



**GENLEŞTİRİLMİŞ PERLİT İÇEREN GEOPOLİMER BAĞLAYICILI ISI
YALITIM PANELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Damla Nur ÇELİK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2018

Damla Nur ÇELİK tarafından hazırlanan “GENLEŞTİRİLMİŞ PERLİT İÇEREN GEOPOLİMER BAĞLAYICILI ISI YALITIM PANELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Gökhan DURMUŞ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hacettepe Üniversitesi

.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 24/12/2018

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Damla Nur ÇELİK

24/12/2018

GENLEŞTİRİLMİŞ PERLİT İÇEREN GEOPOLİMER BAĞLAYICILI ISI YALITIM PANELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Damla Nur ÇELİK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2018

ÖZET

Tez çalışmasında, enerji kullanımının azaltılması ve enerjinin korunumu amacıyla yeni nesil geliştirilmiş perlit esaslı ısı yalıtım paneli geliştirilmiştir. Granüler ve toz geliştirilmiş perlit 1:5, 2:4, 3:3, 4:2 oranında kullanılmıştır. Bağlayıcıların ısı iletkenliğe etkisi ve en uygun bağlayıcı oranının belirlenmesi için sodyum silikat ve (6, 8, 10 ve 12M) sodyum hidroksit çözeltisi kullanılmıştır. Hazırlanan panellerin fiziksel, mekanik, ısı iletkenlik özelliklerinin belirlenmesi için deneyler yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, en düşük ısı iletkenlik, 1:5 granüler ve toz GP içeren, 6M sodyum hidroksit ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 1,5 oranı kullanılarak hazırlanan A10 numaralı panelde 49,19 mW/m.K olarak ölçülmüştür. En yüksek basınç dayanımı ise 2:4 granüler ve toz GP içeren, 12M sodyum hidroksit ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 2,5 oranı kullanılarak hazırlanan D8 numaralı panelde 147,739 kPa olarak ölçülmüştür. Elde edilen verilere göre, iki farklı tane yapısına sahip GP esaslı ısı yalıtım panellerinde granüler ve toz GP oranının, sodyum hidroksit derişiminin ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının artmasıyla birlikte görünür yoğunluk ve basınç dayanımı artarken, ısı iletkenlik olumsuz yönde etkilenmiştir. Ek olarak, panel yoğunluklarının ısı iletkenlik değerleri üzerine doğrudan etkisi olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre, GP esaslı ısı yalıtım panelleri ile ilgili daha fazla çalışma yapılmasının tavsiye edilmesinin yanı sıra mevcut durumda yapı sektöründe yalıtım paneli olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 91127

Anahtar Kelimeler : Genleştirilmiş Perlit, Isı Yalıtım Paneli, Geopolimer

Sayfa Adedi : 161

Danışman : Doç. Dr. Gökhan DURMUŞ

DEVELOPING THERMAL INSULATION PANELS WITH EXPANDED PERLITE
BASED GEOPOLYMER BINDER

(M. Sc. Thesis)

Damla Nur ÇELİK

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2018

ABSTRACT

In the thesis study, a new generation of expanded perlite based thermal insulation panel has been developed in order to reduce energy use and to preserve energy. Granular and fine expanded perlite was used in 1:5, 2:4, 3:3, 4:2 ratios. Sodium silicate and (6, 8, 10 and 12M) sodium hydroxide solution were used to determine the optimum binding ratio and the effect of the binders on the thermal conductivity. Physical, mechanical and thermal properties of the samples were determined. As a result of the experimental studies, the lowest thermal conductivity was measured on A10 panel as 49.19 mW/m.K in 1:5 granular and fine expanded perlite ratio with 6M sodium hydroxide and Na₂SiO₃/NaOH 1,5 ratio. The highest compressive strength was measured on D8 panel as 147,739 kPa in 2:4 granular and fine expanded perlite ratio with 12M sodium hydroxide and Na₂SiO₃/NaOH 2,5 ratio. According to these results, the increase in the ratio of coarse and fine expanded perlite, NaOH concentration and Na₂SiO₃/NaOH ratio in expanded perlite based thermal insulation panels with two different sizes, negatively affected the thermal conductivity while increasing the density and compressive strength. In addition, sample densities have a direct effect on thermal conductivity values. According to these results, it has been determined that expanded perlite based thermal insulation panels can be used as insulation panel in the construction sector, besides recommending further studies on the subject.

Science Code : 91127

Key Words : Expanded Perlite, Thermal Insulation Panel, Geopolymer

Page Number : 161

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Gökhan DURMUŞ

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazım aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Gökhan DURMUŞ'a araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Ümit AĞBULUT'a, Sayın Atatollah Khanlari'ye, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim. 115M041 numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında sağlanan maddi destekler için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na, proje yöneticisi ve araştırmacılarına ayrıca teşekkür ederim. Yüksek Lisans tez jürime katılan sayın Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN ve Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU'na teşekkür ederim. Bu araştırma süresince deneysel çalışmalarında beni yalnız bırakmayan başta sevgili annem Döndü ÇELİK, sevgili babam İbrahim ÇELİK ve tüm aileme maddi ve manevi desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
2.1. Isı Yalıtımı ve Enerji Sektörü.....	5
2.1.1. Isı yalıtımı ile ilgili temel kavramlar	8
2.1.2. Türkiye’de uygulanan ısı yalıtım standartları	10
2.1.3. Isı yalıtım sektöründe kullanılan paneller.....	12
2.1.4. Isı yalıtım panellerinin sahip olması gereken özellikler	26
2.1.5. Isı yalıtımın yapı sektöründeki önemi.....	28
2.2. Isı Yalıtımının Matematiksel Modellerle Belirlenmesi	28
2.2.1. Geometrik ortalama model	29
2.2.2. Maxwell modeli	30
2.2.3. Nielsen modeli	31
2.2.4. Halphin-Tsai modeli	32
2.2.5. Levy modeli	33
2.2.6. Efektif ortam teori (EMT) modeli.....	33
2.2.7. Krischer yaklaşımı	34

	Sayfa
2.2.8. Russell modeli.....	34
2.2.9. Cheng ve Vachon teorik modeli	35
2.3. Genleştirilmiş Perlit.....	35
2.3.1. Perlit ve genleştirilmiş perlitin üretim yöntemleri	36
2.3.2. Türkiye’de bulunan mevcut perlit rezervleri	37
2.3.3. Dünya’da bulunan mevcut perlit kaynakları, rezervler ve tüketim.....	39
2.3.4. Türkiye’de perlit ile ilgili bulunan mevzuatlar	40
2.3.5. Genleştirilmiş perlitin fiziksel ve kimyasal özellikleri	41
2.3.6. Genleştirilmiş perlitin kullanım alanları	46
2.4. Alçı	55
2.5. Silis Dumanı	57
2.6. Geopolimer Malzemeler	61
2.6.1. Geopolimer malzemelerin mekanik özellikleri.....	72
2.6.2. Geopolimer malzemelerin ısı iletkenlikleri	75
2.6.3. Geopolimer malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri	76
3. MALZEME VE YÖNTEM	79
3.1. Malzeme	79
3.1.1. Genleştirilmiş perlit	79
3.1.2. Geopolimer bağlayıcı.....	81
3.1.3. Alçı.....	82
3.1.4. Silis dumanı	83
3.2. Yöntem	83
3.2.1. Agregaların tane büyüklüğü dağılımının tayini	83
3.2.2. Agregaların gevşek yığın yoğunluğunun ve boşluk hacminin tayini.....	84
3.2.3. Isı yalıtım panelinin hazırlanması	85
3.2.4. GP esaslı ısı yalıtım panellerinin gruplandırılması	92

	Sayfa
3.2.5. Isı yalıtım panellerinde görünür yoğunluk tayini.....	93
3.2.6. Isı yalıtım panellerinde uzunluk ve genişlik tayini	94
3.2.7. Isı yalıtım panellerinde kalınlık tayini	94
3.2.8. Isı yalıtım panellerinde yüzey düzlüğünün tayini.....	95
3.2.9. Isı yalıtım panellerinin basınç altındaki davranışın tayini	96
3.2.10. Isı iletim katsayısının ölçülmesi.....	97
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	101
4.1. GP Esaslı Isı Yalıtım Panelinin Numune Özelliklerinin Belirlenmesi.....	101
4.1.1. Tane büyüklüğü dağılımının tayini.....	101
4.1.2. Gevşek yığın yoğunluğunun ve boşluk hacminin tayini.....	104
4.1.3. Görünür yoğunluk değerleri.....	105
4.1.4. Uzunluk, genişlik ve kalınlık tayini	107
4.1.5. Yüzey düzlüğünün tayini	109
4.2. GP Esaslı Isı Yalıtım Paneller Üzerinde Yapılan Mekanik Deneyler	109
4.2.1. 6M NaOH ile hazırlanan panellerin eğilme dayanımı değerleri.....	109
4.2.2. 6M NaOH ile hazırlanan panellerin basınç dayanımı değerleri.....	110
4.2.3. 8M NaOH ile hazırlanan panellerin eğilme dayanımı değerleri.....	111
4.2.4. 8M NaOH ile hazırlanan panellerin basınç dayanımı değerleri.....	112
4.2.5. 10M NaOH ile hazırlanan panellerin eğilme dayanımı değerleri.....	113
4.2.6. 10M NaOH ile hazırlanan panellerin basınç dayanımı değerleri.....	114
4.2.7. 12M NaOH ile hazırlanan panellerin eğilme dayanımı değerleri.....	115
4.2.8. 12M NaOH ile hazırlanan panellerin basınç dayanımı değerleri.....	116
4.2.9. Bağlayıcı oranının panellerin basınç dayanımına etkisi	118
4.2.10. Silis dumanı ilavesinin panellerin fiziksel, mekanik ve ısıl özelliklere etkisi	121
4.3. GP Esaslı Isı Yalıtım Panelinin Isıl İletkenlik Değeri.....	123

	Sayfa
4.3.1. 6M NaOH ile hazırlanan panellerin ısı iletkenlik değerleri.....	123
4.3.2. 8M NaOH ile hazırlanan panellerin ısı iletkenlik değerleri.....	124
4.3.3. 10M NaOH ile hazırlanan panellerin ısı iletkenlik değerleri.....	125
4.3.4. 12M NaOH ile hazırlanan panellerin ısı iletkenlik değerleri.....	126
4.3.5. Bağlayıcı oranının panellerin ısı iletkenlik değerine etkisi.....	128
4.4. Matematiksel Model ile Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması	132
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	135
KAYNAKLAR	145
ÖZGEÇMİŞ	159

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Bazı ülkelerdeki enerji yoğunluğu ve kişi başına düşen enerji tüketimi değerleri	7
Çizelge 2.2. Duvar, döşeme ve çatı uygulamalarında kullanılan yalıtım panelleri	12
Çizelge 2.3. Yapı elemanlarına ait ısı iletkenlik değerleri.....	13
Çizelge 2.4. XPS panelinin genel özellikleri	14
Çizelge 2.5. EPS panelinin genel özellikleri.....	15
Çizelge 2.6. Cam yünü panelinin genel özellikleri	16
Çizelge 2.7. Taş yünü panelinin genel özellikleri.....	17
Çizelge 2.8. Poliüretan panelinin genel özellikleri	18
Çizelge 2.9. Ahşap lifli panelin genel özellikleri.....	19
Çizelge 2.10. Cam köpüğü panelinin genel özellikleri	20
Çizelge 2.11. Fenol köpüğü panelinin genel özellikleri	21
Çizelge 2.12. Mantar panelinin genel özellikleri	21
Çizelge 2.13. Isı yalıtım panellerinin ısı iletkenlik katsayıları ve yangına tepki sınıfları	22
Çizelge 2.14. 30 °C’de ölçüm yapılan panellerin ısı iletkenlik değerleri.....	24
Çizelge 2.15. Isı yalıtım panellerinde optimum kalınlık değerleri	24
Çizelge 2.16. Panellere göre optimum yalıtım kalınlık değerleri	26
Çizelge 2.17. W değer listesi	32
Çizelge 2.18. Vm değer listesi	32
Çizelge 2.19. Perlit sektöründe tüketim oranları	38
Çizelge 2.20. Ülkelerin sahip olduğu perlit rezervleri	39
Çizelge 2.21. Ülkelere bağlı olarak perlit üretim miktarları	39
Çizelge 2.22. Genleştirilmiş perlit hazırlama aşamasındaki test prosedürleri	40
Çizelge 2.23. Perlitle ilgili TSE standartları	40

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.24. Genleştirilmiş perlitin fiziksel özellikleri	41
Çizelge 2.25. Genleştirilmiş perlitin kimyasal özellikleri	42
Çizelge 2.26. Yapı sektöründe perlit kullanılarak üretilen yapı malzemelerinin birim hacim ağırlıkları	44
Çizelge 2.27. Farklı malzemelere ait özgül yüzey alanı değerleri	59
Çizelge 3.1. Granüler ve toz GP ısı karakterizasyon sonuçları	79
Çizelge 3.2. Karışımındaki GP numuneleri için ısı iletkenlik değerleri	80
Çizelge 3.3. GP'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	80
Çizelge 3.4. Granüler ve toz GP kimyasal bileşim oranları.....	81
Çizelge 3.5. Sodyum silikatın genel özellikleri	81
Çizelge 3.6. NaOH'un genel özellikleri.....	82
Çizelge 3.7. Alçının genel özellikleri	82
Çizelge 3.8. Silis dumanı kimyasal bileşim oranları.....	83
Çizelge 3.9. Karışım süresinin ısı iletkenliğe etkisi.....	89
Çizelge 3.10. LINSEIS HFM300 cihaz teknik özellikleri	98
Çizelge 4.1. Toz GP elek analizi sonuçları	102
Çizelge 4.2. Granüler GP elek analizi sonuçları	102
Çizelge 4.3. GP karışımı elek analizi sonuçları	103
Çizelge 4.4. Gevşek yığın yoğunluğunun tayin sonuçları	104
Çizelge 4.5. Boşluk yüzdesi tayin sonuçları	104
Çizelge 5.1. Numunelerin basınç dayanımlarındaki yüzdesel değişim değerleri	139
Çizelge 5.2. Numunelerin ısı iletkenlik değerlerindeki yüzdesel değişim değerleri	140
Çizelge 5.3. Matematiksel modeller ile elde edilen ısı iletkenlik değerleri.....	140

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. EIGM enerji istatistikleri Nisan 2017 raporu	6
Şekil 2.2. Binalarda enerji tüketim dağılımı	7
Şekil 2.3. İletim, taşınım ve ısınım ile ısı geçişi	9
Şekil 2.4. Tek katlı ve çift katlı yapıda ısı kayıp oranları	13
Şekil 2.5. Ülkelerin dış cephe yalıtım özellikleri.....	23
Şekil 2.6. Isı yalıtım paneli geliştirme süreci.....	27
Şekil 2.7. a) Ham perlit b) Genleştirilmiş perlit.....	36
Şekil 2.8. Türkiye'de bulunan perlit yatakları.....	38
Şekil 2.9. Yapı elemanları yaklaşık birim hacim ağırlık değerleri	45
Şekil 3.1. Alkali hidroksit değişimi – viskozite	88
Şekil 3.2. Na_2SiO_3 viskozite tayini	89
Şekil 3.3. Hot Plate çalışma prensibi	98
Şekil 4.1. Tez çalışması akış şeması	101
Şekil 4.2. Toz GP gradasyon eğrisi.....	102
Şekil 4.3. Granüler GP gradasyon eğrisi.....	103
Şekil 4.4. GP karışımı gradasyon eğrisi.....	104
Şekil 4.5. Grup 1 – görünür yoğunluk değerleri	106
Şekil 4.6. Grup 2 – görünür yoğunluk değerleri	106
Şekil 4.7. Grup 3 – görünür yoğunluk değerleri	107
Şekil 4.8. Grup 4 – görünür yoğunluk değerleri	105
Şekil 4.9. Grupların ortalama panel genişlik değerleri	108
Şekil 4.10. Grupların ortalama panel uzunluk değerleri	108
Şekil 4.11. Grupların ortalama panel kalınlık değerleri.....	108
Şekil 4.12. Grup A panelleri eğilme dayanımı değerleri	110

Şekil	Sayfa
Şekil 4.13. Grup A panelleri basınç dayanımı değerleri	111
Şekil 4.14. Grup B panelleri eğilme dayanımı değerleri	112
Şekil 4.15. Grup B panelleri basınç dayanımı değerleri	113
Şekil 4.16. Grup C panelleri eğilme dayanımı değerleri	114
Şekil 4.17. Grup C panelleri basınç dayanımı değerleri	115
Şekil 4.18. Grup D panelleri eğilme dayanımı değerleri	116
Şekil 4.19. Grup D panelleri basınç dayanımı değerleri	117
Şekil 4.20. 4 litre granüler, 2 litre toz GP içeren panellerin basınç dayanım değerleri ..	118
Şekil 4.21. 3 litre granüler, 3 litre toz GP içeren panellerin basınç dayanım değerleri ..	119
Şekil 4.22. 2 litre granüler, 4 litre toz GP içeren panellerin basınç dayanım değerleri ..	119
Şekil 4.23. 1 litre granüler, 5 litre toz GP içeren panellerin basınç dayanım değerleri ..	120
Şekil 4.24. Silis dumanı ilavesinin ısı iletkenliğe etkisi	121
Şekil 4.25. Silis dumanı ilavesinin panellerin basınç dayanımına etkisi	122
Şekil 4.26. Silis dumanı ilavesinin panellerin yoğunluğuna etkisi	123
Şekil 4.27. Grup A ısı iletkenlik değeri – ısı geçirgenlik katsayısı.....	124
Şekil 4.28. Grup B ısı iletkenlik değeri – ısı geçirgenlik katsayısı.....	125
Şekil 4.29. Grup C ısı iletkenlik değeri – ısı geçirgenlik katsayısı.....	126
Şekil 4.30. Grup D ısı iletkenlik değeri – ısı geçirgenlik katsayısı.....	127
Şekil 4.31. 4 litre granüler, 2 litre toz GP içeren panellerin ısı iletkenlik değerleri	128
Şekil 4.32. 3 litre granüler, 3 litre toz GP içeren panellerin ısı iletkenlik değerleri	129
Şekil 4.33. 2 litre granüler, 4 litre toz GP içeren panellerin ısı iletkenlik değerleri	130
Şekil 4.34. 1 litre granüler, 5 litre toz GP içeren panellerin ısı iletkenlik değerleri	131
Şekil 4.35. Matematiksel model ve deneysel verilerin karşılaştırılması.....	132
Şekil 5.1. Tane büyüklüğü dağılımı tayini sonuçları	138

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. XPS paneli	14
Resim 2.2. EPS paneli.....	15
Resim 2.3. Cam yünü paneli	16
Resim 2.4. Taş yünü paneli.....	17
Resim 2.5. Poliüretan panel	18
Resim 2.6. Ahşap lifli panel.....	19
Resim 2.7. Cam köpüğü paneli	20
Resim 2.8. Fenol köpüğü paneli	20
Resim 2.9. Mantar panel	21
Resim 2.10. Alçı tozu.....	56
Resim 2.11. Silis dumanı	58
Resim 2.12. Silis dumanı tane boyutu	58
Resim 2.13. NaOH çözeltisinin uçucu külün mikro yapısına etkisi	68
Resim 2.14. NaOH derişiminin panellerin sertliğine etkisi	72
Resim 3.1. LINSEIS HFM300 ısı iletim katsayısı ölçüm cihazı	86
Resim 3.2. TPS 500S ısı iletim katsayısı ölçüm cihazı.....	86
Resim 3.3. a. Toz GP b. Granüler GP	87
Resim 3.4. Alçı	87
Resim 3.5. Geopolimer bağlayıcının hazırlanması	90
Resim 3.6. Hazırlanan harç karışımı.....	90
Resim 3.7. Kalıplanan panel	91
Resim 3.8. Hidrolik pres makinesi.....	91
Resim 3.9. Kür işlemi yapılan paneller.....	92
Resim 3.10. Gruplanan paneller.....	93

Resim	Sayfa
Resim 3.11. Deney düzeneği	95
Resim 3.12. Deney düzeneği	96
Resim 3.13. a) Panel basınç dayanım testi hazırlığı b) 6 parçaya ayrılan panel.....	96
Resim 3.14. Basınç dayanımı ölçüm cihazı	97
Resim 3.15. LINSEIS HFM300 cihazında ölçümü tamamlanan panelin test sonucu	99



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
a, b	Halpin-Tsai modelde ölçüm verileri
B	Isıl iletkenlikler arası ilişkiyi veren parametre
C	Dağılı fazın oranlarına bağlı parametre
C_i	Değişken parametreler
CO₂	Karbondioksit
d_d	Dolgu lif çapı
dp/dx	Su buharı kısmi basınç gradyeni
F	Dağılım faktörü/oranı veya ampiriksel parametre
f	Kuru eleme
G	Isıl iletkenliklere bağlı parametre
k_d	Dolgu fazının ısı iletkenliği
k_e	Efektif ısı iletkenlik
k_e(paralel)	Isı akışı yönüne paralel efektif ısı iletkenlik
k_e(seri)	Isı akışına dik efektif ısı iletkenlik
k_i	i. bileşenin ısı iletkenliği
KOH	Potasyum hidroksit
k_s	Sürekli fazın ısı iletkenliği
K₂SiO₃	Potasyum silikat
k_{toe}	Ton eşdeğer petrol
L	Lif uzunluğu veya lifin yarı uzunluğu
m	Numune ağırlığı
m₁	Boş ölçü kabı kütlesi
M₁	Deney numunesi kısmının kuru kütlesi
M₂	0,0063mm elek üzerinde kalan numune kuru kütlesi
m²	Metrekare
m₂	Ölçü kabı ve deney numunesinin kütlesi
m³	Metreküp

Simgeler	Açıklamalar
M₀	Numunenin ilk ağırlığı
NaOH	Sodyum hidroksit
Na₂SiO₃	Sodyum silikat
P_m	Tavada kalan elenmiş malzeme kütlesi
P	Numunenin görünür yoğunluğu
P_b	Gevşek yığın yoğunluk
P_p	Etüvde kurutulmuş tane yoğunluğu
V	Boşluk yüzdesi
V	Numunenin hesaplanan hacmi
V	Ölçü kabının hacmi
V_d	Dolgu ya da dağılı fazın hacim oranı
V_i	i bileşenin hacim oranı
V_M	Dolgu fazının maksimum paketleme oranı
W	Şekil, düzen ve yayılıma bağlı ampirik parametre
W_x	x yönünde, su buhar akışı
ε	Sürekli fazın hacim oranı
μ	Dinamik viskozite
μ_p	Yapı malzemesi buhar geçirgenliği
ξ	Ölçüm verilerine bağlı parametre
ρ_b	Gerçek yığın yoğunluğu

Kısaltmalar	Açıklamalar
AB	Avrupa Birliği
CEN	Avrupa Standartlar Komitesi
EİGM	Enerji İşleri Genel Müdürlüğü
EPS	Genleştirilmiş Polistren Köpük
EURIMA	Avrupa Yalıtım Üreticileri Kurumu
FA	Uçucu Kül
GP	Genleştirilmiş Perlit
GPA	Genleştirilmiş Perlit Agregası
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı

Kısaltmalar	Açıklamalar
ISO	Uluslararası Standart Örgütü
MTEP	Milyon Ton Petrol Eşdeğeri
OECD	Ekonomik Kalkınma ve İş birliği Örgütü
PÇ	Portland Çimentosu
PİAR	Halkla İlişkiler
POBA	Palmiye Yağı Kazanı Külü
PU	Poliüretan
PWC	Portland Beyaz Çimento
SD	Silis Dumanı
SS	Sodyum Silikat
TEP	Ton Eşdeğer Petrol
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
XPS	Extrüde Polistren Köpük

1. GİRİŞ

Dünya genelinde hızla artan nüfus ve bununla birlikte hızla gelişmeye devam eden sanayileşme ve kentleşme; tüm coğrafyalarda enerji tüketimini hızla arttıran etkenlerdendir. Enerji kaynaklarının hızla tükenmesi ile ülkeler enerjiyi daha verimli kullanmak için önlemler almaya başlamışlardır (Tsoutsos, Tournaki, De Santos ve Vercellotti, 2013). TÜİK adrese dayalı nüfus sistemine göre ülkemizin toplam nüfusu 1990 yılından 2017 yılına kadar 56,5 milyondan 79,766 milyona ulaşmış olup 2050 yılında, Türkiye nüfusunun 104,749 milyon olması beklenmektedir (Türkiye İstatistik Kurumu, 2018).

Uluslararası enerji ajansının (IEA) öngörüsüne göre hızla büyüyen sanayi, artan nüfus ve kentsel faaliyetler nedeniyle 2030 yılına kadar küresel enerji tüketiminin %53 kadar artması beklenmektedir. Ancak, diğer ülkelerle karşılaştırıldığında ülkemizde enerji tüketimi, son 25 yılda %100'ün üzerinde artmıştır. Türkiye'de kaynaklardan temin edilen enerji tüketimi 30 yıl önce ihtiyacın %50'sini karşılarken, günümüzde yaklaşık %30'una yetebilmektedir (Köse, Isıkan ve İnan, 2006). Enerji talebinin giderek artması, çevresel etkilerin de ciddi boyutlara ulaşacağını ve ekosistemimizi etkileyeceği anlamına gelmektedir (Ong, Mahlia ve Masjuki, 2011). TÜİK'in 2014 yılında yaptığı araştırmada ülkemizde enerji kullanımına bağlı %85,2, endüstriyel işlemlere bağlı %14,6, tarımsal faaliyetlere bağlı %0,2 oranının yıllık toplam CO₂ emisyonunu oluşturduğu tespit edilmiştir (Türkiye İstatistik Kurumu, 2016).

Karbondioksit salınımına neden olan en önemli faktörlerden biri de enerji kullanımıdır. CO₂ gazı ayrıca sera gazı salınımı da ciddi ölçülerde arttırmaktadır (Oh ve Chua, 2010). Türkiye genelinde 2017 Nisan ayında toplam CO₂ emisyon miktarı 2.868 ton'dur. Ek olarak, elektrik üretiminden kaynaklı emisyonda en çok payı CO₂ gazının aldığı tespit edilmiştir (Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, 2017). CO₂ gazı aynı zamanda küresel sıcaklık değerini de arttırmaktadır. CO₂ ve diğer sera gazlarının emisyonunu azaltmak için gereken herhangi bir adım atılmazsa, Dünya'nın ortalama yüzey sıcaklığının 2100 yılı sonuna kadar yaklaşık 1,1 ile 6,4 °C arasında artması beklenmektedir. Küresel sıcaklığın ortalama değerinin 2 °C artması, çevrede geri döndürülemez etkilere, insan sağlığına ciddi sorunlara, doğal ekosistemlerde büyük hasara ve küresel tarımın sürdürülebilirliğini etkileyeceği bilinmektedir (Report, 2018). Bu rakamlar incelendiğinde, enerji tüketiminin azaltılması,

korunumu ve tasarrufunun sağlanmasıyla çevremize ve dünyamıza sağlayacağı katkı kaçınılmazdır.

Bu nedenle enerji kullanımının azaltılması ve enerjinin korunması hem ülkemiz hem de Dünya ülkelerinde çevresel etki, kaynak tüketimi, ekonomik problemlerin azaltılması için literatürde araştırılan ve geliştirilmesi hedeflenen konulardan biri olmuştur. 2015 yılında enerji tüketimiyle ilgili yapılan araştırmada Ülkemizdeki enerji tüketim yeri ve tüketim oranları araştırılmış ve araştırma sonucunda enerji tüketiminin %37'si endüstriden, %35'i binalardan, %18'i ulaşırmadan, %6'sı tarımdan ve 4'ü enerji dışı kullanımdan kaynaklanmaktadır (Engin, 2012). Enerji tüketiminin %35'inin binalardan kaynaklanması özellikle ısıtma, soğutma ve havalandırma ihtiyaçlarından kaynaklanmaktadır.

Bu kapsamda, inşaat sektöründe ısı yalıtımı sağlayarak enerji tüketimini azaltmak amacıyla kullanılan birden fazla ısı yalıtım paneli bulunmaktadır. Ancak, sektörde yapı dış cephelerine hali hazırda uygulanan bu panellerin özellikle yangına dayanım sınıfları, kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır. Bununla birlikte, yangın dayanım sınıfı uygun olan panellerin de yoğunluklarının fazla olması, yapının ölü yük ağırlığını arttırmakta ve yapı deprem performansını olumsuz etkilemektedir. Ek olarak, özellikle gözenekli yapıya sahip ısı yalıtım panelleri kısa vadede yapıda ısı korumunu sağlarken, uzun vadede dış çevre koşullarından etkilenecek gözenek özelliğini kaybederek ısı korumunu sağlamamaktadır. Bu nedenle, kısa ve uzun vadede hem ısı korum sağlayan hem yangına dayanabilen ısı yalıtım panellerinin geliştirilmesine acil olarak ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla geliştirilecek ısı yalıtım panelinin özellikle binalarda ve endüstri yapılarında kullanılmasıyla enerji tüketimini en aza indirmek ve enerjinin korunumunu sağlamak bu çalışmanın ana amacıdır. Bu çalışmayla birlikte rezervlerin %70'i ülkemizde mevcut bulunan genleştirilmiş perlit ham maddesiyle ısı yalıtım paneli geliştirmek hem literatüre bir katkı sağlamak hem de yerel bir ürün geliştirilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen ısı yalıtım panelinin inşaat sektöründe kullanılabilir olması için ısı iletkenliğinin $<65 \text{ mW/m.K } (\lambda)$ olması beklenmektedir.

Bu çalışmada ilk olarak literatür çalışmalarında kullanılması planlanan malzemelerin karışım oranları ve yöntemleri araştırılmıştır. Literatür araştırmaları neticesinde, deneysel çalışmalarda kullanılacak malzemeler ve bu malzemelerin spesifikasyonları, fiziksel ve kimyasal özellikleri tespit edilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılacak malzeme, malzeme

oranları ve karışım yöntemlerinin belirlenmesiyle paneller hazırlanmış ve bu panellere mekanik, fiziksel ve ısı özelliklerin belirlenmesi için testler uygulanmıştır. Deneysel çalışma verileri bulgular kısmında verilerek, sonuçlar kısmında bu bilimsel çalışmanın literatüre kazandırdığı faydalar tartışılmıştır.





2. LİTERATÜR TARAMASI

Genleştirilmiş Perlit esaslı ısı yalıtım panelinin geliştirilmesi için GP odaklı yalıtım teknolojileri ve bunun yanında önemli bir nokta olan geopolimer bağlayıcı araştırılmıştır.

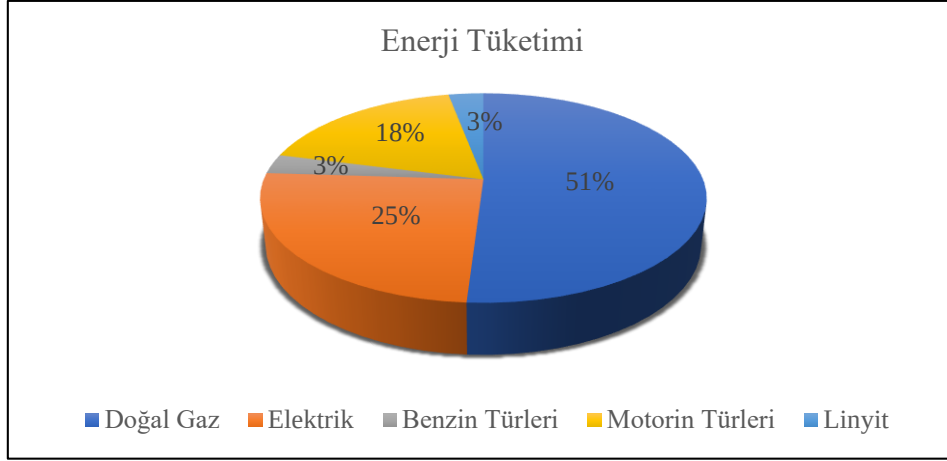
2.1. Isı Yalıtımı ve Enerji Sektörü

Dünya ülkeleri arasında Türkiye toplam birincil enerji tüketiminde 19. sıradadır. 2014 yılında yapılan çalışmada ülkemizin 1970 yılından itibaren enerji tüketimi incelenmiş ve özellikle son 15 yılda birincil enerji tüketiminin %45 arttığı tespit edilmiştir. Bu orana göre 2015 ile 2035 yılları arasında toplam birincil enerji arzının %42 oranında artması beklenmektedir (Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 2014).

2015 yılı verileri incelendiğinde, ülkemiz doğalgazın %99'unu, petrolün %65'ini ve kömürün %64'ünü ithal etmiştir. Başka bir deyişle ülkemiz birincil enerji ihtiyacının %87,3'ünü dış kaynaklardan sağlamaktadır. Bu nedenle rüzgâr, güneş, hidrolik, jeotermal, dalga gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının daha çok kullanılması dışa bağımlılığı azaltacaktır (Yılmaz, 2017).

Enerji ihtiyacının yerli kaynaklardan karşılanmasıyla enerjiyi verimli kullanmak aynı öneme sahiptir. Bu nedenle enerjinin üretilmesi, iletilmesi ve tüketilmesi süreçlerinde verimliliğin artması, gereksiz kullanımın önlenmesi, sektörel ve makro düzeyde enerji yoğunluğunun azaltılması, Türkiye'nin enerji alanındaki temel politikalarından biri olmalıdır (Sezer, 2005; Bıykoğlu, 2012).

EİGM'nün son 2017 Nisan raporuna göre enerji tüketim oranları Şekil 2.1'deki dilim grafikte verilmiştir (Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, 2017).



Şekil 2.1. EIGM enerji istatistikleri Nisan 2017 raporu (Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, 2017)

Şekil 2.1'deki veriler göz önüne alındığında, özellikle işletmeler için düşük enerji verimliliği ve ihtiyaçtan fazla enerji tüketimi maliyeti arttırmaktadır. Bu artış, enerji kullanımının ve enerji harcamalarının artmasına neden olmaktadır. Sanayi sektöründe, üretim maliyetlerinin 1/5'i ile 1/2'si enerji tüketiminden kaynaklanmaktadır. Ülkemizde özellikle sanayi sektöründe enerji tasarrufu potansiyelinin en az %20 olduğu ve bu tasarrufun yaklaşık yarısının küçük yatırımlarla gerçekleştirilebileceği tespit edilmiştir (TMMOB Makina Mühendisleri Odası, 2012). Bu bilgilere ek olarak, ülkemizde enerjiden sağlanabilecek tasarruf sektörel olarak incelendiğinde, %30 ile en çok yapı sektöründe tasarruf sağlanacağı belirtilmiştir (TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, 2012).

Bu kapsamda, enerji verimliliği politikalarının geliştirilmesi için 2023 yılına kadar enerji verimliliği alanında yapılacak çalışmaların yer aldığı Enerji Verimliliği Strateji Belgesi 2012 yılında yürürlüğe girmiştir. Bu stratejiyle, sanayi ve hizmet sektörlerinde enerji yoğunluğunu ve enerji kayıplarını önlemek, karbon emisyonunu azaltarak çevresel etkileri çok az binaları yaygınlaştırmak, enerji üretimi, iletimi ve tüketim aşamalarında verimliliği arttırmak amaçlanmıştır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2010).

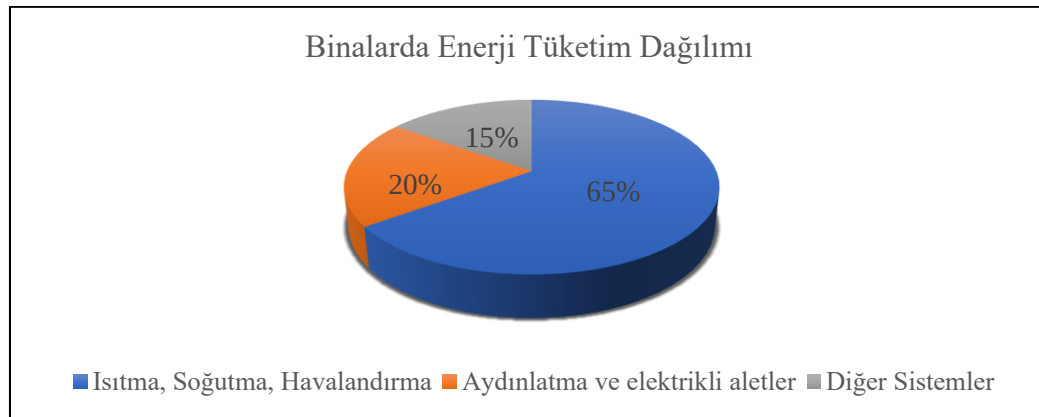
Enerji Verimliliği Strateji Belgesine ek olarak, Onuncu Kalkınma Planı'nda ülkemizin enerji yoğunluğu OECD ve AB ülkeleri ortalamasının üzerinde olduğu belirtilmiştir. Enerji verimliliğinin geliştirilmesiyle 2011 yılında 0,2646 TEP/1000 dolar olan enerji yoğunluğunun, 2018 yılında 0,243 TEP/1000 dolara veya daha fazla indirilmesi ve ek olarak 2018 yılına kadar kamu binalarındaki enerji tüketiminin %10 düşürülmesi hedeflenmiştir (Onuncu Kalkınma Planı, 2014). Enerji verimliliğinde belirleyici faktör olan enerji

yoğunluğunun düşük olması, enerjinin ne kadar verimli kullanıldığını göstermektedir. Enerji verimliliğini arttırmak için kullanılan enerjinin ihtiyaçları karşılayabilecek şekilde en aza indirilmesi, yani enerji tasarrufu sağlanması gerekmektedir. IEA'nın verilerinde gelişmiş ülkelerde enerji yoğunluğu 0,09 ile 0,19 arasında iken, Türkiye'de bu oran 0,38 olarak belirlenmiştir. Çizelge 2.1'de bazı ülkelerdeki enerji yoğunluğu ve kişi başına düşen enerji tüketimi değerleri verilmiştir (İmrak ve Özer, 2010). Buradan hareketle ülkemizde, enerjinin verimsiz kullanıldığı çok açıktır.

Çizelge 2.1. Bazı ülkelerdeki enerji yoğunluğu ve kişi başına düşen enerji tüketimi değerleri (İmrak ve Özer, 2010)

Ülke	GDP (milyar \$)	Tüketim (milyon TEP)	Enerji Yoğunluğu (%)	Kişi Başına Tüketim (TEP/Nüfus)
Türkiye	190,3	72,5	0,38	1,06
Japonya	5648	520,7	0,09	4,09
ABD	8977,9	2281,5	0,25	7,98
Yunanistan	144,8	28,7	0,2	2,62
OECD	27880,9	8970	0,19	4,68
Dünya	34399,8	10029	0,29	1,64

2015 yılında enerjinin tüketimiyle ilgili yapılan araştırmadaki enerji tüketim oranlarına bakıldığında, kullanılan enerjinin %35'i gibi büyük bir kısmının binalarda tüketildiği tespit edilmiştir (Engin, 2012). Enerji tüketim oranında %35 paya sahip binalarda kullanılan enerjinin dağılımı Şekil 2.2'deki dilim grafikte verilmiştir. Binaların ısıtma, soğutma ve havalandırmaya harcadığı enerji, %65 oranla binalarda kullanılan enerjinin en büyük nedenlerinden biridir (İMO Yapı Malzemeleri Komisyonu, 2015).



Şekil 2.2. Binalarda enerji tüketim dağılımı (İMO Yapı Malzemeleri Komisyonu, 2015)

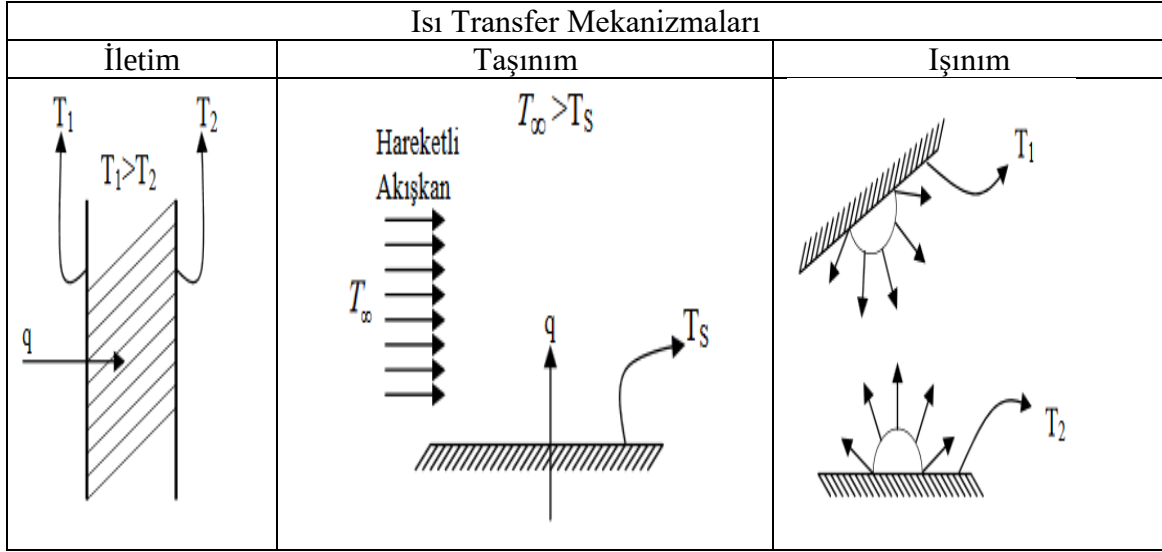
PİAR tarafından 1990 yılında 15543 binada yapılan araştırmada, ısı yalıtım yönetmeliği yürürlüğe girdikten sonra inşa edilmiş binalar arasında İstanbul %53, Ankara %24, İzmir, Kocaeli ve Bursa'da %84 oranında yalıtım uygulaması yapılmadığı tespit edilmiştir. Bu kapsamda, İsveç'in halen yürürlükte bulunan ısı tasarrufu yönetmeliği ülkemiz yönetmelikleri ile karşılaştırıldığında, İstanbul 2,8, Ankara'da 3,6, ve Erzurum'da 6 kat daha fazla yakıt sarf edilerek aynı ısınmanın sağlandığı görülmüştür. Yakıt miktarının bu kadar fazla olması hem ekonomiye hem de doğal çevreye aynı oranda zarar vermektedir (Köse, Isıkan ve İnan, 2006). Isıtma, soğutma ve havalandırma için harcanan enerjinin bu kadar fazla olmasına rağmen, Türkiye'de 2015 yılında yapılan araştırma verilerine göre, binaların %85'inde ısı yalıtım yapılmamıştır. Bu nedenle, Başbakanlık 10. Kalkınma Planı'nda enerji verimliliği konusu yer almış ve ısı yalıtımı bulunan bina oranının 2018'e kadar %15'den %26'ya kadar çıkması hedeflenmiştir (İMO Yapı Malzemeleri Komisyonu, 2015).

Binalarda kullanılan enerjinin %65'i ısıtma, soğutma ve havalandırma amaçlı kullanılması göz önüne alındığında, enerjinin en çok tüketildiği bu alanlarda enerji kullanımını azaltmanın en etkili yollarından birisi de ısı yalıtım uygulaması yapılmasıdır.

2.1.1. Isı yalıtımı ile ilgili temel kavramlar

Isı geçişi kavramı ilk olarak 1821 yılında Fransız bilim adamı Sadi Carnot (1796-1832) tarafından ortaya konmuştur. Isı; yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru kendiliğinden geçmektedir. Böylece, yüksek sıcaklık bölgesinin yanından, düşük sıcaklık bölgesine bir sıcaklık gradyeni oluşmaktadır. Isı geçişi, sıcaklık farkından dolayı sistem ve çevresi arasında ya da maddeler arasında meydana gelen enerji akışıdır (Barnett, 1958). Yemeğin pişmesi, saç kurutma makinesi, fırın, kombi, buhar kazanları, binaların ısıtılması ve soğutulması, iklimlendirme, havalandırma, binaların ısı yalıtımı vb. konular ısı geçişi bilim dalının uygulama alanına girmektedir (Altınışık, 2006).

Isı yalıtımı ise, farklı sıcaklıklara sahip iki ortam arasında ısı şeklindeki enerji akışının azaltılması olayı olarak ifade edilebilmektedir veya farklı sıcaklıklara sahip iki ortam arasında ısı geçişini azaltmak için yapılan uygulamalar "Isı yalıtımı" olarak tanımlanmaktadır (Özer, 1982). Şekil 2.3'de ısı transfer mekanizmaları gösterilmiştir (Altınışık, 2006).



Şekil 2.3. İletim, taşıma ve ısınım ile ısı geçişi (Altınışik, 2006)

Şekil 2.3’de görüldüğü üzere, ısı geçişi türleri sıcaklık farkı varken; katı veya akışkan durgun ortam içinde olan ısı geçişi, iletim (kondüksiyon), bir yüzey ile hareket halindeki bir akışkan arasındaki ısı geçişi, taşıma (konveksiyon) ve iki yüzey arasında (bir engel yokken) elektromanyetik dalgalar halinde yaydıkları enerji, ısınım (radyasyon) olarak adlandırılmaktadır (Altınışik, 2006). Isının korunumu sağlanmazsa, tüketilen enerji sadece ortamı değil geçişten dolayı dış ortamı da ısıtmakta ve bu nedenle daha fazla enerji tüketilmektedir. Kullanılan enerjinin fazla olması hem maliyeti arttırmakta hem de dış ortama yayılan zararlı gazlar neticesinde çevreyi de olumsuz etkilemektedir (Sezer, 2005).

Eski veya yeni yapılarda, ısı koruması sağlamak için ısı yalıtım panelleri kullanılabilmektedir. Ancak, ısı yalıtım panellerinin seçiminde ısı iletkenlik katsayısı önemli bir kriterdir. Bir malzemenin ısı yalıtım paneli olarak kabul edilmesi için ISO ve CEN standartlarına göre ısı iletkenlik katsayısının $< 65 \text{ W.m/m.K}$ (λ) olması gerekmektedir (TS 825, 1999). Isı yalıtım panelinin ısı geçirgenliği ne kadar küçük ise, ısı geçişine karşı o oranda yüksek bir direnç göstereceği anlamına gelmektedir (Kulaksızoğlu, 2006).

Isı yalıtım panellerinde diğer bulunması gereken önemli bir özellik ise su buharı difüzyon direnç faktörü (μ)’dür. İç ortamda oluşan su buharı, yapılara zarar veren bir potansiyele sahip olduğu için su buharına dikkat edilmelidir. Su buharı; basınç farkı nedeniyle ısı akımı ile aynı yönde hareket ederek yapı elemanının gözeneklerinden geçerek dış ortama ulaşmaya çalışmaktadır. Yapı elemanları arasında gerçekleşen geçiş sırasında, doyma veya daha düşük

sıcaklıkta bir yüzeyle temas etmesi durumunda buharın bir kısmı yoğuşarak su haline geçmektedir. Bu yoğuşma, yapının taşıyıcı sistemi içinde oluşması istenmeyen bir durum olup, betona ve donatıya zarar vermektedir (İMO Yapı Malzemeleri Komisyonu, 2015).

Isı yalıtım panellerinde bir diğer önemli faktör ise panellerin yangın sınıfıdır. Panellerin yangın esnasında tutuşması, alevi yayması, dış ortama yayacağı ısı, duman ve toksisite, “Yangın Güvenliği” açısından en önemli kriterler olmakla birlikte yönetmelikte belirtilen sınıfa uygun paneller seçilmelidir.

Literatür çalışmaları incelendiğinde, enerji verimliliğinin artırılmasında ısı yalıtımı önemli bir faktördür. Ülkemizde özellikle binalarda kışın ısınmak ya da yazın serinlemek için genellikle ısıtma, soğutma ve havalandırmada kullanılan enerjiyi azaltmak ve daha konforlu yaşamak amacıyla etkili ısı yalıtım uygulamaları yapılmaktadır. Isının ortamda korunumu için iç sıcaklık ile duvarın iç ortama olan en yakın yüzey sıcaklığı arasında en fazla 3 °C farkın olması gerektiği belirtilmiştir (Engin, 2012). Isı yalıtımı veya korunumu, ısı kaybının azaltılması için binaların dış cepheleri, pencere cam ve doğramalar, çatılar, döşemeler ve iletim tesisatlarında meydana gelecek ısı geçişini azaltan önlemleri kapsamaktadır.

Isı sürekli olarak sıcak ortamdan soğuk ortam tarafına doğru aktarılmaktadır. Aktarımı durdurmak mümkün olmamasına rağmen, bu aktarım ısı yalıtımı ile kontrol edilebilmektedir. İnsanlar için uygun ortam sıcaklıkları 20-22°C arasındadır. Kış mevsiminde bina iç ortamındaki ısı dış ortama hareket ederek ısı kaybına neden olmaktadır, yaz mevsiminde ise dış ortamdaki ısı bina içine hareket ederek ortamı ısıtmaktadır. Mevsimlerde ise ısı aktarımı yön değiştirmektedir. Türkiye’de iklim koşulları göz önüne alındığında, yıl genelinde birçok bölgede hem ısıtma hem soğutma ve hem de havalandırmanın aynı anda kullanıldığı görülmüştür. Binalarda ısıdan kaynaklanan enerji tüketiminin tasarrufu ancak doğru uygulanmış bir ısı yalıtımı ile sağlanabilmektedir (İMO Yapı Malzemeleri Komisyonu, 2015). Bu nedenle ısı yalıtım uygulamaları için Türkiye’de birçok standart yürürlükte bulunmaktadır.

2.1.2. Türkiye’de uygulanan ısı yalıtım standartları

Ülkemizde ısı yalıtım uygulamaları ile ilgili yönetmelikler kapsamında ilk olarak 1970 yılında TSE tarafından “TS825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları” hazırlanmıştır. Ardından,

1977 yılında Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından “Isıtma ve Buhar Tesislerinin Yakıt Tüketiminde Ekonomi Sağlanması ve Hava Kirliliğinin Azaltılması Yönetmeliği” çıkarılmıştır (Sezer, 2005).

