlık	30-32 mikron
Elastisite modülü	4457-5110 MPa
Yoğunluk	0,91 gr/cm ³
Yüzey Alanı	140 m ² /kg
Renk	Şeffaf
Uzama	%20-25

3.2. Karışım Tasarımı

3 boyutlu yazıcı betonu karışım tasarımında geleneksel beton karışımından farklı olarak kalıpsız bir döküm yöntemi olduğundan dolayı üst üste gelen katmanların birbirini taşıyabilmesi (inşa edilebilirliği), ekstrüde edilebilmesi, çalışılabilirlik süresi gibi özellikler dikkate alınarak bir tasarım yapılmıştır. Katmanların üst üste geldiğinde kaymasını önleyecek, çalışılabilirlik süresini etkileyecek olan viskozite düzenleyici katkı, yazıcıdan pompalanabilme süresine etki eden priz geciktirici katkı, düşük su/çimento

oranlarında beton üretimi için yüksek oranda su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı katkı gibi kimyasallar kullanılmıştır.

Bu çalışmada, karışımlarda mikronize kalsit %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında çimento ile yer değiştirilerek seriler hazırlanmıştır. Karışımlarda su/bağlayıcı malzeme oranı, 0,5-1,5 mm kum oranı, viskozite düzenleyici katkı, süperakışkanlaştırıcı katkı, priz geciktirici kimyasal katkı maddeleri ve 6 mm polipropilen lif oranı sabit tutulmuştur. 3 boyutlu yazıcı betonunun karışım oranları; çimento: su: silis kumu (0-1,5 mm): kimyasal katkılar = 1: 0,28: 1,5: 0,06 şeklindedir. Çimento dozajı 800 kg/m^3 , 6 mm uzunluğundaki polipropilen lif 600 gr/m^3 olarak karışımlara ilave edilmiştir. Karışım tasarımı Tablo 3.8’de gösterilmektedir.

Tablo 3. 8. Karışım tasarımı

KARIŞIM TASARIMI											
KALSİT ORANLARI	HACİM (cm^3)	SU/BAĞLAYICI	ÇİMENTO (gr)	SU (ml)	KALSİT (gr)	SU AZALTI CI SÜPER AKIŞK ANLAŞTIRICI (ml)	PRİZ GEÇİKTİRİCİ KATKI (ml)	VİSKOZİTE DÜZENLEYİCİ KATKI (ml)	İNCE KUM (gr)	KABA KUM (gr)	0,6 mm PP LİF (gr)
0%	830,00	0,28	664,00	185,92	0,00	9,96	19,92	9,96	332,00	664,00	0,50
10%	830,00	0,28	597,60	185,92	66,40	9,96	19,92	9,96	332,00	664,00	0,50
20%	830,00	0,28	531,20	185,92	132,80	9,96	19,92	9,96	332,00	664,00	0,50
30%	830,00	0,28	464,80	185,92	199,20	9,96	19,92	9,96	332,00	664,00	0,50
40%	830,00	0,28	398,40	185,92	265,60	9,96	19,92	9,96	332,00	664,00	0,50
50%	830,00	0,28	332,00	185,92	332,00	9,96	19,92	9,96	332,00	664,00	0,50

3.3. Harç Üretimi

Karışım malzemeleri reçeteye uygun olarak hazırlanmıştır. İşlem adımları aşağıda sırası ile belirtilmiştir.

- İlk yapılan işlem gerekli olan su miktarı üç eşit miktara bölünüp ayrı kaba konularak her bir kaba viskozite düzenleyici katkı, süperakışkanlaştırıcı katkı ve priz geciktirici kimyasal katkı maddeleri eklenmiştir. Daha sonra hazırlanan karışımlar tek bir kaptaki birleştirilmiştir ve mikser kabına konulmuştur. Üzerine çimentolu karışım eklenmiştir.
- Mikserde düşük hızda 30 sn boyunca karıştırıldıktan sonra devam eden 30 sn'lik sürede hazırlanan agrega karışımı ilave edilmiştir.
- Mikser 60 sn sonunda yüksek hızda 30 sn boyunca çalıştırılmıştır.
- Yapılan işlemler sonunda karışım 90 sn boyunca dinlendirilmiştir.
- Dinlendirme işlemi sırasında harcın alt kısmında karışmayan parçalar olduğundan karışıma eklenen lif ile birlikte homojen bir şekilde dağıtılmıştır.
- Son olarak karışım yüksek hızda 60 sn karıştırılarak kalıp yağı ile yağlanan kalıplara eklenmiştir.

Numuneler 4x4x16 cm boyutlarında normal çimento harcı kalıplarında üretilmiştir.

3.4. Kür Koşulları

Çalışma kapsamında iki farklı kür yöntemi uygulanmıştır.

3.4.1. Su kürü

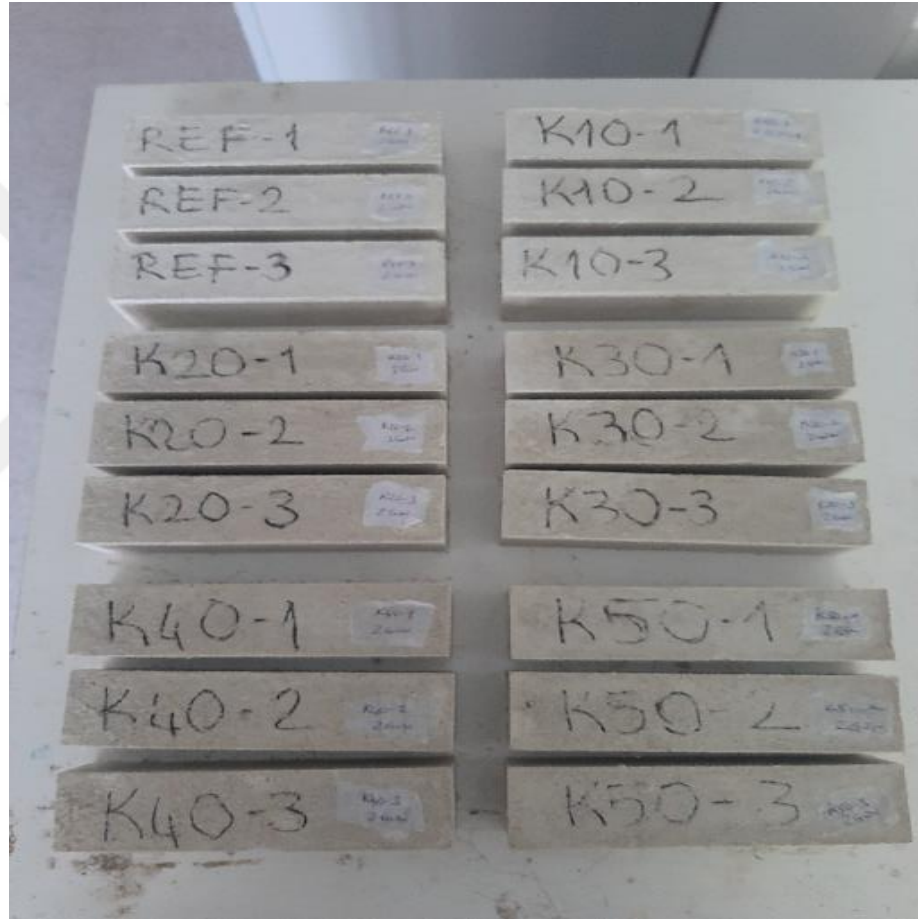
3 boyutlu yazıcı betonu harçları deney sonuçlarını kıyaslayabilmek için kontrol harçları hazırlanmıştır. Kontrol harçları 2 gün, 7 gün ve 28 gün suda (21 ± 1 °C) kür edilmiştir.

3.4.2. Kimyasal kür uygulaması

3 boyutlu yazıcı betonu harçları deney sonuçlarını kıyaslayabilmek için kontrol harçları hazırlanmıştır. Kontrol harçları 2 gün, 7 gün ve 28 gün CHRYSO firması tarafından temin edilen Cure PF-2 ile kür edilmiştir. Bu katkı taze beton yüzeyinde ince bir koruyucu katman oluşumu ile su kaybını önleyerek, oluşabilecek rötre çatlaklarına karşı koruma sağlamaktadır. Kullanılan katkıya ait teknik özellikler Tablo 3.8'de verilmiştir. Bu değerler üretici firmadan temin edilmiştir.

Tablo 3.9. Yüzeysel beton kürü teknik özellikleri

Teknik Özellikler	
Görünüm	Sıvı
Renk	Beyaz
Yoğunluk	0,970 ± 0,02 gr/cm ³
pH	9,00±1
Klorür İçeriği	<%0,1



Şekil 3. 6. Kimyasal kür uygulanan numuneler

3.5. Uygulanan Deneyler

3.5.1. Taze beton deneyleri

Beton tasarım ilkelerine bakıldığında taze beton için en önemli özelliklerden biri işlenebilirlik olarak belirtilmektedir. İşlenebilirliği etkileyen kriterler ise agrega dağılımı, tane şekli, kaba ve ince agrega oranı, çimento miktarı ve cinsi, hapsolmuş havanın varlığı, kimyasal katkıları ve kıvam olarak düşünülmektedir. Kıvam belirlemek için kullanılan

deneysel yöntemlere slump deneyi, vebe deneyi, yayılma tablası deneyi, sıkıştırma faktörü deneyi, kelly topu deneyi, sıkıştırılabilme derecesi deneyleri örnek olarak gösterilebilir.

3.5.1.1. Yayılma tablası deneyi

3 boyutlu yazıcı betonunun kıvamını belirlemek amacıyla 6 farklı seri için 2 günlük, 7 günlük ve 28 günlük yapılan dökümler için harçlara TS EN 1015-3 standardına uygun olarak kıvam deneyi uygulanmıştır. Şekil 3.7’de görülen üst iç çapı 70 mm, taban iç çapı 100 mm ve yüksekliği 50 mm olan yayılma tablasına yerleştirilen harç karışımına, 250 g ağırlığındaki 40 mm çaplı tokmakla 2 tabaka halinde 10’ar defa vurularak sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Sonrasında kalıp çıkarılarak, 1.25 cm yükseklikten her saniyede 1 defa olacak şekilde 15 düşüş yapılmıştır. Yayılan harcın çapı 3 farklı yerden kumpasla ölçülerek bu değerlerin ortalaması alınmıştır (TS EN 1015- 3, 2000).



Şekil 3. 7.Çimento yayılma tablası



Şekil 3. 8. Çimento yayılma tablası tokmak ve kalıp

3.5.2. Sertleşmiş beton deneyleri

3.5.2.1. Basınç dayanımı deneyi

3 boyutlu yazıcı betonu prizma numuneleri 40x40x160 mm boyutlarında üretilerek üzerinde ilk olarak eğilme deneyi uygulanmış, bu deney sonucu iki parçaya ayrılan prizma numuneler üzerinde TS EN 196-1 standartına uygun olarak basınç deneyi uygulanmıştır. İlk olarak basınç testi için kullanılacak olan başlık prese yerleştirildi ve başlığın üst kısmı ile pres arasında kalan boşluk, alt kısımdaki pistonun ilerleyebileceği mesafeden az olacak şekilde ayarlandı. Başlık pres ortalanacak şekilde yerleştirildi. Numune basınç başlığına, döküm yüzeyleri yanda kalacak ve kırık yüzey bize bakacak şekilde yerleştirildi. Pres üzerindeki kol ‘compression’ konumuna getirildi. Güç ünitesi açılıp ‘Channel 1’ kanalı seçildi. Bilgisayarda pres yazılımı açıldı ve ilk ekranda “TS EN 196-1 Basınç” seçeneği işaretlendi. Açılan pencerede dosya butonuna tıklandıktan sonra yeni bir dosya açılıp numunelerin isimleri, kaç günlük numune olduğu, numune numarası şeklinde sıra ile kodlandı. Daha sonra açılan pencerede teste tabi tutulacak numunenin boyutları yazılıma girildi ve yük değeri standartta belirtilen 2.4 kN/sn değerinde ayarlandı. Deney butonuna tıklayarak deney başlatıldı ve sistem durduğunda ekrandaki değerler kaydedildi. Basınç dayanımı standartta yer alan, numunenin kırılma yükü kesit alanına bölünerek (3.1) denklemine göre bulunmaktadır.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

σ : Basınç dayanımı, (N/mm²),

P: Numunenin kırıldığı andaki uygulanan kuvvet (N),

A: Kesit alanı (40mmx40mm)



Şekil 3. 9. Basınç dayanımı deney cihazı

3.5.2.2. Eğilme dayanımı deneyi

3 boyutlu yazıcı betonu prizma numuneleri 40x40x160 mm boyutlarında üretilerek bu numunelere eğilme deneyi uygulanmıştır. Deneysel çalışma TS EN 196-1 standardı esas alınarak yapılmıştır (Şekil 3.10). İlk olarak eğilme testi için kullanılacak olan başlık prese yerleştirildi ve başlığın üst kısmı ile pres arasında kalan boşluk, alt kısımdaki pistonun ilerleyebileceği mesafeden az olacak şekilde ayarlandı. Başlık pres ortalanacak şekilde yerleştirildi. Numune eğilme başlığına simetrik bir şekilde yerleştirildi. Mesnetler arası mesafe 100 mm olmalıdır. Kenarlarda eşit boşluklar bırakıldı. Pres üzerindeki kol 'flexure' konumuna getirildi. Güç ünitesi açılıp 'Channel 2' kanalı seçildi. Bilgisayarda pres yazılımı açıldı ve ilk ekranda "TS EN 196-1 Basınç" seçeneği işaretlendi. Açılan pencerede dosya butonuna tıklandıktan sonra yeni bir dosya açılıp numunelerin isimleri,

kaç günlük numune olduğu, numune numarası şeklinde sıra ile kodlandı. Daha sonra açılan pencerede teste tabi tutulacak numunenin boyutları yazılıma girildi ve yük değeri standartta belirtilen 0.05 kN/sn değeriinde ayarlandı. Deney butonuna tıklayarak deney başlatıldı ve sistem durduğunda ekrandaki değeri kaydedildi. İki parçaya ayrılan prizma basınç testine tabi tutulmak üzere muhafaza edildi. Eğilme dayanımı, (3.2) denklemine göre bulunmaktadır.

$$\sigma_e = \frac{1,5PL}{b^3} \quad (3.2)$$

σ_e : Eğilme dayanımı, (N/mm²)

b: Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu(mm),

P: Numunenin kırıldığı andaki uygulanan kuvvet (N),

L: Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık (mm)'dir.



Şekil 3. 10. Eğilme dayanımı deney cihazı

3.5.2.3. Ultrases geçiş hızı deneyi

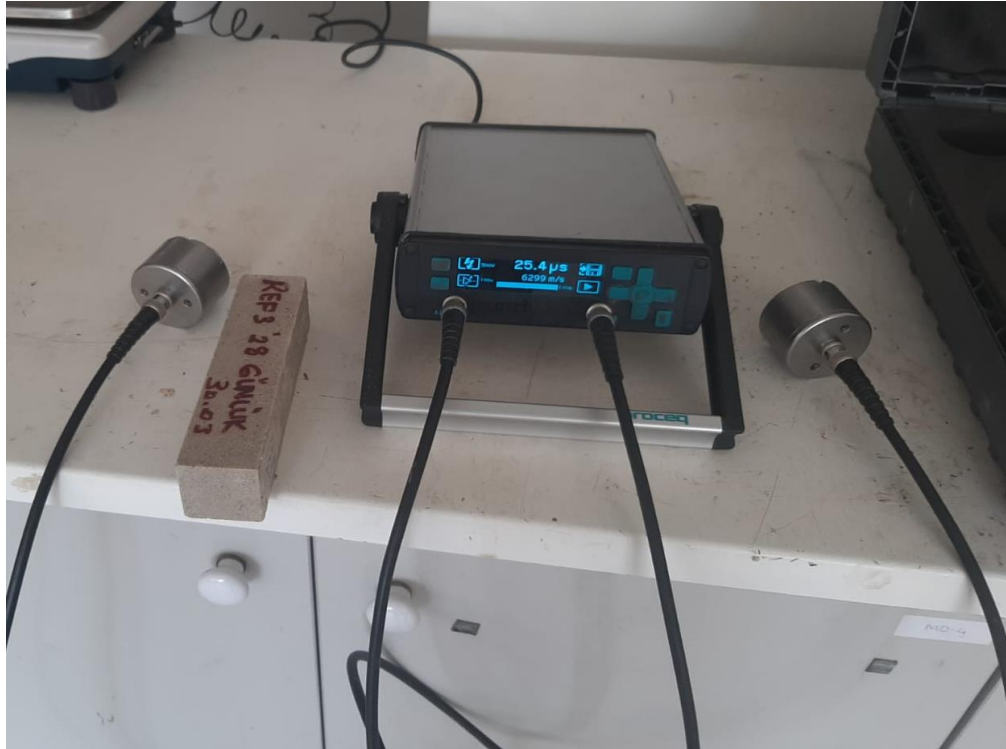
Deneyler kapsamında üretilen 40x40x160 mm boyutlarındaki prizma numunelere TS EN 12504-4'e uygun olarak ultrases geçiş hızı deneyi uygulanmıştır (Şekil 3.11) Elde edilen geçiş hızı sayesinde betonun basınç dayanımı ve homojenliği, betondaki kusur ve çatlaklar hakkında yorum yapılmaktadır. Deneyde kullanılan cihazın okuma yapacağı yüzeyler pürüzsüz olmalıdır. Okuma yapacak başlıkların yüzeylerine vazelin sürülmüştür ve numuneler bir bez yardımıyla temizlenmiştir. Her numune için alınan üç okuma sonucu ortalama değere bakılarak, ulaşılan zaman değerleri ve numune kalınlıklarından, dalganın geçiş hızı sonuçlarına ulaşılr. Ultrases geçiş hızı km/sn cinsinden bulunmuştur. Denklem (3.3) yardımı ile hesaplanmıştır. Şekil 3.11'de ultrases cihazı ölçümü örnek olarak gösterilmiştir.

$$V = \frac{L}{t} \quad (3.3)$$

V= Ses üstü dalga hızı (km/sn)

L = Problar arası mesafe (km)

t= Zaman (sn)



Şekil 3. 11. Ultrases geçiş hızı ölçüm cihazı

3.5.2.4. Özgül ağırlık deneyi

TS EN 12350-6'ya göre 24 saat su içinde bekletilen 3 boyutlu yazıcı beton numunelerinin DKY durumundaki hava ve sudaki kütleleri Şekil 3.12'de verilen özgül ağırlık deney çerçevesi kullanılarak belirlenmiştir. İlk olarak hassas terazide DKY (havadaki) kütleleri ve daha sonra su içerisindeki tel kafese konularak sudaki kütleleri ölçülmüştür. Numunelerin özgül ağırlık değerleri Denklem (3.4) kullanılarak belirlenmiştir.

$$\delta_d = M_1 / (M_1 - M_2) \quad (3.4)$$

M_1 : Numunelerin doygun kuru yüzey ağırlığı (gr)

M_2 : Numunelerin sudaki ağırlığı (gr)



Şekil 3. 12.Arşimet suda tartım

3.5.2.5. Su emme deneyi

TS EN 772-11:2011'e göre su emme oranı tayini için 3 boyutlu yazıcı beton numuneler 24 saat su içerisinde bekletilerek suya doygun hale gelmeleri sağlanmıştır. Sudan çıkarılan numunelerin dış yüzeyleri bir bez ile kurutularak doygun kuru yüzey

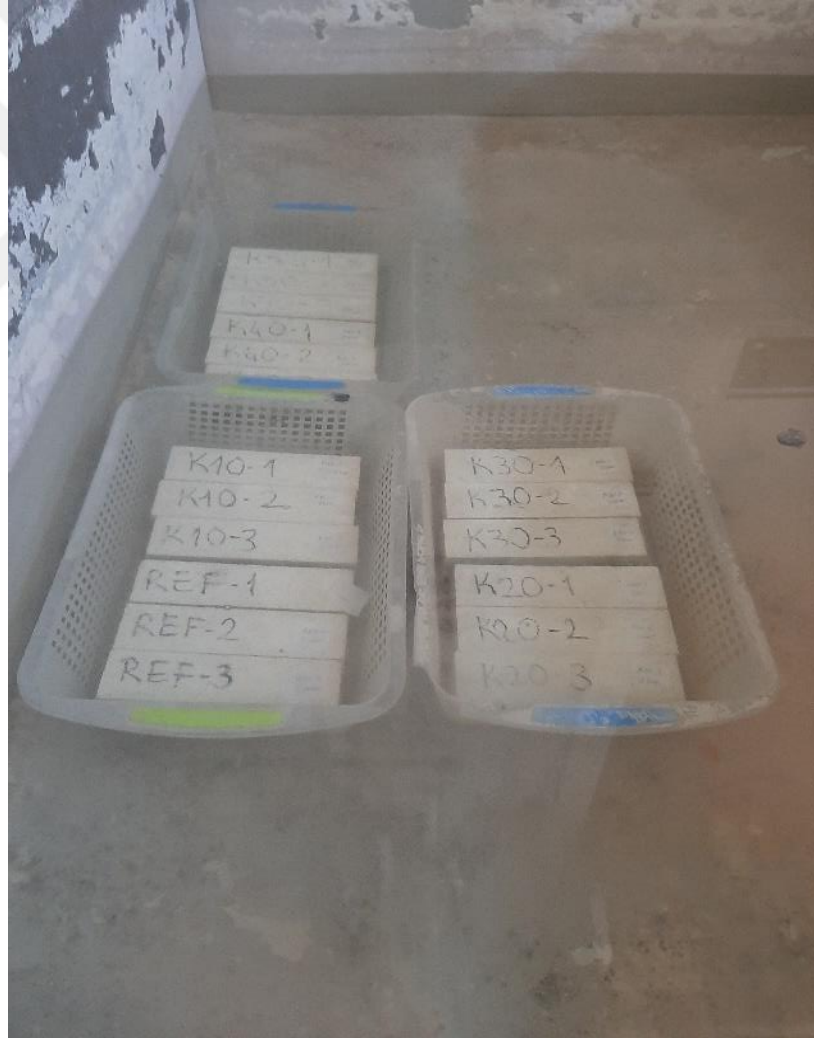
durumuna getirilen numunelerin kütleleri belirlenmiştir. Aynı numuneler 24 saat 105°C etüvde kurumaya bırakılmıştır. Etüvden çıkarılan numunelerin etüv kurusu kütle değerleri ölçülmüştür. Elde edilen doygun kuru yüzey ve etüv kurusu kütle değerleri Denklem (3.5) kullanılarak 3 boyutlu yazıcı beton numunelerinin su emme oranları belirlenmiştir.

$$S_a = (P_2 - P_1) / P_1 \times 100 \quad (3.5)$$

P_2 = Doygun kuru yüzey durumdaki numune ağırlığı, gr

P_1 = Etüv kurusu ağırlık, gr

Su emme deneyi için numunelerin bekletildiği kür havuzu ve doygun kuru yüzey durumuna getirilmiş numunelerde Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3. 13. Numunelerin bekletildiği kür havuzu



Şekil 3. 14. Numunelerin bekletildiği etüv cihazı

3.5.2.6. Kuru birim hacim ağırlık deneyi

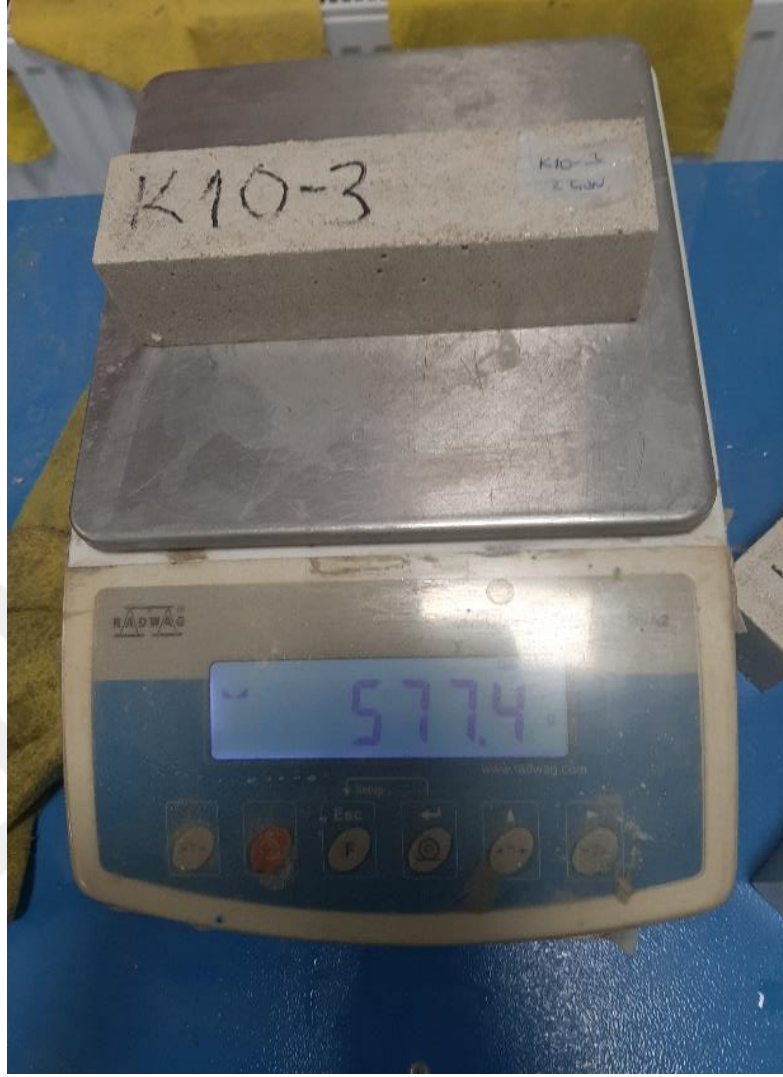
TS EN 678'e göre kuru birim hacim ağırlığı tayini numuneler 24 saat 105°C etüvde kurumaya bırakılmıştır. Etüvden çıkarılan numunelerin etüv kurusu ağırlıkları ölçülmüştür. Numunelerin kuru birim hacim ağırlık değerleri Denklem (3.6) yardımı ile hesaplanmıştır. Şekil 3.15'te numune tartımı gösterilmiştir.

$$\Delta=W/V \quad (3.6)$$

Δ : Birim Hacim Ağırlık (kg/m³)

W: Etüv Kurusu Ağırlığı (kg)

V: Numunenin Hacmi (m³)



Şekil 3. 15. Numune Tartımı

3.5.3. İnşa edilebilirlik testi

Geleneksel betonda kalıp kullanımı olduğundan dolayı betonun kendi kendisini taşımasına gerek duyulmaz fakat gelişen teknolojiyle kalıpsız beton dökümü yöntemiyle uygulanan 3 boyutlu yazıcı betonu inşası için yazdırılan katmanın üzerine gelecek olan katmandan dolayı oluşacak deformasyonun çok az olması koşulu ile yazdırılabilecek katmanların sayısı inşa edilebilirlik olarak yorumlanmaktadır (Le vd., 2012). Bu yorumdan yola çıkılarak prototip bir sıkma aleti ile 9 katman inşa edilerek her bir serinin farklı yayılma değerlerinde inşa edilebilirliği incelendi. Tablo 3.9’da dökülen serilerin yayılma değerleri verilmiş olup, inşa edilebilirlik testi için dökülen 9 katmanlı numunelerin kalıptan çıktığında ve 1 gün sonra alınan yükseklik ölçüleri Tablo 3.10’da gösterilmektedir.