30.10.1981 tarihinde “Isı Yalıtım Yönetmeliği” çıkarılmış ve 16.01.1985 tarihinde üzerinde çeşitli değişiklikler yapılmıştır. Ek olarak, sanayi sektöründe enerji verimliliğinin artırılması için 11.11.1995 tarihinde “Sanayi Kuruluşlarının Enerji Tüketiminde Verimliliğin Artırılması” ile ilgili yönetmelik çıkarılmış ve bu yönetmelik kapsamında; yıllık toplam enerji tüketimi 2000 ton eşdeğer petrol ve yukarısında olan tüm işletmelerde enerji yöneticisi atamak zorunlu hale getirilmiştir (Olgun, Kurtuluş, Gültek ve Heperkan, 2015).

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 1995 yılında “TS825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları” revize çalışmalarına başlamış, 14 Haziran 2000 tarihinden itibaren ilgili yönetmeliğin tüm binalarda uygulanmasını zorunlu hale getirmesinin ardından 2013’te revize edilerek son haline getirilmiştir. Standart, ülkemizdeki binaların ısıtılmasında kullanılan enerji miktarlarını sınırlamayı, dolayısıyla enerji tasarrufunu arttırmayı ve enerji ihtiyacının hesaplanması sırasında kullanılacak standart hesap metodunu ve değerlerini belirlemek amacıyla yayınlanmıştır. Bu standart, yeni yapılacak olan binaları, yeni inşa edilecek binaların ısıtma enerjisi ihtiyacını hesaplama kurallarını, izin verilebilecek en yüksek ısı kaybı değerlerini ve hesaplama ile ilgili bilgilerin sunuş şeklini kapsamaktadır. Ek olarak bu standardın genel kullanım amaçları dolayısıyla iç sıcaklıkları asgari 15°C olacak şekilde ısıtılan iş yerleri ile endüstri ve sanayi binalarında kullanılması hedeflenmiştir. Ülkemizde ısı yalıtımı mantolama yapılarak sadece bina dış cephelerine uygulanmaktadır. Bu nedenle yalıtımın sadece bina dış cephesine değil çatı, teras ve pencereyle bir bütün olduğu tadilat projelerinin hazırlanması ve uygulanması titizlikle denetlenmelidir (Bayraktar ve Bayraktar, 2016; Türk Standartları Enstitüsü, 2018; Karagöz, 2004; TS 825, 1999; Dağsöz, Bayraktar ve Ünveren, 2001).

Literatür çalışmalarına göre, binalarda kullanılan enerjinin, toplam enerji kullanımının %35’ine sahip olduğu ve bu kullanımın %85’inin ısıtma amaçlı tüketilmesi, enerji verimliliği ile ilgili kanun ve düzenlemelerin yapılmasını sağlamıştır (Özkan, Onan ve Erdem, 2009). Enerji verimliliği konusunda yürürlüğe giren ilk mevzuat 2 Mayıs 2007 yılında “Enerji Verimliliği Kanunu” olarak yayınlanmıştır. 9 Ekim 2008’de “Binalarda Isı

Yalıtımı Yönetmeliği”, 25 Ekim 2008’de “Enerji Kaynaklarının ve Enerjinin Kullanımında Verimliliğin Artırılmasına Dair Yönetmelik”, 5 Aralık 2008’de “Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği” ve 6 Şubat 2009’da 5627 Sayılı “Enerji Verimliliği Kanunu” kapsamında yapılacak yetkilendirmeler, sertifikalandırmalar, raporlamalar ve projeler konusunda uygulanacak usul ve esaslar hakkında tebliği olarak yürürlüğe giren mevzuat yayınlanmıştır. (Resmi Gazete, 2007; Olgun, Kurtuluş, Gültek ve Heperkan, 2015; Isı Su Ses ve Yangın Yalıtımcıları Derneği, t.y.; Özyurt, 2009; TMMOB Makina Mühendisleri Odası, 2008).

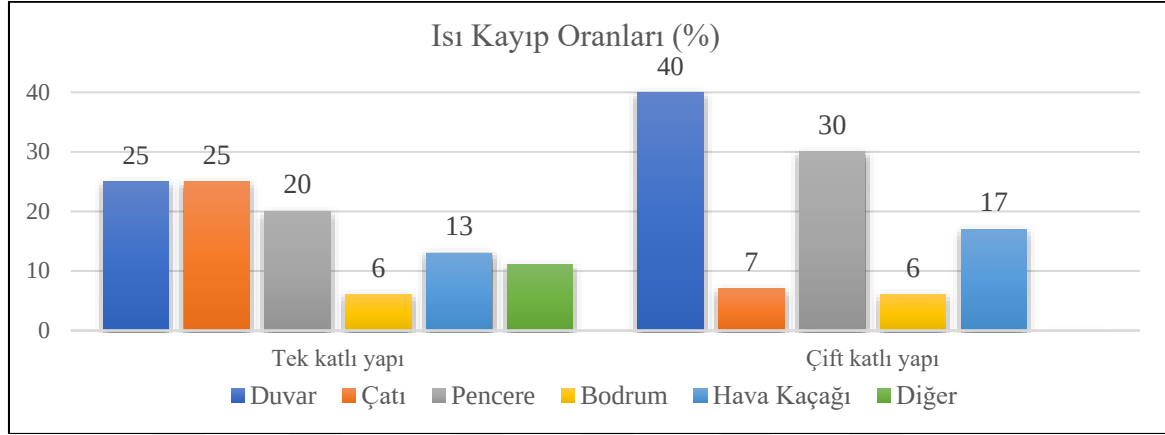
2.1.3. Isı yalıtım sektöründe kullanılan paneller

Binalardaki ısı kayıpları sadece dış cephede olmamakla birlikte, duvar, döşeme, çatı, pencere, temel ve zeminler, doğramalar ve ısı köprüleri gibi yapı elemanlarından gerçekleşmektedir. Isı kayıplarında bina yüksekliğinin artması, buna bağlı olarak dış duvardaki ısı kayıplarını da arttırmaktadır. Günümüz teknolojisi sayesinde duvarlar tek veya birden fazla katmandan oluştuğu için her koşula uygun olarak kullanılabilen ısı yalıtım paneli bulunmamaktadır. Yalıtım panelinin kullanım yeri ve özelliklerine göre seçim yapılması gerekmektedir (İZODER Isı, Su, Ses ve Yangın Yalıtımcıları Derneği, 2005). Ülkemizde ısı yalıtım panelleri; fiziksel ve kimyasal özelliklere, uygulanma durumlarına, ekonomik ve çevresel ihtiyaçlara göre seçilerek kullanılmaktadır. Uygun yalıtım paneli tipi ve türü, uygulanacak alana, fiziksel, termal ve diğer özelliklere bağlıdır (Al-Homoud, 2005) Yapıda farklı alanlarda ısı yalıtım uygulamalarının yapılması için inşaat sektöründe uygulama alanlarına göre çeşitli paneller bulunmaktadır. Çizelge 2.2’de duvar, döşeme ve çatı uygulamalarındaki kullanılan yalıtım panelleri ve bu yalıtım panellerinin bağlı olduğu standartlar verilmiştir (Isı Su Ses ve Yangın Yalıtımcıları Derneği, t.y.).

Çizelge 2.2. Duvar, döşeme ve çatı uygulamalarında kullanılan yalıtım panelleri (Isı Su Ses ve Yangın Yalıtımcıları Derneği, t.y.)

Panel Türü	Bağlı Bulunduğu Standart
Cam yünü	[TS 901 / TS 901-1 EN 13162]
Taş yünü	[TS 901/ TS 901-1 EN 13162]
Genleştirilmiş polistiren (EPS)	[TS 7316 EN 13163]
Ekstrüde polistiren (XPS)	[TS 11989 EN 13164]
Poliüretan (PUR)	[TS EN 13165]
Fenol köpüğü	[TS EN 13166]
Cam köpüğü	[TS EN 13167]
Ahşap yünü levhalar	[TS EN 13168]
Genleştirilmiş perlit (EPB)	[TS EN 13169]
Genleştirilmiş mantar (ICB)	[TS EN 13170]
Ahşap lifli levhalar	[TS EN 13171]

Isı kaybının en çok görüldüğü yapı elemanlarının belirlenmesi amacıyla, 2015 yılında İMO tarafından tek katlı ve çok katlı yapıda yapılan araştırma sonuçları Şekil 2.4'te verilmiştir (İMO Yapı Malzemeleri Komisyonu, 2015).



Şekil 2.4. Tek katlı ve çift katlı yapıda ısı kayıp oranları (%) (İMO Yapı Malzemeleri Komisyonu, 2015)

Şekil 2.4 incelendiğinde, tek ve çok katlı yapılarda ısı kayıplarının en çok görüldüğü yerlerden biri duvardan kaynaklı ısı kayıplarıdır. Tek katlı yapılarda duvarlardan oluşan ısı kaybı %25'iken, çift katlı yapıda %40 olarak ölçülmüştür. Bu da bina yüksekliği arttıkça duvarlardan kaynaklı ısı kayıplarının artacağını göstermiştir. Ülkemizdeki yapılaşma göz önüne alındığında, iki ve daha fazla katlı yapıların sayıca fazla olmasıyla dış duvarlarda yapılacak ısı yalıtım uygulamaları önem kazanmıştır. Dış duvarlara uygulanan farklı sistemlere göre ülkemizde yaygın olarak tercih edilen ve kullanılan ısı yalıtım panelleri lifli ve köpük paneller olarak bilinmektedir. Lifli paneller; taş yünü ve cam yünü gibi mineral yünler ve ahşap yünü, köpük paneller ise; genleştirilmiş polistren köpük (EPS) ve polistren köpük (XPS) gibi polistren köpükler ve poliüretan köpükler oluşturmaktadır. Bu yalıtım panelleri ile diğer yapı elemanlarına ait ısı iletkenlik değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 2.3'te verilmiştir (Jelleab ve diğerleri, 2010).

Çizelge 2.3. Yapı elemanlarına ait ısı iletkenlik değerleri (Jelleab ve diğerleri, 2010)

Yapı Elamanı	Isıl İletkenlik Hesap Değeri (W/m.K)
Metaller	35,0 – 384,0
Donatılı Beton	2,20 – 2,50
Donatısız Beton	1,65 – 2,10
Tuğla	0,19 – 1,40
Gaz Beton	0,11 – 0,29
MW, EPS, XPS, PUR/PIR vb. ısı yalıtım panelleri	0,020 – 0,045

Bu kapsamda, Türkiye’de yaygın olarak kullanılan ısı yalıtım panelleri detaylı olarak incelendiğinde;

Ekstrüde polistren köpük (XPS)

XPS levha günümüzde en çok kullanılan ısı yalıtım panellerinden biri olup, polistren hammaddesinden ekstrüzyon yolu ile üretilmektedir. Kapalı gözenekli yapıya sahiptir. Kullanım yeri ve amacına göre farklı boyut ve yoğunlukta levha olarak üretilmektedir. Panel çok sıkı kapalı gözenekli bir yapıya sahiptir. Bu nedenle su alma yüzdesi çok düşük olup, tüm yoğunluklar arasında su alma yüzdesi hacminin %1’i kadardır. Bu özelliği sayesinde teras çatı sistemleri için iyi bir yalıtım panelidir (Öziç, 2013). Türkiye’de kullanılan XPS paneli Resim 2.1’de gösterilmiştir ve XPS paneline ait genel özellikler Çizelge 2.4’te verilmiştir.



Resim 2.1. XPS paneli (Öziç, 2013)

Çizelge 2.4. XPS panelinin genel özellikleri (Öziç, 2013)

Yoğunluk	25-48 kg/m ³
Isı İletkenlik Katsayısı	0,03-0,04-0,045 W/mK
Basınç Gerilimi	0,15-0,35 N/mm ²
Bükülme Dayanımı	0,6 N/mm ²
Su emmesi (1 yıl)	Hacimce %1
Su buharı difüzyon direnci (μ)	80-225
Kullanılabilir Isı Sınır Değeri	-50°C +75°C arası
Boyutsal Kararlılık	0,07 mm/mK
Yangın Dayanım Sınıfı	D/E

Ekspande polistren köpük (EPS)

Petrolden elde edilen bir hidrokarbon olan EPS'nin %98'i havadan oluşmaktadır. Bir m³'ünde yaklaşık olarak 3-6 milyar küçük gözenekli hücre içermekte olup, bu hücrelerde durgun hava hapsolmüştür. Bu özellik, gözenekli panele ısı ve ses yalıtımı özelliği kazandırmıştır. Büyük bir kısmı havadan oluştuğu için de çok hafif bir paneldir, işlenmesi ve taşınması kolaydır (Candan, 2007). Türkiye'de kullanılan EPS paneli Resim 2.2'de gösterilmiştir ve EPS paneline ait genel özellikler Çizelge 2.5'de verilmiştir.



Resim 2.2. EPS paneli (Candan, 2007)

Çizelge 2.5. EPS panelinin genel özellikleri (Candan, 2007)

Yoğunluk	13-40 kg/m ³
Isı İletkenlik Katsayısı	0,035-0,040 W/mK
Basınç Gerilimi	0,1-0,4 N/mm ²
Bükülme Dayanımı	0,16 – 0,50N/mm ²
Su emmesi (1 yıl)	Hacimce %3,5-5,0
Su buharı difüzyon direnci (μ)	20/50-40/100
Kullanılabilir Isı Sınır Değeri	-180°C +100°C arası
Yangın Dayanım Sınıfı	D/E

Cam yünü

Cam, yüksek sıcaklıkta altında birden fazla malzemelerin birlikte erimesi ve aralarında kimyasal bir bağ bulunmaması esasına dayanmaktadır. Cam, inorganik yapıya sahip silis kumu ham maddesinin 1200 °C - 1500 °C sıcaklıkta elyaf hale getirilerek ince lifler halinde elde edilmesiyle yalıtım paneli olarak kullanılmaktadır. Kullanım yeri ve amacına göre farklı boyut ve yoğunlukta değişik kaplama ve katkı malzemesi ile şilte, levha, boru ve dökme şeklinde üretilmektedir. Zamandan, çevresel, iç ve dış faktörlerden etkilenmemektedir.

Eğimli ve düz çatılarda, havalandırmalı duvar ve çift duvar arası boşluklarda, yüzer şap ve asma kat döşemeleri altında kullanılmaktadır. Yaygın bir biçimde şilte olarak kullanılsa da günümüzde spreyci olarak da uygulanmaktadır (İşbilir, 2009). Türkiye’de kullanılan cam yünü paneli Resim 2.3’de gösterilmiştir ve cam yününe ait genel özellikler Çizelge 2.6’da verilmiştir.



Resim 2.3. Cam yünü paneli (İşbilir, 2009)

Çizelge 2.6. Cam yünü panelinin genel özellikleri (İşbilir, 2009)

Yoğunluk	14-40 kg/m ³
Isı İletkenlik Katsayısı	0,035-0,050 W/mK
Basınç Gerilimi	0,15-0,35 N/mm ²
Bükülme Dayanımı	0,6 N/mm ²
Su emmesi (1 yıl)	Hacimce %3-10 (5cm kalınlıkta)
Su buharı difüzyon direnci (μ)	1
Kullanılabilir Isı Sınır Değeri	-50°C +250°C arası
Yangın Dayanım Sınıfı	A1/A2

Taş yünü

Öz kaynaklarımızdan elde edilen inorganik hammaddelerin 1350 °C - 1400 °C’de ergitilerek elyaf haline getirilen liflerin, fenol formaldehit reçine (bakalit) ile yapıştırılmasıyla elde edilmektedir. Teras çatı levhası, yüzer döşeme levhası olarak çıplak taş yünü levhalar binaların doğal zemine oturan döşemelerinde, iki kat arası döşemelerde, ara bölme levhası olarak, hafif ara bölme duvarlarda dış duvarın içten yalıtım uygulamalarında, merdiven ve asansör boşluklarının komşu duvarlarında, dış cephe levhası olarak bir yüzü alüminyum folyo veya cam tülü kaplı taş yünü levhalar giydirmeye cephe sistemlerinde cephe kaplamalarının altında ısı ve ses yalıtımı maksadıyla, havalandırmalı cephelerde yangın

direnci amacı ile kullanılmaktadır (Ülker, 2009). Türkiye’de kullanılan taş yünü paneli Resim 2.4’de gösterilmiştir ve taş yününe ait genel özellikler Çizelge 2.7’de verilmiştir.



Resim 2.4. Taş yünü paneli (İşbilir, 2009)

Çizelge 2.7. Taş yünü panelinin genel özellikleri (İşbilir, 2009)

Yoğunluk	30-150 kg/m ³
Isı İletkenlik Katsayısı	0,035-0,050 W/mK
Basınç Gerilimi	0,15-0,35 N/mm ²
Bükülme Dayanımı	0,6 N/mm ²
Su emmesi (1 yıl)	Hacimce %2-3
Su buharı difüzyon direnci (μ)	1
Kullanılabilir Isı Sınır Değeri	650°C-1000°C
Yangın Dayanım Sınıfı	A1/A2

Poliüretan

İzosiyanat bileşiğin alkol ile reaksiyonu sonucu alkolün hidrojen atomu izosiyanata kayarak poliüretan elde edilmektedir. Bu tip uygulamalarda malzeme bölgeye uygulandıktan sonra, malzemenin bünyesinde meydana gelen reaksiyonlar sonucu hacimce genişerek, bu genişleme ile de uygulanan bölgede bir basınç meydana getirmektedir. Hücrelerinin %95’i kapalı gözeneklidir. Buna ek olarak, poliüretan köpükleri açık gözenekli, yumuşak veya sert ve küçük hacim ağırlıklı olarak da üretilmektedirler. Levha, sandviç panel ve püskürtme yöntemiyle kullanılmaktadır (Akıncı, 2007). Türkiye’de kullanılan poliüretan paneli Resim 2.5’de gösterilmiştir ve poliüretan paneline ait genel özellikler Çizelge 2.8’de verilmiştir.



Resim 2.5. Poliüretan panel (İşbilir, 2009)

Çizelge 2.8. Poliüretan panelinin genel özellikleri (İşbilir, 2009)

Yoğunluk	30-50 kg/m ³
Isı İletkenlik Katsayısı	0,025-0,040 W/mK
Basınç Gerilimi	0,10-0,4 N/mm ²
Su emmesi (1 yıl)	Hacimce %3-5
Su buharı difüzyon direnci (μ)	30-100
Kullanılabilir Isı Sınır Değeri	-200°C +120°C arasında
Yangın Dayanım Sınıfı	B1/B2/B3

Ahşap lifli panel

Ahşap talaşının manyezit bağlayıcı ile sıkıştırılarak levha halinde üretilmesiyle elde edilen ısı yalıtım panelidir. Odun talaşı; odun, kereste ve artıkların özel makinelerde rendelenmesi ile elde edilen belirli boyutlarda, ince uzun şerit biçiminde odun parçalarıdır. Basınç ve bükülmeye karşı dayanımı olan bu levhaların aynı zamanda ses yalıtımı özelliği de vardır. Güneşin ultraviyole ışınlarından etkilenmezler ancak kökeni organik malzeme olduğu için dış çevreden haşere ve organizmalardan etkilenmektedir (Candan, 2007). Türkiye’de kullanılan ahşap lifli panel Resim 2.6’da gösterilmiştir ve ahşap lifli panele ait genel özellikler Çizelge 2.9’da verilmiştir.



Resim 2.6. Ahşap lifli panel (Candan, 2007)

Çizelge 2.9. Ahşap lifli panelin genel özellikleri (Candan, 2007)

Yoğunluk	360-570 kg/m ³
Isı İletkenlik Katsayısı	0,09-0,15W/mK
Basınç Gerilimi	0,2 N/mm ²
Su emmesi (1 yıl)	Hacimce %10
Su buharı difüzyon direnci (μ)	2-5
Kullanılabilir Isı Sınır Değeri	Maksimum +110°C
Yangın Dayanım Sınıfı	C-D-E

Cam köpüğü

Cam köpüğü, hücresel dolgu malzemesi ile birleştirilmiş atık cam kırıklarından oluşmaktadır. Bu iki bileşenin bir kalıba yerleştirilerek yaklaşık 510°C'ye kadar ısıtılmasıyla malzeme ayrışmakta ve bunun sonucunda karışım genişip kalıbı doldurularak ısı yalıtım paneli elde edilmektedir. Cam köpüğü paneller; çok sert, basınca çok dayanıklı, kolay kırılabilen, sürtünmeye dayanıksız, yüzeyi sürtünmeyle kolay tozlaşabilir, buharı hiç geçirmeyen yalıtım panelidir (İMO Yapı Malzemeleri Komisyonu, 2015). Türkiye'de kullanılan cam köpüğü ısı yalıtım paneli Resim 2.7'de gösterilmiştir ve cam köpüğüne ait genel özellikler Çizelge 2.10'da verilmiştir.



Resim 2.7. Cam köpüğü paneli (İMO Yapı Malzemeleri Komisyonu, 2015)

Çizelge 2.10. Cam köpüğü panelinin genel özellikleri (İMO Yapı Malzemeleri Komisyonu, 2015)

Yoğunluk	100-200 kg/m ³
Isı İletkenlik Katsayısı	0,045-0,060
Basınç Gerilimi	0,2 N/mm ²
Su emmesi (1 yıl)	Su emmez
Su buharı difüzyon direnci (μ)	10000
Kullanılabilir Isı Sınır Değeri	-260°C/ +430°C
Yangın Dayanım Sınıfı	A1-A2

Fenol köpüğü

Fenol köpüğü, fenol-formaldehit bakalitine anorganik şişirici ve sertleştirici maddeler katılarak elde edilmektedir. Fenol köpüğü paneli çeşitli yoğunlukta, sert fakat kırılğan, küçük gözenekli, yüzeyi sürtünme ile tozlaşan bir yapıya sahiptir (Akıncı, 2007). Türkiye’de kullanılan fenol köpüğü paneli Resim 2.8’de gösterilmiştir ve fenol köpüğüne ait genel özellikler Çizelge 2.11’de verilmiştir.



Resim 2.8. Fenol köpüğü paneli (Akıncı, 2007)

Çizelge 2.11. Fenol köpüğü panelinin genel özellikleri (Akıncı, 2007)

Yoğunluk	30-35 kg/m ³
Isı İletkenlik Katsayısı	0,030 – 0,045 W/mK
Su buharı difüzyon direnci (μ)	10-50
Kullanılabilir Isı Sınır Değeri	-180°C/ +120°C
Yangın Dayanım Sınıfı	Kaplamasız B, kaplamalı C

Mantar panel

Mantar levhası, mantarın kırılması veya öğütülmesi ile meydana gelen parçacıkların fırınlanması ve bunların bitümlü, reçine gibi bağlayıcı madde kullanılarak veya kendi yapısındaki doğal yapıştırıcı madde ile ısı ve/veya basınç altında birleştirilmesi suretiyle şekillendirilmesinden elde edilen ısı yalıtım panelidir. Eskiden yalıtım amacıyla kullanılırken bugün daha ziyade dekorasyon amacı ile ve şişe mantarı olarak kullanılmaktadır (Candan, 2007). Türkiye’de kullanılan mantar panel Resim 2.9’da gösterilmiştir ve mantar panele ait genel özellikler Çizelge 2.12’de verilmiştir.



Resim 2.9. Mantar panel (Candan, 2007)

Çizelge 2.12. Mantar panelinin genel özellikleri (Candan, 2007)

Yoğunluk	80-500 kg/m ³
Isı İletkenlik Katsayısı	0,045-0,055 W/mK
Su buharı difüzyon direnci (μ)	10-35
Kullanılabilir Isı Sınır Değeri	-180°C/ +100°C
Yangın Dayanım Sınıfı	C-D-E

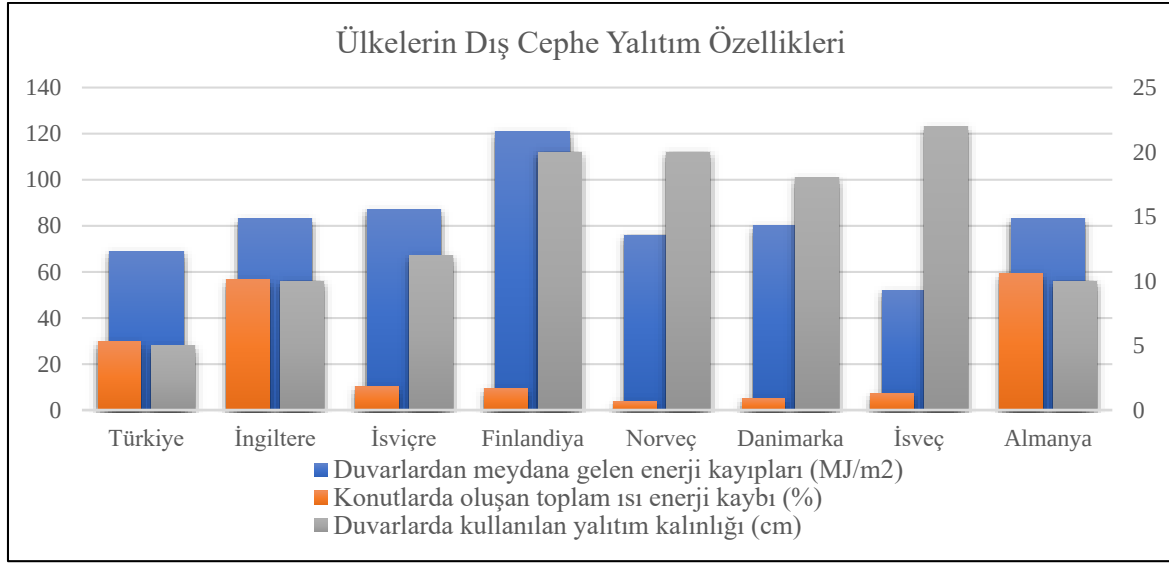
Bu bilgilere ek olarak, ülkemizde kullanılan ısı yalıtım panellerinin ısı iletkenlik katsayıları ve yangına tepki sınıfları Çizelge 2.13’de verilmiştir (Kulaksızoğlu, 2006).

Çizelge 2.13. Isı yalıtım panellerinin ısı iletkenlik katsayıları ve yangına tepki sınıfları (Kulaksızoğlu, 2006)

Isı Yalıtım Paneli	Isı İletim Katsayısı (W/m.K)	Yangına Tepki Sınıfı
Genleştirilmiş Perlit	0.040-0.065	A1
XPS (Ekstrüde Polistren Köpük)	0.030-0.040	D-E
EPS (Ekspande Polistren Köpük)	0.035-0.040	D-E
Cam Yünü	0.035-0.050	A1-A2'
Taş Yünü	0.035-0.050	A1-A2'
PUR (Poliüretan) ve PIR (Poliizosüenürat) sert köpükler	0.025-0.040	B-C-D''/D-E'''
Fenol Köpüğü	0.030-0.045	B-C-D
Cam Köpüğü	0.045-0.060	A1-A2
Ahşap Yünü	0.035-0.076	B-C-D
Genleştirilmiş Mantar Levhalar	0.045-0.055	C-D-E
Ahşap Lifi Levhalar	0.035-0.070	C-D-E
Gaz Beton Isı Yalıtım Levhası	0.042-0.050	A1

Yapı sektöründe yaygın bir biçimde kullanılan ısı yalıtım panellerine ait teknik özellikler incelendiğinde, genel olarak yalıtım panellerinin ısı iletkenlik değerlerinin yaklaşık olarak birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, yalıtım panellerinin yangına tepki sınıfları, malzeme türüne göre farklılık göstermektedir. Özellikle, XPS, EPS, poliüretan, fenol köpüğü, ahşap yünü, mantar levha ve ahşap lifli paneller ile yapılacak dış duvar yalıtımında herhangi bir yangın riski oluştuğunda, yangın dayanım sınıfı can ve mal güvenliğinin sağlanması için gereken süreyi karşılayamayacaktır. Bu nedenle ülkemizde 2002 yılı sonunda yürürlüğe giren “Yangından Korunma Yönetmeliği” gereğince söz konusu panellerin kullanım alanları sınırlandırılmıştır. Bu bilgilere ek olarak, GP, cam yünü, taş yünü, cam köpüğü ve gaz beton ısı yalıtım panellerinin A1 yani yanmaz yangın sınıfında bulunması, dış duvarda ısı yalıtım paneli olarak kullanılması durumunda can ve mal güvenliğinin sağlanması için gereken sürede yangına dayanabileceğini göstermektedir.

Yapı sektöründe, kullanılan ısı yalıtım panelleri kadar panellerin kalınlıkları da enerji korunumunda önemli bir paya sahiptir. Bu kapsamda, Avrupa Yalıtım Üreticileri Kurumu’nun (EURIMA) 2011 yılında yaptığı araştırmaya göre, duvarlardan meydana gelen enerji kayıpları, konutlarda oluşan toplam ısı enerji kaybı ve duvarların yalıtım kalınlığı Şekil 2.5’de gösterilmiştir (Europen Insulation Manufacturers Association, 2017).



Şekil 2.5. Ülkelerin dış cephe yalıtım özellikleri (European Insulation Manufacturers Association, 2017)

Şekil 2.5 incelendiğinde, duvarlardan meydana gelen enerji kayıplarına göre yalıtım kalınlığının ülkeler bazında değiştiği tespit edilmiştir. Duvarlarda en çok enerji kaybı Finlandiya’da gerçekleşmiş olmasına rağmen, ısı yalıtım kalınlığı en fazla İsveç’te tercih edilmiştir. Türkiye’nin duvarlarda meydana gelen enerji kaybı 69 (MJ/m²), binalarda oluşan toplam ısı enerji kaybı %5,3 ve duvarlarda kullanılan yalıtım kalınlığı 5 cm olarak tespit edilmiştir. 2001 verilerine göre, Avrupa’da en düşük ısı yalıtım kalınlığının ülkemizde olduğu görülmüştür (European Insulation Manufacturers Association, 2017).

Ek olarak, termal konfor ihtiyacını karşılamak için konut sektöründe kullanılan enerji miktarının büyük bir kısmını ısıtma ve soğutma sistemleri oluşturmaktadır (Aditya, ve diğerleri, 2017; Bektaş, Çerçevik ve Yerel Kandemir, 2017). Bu nedenle, soğuk ve sıcak iklim bölgelerinde ısı yalıtım panellerinin yerleştirilmesinde değişiklikler görülebilmektedir. En iyi verim, yalıtım panelinin ısı akışına girme noktasına yakın yerleştirilmesinden sağlanmaktadır. Bu, kışın ısıtmanın egemen olduğu iklim bölgelerinde içeriye yalıtımın yerleştirilmesi ve yazın soğutmanın baskın olduğu yerlerde yalıtımın dışa doğru yerleştirilmesi anlamına gelir. Bununla birlikte, pratiklik açısından, içe veya duvar boşlukları arasında yalıtım yapmak yaygın bir durumdur (Al-Homoud, 2005).

Ayrıca iki katlı bir binada içten yalıtım yapıldığında yalıtımsız duruma göre yıllık yakıt tüketiminde %60, ortadan yalıtım yapıldığında %40, dıştan yalıtım yapıldığında ise %70 oranında tasarruf sağlanabilmektedir. Buna göre duvarlarda yapılan yalıtımda en sağlıklı ve

tasarruflu olanı dıştan yapılan yalıtım şeklidir. Dış duvarlarda yapılan yalıtımın kalınlığı arttıkça, ısı kaybı aynı oranda azalmaktadır (Engin, 2012).

Optimum ısı yalıtım kalınlıklarının belirlenmesi konusunda literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Suman Hint Standart Kodu IS: 661 tarafından önerilen genel termal transmitans değerini karşılamak için ısı yalıtım panellerinde olması gereken optimum kalınlığın belirlenmesini araştırmıştır. Öncelikle panellerin 30 °C'deki ısı iletkenlik değerleri Çizelge 2.14'de verilmiştir. Optimum kalınlık -4 ile 2 °C ve 2 ile 10 °C arasındaki sıcaklık aralığında hem toz hem de katı malzeme için belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde panelelin sahip olması gereken optimum kalınlıkları, Hint Standart Kodu IS: 661'na göre Çizelge 2.15'de belirtilmiştir (Suman, 2015). -4 ile 2 °C ve 2 ile 10 °C sıcaklık aralığı için dış duvarlarda optimum kalınlığı en düşük malzeme genişleştirilmiş perlittir.

Çizelge 2.14. 30 °C'de ölçüm yapılan panellerin ısı iletkenlik değerleri (Suman, 2015)

PanelTipi	Isıl İletim Katsayısı (W/m.K)
EPS	0,036
PUF	0,023
Fenolik Köpük	0,026
Mineral Yünü/Cam Yünü	0,033
Pirinç Kabuğu Külü	0,051
Talaş Tozu	0,074
Genleştirilmiş Perlit	0,039
Vermikülit	0,064

Çizelge 2.15. Isı yalıtım panellerinde optimum kalınlık değerleri (cm) (Suman, 2015)

Optimum Kalınlık (m)	Genleştirilmiş Perlit		Uçucu Kül		Vermikülit		Pirinç Kabuğu Külü		Talaş Tozu	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
Dış Duvar	14	10,6	155	117	23	17,3	18,3	13,8	26,5	20,1
İç Duvar	6,2	3,6	67,6	39,7	10,0	5,9	8	4,7	11,6	6,8
Çatı	15,4	12,8	170,3	142,2	25,2	21,1	20,1	16,8	29,2	24,4
Zemin	12,8	7,8	142,2	86,1	25,0	12,8	16,8	10,2	24,4	14,8

Papadopoulos binalarda yalıtım panellerinin kalınlık artışı ve bu artışın etkilediği satış oranlarını araştırmıştır. Avrupa ısı yalıtım sektöründe, inorganik lifli paneller ve organik köpüklü panellerden oluşan iki ürün grubunun kullanımının yaygın olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak, ısı yalıtım panellerinin farklı binalara uyumlu olması ve düşük maliyetli olması gerekmektedir (Papadopoulos, 2005).

Bektaş ve diğerleri, Türkiye'nin 4 farklı derece-gün bölgesinden 16 ilin en uygun yalıtım kalınlığını, sağlanacak enerji tasarrufunu ve geri ödeme sürelerini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, yalıtım kalınlıkları 2 ile 17 cm arasında değiştiğinde tasarrufun %22-%79 arasında olduğu ve geri ödeme sürelerinin 1,3 ile 4,5 yıl arasında değişeceği tespit edilmiştir (Bektaş, Çerçevik ve Yerel Kandemir, 2017). Sonuçlardan görüldüğü üzere, ısı yalıtım paneli kalınlığı enerji tasarrufu ile doğrudan ilişkilidir.

Can üç tip enerji kimlik belgesi için yalıtım paneli kalınlığının etkisini araştırmıştır. Bu enerji tiplerinde A, B ve C tipleri için sırasıyla 7 cm, 5 cm ve 3 cm alınmıştır. Üç tip için TS825 Standardı kullanılarak birim alan başına tüketilecek yakıt miktarı A tipi için 8,01 kg, B tipi için 8,7 kg ve C tipi için 9,88 kg ölçülmüştür. Bu sonuçlar, yapılan yalıtım kalınlığı arttıkça yakıt miktarının düştüğünü ve bunun sonucu olarak yakıt maliyetinin azaldığını göstermektedir (Can, 2013).

Çomaklı ve Yüksel yaptıkları çalışmada Türkiye'nin soğuk illerinden 3 il (Erzurum, Kars, Erzincan) için optimum yalıtım kalınlıklarını araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, Erzurum için optimum yalıtım (10,5 cm) uygulandığında tasarrufun yılda yaklaşık 12 \$/m², Kars için optimum yalıtım (10,7 cm) uygulandığında tasarrufun yılda yaklaşık 12,7 \$/m² ve Erzincan için optimum yalıtım (8,5 cm) uygulandığında ise tasarrufun yılda yaklaşık 8 \$/m² olabileceği hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre, yalıtım kalınlığı arttıkça enerji tasarrufunun da artacağı tespit edilmiştir (Çomaklı ve Yüksel , 2003).

Kürekçi ve diğerleri, 81 il için optimum yalıtım kalınlığını araştırmışlardır. Ayrıca, ömür-maliyet analizi yöntemi kullanılarak, 81 il için dıştan yalıtımlı bir duvar modelinin iki farklı yakıt türü (doğal gaz, ithal kömür) ve beş farklı yalıtım paneli (taş yünü, cam yünü, XPS, EPS ve poliüretan) için optimum yalıtım kalınlığı, geri ödeme süreleri ve tasarruf miktarları hesaplanmıştır. Elde edilen veriler gözetildiğinde, binaların dış duvarlarına uygulanan yalıtım kalınlığı arttıkça, binanın ısı kaybının azaldığı dolayısıyla yakıt tüketiminin düştüğü gözlenmiştir. Ayrıca, optimum yalıtım kalınlığı yakıta, yalıtım paneline ve iklim koşullarına göre değişiklik göstermiştir. Çalışmada ülkemizde ısı yalıtım panellerinin kullanılması için olması gereken optimum kalınlıklar Çizelge 2.16'da verilmiştir (Kürekçi, Bardakçı, Çubuk ve Emanet, 2012).

Çizelge 2.16. Panellere göre optimum yalıtım kalınlık değerleri (Kürekçi, Bardakçı, Çubuk ve Emanet, 2012)

Panel	Yalıtım Kalınlığı
Taş Yünü	4-17 cm
Cam Yünü	6-20 cm
XPS	4-16 cm
EPS	3-13 cm
Poliüretan	1-6 cm

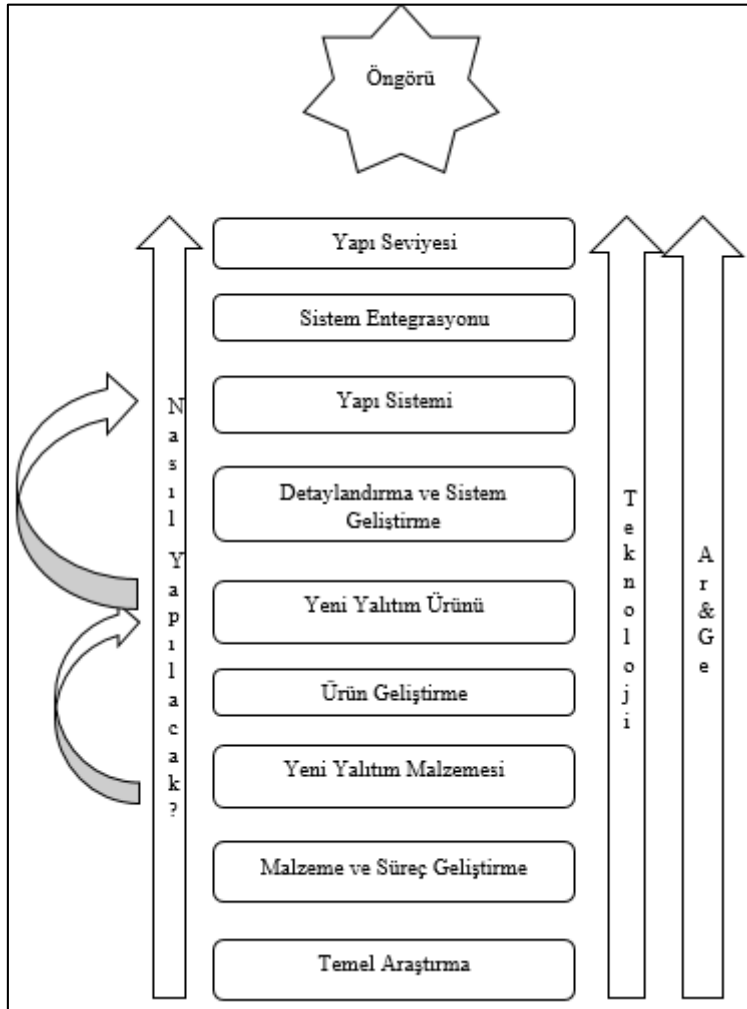
Uygun ısı yalıtım kalınlıklarının enerji kullanımının sınırlandırılabilceği ve hedeflenen enerji tasarrufuna rahatlıkla ulaşılabilceği görülmüştür. Yalıtım panelinin kalınlığı arttıkça, ısı kaybı azalmakta, enerji verimliliği artmakta ve yakıt maliyeti azalmaktadır. Diğer bir taraftan kalınlık arttıkça panel maliyeti, yapı ağırlığı da aynı oranda artmaktadır. Çok kalın panel kullanarak maliyeti yükseltmek de istenen bir durum değildir. Bu nedenle optimum yalıtım kalınlığı hedeflenmelidir (Özkan, Onan ve Erdem, 2009). Ülkemizde bu kalınlıklar ilk aşamalarda 3cm olmasına rağmen, TS 825'in uygulanması ve hesaplama kurallarıyla bulunduğu bölgeye göre 8 - 16 cm kalınlığa kadar artış göstermiştir (İMO Yapı Malzemeleri Komisyonu, 2015).

2.1.4. Isı yalıtım panellerinin sahip olması gereken özellikler

Isı yalıtım panellerinden istenilen tasarrufun sağlanması için sahip olması gereken özellikler literatür çalışmaları incelenerek tespit edilmiştir. Jelle yaptığı çalışmada geleneksel ve yeni ısı yalıtım panellerini araştırmış, yalıtım panellerinin avantajları ve dezavantajlarını incelemiş ve çözümler önermiştir. Isı yalıtım panellerinde bulunması gereken olumlu özelliklerin çalışma sonunda ısıl iletkenlik, delinme hassasiyeti, sahada uygulanabilirliği ve kesilebilirliği, mekanik dayanım, yangın direnci, yangın esnasında duman emisyonu, kalıcılık, iklim yaşlanmasına dayanıklılık, donma/çözme döngülerine karşı direnç, su direnci, maliyetler ve çevresel etkiler gibi özellikler olması gerektiğini tespit etmiştir (Jelle, 2011).

Ojanena ve diğerleri, çalışmasında sıfır enerjili binaların, yüksek performanslı yalıtım paneli kullanılmadan elde edilemeyeceğini belirtmişlerdir. Bu nedenle yüksek performanslı yalıtım panelinin geliştirilmesi ve binalarda uygulanabilirliği önem taşımaktadır. Ayrıca ısı yalıtım panellerinin kilit performans göstergelerinin analizini yapmışlardır. Çalışma sonucunda ısı yalıtım panelinin yapı sektöründe kullanılması için uzun bir aşamadan geçmesi gerektiği

belirtilmiş ve bu aşamalar Şekil 2.6’da gösterilmiştir. Teknik açıdan üstün performansı ve düşük maliyetli ısı yalıtım panellerinin yaygınlaştırması gerekmektedir (Ojanena, Pinto Seppä ve Nykänena, 2015).



Şekil 2.6. Isı yalıtım paneli geliştirme süreci (Ojanena, Pinto Seppä ve Nykänena, 2015)

Bektaş ve diğerleri, ısı yalıtım panellerinde bulunması gereken özellikleri araştırmıştır. Çalışma sonucunda, ısı yalıtım panelinin yapıya fazladan yük kazandığı ve yapının ağırlığının artışının deprem davranışı açısından iyi olmaması nedeniyle ısı yalıtım panelinin hafif olması gerektiğini belirtmişlerdir. Buna ek olarak, ısı yalıtım paneli şekil değiştirmeye, çatlamaya, basınca, çekmeye karşı dayanıklı ve uzun ömürlü olmalıdır. Buna ek olarak, çürümeye, küflenmeye ve korozyona karşı dirençli olması, su geçirmezlik ve neme karşı direnç özelliklerinin uygun olması, panelin hangi yapı elemanında kullanılacağı maruz kalacağı etkiler açısından önemlidir. Su buharı geçirgenliği ve yangın direnci yüksek paneller tercih edilmelidir. Yukarıda bahsedilen özelliklerin yanı sıra ısı yalıtım paneli

seçiminin ekonomik olması da beklenmektedir (Bektaş, erevik ve Yerel-Kandemir, 2017; Isı Su Ses ve Yangın Yalıtımcıları Derneği, ty; Yüksek, 2016).

2.1.5. Isı yalıtımın yapı sektöründeki önemi

Türkiye, üç kıtanın birleşme noktasında yer almakta ve 8.333 km uzunluğundaki kıyı hattıyla, deniz ulaşımı ve turizm için son derece elverişli koşullar yaratmaktadır. Ilıman ve tropik karakteristik iklim özellikleri taşıyan iklim bölgelerinden, sert kışlara, sıcak ve kuru yazlara kadar farklılık gösteren 4 mevsim yaşanan bölgesel ve/veya mevsimsel değişimler, Türkiye'nin ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacını farklı düzeylerde belirlemektedir. Türkiye'de tüketilen toplam enerjinin %36'ı binaların ısıtılması, soğutulması ve aydınlatılması için, kullanılmaktadır. Bu şekilde, binaların yıllık enerji maliyeti 14 milyar \$'ı aşmaktadır. Ancak enerjinin verimli kullanılmasıyla toplam enerji tüketiminde yaklaşık %25 oranında tasarruf sağlanabileceği belirtilmiştir (Tıkansak, t.y.).

Ayrıca Türkiye'de ısı yalıtımı olmayan 19 milyon binanın bulunduğu belirtilmiştir. Bu binaların yalıtımlı hale gelmesiyle yaklaşık 10.000 Megavat kurulu güce sahip, 80 milyar Kilovat saat üretim kapasitesindeki iki adet nükleer santralden elde edilecek enerji kadar tasarruf potansiyeli mevcuttur. Bu tasarrufun her yıl 9 milyar 265 milyon dolar (2013 fiyatlarıyla) tasarrufunun sadece ısı yalıtımından sağlanabileceği belirtilmiştir (Pelesen, 2013). Elde edilen bu verilerle birlikte, özellikle sadece inşaat sektöründe ısı yalıtım uygulamalarının artmasıyla ciddi miktarlarda tasarruf edilebileceği ön görülmüştür.

Isı yalıtım panellerinin yapı sektöründe kullanımı için birçok neden vardır. Literatür çalışmaları incelendiğinde, ısı yalıtımın yapı sektörüne sağladığı avantajlar göz önüne serilmiştir. Yapı sektöründe enerji tasarrufunu sağlamak, çok farklı sıcaklıkları aynı anda yaşayan ülkemizde çevremizin korunumu ve sürdürülebilir bir yaşam için önemlidir (Pamuk ve Kuruoğlu, 2016; Hoşkara, 2007; Kibert, 1994).

2.2. Isı Yalıtımının Matematiksel Modellerle Belirlenmesi

Gözenekli ortamların ısı iletkenliğini etkili bir şekilde tahmin etmek için farklı modeller literatürde yer almaktadır. Çoğu teorik ısı iletkenlik modelleri, sadece bileşenlerin ısı iletkenlikleri ve hacim oranlarını kullanarak ısı iletkenlik değerlerini tespit etmektedir. Bazı

ısı iletkenlik modelleri ise, bileşenlerin ısı iletkenlikleri ve hacim oranlarına ek olarak yeni parametreler kullanmaktadır. Yapıdaki bileşenlerin şekil, boyut, düzen, temas etkisi veya faktörü bu parametreler arasındadır. Buna ek olarak, birkaç modelden elde edilen sonuçların hangisinin doğru sonucu vereceği kesin olmadığından kullanılacak model uygulama yeri ve aralığı dikkate alınarak uygulanmalıdır. Matematiksel teorik modeller ve hesaplama yaklaşımları kullanılarak kompozit ısı yalıtım panellerinin ısı iletkenliğinin belirlenmesi için çalışmışlardır. Isı yalıtımı için kullanılan modelleri bazı gözenekli paneller için kullanarak çözümlemeler yapmışlardır (Kumlutaş ve Tavman, 2003; Karaağaç, Durmuş, Uluer ve Tülü, 2016).

İki bileşenli bir malzeme için seri ve paralel model, kullanılan en yaygın modellerdendir. Isı akışı yönüne dik ve paralel düzenlenmiş iki bileşenli bir malzemede, iletimle ısı transferi mekanizması dikkate alınarak seri ve paralel model oluşturulmaktadır. Bu modeller daha yaygın ve kolay uygulanabilir bir yaklaşımdır. Seri ve paralel modeller, herhangi bir heterojen malzemenin minimum ve maksimum efektif ısı iletkenlik sınırlarıdır. Efektif ısı iletkenlik, bu iki sınır arasında değişmektedir. Paralel ve seri model, ağırlıklı aritmetik ortalama ve harmonik ortalama ile verilmektedir (Bart, 1994).

$$k_{e(seri)} = \left[\left(\frac{V_d}{k_d} \right) + \left(\frac{\epsilon}{k_s} \right) \right]^{-1} \quad (2.1)$$

$$k_{e(paralel)} = (V_d * k_d) + (\epsilon * k_s) \quad (2.2)$$

Burada k_s , k_d ve ϵ , sürekli fazın ısı iletkenliği, dolgu fazının ısı iletkenliği ve sürekli fazın hacim oranı olarak verilmektedir. Sürekli ve dolgu fazlarından oluşan gözenekli bir malzeme (ϵ) ve V_d hacim oranlarına sahiptir.

2.2.1. Geometrik ortalama model

İki bileşenli gözenekli bir malzemede etken ısı iletkenliği, bileşenlerin ısı iletkenliği ile hacim oranlarına bağlı olarak ağırlıklı geometrik ortalaması ile verilmektedir (Singh, Singh ve Chaudhary, 1998; Maqsood ve Kamran, 2005; Tavman, 1998; Cernuschi, Ahmaniemi, Vuoristo ve Mantyla, 2004).

Bu teoriye göre tahmini ısı iletkenliği:

$$k_e = (k_s)^\varepsilon * k_d^{(1-\varepsilon)} \quad (2.3)$$

2.2.2. Maxwell modeli

Maxwell model yaklaşımı, dağılı fazların birbiriyle temassız olduğu bir yaklaşımdır (Maxwell, 1954). Modele göre dağılı fazın asla sürekli iletim yollarını oluşturmadığı belirtilmektedir. Maxwell modeli, seyrek fazlar için bir ortalama alan yaklaşımı olarak bilinmektedir.

Maxwell, potansiyel teoriyi kullanarak, homojen ortamda gelişigüzel dağılı ve etkileşimsiz homojen kürelerin etken ısı iletkenliği için basit bir ilişki elde etmiştir:

$$k_e = k_s \left[\frac{2k_s + k_d - 2(k_s - k_d) * V_d}{2k_s + k_d + 2(k_s - k_d) * V_d} \right] \quad (2.4)$$

Burada, V_d dağılı fazın hacim oranıdır ve $(1-\varepsilon)$ olarak ifade edilebilir. Bu model, düşük dağılımlı dolgu fazlarında efektif ısı iletkenliğini çok iyi tahmin etmektedir. Oysa yüksek derişimli dolgu fazları olan malzemelerde, dolgu parçacıkları ya birbiri ile temas halinde ya da ısı akışı yönünde iletim zincirleri oluşturmaktadır. Bu yüzden, bu modelin efektif ısı iletkenliği düşük tahmin ettiği görülmüştür. Bu modelin iki bileşenden birinin gözenekliliği 0,25'i ve ısı iletkenlik oranı (k_d/k_s) 10'u aşmadığı zaman güvenilir sonuçlara ulaşılacağı belirtilmiştir (Beck, 1976). Maxwell modeli j parametresi ile tanımlayarak verilmektedir (Carson, Lovatt, Tanner ve Cleland, 2003). Burada, Maxwell modelindeki 2 sayısı yerine $(j-1)$ katsayısı koyularak Maxwell – Hamilton modeli olarak verilmiştir. Ayrıca, esnek modeller arasında verilen modifiye edilmiş Maxwell modeli de yer almaktadır. Bu durumda, Maxwell modeldeki 2 yerine $[j^2 / (1 - j^2)]$ katsayısı kullanılmaktadır (Carson, Lovatt, Tanner ve Cleland, 2003; Carson, 2006). Burada j , ampirik parametre olmasına rağmen malzeme içindeki ısı iletim yollarının niteliğinin bir ölçümüdür. Bu model, seyrek dağılımlara sahip malzemeler için uygun bir modeldir. Bu model, farklı dağılımlı faz şekli için incelenmiş olup burada, küre şeklindeki dolgu fazlarının yüksek oranlarında uygun efektif ısı iletkenlik sonuçları elde edilmiştir (Belova ve Murch, 2004).

Benzer modeller arasında sunulabilecek Maxwell – Eucken modeli, ana sebebi farklı olmakla birlikte yaygın olarak kullanılan modellerden biri olmasıdır. Bu modelin, iki formu bulunmaktadır. Bunlar, Maxwell–Eucken 1 ve 2 denklemdir. Burada Maxwell – Eucken 2 modeli;

$$k_e = k_d \left[\frac{2k_d + k_s - 2(k_d - k_s) \cdot \varepsilon}{2k_s + k_d + (k_s - k_d) \cdot V_d} \right] \quad (2.5)$$

Burada k_s ve k_d , sırasıyla sürekli ortamın ve dağılı fazın ısı iletkenlikleridir. Maxwell–Eucken 2 modeli, izotropik iç gözenekli malzemeler için, üst sınır olarak belirlenmiştir. Maxwell – Eucken 1 denklemi ise, izotropik dış gözenekli malzemelerin alt sınırı olarak verilmektedir (Carson, 2006). Maxwell – Eucken 1 denklemi, sürekli faz olarak havanın alındığı bir modeldir.

2.2.3. Nielsen modeli

Nielsen modeline göre bir gözenekli malzemenin ısı iletkenliği, sürekli ortamın ve dolgu fazının ısı iletkenliği (k_s ve k_d) ile ilişkilidir (Nielsen, 1974). Bu model,

$$k_e = k_s \left[\frac{(1 + wBV_d)}{(1 - CBV_d)} \right] \quad (2.6)$$

Burada B ve C parametreleri ise, aşağıdaki gibi ele alınmıştır.

$$B = \left[\frac{\left(\frac{k_d}{k_s} \right) - 1}{\left(\frac{k_d}{k_s} \right) + w} \right] \quad (2.7)$$

$$C = 1 + \left[\frac{(1 - V_m)}{V_m^2} \right] V_d \quad (2.8)$$

Burada, V_m dolgu fazının maksimum paketleme oranıdır. w ise, dolgu parçacıklarının geometrisine bağlı boyutsal bir şekil faktörüdür. w parametresi, genelleştirilmiş Einstein katsayısı ile ilişkili olarak ele alınmaktadır. V_m ve w değerleri Çizelge 2.17 ve 2.18’de verilmiştir (Nielsen, 1974; Kumlutaş ve Tavman, 2003).

Çizelge 2.17. W değeri listesi (Nielsen, 1974; Kumlutaş ve Tavman, 2003)

Katkı malzemesi şekli	Isı Akış Yönü	W
Küp	Her Yönde	2,0
Küre	Her Yönde	1,5
Kümelenmiş küreler	Her Yönde	3
Gelişigüzel düzenlenmiş çubuk		
Görünüş, oranı=2	Her Yönde	1,58
Görünüş, oranı=4	Her Yönde	2,08
Görünüş, oranı=6	Her Yönde	2,8
Görünüş, oranı=10	Her Yönde	4,93
Görünüş, oranı=15	Her Yönde	8,38
Eş eksenli fiber	Fibere dik	2L/D (L:boy, D:çap)
Eş eksenli fiber	Fibere paralel	0,5

Çizelge 2.18. Vm değeri listesi (Nielsen, 1974; Kumlutaş ve Tavman, 2003)

Partikülün şekli	Paketleme Tipi	Vm
Küre	Heksagonal	0,7405
Küre	Yüzey merkezli kübik	0,7405
Küre	Hacim merkezli kübik	0,60
Küre	Basit kübik	0,524
Küre	Gelişigüzel	0,637
Çubuk ya da fiber	Eşeksenli keksagonal	0,907
Çubuk ya da fiber	Eşeksenli basit kübik	0,785
Çubuk ya da fiber	Eşeksenli gelişigüzel	0,82
Çubuk ya da fiber	Üç boyutlu gelişigüzel	0,52

2.2.4. Halphin-Tsai modeli

Tek yönlü faza sahip bir kompozit tabaka için benzer bir model aşağıdaki gibi verilmektedir (Halphin, 1969).

$$k_e = k_s \left[\frac{1+2\left(\frac{L}{d_d}\right)\mu V_d}{(1-\mu V_d)} \right] \quad (2.9)$$

$$\mu = k_s \left[\frac{\left(\frac{k_d}{k_s}\right)-1}{\left(\frac{k_d}{k_s}\right)+2\left(\frac{L}{d_d}\right)} \right] \quad (2.10)$$

Burada d_d , dolgu lif çapıdır. Ayrıca bu model, tekyönlü kısa lifli malzemelerin ısı iletimini tanımlamak için kullanılmıştır (Fu ve Mai, 2003). Lif takviyeli malzemelerin enine ısı iletkenliği bu model ile verilmiştir (Gemci, 1996). Burada, $2(L/d)$ yerine ξ kullanılmaktadır. ξ , aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$\log \xi = \sqrt{3} \log \frac{a}{b} \quad (2.11)$$

Burada a ve b, ısı iletkenliğin dolgu lif eksenine paralel ve dik yöndeki ölçüm katsayılarıdır.

2.2.5. Levy modeli

Levy, sürekli ve dağılı fazlar arasında simetri olmasını sağlamak amacıyla Maxwell-Eucken modeline dayanan bir model ortaya koymuştur (Levy, 1981). Bu modeli, iki Maxwell-Eucken denklemlerinden hangisinin kullanılacağı problemini ortadan kaldırmak için ele almıştır. Bunun için ortaya koyduğu bu model,

$$k_e = k_d \left[\frac{2k_d + k_s - 2(k_d - k_s) * F}{2k_d + k_s + (k_d - k_s) * F} \right] \quad (2.12)$$

$$F = \left[\left(\frac{2}{G} \right) - 1 + 2V_d - \sqrt{\left(\left(\frac{2}{G} \right) - 1 + 2V_d \right)^2 - \left(\frac{8V_d}{G} \right)} \right] \quad (2.13)$$

$$G = \frac{(k_d - k_s)^2}{(k_d + k_s)^2 + \left(\frac{k_d * k_s}{2} \right)} \quad (2.14)$$

şeklindedir.

2.2.6. Efektif ortam teori (EMT) modeli

Bu model, sürekli ya da dağılı faz gelişigüzel dağıtılmış olan bir heterojen malzemeyi göstermektedir. Bileşenlerin bağıl miktarlarına bağılı olarak ikisinden bir bileşen, sürekli ısı iletim yolları oluşturabilmektedir. Efektif ortam teorisi (EMT), rijit modeller arasında genel form ile aşağıdaki gibi verilmektedir (Carson, Lovatt, Tanner ve Cleland, 2005).

$$\sum_i V_i \frac{k_j - k_e}{k_j + 2k_e} = 0 \quad (2.15)$$

İki bileşen için bu model, aşağıdaki gibi yazılmaktadır:

$$k_e = \frac{1}{4[(3\varepsilon - 1)k_s + (3(1 - \varepsilon) - 1)k_d + \sqrt{[(3\varepsilon - 1)k_s + (3(1 - \varepsilon) - 1)k_d]^2 + 8k_s k_d}] } \quad (2.16)$$

Burada k_s ve k_d , sürekli faz olarak havanın ısı iletkenliği ve dağılı faz olarak yoğuşan sıvının ısı iletkenliği ile tanımlanmaktadır. Ayrıca bu model, izotropik dış gözenekli malzemelerin efektif ısı iletkenliğinin üst sınırı olarak belirlenmiştir. İzotropik iç gözenekli malzemeler için ise, bu model alt sınırı oluşturmaktadır. Modele F parametresi ilave edilerek esnek modeller, $k_e = (k_i, v_i, F)$ arasında gösterilmektedir.

2.2.7. Krischer yaklaşımı

Krischer'in yaklaşımında, karmaşık bir yapı daha basit yapıların karışımı olarak ele alınmaktadır. Modelde basit yapıların her birinin bağıl miktarları ampirik olarak tanımlanarak karışımın ısı iletkenliği belirlenmektedir (Krischer, 1963). Krischer, birleşik yapının etken ısı iletkenliğini seri ve paralel iletkenliklerin ağırlıklı harmonik ortalaması olarak tanımlamıştır (Belova ve Murch, 2004; Fu ve Mai, 2003). Bu model, F dağıtım faktörü ile esnek modeller $k_e = k_e(k_i, v_i, F)$ arasında gösterilmektedir.

$$k_e = \left[\left(\frac{1-F}{k_{\text{paralel}}} \right) + \left(\frac{F}{k_{\text{seri}}} \right) \right]^{-1} \quad (2.17)$$

F parametresi sıfır olduğuunda Krischer'in modeli paralel modele indirgenmektedir. F, 1 olduğuunda ise seri modele ulaşılmaktadır. Bu yüzden, 0 ve 1 arasında değişen Wiener sınırları ile sınırlı bölgede herhangi bir yerde $k_e = k_e(k_i, v_i, F)$ yer almaktadır. Krischer'in modelinde, F değeri uygun tahmin edilirse kabul edilebilir tahminler beklenebilir. Bu model, gıda mühendisliği literatüründe en fazla kullanıma sahip modeldir.

2.2.8. Russell modeli

Bu modelde, sürekli ortam içinde aynı boyutlu dağılı izole küplerin olduğu varsayılmaktadır (Tavman, 1998). Elektrik analogisi kullanılarak geliştirilen bu model, matriks malzeme içinde dağılı olan aynı boyutlu izole küpler halindeki fazlar varsayımına dayanmaktadır.

$$k_e = k_s \left[\frac{v_d^{2/3} + \left(\frac{k_s}{k_d} \right) (1 - v_d^{2/3})}{v_d^{2/3} - v_d + \left(\frac{k_s}{k_d} \right) (1 - v_d^{2/3} + v_d)} \right] \quad (2.18)$$

2.2.9. Cheng ve Vachon teorik modeli

Cheng ve Vachon katkı malzemesinin parabolik dağılıma sahip süreksiz bir faz olduğu kabul ediyor. İki farklı kompozit malzemede, katkı malzemesinin hacimsel oranına bağlı kapalı formda ifade edilmektedir (Cheng ve Vachon, 1970).

$$k_s > k_d \rightarrow \frac{1}{k_e} = \frac{2}{\sqrt{C_2(k_d - k_s)[k_s + C_1(k_d - k_s)]}} \tan^{-1} \frac{C_1}{2} \sqrt{\frac{C_2(k_d - k_s)}{k_s + C_1(k_d - k_s)}} + \frac{1 - C_1}{k_s} \quad (2.19)$$

$$k_d > k_s \rightarrow \frac{1}{k_e} = \frac{1}{\sqrt{C_2(k_d - k_s)[k_s + C_1(k_d - k_s)]}} \ln \frac{\sqrt{(k_s + C_1(k_d - k_s)) + \frac{C_1 \sqrt{C_2(k_d - k_s)}}{2}}}{k_s + C_1(k_d - k_s) - \frac{C_1 \sqrt{C_2(k_d - k_s)}}{2}} + \frac{1 - C_1}{k_s} \quad (2.20)$$

Her iki denklemde de C_1 ve C_2 aşağıdaki gibidir:

$$C_1 = \sqrt{\frac{3V_d}{2}} \quad (2.21)$$

$$C_2 = -4 \sqrt{\frac{2}{(3V_d)}} \quad (2.22)$$

Literatür çalışmaları incelendiğinde gözenekli ortamların ısı iletkenliğinin tahmin edilmesinde birden fazla modelin mevcut olduğu görülmüştür. Bu modellerin üretilen numunelere uygunluğunun belirlenmesi için mutlaka deneysel ve matematiksel sonuçlar karşılaştırılmalıdır.

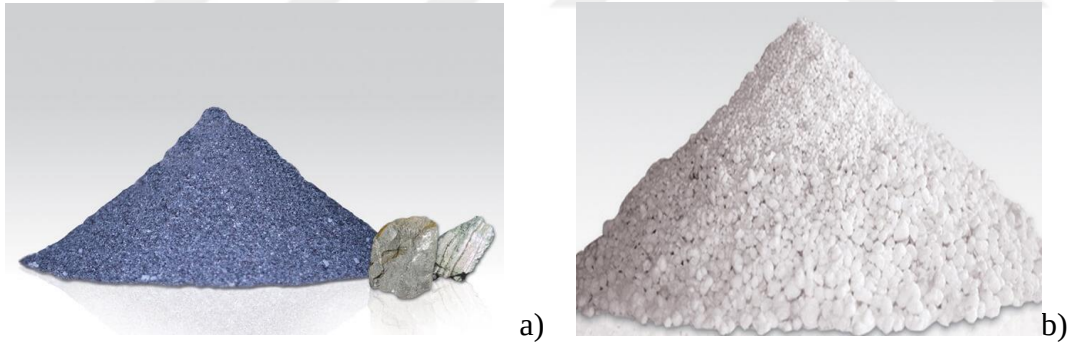
2.3. Genleştirilmiş Perlit (GP)

Perlit ismi bazı perlit tiplerinin kırıldığına inci parlaklığında küçük küreler elde edilmesi nedeni ile inci anlamına gelen perle kelimesinden türetilmiştir. Perlit, ısıyla birlikte genleşme özelliği olan, genleştirildiğinde çok hafif ve gözenekli hale geçmektedir. Perlit kelimesi ham perlit için, genleştirilmiş perlit ise bu ham maddenin genleştirilmesiyle elde edilen ürün için kullanılmaktadır. Perlit kayaçları renk ve yapı özellikleri bakımından farklılık gösterebilmektedir. Ham perlitin rengi saydam açık griden parlak siyaha kadar

değişebilmektedir. Genleştiğinde ise renk tamamen beyazlaşmaktadır. Perlitte en önemli özellik, hidrasyona uğramış camsı silika yapısındaki %2-5 arasında bileşik halinde içerdiği sudur ve bu su perlitin kararlılığını sağlamaktadır. Perlit 700-1200 C° arasında ani olarak ısıtıldığında bünyesinden çıkan buharın etkisiyle genişerek camsı tanelerden oluşan bir köpük agregasına dönüşmektedir. Perlit, hızla ısıtıldığında mısır gibi patlayarak orijinal hacminin 20 katına kadar genişleyen silis içeren asidik karakterli volkanik bir cam kayaç olup, genişlen bu malzemeye genişleştirilmiş perlit denilmektedir (U.S. Geological Survey, 2015; Devlet Planlama Teşkilatı, 2001; Orhun, 1969; Shastri ve Kim, 2014; Arifuzzaman ve Kim, 2014; Skubic, Lakner ve Plazl, 2012; Çelik, Kılıç ve Çakal, 2013).

2.3.1. Perlit ve genişleştirilmiş perlitin üretim yöntemleri

Perlit ve genişleştirilmiş perlitin üretim yöntemleri farklıdır. Perlit cevheri açık işletmecilik metodu ile üretilmekte ve kırma-öğütme-sınıflandırma işlemlerinden sonra genişleştirme aşamasıyla birlikte genişleştirilmiş perlit elde edilmektedir. Ham perlit ve genişleştirilmiş perlit Şekil 2.7’de verilmiştir (Doğusan Boru Sanayi ve Ticaret A.Ş., 2018).



Şekil 2.7. a) Ham perlit b) Genleştirilmiş perlit (Doğusan Boru Sanayi ve Ticaret A.Ş., 2018)

Genleştirilmiş perlitin üretiminde tüvanan cevher ocağa yakın bir yerde ilk kaba kırmadan geçirilip gerekli tane iriliğine getirilmesi daha ekonomik bulunduğundan cevhere yakın yerde ocak kurulmaktadır. Ek olarak, perlit numunesi alınırken mümkün olduğu kadar perlit fazla inceltmeden ve dış yapısını bozmadan nodüllerine ya da küp şeklinde tanelerine ayırmak ve kırılğan bir yapısı nedeniyle üretiminde kırıcı ve öğütücü seçimine dikkat edilmesi gerekmektedir (Doğusan Boru Sanayi ve Ticaret A.Ş., 2018; Devlet Planlama Teşkilatı, 2001; Eti Maden İşletmesi Müdürlüğü, 2015).

Öğütülmüş, boyutlanmış ham perlit tipine göre 700-1200 °C arasında sıcaklıkta genleşmektedir. 400 °C'ye kadar ön ısıtmaya tabi tutulmasıyla perlitin içindeki su %80-90 oranında buharlaşmaktadır. Kalan %2 – 5'i genleşme işleminde aktif olan sudur (Skubic, Lakner ve Plazl, 2013). Perlitin genleştirilmesinde kullanılan perlitin cinsi, ısınma süresi, perlit tane iriliği ve genleşme sıcaklığı olmak üzere dört faktörün önemli olduğu belirtilmiştir (Orhun, 1969).

Kabra ve diğerleri, Türkiye'de kaynakları bulunan perlitin ithal edilerek Hindistan'da perlitin yapısal, morfolojik ve mineralojik özellikleri FT-IR, SEM, SEM-EDX, XRD, TGA ve N₂ adsorpsiyon-desorpsiyon analitik teknikleriyle incelenmiş ve perlitin temel özelliklerinin belirlenmesiyle farklı alanlardaki kullanımını araştırmışlardır. Perlit ham maddesinin içerisinde bulunan yüksek silika ve alümin içeriği EDX analizi ile tespit edilmiştir. Hem XRD hem de FT-IR çalışmaları perlitin ham maddesinde amorf silika varlığını ortaya koymuştur. TGA ve LOI analizi ile ham madde içerisinde su varlığını tespit edilmiştir. Ham maddenin sahip olduğu düzensiz morfoloji SEM görüntüleri aracılığıyla belirlenmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, zengin doğal silika yapısına sahip perlitin çeşitli aktivasyon teknikleri kullanılarak birçok alanda potansiyel ham madde olarak kullanılabileceği belirtilmiştir (Kabra, Katara ve Rani, 2013).

2.3.2. Türkiye'de bulunan mevcut perlit rezervleri

2004 yılında yapılan araştırmaya göre ülkemizin perlit rezervi 5,7 milyar tondur. Türkiye'de mevcut bulunan tüm yapıların GP agregasıyla üretilmesi durumunda perlit rezervlerinin sadece %24'lük kısmının kullanılabileceği belirtilmiştir (Doğan ve Şener, 2004). Bu bilgilere ek olarak, üretilen perlitin yaklaşık %65'i inşaat endüstrisi tarafından tüketilmektedir (Topçu, 2007).

2010 yılında yapılan araştırmaya göre Türkiye'de 8 milyar ton perlit rezervi olduğu ve bu değer dünya rezervlerinin %70'ini kapsadığı tespit edilmiştir (Balo, Ucar ve Yücel, 2010). Ek olarak, Türkiye'den yapılan perlit ihracatının yaklaşık %50'sinin yurt dışında ham olarak kullanıldığı bilinmektedir (Doğusan Boru Sanayi ve Ticaret A.Ş., 2018). 2016 yılında Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü'nde yapılan araştırma sonucunda Türkiye'de perlit cevheri bulunan perlit yatakları ve bu yatakların bulunduğu bölgeler Şekil 2.8'de gösterilmiştir (Doğusan Boru Sanayi ve Ticaret A.Ş., 2018; MTA Genel Müdürlüğü, 2016).



Şekil 2.8. Türkiye'de bulunan perlit yatakları (MTA Genel Müdürlüğü, 2016)

Veriler incelendiğinde, ülkemizde yeterli miktarda perlit rezervi olmasına rağmen, yurtiçi talebin çok sınırlı kaldığı görülmüştür. Bunun nedeni perlit konusunda yeterli tanıtımın yapılmamasıdır. Çok iyi bir izolasyon ham maddesi olan perlit Türk halkı ve hatta teknik kişiler, müteahhitler tarafından bilinmemektedir. Türkiye'de genişmiş perlit üretim kapasitesinin 300000 m³ olmasına karşın tüketilen genişmiş perlitin 100000 m³ olduğu belirlenmiştir. Çizelge 2.19'da kullanılan perlitin tüketim yüzdeleri sektörel olarak verilmiştir (Doğusan Boru Sanayi ve Ticaret A.Ş., 2018).

Çizelge 2.19. Perlit sektöründe tüketim oranları (Doğusan Boru Sanayi ve Ticaret A.Ş., 2018)

Sektör	Tüketim (%)	Tüketim Potansiyeli (1000m ³)
İnşaat	60	300
Tarım	17	85
Sanayi	20	100
Diğer	3	15
Toplam	100	500

Çizelge 2.19'dan anlaşılabacağı üzere tüketilen toplam miktarın 100000 m³ gerçekleştiği ve 1 ton kırılmış-elenmiş perlitten 12 m³ genişmiş perlit elde edildiği düşünüldüğünde Türkiye'de yılda ortalama 8000 ile 8500 ton civarında kırılmış-elenmiş perlit tüketilebileceği tespit edilmiştir (Doğusan Boru Sanayi ve Ticaret A.Ş., 2018).

2.3.3. Dünya’da bulunan mevcut perlit kaynakları, rezervler ve tüketim

1996 yılında Devlet Planlama Teşkilatı’nın yaptığı çalışmaya göre dünya ülkelerindeki perlit rezervleri Çizelge 2.20’de verilmiştir (Devlet Planlama Teşkilatı, 2001).

Çizelge 2.20. Ülkelerin sahip olduğu perlit rezervleri (Devlet Planlama Teşkilatı, 2001)

Ülkeler	Görünür Rezervler (milyon ton)
ABD	50
Diğer	5
Kuzey Amerika Toplamı	55
Türkiye	30
Yunanistan	50
Diğer	490
Avrupa Toplamı	570
Japonya	10
Filipinler	10
Diğer	30
Asya Toplamı	80
Afrika ve Okyanusya	25
Dünya Toplamı	700

Perlit ham maddesi temelde mineral obsidyen olduğu için dünya genelinde birçok ülkede perlit mineral yatakları bulunmaktadır ancak GP üretimi sadece bu üretimi yapmak için fabrikalara sahip ülkelerde yapılmaktadır (Çelik, Kılıç ve Çakal, 2013). 2001 ve 2014 yılında yapılan çalışmalarda yıllara göre perlit üretimi yapan ülkeler ve üretim miktarları Çizelge 2.21’de verilmiştir. Üretimde, çizelgedeki ülkelerin yanı sıra Çin, Bulgaristan, Mozambik, Cezayir, İzlanda gibi ülkelerin de perlit üretiminde yer aldığı belirtilmiştir (Devlet Planlama Teşkilatı, 2001).

Çizelge 2.21. Ülkelere bağlı olarak perlit üretim miktarları (Devlet Planlama Teşkilatı, 2001)

Ülke	1994	1995	1996	1997	1998	2013	2014
ABD	644	700	684	706	685	419	440
Yunanistan	372	431	418	425	425	760	800
Japonya	200	200	200	200	200	190	200
Türkiye	165	171	175	175	150	400	450
Macaristan	85	151	150	150	150	72	70
İtalya	65	60	60	60	60	60	60
Slovakya	50	50	50	50	50	*	*
Diğerleri	69	77	73	74	100	67	70
Toplam	1650	1840	1810	1840	1820	1968	2090

*Tam olarak bilinmemektedir.

Çizelge 2.21 incelendiğinde, Türkiye gibi Çin, Japonya, Amerika ve diğer Avrupa ülkeleri, Yunanistan ve İtalya rezervlerinin büyük kısmını paylaştığı görülmüştür (Erdoğan, 2011).

Bu bilgilere ek olarak, 2014 yılında yapılan çalışmada dünya genelinde tahmin edilen perlit tüketimi 2480000 ton olurken bu üretiminin 451000 tonu (%18,2) Amerika’da tüketilmiştir (USGS Minerals Periodicals, 2018). Amerika’da 2014 yılında GP, %51 inşaat uygulamalarında, %15 dolgu maddesi olarak, %14 bahçecilik agregası olarak, %10 filtreleme yardımıyla ve kalan %10'luk kısımda diğer uygulamalar için kullanılmıştır. Dünyada elde edilen ham perlitin yaygın şekilde genişletilmiş olarak tüketildiği belirtilmiştir. Genleştirilmiş perlit mükemmel ısı ve ses yalıtım özelliğine sahip düşük yoğunluklu bir yapı malzemesidir. Bu özellikleri perlitin özellikle genişletilmiş şekilde inşaat sektöründe kullanımı yaygınlaştırmıştır (U.S. Geological Survey, 2015).

2.3.4. Türkiye’de perlit ile ilgili bulunan mevzuatlar

Perlitin kullanım amaçlarına göre farklı ülkelerde (ASTM, ISO, DIN vs.) hazırlanmış çeşitli standartlar bulunmaktadır. Ancak, genişletilmiş perlit üretimi için uluslararası perlit enstitüsünde bir seri test prosedürü belirlenmiştir. Bu standartlar Çizelge 2.22’de gösterilmiştir (Devlet Planlama Teşkilatı, 2001).

Çizelge 2.22. Genleştirilmiş perlit hazırlama aşamasındaki test prosedürleri (Devlet Planlama Teşkilatı, 2001)

Amaç	Standart
Örnekleme	PI 110-77
Genleşme Testi	PI 307-77
Yalıtımlı Betonda hafif agrega testi	C 332-82
Dolgu yalıtım malzemesi yoğunluk testi	C 520-81
Isı tecrit testleri	C 236
Gevşek Dolgu tecritti	C 549
İnşaat Malzemelerinin yüzey yanma karakteristikleri	E 84

Ülkemizde, perlit için hazırlanan TSE standartları ise Çizelge 2.23’de verilmiştir (Devlet Planlama Teşkilatı, 2001)

Çizelge 2.23. Perlitle ilgili TSE standartları (Devlet Planlama Teşkilatı, 2001)

TSE 415	Isı iletkenliği ve geçirgenliği direncinin yapıda kullanılması için hesap değerinin bulunması
TSE 1114	Hafif agregalar (Beton için)
TSE 2511	Taşıyıcı hafif betonların karışım hesap esasları
TSE 2381	Konutlarda ses yalıtımının değerlendirilmesi
TSE 1476	Ses absorpsiyonu katsayıların ölçülmesi
TSE 1474	Alçı bölme duvar bileşenleri
TSE 1475	Alçı bölme duvar bileşimlerinin yerlerine konulması kuralları
TSE 1262	Sıva yapım kuralları (bina iç yüzeylerinde kullanılan)

Çizelge 2.23. (devam) Perlite ile ilgili TSE standartları (Devlet Planlama Teşkilatı, 2001)

TSE 415	Isı iletkenliği ve geçirgenliği direncinin yapıda kullanılması için hesap değerinin bulunması
TSE 1263	Yapı elemanlarının yanmaya dayanıklılık deney metotları
TSE 825	Binalarda ısı etkilerinden korunma kuralları
TSE 305	Odun talaşı levhaları
TSE 705	Fabrika tuğlaları
TSE 639	Uçucu küller
TSE 640	Uçucu küllü çimento
TSE 20	Yüksek fırın cürufu çimentoları
TSE 901	Lifli ısı ve ses yalıtma malzemesi
TSE 2823	Betondan mamul yapı elemanları
TSE 453	Gaz beton yapı malzemeleri ve elemanları
TSE 3681	Genleştirilmiş perlit agregası
TSE 3649	Perlitli ısı yalıtımı betonu yapım-uygulama kuralları ve deney metotları
TSE 3682	Alçılı perlit bölme duvarı elemanları

Çizelge 2.23 incelendiğinde, perlitin inşaat ve yapı sektöründe farklı alanlarda kullanıldığı ve bu kullanım alanlarına göre mevcut bulunan standartlar görülmektedir.

2.3.5. Genleştirilmiş perlitin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Genleştirilmiş perlit ham maddesine ait fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 2.24 ve Çizelge 2.25’de belirtilmiştir (Perlite, 2018; Tian, Guo, Wu ve Su, 2013; Bulgurcu, 2009; Türkiye Cumhuriyeti Kalkınma Bakanlığı, 2016; Gündüz, Şapçı ve Bekar, 2006).

Çizelge 2.24. Genleştirilmiş perlitin fiziksel özellikleri (Perlite, 2018)

Renk	Beyaz
Kırılma Endeksi	1,5
pH	6,5 -8,0
Serbest Nem (maksimum)	%0,5
Özgül Ağırlık	2,2 -2,4 g/cm ³
Hacimsel Yoğunluk	32 – 400 kg/m ³
Elek numarası	4 -8 numaralı veya daha düşük elek
Yumuşama Noktası	871 – 1093 °C
Erime Noktası	1260 – 1343 °C
Özgül Isı	837 J/kg.K
24 °C’deki ısı iletkenlik	0,04 – 0,06 W/m.K
Sertlik (MOHS Ölçeği)	5-5,5
Kuru Birim Hacim Ağırlık	40-220 kg/m ³
Su Emme	%40-60
Doluluk Oranı	%1,80-9,60
Gerçek Porozite	%98,2-90,4
Zararlı Madde Analizi	Yok
Kükürt Analizi	%0,34
Ateşe Dayanım	Yanmaz
Ateşi Geciktirme	3 saat
Ses Geçiş Katsayısı	0,25
Ses Yutuculuk	35-40 dB

Çizelge 2.24’de genişletirilmiş perlitin teknik özellikleri incelendiğinde, yanmazlık, hafiflik, ses geçirmezlik, düşük ısı iletim katsayısı gibi özellikleri, genişletirilmiş perlitin ısı yalıtım levhası olarak kullanılabilirliğini güçlendirmektedir. Fakat su emme özelliğinin yüksek olması ayrıca dikkat edilmesi gereken bir konu olduğunu göstermektedir. Ek olarak, Çizelge 2.25’de genişletirilmiş perlitin oluşturan bileşenler ve yüzdesel oranlar gösterilmiştir.

Çizelge 2.25. Genişletirilmiş perlitin kimyasal özellikleri (Türkiye Cumhuriyeti Kalkınma Bakanlığı, 2016)

Madde	% Oranı
SiO ₂	71.0-75.0
Al ₂ O ₃	12.5-18.0
Na ₂ O	2.9-4.0
K ₂ O	4.0-5.0
CaO	0.2-0.5
Fe ₂ O ₃	0.1-1.5
MgO	0.03-0.5
TiO ₂	0.03-0.2
H ₂ O	2.0-5.0
MnO ₂	0.0-0.1
SO ₃	0.0-0.2
FeO	0.0-0.1
Cr	0.0-0.1
Ba	0.0-0.05
PbO	0.0-0.03
NiO	Eser
Cu	Eser
B	Eser
Be	Eser
Serbest Silis	0.0-0.2

Çizelge 2.25 incelendiğinde, perlitin oluşturan bileşenler arasında nitrat, sülfat, fosfor, ağır metal, radyoaktif element ve organik madde olmadığı, kimyasal olarak saf olduğu görülmektedir. Ek olarak, genişletirilmiş perlitin %70’den fazla silika içermesi genişletirilmiş perlite puzolanik özellik kazandırmaktadır.

Genişletirilmiş perlit sağladığı fiziksel, kimyasal ve teknik özellikleriyle literatürde araştırmalara konu olmuştur. Perlit, radyoaktivite madde içermeyen ham maddelerden olup, yağ, içme suyu ve benzeri gıda sularının filtrelenmesinde, sanayide, tarımda ve inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Perlit anorganik bir madde olup, yüksek sıcaklıklarda özelliğini korumakta, yangının sıçramasını ve yayılmasını önlemektedir. Bu sayede yangın esnasında insanların güvenli alanlara taşınmasına kadar binanın güvenli kalmasını sağlamaktadır. Nötr bir malzeme olan perlit, kararlı kimyasal yapısı nedeniyle

herhangi bir kimyasal reaksiyona girmez, suda erimez, çürümez, bozulmazdır. Sterildir, bakteri ve mikrop barındırmaz. Bu avantajlı özellikleri sebebiyle geliştirilmiş perlit yaygın olarak yapı sektöründe kullanılmaktadır (Orhun, 1969; Doğusan Boru Sanayi ve Ticaret A.Ş., 2018; Yılmaz, A., 2005; Yilmazer ve Ozdeniz, 2005; Gündüz, Şapçı ve Bekar, 2006; Devlet Planlama Teşkilatı, 2001; Yalgın, 1985).

Bulut ve Tanaçan perlitin puzolanik özelliğinden yararlanılarak kullanılması, kullanım olanaklarının araştırılması ve kullanımının yaygınlaştırılması üzerine çalışmışlardır. Bu çalışma doğrultusunda perlitin puzolanik aktivitesine etki eden parametrelerin belirlenmesi ve bu parametrelerin, aktiviteyi artırıcı yönde geliştirilme olanakları, deneysel yöntemler ile birlikte araştırılmıştır. Çalışmada en yüksek basınç dayanım değeri perlit/bağlayıcı oranı %67, su/bağlayıcı oranı %50), 7 gün 55°C kür uygulanan numunede tespit edilmiştir. Çalışma verilerine göre perlitin puzolanik aktivite gösterdiği kanıtlanmış, çalışmanın amacına uygun olarak perlitin geliştirilebilir malzeme olduğu tespit edilmiştir (Bulut ve Tanaçan, 2009).

Çelik ve diğerleri, İzmir Menderes-Cumaovası'nda bulunan geliştirilmiş perlitin karakteristik ve fiziksel özelliklerini 600 °C'ye kadar farklı sıcaklıklarda belirleyerek yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Yapılan testler neticesinde camsı gözenekli yapıya sahip geliştirilmiş perlitin %70,68 SiO₂ ve %13,04 Al₂O₃ içerdiği belirlenmiştir. 1000 °C sıcaklıkta geliştirilmiş perlitte %1,8 kütle kaybı görülmüştür. Çalışmalar sonucunda geliştirilmiş perlitin fiziksel özelliklerinin sıcaklık ile değiştiği gözlenmiştir. Geliştirilmiş perlite ait en yüksek yüzey alanı, 524 m²/g, 400 °C'de elde edilmiştir. Yapılan testlere göre geliştirilmiş perlitin yapı sektöründe hafif yapı malzemesi olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir (Çelik, Kılıç ve Çakal, 2013).

Erdoğan çalışmasında perlitin camsı, doğal ve kimyasal bileşimi (%70–75 SiO₂ ve %12–18 Al₂O₃) olup, ince öğütülmüş perlitin puzolanik özellikler gösterdiğini belirtmiştir (Erdoğan, 2011). Urban çalışmasında ek olarak camsı yapılarda atom örgüleri aralıklı ve daha bozuk olduğunu ve bu nedenle camsı bir kayaç olan perlitin yüksek oranda amorf silika içermesinin puzolanik aktivitesi açısından olumlu bir özellik olduğunu belirtmiştir (Urhan, 1991). Bu puzolanik özelliğinden dolayı literatürde geliştirilmiş perlitin yapı sektöründe hem yalıtım paneli olarak hem de bağlayıcı malzeme olarak kullanılabileceği öngörülmektedir.

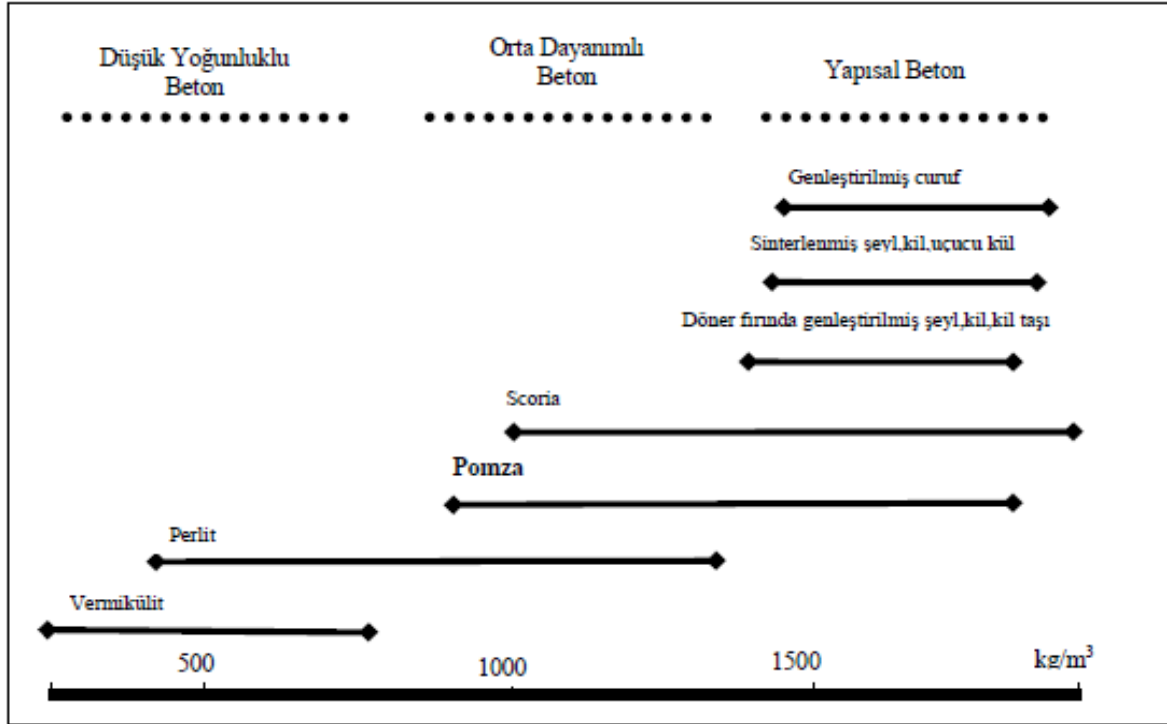
İMO'nun yaptığı araştırmada genleştirilmiş perlitin fiziksel ve kimyasal özellikleri arasında kuru birim hacim ağırlığının önemli bir husus olduğu tespit edilmiştir. GP kullanılarak üretilen yapı malzemelerinin ve diğer yapı elemanlarının birim hacim ağırlıkları ile karşılaştırılması Çizelge 2.26'da verilmiştir (İnşaat Mühendisleri Odası, 2018).

Çizelge 2.26. Yapı sektöründe perlit kullanılarak üretilen yapı malzemelerinin birim hacim ağırlıkları (İnşaat Mühendisleri Odası, 2018)

Malzeme veya Bileşenin Adı	Kgf/m ³
Genleştirilmiş perlit agregası (TS 3681)	50 – 200
Agrega	1800-3000
Genleştirilmiş perlit agregasıyla yapılan sıvalar ve harç tabakaları	400 – 800
Agregasız alçı sıva	1200
Yalnız genleştirilmiş perlit kullanılarak ve kuvars kumu katılmaksızın yapılmış betonlar (TS 3649'a uygun)	300 – 1600
Donatısız normal beton (TS500)	2200
Genleştirilmiş perlit agregası katılmış alçı duvar levhaları (TS 3682'ye uygun)	600 – 900
Alçı karton plaklar	900
Genleştirilmiş perlit betonundan dolu bloklarla (TS 3681)'e uygun yapılmış beton briket veya duvar blokları ile duvarlar	500 – 800
Normal betondan boşluklu briket ve bloklarla duvarlar (TS 406)	≤ 1800

Çizelge 2.26'da genleştirilmiş perlit kullanılarak üretilen yapı elemanları ve normal beton kullanılarak üretilen yapı elemanları karşılaştırıldığında, genleştirilmiş perlit kullanılan yapı malzemeleri birim hacim ağırlıklarının normal beton kullanılan yapı elemanlarından çok daha düşük olduğu görülmektedir. Genleştirilmiş perlit kullanılarak üretilen yapı elemanlarıyla yapının ölü yükünün azaltılabileceği tespit edilmiştir.

Bu bilgilere ek olarak, dikici yaptığı çalışmayla kullanılan agregaya bağlı olarak betonun birim hacim ağırlığı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda ACI 213R-87' ye göre, hafif agregalı betonların sınıflandırılması Şekil 2.9'da verilmiştir (Dikici, 2010).



Şekil 2.9. Yapı elemanları yaklaşık birim hacim ağırlık değerleri (Dikici, 2010)

Şekil 2.9 verileri incelendiğinde, perlit içeren betonun birim hacim ağırlığı 400 ile 1400 kg/m^3 arasında olup, düşük yoğunluklu ve orta yoğunluklu betonun birim hacim ağırlığı değerlerini karşılamaktadır. Bu da perlitin agrega olarak betonda kullanılmasıyla elde edilecek yapı malzemelerinin birim hacim ağırlık değerlerinin yapısal betondan daha düşük olacağını göstermiştir. Ek olarak, PERYUM'un 2018 verilerine göre, genleştirilmiş perlitin agrega olarak kullanıldığı duvar bloklarının ısı iletim katsayı değerleri (μ) yoğunluğa bağlı olarak 0,052 – 0,070 W/mK arasındadır (PERYUM, 2018). Bu da, perlit veya genleştirilmiş perlit kullanılarak üretilen yapı elemanlarının aynı zamanda düşük ısı geçirgenliğine sahip olacağını göstermiştir.

Genleştirilmiş perlitin fiziksel, kimyasal ve teknik özelliklerinin yanı sıra perlit madenciliğinin genel olarak yerleşim alanlarından uzak bölgelerde yapılması, çevreye ciddi bir çevre sorunu yaratmaması perlitin kullanılmasını avantajlı kılmaktadır. Madende bulunan havadaki toz, torba filtreler tarafından yakalanmaktadır ve su kirliliğine neden olmamak için üretim aşamasında hemen hemen su kullanılmamaktadır. Bu nedenle çevresel boyutta herhangi bir problem söz konusu değildir (Devlet Planlama Teşkilatı, 2001; U.S. Geological Survey, 2015).

2.3.6. Genleştirilmiş perlitin kullanım alanları

Genleştirilmiş perlit; inşaat, tarım ve sanayi sektöründe yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu kullanım alanlarının başında inşaat sektöründe; perlitli sıvalar, perlit agregalı hafif yalıtım betonu (Çimento veya alçı bağlayıcılı), perlit agregalı hafif yapı elemanları, ısı ve ses yalıtıcı gevşek dolgu maddesi, ısı ve ses yalıtıcı olarak yüzey döşemelerinde, çimento ve alçı dışındaki bağlayıcılarla yapılan özel amaçlı perlit betonları olarak kullanılmaktadır. Tarım sektöründe; tarla tarımında, bahçe tarımı ve seracılıkta (fide yetiştiricilik, kültür tarımı vb.) ve çimli spor alanlarında kullanılmaktadır. Genleştirilmiş perlit sanayi sektöründe ise gıda, ilaç ve diğer kimyasal maddeler üretiminde yardımcı madde, sanayide ısı yalıtımı, metalürji, seramik ve cam sanayiinde katkı maddesi, ilaç ve kimya sanayiinde dolgu maddesi, sondajlarda, çimentolama işlemini kolaylaştırıcı katkı maddesi, gemi dipleri kaplama ve yalıtımı, petrol artıklarından veya diğer yağlı atıklardan gelen su kirliliğini önlemede, baraj göllerinde, kentlerde, açık su rezervuarlarında buharlaşmayla su kaybı önleyici, ambalajlama için dolgu maddesi, plastik köpüklere ve plakalara katkı dolgu maddesi, ucuz ve hafif plastik mobilya yapımında dolgu maddesi, yangına karşı özellikle çelik konstrüksiyonlarda yalıtım amaçlı kullanılmaktadır (Doğusan Boru Sanayi ve Ticaret A.Ş., 2018; Yılmaz, A., 2005).

Ayberk çalışmasında perlitin inşaat sektöründe kullanımını incelemiştir. Perlit hafiflik, yalıtım ve yangına dayanım özellikleri ile yapılarda çeşitli biçimlerde yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Perlit, gevşek dolgu olarak döşemelerde ve çift katmanlı dış duvarlarda, yalıtım betonu olarak zemin kat ve çatı döşemelerinde, sıva agregası olarak iç, dış duvarlarda ve tavan sıvasında, blok ve levha biçiminde duvar gövdesi olarak kullanılmaktadır. Yapı malzemesi olarak perlit yapıya az yük vermesi, alan kazandırması (duvar elemanı olarak kullanıldığında), yakıt tasarrufu sağlaması ile yapı maliyetini olumlu yönde etkilediğini tespit etmiştir. Ek olarak yapı sektöründe perlit esaslı yalıtım betonu da kullanılmaktadır. Perlitli yalıtım betonu; perlit, kum (basınca dayanım gerektiği yerde), çimento, katkı maddeleri ve su ile oluşan bir karışımdan oluşmaktadır. Perlitin yalıtım betonu olarak döşemede; toprağa oturan döşemede grobeton yerine perlit kum betonu olarak, kat döşemelerinde gürültü kontrolü, farklı döşeme seviyelerini düzeltme ve ölü yükleri azaltmada, çatıda; oturma çatıda döşeme üzerinde, düz (teras) çatıda döşeme ile su yalıtımı arasında kullanılmaktadır (Ayberk, 1995).

Shastri ve Kim çalışmalarında nişasta esaslı bağlayıcı ile genleştirilmiş perlitli kullanarak yapı malzemesi üretmişlerdir. Üretilen numunelerin yoğunluğunu alçı esaslı köpük yoğunluğuyla kıyaslanmıştır. Perlit esaslı köpüğün $0,3 \text{ g/cm}^3$ yoğunluktaki basınç dayanımı alçı esaslı köpüğün basınç dayanımıyla uyumlu olduğu görülmüştür (Shastri ve Kim, 2014). Topçu ve Işıkdag yaptıkları çalışmada genleştirilmiş perlitin agregalı hafif beton özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. GPA, inşaat sektöründe olmak üzere özellikle yapılarda ekonomik avantaj sağlayan ısı ve ses yalıtımı özelliklerini karşılayabilmektedir. Çimento tipleri (CEM II 32.5R ve CEM I 42.5R), dozajlar (300, 350 ve 400) ve değiştirme oranları (0, 15, 30, 45 ve 60) dikkate alınarak genleştirilmiş perlit agregası içeren betonun özellikleri araştırılmıştır. Deneylerde çimentonun 300 dozajında, beton karışımının asgari birim ağırlığı 1800 kg/m^3 , 20 ve 30 MPa arasında çimento türleri dikkate alınarak %30 oranında genleştirilmiş perlit agregasının hafif beton üretiminde basınç dayanımında bazı kayıplar olsa da kullanılabileceği görülmüştür (Topçu ve Işıkdag, 2008).

Demirboğa ve Gül çalışmasında genleştirilmiş perlitli agregası olarak kullanarak iki farklı katkı maddesinin beton üzerine etkisini araştırmışlardır. Silika dumanı ve uçucu kül, çimentoyla ağırlıkça %10, 20 ve 30 oranında yer değiştirmiştir. Süper akışkanlaştırıcı, s/ç oranını azaltmak için yüzde %1,5 oranında kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, silika dumanı ve uçucu külü, sırasıyla %14 ve %18 oranında PÇ ile yer değiştirdiğinde termal iletkenlik değerinin azaldığı görülmüştür. Silika dumanı ve uçucu külün birlikte kullanılmasıyla tüm numuneler için yoğunluk 522 kg/m^3 'den 483 kg/m^3 'e düşmüştür (Demirboğa ve Gül, 2003b).

Türkmen ve Kantarcı çalışmalarında farklı kür koşullarında kendinden sıkışan beton üzerine genleştirilmiş perlit agregası ve doğal agregası karışımı etkisini araştırmışlardır. Genleştirilmiş Perlit kullanılarak kılcallık katsayısının ve görünür gözenekliliğin arttığı ve betonun basınç dayanımının artan genleştirilmiş perlit oranına bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar neticesinde kendinden sıkışan betona genleştirilmiş perlit agregası ilave edilmesiyle 28 günlük nihai basınç dayanımı 38,3 ile 53,9 MPa arasında değişiklik göstermiştir. Genleştirilmiş perlit agregasının en yüksek oranda kullanıldığı numunede basınç dayanım en düşük değerde olmasına karşın kılcallık katsayısı ve görünür gözenekliliğin arttığı tespit edilmiştir (Türkmen ve Kantarcı, 2007).

Bulgurcu yaptığı çalışmayla farklı hacim oranlarında GP içeren çimento ve alçı bağlayıcılı yapı elemanlarının ısı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Isı ve ses yalıtımı özellikleri iyileştirilmiş, ekonomik ve mekanik olarak binaya yük bindirmeyen hafif yapı bileşenlerine ihtiyaç duyulduğu için bu çalışmada GP kullanılmıştır. GPA ile çimento ve alçı bağlayıcılı numuneler, %10-%80 perlit oranlarında %10'luk artışlarla hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, GP oranı arttıkça alçı ve çimento bağlayıcılı karışımların ısı iletkenlik değerleri de aynı oranda azalmıştır. En düşük ısı iletkenlik genleştirilmiş perlit oranı %80 iken çimento bağlayıcılı sistemde 20 mW/m.K olarak ölçülmüştür. Buna ek olarak, genleştirilmiş perlit oranı arttıkça su emme oranı artmış ve basınç dayanımı azalmıştır. İnceleme sonunda özellikle çimento bağlayıcılı GP içeren numunelerin TS 825'e uygun olarak prefabrik blok duvar ve boşluklu briket üretimlerinde kullanılabileceği tespit edilmiştir (Bulgurcu, 2009).