Tablo 3. 10. Karışımların yayılma değerleri

Karışım Yayılma Değerleri (cm)					
Referans	K10	K20	K30	K40	K50
19,43	19,79	20,11	20,48	20,22	20,88



Şekil 3. 16. Prototip sıkma aletiyle inşa edilebilirlik testi uygulaması

Tablo 3. 11. Karışımların 3 noktasından alınan yükseklik değerleri

Karışımların 3 Noktasından Alınan Yükseklik Değerleri (cm)						
	Referans	K10	K20	K30	K40	K50
1.Nokta	12,40	12,00	12,90	11,50	13,00	12,20
2.Nokta	13,20	12,60	14,00	12,00	13,30	12,30
3.Nokta	10,00	11,50	12,00	10,00	11,00	11,00
1 Gün Sonra Karışımların 3 Noktasından Alınan Yükseklik Değerleri (cm)						
	Referans	K10	K20	K30	K40	K50
1.Nokta	12,35	11,60	12,60	11,45	12,60	12,00
2.Nokta	13,15	12,30	13,95	12,00	13,20	12,20
3.Nokta	9,95	11,35	11,70	10,00	10,90	10,50



Şekil 3. 17.Referans karışımı inşa edilebilirlik testi



Şekil 3. 18.K10 karışımı inşa edilebilirlik testi



Şekil 3. 19. K20 karışımı inşa edilebilirlik testi



Şekil 3. 20. K30 karışımı inşa edilebilirlik testi



Şekil 3. 21. K40 karışımı inşa edilebilirlik testi

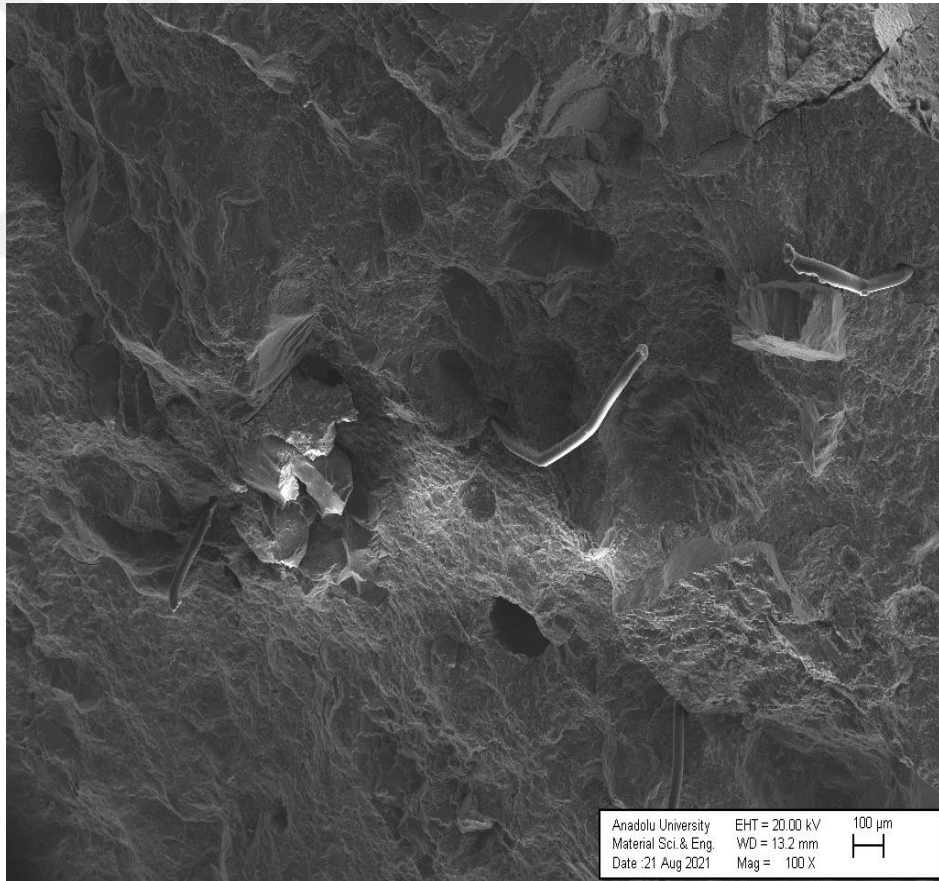


Şekil 3. 22. K50 karışımı inşa edilebilirlik testi

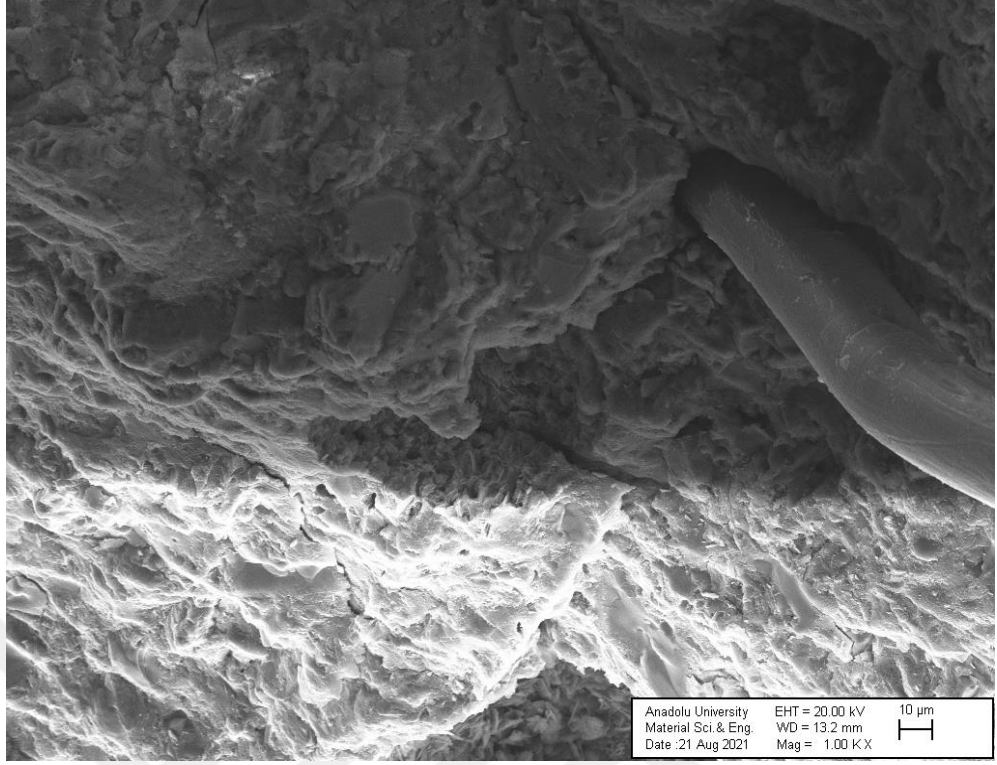
3.5.4. Mikro analiz yapı deneyleri

3.5.4.1. Taramalı elektron mikroskobu deneyi

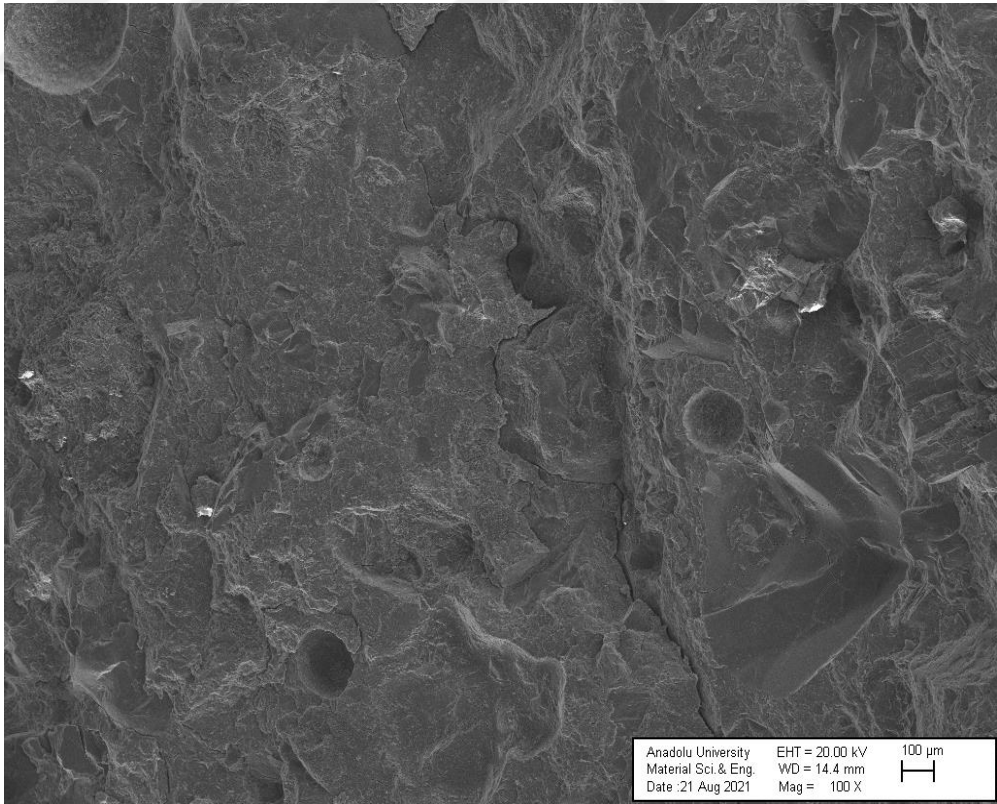
Taramalı elektron mikroskobu dökülmüş olan numunenin yüzeyini nano ölçeğe kadar analizini sağlamak için yüksek enerjili elektronlar, elektron ve foton sinyalleri oluşturarak saçılan elektronların dedektör tarafından toplanarak sinyallerin mikroskop yazılımı ile işlenmesi sonucu görüntü elde edilen tahribatsız bir yöntemdir. Taramalı elektron mikroskobu çok yüksek çözünürlükte görüntüler elde ederek incelenecek olan numunenin mikro ve nano boyutta görüntülenmesini ve malzemenin elementel kompozisyonlarının belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Dökülen 6 karışımdan alınan örneklerin sem görüntüleri incelendiğinde mikronize kalsit oranı düşük numunelerde daha yoğun bir yapı ve %50 mikronize kalsit katkılı numunenin sem görüntülerinde kalsit kristalleri görülmektedir.



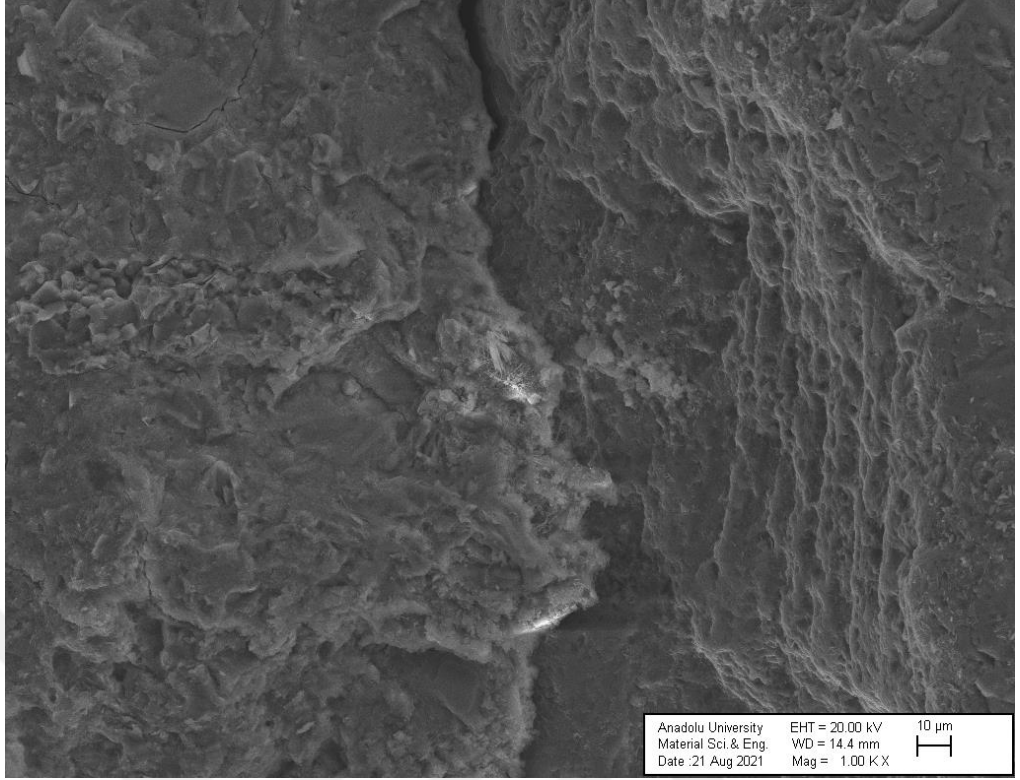
Şekil 3. 23. Referans karışım 100x sem görüntüsü



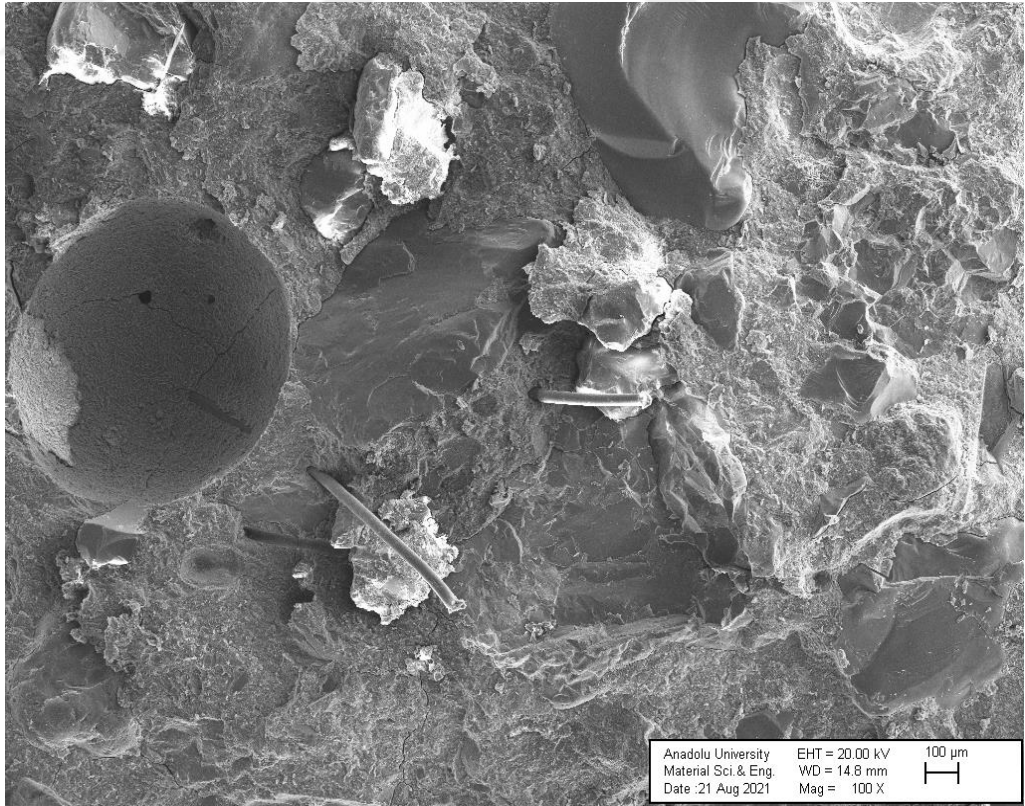
Şekil 3. 24. Referans karışım 1000x sem görüntüsü