Çelik ve diğerleri ana hammadde olarak genleştirilmiş perlit agregası kullanarak duvar örgü elemanı üretilmesini araştırmışlardır. Çalışmalar sonucunda, sıvı/katı oranı 1 ve 0,50 bar basınçta üretilen ve 200 °C sıcaklıkta 1 saat kür uygulanan numunelerde en düşük birim hacim ağırlık $522,5 \pm 48,3 \text{ kg/m}^3$ ve en yüksek basınç dayanımı $12,13 \pm 0,13 \text{ kg/cm}^2$ olarak tespit edilmiştir. İlerleyen aşamalarda farklı bağlayıcıların (doğal mineral/kimyasal) kullanılmasıyla yüksek dayanım ve düşük birim hacim ağırlık değerlerine sahip yapı malzemesi üretimine yönelik bilimsel çalışmaların yapılmasının oldukça önemli olduğu belirtilmiştir (Çelik, Kılıç ve Akkurt, 2014).

Kara ve diğerleri, genleştirilmiş perlitin asfalt betonlarında agrega olarak kullanılmasıyla karışımın performans değerlerinin değişimini incelemişlerdir. İki farklı bitüm sınıfında, farklı bitüm/perlit oranları (%55, %60, %65), arkalı önlü olmak üzere üç farklı (15-15, 20-20, 25-25) darbe sayılarında kompaksiyon işlemi uygulanmıştır. Dayanım değerlerine bakıldığında darbe, penetrasyon tipi ve bitüm/perlit miktarına göre en uygun olanı sırasıyla 25-25 darbeleri, 50-70 penetrasyon tipi ve %60 bitüm/perlit içeren numunede görülmüştür. Ayrıca asfaltın üretim maliyetinin de 2 kat artırmasına karşın ağırlığın 6 kat azaltılması ve Marshall dayanım sonuçlarına göre uygun içerikteki numunelerin şartları sağladığı göz önüne alınırsa, köprü ve viyadük gibi yükün önemli olduğu yapılarda, statik hesaplarda taşıyıcı eleman boyutlarını azaltılabilmesi için genleştirilmiş perlitin agrega olarak asfalt betonunda kullanılabileceği öngörülmüştür (Kara, Karacasu, Canbaz ve Akalın, 2015).

Argunhan ve diğerkleri, ısı ve ses yalıtımı gibi avantajları bulunan genleştirilmiş perlitin inşaat sektöründe kullanılmasıyla hem ülke ekonomisine katkı sağlayan hem de enerji verimli binalarda nispeten yüksek dayanım, düşük yoğunluk, yüksek ısı ve ses yalıtımı olan yeni beton tipi deneysel olarak araştırılmıştır. Çeşitli beton numuneleri sabit su-çimento oranında, normal agrega yerine hacimce %10, %20, %30, %40, %50 ve %60 oranlarda genleştirilmiş perlit agregası kullanılarak hazırlanmıştır. Deneysel çalışmaların sonuçlarına göre, genleştirilmiş perlit kullanılarak elde edilen betonun dayanımının ve yoğunluğunu düştüğü, buna karşın ısı ve ses yalıtım özelliğinin yüksek oranda geliştiği görülmüştür. Deneysel çalışmaların sonucunda, üretilen numunelerin ısı iletkenlik değeri %75 ve ultra ses geçiş hızı %35 azalmıştır. Ek olarak, 28 gün sonunda normal beton ile %60 oranında perlit ile üretilen numunelerde yapılan hesaplamalar sonucunda, numunenin basınç dayanımında %88,8 oranında, kuru yoğunluğunda %55,14 oranında azalma olduğu tespit edilmiştir (Argunhan, Oktay ve Dogmus, 2016).

Ayberk çalışmasında genleştirilmiş perlitin agrega olarak inşaat sektöründe kullanımını araştırmıştır. Hafif agregalar grubundaki perlitin geleneksel agregalara göre birim maliyetinin yüksek olduğu bunun nedeninin ise genleştirilmesi için yüksek sıcaklık gerektirmesi ve hacmi 15-20 kat artan perlitin taşınmasının ek maliyet getirmesinden kaynaklandığını belirtmiştir. Birim fiyatının yüksek olmasına karşın genleştirilmiş perlitin yapı maliyetini olumlu etkilediğini tespit etmiştir. Perlitin yapı maliyetine olumlu etkisi ile hava kirliliğini ve doğa tahribat azalarak ekolojik dengeye katkıda bulunmaktadır (Ayberk, 1995).

Genleştirmiş perlit, düşük ısı iletkenliğe sahip ve yanmaz A1 sınıfı malzeme olması nedeniyle çalışmalara konu olmuştur. Yalgın yapmış olduğu çalışmada, ısı yalıtımında genleştirilmiş perlit ve genleştirilmiş perlit ürünleri kullanımını araştırmıştır. Genleştirilmiş perlite ısı yalıtımı ve hafiflik özelliğini kazandıran perlit taneleri içinde bulunan sayısız hava kabarcıklarıdır. Bu kabarcıklar, perlit yoğunluğunun 35-190 kh/m³ değerleri arasında, ısı iletkenlik değerlerinin de 0.021-0.06 Kcal/mh⁰C arasında olmasını sağlamaktadır. Genleştirilmiş perlitin ısı iletkenlik katsayısının yoğunluğuna bağlı olarak değiştiği belirtilmiştir. Genleştirilmiş perlit, alçı veya çimento gibi bağlayıcılar ile karıştırılıp kalıplarda şekil verilerek hazır yapı elemanlarının üretiminde kullanılan numunelerin 600-900 kg/m³ kuru yoğunluklara ve 0.16-0.22 Kcal/mh⁰C ısı iletkenliğe sahip olduğunu tespit etmiştir (Yalgın, 1985).

Skubic ve Plazl genleştirilmiş perlit esaslı panel üretimini araştırmışlardır. Harç, genleştirilmiş perlit ve sodyum silikat kullanılarak hazırlanmış, kalıplanmış, sıkıştırıldıktan sonra kalıplanan harca mikrodalga kür uygulanmış, kür sonrası panel yüksek sıcaklıkta ısı işlem görmesiyle genleştirilmiş perlit esaslı panel üretilmiştir. Üretilen panelde kür sıcaklığı ve davranış tahmini gibi en iyi özelliklerin belirlenmesi için sonlu-farklara dayalı matematiksel bir model geliştirilmiştir. Elde edilen verilere göre, yüksek ısı işlem sırasında panel içinde kür işleminin sonucu olarak belirli büzölmeler ortaya çıkmıştır. Ancak, panelin yeterli miktarda mekanik özellik kazanması ve nemli koşullarda ısı yalıtım paneli dayanıklılığının artması için belli bir miktarda büzölmeye ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışmalar neticesinde genleştirilmiş perlitin ısı iletim katsayısı 45 mW/m.K olarak hesaplanmıştır. Hazırlanmış numunenin deneysel olarak ısı iletkenlik değeri 50,3 mW/m.K olarak ölçölmüştür (Skubic, Lakner ve Plazl, 2013).

Vaou ve Panias çalışmalarında H₂O₂ ilavesinin genleştirilmiş perlit esaslı köpüklerin termal özellikleri üzerinde etkisini incelemiştir. Karışım için 8M NaOH derişimi katı/sıvı oranı 1,2 g/mL kullanılmış ve harçta gözenek oluşumu için H₂O₂ kullanılmıştır. Hazırlanan hamur plastik kalıplarda kalıplanmış, numunelere ilk olarak 35 °C'de 2 saat ve daha sonra 65 °C'de 24 saat boyunca kür uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre en düşük ısı iletkenlik 30 mW /m.K, basınç dayanımı 780 KPa ve deformasyon %2 olarak ölçölmüştür. Çalışma neticesinde genleştirilmiş perlit esaslı köpüklerin yalıtım paneli olarak kullanımının uygun olduğı kanıtlanmıştır (Vaou ve Panias, 2010).

Morsy ve Aglan çalışmalarında nano yapılı çimento bileşiklerine genleştirilmiş perlit ilavesinin termal direnç ve dolaylı çekme dayanımı üzerine etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada Portland beyaz çimento (PWC) kısmen nano kil ile yer değıştirilmiştir. Genleştirilmiş perlit dozajı ağırlık olarak farklı oranlarda (10, 20, 30, 40, 50, 60 ve 70) optimum çimento-nano kil karışımına ilave edilmiştir. Hazırlanan harç, kalıplandıktan sonra 24 saat oda koşullarında dinlendirilmiş ve ardından 28 gün boyunca nemli havada bekletilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre genleştirilmiş perlitin karışıma ilavesi dolaylı çekme dayanımı düşürdüğü ancak bileşiğin termal direnç oranını %250 arttırdığı tespit edilmiştir (Morsy ve Aglan, 2007).

Li ve diğlerleri, çalışmasında poliüretan (PU) köpüğün ses emme, ısı yalıtımı ve sıçrama esneklik özelliklerini iyileştirmek için vermiküli ve perliti dolgu maddesi olarak

eklemişlerdir. Elde edilen veriler incelendiğinde, vermikülit ve perlitin dolgu maddesi olarak ilavesiyle ses emiliminin daha düşük frekansa sahip olduğu, ısı yalıtımı ve sıçrama esnekliğinin aynı anda geliştirdiği tespit edilmiştir. Ek olarak, Vermikülit ve perlit ilave edilen poliüretan köpük numunenin ısı iletim katsayısı 54 mW/m.K olarak ölçülmüştür (Li, Chuang, Huang, Lou ve Lin, 2015).

Balo ve diğerleri, ısı yalıtım panellerine uçucu kül, kil, perlit ve keten tohumu yağı eklenmesinin termal ve mekanik özellikler üzerine etkisini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre %60 uçucu kül, %30 kil, %10 perlit oranı ve 200 ° C'de işlenmiş %50 keten tohumu yağı içeren numunenin en düşük ısı iletim değerine (31,3 mW/m.K) sahip olduğu tespit edilmiştir (Balo, Ucar ve Yücel, 2010).

Sun ve Wang çalışmasında çimento harcının mekanik ve ısı özelliklerine geliştirilmiş perlit malzeme içeriğinin etkisini araştırmışlardır. Karışımda kullanılan parafin/genleştirilmiş perlit maddesindeki ortalama parafin miktarı %65'e kadar karışıma eklenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre basınç dayanımı ve eğilme dayanımı parafin/genleştirilmiş perlit miktarı arttıkça azalmıştır. Ağırlıkça %20 parafin/genleştirilmiş perlit malzemesi içeren çimento harcının ısı iletim katsayısı (52 mW/m.K) sıradan çimento harcının ısı iletim katsayısı (66 mW/m.K) ile karşılaştırıldığında karışımın iyi ısı depolama özelliği ve termal kararlılığa sahip olduğu tespit edilmiştir (Sun ve Wang, 2015).

Gandage ve diğerleri, kendinden sıkışan betonun termal özellikleri üzerine ince kumla perlitin yer değiştirmesinin etkisini incelemişlerdir. Elde edilen veriler neticesinde %5 perlit miktarına sahip numunenin 28 günlük basınç ve eğilme dayanımı sırasıyla 51,852 MPa ve 8,4 MPa olarak ölçülmüştür. Buna ek olarak, bütün sıcaklık değerlerinde betonun ısı iletkenlik değeri ve yoğunluğu azalmıştır. Ancak düşük sıcaklıkta kür uygulananların ısı iletkenlik değeri, yüksek sıcaklıktakilere göre daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni betonda bulunan nemin yüksek sıcaklıkta buharlaşması ile alakalıdır. %20 uçucu kül ve %5 perlit ilave edilmesiyle elde edilen %100 çimento kullanılan numunenin betonunkine göre %20,74 oranında daha düşük ısı iletkenlik değerine sahip olduğu tespit edilmiştir (Gandage, ve diğerleri, 2013).

Sengül ve diğerleri, geliştirilmiş perlitin hafif betonun mekanik özellikleri ve ısı iletkenliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Doğal agregalar geliştirilmiş perlitle kısmen

değiştirilerek karışımlar hazırlanmıştır. Test sonuçları, perlit içeriğinin artması ile basınç dayanımı ve elastisite modülünün azaldığını göstermiştir. Test sonuçları ayrıca perlit kullanımı ile termal iletkenliğin önemli ölçüde iyileştiğini ve ısı iletkenlik ile birim ağırlık arasında güçlü bir ilişki elde edildiğini göstermiştir. Karışımların ısı iletkenlik katsayısı, normal agreganın genleştirilmiş perlit ile değiştirilmesi ile büyük ölçüde azalmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde betonun yoğunluğu en az 392 kg/m^3 olarak ölçülmüştür. Deneysel sonuçlar aynı zamanda %80 oranında genleştirilmiş perlitin doğal agregayla yer değiştirdiğinde, ısı iletkenlik değeri karışım değerine göre %60 oranında düşüş göstermiştir (Sengul, Azizi, Karaosmanoglu ve Tasdemir, 2011).

Topçu ve Işıkdag çalışmalarında ısı dirençli perlit içeren kil tuğlasının üretimini araştırmışlardır. Isıl, hafif ve akustik izolasyon özellikleri bulunan perlit, tuğla imalatında hafif agrega olarak kil içeriğine %0 ile %50 arasında ilave edilmiştir. Deney sonuçlarına göre normal tuğlanın basınç dayanımı 5,8 MPa iken perlit içeriğinin artmasıyla dayanım 2,0 MPa'a düşmüştür. Buna karşın normal bir tuğlanın ısı iletkenliği $0,40 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ iken %30 perlit içeren karışımın ısı iletim katsayısı $0,185 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ olarak ölçülmüştür (Topçu ve Işıkdag, 2007).

Demirboğa ve Gül çalışmalarında silika dumanı, uçucu kül ve genleştirilmiş perlit kullanılarak üretilen hafif betonun ısı özellik üzerine etkisini incelemişlerdir. Karışıma %10, %20 ve %30 oranlarında çimento miktarını azaltacak şekilde genleştirilmiş perlit ilave edilmiştir. Sadece pomza agregası ve çimento içeren numunelerde en yüksek ısı iletim katsayısı $31,78 \text{ mW/m.K}$ iken, %70 oranında pomza agregasıyla yer değiştiren genleştirilmiş perlit agregası ve % 30 uçucu kül içeren numunenin ısı iletim katsayısı $14,72 \text{ mW/m.K}$ olarak ölçülmüştür. Genleştirilmiş perlit agregası içeren betonun ısı iletkenliğinde %43,52'lik bir düşüş gözlenmiştir (Demirboğa ve Gül, 2003a).

Vimmrovà ve diğerleri, hafif alçı esaslı kompozit hazırlanması için tasarım tekniklerini araştırmışlardır. Tasarım için iki mevcut çözümü incelemişlerdir. Bunlar, düşük yoğunluklu alçı köpüğü matrisi ile yüksek yoğunluklu agrega ve yüksek yoğunluklu matris ile düşük yoğunluklu agregalardır. Elde edilen sonuçlara göre, yüksek yoğunluklu matris ve düşük yoğunluklu agregalar ile tasarım daha başarılı olmuştur. Ek olarak, bu hafif malzemelerin inşaat sektöründe ısı yalıtım paneli olarak kullanılabileceği öngörülmüştür. Bu çalışma sonucunda en uygun numunedeki karışım %5 genleştirilmiş perlit içeriğinde 547 kg/m^3

yoğunluk, 120 mW/m.K ısı iletim katsayısı ve 2 MPa basınç dayanıma sahip olmuştur (Vimmrová, Keppert, Svoboda ve Cerny, 2011). Genleştirilmiş perlitin düşük yoğunluğa sahip olması agrega olarak kompozit malzeme üretiminde kullanılabileceğini göstermiştir.

Alama ve diğerleri, genleştirilmiş perlitin termo-fiziksel özelliklerini deneysel olarak değerlendirilmesini incelemişlerdir. 100 mm x 100 mm ölçülerinde ve çeşitli oranlarda genleştirilmiş perlit, silika dumanı, silikon karpit ve polyester elyaf kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Genleştirilmiş perlit içeriği %30 olan numunenin ısı iletkenliği 0.5 mbar basınçta 7,6 mW/m.K olarak ölçülmüştür (Alama, Singh, Brunner ve Naziris, 2014).

Literatür çalışmaları incelendiğinde, genleştirilmiş perlitin sağladığı avantajlar sayesinde ısı yalıtım paneli olarak kullanımı ile ısı iletkenliği düşük yapı malzemeleri üretilabileceği tespit edilmiştir. Ancak genleştirilmiş perlit esaslı ısı yalıtım panellerinin kuşkusuz ki en büyük problemi mekanik özelliklerin yeterli değerlere ulaşamamasıdır. Genleştirilmiş perlit esaslı ısı yalıtım panellerinin mekanik özelliklerinin ve teknik özelliklerinin iyileştirilmesi için literatürde yapılmış çalışmalar bulunmaktadır.

Tian ve diğerleri, sodyum silikat içeren genleştirilmiş perlit esaslı ısı yalıtım panellerinin düşük dayanımlı olması nedeniyle enerjide kullanımının sınırlı olmasını etkileyen faktörleri araştırmışlardır. En iyi ısı iletkenlik performansına ve yüksek dayanıma, ağırlık oranı 2:5:1'le %30 oranında Na_2SiO_3 çözeltisi içeren numunede rastlanmıştır. Buna ek olarak, sıkıştırma basıncı arttıkça genleştirilmiş perlit esaslı ısı yalıtım panelinin yoğunluğu ve basınç dayanımı da artmıştır. Eğilme dayanımı ve çekme dayanımı maksimum değerine basınç değeri 0,38 MPa olduğunda ulaşmıştır. Panel için en iyi kür sıcaklığının 105 °C olduğu tespit edilmiştir (Tian, Guo, Wu ve Su, 2013).

Arifuzzaman ve Kim genleştirilmiş perlit esaslı yalıtım paneli geliştirmiş ve mekanik özellikleri deneysel olarak araştırmışlardır. Sodyum silikat, yanmaz, suya karşı dirençli ve nispeten ucuz olduğu için bağlayıcı olarak sodyum silikat kullanılmıştır. Panellerin hazırlanma aşamaları; sodyum silikatın sulandırılması, genleştirilmiş perlit ile sodyum silikatın karıştırılması, kalıplanma, preslenme, kalıptan çıkarılıp kür işlemine tabii tutulmasıdır. Bağlayıcı olarak sulandırılmış sodyum silikat kullanılarak elde edilen kompozit köpük yoğunluğu 0,2-0,5 gr/cm³ olarak elde edilmiştir. Genleştirilmiş perlitin kırılğan bir malzeme olduğu ve bağlayıcı ile karıştırıldığı zaman hasara uğradığı görülmüştür. Basınç

dayanımı sıkıştırma basıncı ve bağlayıcı oranına bağlıdır. Sıkıştırma basıncı arttıkça, yoğunluk artmıştır (Arifuzzaman ve Kim, 2014).

Aglan ve diğerleri, kısa boylu polipropilen lif takviyesiyle yeni geliştirilen nano yapılı genişletilmiş perlit içeren çimentolu bileşiklerinin yüzey kırılma direnci ve dolaylı gerilme dayanımı üzerindeki polipropilen lif etkisini araştırmışlardır. Deney karışımına, ağırlıkça %1, %2, %3 ve %4 oranında kısa polipropilen elyafı lifleri ilave edilmiştir. Nano yapılı genişletilmiş perlit içeren çimentolu bileşiklerin kırılma direncinin polipropilen lif kullanılarak arttırılması sağlanmıştır. Nano yapılı perlitin çimento yüzeyli bileşiklerinde eklenen polipropilen lif %3 oranında eklendiğinde, ısı direnci %20 oranında artmıştır. Ayrıca, %3 ila %4 arasında polipropilen lif eklenmesiyle kırılma direncinde dört kat artış sağlanmıştır (Aglan, Morsy, Allie ve Fouad, 2009).

Arifuzzaman ve Kim perlit parçacıklarının su yüzeyinde kalma özelliğinden faydalanarak perlit/sodyum silikat bileşiklerinin mekanik davranışını araştırmışlardır. Bu çalışmayla perlit esaslı bileşikler geliştirmek ve üretim parametreleri, bileşenlerin hacim oranları ve özellikleri arasındaki niceliksel ilişkileri belirlenmiştir. Dehidrasyonda su kaybı-zaman eğrisinde üç belirgin bölüm bulunmuştur. Sıvı fazın ilk aşamaları için doğrusal bir bölüm, jel başlangıcı ve sulu katı fazın arasında doğrusal olmayan bir bölüm ve sulu katı faz için bir başka doğrusal bölüm bulunmaktadır. Bileşikler, 0,2-0,5 g/cm³'lük bir yoğunluk aralığı için seyreltilmiş sodyum silikat bağlayıcı ile üretilmiştir. Demir donatı olmadan üretilmiş numunelerin basınç dayanımı 1 MPa, yoğunluğu 0,3 g/cm³ olarak ölçülmüştür (Arifuzzaman ve Kim, 2015).

Taherishargh ve diğerleri, ısı işlem görmüş genişletilmiş perlit-alüminyum sentaktik köpüğün mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Isıl işlemin, mikro yapı özelliklerine, mekanik özellikleri ve deformasyon davranışına etkisi incelenmiştir. Yoğunluğun mekanik özellikler üzerindeki etkisi ısı işlem görmüş numunelerde ısı işlem görmeyenlere göre daha fazladır. Isıl işlem görmüş köpüklerde daha homojen bir deformasyon görülmüştür. Isıl işlem görmüş numunede yoğunluğundaki az bir değişim gerilimi önemli ölçüde artırmıştır. Buna ek olarak, Al matrisindeki Si parçacıklarının en-boy oranını ve parçacıklar arası mesafeyi arttırarak çatlak yayılımını sınırlamıştır (Taherishargh, Belova, Murch ve Fiedler, 2014).

Erdoğan çalışmasında Türkiye rezervlerinden geliştirilmiş perlit kullanarak geopolimer üretimini araştırmıştır. Türkiye rezervlerinden elde edilen perlitin SiO_2 oranı %70'den daha fazla olup, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 5,5'dir. Geopolimer malzeme üretiminde yaygın olarak alkali hidroksit veya alkali silikat çözeltisi kullanılmaktadır. Na veya K seçimi alkali gibi arzu edilen özelliklere ve ekonomik koşullara bağlı olmakla birlikte İki alkali kimyasal NaOH ve Na_2SiO_3 kullanılmıştır. Yapılan testler neticesinde alkali olarak yalnızca NaOH kullanılan karışımlar düşük eğilme ve basınç dayanımları göstermiştir. Basınç dayanımları 0 ile 5 MPa arasında ölçülmüştür. Alkali aktivatör olarak hem NaOH hem de Na_2SiO_3 içeren karışımlarda; Na_2SiO_3 oranı 2,5 olan numunelerde en yüksek basınç dayanımı 29,9 MPa ölçülmüştür. Ek olarak, kuru kür koşullarının mekanik özelliklerin kazanılmasında etkili olduğu tespit edilmiş ve 100 °C'deki kür sıcaklığında en yüksek basınç ve eğilme dayanımları elde edilmiştir. Oda sıcaklığındaki kürden elde edilen perlit esaslı geopolimer malzemelerin basınç dayanımları 20 ile 30 MPa arasında ölçülmüştür (Erdoğan, 2011).

Literatür çalışmalarıyla birlikte geliştirilmiş perlit kullanılarak üretilcek panel özelliklerinin iyileştirilmesiyle inşaat sektöründe yapı malzemesi olarak kullanımının daha fazla değerlendirilmesi gerekmektedir.

2.4. Alçı

Alçıtaşı, kalsiyum sülfat bileşiği olmakla birlikte alçı, alçıtaşının çeşitli derecelerde pişirilmesi sonucu elde edilmektedir. Alçıtaşı doğada iki şekilde bulunmaktadır. Bunlara anhidrit (CaSO_4) ve jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) adı verilmektedir. Yapısında iki molekül kristal su bulunduran alçıtaşı (jips) ısıtıldığında bu suyun bir kısmını yitirerek dehidratasyon denilen işlem sırasında su ile katılarak alçıyı oluşturmaktadır (Ülker, 1996; Karnı ve Karnı, 1995). Kalsiyum esaslı bağlayıcı bir malzeme olarak bilinen alçı yapılarda harç, sıva, döşeme kaplaması, levha, blok, baca, tavan plağı, çatı döşemesi, ön yapımlı duvar gibi her düzeydeki yapı ürününün (gereç, parça, bileşen, öge) üretiminde bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Yapı sektöründe kullanılan alçı tozu Resim 2.10'da verilmiştir.



Resim 2.10. Alçı tozu (Karnı ve Karnı, 1995)

Alçıtaşı yumuşak bir sülfat minerali olmakla birlikte, orta derecede suda çözünür ve diğer birçok tuzun aksine, daha yüksek sıcaklıklarda daha az çözünür hale gelen, retrograd bir çözünürlük sergiler. Alçı, tortul kayaçlar ile kalın ve yoğun buharlaşan yataklara sahip, yaygın bir mineraldir. Depozitlerin, Arkaik devir kadar uzaktaki tabakalarda meydana geldiği bilinmektedir. Alçı, göl ve deniz suyunun yanı sıra kaplıcalarda, volkanik buharlardaki sülfat çözeltilerinden biriktirilir. Saf alçı beyaz olmasına rağmen, yerel tortulara göre geniş bir renk yelpazesine sahiptir (Fitzpatrick-Schmidt, Horsley, Tsaknopoulos ve Zhang, 2015).

Alçıtaşı yapı sektöründe farklı amaçlar için literatür çalışmalarına konu olmuştur. Yıldız ve diğerleri, yapı alçılarının belirli oranlarda silis dumanı ile yer değiştirilmesinin mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Yapı alçısı olarak kullanılan kartonpiyer alçısının silis dumanı ile hacimce %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında yer değiştirmiştir. Deneysel çalışmaların neticesinde, silis dumanı ilavesi ile kartonpiyer alçısının birim ağırlığı ve boşluk miktarında azalmalar meydana geldiği belirlenmiştir. Yapılan çalışma ile, basınç dayanımı değerleri göz önünde bulundurularak kartonpiyer alçısının silis dumanı ile %10 oranına kadar yer değiştirilerek kullanılabileceği sonucu elde edilmiştir (Yıldız, Yalınbaş ve Keleştemur, 2006).

Gökçe ve Akçaözoğlu çalışmasında diyatomit ve kartonpiyer alçısı ile bağlanarak diyatomit esaslı hafif yapı elemanı üretimini araştırmışlardır. Karışımında sadece öğütülmüş diyatomit, diyatomite göre ağırlıkça %15, %25 ve %35 oranlarında kartonpiyer alçısı ve su kullanılmıştır. Etüv fırında 100°C sıcaklıkta 24 saat kür uygulanan numuneler daha sonra 24 saat 1100°C'de pişirilmiştir. Elde edilen verilere göre artan alçı miktarına bağlı olarak,

örneklerin birim ağırlık, basınç ve eğilme dayanımları da artmıştır. Yine artan alçı miktarına bağlı olarak su emme değerleri azalmıştır. Bu verilere diatomit ve alçı karışımının hafif yapı elemanı üretiminde kullanılabileceği öngörülmüştür (Gökçe ve Akçaözoğlu, 2017).

Fitzpatrick ve diğerleri, çalışmalarında geopolimerizasyon reaksiyonunu geliştirmek için uçucu kül esaslı geopolimer yapım işlemi sırasında bir katkı maddesi olarak alçı kullanmışlardır. Çalışma neticesinde sülfat iyonları, alüminaların süzülmesini, ek alümina-silikatlar oluşumunu ve sistemde fazladan kalsiyum oluşumunu sağlamıştır. Jips eklenmesi ile birlikte oluşan numunenin basınç dayanımı ve toplam gözenekliliğin iyileştiği daha iyi geopolimerizasyon özelliğine sahip numune elde edildiğini belirtmişlerdir (Fitzpatrick-Schmidt, Horsley, Tsaknopoulos ve Zhang, 2015).

Demir ve Başpınar çalışmalarında uçucu kül-alçı-kireç karışımından üretilen malzemeye farklı tiplerde puzolan ilavesinin fiziksel, mekanik ve termal özelliklere etkisini araştırmışlardır. Karışıma genleştirilmiş perlit, ısı iletkenliğinin iyileştirilmesi amacıyla ilave edilmiştir. Çalışmalar neticesinde, yüksek alçı oranında uçucu külle silis dumanı yer değiştirildiğinde ısı iletkenlik azalmıştır. Optimum dayanım-ısı iletkenlik kombinasyonuna silis dumanı ve genleştirilmiş perlitin düşük alçı oranında karışıma ilave edilmesiyle elde edilmiştir (Demir ve Başpınar, 2008).

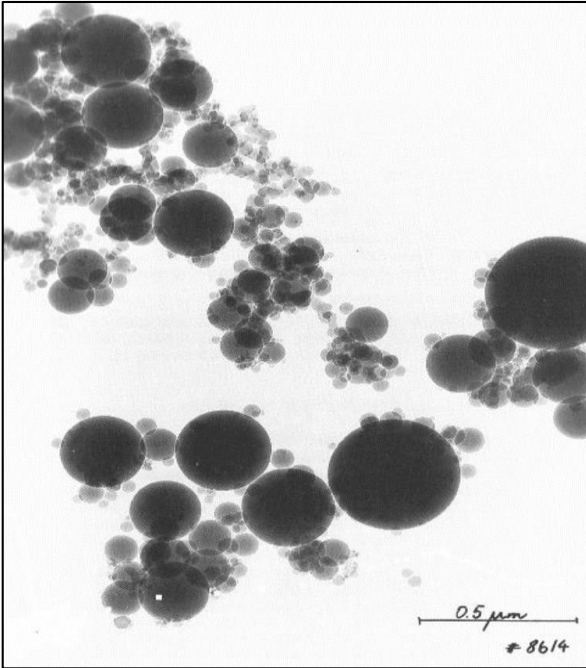
2.5. Silis Dumanı

Silis dumanı silisyum metali veya ferrosilisyum (FeSi) alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin, kömür ve odun parçacıkları ile 2000 °C'de indirgenmesi sonucu elde edilen çok küçük küresel taneli olup, yaklaşık %90 oranında amorf silis içermesinden dolayı puzolanik değeri yüksek bir maddedir. Fırınların düşük sıcaklıktaki üst bölümlerinde SiO gazı hava ile temas ederek hızla okside olur ve amorf SiO₂ olarak yoğunlaşarak silis dumanı bileşiminin hemen hemen tamamını oluşturur. Ani soğutma nedeniyle kristalleşmeyen SiO₂ amorf yapıda çok küçük taneler halinde oluşmaktadır (Yıldız, Yalınbaş ve Keleştemur, 2006; Yılmaz, A., 2002). Yapı sektöründe kullanılan silis dumanı Resim 2.11'de verilmiştir.



Resim 2.11. Silis dumanı (Yılmaz, A., 2002)

Alaşımdaki silisyum içeriğine bağlı olarak silis dumanındaki SiO_2 miktarı da artar. Bu miktar silisyum metalinde %98'e ulaşır. Araştırmalarda ve pratikte kullanılan silis dumanları genellikle %75 ve yukarı oranlarda ferrosilisyum içeren alaşımlardan elde edilmiştir (Yeğınobalı, 2009). Elektrik ark fırınlarında kuvarstın silikona indirgenmesi sırasında oluşan çok küçük taneli silis dumanı ortalama tane boyutu $0.1\mu\text{m}$ olduğu için filtreler aracılığıyla toplanmaktadır. Toplanan silis dumanının tane boyutu Resim 2.12'de verilmiştir. Türkiye'de Antalya Ferrokrom tesislerinde yılda ortalama 500-1000 ton civarında silis dumanı üretilmektedir (Çimento Araştırma ve Uygulama Merkezi, 2018; (Baradan, Yazıcı ve Aydın, 2015).



Resim 2.12. Silis dumanı tane boyutu (Çimento Araştırma ve Uygulama Merkezi, 2018)

Yapı sektöründe kullanılan silis dumanının yoğunluğu $2,2\text{g/cm}^3$, birim hacim ağırlığı ise $200\text{-}250\text{kg/cm}^3$ mertebesinde olup siyah ve beyaz renkte olmak üzere değişen bir renk aralığına sahiplerdir (Çimento Araştırma ve Uygulama Merkezi, 2018; Topçu ve Canbaz, 2002). Silis dumanı genellikle camsı, düzgün yüzeyli küresel taneciklerden meydana gelir. Çok ince taneli ve hafif olduğundan özgül yüzey bazında inceliği Blaine metodu ile tayin edilememektedir. Bu nedenle çok ince taneli cisimlerde özgül yüzey Azot Adsorpsiyon (BET) metodu ile tayin edilebilmektedir. Çizelge 2.27’de silis dumanı ve diğer puzolanik malzemelerin özgül yüzey alanı değerleri verilmiştir (Yeğinobalı, 2009).

Çizelge 2.27. Farklı malzemelere ait özgül yüzey alanı değerleri (Yeğinobalı, 2009)

Malzeme	Metod	Özgül Yüzey (m^2/kg)
Portland çimentosu	Blaine	300 - 400
Uçucu kül	Blaine	400 - 700
Granüle Y.F.cürufu	Blaine	350 - 600
Silis dumanı	Azot (BET)	13000 - 20000

Özgül yüzey alanı diğer puzolanik katkı malzemelerine göre daha yüksek olan silis dumanı kullanıldığı malzemeye birçok avantaj sağlamaktadır. Bu avantajlar teknik ve çevresel olarak değerlendirilebilmektedir. Silis dumanı kullanılması betonun dayanıklılığı ve basınç dayanımının artmasını sağlarken betonda kullanılması için ayrıca öğütülmesine de gerek yoktur (Çimento Araştırma ve Uygulama Merkezi, 2018).

Okoye ve diğerleri, uçucu kül esaslı geopolimer betonun mekanik özelliklerine silis dumanının etkisini araştırmışlardır. Karışımlarda alkali aktivatör olarak 14M sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat karışımı hazırlandıktan sonra bir gün oda koşullarında bekletilmiştir. Numuneler 48 saat oda koşullarında bekletilmiş ve daha sonra 72 saat boyunca $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kür uygulanmıştır. Sonuçlar, silis dumanı ilavesinin, üretilen geopolimer betonların basınç dayanımını arttırdığını göstermiştir. Silika dumanı içeriği arttıkça çekme ve eğilme dayanımları da artmıştır. Geopolimer betonlar %2 H_2SO_4 , %5 Na_2SO_4 ve %5 NaCl varlığına oldukça dayanıklı bulunmuştur (Okoye, Durgaprasad ve Singh, 2016).

Yılmaz çalışmasında yol üst yapısında silis dumanı kullanımını incelemiştir. Yapılan çalışmada, bölgedeki endüstriyel atıklardan olan Antalya Ferrokrom Fabrikası atıklarının (FeCr cürufu, SiFeCr cürufu, silis dumanı) yol üstyapısındaki kullanım potansiyeli

araştırılmıştır. Sonuç olarak, FeCr ve SiFeCr cürufunun fiziksel ve mekanik özellikleri bakımından yol üstyapısının granüller tabakalarında doğal agregaya alternatif olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir. Yapılan çalışma neticesinde silis dumanının dayanım özelliğini arttırdığı ve yol yapımında kullanılabileceği görülmüştür (Yılmaz, A., 2008).

Tohumcu ve Bingöl silis dumanı ve uçucu kül katkılı kendiliğinden yerleşen betonların taze beton özellikleri ve basınç dayanımlarını araştırmışlardır. Bu çalışmada mineral katkı maddesi olarak çimento yerine ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranında silis dumanı ve %25, %40 ve %55 oranlarında uçucu kül kullanılarak kendinden yerleşen beton üretilmiş ve taze beton özellikleri ile sertleşmiş betonların 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre silis dumanı ilavesi basınç dayanımında artışı sağlarken uçucu kül katkılı betonlarda dayanımda azalmalar tespit edilmiştir. En yüksek basınç dayanım 88 MPa değeri ile %15 silis dumanı kullanılarak üretilen betonlardan elde edilmiştir (Tohumcu ve Bingöl, 2013).

Kurt silis dumanının betonun basınç dayanımına, kılcal yolla su emmesine, klorür geçirimsizliğine ve öz direncine etkisini araştırmıştır. Çimentodan daha ince olan silis dumanının yeni nesil akışkanlaştırıcılarla birlikte kullanılması ile daha dayanıklı betonlar elde edilmiştir. Betonun dayanıklılığını ve dayanımını arttıran puzolanik malzemelerin betonda kullanımı için kür koşullarının da dikkate alınması gerekmektedir. Çalışmalar, silis dumanının genellikle numunelerin basınç dayanımını arttırdığını göstermiştir. Bununla birlikte su/bağlayıcı miktarının azalması ve artan dozajla birlikte basınç dayanımı değerlerinde önemli ölçüde artış görülmüştür (Kurt, 2007).

Chaipanich ve diğerleri, Portland çimento-silika fumekarbon nanotüp çimento harçlarının karbon nanotüplerin basınç dayanımına ve eğilme dayanımına olan etkisini araştırmışlardır. Silika dumanı, silikon metal ve ferro-silikon alaşımları endüstrilerinden gelen yan ürünler, ağırlıkça %10 oranında çimento ile yer değiştirmiştir. Tüm harç karışımları için su/bağlayıcı oranı 0,5 olarak kullanılmıştır ve numuneler 28 gün su içerisinde bekletilmiştir. Sonuçlar, silis dumanı bulunan harcın, Portland çimento kontrol numunesine göre daha yüksek basınç ve eğilme dayanımına sahip olduğunu göstermiştir (Chaipanich, Rianyai ve Nochaiya, 2017).

Rostami ve Behrarnia cürufun silis dumanı ile yer değiştirmesinin alkali dayanımlı cüruf betonunun basınç direnci ve geçirgenliği üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Alkali ile aktive edilen cüruf betonunun uygun bir karışımının geleneksel normal Portland çimento betonuna kıyasla üstün mekanik özellikler ve dayanıklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Ek olarak, silis dumanı eklenmesiyle basınç dayanımının artabileceği ve alkali ile aktive edilen cüruf betonunun geçirgenliğini azaltabileceği tespit edilmiştir. Ek olarak, numuneler için su kürünün en uygun kür çeşidi olduğu belirlenmiştir (Rostami ve Behfarnia, 2017).

Gündeşli çalışmasında uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun beton ve çimento katkısı olarak kullanımını araştırmıştır. Çalışmada puzolanik malzemelerin beton ve çimento katkısı olarak kullanımının beton özellikleri üzerindeki etkileri, kullanım oranları ve deneysel çalışma sonuçları yapılan çalışmalarla incelenmiştir. Sonuçlara göre, silis dumanı ilavesinin basınç ve eğilme dayanımlarını arttığı görülmüştür ancak bu konudaki çalışmaların devam ettirilmesi gerektiği belirtilmiştir (Gündeşli, 2008).

2.6. Geopolimer Malzemeler

“Geopolimer” terimi 1970'lerde Fransız bilim adamı ve mühendis Prof. Joseph Davidovits tarafından öne atılmıştır ve alümina-silikat tozunun alkali bir çözelti ile tepkimeye sokulmasıyla sentezlenen bir katı malzeme sınıfına uygulanmıştır. Geopolimer ismi meydana gelen reaksiyonun termoset polimerlerin polikondensasyon reaksiyonuna benzerlik göstermesinden gelmektedir. Polikondensasyon çeşitli ısı ve kimyasal etkilerle monomerler arasındaki bağların değişmesi ve moleküller içindeki atomların enerji düzeylerinin değişmesi ile gerçekleşmektedir. Bu malzemeler, Avrupa'daki bir dizi yangının ardından organik ısıyla sertleşen polimerlere yangına dayanıklı bir alternatif olarak geliştirilmiştir ve bu malzemeler, yangından korunması için yolcu gemilerinde kaplama olarak uygulanmıştır (Provis ve van Deventer, 2009; Komnitsas ve Zaharaki, 2017).

Davidovits ve Orlinski geopolimer malzemelerle ilgili 1988 yılından 2005 yılına kadar yapılmış çalışmaları geopolimer kitabı altında toplamıştır. 1988 yılında geopolimer malzemeler Davidovits'in yaptığı tanıma göre üç boyutlu alümina-silikatlardır ve bu oluşum düşük sıcaklıkta ve kısa zamanda alümina-silikatların doğal olarak oluşmasından kaynaklanmaktadır. Kompleks geopolimer yapısı zincir, tabakaya benzeyen ve üç boyutlu SiO_4 ve AlO_4 dört köşelisini içermektedir (Davidovits ve Orlinski, 1988).

Geopolimer malzemenin ilk polikondensasyon reaksiyonu alkali polisilikatlar tarafından sentezlenebilmektedir. Literatür çalışmalarına göre, kesin geopolimerizasyon mekanizması tam olarak anlaşılamamıştır. Ancak geopolimerizasyon aşamaları oldukça hızlı gerçekleşen bir kimyasal reaksiyondur. Bununla birlikte, en çok tasarlanan mekanizma üç aşamadan oluşur; (1) silisyum ve alüminyum atomlarının hidroksit iyonları etkisiyle çözünmesi, (2) taşınma, yönlendirme ve öncü iyonların monomerlerde yoğunlaşması, (3) sertleşme veya monomerlerin polikondensasyon/polimerizasyonun polimerik yapıda oluşmasıdır. Geopolimer yapıdaki düşük Si/Al oranı 3 boyutlu yapıdır ve çok katıdır. Yüksek Si/Al oranı 15'den daha yüksek olduğunda geopolimerik malzemelere polimerik karakter sağlamaktadır (Abdullah, Hussin, Bnhussain, Ismail ve Ibrahim, 2011; Davidovits ve Orlinski, 1988).

Gelişen teknolojiyle birlikte geopolimer bileşikler son zamanlarda geleneksel çimento malzemelerde kaynak tüketiminin azaltılması ve çevre bilime sağlanacak katkı için alternatif haline gelmiştir. Ateşe ve ısınmaya karşı yüksek direnç gösteren iyi basınç dayanımı, dayanıklılık ve termal özellikleri vardır. Bununla birlikte, bu bileşikler nispeten düşük çekme ve bükülme dayanımına sahiptir ve bu da birçok alanda geopolimer malzemelerin kullanımını sınırlamaktadır (Korniejenko, Fraczek, Pytlak ve Adamski, 2016). Ancak Davidovits son olarak geopolimer malzemelerin geri dönüştürülebilir mineral atıklardan üretildiğinde, tanıtılması ve yaygın kullanımıyla çimento ve beton endüstrisinde CO₂ yayılımını %80 oranında azalabileceğini belirtmiştir (Davidovits ve Orlinski, 1988).

Geopolimerizasyon reaksiyonu ise büyük çapta alüminyum silikat atıklarının yüksek mekanik dayanım ve yüksek asit, yangın ve bakteri direnci ile geliştirilmiş geopolimer ürünlere aktarılmasıdır. Sonuçlar, uygun reaksiyon parametreleri kullanıldığında üç bileşenli sistemin en yüksek basınç dayanımı ve düşük kırılma olasılığına sahip geopolimer malzeme üretilabileceğini göstermiştir (Xu ve Van Deventer, 2002). Alümina-silikatın alkali aktivasyonu olarak da bilinen geopolimerizasyon, yüksek miktarda Al ve Si içeriğine sahip, kaolin, yüksek fırın cürufu veya uçucu kül gibi mineral kaynakları yüksek, alkaline ortamlara maruz bırakıldığında, iki üç boyutlu Si-O-Al yapısı ortaya çıkmaktadır ve Portland çimentosu gibi geleneksel çimento malzemelerinde bulunmayan hem zeolik hem de seramik özellik göstermektedir (Ramasamy ve diğerleri, 2015). Fakat, geopolimer malzemeyi zeolitten ayıran en önemli özellik, geopolimerizasyon sürecinde alümina-silikat ve alkali çözeltinin karıştırılmasıyla macun formundan kısa sürede katı forma geçerek geopolimer yapısına dönüşmesidir (Komnitsas ve Zaharaki, 2017).

Geopolimer malzemelerin oluşumunda görülen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir;

(Si-Al içeren malzemeler) + (Alkaliler) = (Geopolimer ara bileşeni) (1)

(Geopolimer ara bileşeni) + (Alkaliler) = (Geopolimer) (2)

Reaksiyonlardan anlaşılacağı üzere geopolimer malzemelerin yapısında su yoktur. Geopolimer malzemelerde karışım aşamasında kullanılan su işlenebilirlik için kullanılmakta, geopolimer malzemenin kür ve kuruması sırasında geopolimer içerisinde süresiz nano boşluklar bırakarak geopolimer malzemeyi terk etmektedir. Bu durum geopolimer malzemeye hafiflik, ısı yalıtımı ve yangın dayanımı gibi olumlu özellikler kazandırmaktadır (Topçu ve Toprak, 2009). Ek olarak geopolimerizasyon reaksiyonunun diğer avantajları ise erken dayanımların yüksek, düşük alkali agrega genişlemesi, donma-çözünme, sülfata ve korozyona olan dayanımlarıdır (Davidovits ve Orlinski, 1988).

Geopolimer malzemelerin yapısı, mekanik, fiziksel ve termal özelliklerinin geliştirilerek yapı sektöründe kullanımı için literatürde yapılmış çalışmalar bulunmaktadır. İlkede çalışmasında geopolimer bağlayıcı tekniği ile malzemelerin üretilmesi için mineral tozların geliştirilmesi üzerine çalışmıştır. Geopolimer malzemelerin sentezi için üç malzemenin gerekli olduğunu belirtmiştir. Bu malzemeler; ham maddeler, aktif olmayan doldurucu ve geopolimer çözeltilidir. Ham maddeler saf madde olabilirken (alümina-silikat), endüstriyel atık (uçucu kül, cüruf) da olabilmektedir. Aktif olmayan tamamlayıcı olan kaolin ve metakaolin genellikle Al^{3+} iyonuna destek sağlamak için kullanılmıştır. Geopolimer çözelti için sodyum silikat (potasyum silikat) hem bağlayıcı, alkali aktivatör ve plastikleştiriciyen aynı zamanda hammaddelerin çözünmesi için gerekli alkali hidroksit çözeltiyken sodyum hidroksit ise alümina-silikat kaynaklarının çözünmesine yardımcı olmaktadır (İlkeda, 1988).

Panagiotopoulou ve diğerleri, altı farklı alümina-silikat endüstriyel mineralin ve yan ürünlerin (kaolin, metakaolin, uçucu kül, doğal puzolan, zeolit ve ocak cürufu) alkali çözeltide çözünmesini incelemişlerdir. Alkali metal (K, Na), alkali çözelti (2.5, 5 ve 10 M) konsantrasyonu ve çözünme zamanı (5, 10 ve 24 saat) değişkenleri incelenmiştir. Sonuç olarak, Al ve Si'un sızdırma kabiliyetinin Metakaolin> Zeolit> Cüruf> Uçucu Kül> Puzolan> Kaolin sırasına göre değiştiği tespit edilmiştir. Özellikle en reaktif malzemeler söz konusu olduğunda çözünme derecesi NaOH çözeltisinde KOH çözeltisinden daha yüksektir (Panagiotopoulou, Kontori, Perraki ve Kakali, 2007).

Komnitsas ve Zaharaki çalışmasında genel olarak amorf yapılı alümina-silikat içeren cüruf, uçucu kül ve metakaolin toz haline getirildiğinde, toz haline getirilmemiş malzemelere kıyasla geopolimerizasyon sırasında daha yüksek reaktiflik gösterdiğini belirtmiştir (Komnitsas ve Zaharaki, 2017).

Geopolimer malzeme özelliklerini bileşim, alkali aktivatörün tipi ve miktarı, ana malzemenin yüzey bileşimi ve geopolimerizasyon reaksiyonun ilk aşamasındaki durumu gibi etkenler etkilemektedir. Geopolimer malzeme kullanımıyla yangına dayanıklı, zayıf elektrik iletkenleri için mükemmel kaplama malzemesi, geniş bir pH aralığında tepkimeye girmeyen, aşındırıcı olmayan, düşük enerji tüketimi, zayıf geçirgenlik ve emisyonlar gibi etkileyici mekanik özelliklere sahip alüminyum silikatlar olan inorganik polimerlerle CO₂ salınımını düşürerek küresel ısınmaya sebep olacak sera gazları etkisi azaltılmaktadır (Ramasamy ve diğerleri, 2015).

Xu ve Van Deventer 15 doğal Al-Si minerallerin geopolimerizasyon reaksiyonuyla sentezlenen geopolimer malzemenin basınç dayanımının mineral özelliklere etkisi incelenmiştir. Geopolimer malzemeler kimyasal bileşimi içerisinde zeolite benzerler ancak farklı olarak amorf mikro yapı oluşmaktadır. Geopolimer malzemeler alümina ve silikat türlerinin birlikte polimerizasyonu tarafından biçimlenmektedirler. Bu oluşum yüksek pH ortamında çözünebilir alkali metal silikatlarda, alümina ve silikanın çözünmesiyle oluşturulmaktadır. Çalışma sonucunda NaOH çözeltisinin çözünmesinin KOH ortamına göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Silikat yapısı alkali çözeltide zincir, levha ve halka yapılarında yüksek kapsamda çözünme gösterdiği istatistiksel analizlerle belirlenmiştir ve yüksek çözünme gösteren mineraller, geopolimerizasyon sonrasında daha iyi basınç dayanımı göstermiştir. Sonuçta, doğal Al-Si minerallerinin geopolimer malzemelerin sentezi için potansiyel kaynak malzeme olabileceğini göstermiştir (Xu ve Van Deventer, 2000).