Şekil 3. 25. K10 100x sem görüntüsü



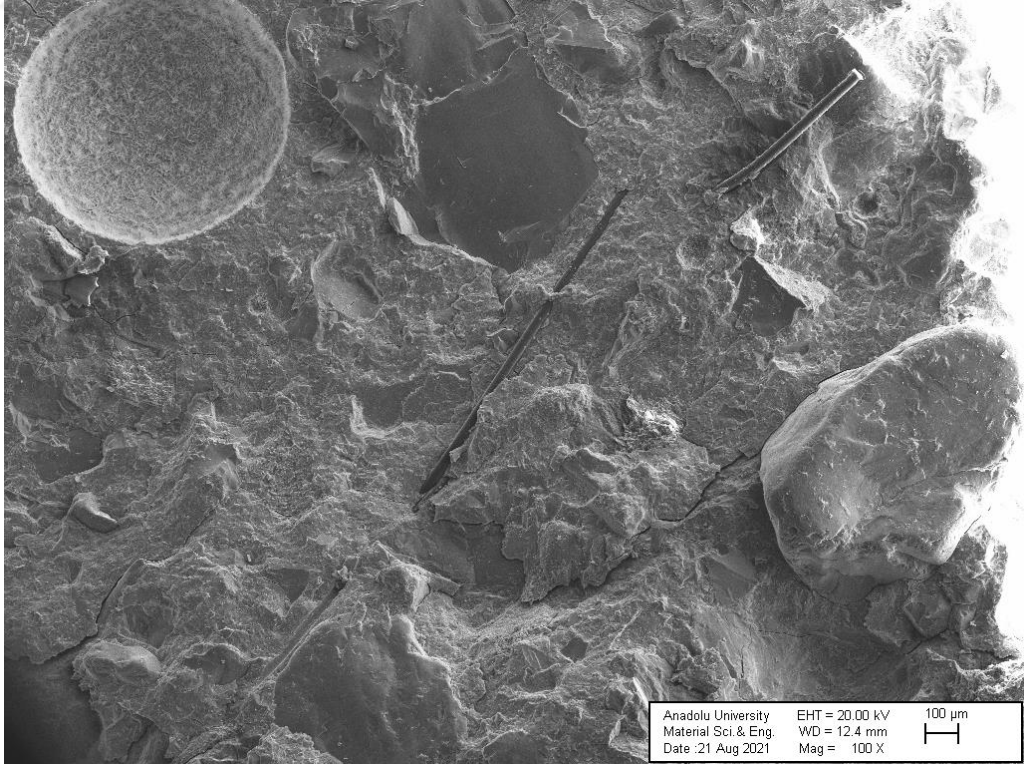
Şekil 3. 26. K10 1000x sem görüntüsü



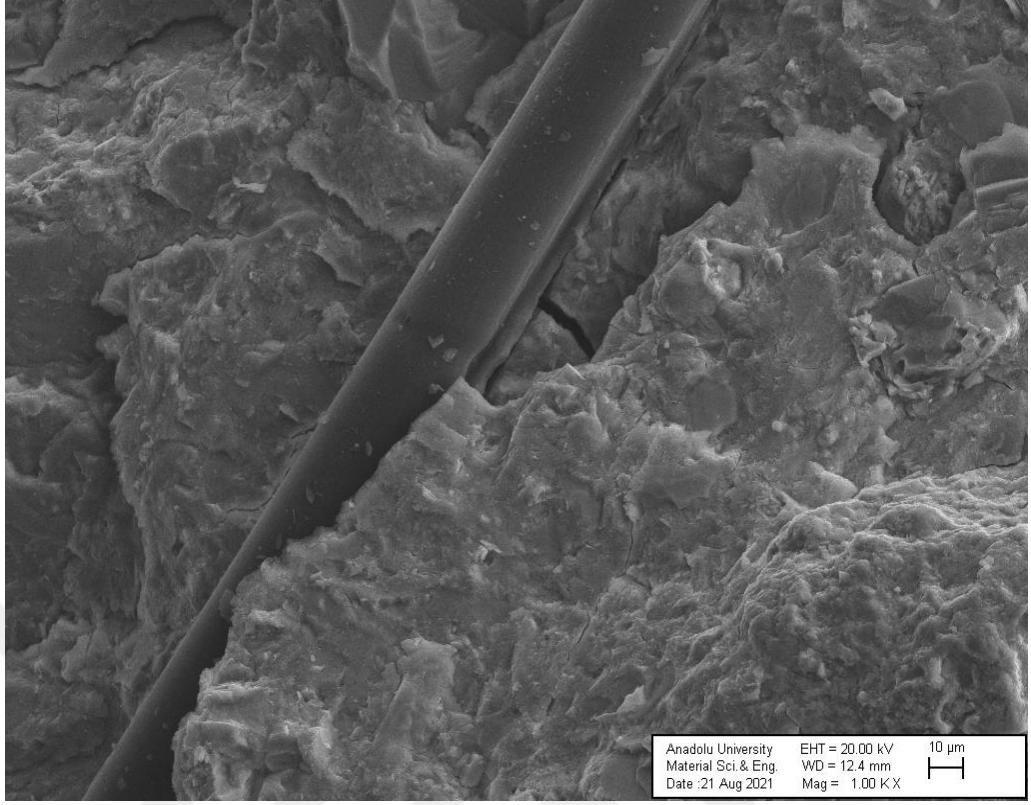
Şekil 3. 27. K20 100x sem görüntüsü



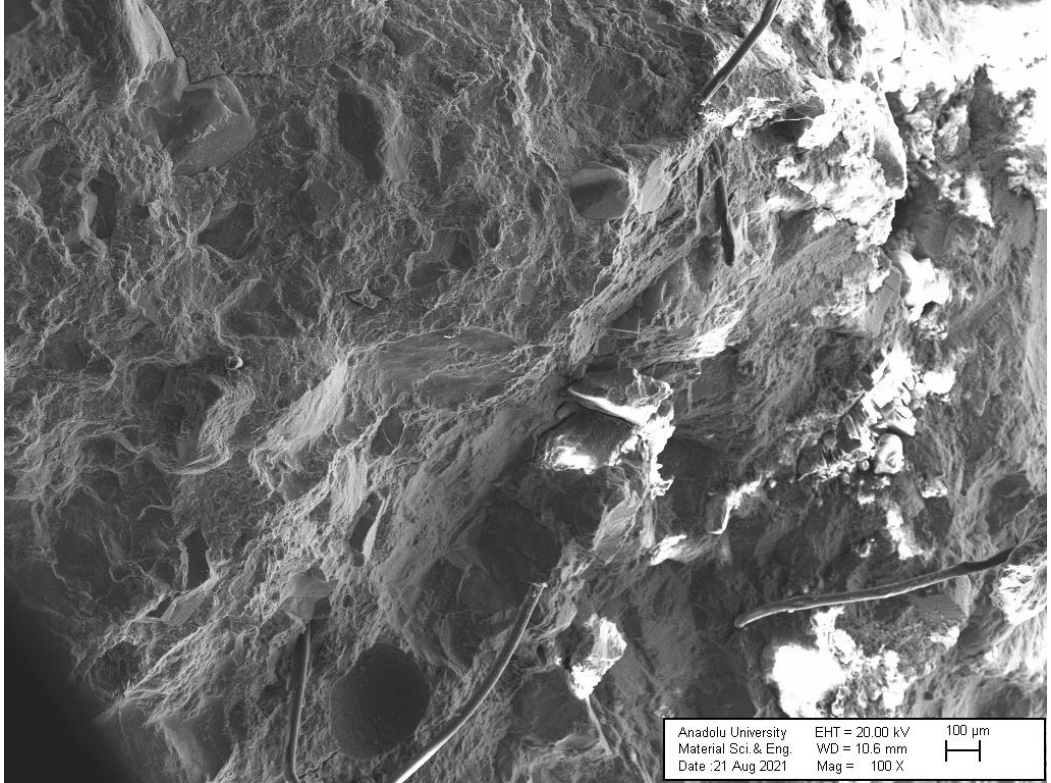
Şekil 3. 28. K20 1000x sem görüntüsü



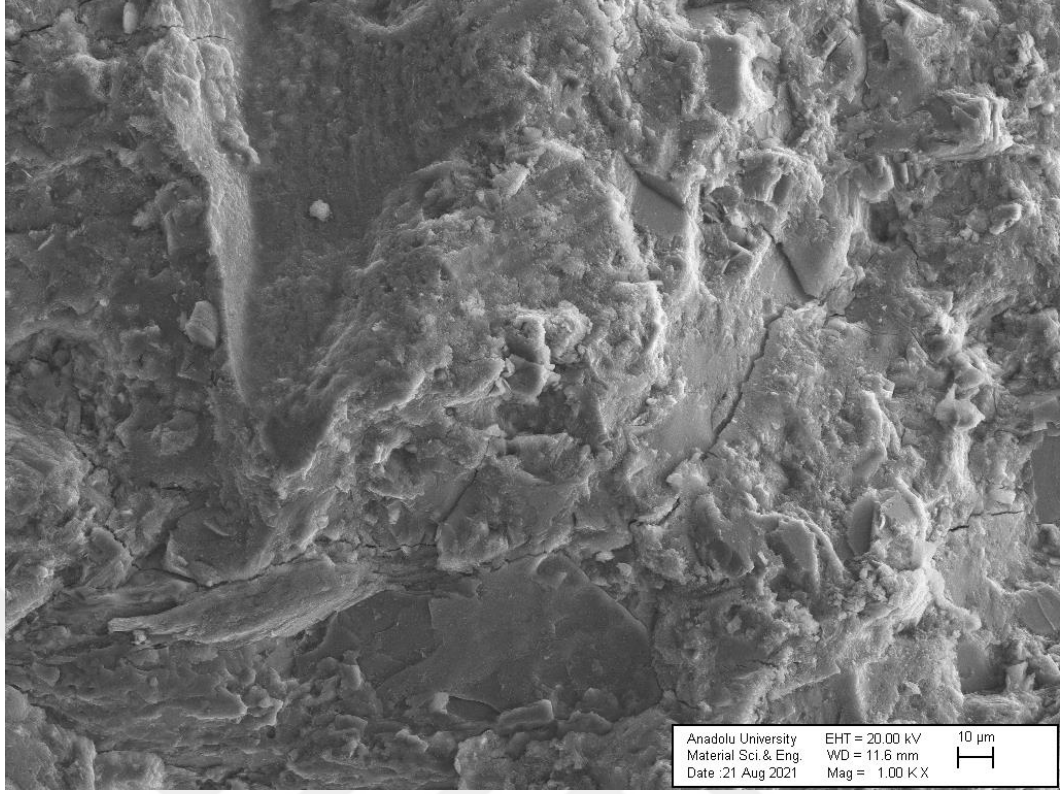
Şekil 3. 29. K30 100x sem görüntüsü



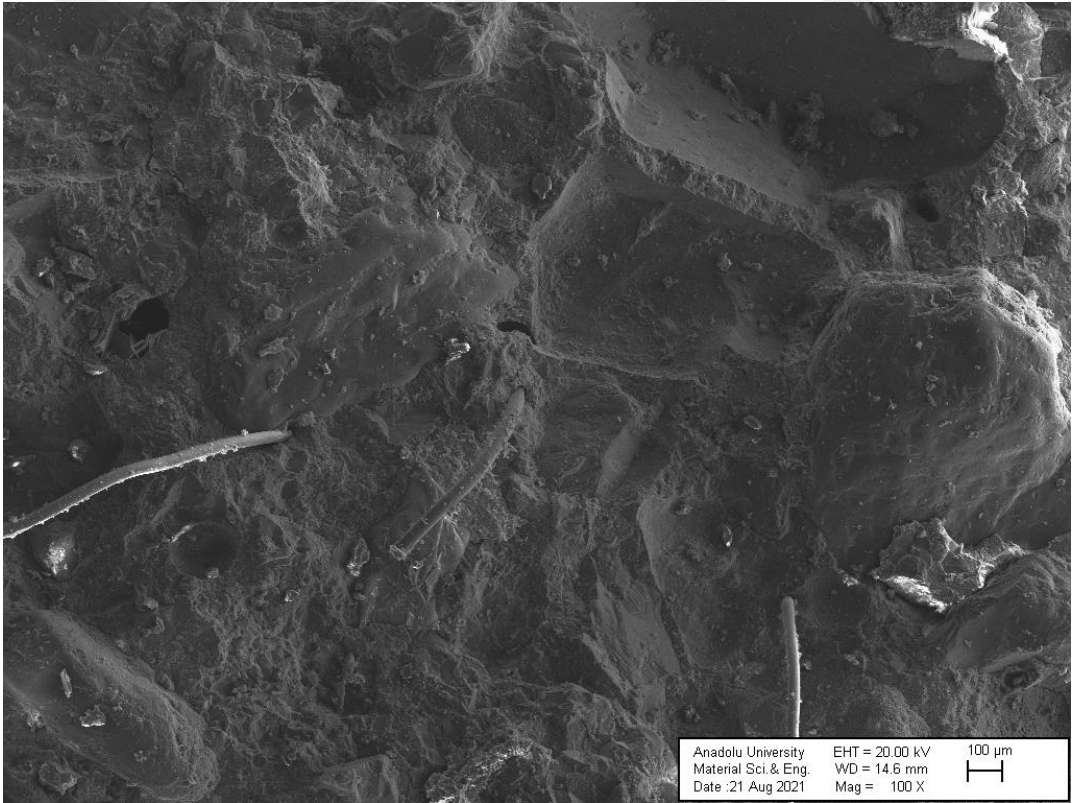
Şekil 3. 30. *K30 1000x sem görüntüsü*



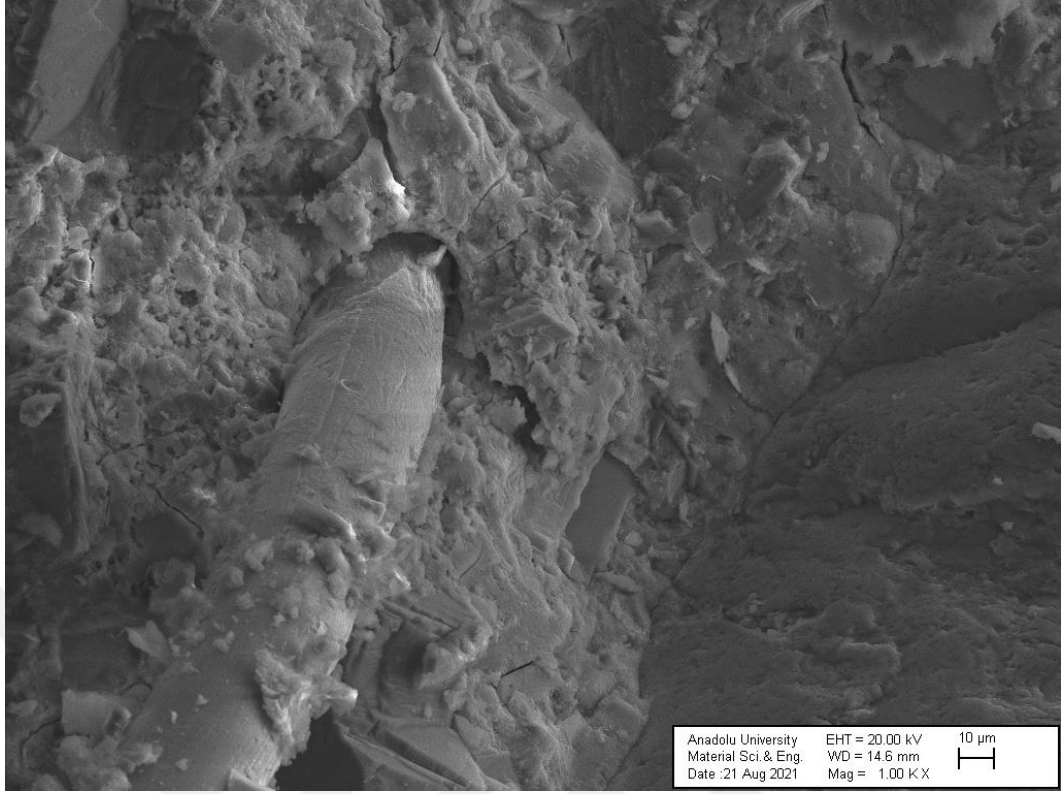
Şekil 3. 31. *K40 100x sem görüntüsü*



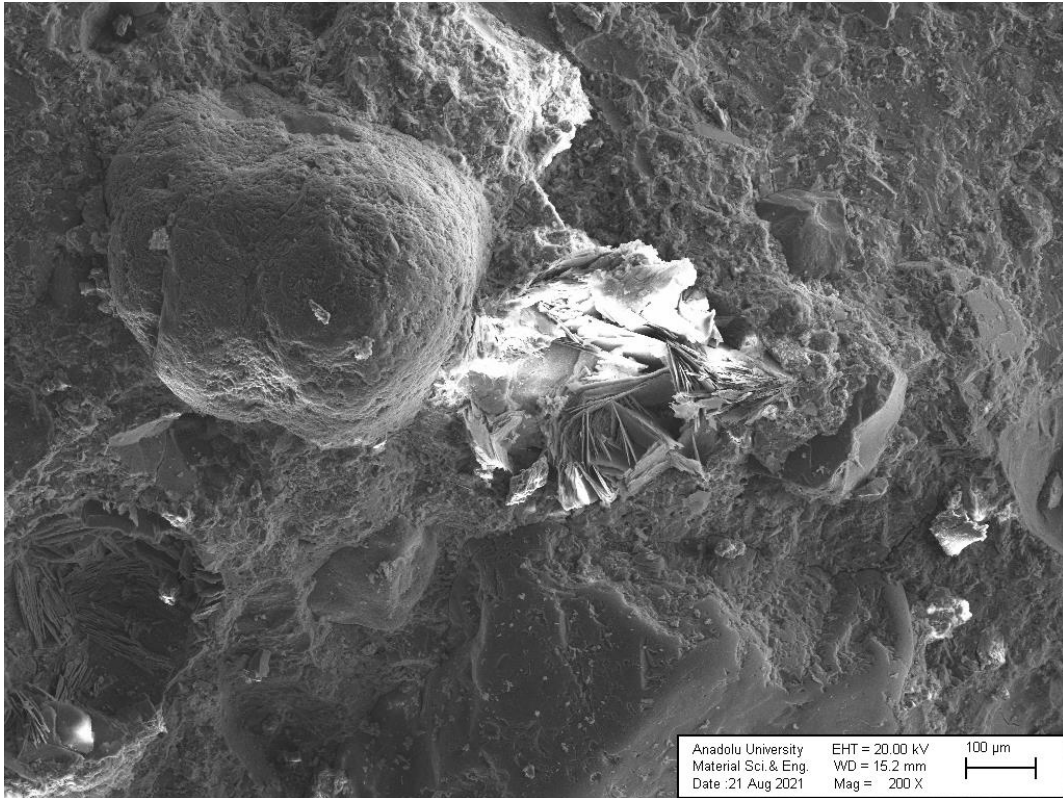
Şekil 3. 32. *K40 1000x sem görüntüsü*



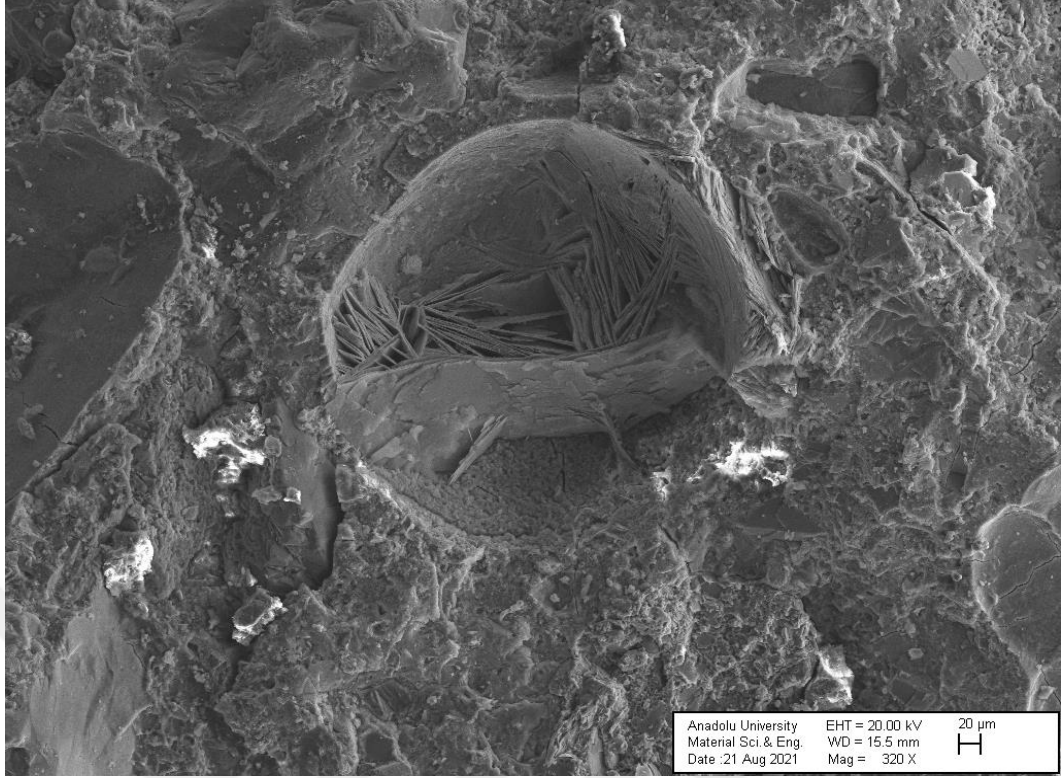
Şekil 3. 33. *K50 100x sem görüntüsü*



Şekil 3. 34. *K50 1000x sem görüntüsü*



Şekil 3. 35. *K50 200x kristaller sem görüntüsü*



Şekil 3. 36. K50 320x kristaller sem görüntüsü

4. DENEY SONUÇLARI

4.1. Yayılma Tablası Deney Sonuçları

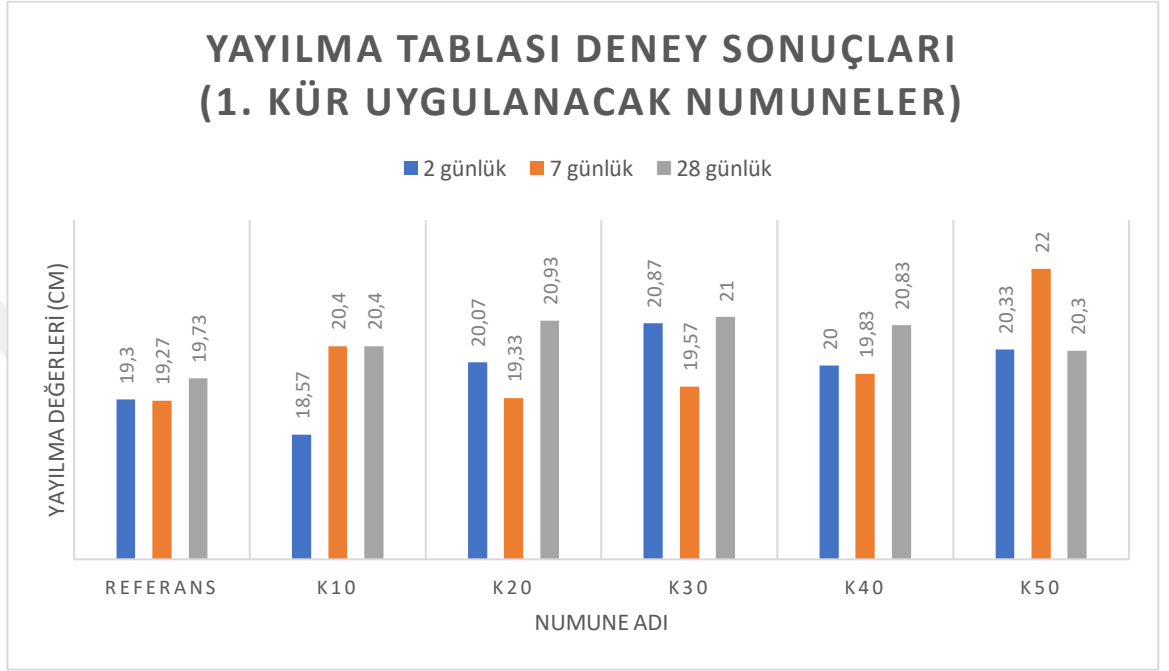
Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda referans, %10 kalsit katkılı, %20 kalsit katkılı, %30 kalsit katkılı, %40 kalsit katkılı ve %50 kalsit katkılı harçların yayılma tablası ile kıvamı tayin edilmiştir. Yayılma sonuçları Tablo 4.1’de verilmektedir. Sonuçlara bakıldığında 2 kür işlemi için de karışım oranları aynı olduğundan sonuçlarda farklılık görülmemektedir. Yayılma değerleri referans numune için ortalama 19,45 cm, K10 serisi için ortalama 19,84 cm, K20 serisi için ortalama 20,50 cm, K30 serisi için ortalama 20,27 cm, K40 serisi için ortalama 20,66 cm ve K50 serisi için ortalama yayılma değeri 20,94 cm olarak gözlemlenmiştir.

Tablo 4. 1. Numunelerin yayılma değerleri

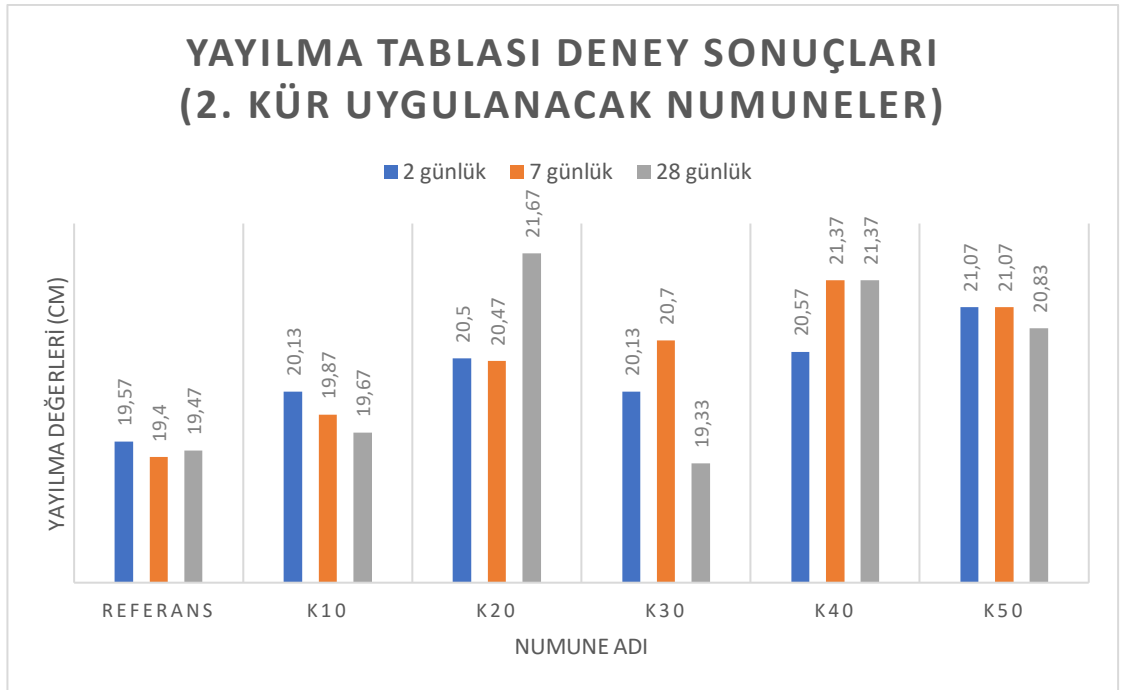
YAYILMA TABLASI DENEY SONUÇLARI (cm)	
REFERANS _{ORT}	19,45
K10 _{ORT}	19,84
K20 _{ORT}	20,50

K30 _{ORT}	20,27
K40 _{ORT}	20,66
K50 _{ORT}	20,94

Tablo 4. 2. Serilere 1. Kür işlemi uygulanan numunelerin yayılma değerleri



Tablo 4. 3. Serilere 2. Kür işlemi uygulanan numunelerin yayılma değerleri



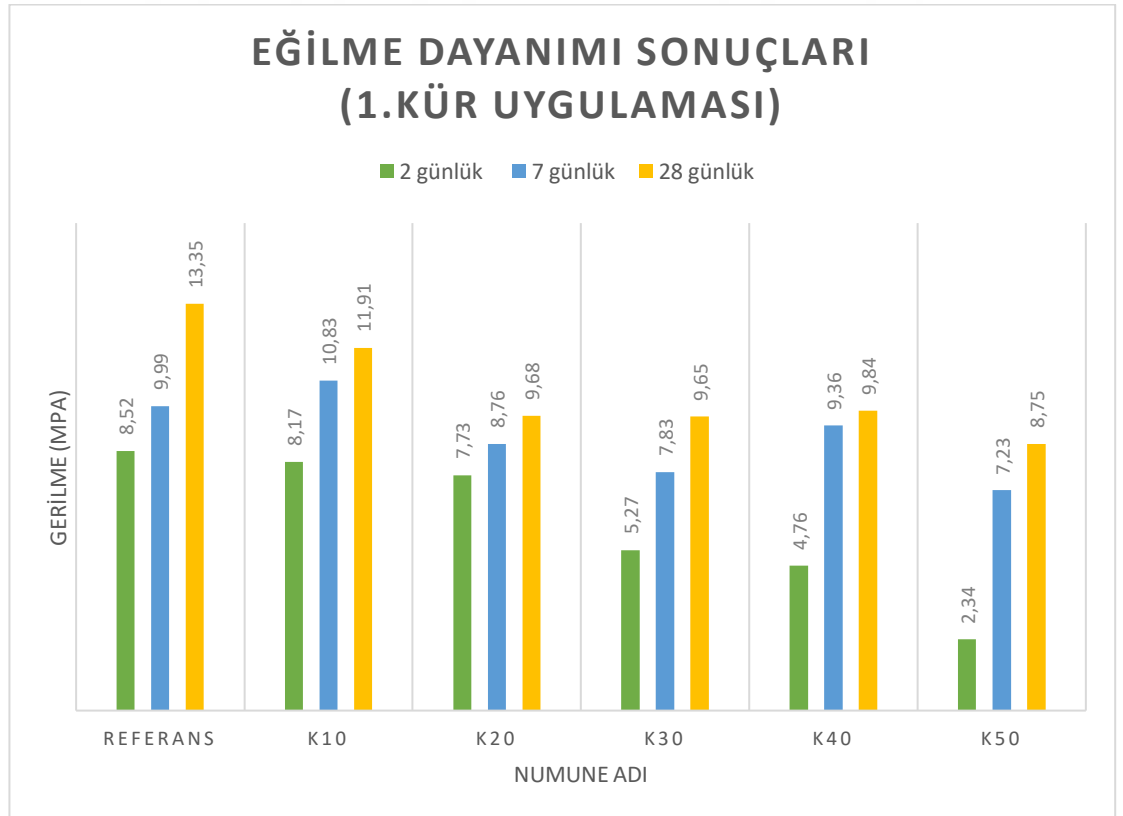
4.2. Eğilme Deneyi Sonuçları

3 boyutlu yazıcı betonu karışımlarında 6 farklı seri ve bu 6 serinin üzerinde 2 farklı kür işlemi uygulanarak numunelerin 2 günlük, 7 günlük ve 28 günlük sonuçları aşağıdaki grafiklerde verilmiştir. Her seri için 2 günlük ,7 günlük ve 28 günlük üçer numune deneye tabi tutularak bu 3 sonucun ortalaması alınarak grafik oluşturulmuştur.

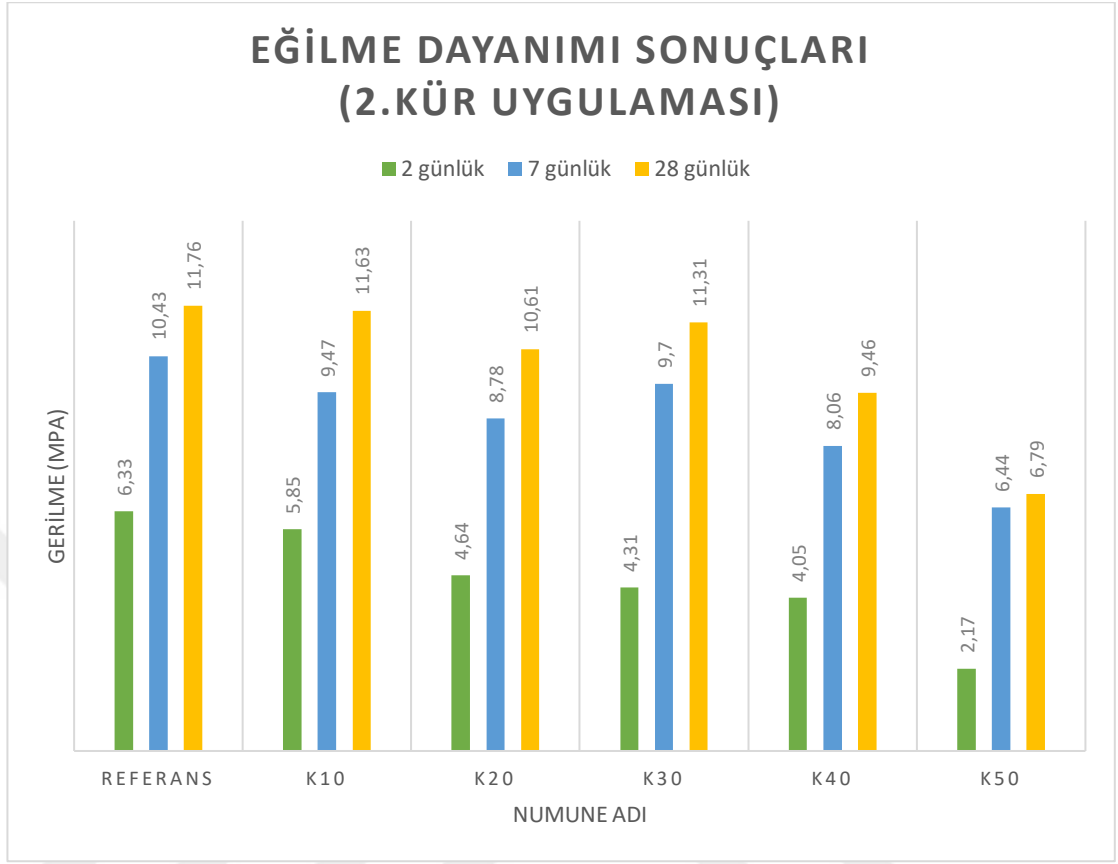
Mikronize kalsit katkısının 3 boyutlu yazıcı betonun eğilme dayanımına etkisi Tablo 4.3'te gösterilmiştir. Sonuçlara bakıldığında 1.Kür (su kürü) uygulaması gerçekleştirilen numunelerde en yüksek 28 günlük eğilme dayanımı değerinin referans numunede (13,35 MPa), en düşük 28 günlük eğilme dayanımı değerinin (8,75 MPa) %50 kalsit katkılı K50 numunesi olduğu gözlemlenmiştir. 2. Kür (kimyasal kür) uygulaması gerçekleştirilen numunelerde en yüksek 28 günlük eğilme dayanımı değerinin (11,76 MPa) referans numunede, en düşük 28 günlük eğilme dayanımı değerinin (6,79 MPa) %50 kalsit katkılı K50 numunesi olduğu gözlemlenmiştir.

Eğilme dayanımı deneyine göre çimento oranındaki azalma yani mikronize kalsit oranındaki artış eğilme dayanım değerlerini düşürmektedir.

Tablo 4. 4. 1.Kür işlemi uygulanan serilerin eğilme deneyi sonuçları



Tablo 4. 5. 2.Kür işlemi uygulanan serilerin eğilme deneyi sonuçları



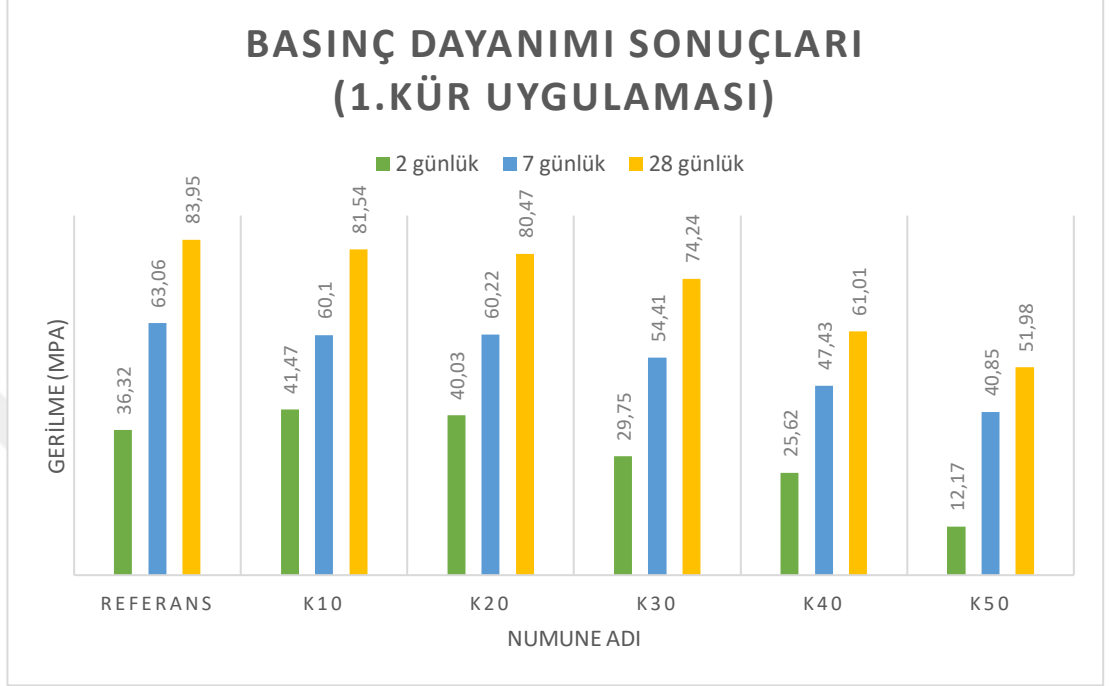
4.3. Basınç Deneyi Sonuçları

3 boyutlu yazıcı betonu karışımlarında 6 farklı seri (Referans, K10, K20, K30, K40 ve K50) ve bu 6 serinin üzerinde 2 farklı kür işlemi uygulanarak 2 günlük, 7 günlük ve 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları için üçer adet deneye tabi tutulup iki parçaya bölünen numuneler üzerinde basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Her seri için 2 günlük, 7 günlük ve 28 günlük altışar numune deneye tabi tutulup bu 6 sonucun ortalaması alınarak grafik oluşturulmuştur.

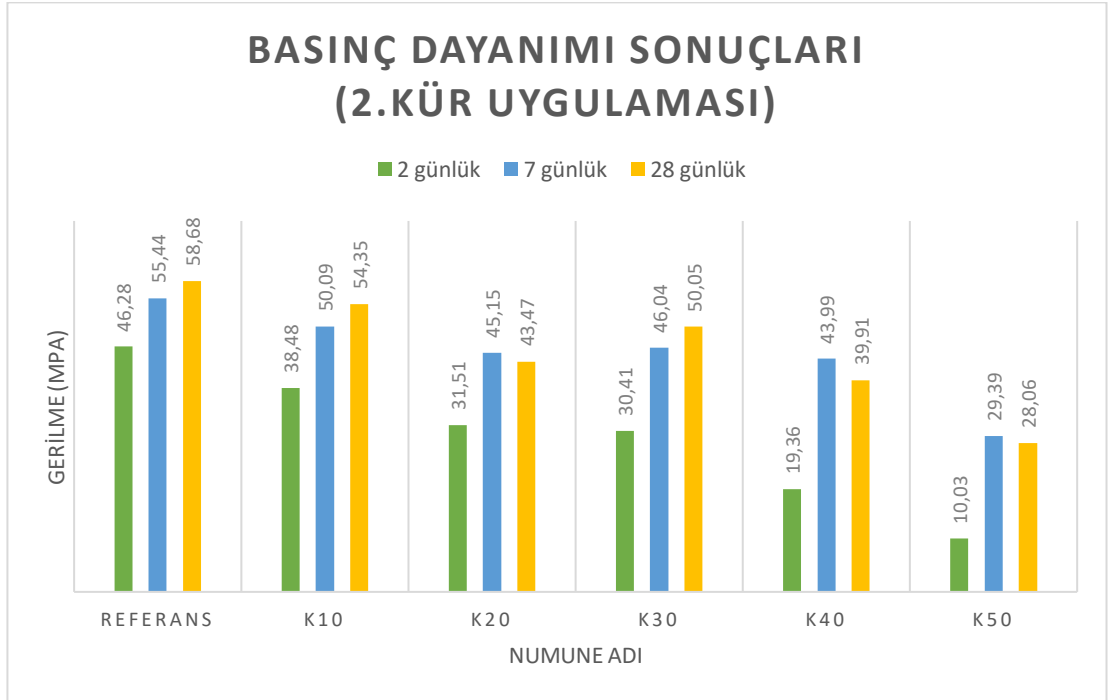
Mikronize kalsit katkısının 3 boyutlu yazıcı betonun basınç dayanımına etkisi Tablo 4.5'te gösterilmiştir. Sonuçlara bakıldığında 1.Kür (su kürü) uygulaması gerçekleştirilen numunelerde en yüksek 28 günlük basınç dayanımı değerinin referans numunede (83,95 MPa), en düşük 28 günlük basınç dayanımı değerinin (51,98 MPa) %50 kalsit katkılı K50 numunesi olduğu gözlemlenmiştir. 2. Kür (kimyasal kür) uygulaması gerçekleştirilen numunelerde en yüksek 28 günlük basınç dayanımı değerinin (58,68 MPa) referans numunede, en düşük 28 günlük basınç dayanımı değerinin (28,06 MPa) %50 kalsit katkılı K50 numunesi olduğu gözlemlenmiştir. Basınç dayanımı deneyine göre çimento

oranındaki azalma yani mikronize kalsit oranındaki artış basınç dayanım değerlerini düşürmektedir.

Tablo 4. 6. 1.Kür işlemi uygulanan serilerin basınç deneyi sonuçları



Tablo 4. 7. 2.Kür işlemi uygulanan serilerin basınç deneyi sonuçları

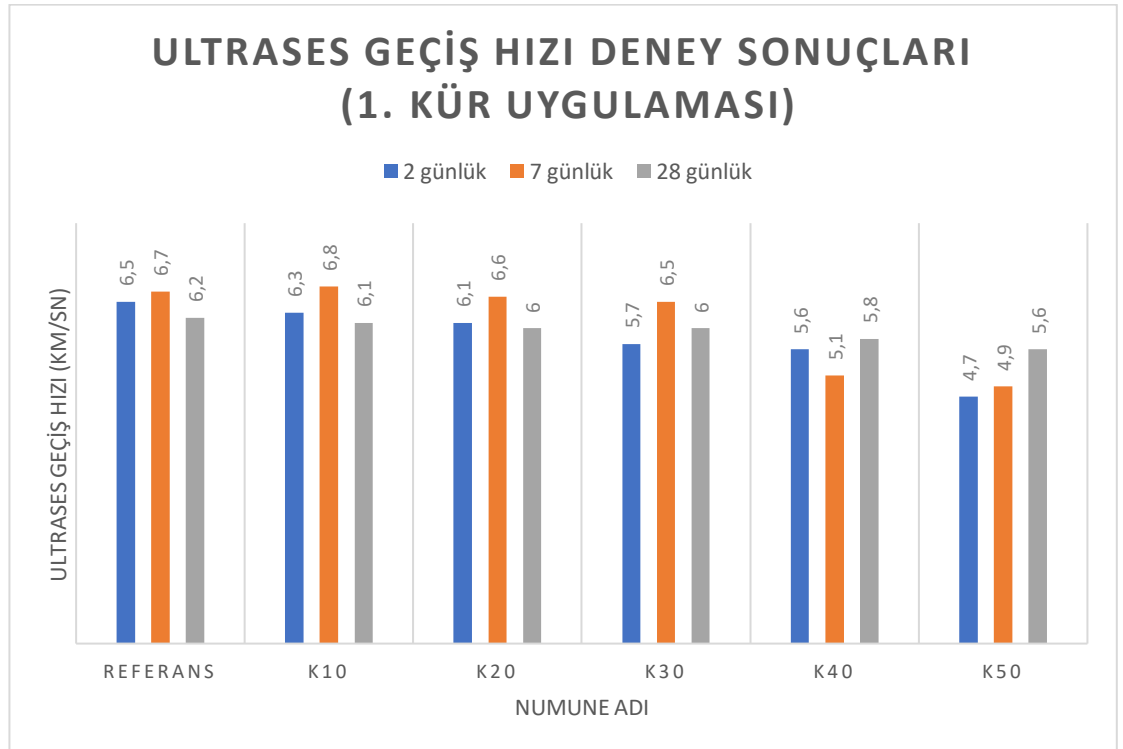


4.4. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi Sonuçları

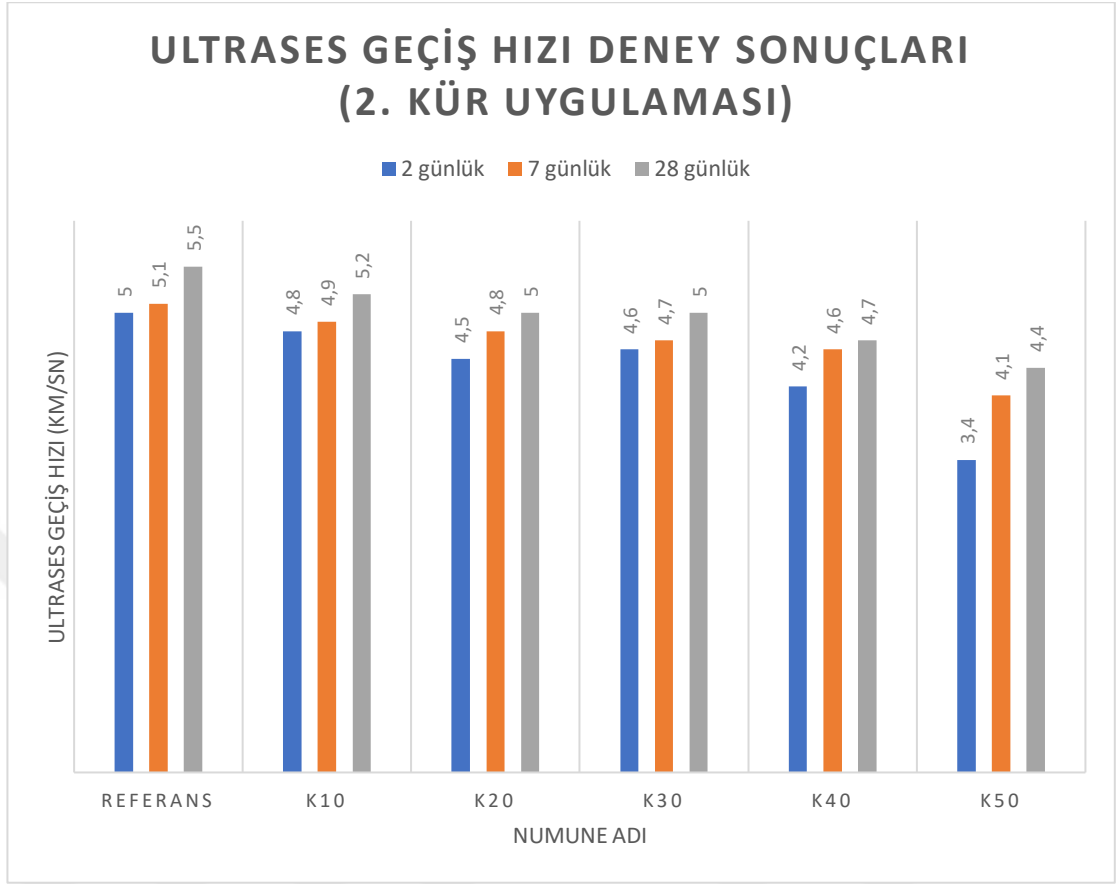
Mikronize kalsit katkısının 3 boyutlu yazıcı betonun ultrases geçiş hızına etkisi Tablo 4.8 ve Tablo 4.9’da gösterilmiştir. Sonuçlara bakıldığında 1.Kür (su kürü) uygulaması gerçekleştirilen numunelerde en yüksek ultrases geçiş hızı değerinin referans numunede (6,5 km/sn), en düşük ultrases geçiş hızı değerinin (5,1 km/sn) %50 kalsit katkı K50 numunesi olduğu gözlemlenmiştir. 2. Kür (kimyasal kür) uygulaması gerçekleştirilen numunelerde en yüksek ultrases geçiş hızı değerinin referans numunede (5,2 km/sn), en düşük ultrases geçiş hızı değerinin (4,0 km/sn) %50 kalsit katkı K50 numunesi olduğu gözlemlenmiştir.

Serilerde mikronize kalsit katkısının çimentoya ikame olarak kullanıldığı göz önünde bulundurularak mikronize kalsit oranının artması ile ultrases geçiş hızı değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Çimento oranındaki azalma sonucu ultrases geçiş hızında düşüş görülmektedir. Uygulanan diğer deneylere bakıldığında ise kuru birim hacim ağırlık deneyi ile ultrases geçiş hızı deneylerinde paralel sonuçlar elde edilmiştir. Kuru birim hacim ağırlık değerlerinin yüksek olması numunenin daha yoğun yapıda olduğunu gösterirken bununla birlikte ultrases geçiş hızı değerlerinin malzemenin iç yapısı ve basınç dayanımı hakkında yorumlanabilmesini sağlamaktadır.

Tablo 4. 8. 1.Kür işlemi uygulanan serilerin ultrases geçiş hızı deneyi sonuçları



Tablo 4. 9. 2.Kür işlemi uygulanan serilerin ultrases geçiş hızı deneyi sonuçları



4.5. Özgül Ağırlık Deney Sonuçları

Mikronize kalsit katkısının 3 boyutlu yazıcı betonun özgül ağırlığına etkisi Tablo 4.10'da gösterilmiştir. Sonuçlara bakıldığında en yüksek özgül ağırlık değerinin (2,2535 kg/dm³) %20 kalsit katkılı K20 numunesi olduğu, en düşük özgül ağırlık değerinin (2,2410 kg/dm³) %50 kalsit katkılı K50 numunesi olduğu gözlemlenmiştir.

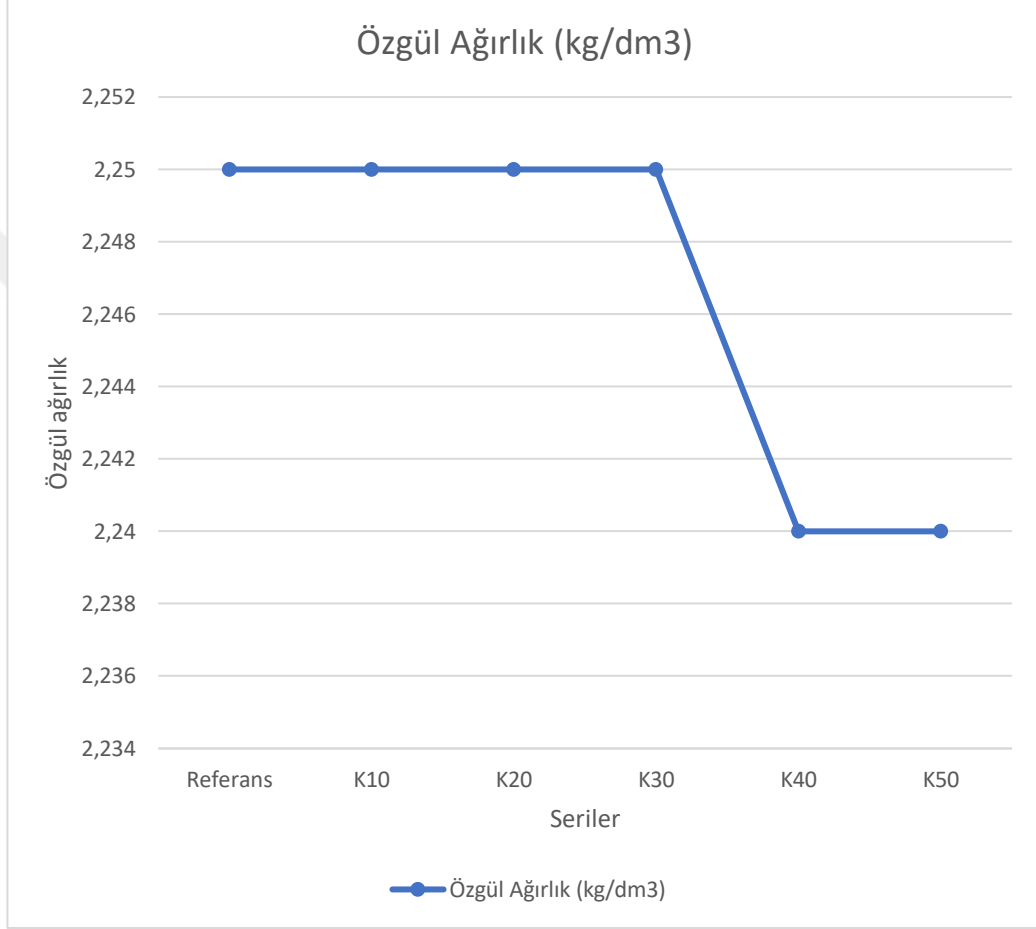
Özgül ağırlık deneyi sonucunda 3 boyutlu yazıcı betonu numunelerinde artan kalsit oranı ile özgül ağırlığında çok büyük farklılıklar olmadığı belirlenmiştir.

Tablo 4. 10. Özgül ağırlık deneyi sonuçları

ÖZGÜL AĞIRLIK DENEYİ SONUÇLARI (kg/dm ³)	
REFERANS _{ORT}	2,2480
K10 _{ORT}	2,2506

K20 _{ORT}	2,2534
K30 _{ORT}	2,2476
K40 _{ORT}	2,2446
K50 _{ORT}	2,2410

Tablo 4. 11. Serilere uygulanan özgül ağırlık deneyi sonuçları



4.6. Su Emme Deneyi Sonuçları

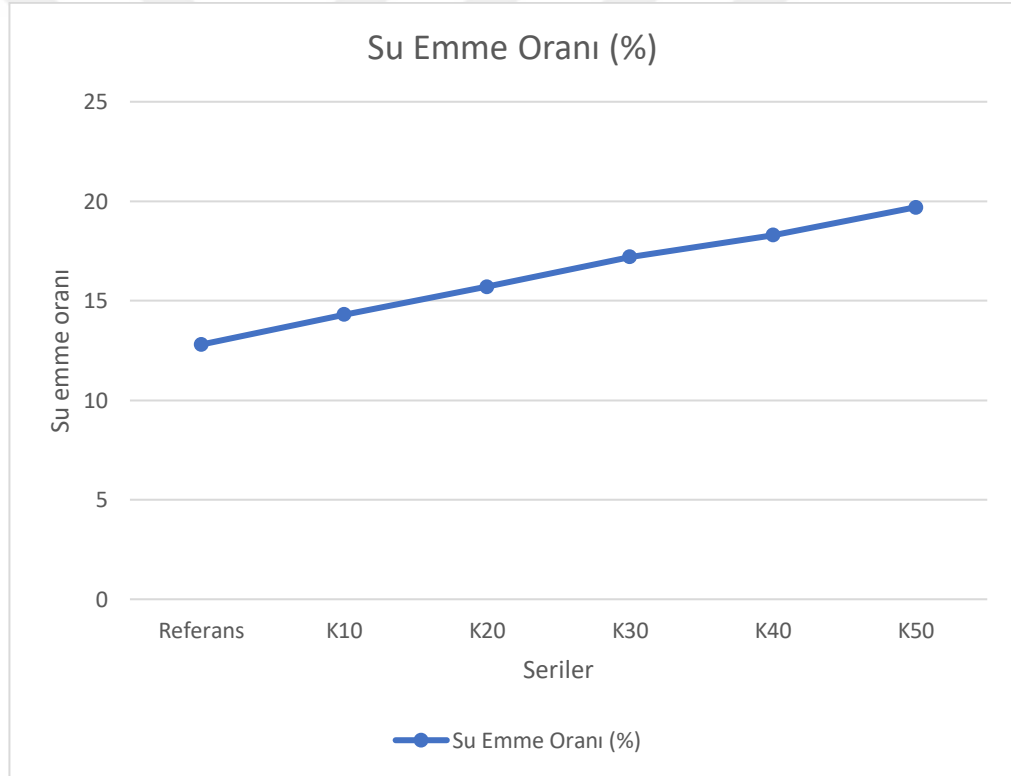
Mikronize kalsit katkısının 3 boyutlu yazıcı betonun su emme oranına etkisi Tablo 4.12'de gösterilmiştir. Sonuçlara bakıldığında en yüksek su emme oranının (19,7) %50 kalsit katkılı K50 numunesi, en düşük su emme oranının (12,8) referans numune olduğu gözlemlenmiştir.

Serilerde mikronize kalsit katkısının çimentoya ikame olarak kullanıldığı göz önünde bulundurularak mikronize kalsit oranının artması ile su emme oranının yükseldiği gözlemlenmiştir. Çimento oranındaki azalma sonucu su emme oranlarında artış görülmektedir.

Tablo 4. 12. *Su emme deneyi sonuçları*

SU EMME ORANI DENEYİ SONUÇLARI (%)	
REFERANS _{ORT}	12,8
K10 _{ORT}	14,3
K20 _{ORT}	15,7
K30 _{ORT}	17,2
K40 _{ORT}	18,3
K50 _{ORT}	19,7

Tablo 4. 13. *Serilere uygulanan su emme deneyi sonuçları*



4.7. Kuru Birim Hacim Ağırlık Deneyi Sonuçları

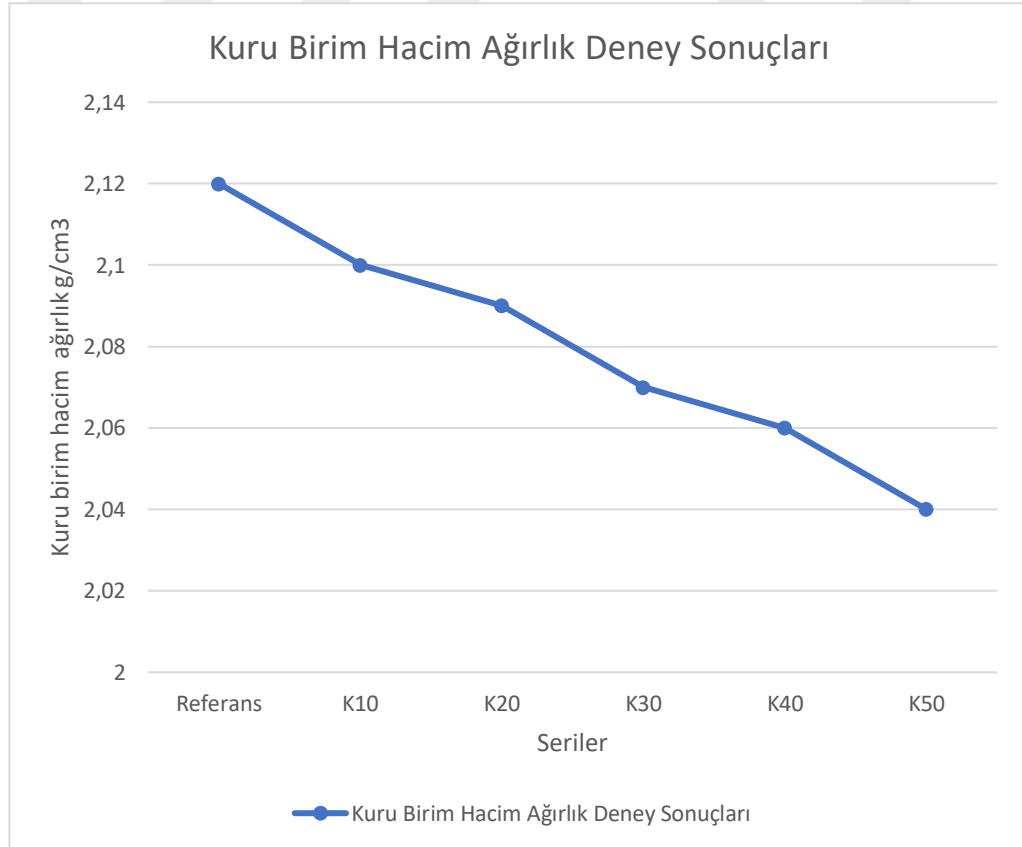
Mikronize kalsit katkısının 3 boyutlu yazıcı betonun kuru birim hacim ağırlıklarına etkisi Tablo 4.14'te gösterilmiştir. Sonuçlara bakıldığında en yüksek kuru birim hacim ağırlık değerinin referans numunede ($2,12 \text{ g/cm}^3$), en düşük kuru birim hacim ağırlık değerinin ($2,04 \text{ g/cm}^3$) %50 kalsit katkılı K50 numunesi olduğu gözlemlenmiştir.