Azimi ve diğerleri, geopolimer oluşum süreci ve geopolimer bileşiklerin ısı yalıtım uygulamalarında kullanımına yönelik çalışmışlardır. Alümina-silikat malzemeleri aktive etmek için sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH) sodyum silikat (Na₂SiO₃) ve potasyum silikat (K₂SiO₃) kullanılmıştır. Literatür araştırmalarında alkali aktivatör olarak en yaygın kullanılan NaOH ve Na₂SiO₃'dür. NaOH, KOH'la kıyaslandığında daha fazla alkali seviyeye sahiptir. Genel olarak, alkali çözelti için NaOH molar derişimi 8-16 M,

sodyum silikatın sodyum hidroksite ağırlıkça oranı 1,75-3 arasında seçilerek üretildiği tespit edilmiştir (Azimi ve diğerleri, 2016).

Usha ve diğerleri, çevresel etkileri azaltmak amacıyla Portland Çimentosuna alternatif olarak kullanılmak üzere geopolimer bağlayıcıları araştırmışlardır. Geopolimerizasyon alümina-silikat oksitlerle silikatların yüksek alkali koşullar altında kimyasal reaksiyonu sonucu polimerik Si-O-Al-O bağlarının oluşmasıyla elde edilmektedir. Yüksek reaktivlik içeren geopolimer malzemeler kullanıldığında yüksek basınç dayanımının elde edildiği gözlemlenmiştir. Geopolimer dayanımının uçucu külün inceliğine bağlı olarak arttığı belirlenmiştir. Uçucu kül çözünebilen silikatlarla aktive olduğunda, sadece hidroksitlerle aktive edildiğinden daha fazla reaksiyon oranı olabileceği ve mekanik dayanımının daha hızlı gelişebileceğini göstermiştir. Geopolimerizasyon reaksiyonda en yaygın kullanılan alkali aktivatör, NaOH ve KOH'un sodyum silikat veya potasyum silikatla kombinasyonu sonucu oluşturulmaktadır. Sodyum silikatın sodyum hidroksite oranının artmasıyla geopolimer betonun basınç dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Uçucu kül esaslı geopolimer malzemenin en yüksek basınç dayanımına 60 °C 24 saat kür uygulandığında ulaşılacağı bildirilmiştir (Usha, Nair ve Vishnudas, 2014).

Al-Bakri Abdullah ve diğerleri, geopolimer malzeme üretimini araştırmışlardır. Geopolimerizasyon reaksiyonunda en yaygın kullanılan alkali aktivatör çözelti sodyum hidroksitin sodyum silikat, potasyum hidroksitin potasyum silikat ile kombinasyonu ile oluşturulmuştur. Sodyum silikat ve sodyum hidroksit karışımıyla hazırlanan çözelti alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Uçucu külün alkali aktivatördeki oranı ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı uygulanan tüm numuneler için 2,5 de sabitlenmiş ve 6,10 ve 12 M derişime sahip sodyum hidroksit çözeltiler kullanılmıştır. Numunelere 70 °C'de 24 saat boyunca kür uygulanmıştır. Alkali çözeltinin türü ve derişimi uçucu külün çözünmesini etkilediği yapılan testler sonucunda belirlenmiştir. Buna ek olarak, en yüksek basınç dayanımı 57 MPa, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 2,5 olduğunda elde edilmiştir (Al-Bakri Abdullah, Kamarudin, Bnhussain, Rafiza ve Zarina, 2012).

Ramasamy ve diğerleri, kaolin, sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılarak üretilen geopolimer malzeme üzerinde oranların etkisini araştırmışlardır. Deneysel çalışmada geopolimerizasyon için katı/sıvı madde oranı ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı üzerinde çalışılmıştır. Bu oranın, geopolimer malzemelerin mekanik özelliklerine büyük etkisi olduğu tespit

edilmiştir. Kaolin esaslı geopolimer malzeme üretiminde 8M NaOH çözeltisi, sodyum silikat ile karıştırılmış ve aktivasyon aşaması ve alkali çözelti elde etmek için 24 saat oda koşullarında dinlendirilmiştir. Kaolin esaslı malzemeler $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 0,24'de sabit tutulduğunda ve sıvı/katı oranı 0,80 olduğunda geopolimer macunun basınç dayanımının ideal bir dayanım gösterdiğini tespit etmiştir (Ramasamy ve diğerleri, 2015).

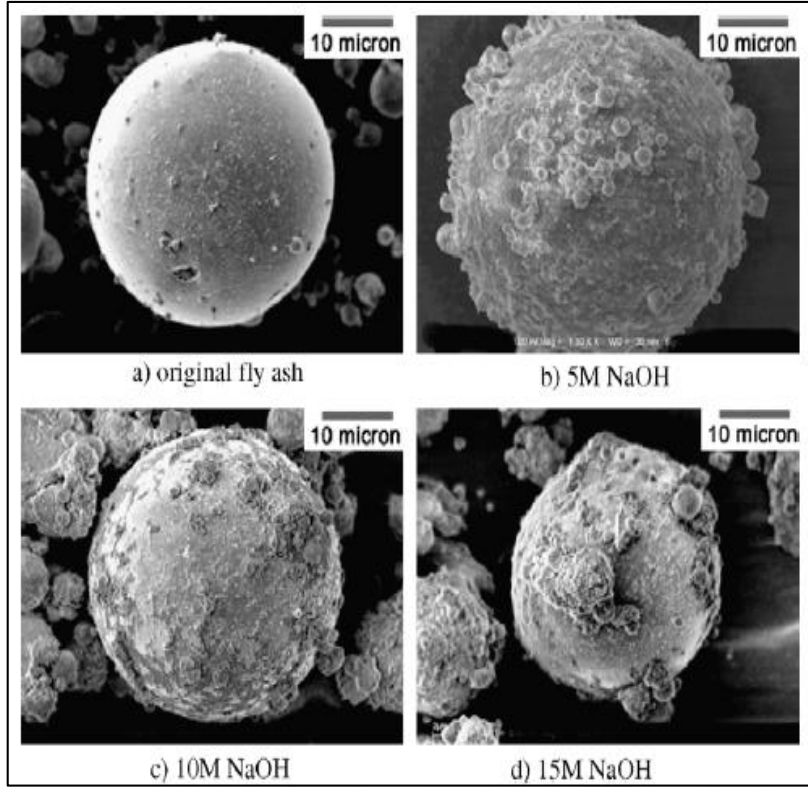
Yahya ve diğerleri, POBA esaslı geopolimer üretimine katı/sıvı ve sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı etkisini araştırmışlardır. Alkali aktivatör üretmek için 14 M sodyum hidroksit çözeltisi ve sodyum silikat kullanılmıştır. Geopolimer numuneler farklı katı/sıvı oranlarında (0,5, 1, 1,25, 1,5 ve 1,75) ve sodyum silikat/sodyum hidroksit oranları (0,5, 1, 1,5, 2, 2,5 ve 3) ile hazırlanmıştır. Sonuçlar, yedi günlük dayanımda katı/sıvı oranı ve sodyum silikat/sodyum hidroksit oranının 1,5 ve 2,5 olduğu numunede maksimum basınç dayanımının 11,9 MPa olarak elde edildiğini göstermiştir (Yahya ve diğerleri, 2015).

Abdulkareem ve diğerleri, uçucu kül esaslı hafif agregası içeren geopolimer beton numunelerine yüksek sıcaklık etkisini araştırmışlardır. Numuneler hazırlanırken, uçucu külün aktive edilmesi için alkali aktivatör kullanılmıştır. Alkali aktivatörün hazırlanması için sodyum silikat ve 12M sodyum hidroksit karışımı hazırlanmıştır. Alkali aktivatör çözeltide kullanılan sodyum silikatın, sodyum hidroksite oranı kütlece 1:1'dir. Aktivatör/uçucu kül oranı 0,6 olarak belirlenmiştir. Sıvı alkali aktivatör, homojen karışması için 5 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karışım oranları, Amerikan Beton Enstitüsü tarafından belirlenen aktivatör/geopolimer oranına bağlı kalınarak karışımlar hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, ham maddeyi aktive etmek için kullanılan yüksek aktivatör içeriğinin, geopolimer malzemelerin yüksek sıcaklıklara dayanabildiği, mükemmel mekanik ve mikroyapısal özellikleri gösterdiği tespit edilmiştir (Abdulkareem, Mustafa Al-Bakri Kamarudin, Nizar ve Saif, 2014).

Granizo ve diğerleri, metakaolinin alkali aktivasyonu için iki farklı alkali aktivatör çözelti kullanarak geopolimer malzemenin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Karışımlar hidrotermal koşullar altında (85 °C'de 2 saat) aktive edilmiştir. Sodyum hidroksit derişimi 6, 8, 10, 12, 15, 18, 20 M arasında kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, sodyum silikat ve sodyum hidroksit içeren çözeltilerin sadece sodyum hidroksit kullanılan çözeltilerine göre daha yüksek mekanik dayanıma sahip olduğu görülmüştür (Granizo, Blanco-Varela ve Martí'nez-Ramí'ez, 2007).

Wang ve diğerkleri, metakaolin esaslı geopolimer malzemelerin sentezi ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Metakaolin esaslı geopolimer malzemeler 20 °C'de sodyum hidroksit (4 ila 12 M) ve sodyum silikat çözeltisi kullanılarak üretilmiştir. Harç kalıba konularak 4MPa basınç uygulanmış, kalıplanmış ve 65 °C'de 10 saat kür uygulanmıştır. Sonuçlara göre NaOH çözeltisinin 4 ila 12 M'a kadar derişiminin artmasıyla birlikte basınç dayanımının, eğilme dayanımının ve görünür yoğunluğunun arttığı tespit edilmiştir. XRD (X-ışını kırınımı) ve IR (kızılötesi spektrometresi) analizlerine göre geopolimer malzemenin su ve metakaolinden kaynaklı az miktarda amorf farz ve kristal fazdan oluştuğı görülmüştür. Geopolimer malzemedeki amorf faz, NaOH derişiminin artmasıyla birlikte artmıştır. 65 °C altında kür uygulanan numunelerde çatlama görülmemiştir. Elde edilen ürün özelliklerine göre metakaolin esaslı geopolimer malzemelerin yapı malzemesi olarak kullanılabileceğı öngörülmüştür (Wang, Li ve Yan, 2005).

Rattanasak ve Chindaprasirt uçucu kül esaslı geopolimer malzemelere sodyum hidroksit çözeltisinin etkisini araştırmışlardır. SiO₂ ve Al₂O₃'ün süzülmesi, uçucu kül ve NaOH çözeltisi ile farklı zaman aralıklarıyla karıştırarak incelenmiş ve süzüntüler silika ve alümin içeriğı bakımından analiz edilmiştir. Ayrı karıştırma için NaOH çözeltisi uçucu kül ile ilk 10 dakika karıştırılmış ve daha sonra Na₂SiO₃ çözeltisi karışıma ilave edilmiştir. Normal karıştırma için ise uçucu kül, sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltisi aynı anda karıştırılmıştır. Geopolimer malzemelere 65 °C'de 48 saat kür uygulanmıştır. Yapıştırma mikro yapıları ve harçların basınç dayanımları incelenmiştir. Sonuçlar uçucu külün çözünürlüğünün NaOH derişimine ve NaOH ile karıştırma süresine bağı olduğunu ortaya koymuştur (Resim 2.13). Karıştırma işlemi için, ayrı karıştırma, normal karıştırmadan biraz daha iyi dayanımlı harç elde edilmesini sağlamıştır. Karışım 10M NaOH ve Na₂SiO₃/NaOH 1:1 oranı ile formüle edildiğinde ve ayrı karıştırıldığında 70 MPa kadar yüksek dayanımlı geopolimer harç elde edilebileceğini göstermiştir (Rattanasak ve Chindaprasirt, 2009).



Resim 2.13. NaOH çözeltisinin uçucu külün mikro yapısına etkisi (Chindaprasirt, 2009)

Somna ve diğerleri, NaOH ile aktive edilmiş taban uçucu külü esaslı geopolimer malzemelere oda koşullarında kür uygulanmasını incelemişlerdir. Alkali aktivatör olarak 4,5 ile 16,5 M arasında sodyum hidroksit kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre NaOH derişiminin 4,5 ile 14 M arasındaki artışı, taban uçucu külü geopolimer hamurlarının dayanımını arttırmıştır. Mikro yapı çalışmaları, 12-14 M NaOH derişimlerinin, yeni kristal halde sodyum alümina-silikat ürünler oluştuğunu göstermiştir. 9,5-14 M NaOH derişimleri ile 28 günlük basınç dayanımları 20-23 MPa olarak elde edilmiştir. NaOH derişiminin bu noktanın ötesinde arttırılması, alümina-silikat ürünlerinin erken çökmesine bağlı olarak, macunun dayanımında önemli bir düşüş ile sonuçlanmıştır. Sonuçlar neticesinde, taban uçucu külünün orijinal uçucu külden daha yüksek dayanımlı geopolimer hamur dayanımına sahip olduğunu göstermiştir (Somna, Jaturapitakkul, Kajitvichyanukul ve Chindaprasirt, 2011).

Yun Leong ve diğerleri, farklı Na_2O ve K_2O oranlarındaki alkali aktivatörün uçucu kül esaslı geopolimer malzemelerin basınç dayanımına etkisini araştırmışlardır. Numuneler NaOH, KOH veya $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve Na_2SiO_3 kullanılmasıyla aktive edilmiştir. Farklı oranlardaki alkali aktivatör/uçucu kül ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$ ya da $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{Ca}(\text{OH})_2$) oranları

incelenmiştir. Sonuçlar yüksek oksit derişim oranlarının yüksek dayanım anlamına gelmediğini göstermiştir. $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$, $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ ve $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ ağırlık oranlarının NaOH ve KOH esaslı geopolimer malzemelerin basınç dayanımı üzerinde benzer etkilere sahip olduğu belirlenmiştir. Ticari sınıf Na_2SiO_3 kullanılarak NaOH ve KOH esaslı geopolimer numunede $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ve $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$ azaltılması, dayanımı yoğun bir şekilde arttırmıştır. Ek olarak, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ esaslı geopolimer numunede $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ve $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$ oranları en yüksek olmasına rağmen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ esaslı geopolimer malzemenin basınç dayanımı ve işlenebilirliği NaOH ve KOH esaslılara göre daha düşük çıkmıştır. En yüksek basınç dayanımına $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2$ ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH} = 1$ ile ve alkali aktivatör/uçucu kül oranı 0,4 olduğunda ve kür koşuluna bakılmaksızın sırasıyla 30 MPa ve 28 MPa olarak ölçülmüştür (Yun Leong , Ek Leong Ong, Sanjayan ve Nazari, 2016).

Fitzpatrick ve diğerleri, çalışmalarında geopolimerizasyon reaksiyonunda sodyum silikat ilave edildiğinde daha güçlü iyon çiftinin oluşması için yüksek silikat derişimi kullanmışlardır. Bu oluşum, daha uzun zincirli silikat oligomerlerinin yanı sıra Al-O-Si bileşiklerini de oluşturmaktadır. Sodyum silikat mineral ve çözelti arasındaki temasıyla geopolimer öncüllerinin oluşumunu arttırmak amacıyla eklenmektedir. Çeşitli mineraller tarafından görülen farklı çözünme miktarları göz önüne alındığında, bu konsantrasyonun nihai geopolimerin özelliklerini etkilediği her bir durum için sodyum silikat derişiminin optimize edilmesi gerektiğini tespit etmişlerdir (Fitzpatrick-Schmidt, Horsley, Tsaknopoulos ve Zhang, 2015).

Geopolimer malzeme üzerinde kür koşulunun etkisi literatür çalışmalarında incelenmiştir. Bing-hui ve diğerleri, 20 ila 100 °C arasında farklı kür uygulama sıcaklıklarının metakaolin esaslı geopolimer malzemelere etkisini araştırmışlardır. Geopolimer üretiminde bağlayıcı olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılmıştır. Test sonuçlarına göre, kür uygulama sıcaklığı arttıkça geopolimerizasyon reaksiyonunun çözünme ve polimerizasyon süreci hızlanmıştır. Geopolimer malzemeler için en iyi kür sıcaklığı yaklaşık 60 °C ve 7 gün olarak tespit edilmiştir. Bu numunelerin basınç dayanımı 97,95 MPa olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte, çok yüksek sıcaklıklardaki (80 °C ve 100 °C) kür sıcaklığı fiziksel özellikleri olumsuz etkilemiştir (Bing-hui, Zhu, Xue-min , Yan ve Si-yu, 2014).

Kürklü yüksek fırın cürufu (BFS) esaslı karışımların farklı oranlarda kaba uçucu kül (FA) ile değiştirilmesi ile üretilen geopolimer harçları incelemiştir. 60 °C kür sıcaklığında

bağlayıcı malzeme olarak 14 M NaOH ve Na₂SiO₃ (Modül 3) çözeltisine (NaOH/Na₂SiO₃ 1:2) ve yüksek fırın cürufuna ek olarak %25, %50 ve %75 uçucu kül eklenerek çift bağlayıcı karışım oranları hazırlanmıştır. Hazırlanan (sıvı/bağlayıcı) oranı 1 olan geopolimer harçlara 5, 24, 48, 168 saat etüv fırında kür uygulanmıştır. Fiziksel ve mekanik testlerden sonra en yüksek basınç dayanımına sahip numuneler belirlenerek basınç dayanımı arttırmak için (sıvı/bağlayıcı) oranı 0,5-1 arasında değiştirilerek 6 farklı karışım hazırlanmıştır. Son olarak, en yüksek basınç dayanımına sahip harç numunesi 200, 400, 600, 800 ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakılmış ve fiziksel ve mekanik özelliklerdeki değişimler analiz edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı değerine (27,3 MPa), 48 saat boyunca kür uygulanan %100 yüksek fırın cürufu içeriğine sahip harç numunelerinden elde edilmiştir. Sıvı/bağlayıcı oranına yapılan optimizasyon sonucunda 0,7 oranı için %28,1'lik artış ile 35,1 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir (Kürklü, 2016).

Gökhan ve Kürklü farklı sıcaklıklarda kür uygulanmasıyla elde edilen uçucu kül esaslı geopolimer malzemeye NaOH çözeltisinin etkisini araştırmışlardır. Alkali çözelti derişimi, kür sıcaklığı ve kür süresi arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Çalışmada uçucu kül parçacıklarının silis ve alümini çözmek için üç farklı sodyum hidroksit derişimi (3M, 6M ve 9M) ve sodyum silikat (Modül 3) çözeltisi birlikte kullanılmıştır. NaOH çözeltisi oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiştir. Bekleyen çözeltiye soyum silikat ilave edilmiş ve numunelere 65 °C ve 85 °C'de 24 saat kür uygulanmıştır. Elde edilen verilere göre 65 °C'de ve 85 °C'de 24 saat kür uygulanan 6 M derişime sahip harçtan sırasıyla 21,3 MPa ve 22 MPa basınç dayanımları elde edilmiştir. 85 °C'de kür uygulanan geopolimer harçların basınç dayanım değerleri, sertleştirme süresine ve NaOH derişimindeki artışa bağlı olarak artmıştır. Elde edilen dayanım değerleri göz önüne alındığında, optimum kür sıcaklığı ve en uygun NaOH konsantrasyonu sırasıyla 85 °C ve 6 M olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, kür sıcaklığı ve sertleşme süresinin, geopolimer harçların fiziksel özellikleri üzerinde etkili olduğunu tespit etmişlerdir (Görhan ve Kürklü, 2014).

Zeybek geopolimerizasyon yöntemini araştırarak, C ve F sınıfı uçucu kül esaslı yüksek dayanımlı yapı tuğlası üretiminde değerlendirilmesini incelemiştir. 30 MPa basınçla şekillendirilen 40, 60, 80 ve 100 °C arasındaki sıcaklıklarda 2, 4, 6, 24, 48 ve 72 saat aralığındaki ısıt işlemlerle üretilen, geopolimer tuğlaların basınç dayanımı, su tutma, yoğunluk değerleri ve donma çözülme dirençleri değerlendirilmiştir. Elde edilen testler neticesinde F sınıfı uçucu külden üretilen geopolimer tuğlaların Si/Al molar oranının 2

olduğu 60 °C sıcaklıkta etüvde 24 saat uygulanan ısı işlem sonrasında optimum basınç dayanımı değerini 45 MPa olarak ölçülmüştür. Ayrıca, suda çözme, kür ve öğütme işlemleri sonrasında C sınıfı uçucu küllerle üretilen geopolimer tuğlaların geleneksel tuğla malzeme standartlarına ulaştığı tespit edilmiştir (Zeybek, 2009).

Swanepoel ve Strydom uçucu külün geopolimer malzemede kullanımını araştırmışlardır. Uçucu külün doğal puzolanlara benzerliği, bu atık ürünün geopolimer sentezinde kullanılmasını teşvik etmiştir. Uçucu kül, kaolin, sodyum silikat, sodyum hidroksit ve su kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Numunelere farklı zaman aralıklarında (6, 24, 48 ve 72 saat) ve farklı kür sıcaklıklarda (40, 50, 60 ve 70 °C'de) kür uygulanmıştır. Yapılan testlerden sonra X-ışını kırınım ölçümleri ana bileşeni kuvarz gösterirken, geopolimer yapının en büyük kısmı amorf ve cam benzeri bir yapıda olduğu tespit edilmiştir. Buna ek olarak optimum kür sıcaklığı 60 °C ve optimum kür süresi 48 saat olarak belirlenmiştir. 28 günlük numunenin basınç dayanımı maksimum 8 MPa ölçülmüştür (Swanepoel ve Strydom, 2002).

Tekin mermer, traverten ve doğal puzolan atıklarının 1M, 5M ve 10M NaOH ile bağlanmasıyla elde edilen geopolimer macunların mekanik özelliklerini araştırmıştır. Çimento kullanılmadan numuneler üretilmiştir. Kür işlemi, fırında 24 saat boyunca 20, 45 ve 75 °C sıcaklıklarda uygulanmıştır ve bu işlemde hemen sonra numuneler ayrıca ıslak ve kuru şartlara maruz bırakılmıştır. Elde edilen veriler neticesinde, ıslak koşullardaki numunelerin basınç dayanımı, zamana bağlı olarak azalmış, ancak kuru koşullardaki numunelerin basınç dayanımı kür süresinin artmasıyla birlikte artmıştır. Derişimin artışına bağlı olarak malzemelerin dayanımı ve dayanıklılığı da artmıştır (Resim 2.14.) Üretilen geopolimer malzemelerin basınç dayanımı ısı ile kür işlemi yapılmadan (20 °C) 10 M NaOH ile 46,5 MPa olarak ölçülmüştür. Kür sürelerine göre, 10 M NaOH ile üretilen numunenin 40 MPa basınç dayanımına ve yaklaşık 1,8 kg/dm³ birim ağırlığına sahip ve geopolimer macunun hafif betondan daha fazla basınç dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir (Tekin, 2016).



Resim 2.14. NaOH derişiminin panellerin sertliğine etkisi (Tekin, 2016)

Pangdaeng ve diğerleri, mikro yapılı yüksek kalsiyumlu Portland çimentosu içeren geopolimer malzemenin farklı kür koşullarındaki mekanik özelliklerini incelemiştir. Uçucu kül ile Portland çimentosu bağlayıcı ağırlığına göre 0%, 5%, 10%, ve 15% oranında yer değiştirmiştir. Karışımda NaOH 10 M, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 0,67 ve sıvı/bağlayıcı oranı 0,40 olarak kullanılmıştır. Çalışmada buhar geçirmez membran kür, ıslak kür ve sıcaklık kürü olmak üzere üç tip kür uygulanmıştır. Elde edilen verilere göre, yüksek kalsiyumlu uçucu kül kullanılmış geopolimer malzemelere eklenen Portland çimentonun karışımın gözeneklerinde azalma sağladığı, su emme ve basınç dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir. Bu gelişim C-S-H jelinin C-A-S-H jeliyle yer değişmesi, yoğun ve güçlü karışım sayesinde olmuştur. Kür yöntemleri de önemli ölçüde Portland çimentosu ile geopolimer özelliklerini etkilemiştir. Buhar geçirmez kür ve ıslak kürde ek hidratasyon oluşmuş ayrıca sıcaklık kürü yüksek erken basınç dayanımı gelişmesini etkilemiştir (Pangdaeng, Phoo-ngernkham, Sata ve Chindaprasirt, 2014).

2.6.1. Geopolimer malzemelerin mekanik özellikleri

Geopolimer malzemelerin sağladığı olumlu yanlarının yanında olumsuz yanları da bulunmaktadır. Yapı sektöründe kullanılması amaçlanan geopolimer malzemelerle ilgili bu olumsuzlukların iyileştirilmesi için çalışmalar yapılmıştır. Geopolimer malzemelerdeki kuşkusuz en önemli sorun mekanik özelliklerinin kullanımı sınırlamasıdır.

Hemra ve Aungkavattana kordiyerit ilavesinin metakaolin esaslı geopolimer malzemenin basınç dayanımına ve ısı kararlılığına etkisini araştırmışlardır. Metakaolin esaslı geopolimer numuneler oda sıcaklığında metakaolin, sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri karıştırılarak sentezlenmiştir ve daha sonra ağırlıkça %0 ila %50 arasında kordiyerit tozu eklenerek geopolimer matris ağırlık bölüntüsü elde edilmiştir. Isı kararlılık için küp numunelere fırında 800°C 'de 2 saat kür uygulanmış ve daha sonra sonuçlar analiz edilmiştir. Test sonuçlarına göre, 28 günlük basınç dayanımında kordiyerit ilavesi (ağırlıkça 0% ila %50) arttıkça ve $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3,5$ ve $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 13$ mol oranı uygulandığında, dayanım 45 MPa'dan 57 MPa'a yükselmiştir. Buna ek olarak, metakaolin esaslı geopolimer malzemelerin kordiyerit içeriğinin yüksek sıcaklıkta iyi bir termal özellik sağlayabileceği tespit edilmiştir (Hemra ve Aungkavattana, 2016).

Guades kum/uçucu kül oranının geopolimer harç karışımının basınç ve çekme dayanımı üzerine etkisini araştırmıştır. Kum/uçucu kül oranı 0 ila 6 arasında kullanılmıştır. Geopolimer harç hazırlanırken bağlayıcı olarak 14 M sodyum hidroksit ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 1 olarak kullanılmıştır. Test sonuçlarına göre, geopolimer numunede bölme, kesme ve merkezi çatlamların olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen numunelerin basınç ve çekme dayanımı sırasıyla 12,4 MPa ve 2,1 MPa olarak ölçülmüştür. Kum/uçucu kül oranı 0 ile 1,5 arasında arttıkça her iki dayanımında belirli oranda azaldığı görülmüştür (Guades, 2016).

Komljenović ve diğerleri, uçucu kül esaslı geopolimer malzemelerin mekanik ve mikro yapı özelliklerini incelemişlerdir. Alkali aktivatör olarak farklı derişimlerde $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH, $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$, KOH ve Na_2SiO_3 (su camı) sulu çözeltileri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; en yüksek basınç dayanımı sodyum silikat kullanılarak elde edilmiştir ($n = 1,5$; %10 Na_2O Modül 3). Sodyum silikat $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ kütle oranının artmasıyla birlikte, reaksiyon ürünlerindeki atomik Si/Al oranı da artmıştır. Aktivatörün niteliği ve derişimin alkali aktivasyon sürecinde en baskın parametreler olduğu belirlenmiştir. Bu araştırma doğrultusunda yüksek dayanımın doğrudan yüksek Si/Al oranıyla ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Uçucu kül özelliklerine bakılmaksızın alkali aktivasyon ürünlerinin çoğunlukla amorf yapıları olduğu da belirtilmiştir (Komljenović, Bašćarević ve Bradić, 2010).

Lemougna ve diğerleri, volkanik kül, sodyum hidroksit çözelti ile sentezlenen numuneleri incelemişlerdir. Hem kür koşulları hem de $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ derişim oranının (0,3), maksimum 55 MPa'a ulaşan geopolimer çimento hamurunun basınç dayanımının gelişimini etkilediği

görülmüştür. Optimize edilmiş geopolimer çimento karışımına ağırlıkça %40 kum ilavesi ile bir harç oluşturulması, basınç dayanımını 30 MPa'a düşürmesine rağmen inşaat sektöründe kullanılabilir. Buna ek olarak, $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 0,25$ olan numune 250 °C'den 750 °C'ye kadar ısıtıldığında 30 MPa'a kadar önemli bir ölçüde dayanım kaybı yaşanmıştır. Aynı numune 900 dereceye kadar ısıtıldığında dayanım 35 MPa olarak ölçülmüştür. İlk ısıtma üzerine dayanımın azalması, büyük olasılıkla, yapısal suyun geopolimer matrisinden kaybedilmesi, yapının zayıflaması ve aynı zamanda mikro çatlakların eşzamanlı gelişimine bağlıdır (Lemouagna , MacKenzie ve Melo, 2011).

Astutiningsih ve Liu Avustralya cürufu kullanılarak geopolimerizasyon reaksiyonunun alkali tarafından etkili bir şekilde sentezlenmesini araştırmışlardır. Avustralya cürufunun yüksek CaO içeriğinden (%41) faydalanarak 60 °C'de 24 saat kür uygulayarak geopolimer üretilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre geopolimer numunelerin basınç dayanımı maksimum 30 MPa olarak ölçülmüştür. Geopolimer malzemelerin basınç dayanımının sodyum silikat çözeltisindeki su oranının azalmasıyla artış gösterdiği ve karıştırma sırasında Ca^{+2} ile OH⁻ın alkali sulu sistem içerisine etki ederek, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oluşturduğunu ve sonrasında atmosfer ortamında CO₂'ye maruz kaldığında kalsit (CaCO_3) oluşturduğunu tespit etmişlerdir (Astutiningsih ve Liu, 2005).

Yunsheng ve diğerleri, cüruf ve metakaolin kullanılarak geopolimer sentezi ve cüruf esaslı geopolimer malzemenin Pb ve Cu iyonlarının varlığında bağlanma davranışlarını incelemişlerdir. Numuneler dört farklı cüruf içeriği (%10, %30, %50, %70) ve üç tip kür sistemi (standart kür, buhar kürü ve otoklav kür) uygulanarak üretilmiş, basınç ve eğilme dayanımına bağlı olarak optimum sentezleme koşulunu araştırmışlardır. Test sonuçları geopolimer hamurunun %50 oranında cüruf içerdiğinde ve buhar kürü uygulanarak (80°C ve 8 saat) yüksek mekanik dayanıma sahip olduğunu göstermiştir. Cüruf esaslı geopolimer hamurunun basınç ve eğilme dayanımı sırasıyla 75,2 MPa ve 10,1 MPa olarak ölçülmüştür. X-ışını difraksiyonu sonuçlarına göre cüruf esaslı geopolimer ürünlerin amorf yapılı malzemeler olduğunu göstermiştir. SEM sonuçlarına göre geopolimer jel ve kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jel oluşumunun cüruf esaslı geopolimer hamuruyla aynı anda oluşmasının mümkün olabileceğini göstermiştir (Yunsheng, Wei, Qianli ve Lin, 2007).

2.6.2. Geopolimer malzemelerin ısı iletkenlikleri

Geopolimer esaslı malzemelerin diğ er yapı malzemelerine göre en önemli olumlu özelliklerinden birisi ısı ı dirençlerinin yüksek olmasıdır. Isı ve yangın direncine sahip geopolimer malzemelerin geliştirilmesi literatürde geçmiş ten günümüze yapılmış önemli çalışmalarından biri olmuştur. Feng ve diğ erleri, gözenekli uçucu kül esaslı ve düşük ısı ı iletkenliğ e sahip geopolimer malzeme üretimini araşt ırmış lardır. Geopolimerizasyon ve H_2O_2 'nin ayrış ması sonucu nihai ürünlerin özellikleri üzerinde meydana gelen değ iş iklikler, farklı miktarda Na_2SiO_3 (60, 80 ve 100 g) ve H_2O_2 (4, 6 ve 8 g) iç eren geopolimer harçlara 55 °C ve 85 °C farklı kür sıcaklıkları uygulanarak araşt ırılmış tır. Numunelerin gözeneklilik, yoğunluk, ısı ı iletkenlik, mekanik ve fiziksel özellikleri tespit edilmiş tir. Elde edilen basınç dayanımı, çevresel ve ekonomik etkiler göz önüne alınd ığında, en uygun kür sıcaklığı , Na_2SiO_3 ve H_2O_2 miktarı sırasıyla 55 °C, 80g ve 6g'dır. Bu koş ullarda üretilen numunede gözeneklilik %79.9, ısı ı iletim katsayısı 74,4 mW/m.K ve basınç dayanımı 0,82 MPa olarak ölç ülmüş tür (Feng ve diğ erleri, 2015).

Li ve diğ erleri, termal direnç, yoğunluk, basınç dayanımı ve adiyabatik köpük numunelerin mikro yapısını sodyum silikatla borik asit kullanılarak incelemiştir. Hazırlanan numunelerde kür uygulama sıcaklığı 450-500 °C'de, 600 gr sodyum silikat, 18-24 gr borik asit eklenmiş ve sodyum silikatın modülü 2,5 ile 2,8 arasında seç ilmiş tir. Elde edilen sonuçlara göre, yüksek sıcaklık, düşük borik asit içeriğı ve düşük modüle sahip sodyum silikatın birlikte kullanılmasının termal iletkenliğ i, yoğunluğı ve basınç dayanımını düş ürdüğü görülmüş tür. Bu koş ullarda ısı ı iletim katsayısının 44 mW/m.K'den ve yoğunluğun 100 kg/m³'den düşük ve basınç dayanımının 0,7 MPa'dan fazla olabileceğı tespit edilmiş tir (Li, Y., Cheng, Cao ve Gong, 2016).

Jonker çalış masında uçucu kül, metakaolin, alüminyum tozu, sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanarak elde edilen geopolimer malzemelerin 1200 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklara dirençli olduğı nu, ısı ı iletkenlik katsayılarının oldukça düşük olduğı ($\mu=0,2$ W/mK) aynı zamanda hafif (580 kg/m³) ve yüksek dayanımlı (13,84 MPa) malzemelerin elde edilebileceğini tespit etmiş tir (Jonker, 2006).

Lach ve diğ erleri, uçucu kül esaslı geopolimer köpüklerin üretim yöntemini araşt ırmış lardır. Geopolimer köpük elde etmek için 1:2:5 oranında 14 M NaOH ve Na_2SiO_3 (Modül: 2,5)

karışımında kullanılmıştır. Daha sonra karışıma çeşitli miktarda H_2O_2 eklenmiştir. Karışım tamamlandıktan sonra harç kalıplara dökülmüş ve $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ de 24 saat kür uygulanmıştır. Kür aşamasından sonra numune 28 gün boyunca laboratuvar koşullarında bekletilmiştir. 28 günlük dayanımda en yüksek basınç $3,4\text{ MPa}$ iken, en düşük ısı iletim katsayısı $82,6\text{ mW/m.K}$ olarak tespit edilmiştir. Elde edilen numunelerin yoğunluğu yaklaşık $400\text{-}650\text{ kg/m}^3$ arasındadır. Test sonuçları, uçucu külden üretilen geopolimer köpüklerin uygun mekanik özelliklere sahip olduğunu ve inşaat malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermiştir (Lach, Korniejenko ve Mikula, 2016).

Li ve diğerleri, Sodyum silikatın kaynak malzemesi olarak düşük sıcaklıkta adyabatik köpük üretiminde kullanılmasını araştırmışlardır. Uçucu kül, ısı yalıtım özelliğinin sağlanması ve yeterli dayanıma ulaşılması için karışıma eklenmiştir. Kür işlemi, uçucu kül içeriği ve sodyum silikatın modülü büyük ölçüde numune özelliklerini etkilemiştir. $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ kür sıcaklığında 30 dakika süre ve $5\text{ }^{\circ}\text{C/dakika}$ ısıtma hızıyla numune içeriği $\%7,5$ uçucu kül ve sodyum silikatın modülü 1,8 olarak sabitlendiğinde, ısı iletim katsayısı $48,8\text{ mW/mK}$, yoğunluk 97 kg/m^3 ve basınç dayanımı $0,44\text{ MPa}$ olarak ölçülmüştür (Li, Y. ve diğerleri, 2015).

2.6.3. Geopolimer malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Yapı sektöründe farklı amaçlar için kullanılan geopolimer malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, malzemelerin geniş yelpazede kullanımı için önemli bir yere sahiptir. Davidovits ve Orlinski çalışmalarında geopolimer, zeolit malzemelere benzer sentezlere sahip olsa da oluşan ürünler farklı yapıda ve kompozisyonda olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte geopolimer ürünler stoikiometrik olmayan bileşikler ve yarı-kristal veya kristal Al-Si içeren amorf yapıları ürünlerdir. Ek olarak, geopolimerizasyon sürecinin egzotermik reaksiyon olduğunu belirtmişlerdir (Davidovits ve Orlinski, 1988).

Cheng ve Chiu granüle yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer malzemenin üretilmesinde aktif dolgu maddesi olarak kullanılması ve yangın direncini incelemişlerdir. Karışım hazırlanırken metakaolin ve potasyum hidroksit 10 dakika boyunca karıştırılmış, daha sonra sodyum silikat çözeltisi ve granüle yüksek fırın cürufu karışıma ilave edilmiştir. Kalıplanan numunelere 3 saat için $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ etüv fırında kür uygulanmış ve daha sonra 21 saat oda koşullarında bekletilmiştir. Elde edilen deneyler sonucunda geopolimerizasyon sürecinin

sıcaklık, potasyum oksit derişimi, metakaolin ve sodyum silikat eklenmesiyle iyi bir ilişkisi olduğu görülmüştür. Geopolimer malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri, alkali  z ltnin derişimi ve eklenen metakaolin miktarı ile de iyi bir ilişki olduğunu göstermiştir. Numuneler arasında en yüksek basıncı dayanımı 79 MPa olarak ölçülmüştür. Yangın direnci testleri için 10mm kalınlıktaki geopolimer panel 1100  C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Testten 35 dakika sonra panelin sıcaklığının 350  C'den az olduğu tespit edilmiştir. Son olarak elde edilen bu ürünün yapı sektöründe kullanılabilecek potansiyelde bir malzeme olduğu tespit edilmiştir (Cheng ve Chiu, 2003).

Ramasamy ve diğerleri, çalışmalarında kaolin esaslı geopolimer malzemeler üzerine yapılmış son çalışmaları incelemişlerdir. Kaolin esaslı geopolimer malzemelerin, inorganik polimerler olduğu ayrıca alümina-silikat malzemelerin mekanik özellikleri örneğin yangın direnci, zayıf elektrik iletkenliği, kimyasal olarak yüksek PH ortamda aşındırıcı olmayan, düşük enerji tüketimi, düşük geçirgenlik ve düşük CO₂ emilimiyle daha iyi malzeme olacağını tespit etmişlerdir (Ramasamy ve diğerleri, 2015).

Rangan uçucu kül esaslı betonları araştırmıştır. Test sonuçları taze ve sertleşmiş beton özelliklerini etkileyen önemli faktörleri belirlemek için kullanılmıştır. Düşük kalsiyumlu uçucu kül, ana malzeme olarak geleneksel Portland  imentosunun yerine kullanılmıştır. Düşük kalsiyumlu uçucu kül esaslı geopolimer betonun m kemmek basıncı dayanımına sahip olduğunu ve yapısal uygulamalar için uygun olduğunu belirtmiştir. Kür sıcaklığı ve süresinin artması, düşük kalsiyum esaslı geopolimer beton da m kemmek direnç, iyi asit direnci, düşük sürtünme, sülfata karşı çok iyi direnç ve çok az kuruma küçülmesi gösterdiği tespit edilmiştir (Rangan, 2010).

Kawade ve diğerleri, uçucu kül esaslı geopolimer betonları araştırmışlardır. Uçucu kül ve alkali aktivatörün geopolimerizasyon reaksiyonu ile alümina-silikat jel oluşmaktadır. Alkali aktivatör karışımında NaOH/Na₂SiO₃ ağrılık a 2,5 oranında kullanılmıştır. Karışımda NaOH 12, 14 ve 16 M kullanılmıştır. Test sonuçları, basıncı dayanımının derişim arttıkça arttırdığını göstermiştir. Mevcut beton, kaynak malzemeleri ile karşılaştırıldığında, uçucu külün avantajlı bir malzeme olduğu fakat dayanıma ve dayanıklılık testlerine tabii olması ve onaylanması gerektiği belirtilmiştir (Kawade, Salunkhe ve Kurhade, 2014).

Fitzpatric ve diğeri, geopolimer malzemelerin dayanıklılığının olması ve geleneksel portland çimentosuna göre çevreye verilen zararlı etkileri azaltması gibi avantajlara sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bu olumlu özelliklerle birlikte geopolimer esaslı malzemelerin yaygın olarak kullanılmasının önünde ufak engeller bulunmaktadır. Birinci olarak, alkali terimi geleneksel Portland çimentosunda çatlaklara neden olduğu için sınırlandırılması gereken bir terim olarak bilinmektedir. Diğer bir engel de yapı sektörüne tanıtılması için geopolimer malzemelerle ilgili standartların bulunmamasıdır. Son olarak, geopolimer hakkındaki bilgi ve birikimin, tüm mekanik ve ekonomik ihtiyaçların karşılaması için genişletilmesi gerekmektedir. Geopolimer, bir alümina-silikat karışımı ve bir alkali çözeltisi karıştırılarak hazırlanırken, alümin-silikat karışımının nasıl oluşturulacağını ve çözeltinin ne kadar alkalın olması gerektiğini bilmek çok önemlidir (Fitzpatrick-Schmidt, Horsley, Tsaknopoulos ve Zhang, 2015).

Sonuç olarak, yapı sektöründe kullanılmak üzere ısı yalıtım paneli seçerken bazı faktörlerin göz önünde bulunması gerekmektedir. Panellerin ısı iletkenlikleri, su buharı difüzyon direnç katsayısı, yangın sınıfı ve toksisite, hacimce su emme, hücre yapısı, ekonomik olması, ısı yalıtım panelinin kullanacağı bölge veya alan, ekolojik ve biyolojik özellikler göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, ısı yalıtım panelinin binaya kolay monte edilmesi, tasarruf sağlaması ve doğal çevreye zarar vermemesi de gerekmektedir. Literatür çalışmaları incelendiğinde ve tüm bu özellikler gözetildiğinde, geliştirilmiş perlitin ısı yalıtım panelinde ana malzeme olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Malzeme

3.1.1. Genleştirilmiş perlit

Türkiye’de genleştirilmiş perlit rezervi bulunan maden ocaklarının konumları araştırılmış ve bu maden ocaklarından genleştirilmiş perlit (GP) temin edilmiştir. Türkiye’de irili ufaklı birçok il ve ilçede olmak üzere yaklaşık 15 bölgede perlit çıkarılmaktadır. Proje kapsamında 4 ayrı bölgeden GP tedarik edilmiştir. Farklı bölgelerden alınan GP numunelerinin ısı iletkenlik değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Granüler ve toz GP ısı karakterizasyon sonuçları

Firma	Isı İletim Katsayısı (mW/m.K)	
	Toz GP	Granüler GP
A	43,58	55,18
B	52,81	59,7
C	45,38	56,28
GENPER	43,16	47,65

Farklı bölgelerden temin edilen GP numuneleri aynı şartlar sağlanarak ısı yalıtım paneli şeklinde kalıplandıklarında, ısı iletim değerlerinin farklı olduğu tespit edilmiştir. Farklı bölgelerden temin edilen GP’nin, genleştirme sıcaklığı, GP tanelerin farklı gözeneklere sahip olması, tane sıkıştırma basıncı, taşların morfolojik yapısı, GP’nin fiziksel ve kimyasal özelliğinin ısı iletkenlik üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle GP en iyi ısı iletkenlik gösteren Kütahya merkezli GENPER firmasından temin edilmiştir. GENPER firmasından alınan granüler (p12mm, p14mm) ve toz (p05mm) GP tanelerinin ısı iletkenlik değerleri Çizelge 3.2’ de verilmiştir. Her ölçüm farklı çuvallardan alınarak elde edilen sonuçları içermektedir.

Çizelge 3.2. Karışımdaki GP numuneleri için ısı iletkenlik değerleri

Ölçüm	Isı iletim katsayısı değeri (mW/m.K)		
	P05 kodlu numune	P12 kodlu numune	P14 kodlu numune
1.ölçüm	43,16	47,65	54,65
2.ölçüm	43,58	48,11	55,12
3.ölçüm	42,25	48,5	54,39
4.ölçüm	43,08	47,36	54,61
5.ölçüm	42,57	48,53	54,22
6.ölçüm	44,01	47,68	54,36
7.ölçüm	43,77	46,73	53,87
8.ölçüm	43,58	48,48	54,67
9.ölçüm	43,88	48,12	56,12
10.ölçüm	43,33	48,66	54,55
Ortalama	43,321	47,982	54,656

Yapılan ölçümlere göre deneylerde en düşük değerleri veren toz (P05mm) ve granüler (P12mm) GP kullanılmıştır. GP'nin tane boyutları esas alınarak karışım oranları hazırlanmıştır. Deneylerde kullanılan, Kütahya ili GENPER fabrikasından alınan granüler ve toz GP numunelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kimyasal bileşimleri Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. GP'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri (GENPER, 2018)

Özellik	Granüler GP	Toz GP
Renk	Beyaz	Beyaz
Sertlik (MOHS Ölçeği)	5.23	5.15
Ph	7.08	7.26
Kuru Birim Hacim Ağırlık, kg/m ³	112.45	51.48
Su Emme, %	66	55
Yapısal Bozulma, °C	900	885
Erime Noktası, °C	1150	1075
Ateşe Dayanım, A1	Yanmaz	Yanmaz
Isı İletim Katsayısı, mW/m.K	47.982	43.321

Çizelge 3.3'de verilen değerler gözetildiğinde, GP'nin granüler ve toz numunelerinde yangın sınıflarının A1, yanmaz sınıf olduğu görülmektedir. GP numunelerinde görülen yapısal bozulma sıcaklıkları granüler ve toz numune için sırasıyla 900 °C ve 885 °C'dir. Bozulma sıcaklıklarının yüksek olması, GP kullanılarak üretilecek yapı veya ısı yalıtım panellerinde oluşacak istenmeyen bir yangın durumunda yapının kararlılığını koruyarak binanın tahliye edilmesini sağlayacak zamanı tanıyacaktır. GP'nin kuru birim hacim ağırlığının düşük olması, GP kullanılarak üretilecek yapı malzemelerinin hafif olmasını ve böylelikle yapının ölü yük ağırlığının azaltılması sağlanabilecektir. Ek olarak, GP'nin granüler ya da toz taneli olması durumuna göre geliştirilen ısı yalıtım panelinin ısı iletim katsayı değeri değişiklik gösterecektir.

Çizelge 3.4. Granüler ve toz GP kimyasal bileşim oranları (GENPER, 2018)

Kimyasal Bileşenler (%)	Granüler GP	Toz GP
SiO ₂	71-74	71-74
Al ₂ O ₃	12-14	12-14
K ₂ O	5-6	5-6
Na ₂ O	3-4	3-4
MgO	0,10-0,20	0,10-0,20
CaO	0,8-1,0	0,8-1,0
Fe ₂ O ₃	0,5-1	0,5-1
TiO ₂	0,009-0,012	0,009-0,012

Çizelge 3.4 incelendiğinde, granüler ve toz GP numunelerinin kimyasal bileşimlerinden özellikle silisyum ve alüminyum değerlerinin yüksek olması numuneye puzolanik özellik kazandırmaktadır.

3.1.2. Geopolimer bağlayıcı

Geopolimer bağlayıcı oluşturmak için deneysel çalışmada sodyum silikat (SS) (Modül 3) ve sodyum hidroksit kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan SS (40-42° Teknik) Aklar Kimya'dan temin edilmiştir. SS'in genel özellikleri Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Sodyum silikatın genel özellikleri (Aklar Kimya, 2018)

Genel özellikler	Sodyum silikat
Fiziki durumu	Sıvı
Görünüm	Uygun değil
pH	11.2
Buhar basıncı	14 mm Hg
Buhar yoğunluğu	0.7
Buharlaşma hızı	> 1
Viskozite	Uygun Değil
Kaynama noktası	100,6 °C
Erime noktası	-0,6 °C
Çözünürlük	Suda Çözünür
Özgül yoğunluk	1.4 g/cm ³

Bağlayıcı karışımı oluşturmak için toz halde ayrıca Aklar Kimya'dan temin edilen sodyum hidroksit kullanılmıştır. Sodyum hidroksitin genel özellikleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. NaOH'un genel özellikleri (Aklar Kimya, 2018)

Özellik	Sodyum Hidroksit
Saflık	%99
Na ₂ CO ₃	%0,3
NaCl	%0,02
Silika	%0,01
Molar kütle	40 g/mol
Erime noktası	324 °C
Kaynama noktası	1390 °C
pH (10 M)	10,05

Çizelge 3.5 ve 3.6 incelendiğinde, GP içerisinde bulunan Al₂O₃ (ağırlıkça %13,23) ve SiO₂ (ağırlıkça %71,58) GP'nin yüksek pH şartlarında alkali hidroksitlerle veya silikatlarla alümina silikat bağlayıcı oluşturmak üzere aktive edilebileceğini göstermektedir. Bu doğrultuda literatür çalışmaları da incelendiğinde, bağlayıcı karışım için genel olarak en iyi ısı iletkenlik değeri ve basınç dayanımına sodyum hidroksit ve sodyum silikat karışımıyla ulaşıldığı tespit edilmiştir. Bu nedenle GP esaslı ısı yalıtım numunesi hazırlanırken, bağlayıcı karışımında sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanımı tercih edilmiştir.

3.1.3. Alçı

Çalışmada ABS Alçı ve Blok Sanayi Anonim Şirketi'nden temin edilen saten perdah alçısı kullanılmıştır. Saten perdah alçısına ait genel özellikler Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Alçının genel özellikleri (ABS Alçı, 2018)

Özellikler	Alçı
Karışım suyu	6.0 lt suya 10 kg alçı
Donma sonu	150 dakika*
Kullanılabilirlik süresi	90 Dakika
Tüketim miktarı (1 mm)	1 kg/m ²
Kuruma süresi	Ortalama 2 gün
Su emme	Ağırlığın %17'si
Yüzey sertliği	50 Shore D
Basınç dayanımı	min. 2,5 N/mm ²
Eğilme dayanımı	min. 1,0 N/mm ²
Isı iletkenliği	0,30 W/mK
Yangına tepki	A1

Çizelge 3.7 incelendiğinde, alçının yangına tepki sınıfının A1, yanmaz olduğu görülmüştür.