Serilerde mikronize kalsit katkısının çimentoya ikame olarak kullanıldığı göz önünde bulundurularak mikronize kalsit oranının artması ile kuru birim hacim ağırlık değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Çimento oranındaki azalma sonucu su emme oranlarında düşüş görülmektedir.

Tablo 4. 14. Numunelerin kuru birim hacim ağırlık deney sonuçları

KURU BİRİM HACİM AĞIRLIK DENEYİ SONUÇLARI (g/cm ³)	
REFERANS _{ORT}	2,12
K10 _{ORT}	2,10
K20 _{ORT}	2,09
K30 _{ORT}	2,07
K40 _{ORT}	2,06
K50 _{ORT}	2,04

Tablo 4. 15. Serilere uygulanan kuru birim hacim ağırlık deney sonuçları



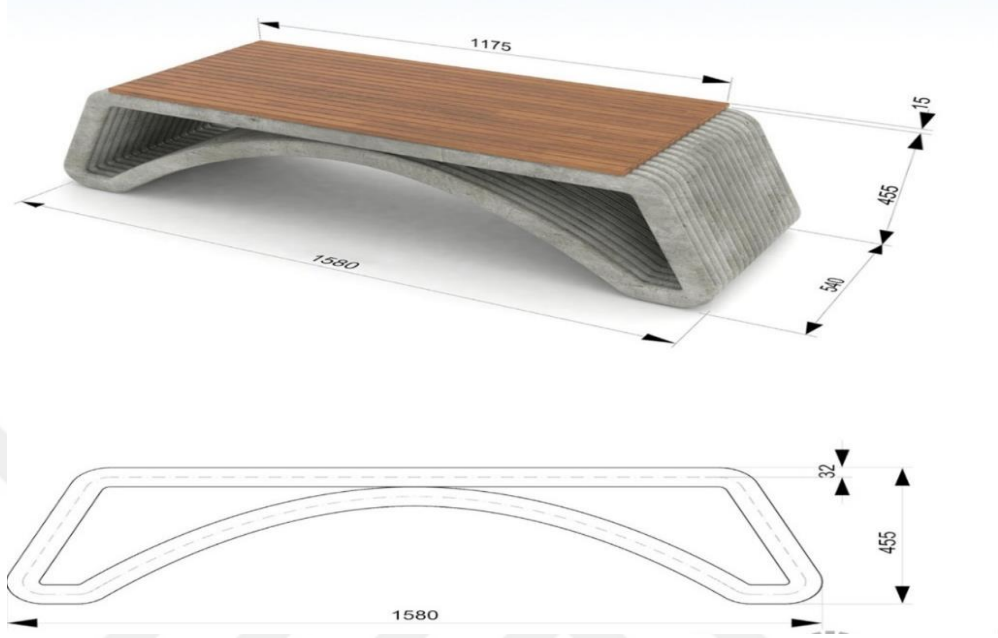
5. ANSYS PROGRAMINDA YAPISAL ANALİZ

Yapısal dış yüklerin (kuvvet, moment, basınç vb.) etkisinde olmasına rağmen statik dengede olan katı cisimleri ya da sistemleri incelediğimiz analiz çeşididir. Program, sistemde oluşan gerilme ve şekil değiştirmeleri hesaplar. Tasarımda yapılan değişiklikler ile gerilmeler düşürülerek emniyet sınırları içine çekilebilmektedir. Gerilmeler düşük olduğunda ise hacimsel azaltmalarla malzemeden tasarruf sağlanabilmekte ve optimum bir tasarım elde edilebilmektedir.

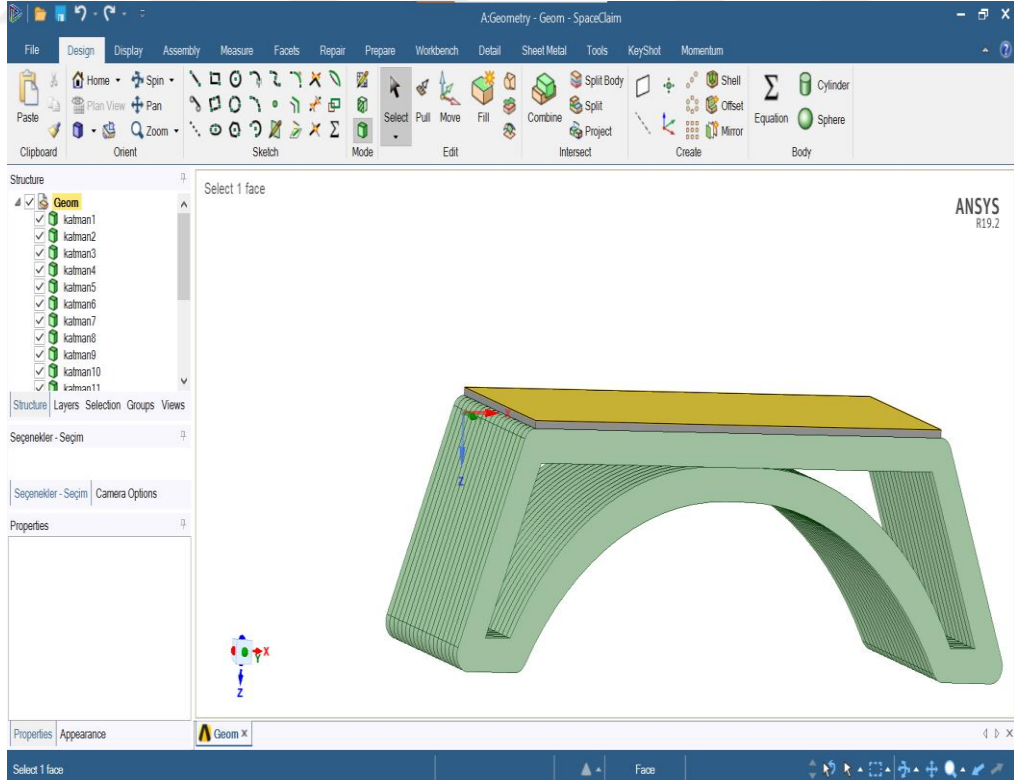
Analiz Adımları:

- CAD Geometrisi Oluşturma: Analizi yapılacak olan sistemin geometrisi DesignModeler ya da SpaceClaim yazılımları ile 3 boyutlu şekilde yapılabilmektedir. Geometri çizilirken sık olarak extrude, revolve, sweep ve skin/loft komutları kullanılmıştır.
- Malzeme Modelleri Tanımlama: Engineering Data seçeneğine tıklayarak kullanılacak malzemenin özellikleri girilmiştir. İstön Bank analizinde beton ve polietilen, basınç ve eğilme deneylerinde ise beton ve çelik malzemeleri girilmiştir. Malzemelerin poisson oranı, yoğunluk, elastisite modülü gibi özellikleri malzemelere uygun bir şekilde girilmiştir.
- Mesh Atma: Geometri yazılıma import edildikten sonra sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur.
- Programda Mesh metriklerinde element kalitesi, en-boy oranı, çarpıtma faktörü, skewness yani maksimum köşe açısı çarpıklık gibi seçenekler bulunmaktadır. Skewness (çarpıklık) seçeneğinde hexa, tri ve quad için 0,8'den küçük, tetrahedra için ise 0,9'dan küçük olması gerekmektedir.
- Connections: Malzemelerin birbirleri olan durumlarını tanımlamaktadır.
- Analiz yapmadan önce son adım ise malzemenin hangi noktalardan sabit olduğunu tanımlamaktır. Fixed support seçeneği ile numunenin sabitlenecek kısımları tanımlandı.
- Force: Eğilme ve basınç deneylerinde numuneye uygulanan yük (kN) girilerek analiz başlatıldı.
- Çözüm yapıldıktan sonra toplam deformasyon, maksimum gerilme gibi sonuçların analizi yapıldı.

İSTON firmasının 3 boyutlu yazıcı betonu ile ürettiği şehir mobilyalarından biri Ansys programında analiz yapılmak üzere modellenmiştir. Ölçüleri aşağıdaki resimde gösterilmiştir.



Şekil 5. 1. İston firması şehir mobilyası ölçüleri



Şekil 5. 2. İston firması şehir mobilyası ölçüleri

istonbank2 - Workbench

File Edit View Tools Units Extensions Jobs Help

Project R2,C2,D2:Engineering Dx

Filter Engineering Data Engineering Data Sources

Outline of Schematic C2, C3, D2: Engineering Data

A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data	Source	Description	
2	Material			
3	Concrete	Gener		
4	Polyethylene	Gener		

Table of Properties Row 2: Concrete Field Variables

A	B	C	D	E
1	Variable Name	Unit	Default Data	Lower Limit
2	Temperature	C	22	Program Controlled

Properties of Outline Row 3: Concrete

A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2350	kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	Coefficient of Thermal Expansion	1,4E-05	C ⁻¹	
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's ...		
8	Young's Modulus	3,66E+10	Pa	
9	Poisson's Ratio	0,3		
10	Bulk Modulus	3,05E+10	Pa	
11	Shear Modulus	1,4077E+10	Pa	
12	Tensile Yield Strength	1250	Pa	
13	Compressive Yield Strength	1250	Pa	
14	Tensile Ultimate Strength	3E+06	Pa	
15	Compressive Ultimate Strength	4,1E+07	Pa	

Chart: No data

Ready

Şekil 5. 3. İston bank malzeme bilgileri, beton

istonbank2 - Workbench

File Edit View Tools Units Extensions Jobs Help

Project R2,C2,D2:Engineering Dx

Filter Engineering Data Engineering Data Sources

Outline of Schematic C2, C3, D2: Engineering Data

A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data	Source	Description	
2	Material			
3	Concrete	Gener		
4	Polyethylene	Gener		

Table of Properties Row 2: Polyethylene Field Variables

A	B	C	D	E
1	Variable Name	Unit	Default Data	Lower Limit
2	Temperature	C	22	Program Controlled

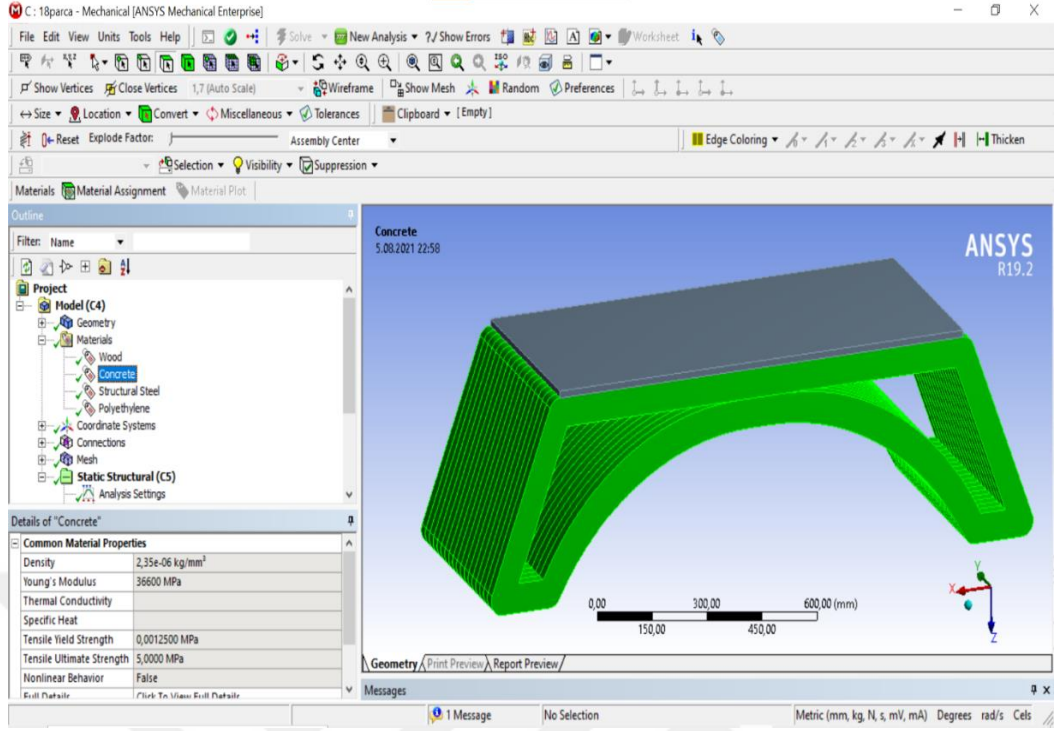
Properties of Outline Row 4: Polyethylene

A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	950	kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	Coefficient of Thermal Expansion	0,00023	C ⁻¹	
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's ...		
8	Young's Modulus	1,1E+09	Pa	
9	Poisson's Ratio	0,42		
10	Bulk Modulus	2,2917E+09	Pa	
11	Shear Modulus	3,8732E+08	Pa	
12	Tensile Yield Strength	3,3E+07	Pa	
13	Compressive Yield Strength	0	Pa	
14	Tensile Ultimate Strength	3,3E+07	Pa	
15	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	
16	Isotropic Thermal Conductivity	0,28	W m ⁻¹ K ⁻¹	
17	Specific Heat, C _p	2300	J kg ⁻¹ K ⁻¹	

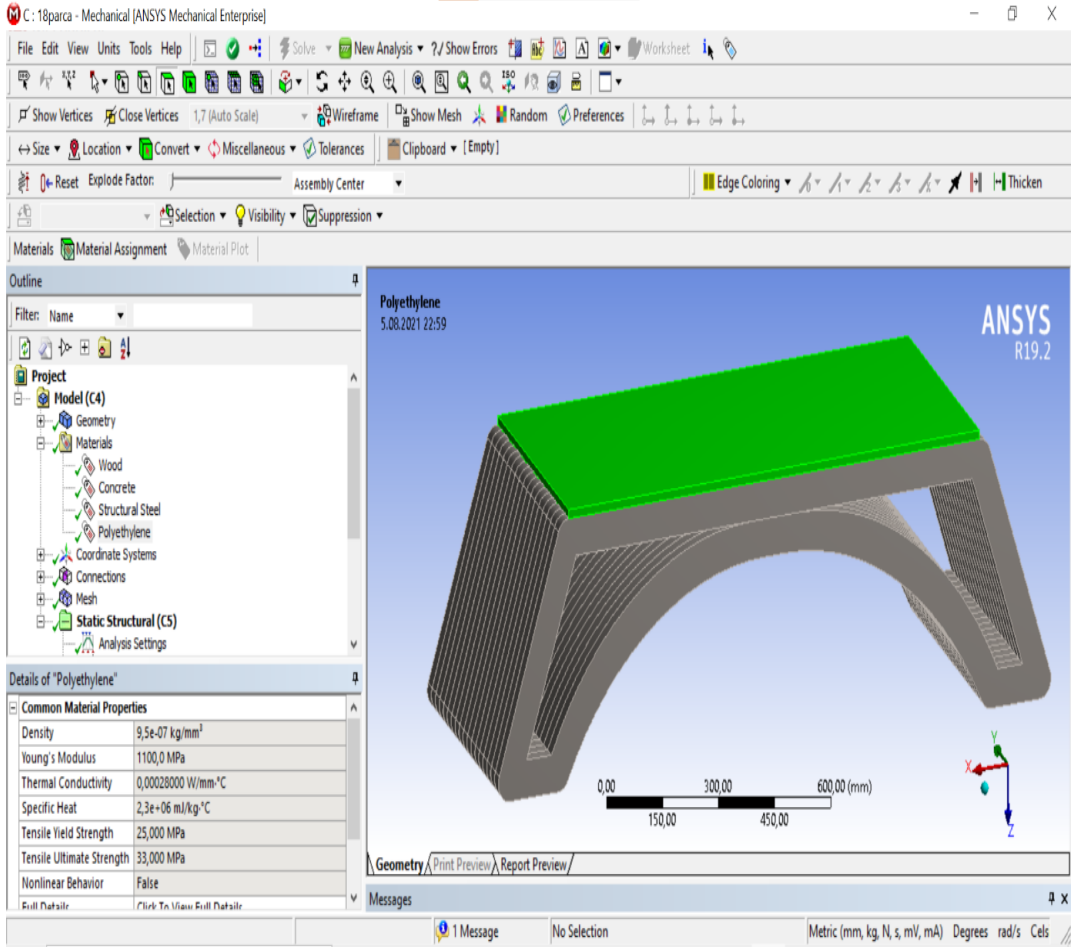
Chart: No data

Ready

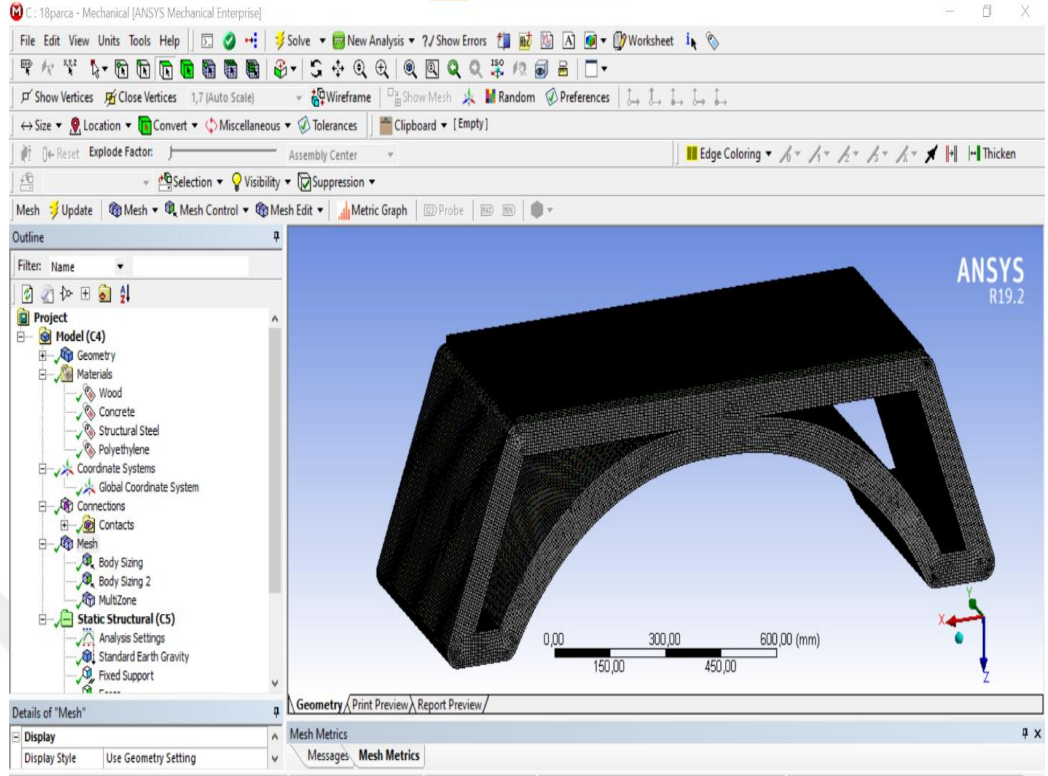
Şekil 5. 4. İston bank malzeme bilgileri, polietilen



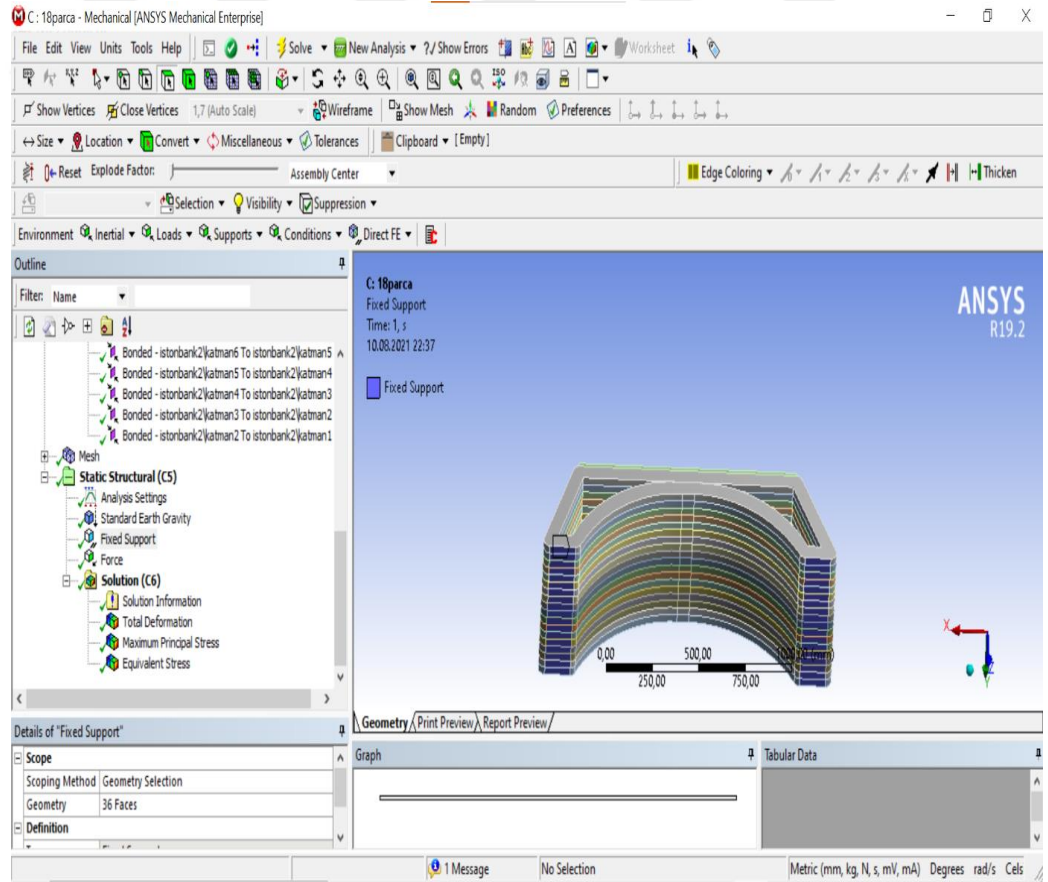
Şekil 5. 5. İstön bank malzeme tanımlama, beton



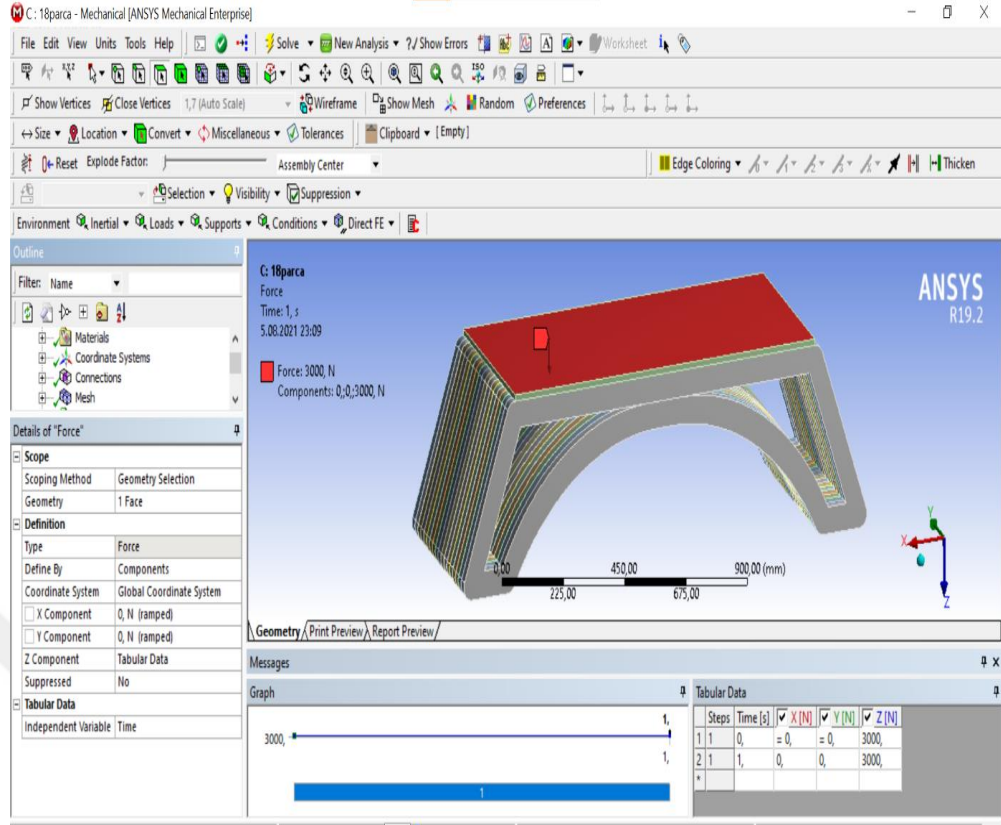
Şekil 5. 6. İstön bank malzeme tanımlama, polietilen



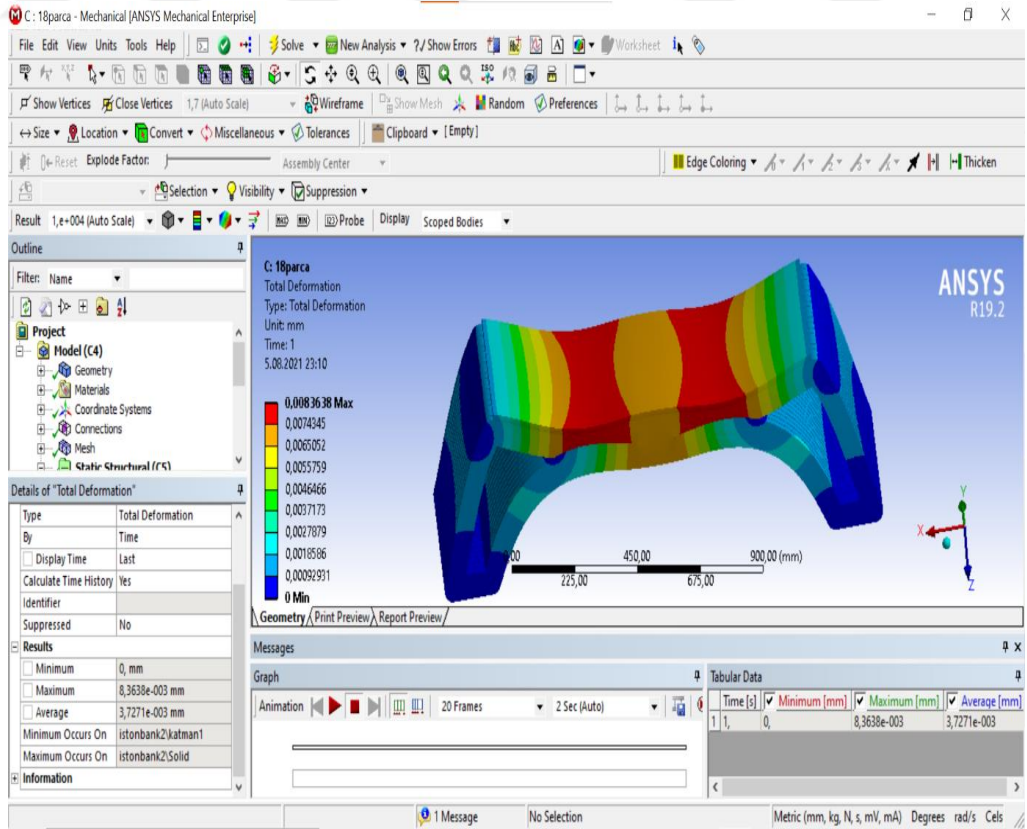
Şekil 5. 7. İston bank mesh atma



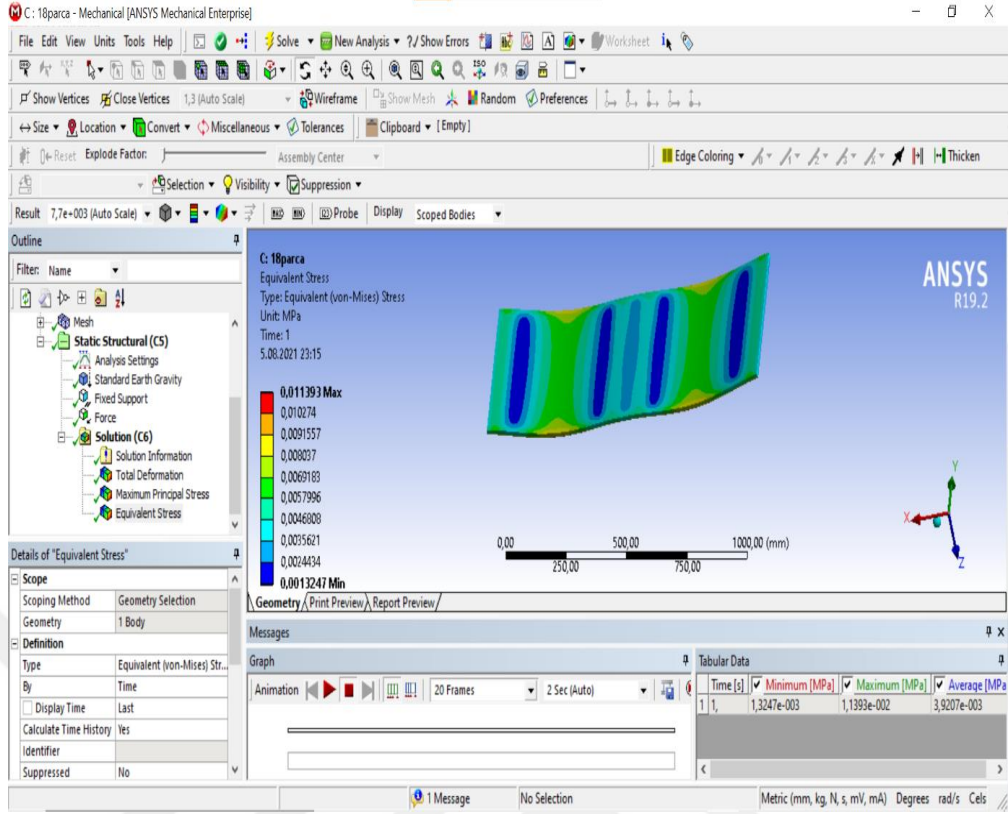
Şekil 5. 8. İston bank yapısal analiz



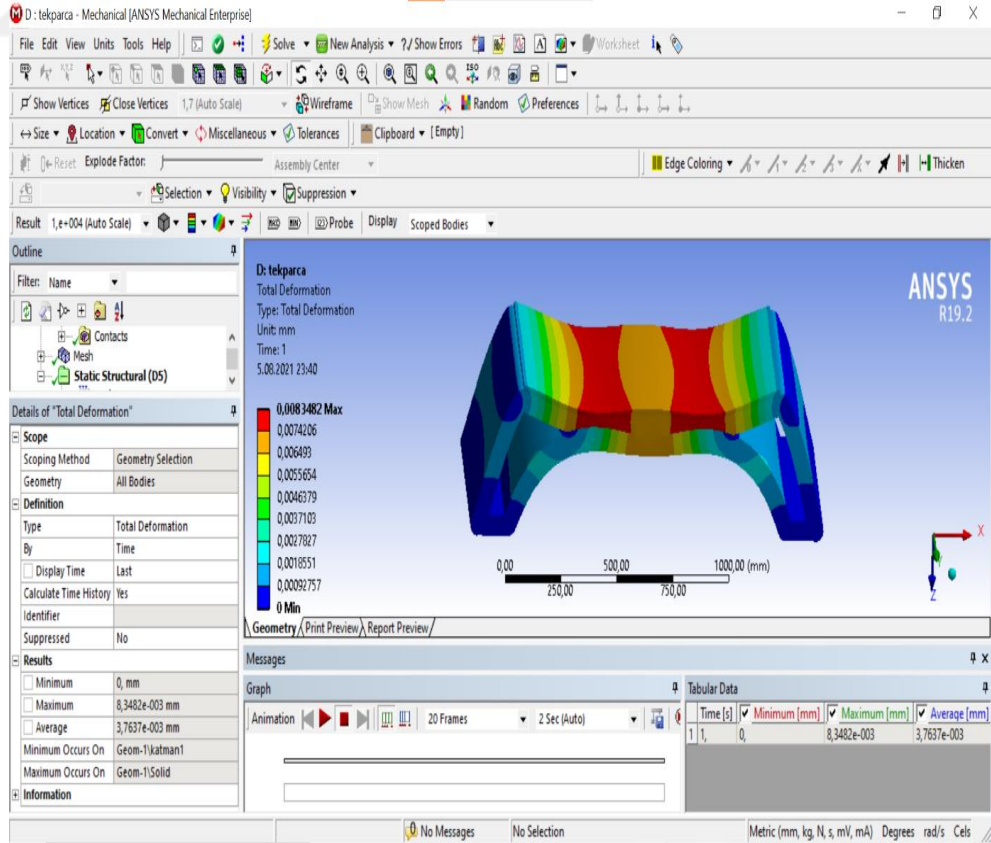
Şekil 5. 9. İstön bank kuvvet tanımlama



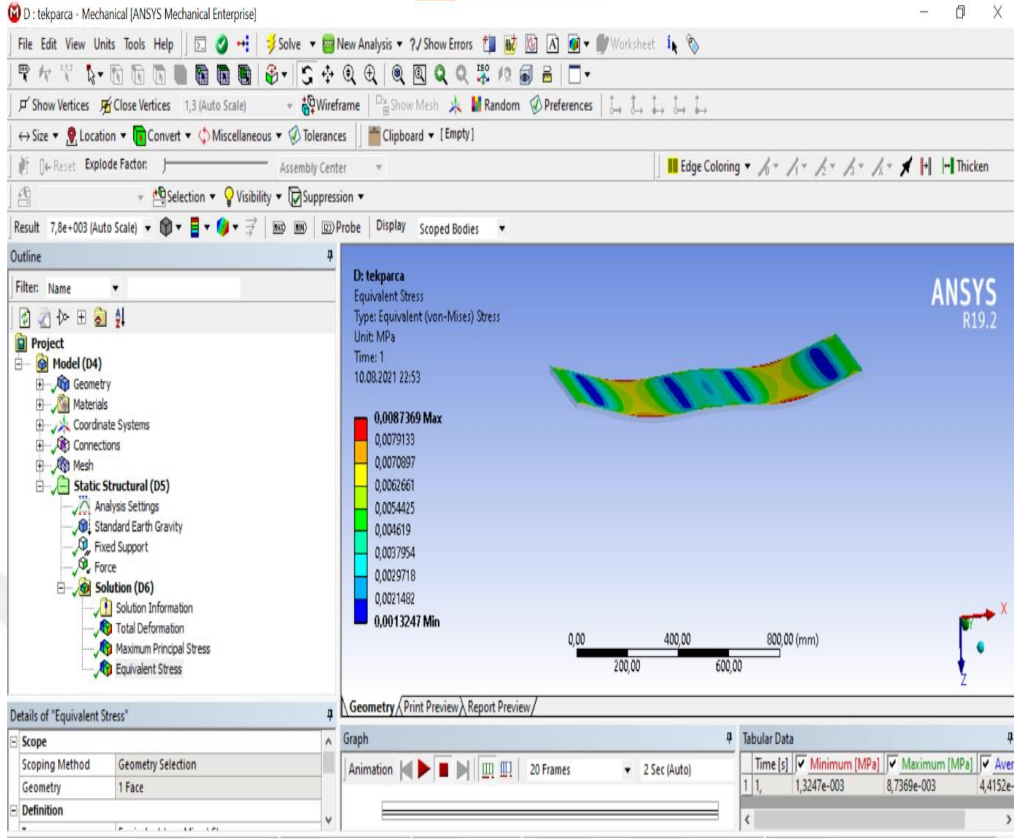
Şekil 5. 10. İstön bank deformasyon (18 katman)



Şekil 5. 11. İstön bank gerilme (18 katman)



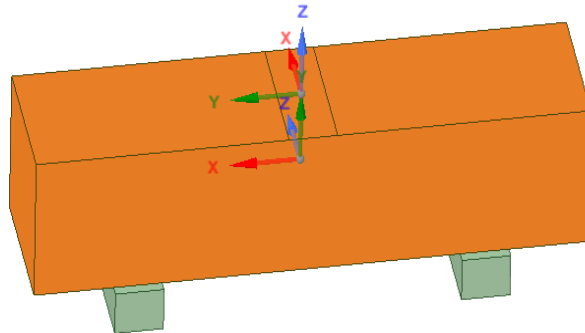
Şekil 5. 12. İstön bank deformasyon (tek parça)



Şekil 5. 13. İstön bank gerilme (tek parça)

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE SAYISAL YAKLAŞIM

Programda çizilen eğilme test cihazı ve numunenin işlem adımları görsellerle anlatılmıştır. Numunelere uygulanan eğilme dayanımı sonuçları ve Ansys programında yapılan analiz sonuçları aşağıdaki resimlerde ve tablolarda verilmiştir.



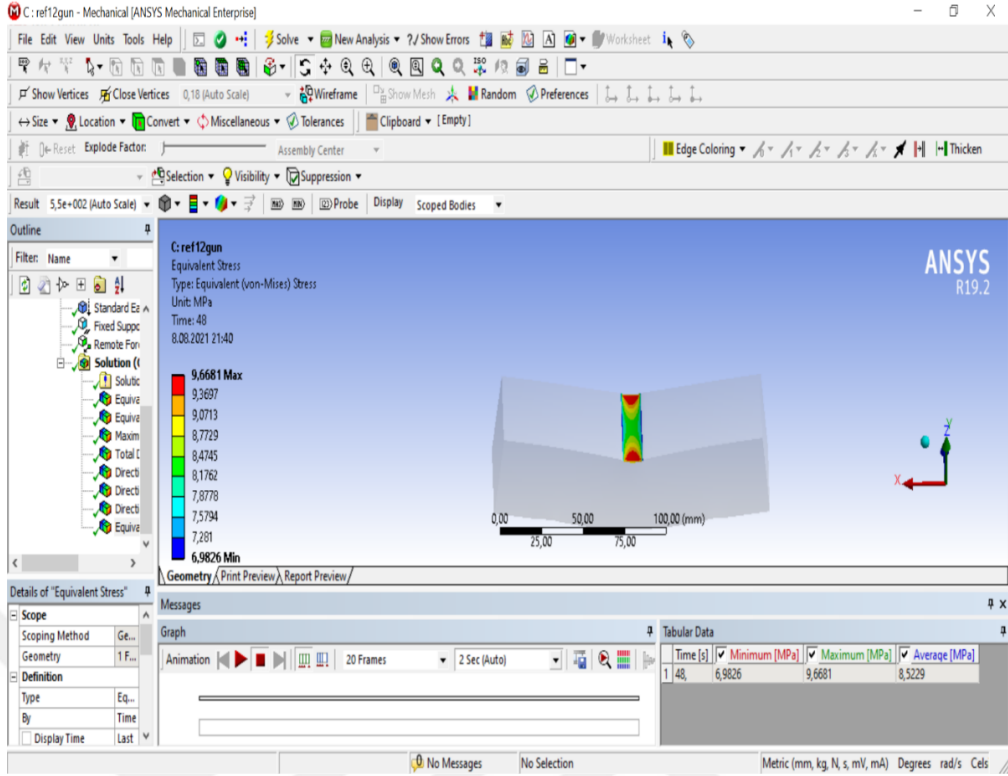
Şekil 6. 1. Eğilme dayanımı test cihazı ve numune geometrisi

Tablo 6. 1. Referans karışım 2 günlük eğilme dayanımı sonuçları

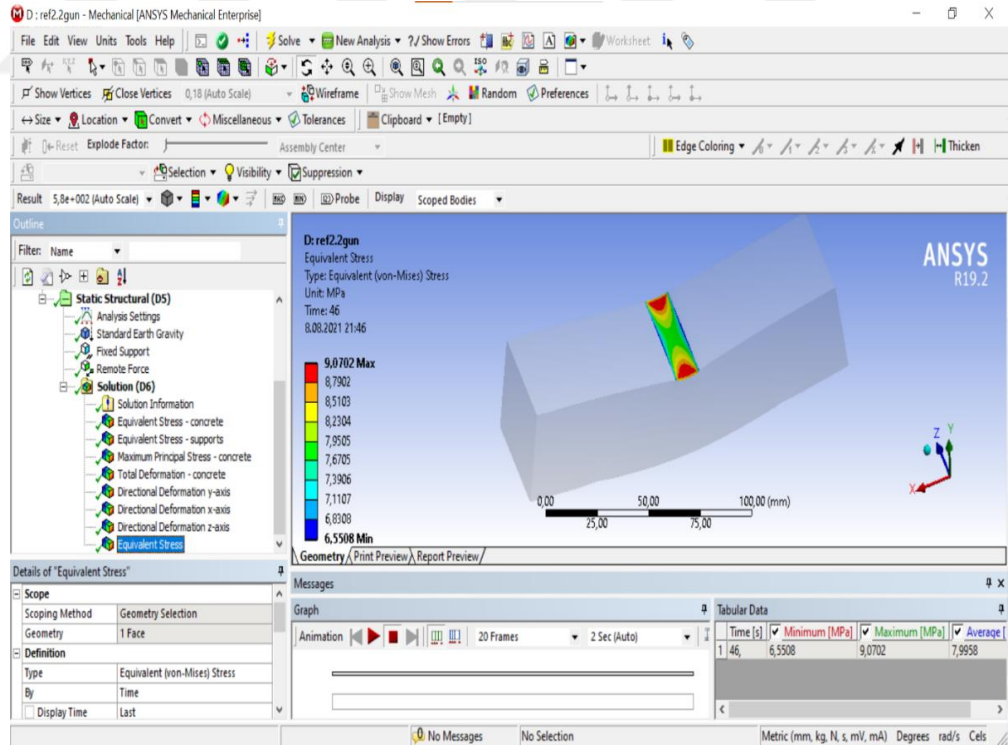
REFERANS KARIŞIM 2 GÜNLÜK EĞİLME DAYANIMI SONUÇLARI			
NUMUNE ADI	YÜK (kN)	GERİLME (MPa)	ZAMAN (sn)
REF 1	3,88	9,10	48
REF 2	3,64	8,54	46
REF 3	3,38	7,93	48
ORTALAMA		8,52	

Tablo 6. 2. Referans 2 günlük ansys equivalent stress sonuçları

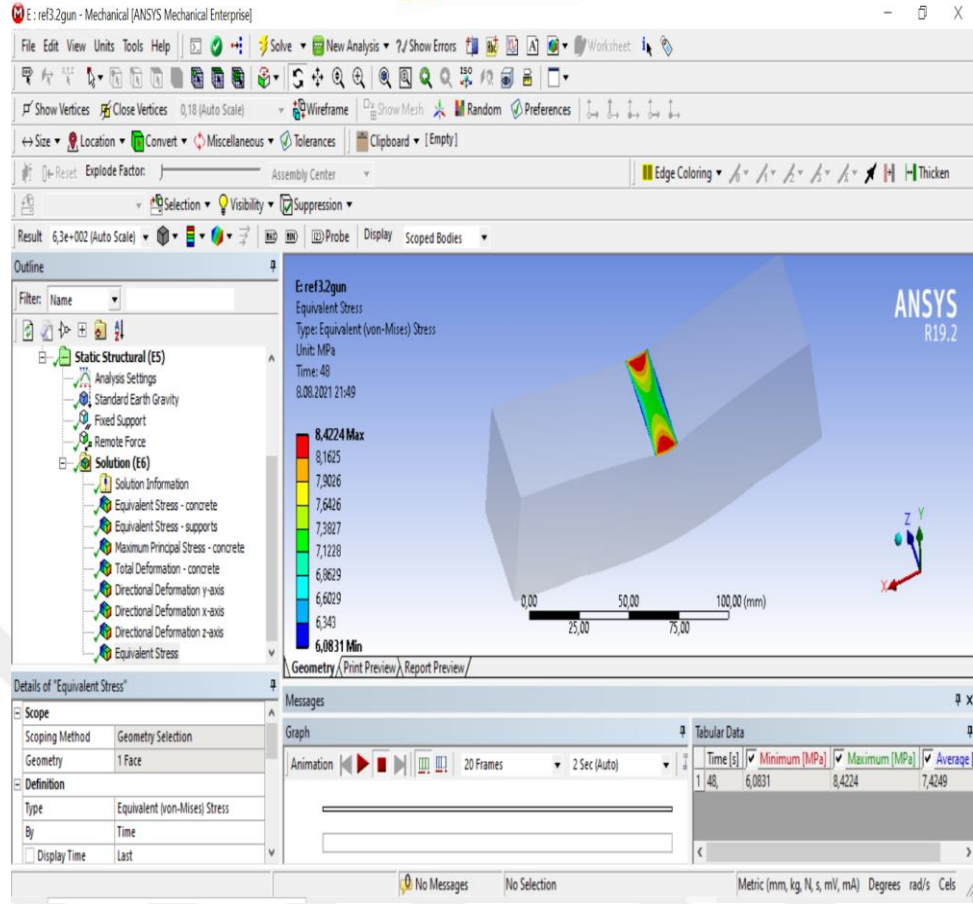
REFERANS KARIŞIM 2 GÜNLÜK ANSYS EQUIVALENT STRESS SONUÇLARI			
NUMUNE ADI	MİN(Mpa)	AVERAGE (MPa)	MAX(Mpa)
REF 1	6,98	8,52	9,67
REF 2	6,55	8,00	9,07
REF 3	6,08	7,42	8,42
ORTALAMA	6,54	7,98	9,05



Şekil 6. 2. Ref 1-2 günlük numune sonuçları



Şekil 6. 3. Ref 2-2 günlük numune sonuçları



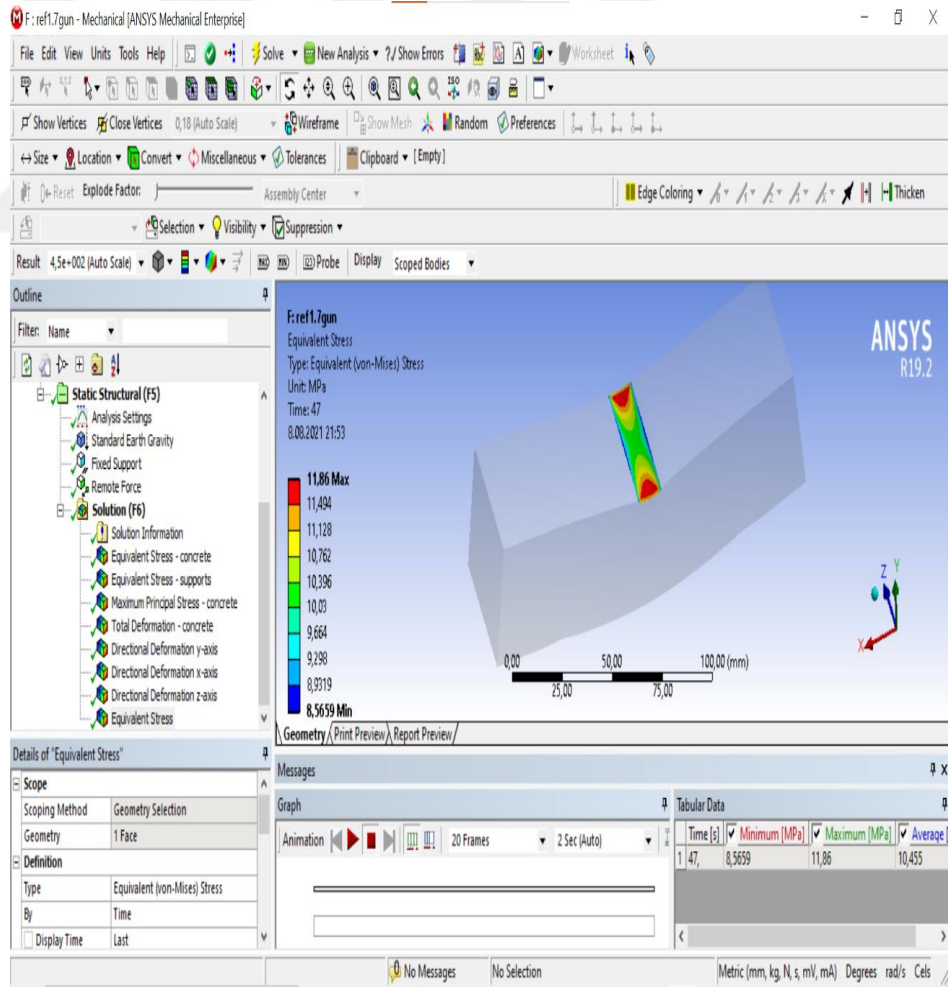
Şekil 6. 4. Ref 3-2 günlük numune sonuçları

Tablo 6. 3. Referans karışım 7 günlük eğilme dayanımı sonuçları

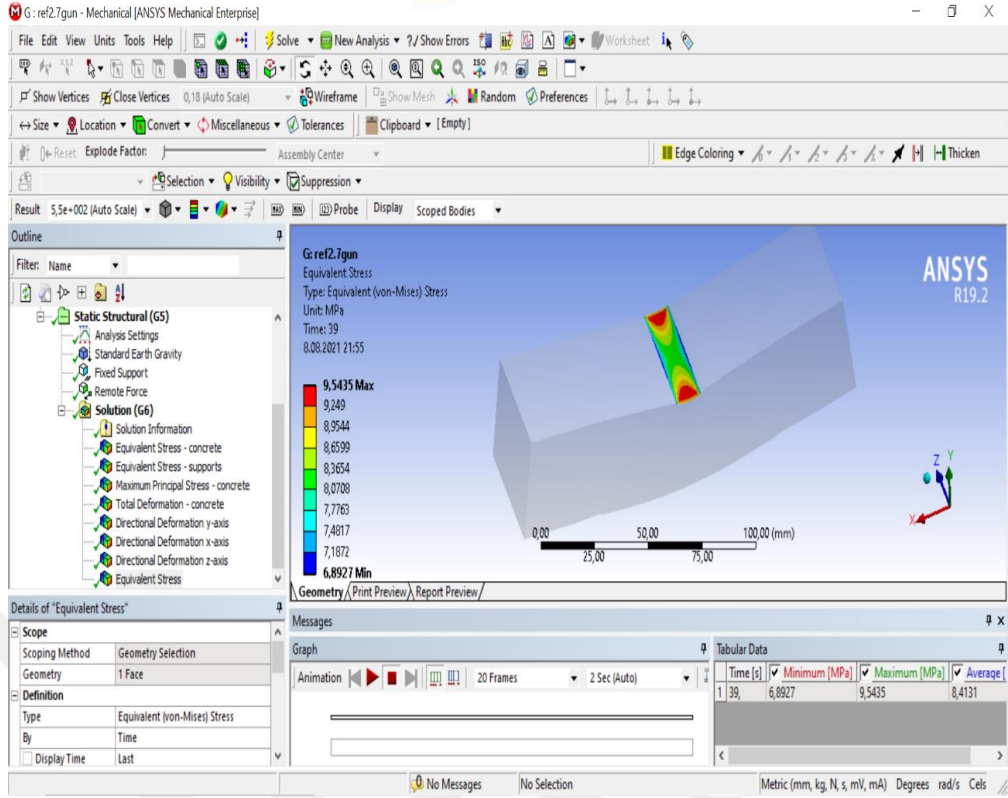
REFERANS KARIŞIM 7 GÜNLÜK EĞİLME DAYANIMI SONUÇLARI			
NUMUNE ADI	YÜK (kN)	GERİLME (MPa)	ZAMAN (sn)
REF 1	4,76	11,16	47
REF 2	3,83	8,98	39
REF 3	4,2	9,84	41
ORTALAMA		9,99	