3.1.4. Silis dumanı

Deneysel çalışmada ana deneylere ek olarak, silis dumanı (SD) ilavesinin GP esaslı ısı yalıtım malzemesinin basınç, eğilme ve ısı iletkenliğine etkisi incelenmiştir. SD, Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi Tesisleri'nden (A.E.E.İ.) temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan SD'ye ait kimyasal bileşim Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Silis dumanı kimyasal bileşim oranları (Etibank Elektrometalurji İşletmesi, 2018)

Bileşenler	Bileşen Yüzdesi (%)
SiO ₂	91
Al ₂ O ₃	0,58
Fe ₂ O ₃	0,24
CaO	0,71
MgO	0,33
SO ₃	1,06
Cl	0,09
Kızdırma Kaybı	1,84
Tayin Edilemeyen	-

Çizelge 3.8'de kimyasal bileşimi verilen silis dumanının yoğunluğu 2,2 kg/dm³ olarak belirlenmiştir (Etibank Elektrometalurji İşletmesi, 2018).

3.2. Yöntem

GP esaslı ısı yalıtım panelinin karışım çizelgesi oluşturulurken literatür çalışmaları göz önünde bulundurulmuş ve seçilen malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri dikkate alınmıştır.

3.2.1. Agregaların tane büyüklüğü dağılımının tayini

TS EN 933-1 standardına göre, tip deneyi için agregaların tane büyüklüğü dağılımının tayini için kullanılan referans yıkama ve kuru eleme yöntemini içerir. Bu standart, dolgu agregaları hariç olmak üzere, 90 mm'ye kadar anma tane büyüklüğüne sahip hafif agregalar dâhil bütün agregalara uygulanır. GP numunesinin elek analizi yapılması için önce numune sabit kütleye ulaşınca kadar 110±5 °C sıcaklıkta ısıtılarak kurutulur. Soğumaya bırakılarak, tartılır ve ağırlığı m₁ olarak kaydedilir. Daha sonra numune bulunan toz ve diğer malzemelerin giderilmesi için numune su içinde 24 saat bekletilir ve kalan malzeme 110±5 °C'de sabit

kütleye ulaşıncaya kadar kurutulur, 0,0063 mm elek üzerinde kalan numune tartılır ve m_2 olarak kaydedilir. Daha sonra elek analizi yapılacak numune için belirlenen elek analizi boyutları büyük olandan küçük olana kadar sıralanmıştır ve mekanik olarak sallanmıştır. Sonuçlar tablo haline getirilmiş ve GP'in granüler ve toz taneli olmak üzere elek analizi grafiği oluşturulmuştur.

Elekten geçen ince tanelerin yüzdesi (f), aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$f = ((m_1 - m_2) + P)/m_1 \times 100 \quad (3.1)$$

Burada,

m_1 ; Deney numunesi kısmının kuru kütlesi, kg

m_2 ; 0,0063 mm göz açıklıklı elek üzerinde tutulan numune kuru kütlesi, kg

P; Tavada kalan elenmiş malzeme kütlesi, kg olarak belirlenmiştir.

Kuru eleme (f), aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$f = (100 \times P)/m_1 \quad (3.2)$$

3.2.2. Agregaların gevşek yığın yoğunluğunun ve boşluk hacminin tayini

TS EN 1097-3 standardına göre, 63 mm tane büyüklüğüne kadar kuru agregaların gevşek yığın yoğunluğunun ve boşluk hacminin belirlenmesi için deney metodunu içerir. GP numunesinin gevşek yığın yoğunluğunun ve boşluk hacminin tayinin yapılması için 3 deney numunesi alınmıştır. Alınan numune 110 ± 5 °C'de sabit kütleye kadar kurutulmalıdır. İlk olarak boş, kuru ve temiz ölçü kabı tartılır (m_1). Boş ölçü kabına numune eklenir ve tartılır (m_2). Deney üç kere tekrarlanmalıdır.

Gevşek yığın yoğunluğu ρ_b , her deney numunesi için aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$\rho_b = (m_2 - m_1)/V \quad (3.3)$$

Burada;

ρ_b : Gerçek yığın yoğunluğu, Mg/m³

m_2 : Ölçü kabı ve deney numunesinin kütlesi, kg

m_1 : Boş ölçü kabı kütlesi, kg

V : Ölçü kabının hacmi, L olarak belirlenmiştir.

Boşluk yüzdesi v , ölçü kabındaki boşlukların hacimsel oranı olup aşağıdaki eşitlikle hesaplanır;

$$v = (\rho_p - \rho_b) / \rho_b \times 100 \quad (3.4)$$

Burada;

v : Boşluk yüzdesi

ρ_b : Gevşek yığın yoğunluk, Mg/m^3

ρ_p : Aynı laboratuvar numunesinden alınan bir deney kısmında prEN 1097 – 6'e göre belirlenen etüvde kurutulmuş tane yoğunluğu Mg/m^3 olarak belirlenmiştir.

3.2.3. Isı yalıtım panelinin hazırlanması

GP esaslı ısı yalıtım numunesi hazırlanırken, öncelikle kuru karışım hazırlanmıştır. Kuru karışımda granüler ve toz taneli GP ve alçı kullanılmıştır. Granüler ve toz GP'nin ısı iletkenlik değerlerinin belirlenmesi amacıyla tedarik edilen GP numunesi için karbonlu XPS panelinin içi 235*230*46 mm boyutlarında oyularak, oyulan kısmın altına, tutucu kâğıt geçirilmiştir. Oyuk kısmın içine 300g numune eklenmiş ve 72,5 N kuvvet ile presleme yapılmıştır. Granüler ve toz GP taneciklerinin ısı iletkenlik değeri Resim 3.1'deki LINSEIS HFM300 ısı iletim katsayısı ölçüm cihazı kullanılarak ölçülmüştür.



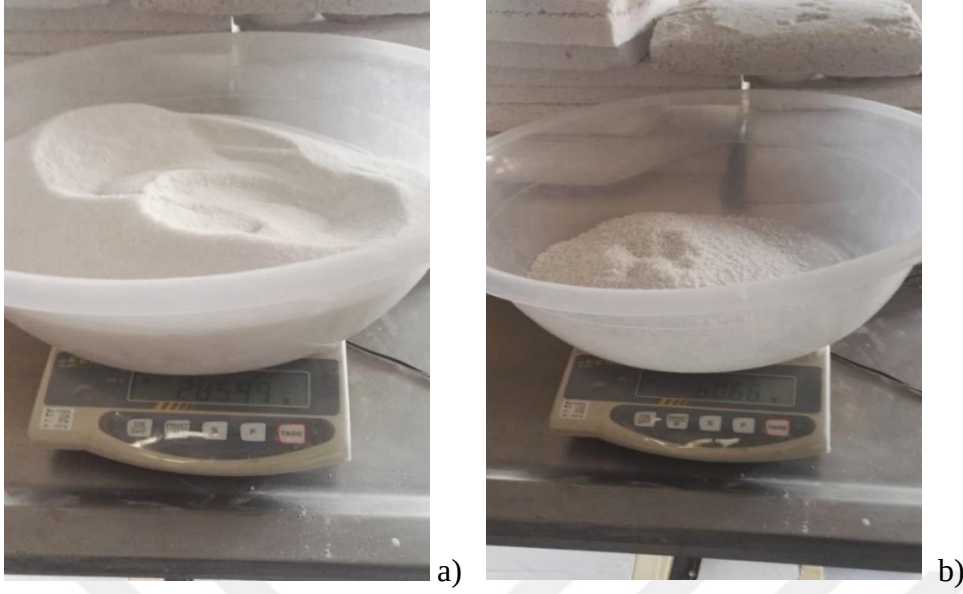
Resim 3.1. LINSEIS HFM300 ısı iletim katsayısı ölçüm cihazı

Ayrıca, Resim 3.2.'de gösterilen sıcak disk (Hot Disk) yöntemi ile ölçüm yapan TPS 500S cihazıyla aynı numuneler ölçülmüştür.



Resim 3.2. TPS 500S ısı iletim katsayısı ölçüm cihazı

Yapılan ölçümlerde sonuçların değişmediği görüldüğü için ölçümlere Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarında bulunan LINSEIS HFM300 marka cihazla devam edilmiştir. Deneysel çalışmalara başlamadan, ön bir çalışma planlanmıştır. Ön çalışma sonuçlarına göre, toz GP'nin ısı iletkenliği granüler GP'den daha düşük olduğu için kuru karışım hazırlanırken granüler:toz GP, 1:5, 2:4, 3:3 ve 4:2 oranında kullanılmıştır. Her bir numune için granüler ve toz taneli olmak üzere toplam 6 litre GP kullanılmıştır. Resim 3.3'de karışımda kullanılmış granüler ve toz GP gösterilmiştir.



Resim 3.3. a. Toz GP b. Granüler GP

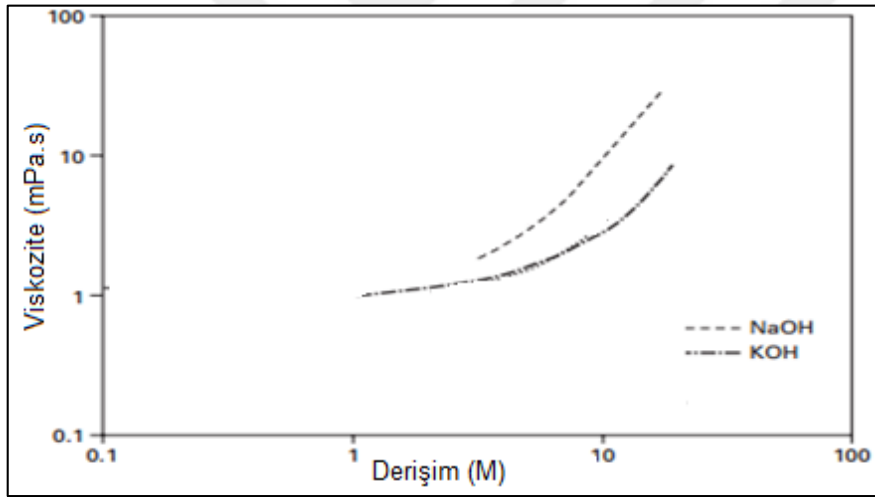
Granüler ve toz GP karıştırıldıktan sonra, kuru karışımın hazırlanması için Resim 3.4’de görülen alçı, GP karışımına ilave edilmiştir. Alçı miktarı her bir numene için ağırlıkça GP miktarının 1:6’sı olacak şekilde ilave edilmiştir. Alçı literatür çalışmaları da göz önüne alındığında, panel dış yüzey sertliğinin arttırılması için karışıma eklenmiştir. Alçının ilave edilmesiyle kuru karışım elde edilmiştir.



Resim 3.4. Alçı

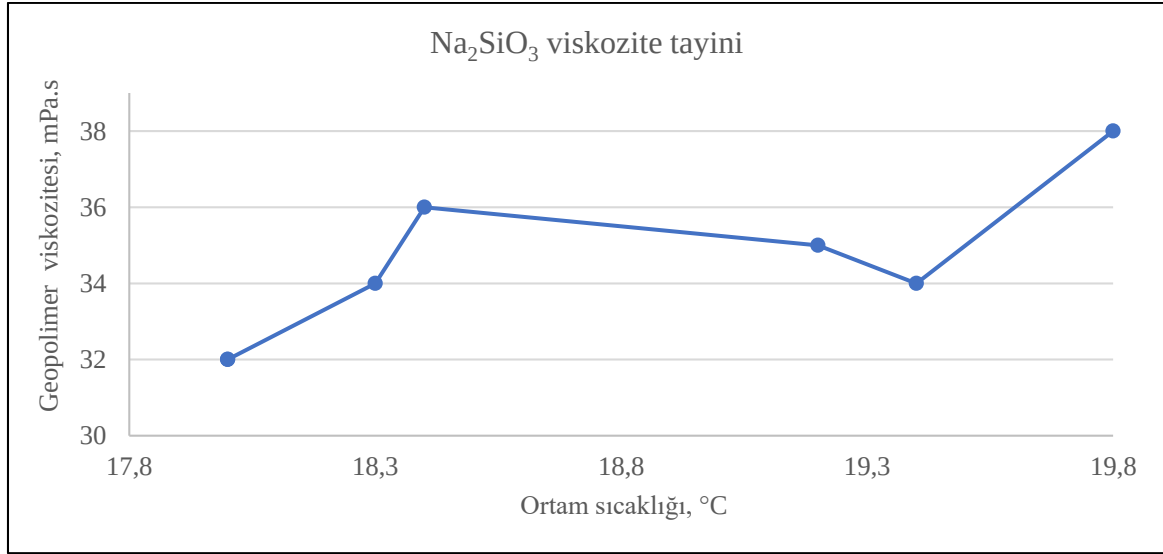
Kuru karışım hazırlanmasıyla birlikte, karışımda kullanılmak üzere ağırlıkça toplam GP miktarının 1:1,2 miktarında su kullanılmıştır. Bu miktara ek olarak, her 100 gram alçı ilavesi için alçı miktarının ağırlıkça %5-7 arasında su, karışım suyuna ilave edilmiştir. Bir numune hazırlanması için gereken toplam karışım suyu miktarı GP karışımı için belirlenen su ve alçı için belirlenen suyun toplamıdır.

Kuru karışım miktarı ve su miktarının belirlenmesiyle GP parçacıklarının bağlanması için kullanılan geopolimer bağlayıcı hazırlanmıştır. Bağlayıcı çeşitleri arasında kullanım şartları, deney prosedürü, ısı iletkenlik ve pH değerleri göz önüne alınarak ilk aşamada GP'yi bağlamak için sodyum/kalsiyum-silikat esaslı bağlayıcılar tercih edilmiştir. Bağlayıcı karışımda viskozitenin düşük olması bağlayıcının etkinliği için önemlidir (Davidovits, 1988).



Şekil 3.1. Alkali hidroksit değişimi – viskozite

Resim 3.5 dikkate alındığında uygun viskozite değeri için sodyum hidroksit derişim değeri 6-12 M arasında saf su ile hazırlanarak en uygun bağlayıcı karışımın belirlenmesi için bağlayıcının viskozite ölçüm deneyi (Resim 3.6) Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümünde laboratuvar tipi HS-100D cihazı kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca, bu bağlayıcıların en önemli özelliği olan silikat modülü $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranıyla tespit edilmiştir.



Şekil 3.2. Na₂SiO₃ viskozite tayini

Molarite (derişim), bir litre çözeltide çözünmüş halde bulunan maddenin mol sayısıdır. 1 mol sodyum hidroksitin molekül ağırlığı 39,9971 g/mol'dur. Bağlayıcı karışımın oluşturulması için hazırlanmış sodyum hidroksit çözeltisine sodyum silikat çözeltisi eklenmiştir. Geopolimer bağlayıcı olarak kullanılan sodyum silikat ve sodyum hidroksit, GP'yi bağlamak için en uygun sodyum silikat oranının belirlenmesi amacıyla ağırlıkça Na₂SiO₃/NaOH 1, 1,5, 2 ve 2,5 oranlarında kullanılmıştır.

Çalışmalar dikkate alındığında, bağlayıcı karışımının hazırlanmasında iki yöntem kullanıldığı tespit edilmiştir. İlk yöntem sodyum silikat ve sodyum hidroksitin karıştırıldıktan sonra bekletilmeden kuru karışıma ilave edilmesidir. Diğer yöntem ise sodyum silikat ve sodyum hidroksitin karıştırıldıktan sonra karışımın 24 saat oda sıcaklığında bekletilmesidir. Ön çalışmalara göre, Çizelge 3.9'dan anlaşılabacağı üzere beklenilmeden hazırlanan numunenin ısı iletkenlik değeri diğer karışım türüne göre daha düşük olduğu için geopolimer bağlayıcı karışıma bekletilmeden ilave edilmiştir.

Çizelge 3.9. Karışım süresinin ısı iletkenliğe etkisi

Karışım Süresi	Toplam Perlit Miktarı (g)	NaOH (M)	NaOH (g)	Na ₂ SiO ₃ /NaOH	Na ₂ SiO ₃ (g)	Toplam Karışım (g)	Isı İletim Katsayısı (mW/m.K)
24 saat beklenen karışım	393	10	159.78	1	159.78	1400	55,21
Beklenmeyen karışım	393	10	159.78	1	159.78	1400	53,80

Bu veriden hareketle, Resim 3.6'da sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltilerinin eklenmesiyle hazırlanan sıvı karışım gösterilmiştir. Geopolimer bağlayıcı karışım hazırlanırken, ilk olarak sodyum hidroksit çözeltisi, daha sonra sodyum silikat karışıma eklenmiştir. Hazırlanan karışımın homojen elde edilebilmesi için mekanik karıştırıcı 400rpm'de 10 dakika boyunca çalıştırılmıştır.



Resim 3.5. Geopolimer bağlayıcının hazırlanması

Geopolimer bağlayıcı karışım, kuru karışıma ilave edilerek harç hazırlanmış ve karışım elle karıştırılmıştır. Deneysel çalışmada tüm harç karışımlarının homojen olabilmesi için tüm karışımlar 20 dakika boyunca GP taneciklerine zarar vermeyecek şekilde elle karıştırılmıştır. Karıştırma işleminin tamamlanmasıyla elde edilen harç karışımı Resim 3.7'de gösterilmiştir.



Resim 3.6. Hazırlanan harç karışımı

Harç, oda koşullarında 1 saat dinlenmeye bırakılmıştır. 1 saat süre sonunda hazırlanan harç karışımı Resim 3.8'deki 300*300*50 mm tahta kalıplara 3 bölümde dolacak şekilde dökülmüştür.



Resim 3.7. Kalıplanan panel

Kalıplara numunenin doldurulmasından sonra, Resim 3.9'daki pres makinasıyla 1000N/300*300 mm² kuvvet uygulanmıştır.



Resim 3.8. Hidrolik pres makinesi (± 10 N hassasiyetli)

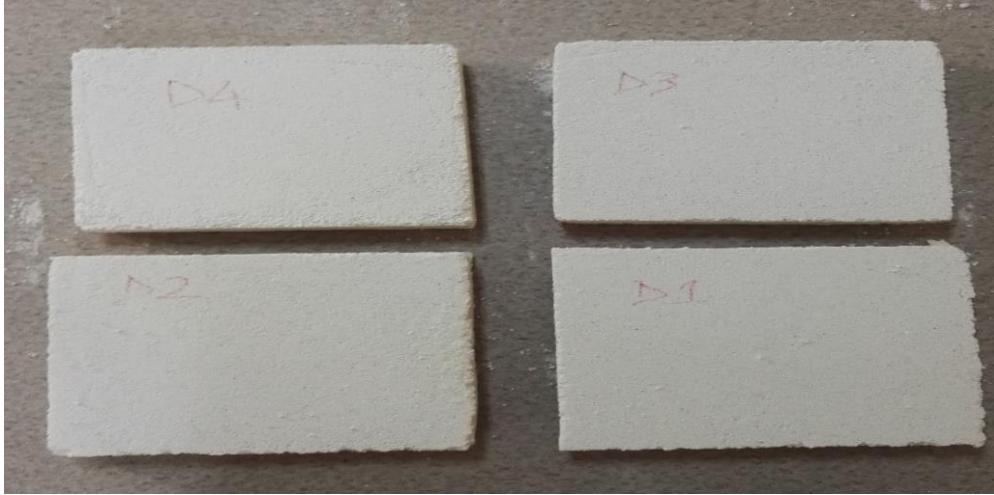
Kalıplama aşamasının tamamlanmasıyla birlikte, literatürde uygulanan kür sıcaklık değerleri incelenmiştir. Literatürde genellikle kür sıcaklığı 60 °C ve 105 °C olarak uygulanmaktadır. Ön numune denemelerinde GP esaslı ısı yalıtım numunelerine 105 °C'de kür uygulandığında, numunelerde çatlama ve kırılma gözlemlendiğinden kür sıcaklığı 60 °C olarak belirlenmiştir. Ek olarak, geopolimer sürecinin devam edebilmesi için numuneler 48 saat boyunca oda koşullarında bırakılmıştır. 48 saat sonunda numunelerde görülen ağırlık kayıpları tespit edilmesiyle numuneler 48 saat boyunca Resim 3.10'da görülen 60 °C sıcaklığındaki etüv fırında tutulmuştur. Numuneler etüv fırında bekletilirken fırın sıcaklığının etkili bir şekilde yüzeyden içeriye iletilmesi için numuneler dikey doğrultuda yerleştirilmiştir. 48 saat sonunda numunelerin 60 °C sıcaklık altındaki ağırlık kaybı, panel genişliği, panel uzunluğu, panel kalınlığı, numune hacim ve yoğunluk değerleri belirlenmiştir.



Resim 3.9. Kür işlemi yapılan paneller

3.2.4. GP esaslı ısı yalıtım panellerinin gruplandırılması

GP esaslı ısı yalıtım numuneleri 4 grupta incelenmiştir. Kür işleminin tamamlanmasından sonra numuneler kalıptan çıkarılmış ve numuneler karışım çizelgesinde olduğu şekliyle Resim 3.11'deki gibi gruplandırılmıştır.



Resim 3.10. Gruplanan paneller

Deney numunelerine A, B, C ve D etiket ismi verilmiştir. Her bir grup için 16 numune hazırlanmış ve test edilmiştir. Grup harfi ve numune sayısına göre numuneler A1, B5, C10 ve D16 gibi sıralanmıştır. A grubu 6M sodyum hidroksit, B grubu 8M sodyum hidroksit, C grubu 10M sodyum hidroksit ve D grubu 12M sodyum hidroksit kullanılarak üretilmiştir. Tüm A, B, C ve D gruplarında $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 1:1, 1,5:1, 2:1 ve 2,5:1 oranında kullanılmıştır. Ayrıca, en uygun GP oranının belirlenmesi için 4 farklı karışım grubu, 4:2, 3:3, 2:4 ve 1:5 granüler:toz perlit içerecek şekilde kullanılmıştır. Her bir numune için 6 litre GP kullanılacak şekilde harç hazırlanmıştır. GP esaslı ısı yalıtım paneli numuneleri kalıptan çıkarıldıktan sonra, panelin mekanik, fiziksel özellikleri ve ısı iletkenliklerinin belirlenmesi için Türk Standartları göz önüne alınarak testler gerçekleştirilmiştir.

3.2.5. Isı yalıtım panellerinde görünür yoğunluk tayini

TS EN 1602 standardına göre, referans koşullar altında görünür yoğunluğu ve görünür öz yoğunluğunu belirlemek için kullanılan ekipman ve prosedürleri içerir. Tam boyutlu ısı yalıtım ürünleri ve test numuneleri için geçerlidir. Bu standart, çok tabakalı ürünlerin katmanlarına da uygulanabilmektedir. Deneysel ölçümler, numuneler $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ ve $(50 \pm 5)\%$ bağıl nem koşullarındayken gerçekleştirilmiştir. TS EN 822 ve 823 standartlarına göre numunenin panel kalınlığı ve boyutları belirlendikten sonra bu ölçümlere dayalı olarak hacim hesaplanmıştır. Numunelerin ağırlığı (m) %0,5 doğrulukta ölçüm yapan hassas terazide ölçülmüştür.

Görünür yoğunluk tayini ρ , her deney numunesi için aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$V = (\text{Panel Kalınlığı}) * (\text{Panel Genişliği}) * (\text{Panel Uzunluğu}) \quad (3.5)$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.6)$$

Burada;

m ; numune ağırlığı, kg

V ; numunenin hesaplanan hacmi, m^3

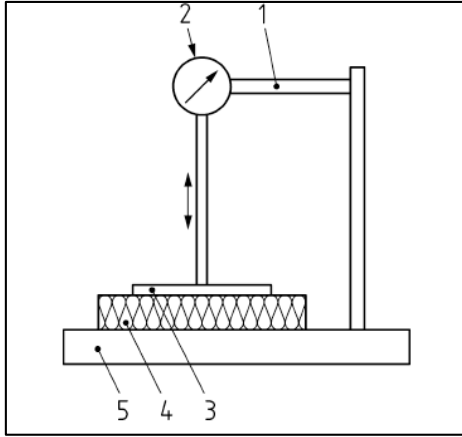
ρ ; numunenin görünür yoğunluğu, kg/m^3 olarak belirlenmektedir.

3.2.6. Isı yalıtım panellerinde uzunluk ve genişlik tayini

TS EN 822 standardına göre, tam boyutlu ürünlerin uzunluğunu ve genişliğini belirlemek için kullanılan ekipman ve prosedürleri içerir. Bu standart, ısı yalıtım panelleri için geçerlidir. GP esaslı ısı yalıtım panelinin uzunluk ve genişlik tayinini yapabilmek için öncelikle test numuneleri $(23 \pm 5) ^\circ C$ 'de en az 6 saat süreyle saklanmalıdır. Uzunluk ve genişlik boyutunu tayin edebilmek için 1,5 metreden küçük olan numuneler seçilmektedir.

3.2.7. Isı yalıtım panellerinde kalınlık tayini

TS EN 823 standardına göre, ısı yalıtım panelleri için tam boyutlu ürünlerin kalınlığının belirlenmesine yönelik ekipman ve prosedürleri içerir. GP esaslı ısı yalıtım panelinin kalınlık tayinini yapabilmek için öncelikle test numuneleri $(23 \pm 5) ^\circ C$ 'de en az 6 saat süreyle saklanmalıdır. Kalınlığı ölçülecek numuneye Resim 3.12'deki gibi 50 Pa veya 250 Pa değerinde basınç uygulanarak panelin kalınlığının doğru ölçülmesi sağlanacaktır. LINSEIS HFM300 ısı iletim katsayısı ölçüm cihazı ile panel kalınlığının ortalama değeri tespit edildiği için bu değerler dikkate alınmıştır.



Resim 3.11. Deney düzeneği

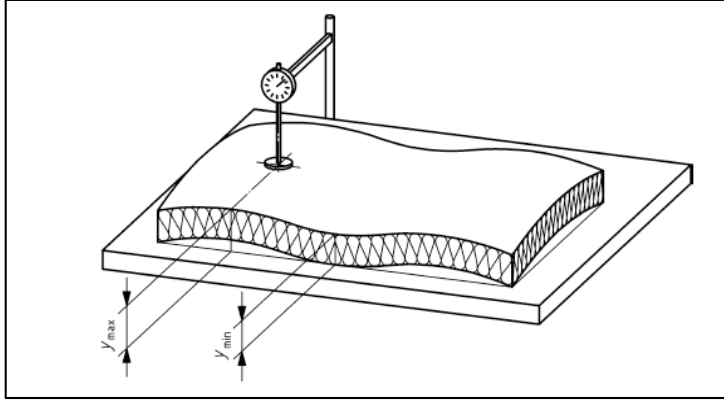
Şekilde;

- 1: Rijit Çerçeve
- 2: Kadran göstergesi
- 3: Kare basınç plakası
- 4: Numune
- 5: Düz rijit alt plaka olarak belirlenmektedir.

3.2.8. Isı yalıtım panellerinde yüzey düzlüğünün tayini

TS EN 825 standardına göre, ısı yalıtım panellerinde tam boyutlu ürünler için düzlükten sapmayı belirlemek için gerekli ekipmanı ve prosedürleri içerir. GP esaslı ısı yalıtım panelinin yüzey düzgünlüğü tayinini yapabilmek için öncelikle test numuneleri $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ 'de en az 6 saat süreyle saklanmalıdır. Yüzey düzgünlüğü tayini için test numunesi düz bir yüzeye yerleştirilmelidir. Daha sonra Resim 3.13'deki gibi paneldeki saptmalar belirlenecektir. Paneldeki sapma maksimum saptmadan minimum saptmanın çıkarılmasıyla belirlenmektedir. Sapma mm cinsinden bulunmaktadır.

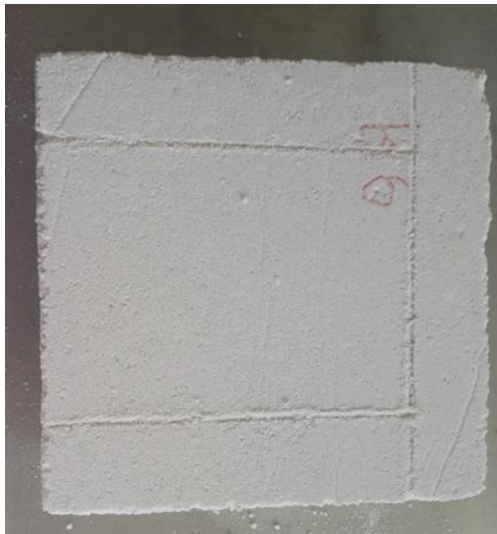
$$S_{\max} = Y_{\max} - Y_{\min} \quad (3.7)$$



Resim 3.12. Deney düzeneği

3.2.9. Isı yalıtım panellerinin basınç altındaki davranışın tayini

TS EN 826 standardına göre, ısı yalıtım mamulü deney numunelerinin basınç altındaki davranışının tayininde kullanılan cihaz ve işlemleri içerir. Standartta verilen yöntem, kalite kontrol amaçları için kullanılabilir. Aynı zamanda güvenlik katsayıları kullanılarak hesaplanabilen tasarım değerlerinden, referans değerleri elde etmek için de kullanılabilir. GP esaslı ısı yalıtım panelinin basınç altındaki davranışının tayini yapabilmek için öncelikle test numuneleri $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ 'de en az 6 saat süreyle saklanmalıdır. GP esaslı ısı yalıtım panelinin TS EN 826 standardına göre basınç altındaki davranışının tayini için Resim 3.14'deki gibi panel 3 parçaya ayrılmıştır. 3 parçaya ayrılan panele eğilme dayanımı testi uygulandıktan sonra 6 parça $4 \times 4 \text{ cm}^2$ boyutunda parçalar elde edilmiştir.



a)



b)

Resim 3.13. a) Panel basınç dayanım testi hazırlığı b) 6 parçaya ayrılan panel

Kesilen parçaların basınç dayanımı, Resim 3.15’de gösterilen Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Beton Laboratuvarında bulunan test cihazıyla ölçülmüştür.



Resim 3.14. Basınç dayanımı ölçüm cihazı

3.2.10. Isı iletim katsayısının ölçülmesi

Kalıptan çıkarılan numunelerin daha sonra ısı iletkenlikleri Şekil 3.1’de gösterilen Hot Disk yöntemiyle belirlenmiştir. Hot Disk yöntemiyle ısı iletkenliğinin belirlenmesi, geleneksel olarak, %2’nin altında küresel ölçüm belirsizliği elde edebilen homojen materyallerin kararlı durumunda termal iletkenlik ölçümü için mutlak yöntem olarak kabul edilmektedir. İlkesi, iki sonsuz izotermal düzlem arasında kalan sonsuz homojen bir levha şeklindeki numuneyle var olan tek yönlü ve sabit ısı akısı yoğunluğunu üretmektir. Çalışma prensibi “tekli numune aparatına” dayanmaktadır.

Hot Disk yönteminin ilkelerinde analiz edilen numune, T_h sıcaklıkta muhafaza edilen elektrikle ısıtılmış bir sıcak plaka ile T_c düşük sıcaklıkta muhafaza edilen bir soğuk plaka arasında sandviç haline getirilir. Sıcak plakadaki Joule efekti tarafından çıkan ısı, numune üzerinden soğuk plakaya, aynı zamanda sıcak plakanın kenarlarında geriye ve yana doğru ilerler. Bu sızıntıları nötralize etmek için sırt ve yan "bekleme bölgeleri" gereklidir. Farklı koruma bölgelerini hassas kontrol ile aynı sıcaklıkta tutarak, istenmeyen tüm termal transferler yok edilir. Sıcak plaka iki bölümden ayrılır: Bilinen alanın bir ısıtıcı bölgesi (veya ölçüm bölgesi) elektrikle ısıtılır ve bitişik bir muhafaza halkası farklı bir devre ile ısıtılır. İki

bölgeyi küçük bir aralıkla ayırır ve bunlar arasında sıcaklık farkını kontrol etmek için çoğu zaman bir termopil kullanılır. Sıcak plakanın arka yüzü, geriye doğru termal akışlardan koruma sağlayan aynı boyutlara sahip ilave bir koruma plakası ile donatılmıştır. Bu arka koruma plakası ayrıca kendi ısıtma sistemine sahiptir ve yanal aralıkta olduğu gibi uygun sıcaklık fark kontrolüyle ilişkilendirilmiştir (Dubois ve Lebeau, 2013).



Şekil 3.3. Hot Plate çalışma prensibi

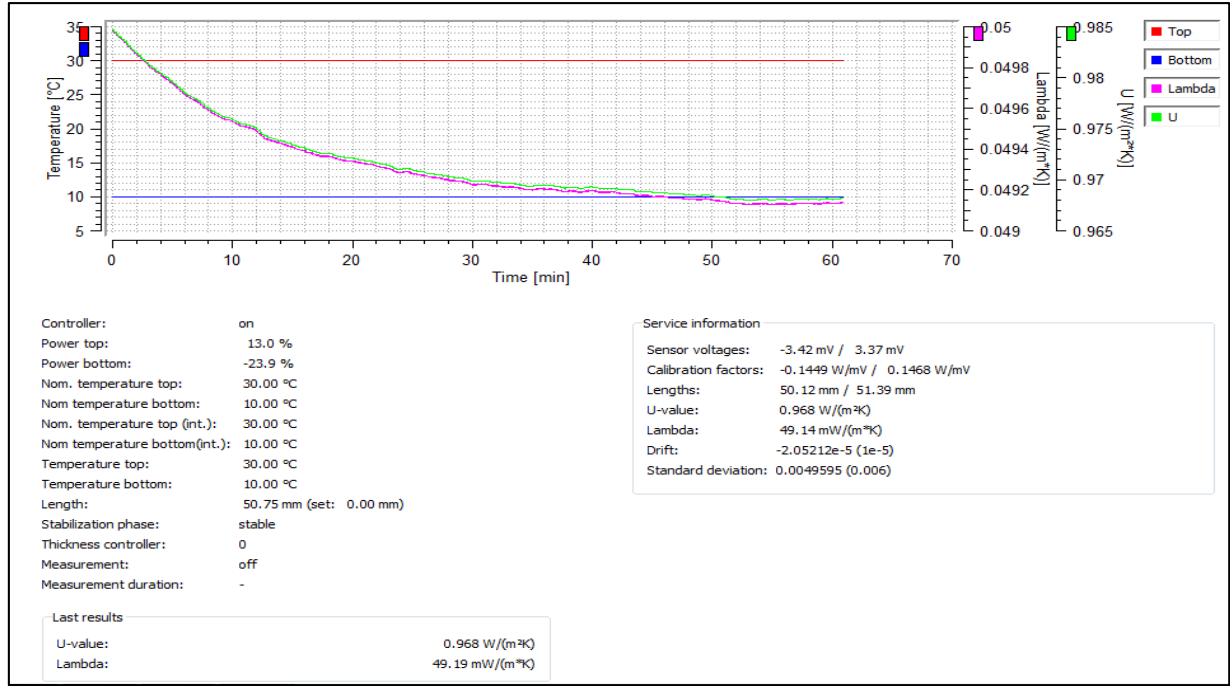
GP esaslı ısı yalıtım panelleri üretildikten sonra numunelere LINSEIS HFM300 ısı iletim katsayısı ölçüm cihazı ile testler yapılmış ve her bir numune için ısıl iletkenlik değeri tespit edilmiştir. Kullanılan LINSEIS HFM300 cihazının teknik özellikleri Çizelge 3.10’da verilmiştir.

Çizelge 3.10. LINSEIS HFM300 cihaz teknik özellikleri

Model Tipi	HFM300/1
Plakaların Sıcaklık Aralığı	0 - 40°C
Soğutma Sistemi	Basınçlı Hava
Plaka Sıcaklık Kontrolü	Peltier
Veri Ölçüm Noktaları	1
Numune Boyutu	305x305x105mm ³
Termal Direnç Ölçüm Aralığı	0,1 - 8.0 m ² K/W
Termal İletkenlik Ölçüm Aralığı	0,001 - 2.5 W/m.K
Tekrarlanabilirlik	0.25%
Doğruluk	+/- 1 - 3%
Değişken Temas Basıncı	0.25kPa

LINSEIS Isı Akış Ölçer, düşük ısı iletkenliğine sahip yalıtım panellerinin yanı sıra tüm diğer panellerdeki ısı iletkenlik özelliklerini yüksek düzeyde doğrulukla belirlemek için hızlı ve kullanımı kolay bir donanım sağlamaktadır. Cihaz, ASTM C518, JIS A1412, ISO 8301 ve DIN 12667 standartları uyarınca tasarlanmıştır.

Ölçüm prensibi, sıcak ve soğuk bir plaka arasında bir numuneyi yerleştirmek ve ısı akışını ölçmektir (LINSEIS Thermal Analysis, 2018). Isıl iletkenlik deneyleri tamamlanırken üst plaka 30 °C ve alt plaka 10 °C’de çalıştırılmaktadır. Numune cihaz içinde plakalar arasına yerleştirildikten sonra numunenin ısı iletkenliği ölçülmektedir. Isıl iletkenliği belirlenen numunelerin test sonucu Resim 3.17’deki gibi olmaktadır.

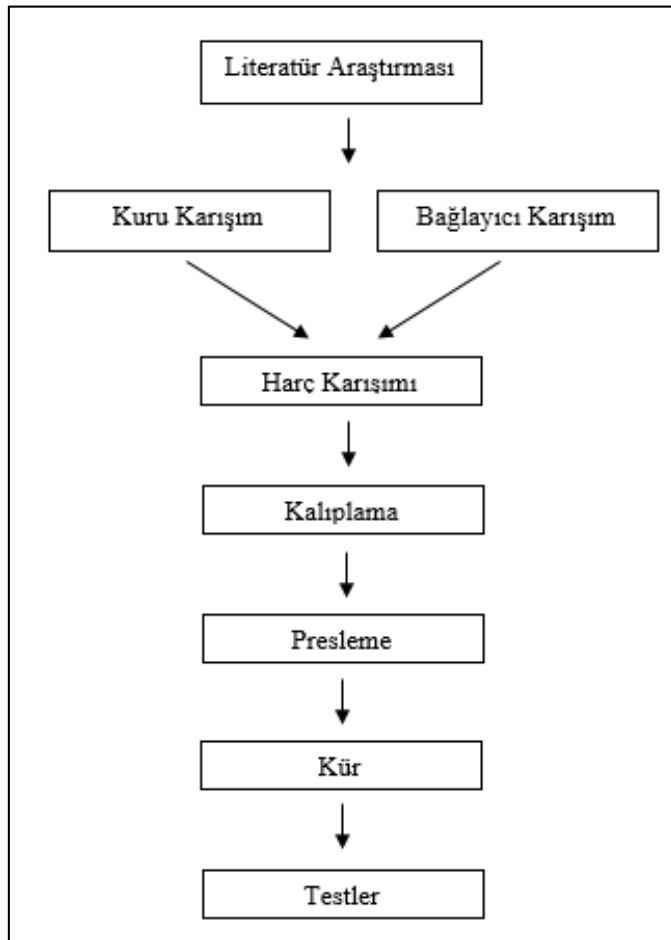


Resim 3.15. LINSEIS HFM300 cihazında ölçümü tamamlanan panelin test sonucu



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Literatür çalışmalarından hareketle belirlenen yöntemler tez çalışmasında Şekil 4.1'deki gösterilen aşamalar izlenerek GP esaslı ısı yalıtım numuneleri hazırlanmış ve sonrasında deneysel işlemler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda hazırlanan numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri tespit edilmiş ve bu bölümde verilmiştir.



Şekil 4.1. Tez çalışması akış şeması

4.1. GP Esaslı Isı Yalıtım Panelinin Numune Özelliklerinin Belirlenmesi

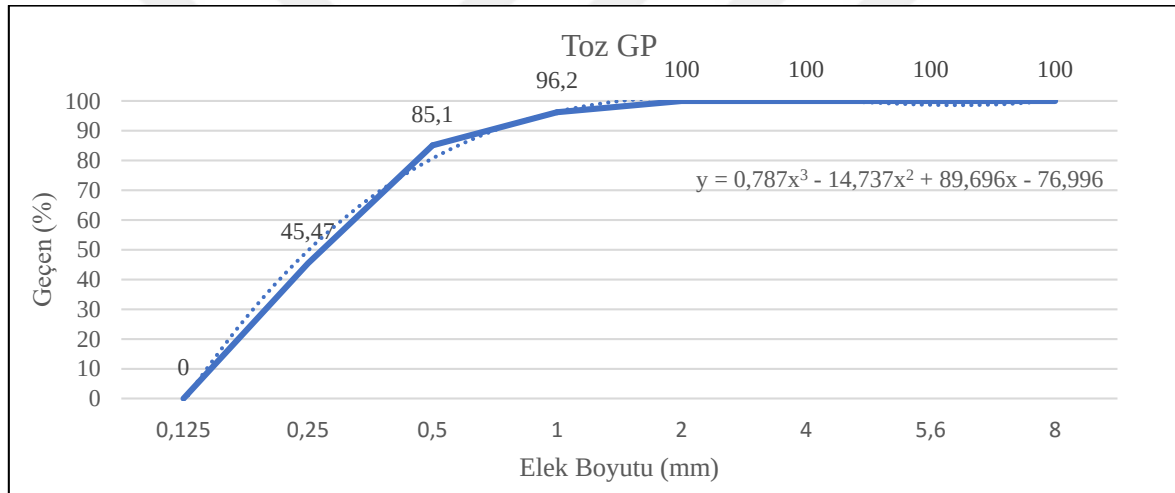
4.1.1. Tane büyüklüğü dağılımının tayini

Deneylerde kullanılmak üzere temin edilen toz GP için yapılan tane büyüklüğü tayininin sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Toz GP elek analizi sonuçları

Elek Boyutu	Elekte Kalan Miktar	Kalan Miktarın Yüzdelik Oranı	Kümülatif Kalan Miktar	Yüzdelik Geçen Miktar
8	00	0	0	100
5,6	0	0	0	100
4	0	0	0	100
2	0	0	0	100
1	4,50	3,83	3,83	96,2
0,5	13	11,1	14,93	85,1
0,25	46,5	39,6	54,53	45,47
0,125	53,5	45,5	100	0
Toplam	117,5g			

Çizelge 4.1’den elde edilen değerlere göre, toz GP’ye ait gradasyon eğrisi Şekil 4.2’de verilmiştir.



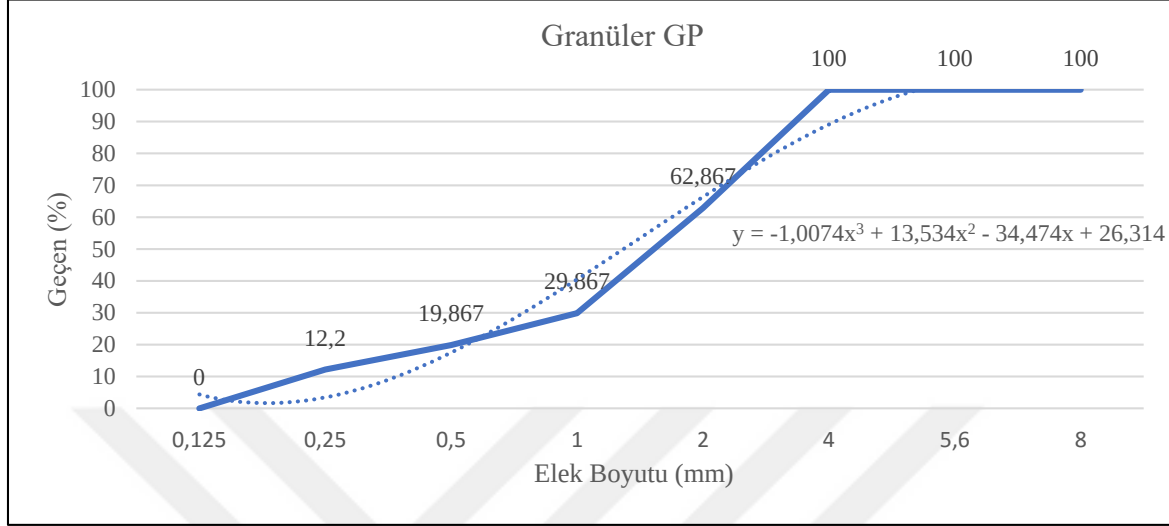
Şekil 4.2. Toz GP gradasyon eğrisi

Deneylerde kullanılmak üzere temin edilen granüler GP için yapılan tane büyüklüğü tayininin sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Granüler GP elek analizi sonuçları

Elek Boyutu	Elekte Kalan Miktar	Kalan Miktarın Yüzdelik Oranı	Kümülatif Kalan Miktar	Yüzdelik Geçen Miktar
8	00	0	0	100
5,6	0	0	0	100
4	0	0	0	100
2	55,70	37,133	37,133	62,867
1	49,50	33	70,133	29,867
0,5	15	10	80,133	19,867
0,25	11,5	7,667	87,8	12,2
0,125	18,5	12,333	100	0
TOPLAM	150g			

Çizelge 4.2’den elde edilen değerlere göre, granüler GP’ye ait gradasyon eğrisi Şekil 4.3’de verilmiştir.



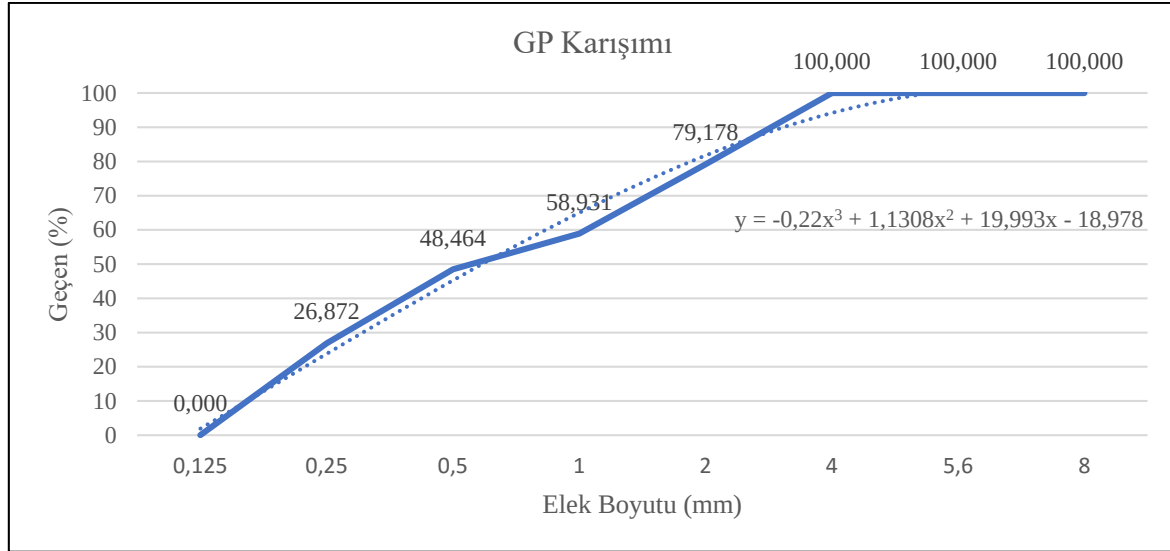
Şekil 4.3. Granüler GP gradasyon eğrisi

Şekil 4.2 ve 4.3’den de anlaşıldığı üzere, granüler ve toz GP tanecikleri çok ince yapılı malzemeler olmakla birlikte, en iri taneli GP taneciği en fazla 4 mm elek boyutu kadardır. Bu nedenlerle GP malzemesinin granüler ve toz boyutunda hafif yapı malzemesi olarak kullanımı uygundur. Bu verilere ek olarak, granüler ve toz GP’den oluşan karışıma ait yapılan tane büyüklüğü tayininin sonuçları Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. GP karışımı elek analizi sonuçları

Elek Boyutu	Elekte Kalan Miktar	Kalan Miktarın Yüzdelik Oranı	Kümülatif Kalan Miktar	Yüzdelik Geçen Miktar
8	0	0	0	100
5,6	0	0	0	100
4	0	0	0	100
2	55,70	20,822	20,822	79,178
1	54,00	20,187	41,069	58,931
0,5	28	10,467	51,536	48,464
0,25	58	21,682	73,218	26,782
0,125	71,80	26,841	100	0
TOPLAM	267,5g			

Çizelge 4.3’den elde edilen değerlere göre granüler ve toz GP’den oluşan karışıma ait gradasyon eğrisi Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.4. GP karışımı gradasyon eğrisi

4.1.2. Gevşek yığın yoğunluğunun ve boşluk hacminin tayini

Taş ve toz GP taneciklerine ait gevşek yığın yoğunluğu ve boşluk hacminin tayini testinin sonuçları Çizelge 4.4’de verilmiştir. Hacim, 1 dm³ olarak alınmıştır.

Çizelge 4.4. Gevşek yığın yoğunluğunun tayin sonuçları

Değer	Örnek 1		Örnek 2		Örnek 3	
	Toz GP	Granüler GP	Toz GP	Granüler GP	Toz GP	Granüler GP
$m_2 - m_1$	69,50	60	68,5	59	71	60
ρ_b	69,5	60	68,5	59	71	60
Mg/m ³	0,0695	0,06	0,0685	0,059	0,071	0,06
Ortalama ρ_b	0,070	0,060				

Granüler ve toz GP için üç kez tekrarlanan deneyler sonucunda ortalama gevşek yığın yoğunluğu granüler ve toz GP için sırasıyla 0,070 Mg/m³ ve 0,060 Mg/m³ olarak ölçülmüştür. Ayrıca granüler ve toz GP tanelerinin boşluk yüzdeleri Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Boşluk yüzdesi tayin sonuçları

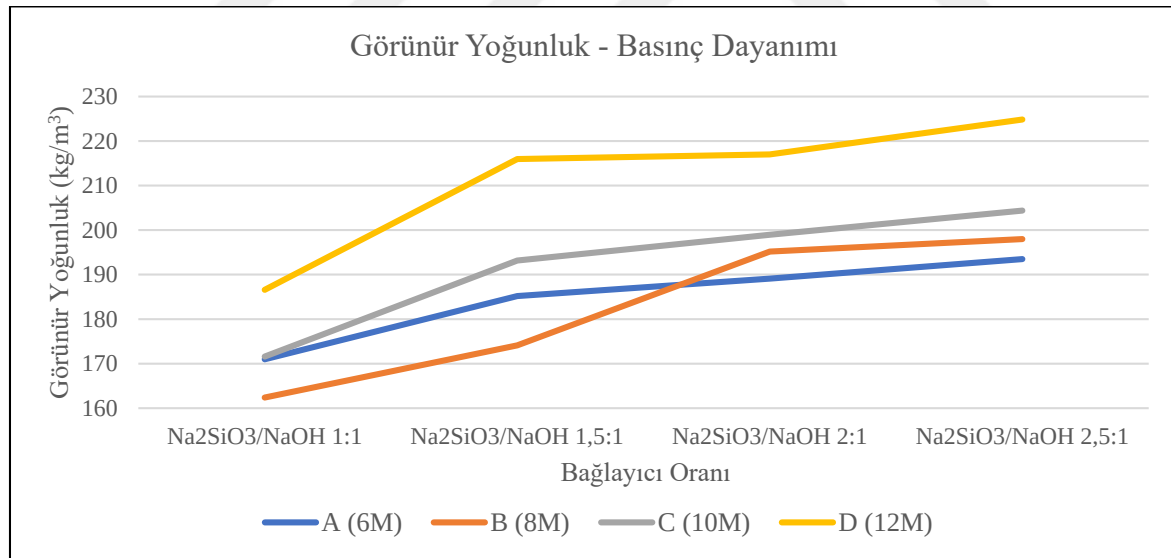
	Boşluk Yüzdesi Tayini	
	Toz GP	Granüler GP
P_p (kuru haldeki tane yoğunluğu)	0,087	0,062
P_b (gevşek yığın yoğunluğu)	0,070	0,060
V	24,303	3,093

Çizelge 4.5’den de görüldüğü üzere, toz GP’nin boşluk yüzdesi %24,303 iken, granüler GP’nin boşluk yüzdesi %3,093 olarak tespit edilmiştir. Isı yalıtım panellerinin düşük ısı iletkenliğe sahip olmasını sağlayan boşluk yüzdeleri olduğu düşünülürse en düşük ısı iletkenlik değerleri içerisinde %24,303 oranında boşluğa sahip toz GP içeren numunelerde görülecektir.

4.1.3. Görünür yoğunluk değerleri

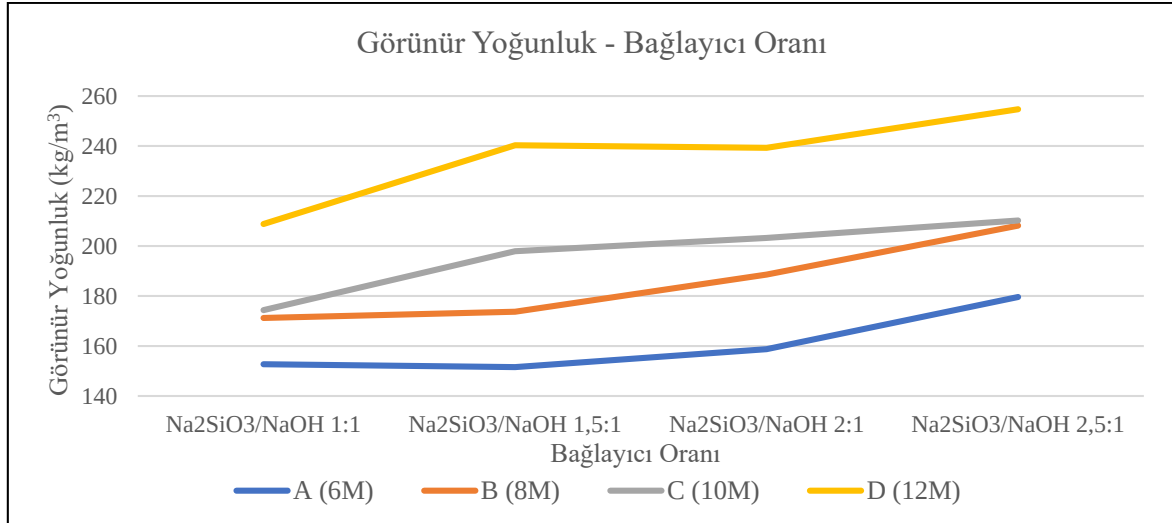
GP esaslı numunelerin görünür yoğunlukları belirlenmiştir. 300*300*50 mm kalıptan çıkarılan numunelerin ağırlıkları, uzunluk, genişlik ve kalınlıklarının farklılaşmasına bağlı olarak görünür yoğunluk değerlerinde değişiklikler görülmüştür.

Şekil 4.5’de aynı oranda (4 l granüler ve 2 l toz) GP içeren karışımlarda sodyum hidroksit derişiminin ve sodyum silikat miktarının görünür yoğunluğa etkisini gösteren grafik verilmiştir.



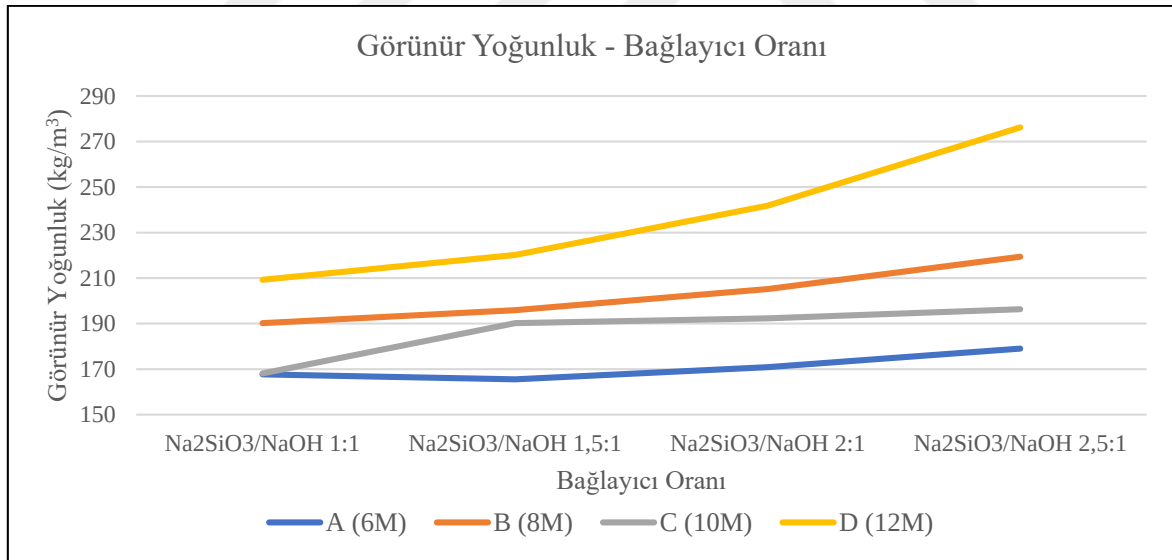
Şekil 4.5. Grup 1 – görünür yoğunluk değerleri

Şekil 4.6’da aynı oranda (3 litre granüler ve 3 litre toz) GP içeren karışımlarda sodyum hidroksit derişiminin ve sodyum silikat miktarının görünür yoğunluğa etkisini gösteren grafik verilmiştir.



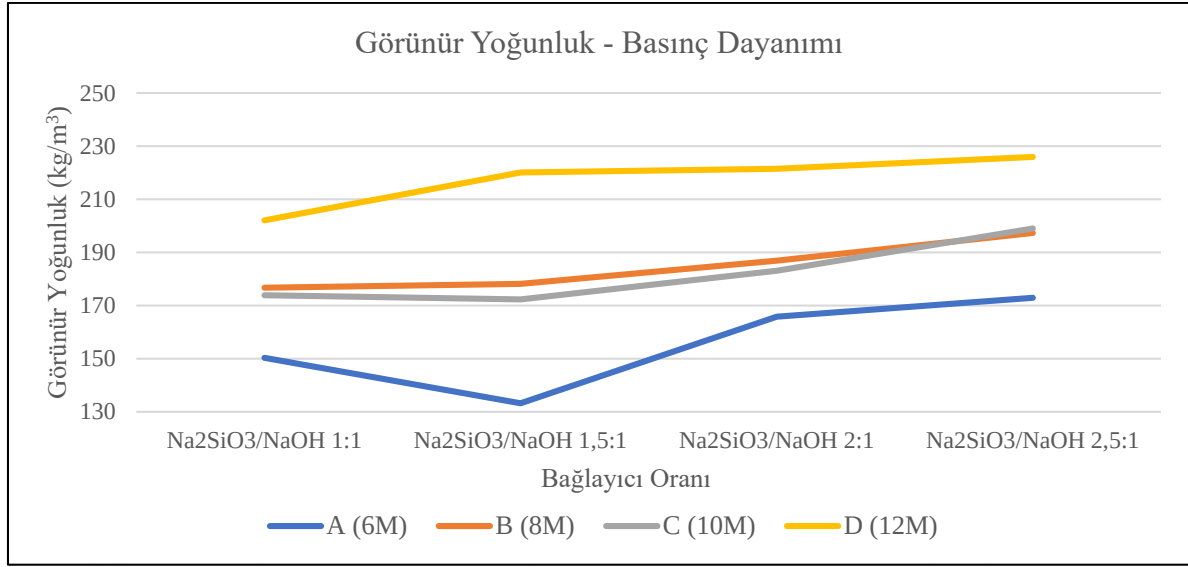
Şekil 4.6. Grup 2 – görünür yoğunluk değerleri

Şekil 4.7’de aynı oranda (2 l granüler ve 4 l toz) GP içeren karışımlarda sodyum hidroksit derişiminin ve sodyum silikat miktarının görünür yoğunluğa etkisini gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 4.7. Grup 3 – görünür yoğunluk değerleri

Şekil 4.8’de aynı oranda (1 l granüler ve 5 l toz) GP içeren karışımlarda sodyum hidroksit derişiminin ve sodyum silikat miktarının görünür yoğunluğa etkisini gösteren grafik verilmiştir.

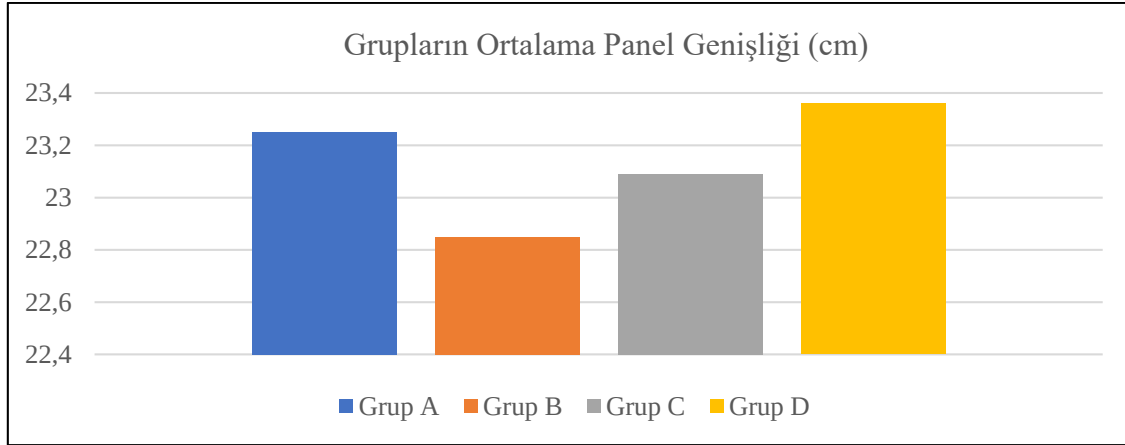


Şekil 4.8. Grup 4 – görünür yoğunluk değerleri

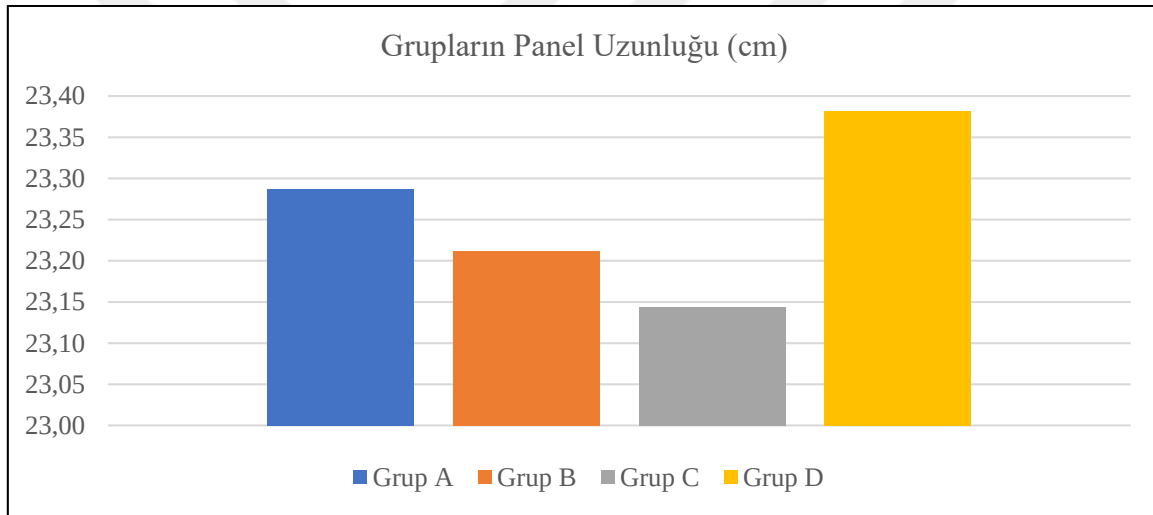
Şekil 4.5 - 4.8 incelendiğinde, sodyum hidroksit derişimi ve sodyum silikat miktarı arttıkça görünür yoğunluğun da genellikle gruplar arasında arttığı gözlenmiştir. Buna ek olarak Na₂SiO₃/NaOH oranı arttıkça genellikle görünür yoğunluk da aynı oranda artmıştır. Ancak tüm GP oranları arasında A grubu (6M) numunelerinde Na₂SiO₃/NaOH 1,5:1 oranı için görünür yoğunluk azalmıştır. Bununla birlikte 4 grup arasında en düşük görünür yoğunluk 1:5 taş/toz perlit, 6M sodyum hidroksit ve Na₂SiO₃/NaOH oranı 1,5 olan A10 numaralı numunede 133,267 kg/m³ olarak ölçülmüştür. 4 grup arasında en yüksek görünür yoğunluk ise 2:4 granüler/toz perlit, 12M sodyum hidroksit ve Na₂SiO₃/NaOH oranı 2,5 olan D8 numaralı numunede 276,161 kg/m³ olarak ölçülmüştür. Bağlayıcı oranı ve sodyum hidroksit derişiminin artmasıyla yoğunluk değerleri de artmıştır.

4.1.4. Uzunluk, genişlik ve kalınlık tayini

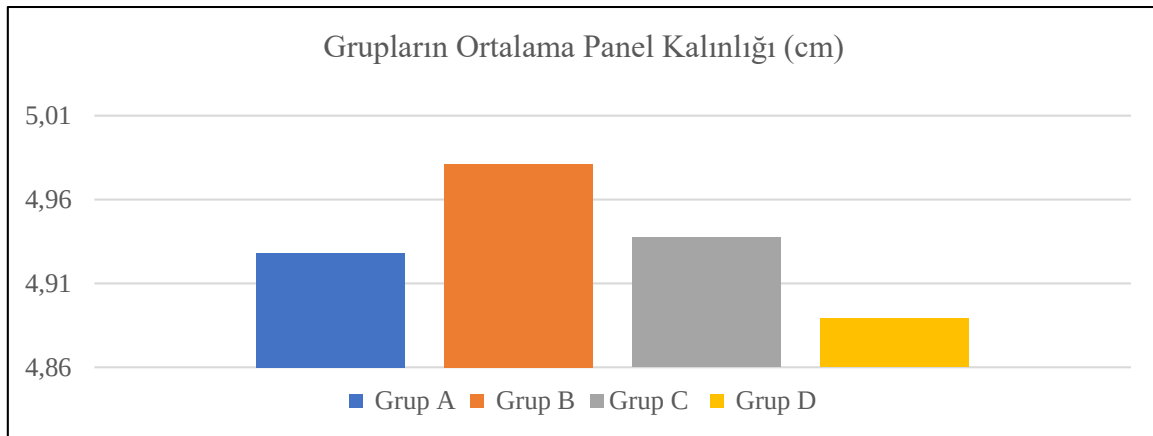
GP esaslı numunelerde panel genişlik, uzunluk ve kalınlık değerleri 240*240*50 mm'ye göre tasarlanmıştır. Ancak, numunelere ait uzunluk, genişlik ve kalınlık değerlerinde üretim aşamalarında kesit farklılıkları gözlenmiştir. Tüm numunelere ait ortalama uzunluk, genişlik ve kalınlık değerleri Şekil 4.9, Şekil 4.10, ve Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.5. Grupların ortalama panel genişlik değerleri



Şekil 4.6. Grupların ortalama panel uzunluk değerleri



Şekil 4.7. Grupların ortalama panel kalınlık değerleri

Tüm numuneler 240*240*50 mm boyutlarında üretilmiştir. Şekil 4.9 - 4.11 incelendiğinde, numunelerin ortalama uzunluk, genişlik ve kalınlık değerlerinde farklılıklar görülmektedir. Ortalama genişlik değerlerinde A, B, C ve D grubu numuneleri sırasıyla %3,125, %4,792, %3,792 ve %2,667 oranında küçülme göstermiştir. Genişlik değerleri gözetildiğinde en fazla kayıp B grubu numunelerinde görülmüştür. Ortalama uzunluk değerlerinde A, B, C, ve D grubu numuneleri sırasıyla %2,958, %3,292, %3,583 ve %2,583 oranında küçülme görülmüştür. Uzunluk değerleri gözetildiğinde en fazla kayıp C grubu numunelerinde görülmüştür. Ortalama kalınlık değerlerinde A, B, C, ve D grubu numuneleri sırasıyla %1,4, %0,4, %1,2 ve %2,2 oranında küçülme görülmüştür. Kalınlık değerleri gözetildiğinde gruplar arasında kayıp değerlerinin %2'yi aşmamasıyla birlikte en fazla kayıp D grubu numunelerinde görülmüştür. Bu farklılıklara harcın düzgün kalıplanamaması, kür işlemi sonrasında daralan panel, kalıptan çıkarılırken numunenin hasar görmesi ve etüv fırınında görülen çekme ya da büzülmeden kaynaklanmaktadır.

4.1.5. Yüzey düzlüğünün tayini

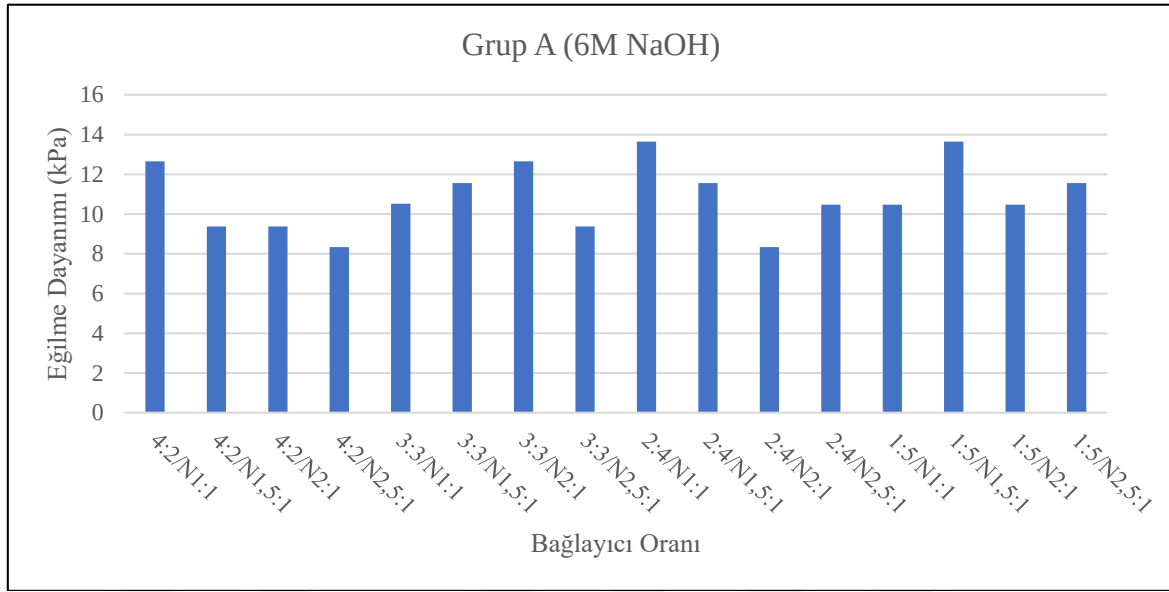
Yapılan testler neticesinde GP kullanılarak üretilen ısı yalıtım panellerinde istatistiksel anlama sahip bir değer (sapma) tespit edilmemiştir.

4.2. GP Esaslı Isı Yalıtım Paneller Üzerinde Yapılan Mekanik Deneyler

GP esaslı ısı yalıtım panellerinin yapıya uygulanırken sınır dayanım değerlerine ulaşması beklenmektedir. GP esaslı ısı yalıtım panellerinin mekanik özelliklerinin tespit edilmesi için basınç ve eğilme dayanımları tespit edilmiştir.

4.2.1. 6M NaOH ile hazırlanan panellerin eğilme dayanımı değerleri

6M NaOH kullanılarak hazırlanan ve içerisinde bağlayıcı oranı 1 ila 2,5 arasında, farklı oranlarda granüler ve toz GP bulunan numunelere ait eğilme dayanımı değerleri Şekil 4.12'de gösterilmiştir.

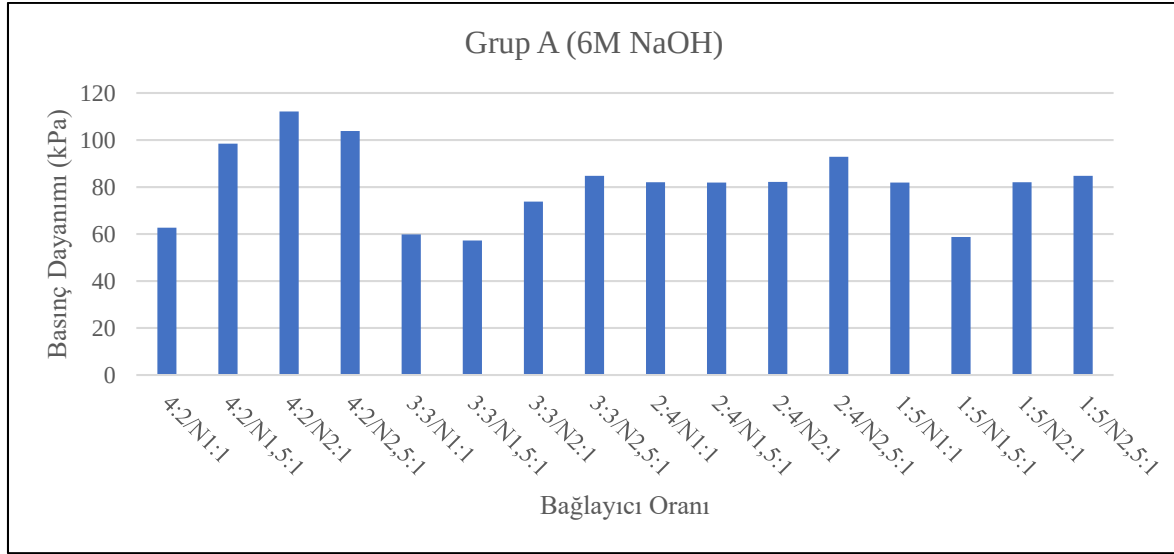


Şekil 4.8. Grup A panelleri eğilme dayanımı değerleri

Şekil 4.12 incelendiğinde, 6 M sodyum hidroksit ve farklı oranlarda $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ kullanılarak üretilen Grup A numuneleri içerisinde ortalama eğilme dayanımı değeri sırasıyla 10,875 kPa olarak ölçülmüştür. Grup A numuneleri içerisinde en yüksek eğilme dayanımı numune 5'de 13,646 kPa olarak ölçülmüştür. Numune 5 hazırlanırken 2 litre granüler ve 4 litre toz GP, 6 M sodyum hidroksit, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 1:1 oranı kullanılmıştır.

4.2.2. 6M NaOH ile hazırlanan panellerin basınç dayanımı değerleri

6M NaOH kullanılarak hazırlanan ve içerisinde bağlayıcı oranı 1 ila 2,5 arasında, farklı oranlarda granüler ve toz GP bulunan numunelere ait basınç dayanımı değerleri Şekil 4.13'te gösterilmiştir.

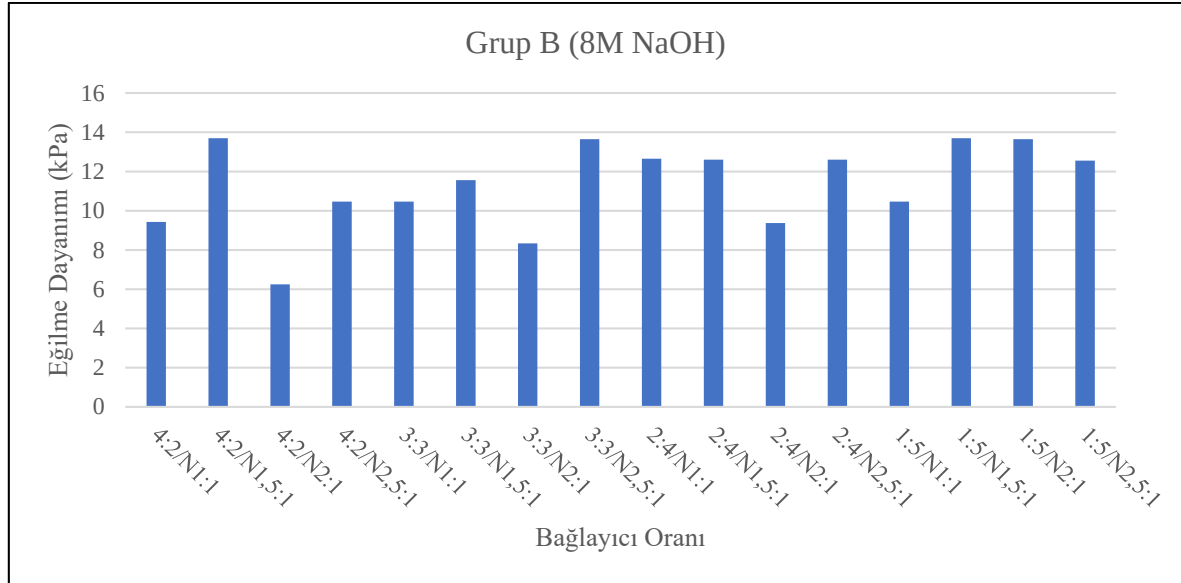


Şekil 4.9. Grup A panelleri basınç dayanımı değerleri

Şekil 4.13 incelendiğinde, 6 M sodyum hidroksit ve farklı oranlarda $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ kullanılarak üretilen Grup A numuneleri içerisinde ortalama basınç dayanımı değeri sırasıyla 81,216 kPa olarak ölçülmüştür. Grup A numuneleri içerisinde en yüksek basınç dayanımı numune 15’de 112,125 kPa olarak ölçülmüştür. Numune 15 hazırlanırken 4 litre granüler ve 2 litre toz GP, 6 M sodyum hidroksit, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 2:1 oranı kullanılmıştır. Ek olarak, en yüksek basınç dayanımlarına 4 litre granüler, 2 litre toz içeren numunelerde rastlanmıştır. Bununla birlikte, ortalama basınç dayanım değeri eğilme dayanımlarının yaklaşık 7,47 katı olarak tespit edilmiştir.

4.2.3. 8M NaOH ile hazırlanan panellerin eğilme dayanımı değerleri

8M NaOH kullanılarak hazırlanan ve içerisinde bağlayıcı oranı 1 ila 2,5 arasında, farklı oranlarda granüler ve toz GP bulunan numunelere ait eğilme dayanımı değerleri Şekil 4.14’te gösterilmiştir.

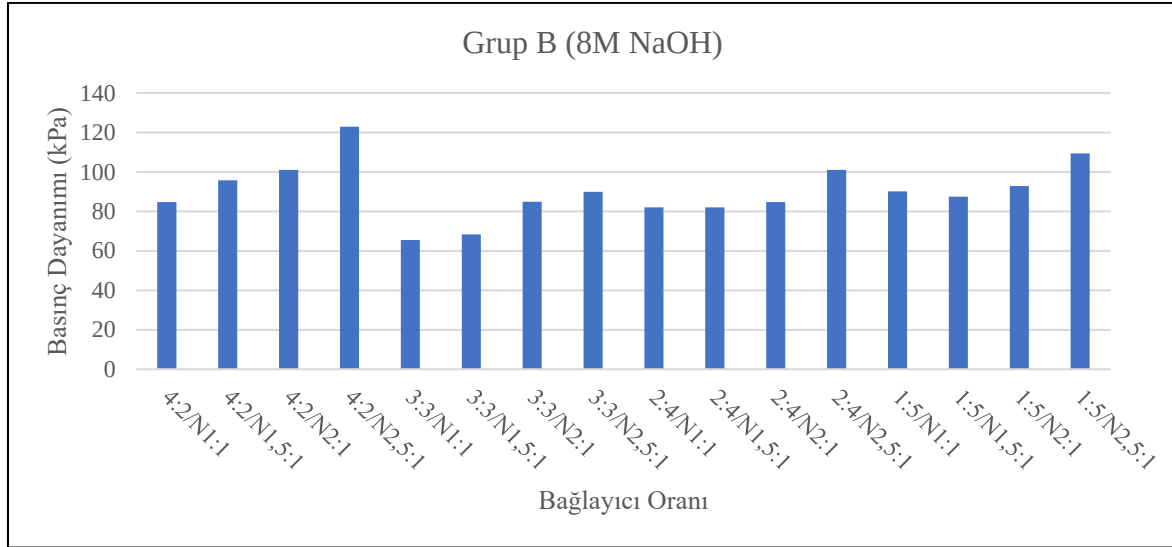


Şekil 4.10. Grup B panelleri eğilme dayanımı değerleri

Şekil 4.14 incelendiğinde, 8 M sodyum hidroksit kullanılarak üretilen Grup B numuneleri içerisinde ortalama eğilme dayanımı değeri 11,341 kPa olarak ölçülmüştür. Grup B numuneleri içerisinde en yüksek basınç dayanımı numune 10'da 13,679 kPa olarak ölçülmüştür. Numune 10 hazırlanırken 1 litre granüler ve 5 litre toz GP, 8 M sodyum hidroksit, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 1,5:1 oranı kullanılmıştır.

4.2.4. 8M NaOH ile hazırlanan panellerin basınç dayanımı değerleri

8M NaOH kullanılarak hazırlanan ve içerisinde bağlayıcı oranı 1 ila 2,5 arasında, farklı oranlarda granüler ve toz GP bulunan numunelere ait basınç dayanımı değerleri Şekil 4.15'te gösterilmiştir.

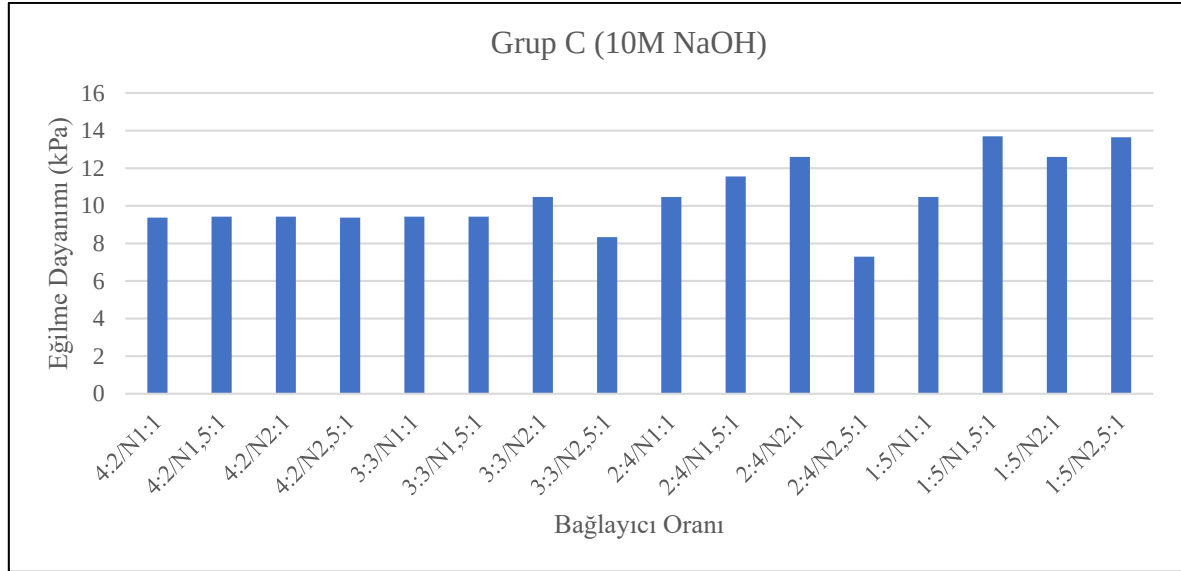


Şekil 4.11. Grup B panelleri basınç dayanımı değerleri

Şekil 4.15 incelendiğinde, 8 M sodyum hidroksit ve farklı oranlarda $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ kullanılarak üretilen Grup B numuneleri içerisinde ortalama basınç dayanımı değeri sırasıyla 90,196 kPa olarak ölçülmüştür. Grup B numuneleri içerisinde en yüksek basınç dayanımı numune 16'da 122,125 kPa olarak ölçülmüştür. Numune 16 hazırlanırken 4 litre granüler ve 2 litre toz GP, 8 M sodyum hidroksit, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 2,5:1 oranı kullanılmıştır. Ek olarak, en yüksek basınç dayanımlarına 4 litre granüler, 2 litre toz içeren numunelerde rastlanmıştır. Bununla birlikte, ortalama olarak basınç dayanımları eğilme dayanımlarının yaklaşık 7,95 katı olduğu tespit edilmiştir.

4.2.5. 10M NaOH ile hazırlanan panellerin eğilme dayanımı değerleri

10M NaOH kullanılarak hazırlanan ve içerisinde bağlayıcı oranı 1 ila 2,5 arasında, farklı oranlarda granüler ve toz GP bulunan numunelere ait eğilme dayanımı değerleri Şekil 4.16'da gösterilmiştir.

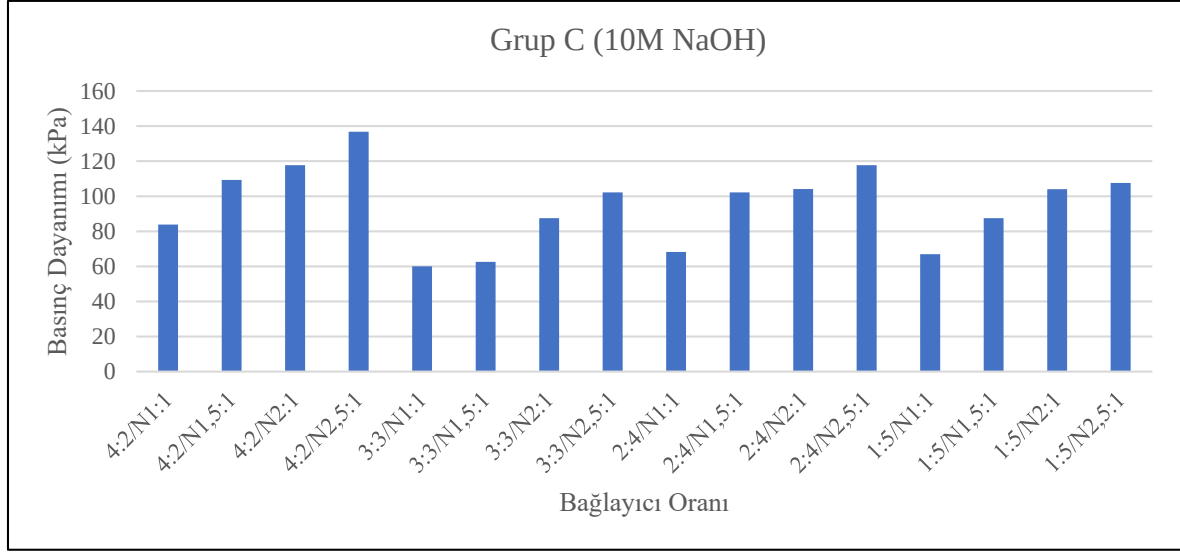


Şekil 4.12. Grup C panelleri eğilme dayanımı değerleri

Şekil 4.16 incelendiğinde, 10 M sodyum hidroksit kullanılarak üretilen Grup C numuneleri içerisinde ortalama eğilme dayanımı değeri 10,475 kPa olarak ölçülmüştür. Grup C numuneleri içerisinde en yüksek eğilme dayanımı numune 10'da 13,698 kPa olarak ölçülmüştür. Numune 10 hazırlanırken 1 litre granüler ve 5 litre toz GP, 10 M sodyum hidroksit, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 1,5:1 oranı kullanılmıştır.

4.2.6. 10M NaOH ile hazırlanan panellerin basınç dayanımı değerleri

10M NaOH kullanılarak hazırlanan ve içerisinde bağlayıcı oranı 1 ila 2,5 arasında, farklı oranlarda granüler ve toz GP bulunan numunelere ait basınç dayanımı değerleri Şekil 4.17'de gösterilmiştir.

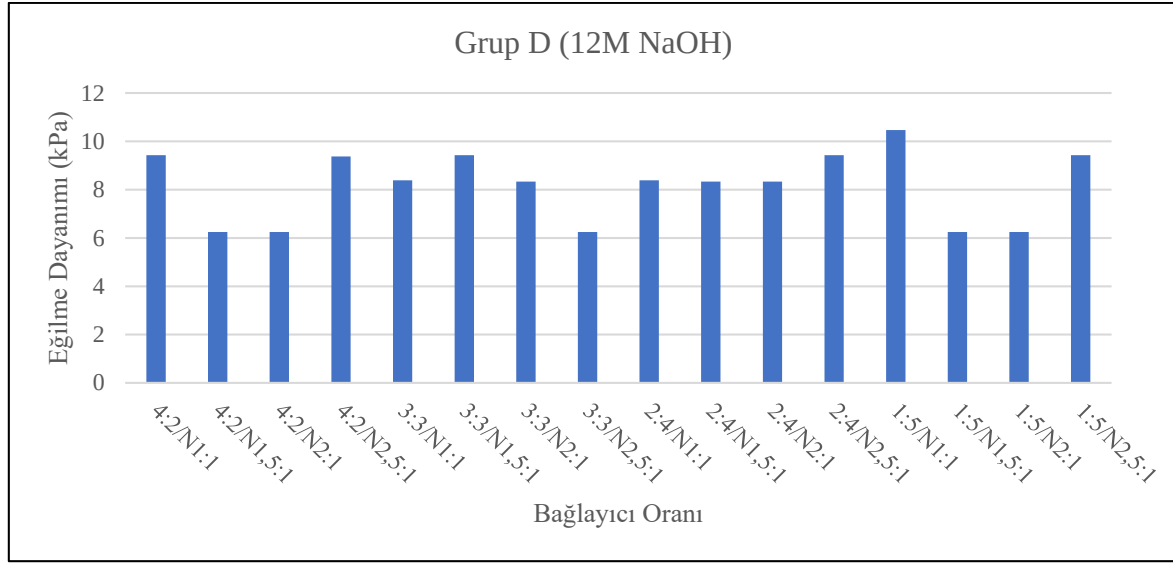


Şekil 4.13. Grup C panelleri basınç dayanımı değerleri

Şekil 4.17 incelendiğinde, 10 M sodyum hidroksit kullanılarak üretilen Grup C numuneleri içerisinde ortalama basınç dayanımı değeri 94,885 kPa olarak ölçülmüştür. Grup C numuneleri içerisinde en yüksek basınç dayanımı numune 16'da 136,7738 kPa olarak ölçülmüştür. Numune 16 hazırlanırken 4 litre granüler ve 2 litre toz GP, 10 M sodyum hidroksit, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 2,5:1 oranı kullanılmıştır. Ek olarak en yüksek basınç dayanımlarına 4 litre granüler, 2 litre toz içeren numunelerde rastlanmıştır. Bununla birlikte, ortalama olarak basınç dayanımları eğilme dayanımlarının yaklaşık 9,08 katı olduğu tespit edilmiştir.

4.2.7. 12M NaOH ile hazırlanan panellerin eğilme dayanımı değerleri

12M NaOH kullanılarak hazırlanan ve içerisinde bağlayıcı oranı 1 ila 2,5 arasında, farklı oranlarda granüler ve toz GP bulunan numunelere ait eğilme dayanımı değerleri Şekil 4.18'de gösterilmiştir.

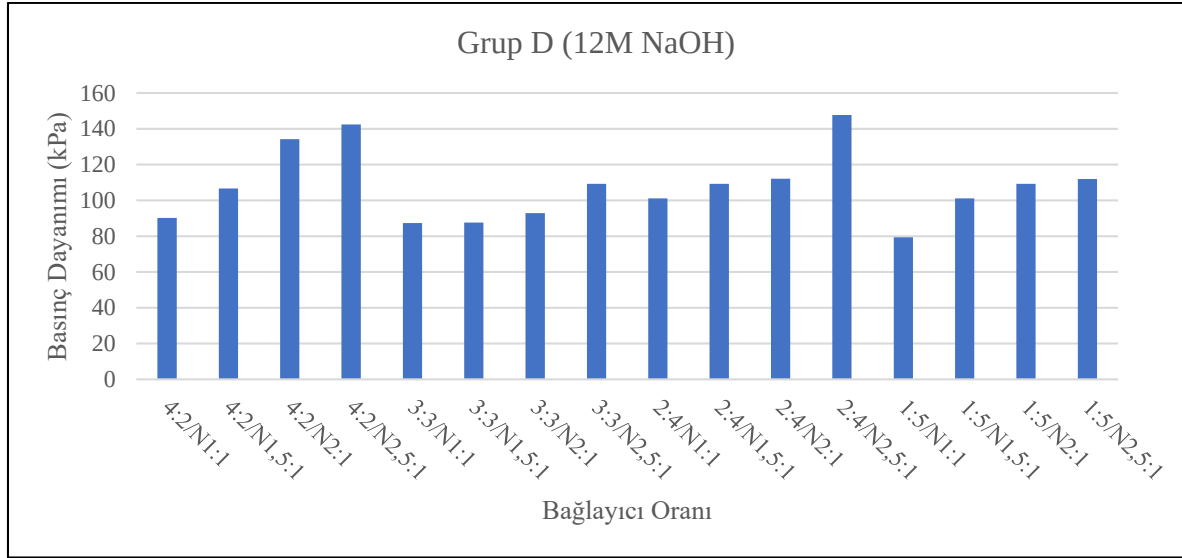


Şekil 4.14. Grup D panelleri eğilme dayanımı değerleri

Şekil 4.18 incelendiğinde, 12 M sodyum hidroksit kullanılarak üretilen Grup D numuneleri içerisinde ortalama eğilme dayanımı değeri 8,160 kPa olarak ölçülmüştür. Grup D numuneleri içerisinde en yüksek eğilme dayanımı numune 9'da 10,469 kPa olarak ölçülmüştür. Numune 9 hazırlanırken 1 litre granüler ve 5 litre toz GP, 12 M sodyum hidroksit, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 1:1 oranı kullanılmıştır.

4.2.8. 12M NaOH ile hazırlanan panellerin basınç dayanımı değerleri

12M NaOH kullanılarak hazırlanan ve içerisinde bağlayıcı oranı 1 ila 2,5 arasında, farklı oranlarda granüler ve toz GP bulunan numunelere ait basınç dayanımı değerleri Şekil 4.19'da gösterilmiştir.



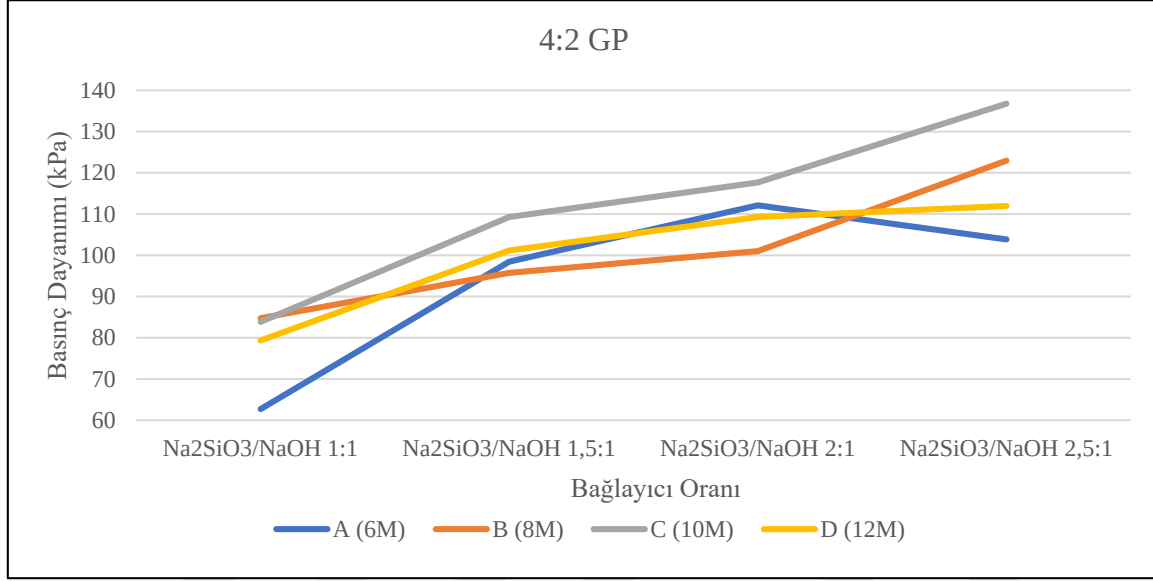
Şekil 4.15. Grup D panelleri basınç dayanımı değerleri

Şekil 4.19 incelendiğinde, 12 M sodyum hidroksit kullanılarak üretilen Grup D numuneleri içerisinde ortalama basınç dayanımı değeri 107,672 kPa olarak ölçülmüştür. Grup D numuneleri içerisinde en yüksek basınç dayanımı numune 8'de 147,7398 KPa olarak ölçülmüştür. Numune 8 hazırlanırken 2 litre granüler ve 4 litre toz GP, 12 M sodyum hidroksit, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 2,5:1 oranı kullanılmıştır. Ayrıca, D8 numaralı numune tüm gruplar arasında en yüksek yoğunluğa sahip numunedir. En yüksek dayanıma sahip numune 2 litre granüler, 4 litre toz GP içeren numunede görülürken, D grubu içerisinde yüksek basınç dayanımlarına 4 litre granüler, 2 litre toz içeren numunelerde rastlanmıştır. Bununla birlikte, ortalama olarak basınç dayanımları eğilme dayanımlarının yaklaşık 13,11 katı olduğu tespit edilmiştir.

Tüm numuneler arasında basınç dayanımı 57 KPa ile 148 KPa arasında değişmektedir. Elde edilen basınç dayanımları, ısı iletkenlik değerleriyle doğru orantılı olarak değişmiştir. Tüm gruplar arasında basınç dayanımları incelendiğinde, en yüksek değerlere 4 litre granüler, 2 litre toz GP içeren numunelerde rastlanmıştır. Eğilme dayanımları genel olarak tüm gruplarda ortalama değerdedir. Ancak basınç dayanımlarının artmasıyla eğilme dayanımları arasındaki oran artmıştır.

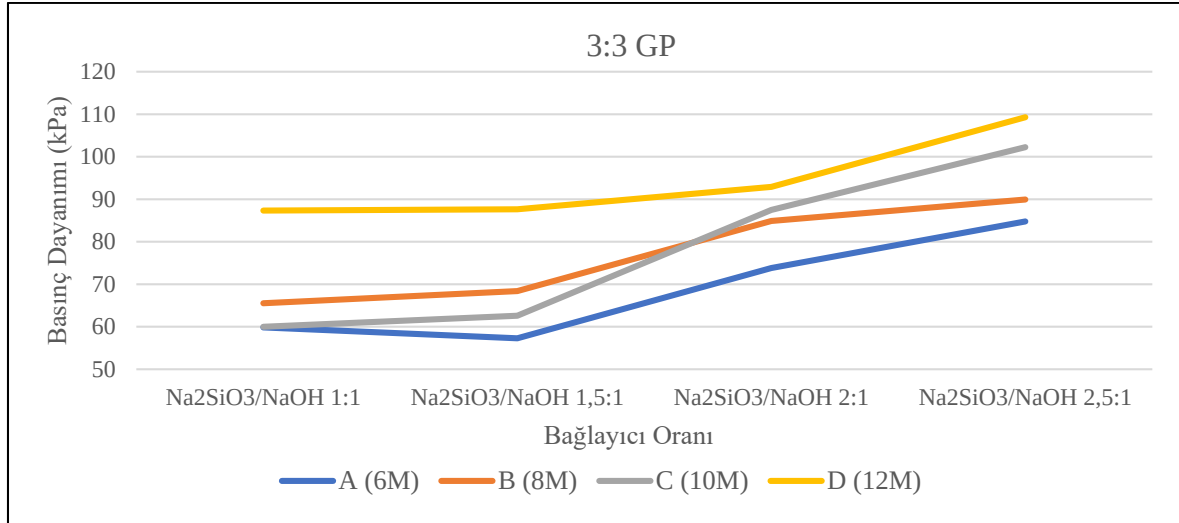
4.2.9. Bağlayıcı oranının panellerin basınç dayanımına etkisi

Farklı hacimsel oranlarda granüler ve toz GP kullanılarak hazırlanan panellerin bağlayıcı oranına bağlı basınç dayanımına etkisi Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te gösterilmiştir.