Tablo 6. 4. Referans 7 günlük ansys equivalent stress sonuçları

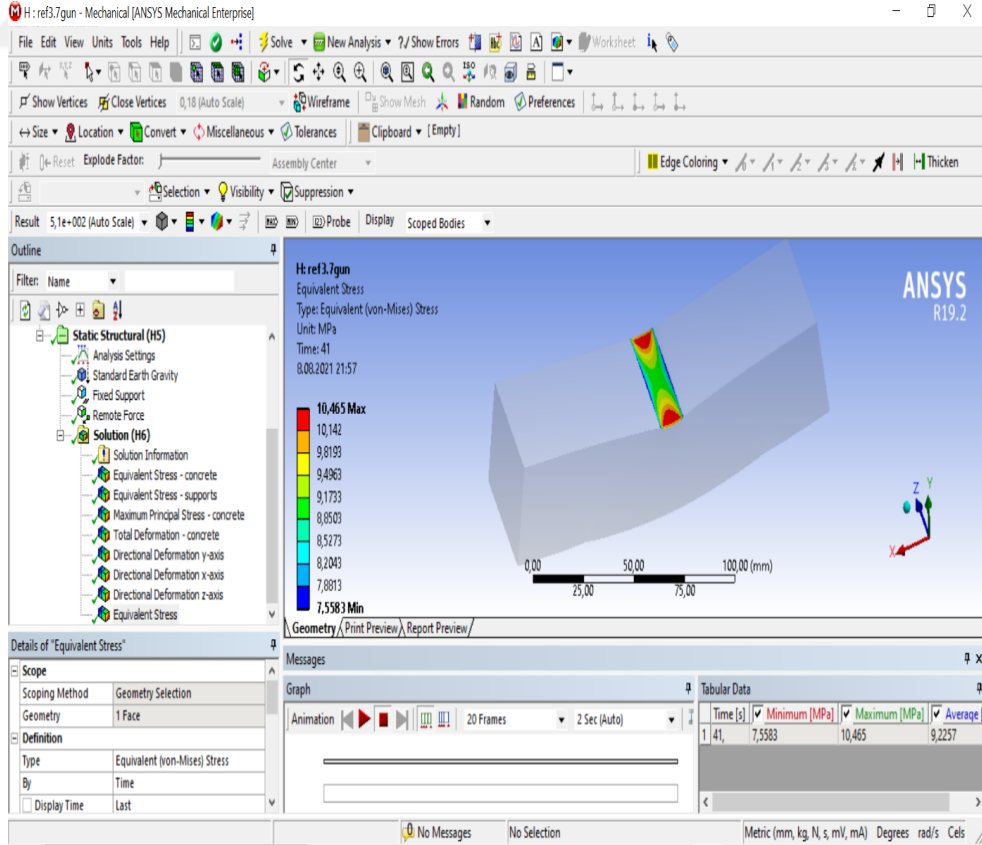
REFERANS KARIŞIM 7 GÜNLÜK ANSYS EQUIVALENT STRESS SONUÇLARI			
NUMUNE ADI	MİN(Mpa)	AVERAGE (MPa)	MAX(Mpa)
REF 1	8,57	10,46	11,86
REF 2	6,89	8,41	9,54
REF 3	7,56	9,23	10,47
ORTALAMA	7,67	9,37	10,62



Şekil 6. 5. Ref 1-7 günlük numune sonuçları



Şekil 6. 6. Ref 2-7 günlük numune sonuçları



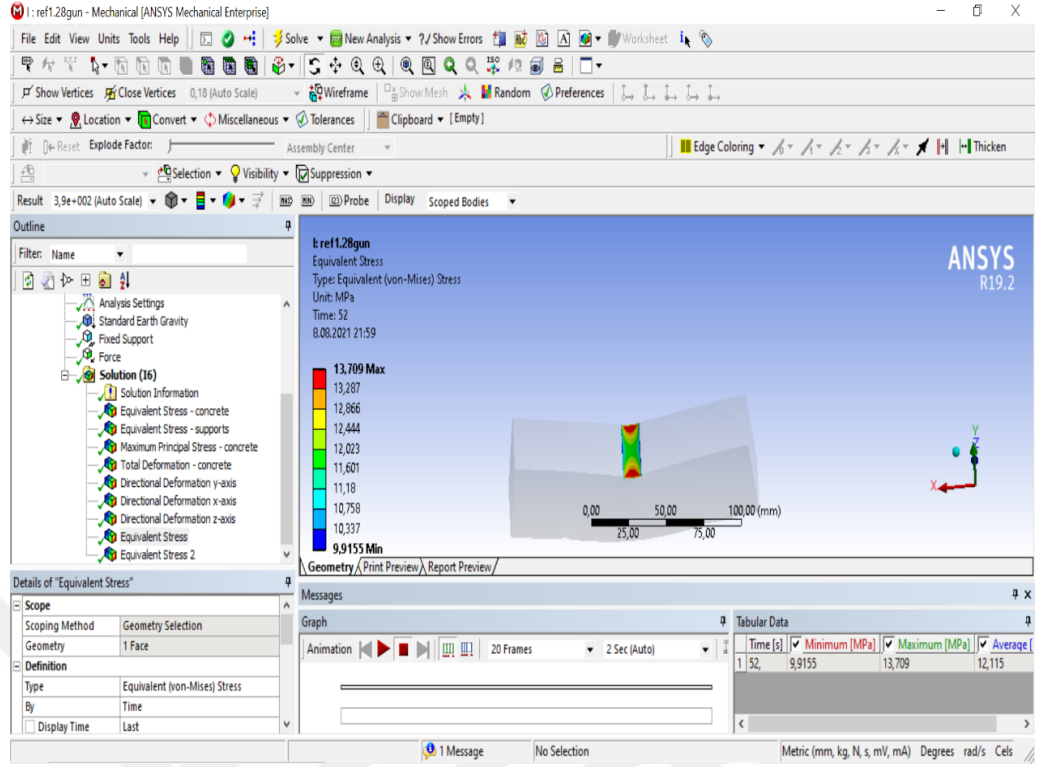
Şekil 6. 7. Ref 3-7 günlük numune sonuçları

Tablo 6. 5. Referans karışım 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları

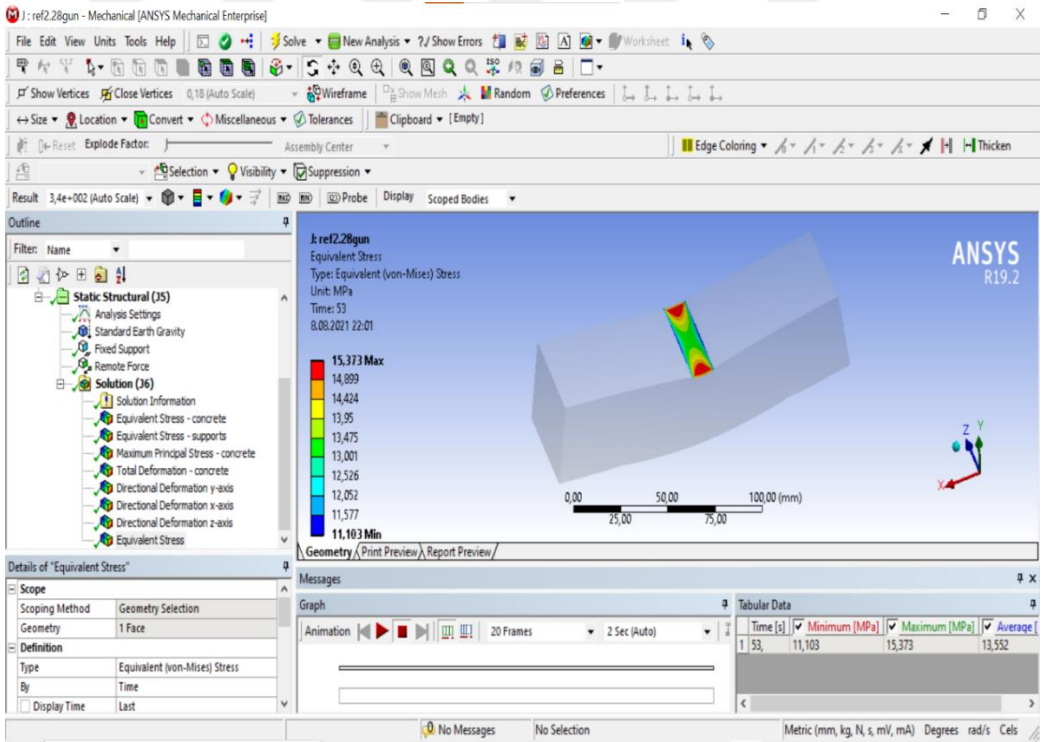
REFERANS KARIŞIM 28 GÜNLÜK EĞİLME DAYANIMI SONUÇLARI			
NUMUNE ADI	YÜK (kN)	GERİLME (MPa)	ZAMAN (sn)
REF 1	5,49	12,87	52
REF 2	6,17	14,46	53
REF 3	5,42	12,71	48
ORTALAMA		13,35	

Tablo 6. 6. Referans 28 günlük ansys equivalent stress sonuçları

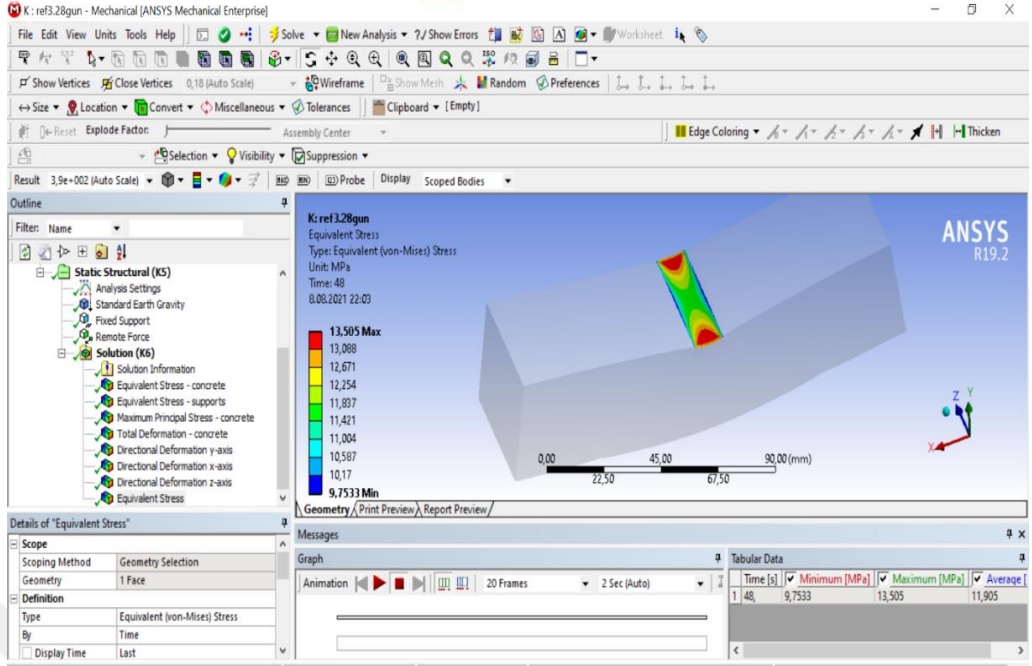
REFERANS KARIŞIM 28 GÜNLÜK ANSYS EQUIVALENT STRESS SONUÇLARI			
NUMUNE ADI	MİN(Mpa)	AVERAGE (MPa)	MAX(Mpa)
REF 1	9,92	12,12	13,71
REF 2	11,1	13,55	15,37
REF 3	9,75	11,91	13,51
ORTALAMA	10,26	12,53	14,2



Şekil 6. 8. Ref 1-28 günlük numune sonuçları

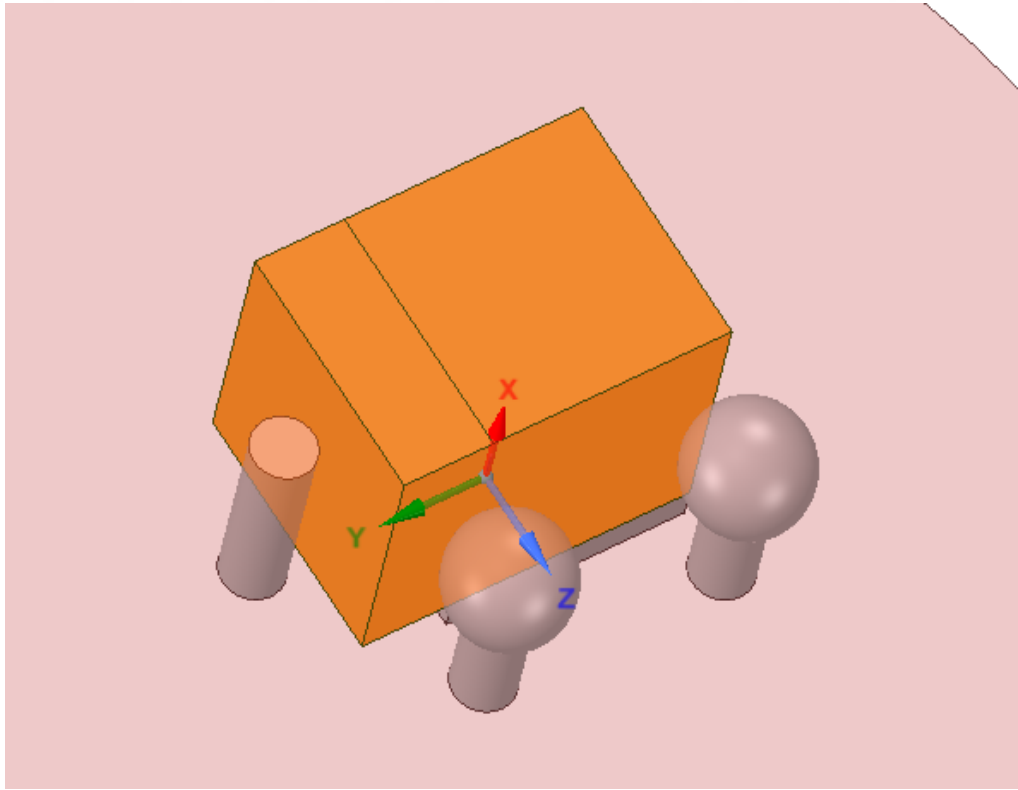


Şekil 6. 9. Ref 2-28 günlük numune sonuçları



Şekil 6. 10. Ref 3-28 günlük numune sonuçları

Programda çizilen basınç test cihazı ve numunenin işlem adımları görsellerle anlatılmıştır. Numunelere uygulanan basınç dayanımı sonuçları ve Ansys programında yapılan analiz sonuçları aşağıdaki resimlerde ve tablolarda verilmiştir.



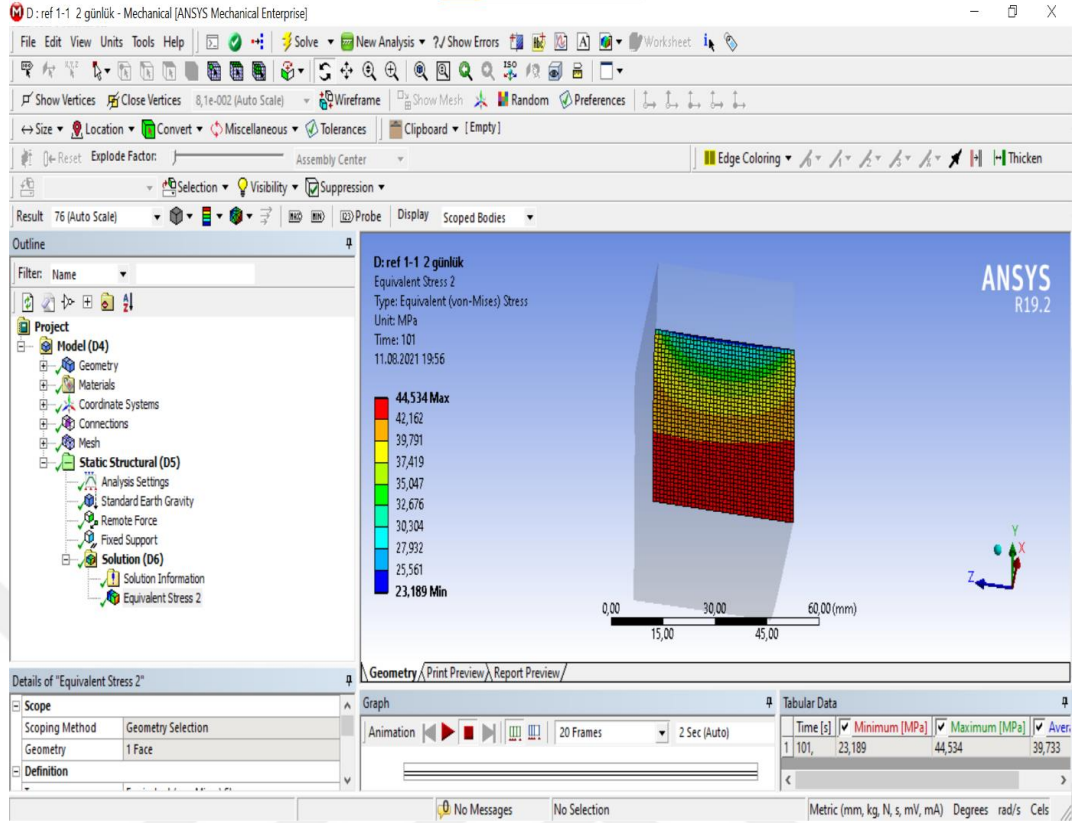
Şekil 6. 11. Basınç dayanımı test cihazı ve numune geometrisi

Tablo 6. 7. Referans karışım 2 günlük basınç dayanımı sonuçları

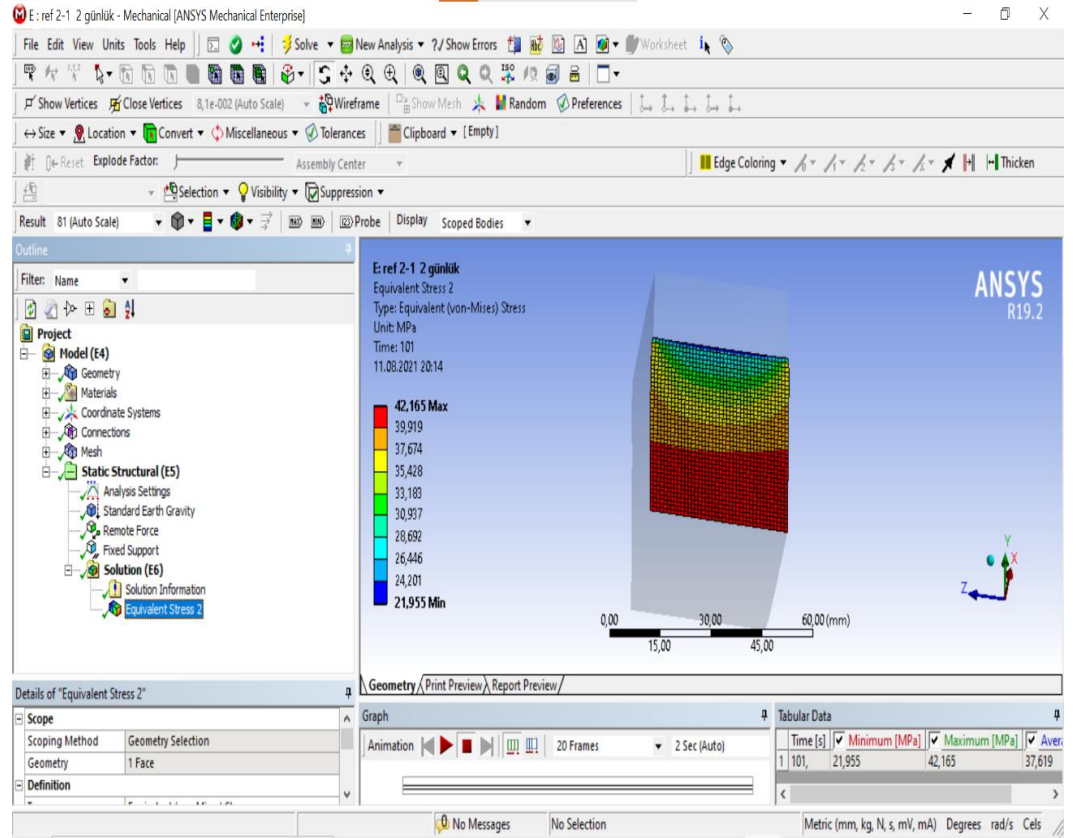
REFERANS KARIŞIM 2 GÜNLÜK BASINÇ DAYANIMI SONUÇLARI			
NUMUNE ADI	YÜK (kN)	GERİLME (MPa)	ZAMAN (sn)
REF 1-1	70,3	43,94	101
REF 2-1	56,36	35,22	99
REF 3-1	66,56	41,60	101
ORTALAMA		39,89	

Tablo 6. 8. Referans 2 günlük ansys equivalent stress sonuçları, basınç cihazı

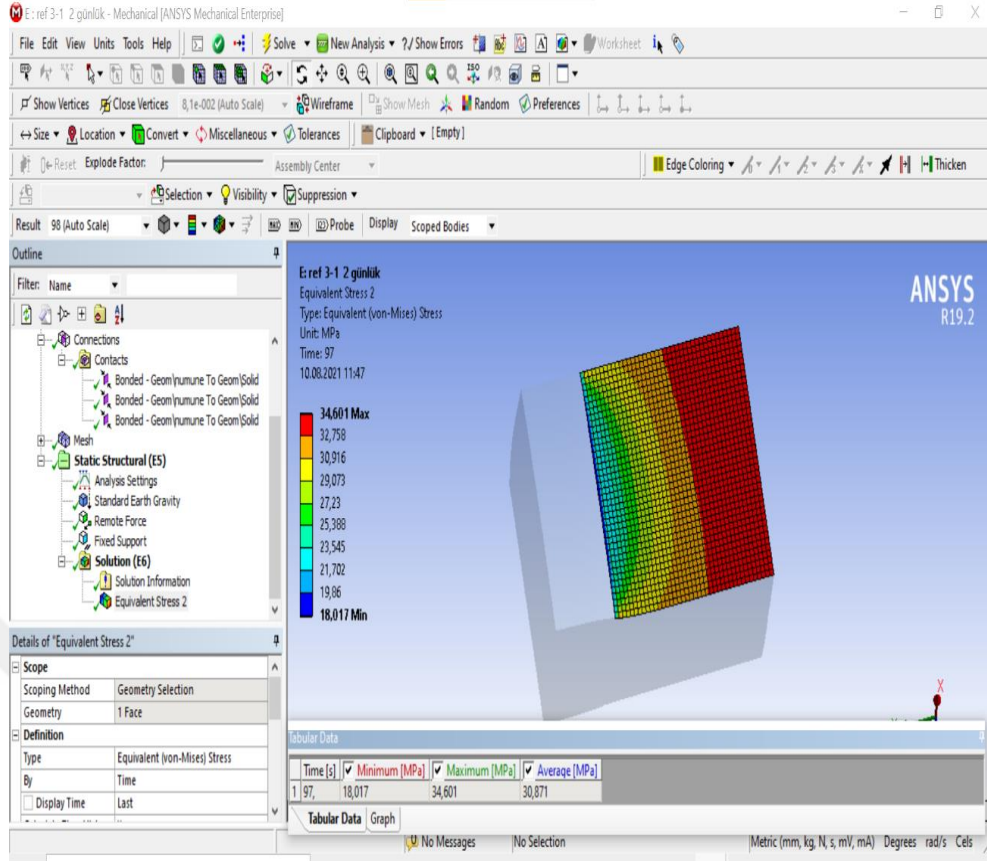
REFERANS KARIŞIM 2 GÜNLÜK ANSYS EQUIVALENT STRESS SONUÇLARI			
NUMUNE ADI	MİN(Mpa)	AVERAGE (MPa)	MAX(Mpa)
REF 1-1	23,19	39,73	44,53
REF 2-1	21,96	37,62	42,17
REF 3-1	18,02	30,87	34,6
ORTALAMA	21,06	36,07	40,43



Şekil 6. 12. Ref 1-1 2 günlük numune sonuçları



Şekil 6. 13. Ref 2-1 2 günlük numune sonuçları



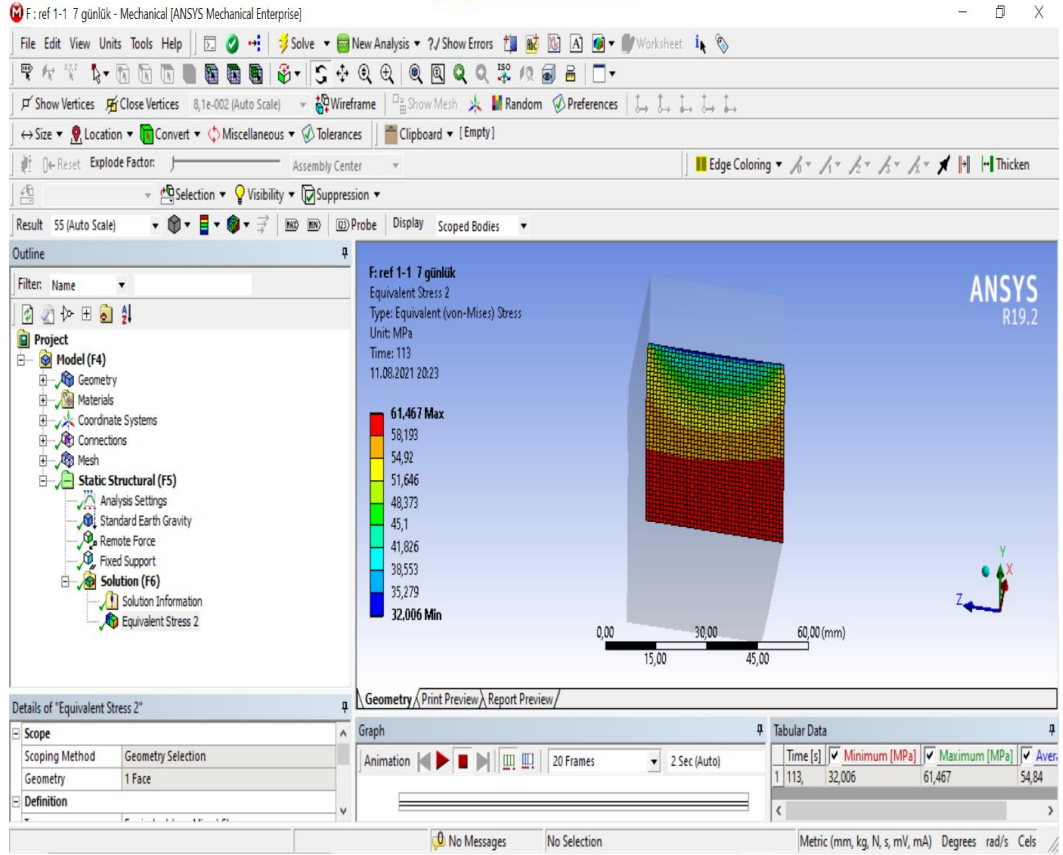
Şekil 6. 14. Ref 3-1 2 günlük numune sonuçları

Tablo 6. 9. Referans karışım 7 günlük basınç dayanımı sonuçları

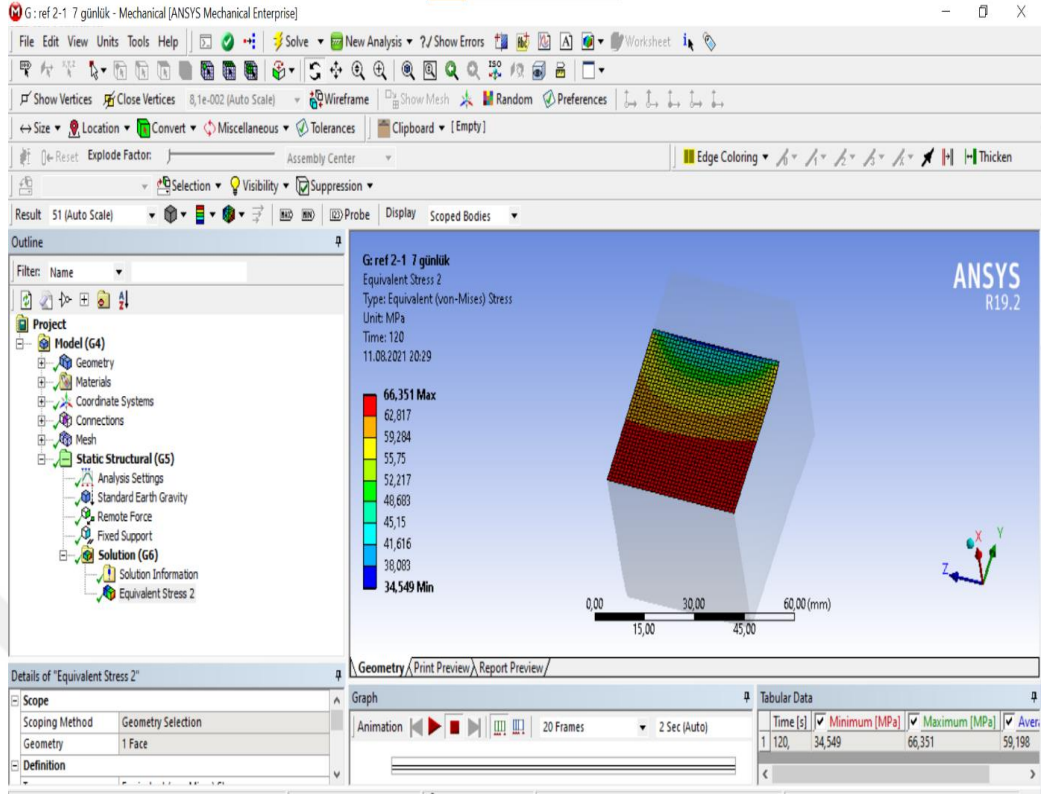
REFERANS KARIŞIM 7 GÜNLÜK BASINÇ DAYANIMI SONUÇLARI			
NUMUNE ADI	YÜK (kN)	GERİLME (MPa)	ZAMAN (sn)
REF 1-1	97,03	60,64	113
REF 2-1	102,06	63,79	118
REF 3-1	104,74	65,47	120
ORTALAMA		63,12	

Tablo 6. 10. Referans 7 günlük ansys equivalent stress sonuçları, basınç cihazı

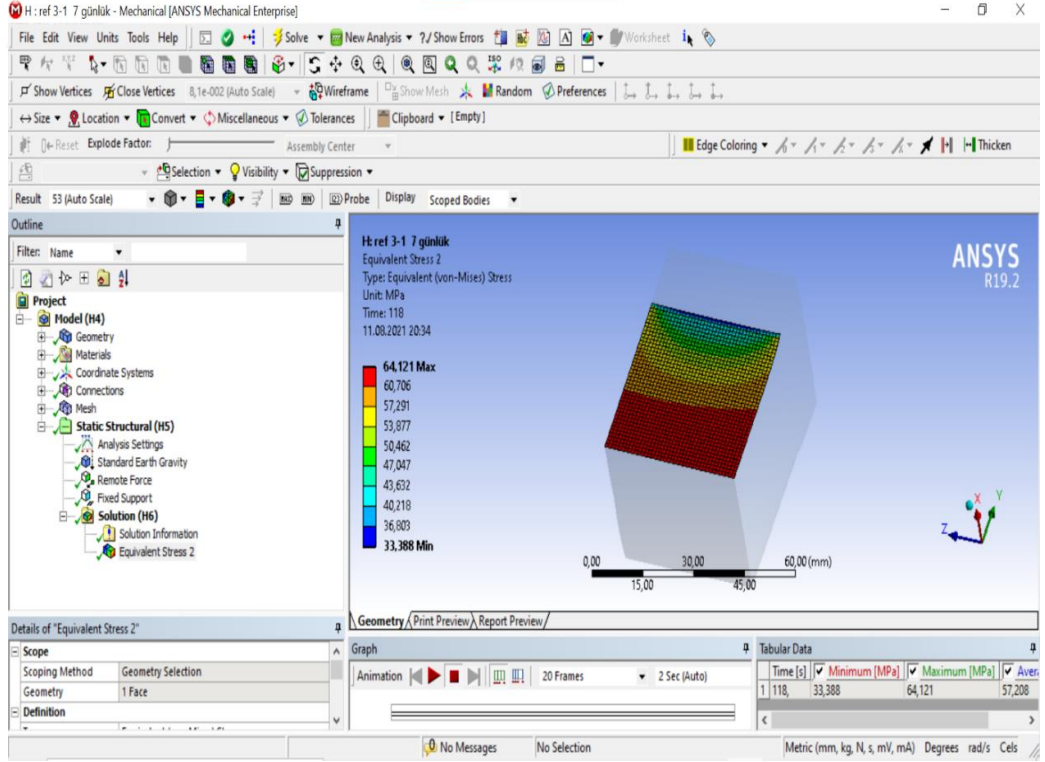
REFERANS KARIŞIM 7 GÜNLÜK ANSYS EQUIVALENT STRESS SONUÇLARI			
NUMUNE ADI	MİN(Mpa)	AVERAGE (MPa)	MAX(Mpa)
REF 1-1	32,01	54,84	61,47
REF 2-1	34,55	59,2	66,35
REF 3-1	33,39	57,21	64,12
ORTALAMA	33,32	57,08	63,98



Şekil 6. 15. Ref 1-1 7 günlük numune sonuçları



Şekil 6. 16. Ref 2-1 7 günlük numune sonuçları



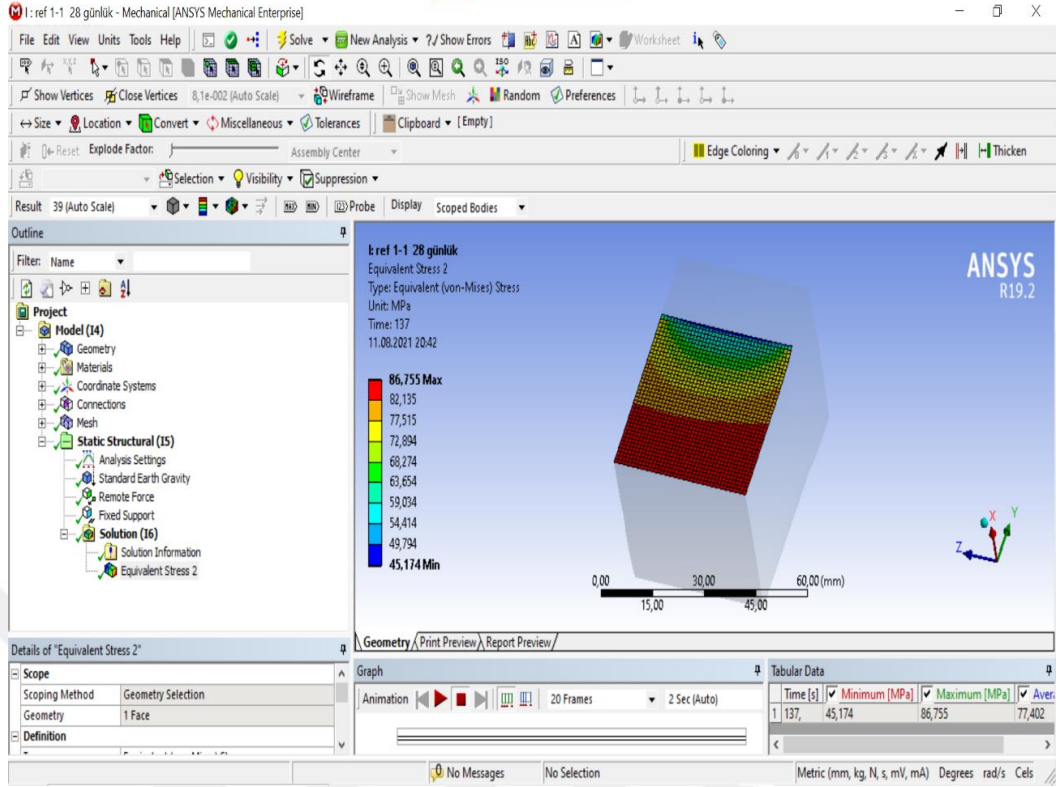
Şekil 6. 17. Ref 3-1 7 günlük numune sonuçları

Tablo 6. 11. Referans 28 günlük basınç dayanımı sonuçları

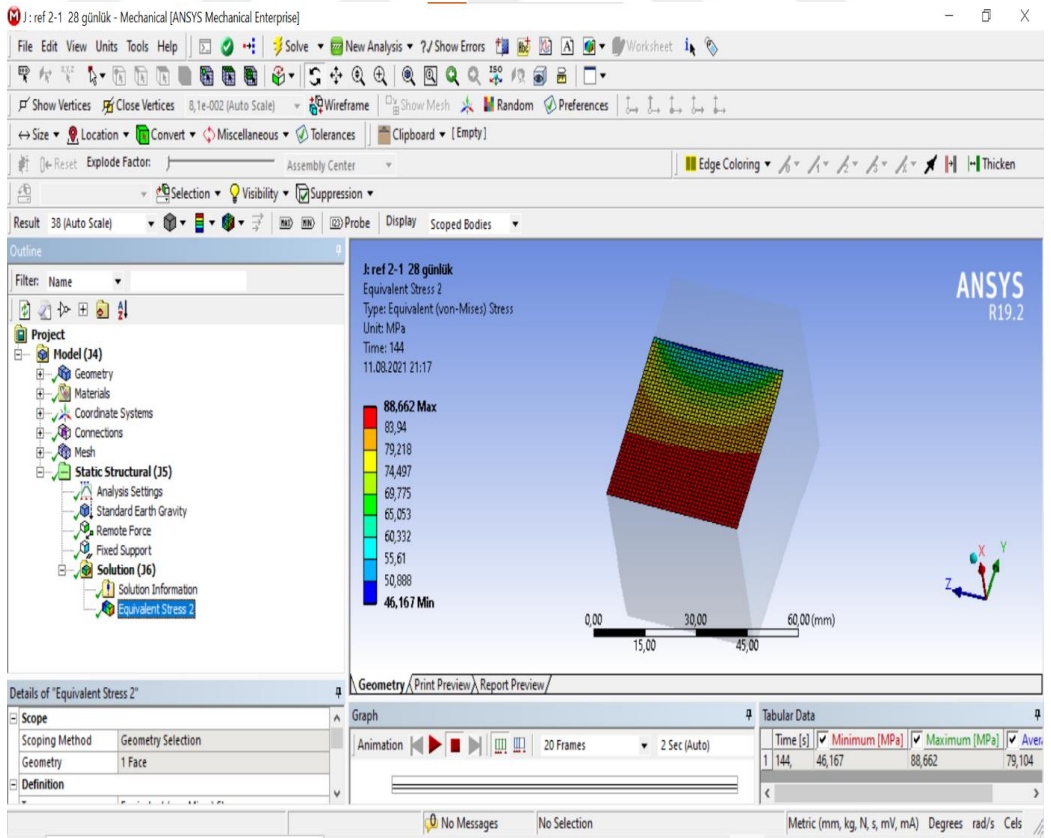
REFERANS KARIŞIM 28 GÜNLÜK BASINÇ DAYANIMI SONUÇLARI			
NUMUNE ADI	YÜK (kN)	GERİLME (MPa)	ZAMAN (sn)
REF 1-1	136,95	85,59	137
REF 2-1	139,14	86,96	140
REF 3-1	139,96	87,48	144
ORTALAMA		85,70	

Tablo 6. 12. Referans 28 günlük ansys equivalent stress sonuçları, basınç cihazı

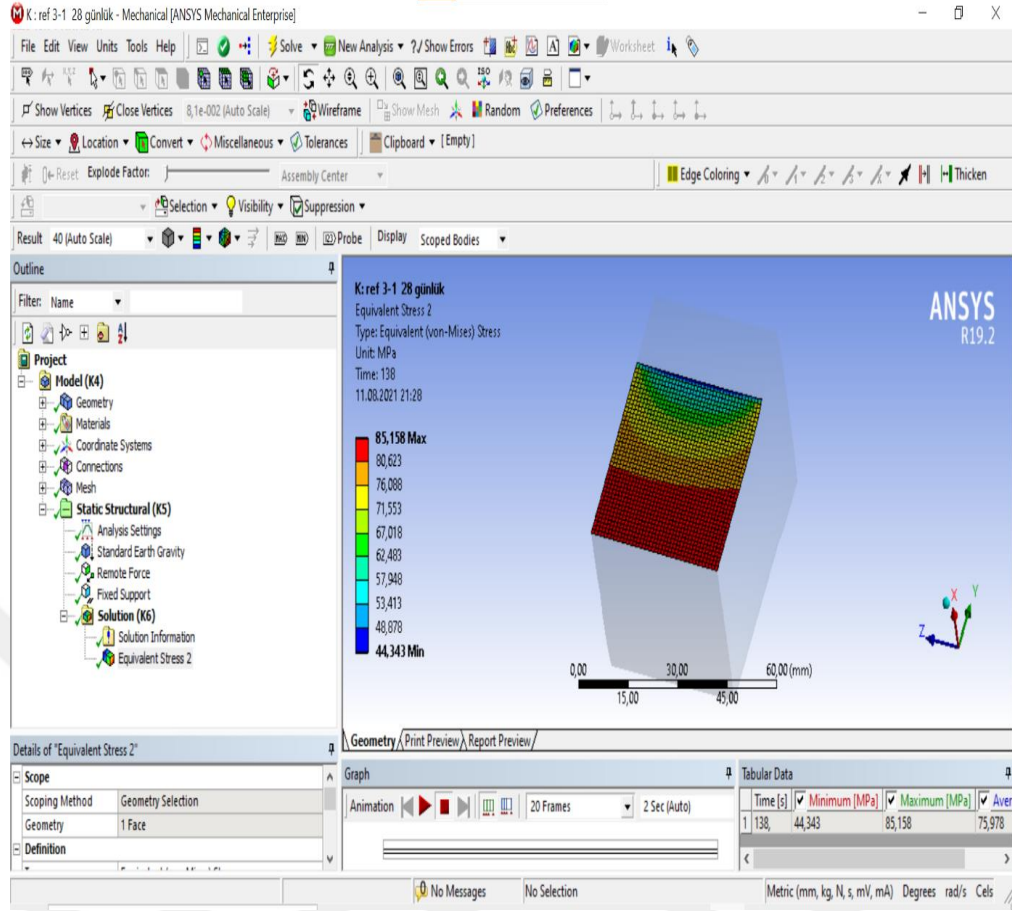
REFERANS KARIŞIM 28 GÜNLÜK ANSYS EQUIVALENT STRESS SONUÇLARI			
NUMUNE ADI	MİN(Mpa)	AVERAGE (MPa)	MAX(Mpa)
REF 1-1	45,17	77,40	86,76
REF 2-1	46,17	79,10	88,66
REF 3-1	44,34	75,98	85,16
ORTALAMA	45,23	77,49	86,86



Şekil 6. 18. Ref 1-1 28 günlük numune sonuçları



Şekil 6. 19. Ref 2-1 28 günlük numune sonuçları



Şekil 6. 20. Ref 3-1 28 günlük numune sonuçları

7. SONUÇLAR

Yapılan deneyler sonucunda;

- Mikronize kalsit katkısının çimentoya ikame olarak kullanıldığı göz önünde bulundurulurken mikronize kalsit oranı arttıkça basınç dayanımı düşmektedir. Referans karışım, %10 ve %20 mikronize kalsit katkılı numunelerde 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarının 80 MPa üstünde olduğu sonucuna varılmıştır.
- Mikronize kalsit oranı arttıkça eğilme dayanımı düşmektedir.
- İki farklı kür uygulanan numunelerde ise sonuçlar önemli derece farklılık göstermektedir. Su kürü uygulanan ilk serilerde eğilme dayanımı 14,46 MPa ve basınç dayanımı 87,48 MPa olarak kaydedilirken kimyasal kür uygulanan diğer serilerde eğilme dayanımı 12,1 MPa ve basınç dayanımı 64,54 MPa olarak görülmüştür. Kimyasal kürün betonun kalitesini düşürdüğü görülmektedir.
- Mikronize kalsit oranı arttıkça, ultrases geçiş hızına bağlı betonun kalitesinde düşüş görülmektedir.

- Ansys yapısal analiz sonuçlarında geometri cihaz ölçülerine uygun çizilmiş olup numunelere eğilme ve basınç test cihazlarında uygulanan yük (kN) girilerek deneylerde elde edilen sonuçlara yakın sonuçlar elde edilmiştir.
- İnşa edilebilirlik testini uygularken prototip sıkma aletinin tutuş yönünün önemi ilk denemelerde yapılan katman üstüne katman yöntemi sonucu numunede oluşan boşluklar ile fark edilmiştir.
- Mikronize kalsit katkısının erken yaşlardaki betonun dayanımına etkisi ilerleyen yaşlardaki etkisinden daha yüksek olduğu sonuçlardan çıkarılmaktadır.



KAYNAKÇA

Karakule, F., Akakın, T. ve Uçar, S. (2004). Türkiye’de ve Dünyada Hazır Beton Sektörü. THBB, 2004.

Erdoğan, S.T. ve Erdoğan, T.Y. (2007). Bağlayıcı malzemelerin ve betonun onbin yıllık tarihi. Ankara: Odtü Yayıncılık.

Gaimster, R. ve Dixon, N. (2003). Self-compacting concrete. Advanced concrete technology, 1-9

Erdoğan, T.Y. (2016). Beton. Ankara: Odtü Yayıncılık.

Baradan, B., Yazıcı, H.ve Aydın, S. (2015). Beton. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları No:334.

Şimşek, O. (2019). Yapı Malzemesi-2. Ankara: Seçkin Yayınları.

Engin, Y. ve Tarhan, M. (2012). TS EN 197-1:2012 Standardı’ndaki Değişiklikler. Hazır Beton.

Popovics, S. Concrete Materials: properties, specifications, and testing, Park Ridge RJ: Noyes Publications,1992.

TS EN 1008, Beton-Karma Suyu- Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları, T.S.E., Ankara, Nisan 2003.

ASTM C618, Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Pozzolan for Use As a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, ASTM International, 1991.

Erdoğan, S.T. ve Erdoğan, T.Y. (2007). Puzolanik Mineral Katkılar ve Tarihi Geçmişleri, 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, Ankara: Bildiriler Kitabı, 263-275.

TS EN 934-2+A1, Kimyasal Katkılar- Beton, Harç ve Şerbet için-Bölüm 2: Beton Kimyasal Katkıları- Tarifler, Gereklere, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme, T.S.E., Ankara, Nisan 2013.

Cho, S., Kruger, J., Zeranka, S. ve Zijl, G.V. (2019). 3D Printable Concrete Technology and Mechanics. Technical Paper, 158, 11-18.

Liu, G., Bai, E., Xu, J., Wang, T. ve Chang, S. (2019). Research Status and Development Prospect of 3D Printing Concrete Materials. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,267.

Khoshnevis, B. (2004). Automated Construction by Contour Crafting-Related Robotics and Information Technologies, Automation in Construction 13 (2004) 5-19.

Le, T.T., Austin, S.A., Lim, S., Buswell, R.A., Law, R., Gibb, A.G.F. ve Thorpe, T. (2012). Hardened Properties of High-Performance Printing Concrete, Cement and Concrete Research 42 (2012) 558-566.

Schutter, D.G., Lesage, K., Mechtcherine, V., Nerella, V.N., Habert, G. ve Juan, I.A. (2018). Vision of 3D Printing with Concrete- Technical, Economic and Environmental Potentials, Cement and Concrete Research 112 (2018) 25-36.

Zou, S., Xiao, J., Ding, T., Duan, Z. ve Zhang, Q. (2021). Printability and Advantages of 3D Printing Mortar with 100% Recycled Sand, Constuction and Building Materials 273(2021)121699.

Malaeb, Z., Hachem, H., Tourbah, A., Maalouf, T., Zarwi, N.E. ve Hamzeh, F. (2015). 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design, IJCIET Volume 6, Issue 6, June (2015), Pp. 14-22.

Ma, G., Salman, N.M., Wang, L. ve Wang, F. (2020). A Novel Additive Mortar Leveraging Internal Curing For Enhancing Interlayer Bonding Of Cementitious Composite For 3D Printing, Constuction and Building Materials 244 (2020) 118305.

Marchment, T., ve Sanjayan, J. (2020). Mesh Reinforcing Method For 3D Concrete Printing, Automation in Construction 109 (2020) 102992.

Uygunoğlu, T. ve Özgüven, S.B. (2019). İnşaat Mühendisliği 3D Teknolojisinde Kullanılan Harçların Reolojik Özelliklerinin Araştırılması, International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry 3:2 (2019) 189-197.

Durmuş, G. ve Bekem, İ. (2015). Kalsitin İnce Agregaya İkamesi Olarak Kullanımının Beton Sürdürülebilirliğine Etkisi, 2nd International Sustainable Buildings Symposium, May (2015) 309-313.

Kara B.İ. (2020). Kalsitin Çimento İkame Malzemesi Olarak Kullanımının Basınç Dayanımına Etkisi, Journal of Investigations on Engineering & Technology Volume 3, Issue 1, 10-16, 2020.

Akkaya, Y. ve Kesler, Y.E. (2012). Mikrokalsit Katkısının Betonun İşlenebilirliğine, Mekanik Özelliklerine ve Dayanıklılığına Etkisi, İMO Teknik Dergi, 2012 6051-6061, Yazı 384.

Uçurum, M. (2015) Kalsit Madenciliğinin Geleceğinde Optik Ayırma Teknolojilerinin Yeri ve Önemi, Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 4, Sayı 1, (2015), 40-46.

Hojati, M., Nazarian, S., Duarte, J.P., Radlińska, A., Ashrafi, N., Craveiro, F. ve Bilén, S. (2018). 3D Printing of Concrete: A Continuous Exploration of Mix Design and Printing Process, 42nd IAHS WORLD CONGRESS The housing for the dignity of mankind 10-13th April 2018 Naples, Italy.

TS EN 12504-4,2004. Beton deneyleri- Bölüm 4: Ultrases geçiş hızının tayini. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.

TS EN 1015-3, 2000. Kâgir harcı- Deney metotları- Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayıma tablası ile). Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.

TS EN 196-1, 2016. Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım tayini. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.

TS EN 12350-6, 2019. Beton- Taze beton deneyleri- Bölüm 6: Yoğunluk. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.

TS EN 772-11,2011. Kâgir birimler- Deney metotları- Bölüm 11: Betondan, yapay ve doğal taştan yapılmış kâgir birimlerde kapiler su emme ve kil kâgir birimlerde ilk su emme hızının tayini. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.

Le, T.T., Austin, S.A., Lim, S., Buswell, R.A., Law, R., Gibb, A.G.F. ve Thorpe, T. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete, Materials and Structures (2012) 45:1221–1232.

Kazemian, A., Yuan, X., Meier, R., Cochran, E., Khoshnevis, B. (2017). Construction-Scale 3d Printing: Shape Stability Of Fresh Printing Concrete, Proceedings

of the ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference, MSEC2017, June 4-8, 2017, Los Angeles, CA, USA.

Özalp, F., Yılmaz, H.D., Şenol, Y. (2018). 3d Yazıcı Teknolojisine Uygun Sürdürülebilir ve Yenilikçi Betonların Geliştirilmesi, Hazır Beton Dergisi,2018, 1300-8390, 25, 149, 62-70.



ÖZGEÇMİŞ

Ceyda AYGÜN

İnşaat Mühendisi

DENEYİM

07.2021-...	Teknik Ofis Mühendisi BTSOBursa Yatırım A.Ş. (Sürekli/Tam Zamanlı) Bursa, Türkiye
06.2020-12.2020	Kesin Hesap Mühendisi (7 ay) BAYBURT GROUP (Sürekli/Tam Zamanlı) Kütahya, Türkiye
12.2018-07.2019	Kontrol Mühendisi (8 ay) Turna Yapı Denetim (Yarı Zamanlı) Eskişehir, Türkiye
06.2018-07.2018	Ulaştırma-Hidrolik Stajı (2 ay) Karayolları 14. Bölge Müdürlüğü Kütahya, Türkiye
07.2016-08.2016	Büro-Şantiye Stajı (2 ay) İres İnşaat Bursa, Türkiye
06.2015-07.2015	Büro-Şantiye Stajı (2 ay) Torun Holding, Torunlar İnşaat İstanbul, Türkiye

EĞİTİM

09.2018-...	Yapı Malzemeleri ABD-İnşaat Mühendisliği Bilim Dalı 3.70/4.00 Eskişehir Teknik Üniversitesi (Eskişehir, Türkiye)
09.2014-06.2018 2.69/4.00	Mühendislik Fakültesi - İnşaat Mühendisliği Dumlupınar Üniversitesi (Kütahya, Türkiye)
09.2010-06.2014	Orhangazi Anadolu Öğretmen Lisesi (88/100)

YETENEKLER/YETKİNLİKLER

Dil: İngilizce (Orta), Almanca (Başlangıç)

Programlar: Microsoft Office, Ansys, SAP2000, Autocad.