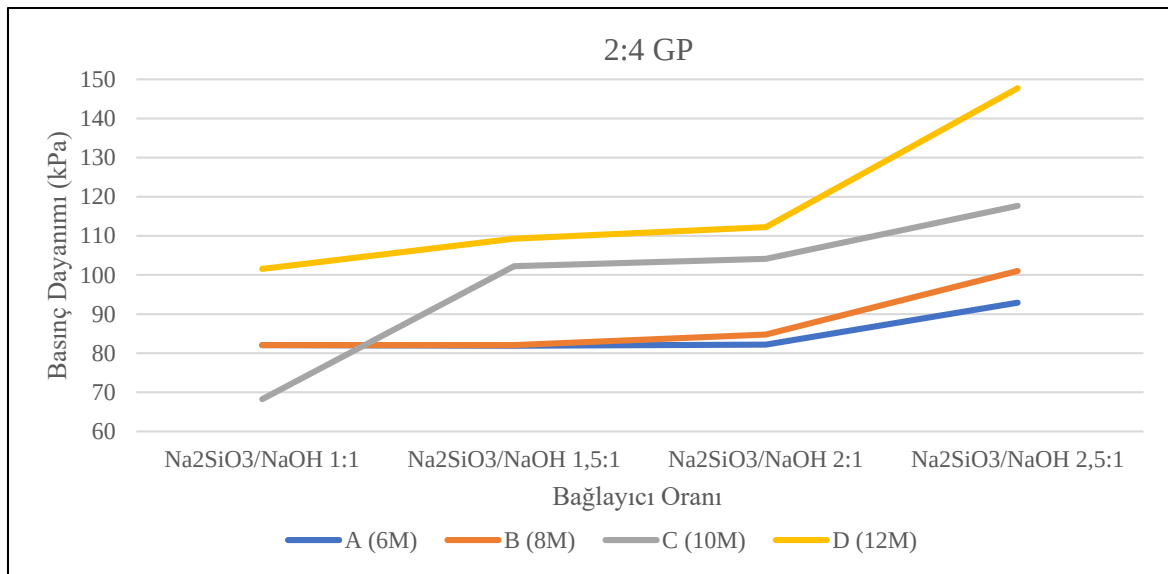
Şekil 4.16. 4 litre granüler, 2 litre toz GP içeren panellerin basınç dayanım değerleri

Şekil 4.20 incelendiğinde 4 litre granüler, 2 litre toz GP içeren karışımlarda sodyum hidroksit derişimi ve Na₂SiO₃/NaOH oranının basınç dayanıma etkisi görülmüştür. 4 farklı grup arasında en yüksek dayanım D16 numunesinde 136,7708 kPa olarak ölçülmüştür. Gruplar arasında bağlayıcı oranı 1:1 ve 2,5:1 oranlarında en düşük basınç dayanımı 6 M içeren gruplarda, bağlayıcı oranı 1,5:1 ve 2:1 oranlarında en düşük basınç dayanımı 8 M içeren gruplarda görülürken, en yüksek basınç dayanımları ise 12 M sodyum hidroksit içeren gruplarda elde edilmiştir. Buna ek olarak, bağlayıcı oranının artmasıyla basınç dayanımları da artmıştır. Ancak A12 numaralı numunede bağlayıcı oranı 2,5:1 için basınç dayanımı düşüş göstermiştir. Bunun nedeni, A12 numaralı numunede ısı iletkenlik değerinin düşmesidir. 4 litre granüler, 2 litre toz GP içeren numunelerde en yüksek dayanımlar A12 numaralı numune hariç Na₂SiO₃/NaOH 2,5:1 oranında elde edilmiştir.



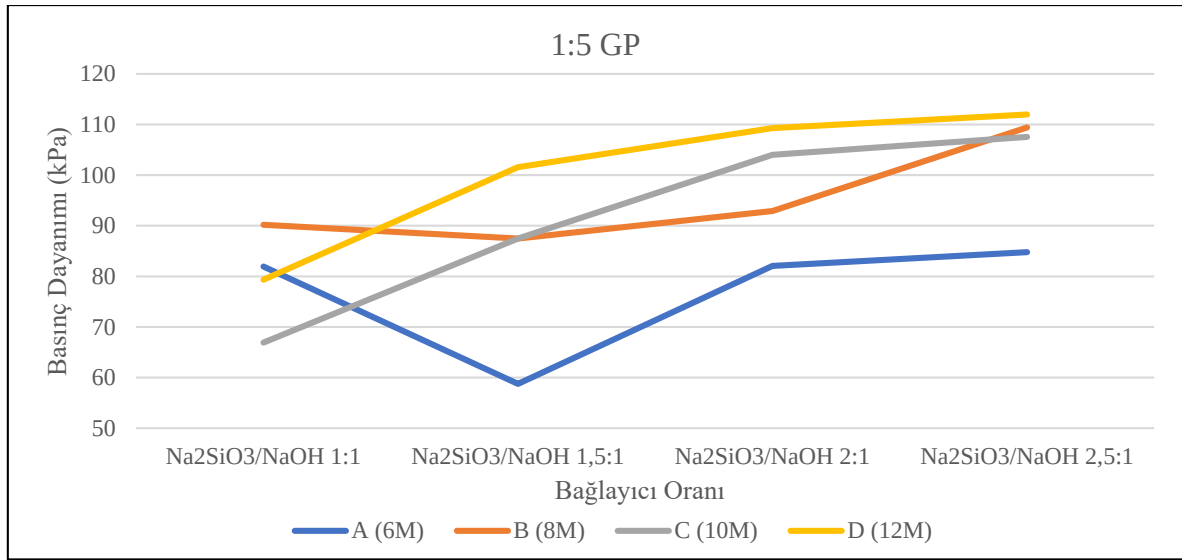
Şekil 4.17. 3 litre granüler, 3 litre toz GP içeren panellerin basınç dayanım değerleri

Şekil 4.21 incelendiğinde, 3 litre granüler, 3 litre toz GP oranının sabit tutulduğu karışımlarda sodyum hidroksit derişimi ve Na₂SiO₃/NaOH oranının basınç dayanıma etkisi görülmüştür. 4 farklı grup arasında en yüksek dayanım D4 numunesinde 109,281 kPa olarak ölçülmüştür. Gruplar arasında en düşük basınç dayanımları 6 M sodyum hidroksit içeren gruplarda, en yüksek basınç dayanımları ise 12 M sodyum hidroksit içeren gruplarda elde edilmiştir. Buna ek olarak, bağlayıcı oranının artmasıyla basınç dayanımları da artmıştır. 3 litre granüler, 3 litre toz GP içeren numunelerde en yüksek dayanımlar Na₂SiO₃/NaOH 2,5:1 oranında elde edilmiştir.



Şekil 4.18. 2 litre granüler, 4 litre toz GP içeren panellerin basınç dayanım değerleri

Şekil 4.22 incelendiğinde, 2 litre granüler 4 litre toz GP içeren karışımlarda sodyum hidroksit derişimi ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının basınç dayanıma etkisi görülmüştür. 4 farklı grup arasında en yüksek dayanım D8 numunesinde 147,739 kPa olarak ölçülmüştür. Ek olarak, tüm numuneler arasında en yüksek dayanım D8 numunesinde elde edilmiştir. Gruplar arasında en düşük basınç dayanımları 6 M ve 8 M sodyum hidroksit içeren gruplarda, en yüksek basınç dayanımları ise 12 M sodyum hidroksit içeren gruplarda elde edilmiştir. Buna ek olarak, bağlayıcı oranının artmasıyla basınç dayanımları da artmıştır. 2 litre granüler, 4 litre toz GP içeren numunelerde en yüksek dayanımlar $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 2,5:1 oranında elde edilmiştir.



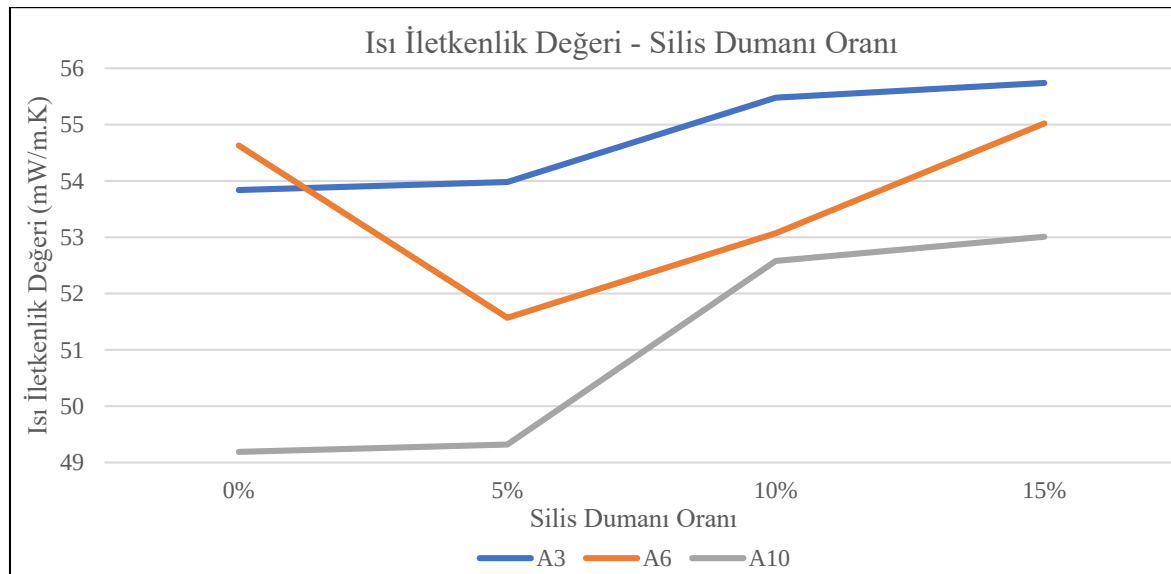
Şekil 4.19. 1 litre granüler, 5 litre toz GP içeren panellerin basınç dayanım değerleri

Şekil 4.23 incelendiğinde 1 litre granüler, 5 litre toz GP içeren karışımlarda sodyum hidroksit derişimi ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının basınç dayanıma etkisi görülmüştür. 4 farklı grup arasında en yüksek dayanım D12 numunesinde 111,983 kPa olarak ölçülmüştür. Gruplar arasında en düşük basınç dayanımları 6 M içeren gruplarda, en yüksek basınç dayanımları ise 12 M sodyum hidroksit içeren gruplarda elde edilmiştir. Buna ek olarak, bağlayıcı oranının artmasıyla basınç dayanımları da artmıştır. Ancak A10 numaralı numunede basınç dayanımı ani şekilde düşüş göstermiştir. A10 numaralı numune tüm gruplar arasında en düşük ısı iletkenliğe sahiptir. Buna ek olarak, bağlayıcı oranının artmasıyla basınç dayanımları da artmıştır. 1 litre granüler, 5 litre toz GP içeren numunelerde en yüksek dayanımlar $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 2,5:1 oranında elde edilmiştir.

Genel olarak Şekil 4.20 - Şekil 4.23 incelendiğinde, aynı granüler ve toz GP oranlarında sodyum hidroksit derişimi ve bağlayıcı oranının basınç dayanımları üzerine etkisi açıkça görülmüştür. Tüm gruplar arasında, farklılıklar olmakla birlikte en düşük basınç dayanımları 6 M sodyum hidroksit derişiminde elde edilirken, en yüksek basınç dayanımları 12 M sodyum hidroksit derişiminde elde edilmiştir. Bununla birlikte, bağlayıcı oranları göz önüne alındığında, bağlayıcı oranının artması basınç dayanım değerlerini olumlu yönde etkilerken, ısı iletkenlik değerini de olumsuz yönde etkilemiştir. En düşük dayanımlar bağlayıcı oranı 1:1’de elde edilirken, en yüksek dayanımlar 2,5:1 oranında elde edilmiştir. Bu bilgilere ek olarak, numuneler arasında ısı iletkenlik değerleri daha düşük olan numunelerde basınç dayanımları da düşük çıkmıştır.

4.2.10. Silis dumanı ilavesinin panellerin fiziksel, mekanik ve ısı özelliklerine etkisi

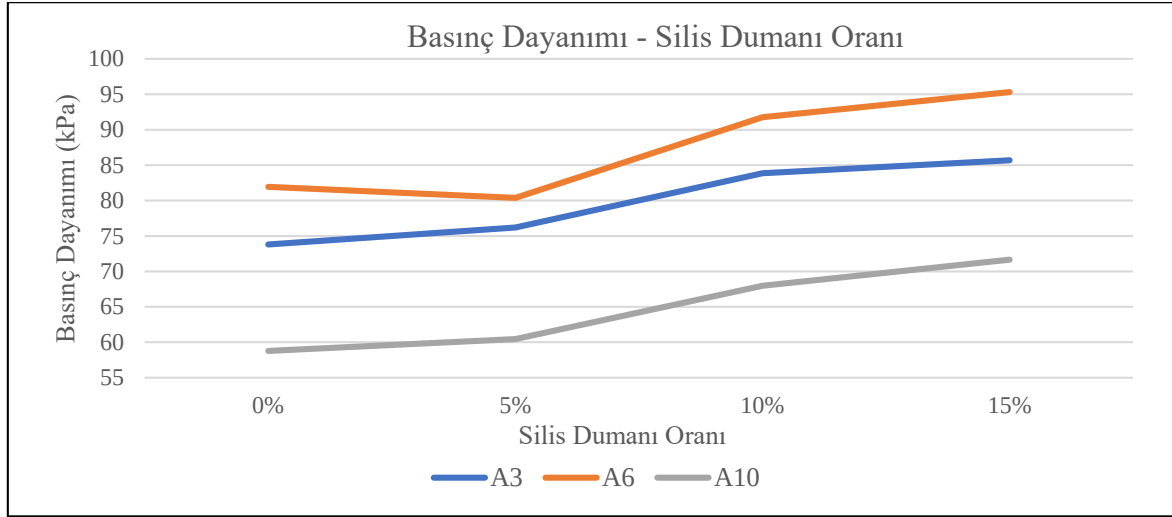
GP esaslı numunelerin basınç dayanımlarına silis dumanı ilavesinin mekanik, fiziksel ve ısı özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre 1:5, 2:4 ve 3:3 GP karışım oranlarında A, B, C ve D grupları arasında en düşük ısı iletkenliklere sahip A3, A6 ve A10 numaralı numunelerin basınç dayanımlarını iyileştirmek için toplam bağlayıcı miktarının %5, %10 ve %15’i olacak şekilde bağlayıcı karışıma silis dumanı ilave edilmiştir. Şekil 4.24’te silis dumanı ilavesinin numunelerin ısı iletkenliğine etkisi verilmiştir.



Şekil 4.20. Silis dumanı ilavesinin ısı iletkenliğe etkisi

Şekil 4.24 incelendiğinde, silis dumanı ilavesinin ısı iletkenliğı genel olarak arttırdığı tespit edilmiştir. Silis dumanı yüzdesi arttıkça ısı iletkenlik de artmıştır. Ancak A6 numunesinde %5 silis dumanı ilavesi ısı iletkenliğı 54,63 mW/m.K'den 51,57 mW/m.K'e düşürmüştür.

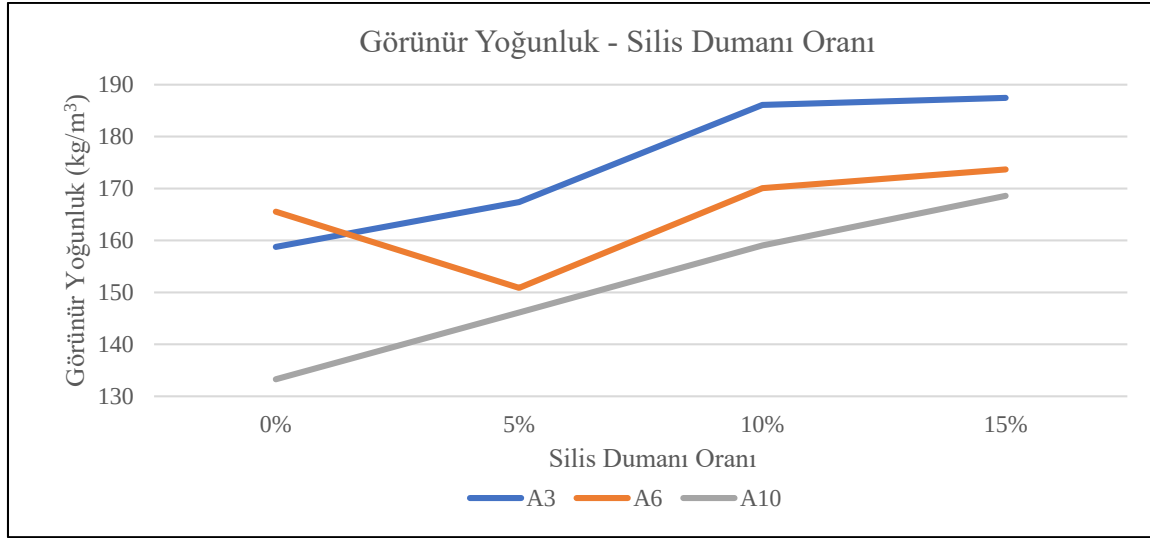
Şekil 4.25'de ise silis dumanı ilavesinin numunelerin basınç dayanımına etkisi verilmiştir.



Şekil 4.21. Silis dumanı ilavesinin panellerin basınç dayanımına etkisi

Şekil 4.25 incelendiğinde, silis dumanı ilavesinin basınç dayanımını olumlu yönde etkilediğı tespit edilmiştir. Silis dumanı miktarı arttıkça numunelerin basınç dayanımları da artmıştır. Ancak, basınç dayanım değerleri incelendiğinde, önemli derecedeki artış %10 silis dumanı ilavesinde görülmüştür. Ayrıca, %5 silis dumanı numunesinde A6 numunesinin basınç dayanımını düşüş göstermiştir.

Şekil 4.26'da ise silis dumanı ilavesinin numunelerin yoğunluğuna etkisi verilmiştir.



Şekil 4.22. Silis dumanı ilavesinin panellerin yoğunluğuna etkisi

Şekil 4.26 incelendiğinde, silis dumanı ilavesinin numunelerin yoğunluğunu arttırdığı tespit edilmiştir. Silis dumanı miktarı arttıkça yoğunlukta genel olarak artmıştır. Ancak A6 numaralı numunede %5 silis dumanı ilavesinde yoğunluk $167,725 \text{ kg/m}^3$ 'den $150,885 \text{ kg/m}^3$ 'e düşmüştür.

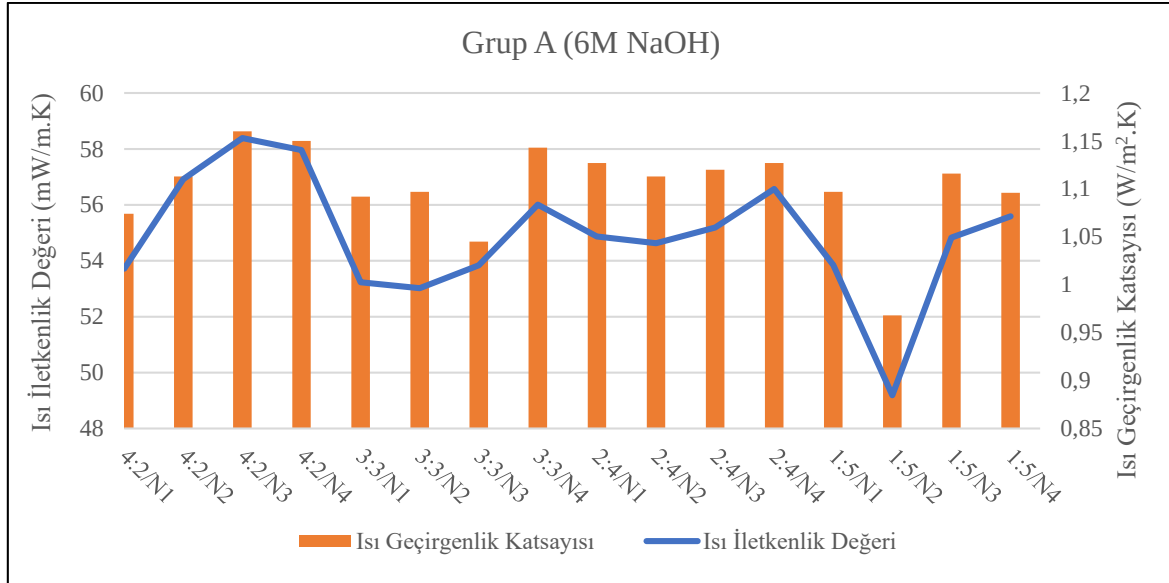
Genel olarak ısı iletkenlik, mekanik ve fiziksel özellikler incelendiğinde, silis dumanı ilavesinin genel olarak numunelerin yoğunluğunu ve buna bağlı olarak basınç dayanımını arttırdığı ancak ısı iletkenlik değerini düşürdüğü tespit edilmiştir. Silis dumanı ısı direnci iyi olan panellerde basınç dayanımını arttırmak için %10 oranında ilave edilebileceğini göstermiştir.

4.3. GP Esaslı Isı Yalıtım Panelinin Isıl İletkenlik Değeri

GP esaslı ısı yalıtım panellerinin yapı sektöründe ısı yalıtım paneli olarak kullanılması için 65 mW/m.K değerinden daha düşük ısı iletkenliğe sahip olması gerekmektedir.

4.3.1. 6M NaOH ile hazırlanan panellerin ısı iletkenlik değerleri

6M NaOH kullanılarak hazırlanan ve içerisinde bağlayıcı oranı 1 ila 2,5 arasında, farklı oranlarda granüler ve toz GP bulunan numunelere ait ısı iletkenlik değerleri Şekil 4.27'de gösterilmiştir.

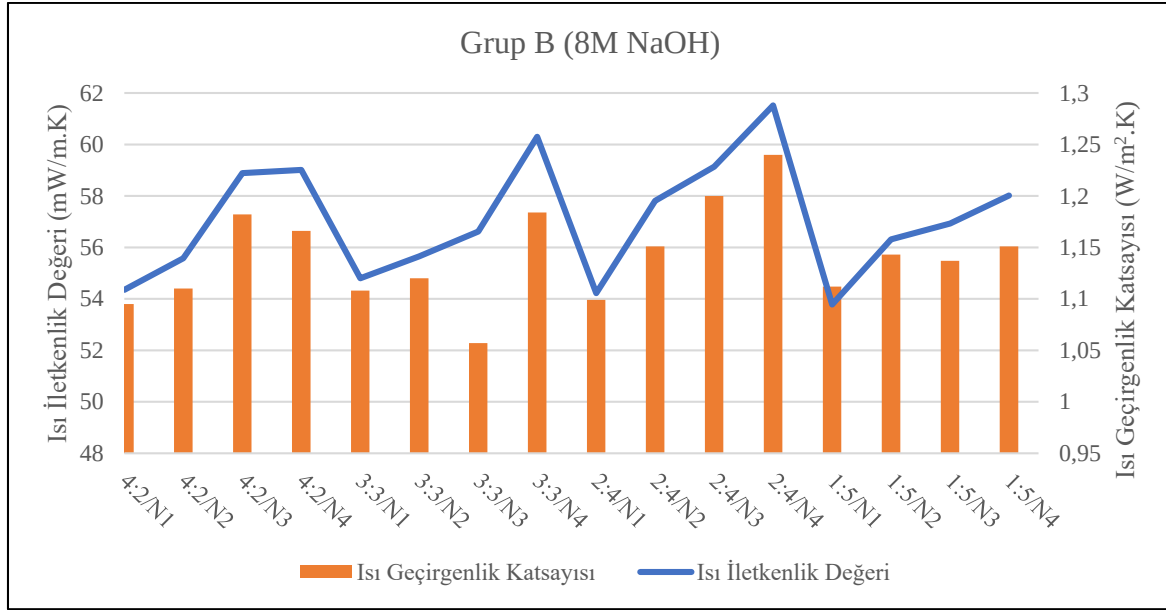


Şekil 4.23. Grup A ısı iletkenlik değeri – ısı geçirgenlik katsayısı

Şekil 4.27 incelendiğinde, 16 numune arasında en düşük ısı iletkenlik değeri $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 1,5 olan numune A10'da 49,19 mW/m.K olarak ölçülmüştür. Grup A numunelerinin ortalama ısı iletkenlikleri 54,86 mW/m.K olarak belirlenmiştir. Grup A numuneleri 6 M sodyum hidroksit kullanılarak üretilmişlerdir. Numuneler arasında en düşük değerler, 1 litre granüler 5 litre toz GP ile üretilen numunelerde elde edilmiştir. Ayrıca, A grubu numuneleri içerisinde aynı oranlarda GP içeren numuneler arasında $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 1,5:1 olan numuneler daha düşük ısı iletkenliğe sahiptir. Bununla birlikte, Grup A numuneleri içinde granüler:toz GP oranı azaldıkça ısı iletkenlik değeri azalmıştır. Bu bilgilere ek olarak, ısı geçirgenlik katsayıları da ısı iletkenliklere paralel değerlere sahiptir.

4.3.2. 8M NaOH ile hazırlanan panellerin ısı iletkenlik değerleri

8M NaOH kullanılarak hazırlanan ve içerisinde bağlayıcı oranı 1 ila 2,5 arasında, farklı oranlarda granüler ve toz GP bulunan numunelere ait ısı iletkenlik değerleri Şekil 4.28'de gösterilmiştir.

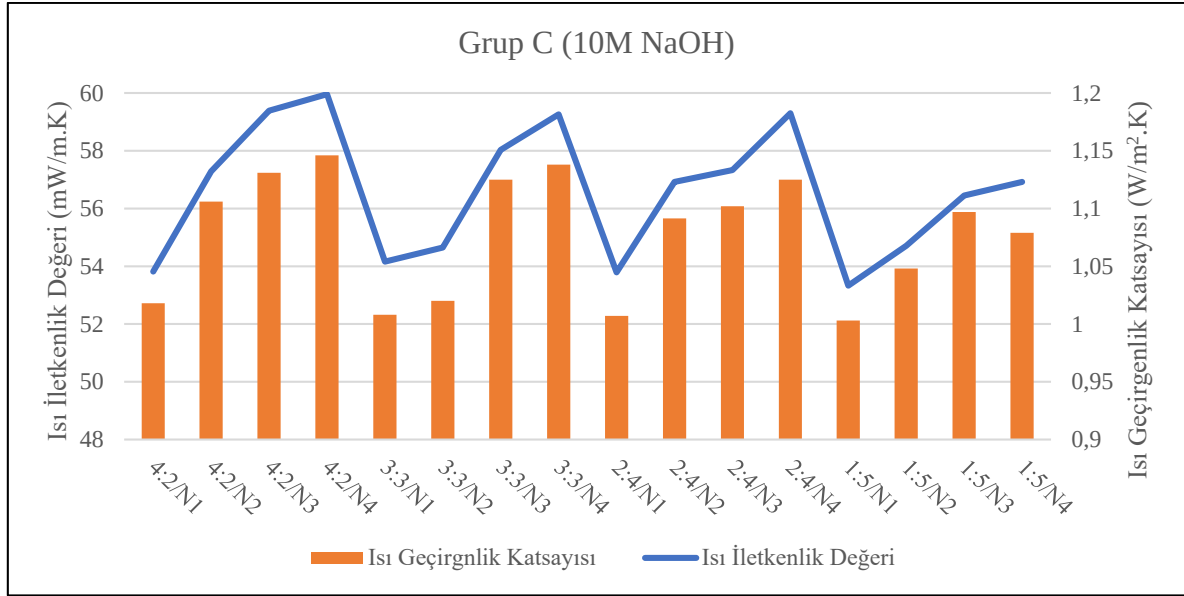


Şekil 4.24. Grup B ısı iletkenlik değeri – ısı geçirgenlik katsayısı

Şekil 4.28 incelendiğinde, 16 numune arasında en düşük ısı iletkenlik değeri $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 1 olan numune B9'da 53,78 mW/m.K olarak ölçülmüştür: Grup B numunelerinin ortalama ısı iletkenlikleri 57,058 mW/m.K olarak belirlenmiştir. Grup B numuneleri 8 M sodyum hidroksit kullanılarak üretilmişlerdir. Numuneler arasında en düşük değerler 1 litre granüler, 5 litre toz GP ile üretilen numunelerde elde edilmiştir. Ayrıca, B grubu numuneleri içerisinde aynı oranlarda GP içeren numuneler arasında $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 1:1 olan numuneler daha düşük ısı iletkenliğe sahiptir. Bununla birlikte, Grup B numuneleri içinde genellikle granüler:toz gp oranı azaldıkça ısı iletkenlik değeri azalmıştır. Bu bilgilere ek olarak, ısı geçirgenlik katsayıları da ısı iletkenliklere paralel değerlere sahiptir.

4.3.3. 10M NaOH ile hazırlanan panellerin ısı iletkenlik değerleri

8M NaOH kullanılarak hazırlanan ve içerisinde bağlayıcı oranı 1 ila 2,5 arasında, farklı oranlarda granüler ve toz GP bulunan numunelere ait ısı iletkenlik değerleri Şekil 4.29'da gösterilmiştir.

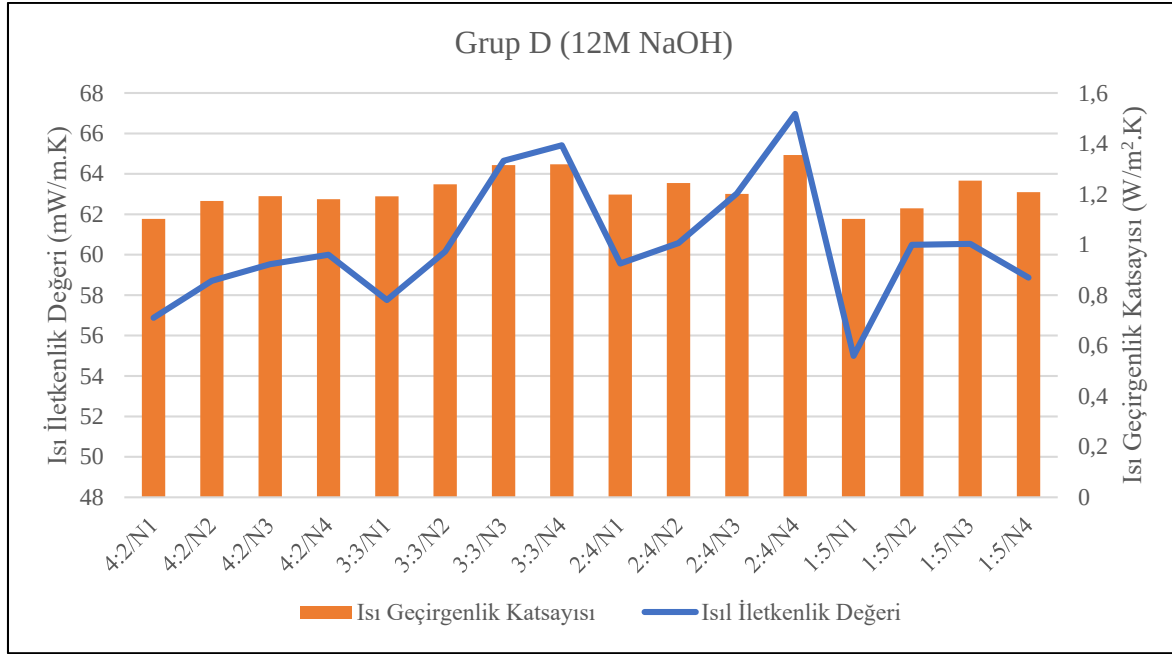


Şekil 4.25. Grup C ısı iletkenlik değeri – ısı geçirgenlik katsayısı

Şekil 4.29 incelendiğinde, 16 numune arasında en düşük ısı iletkenlik değeri $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 1 olan numune C9 ‘da 53,33 mW/m.K olarak ölçülmüştür: Grup C numunelerinin ortalama ısı iletkenlikleri 56,456 mW/m.K olarak belirlenmiştir. Grup C numuneleri 10 M sodyum hidroksit kullanılarak üretilmişlerdir. Numuneler arasında en düşük değerler 1 litre granüler, 5 litre toz GP ile üretilen numunelerde elde edilmiştir. Ayrıca, C grubu numuneleri içerisinde aynı oranlarda GP içeren numuneler arasında $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 1:1 olan numuneler daha düşük ısı iletkenliğe sahiptir. Bununla birlikte, Grup C numuneleri içinde genellikle granüler:toz GP oranı azaldıkça ısı iletkenlik değeri azalmıştır. Bu bilgilere ek olarak, ısı geçirgenlik katsayıları da ısı iletkenliklere paralel değerlere sahiptir.

4.3.4. 12M NaOH ile hazırlanan panellerin ısı iletkenlik değerleri

12M NaOH kullanılarak hazırlanan ve içerisinde bağlayıcı oranı 1 ila 2,5 arasında, farklı oranlarda granüler ve toz GP bulunan numunelere ait ısı iletkenlik değerleri Şekil 4.30’da gösterilmiştir.



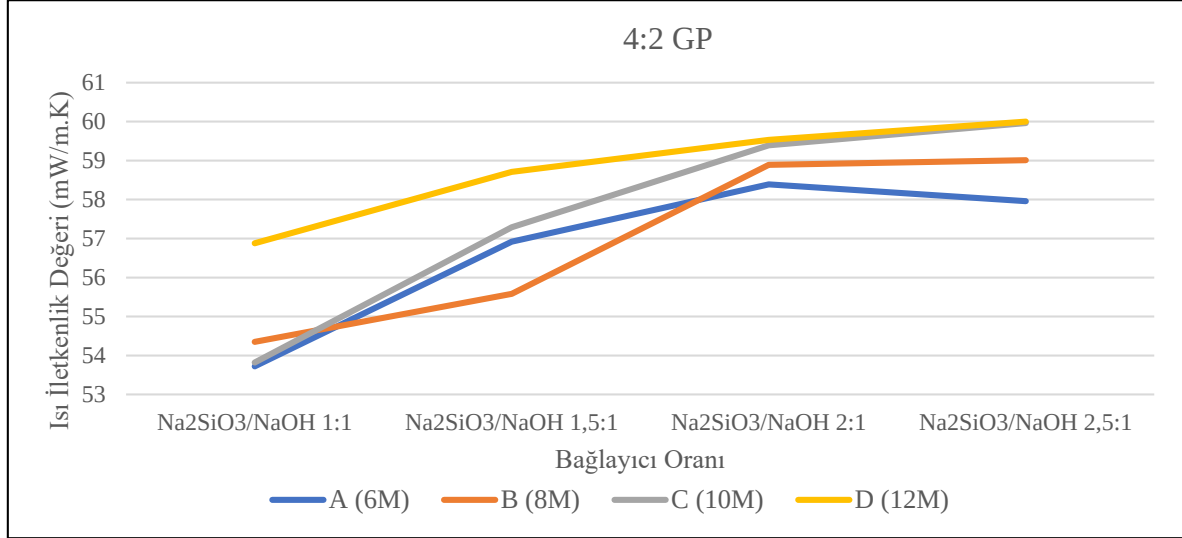
Şekil 4.26. Grup D ısı iletkenlik değeri – ısı geçirgenlik katsayısı

Şekil 4.30 incelendiğinde, 16 numune arasında en düşük ısı iletkenlik değeri $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 1 olan numune D9 ‘da 54,99 mW/m.K olarak ölçülmüştür. Grup D numunelerinin ortalama ısı iletkenlikleri 60,508 mW/m.K olarak belirlenmiştir. Grup D numuneleri 12 M sodyum hidroksit kullanılarak üretilmişlerdir. Numuneler arasında en düşük değer 1 litre granüler, 5 litre toz GP ile üretilen numunelerde elde edilmiştir. Bununla birlikte, D grubu numuneleri içerisinde aynı oranlarda GP içeren numuneler arasında $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 1:1 olan numuneler daha düşük ısı iletkenliğe sahiptir. Ayrıca, D grubu numuneleri arasında D4 ve D8 numunelerinin ısı iletkenlik değerleri 65 mW/m.K değerinden daha yüksek oldukları için ısı yalıtım paneli olarak değerlendirilememektedir. Bu bilgilere ek olarak, ısı geçirgenlik katsayıları da ısı iletkenliklere paralel değerlere sahiptir.

Tüm gruplar arasında en düşük ısı iletkenlik 1 litre granüler ve 5 litre toz GP içeren ve 6 M sodyum hidroksitle üretilen numunelerde görülmüştür. Tüm numuneler arasında ısı iletkenlik değeri 49 mW/m.K ile 67 mW/m.K arasında değişmektedir. Bununla birlikte tüm numuneler arasında en düşük ısı iletkenlik, A10 numaralı numunede 49,19 mW/m.K olarak ölçülmüştür. Gruplar arasında granüler GP oranının azalması ısı iletkenliği olumlu yönde etkilemiş, ısı iletkenlik değerleri de azalmıştır.

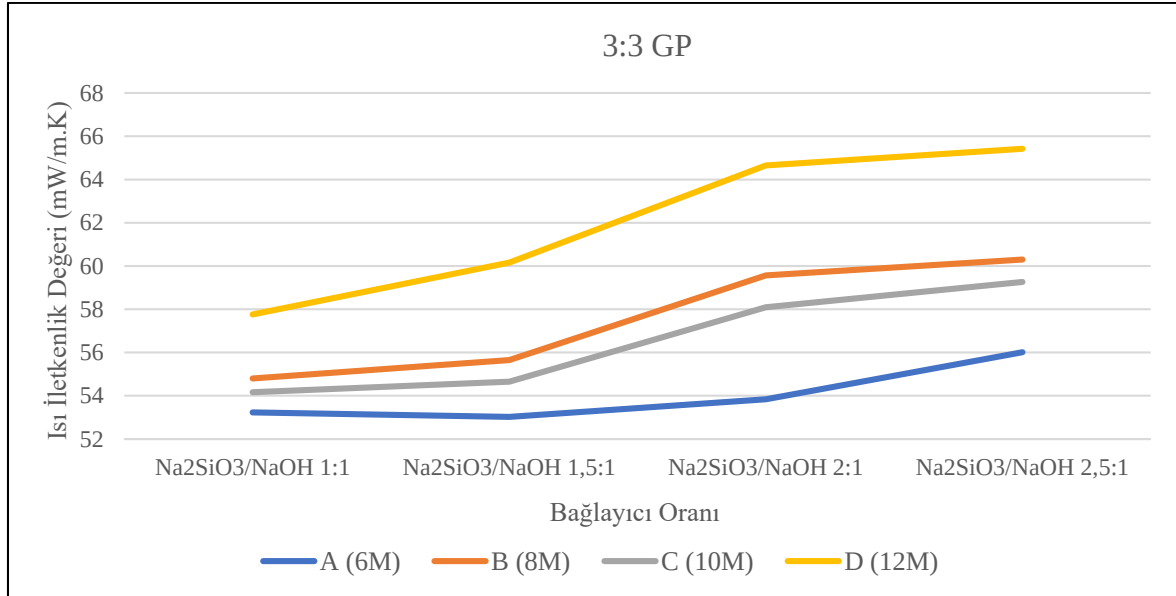
4.3.5. Bağlayıcı oranının panellerin ısı iletkenlik değerine etkisi

Farklı hacimsel oranlarda granüler ve toz GP kullanılarak hazırlanan panellerin bağlayıcı oranına bağlı ısı iletkenlik değerine etkisi Şekil 4.31, Şekil 4.32, Şekil 4.33 ve Şekil 4.34’te gösterilmiştir.



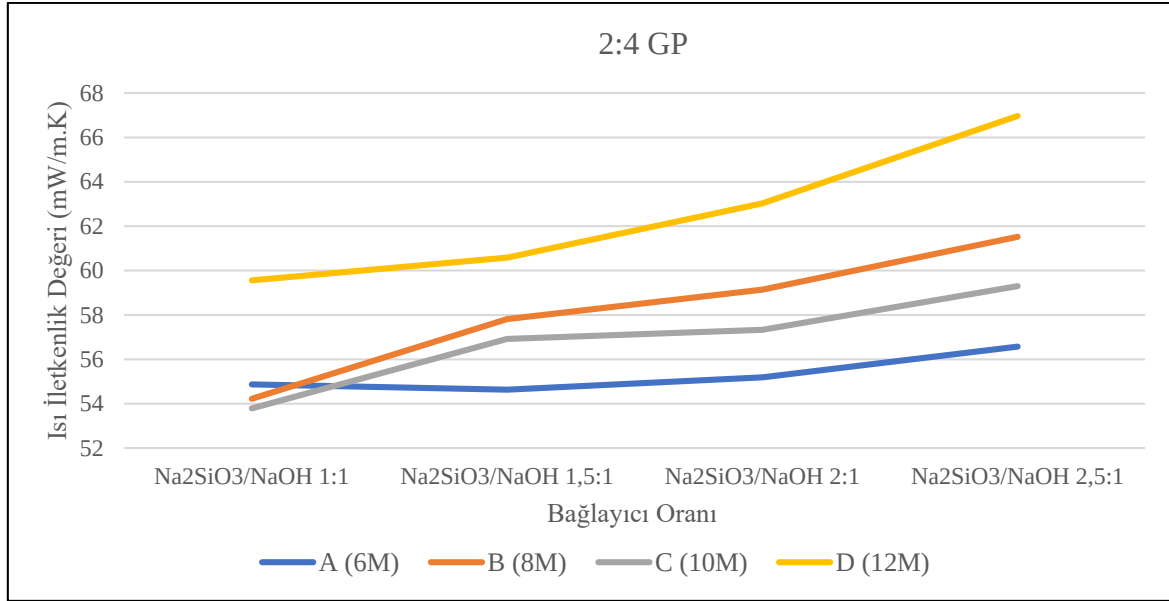
Şekil 4.27. 4 litre granüler, 2 litre toz GP içeren panellerin ısı iletkenlik değerleri

Şekil 4.31’de görülen ısı iletkenlik değerlerine göre numune grupları arasında 4 litre granüler ve 2 litre toz kullanılarak hazırlanan GP esaslı numune gruplarında en iyi değerler A13, C13 ve B13 numunelerinde sırasıyla 53,72, 53,82 ve 54,35 mW/m.K olarak ölçülmüştür. Numuneler arasında Na₂SiO₃/NaOH oranı arttıkça ısı iletkenlik değerleri de artmıştır. 4 litre granüler ve 2 litre toz GP kullanılan numuneler içinde 6 M sodyum hidroksit kullanılan numuneler her oranda en düşük ısı iletkenlik değerine sahipken, 12 M sodyum hidroksit kullanılan numuneler her bağlayıcı oranı için en yüksek ısı iletkenlik değerine sahiptir. Ek olarak, B grubu numunelerinde 1,5:1 bağlayıcı oranında ısı iletkenlik diğer numunelerden daha düşük çıkmıştır.



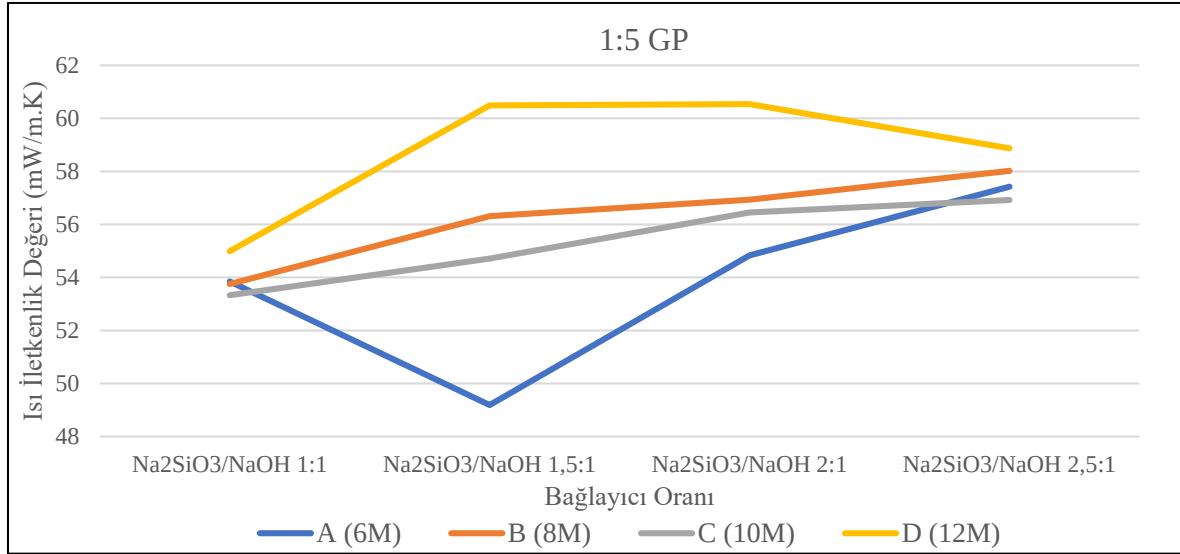
Şekil 4.28. 3 litre granüler, 3 litre toz GP içeren panellerin ısı iletkenlik değerleri

Şekil 4.32’de görülen ısı iletkenlik değerlerine göre numune grupları arasında 3 litre granüler ve 3 litre toz kullanılarak hazırlanan GP esaslı numune gruplarında en iyi değerler A1, A2, A3 numunelerinde sırasıyla 53,23, 53,02, ve 53,84 mW/m.K olarak ölçülmüştür. Genel olarak Na₂SiO₃/NaOH oranı arttıkça ısı iletkenlik değerleri de genel olarak artmıştır ancak sadece A grubu 1,5:1 oranında ısı iletkenlik değeri düşüş göstermiştir. 3 litre granüler ve 3 litre toz GP kullanılan numuneler içinde 6 M sodyum hidroksit kullanılan numuneler her bağlayıcı oranı için en düşük ısı iletkenlik değerine sahipken, 12 M sodyum hidroksit kullanılan numuneler her bağlayıcı oranı için en yüksek ısı iletkenlik değerine sahiptir. Ek olarak, D4 numaralı numune 65 mW/m.K değerinden daha yüksek ısı iletkenliğe sahip olduğu için ısı yalıtım paneli olarak yapı sektöründe kullanılamamaktadır.



Şekil 4.29. 2 litre granüler, 4 litre toz GP içeren panellerin ısı iletkenlik değerleri

Şekil 4.33'te görülen ısı iletkenlik değerlerine göre numune grupları arasında 2 litre granüler ve 4 litre toz kullanılarak hazırlanan GP esaslı numune gruplarında en iyi değerler C5, B5 ve A6 numunelerinde sırasıyla 53.79, 54.22, 54,63 mW/m.K olarak ölçülmüştür. Genel olarak Na₂SiO₃/NaOH oranı arttıkça, ısı iletkenlik değerleri de genel olarak artmıştır ancak sadece A grubu 1,5:1 oranında ısı iletkenlik değeri düşüş göstermiştir. 2 litre granüler ve 4 litre toz GP kullanılan numuneler içinde 6 M sodyum hidroksit kullanılan numuneler 1:1 bağlayıcı oranı dışında her oranda en düşük ısı iletkenlik değerine sahipken, 12 M sodyum hidroksit kullanılan numuneler her bağlayıcı oranı için en yüksek ısı iletkenlik değerine sahiptir. Ek olarak, D8 numaralı numune 65 mW/m.K değerinden daha yüksek ısı iletkenliğe sahip olduğu için ısı yalıtım paneli olarak yapı sektöründe kullanılamamaktadır.



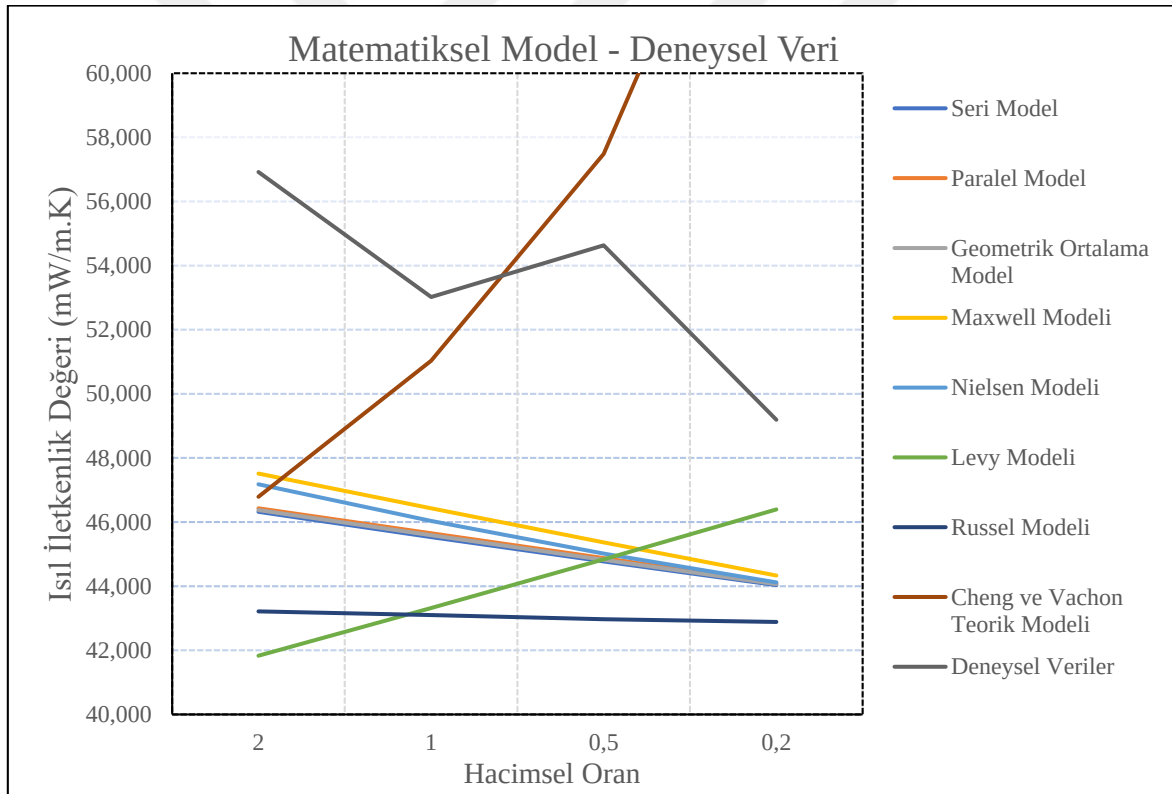
Şekil 4.30. 1 litre granüler, 5 litre toz GP içeren panellerin ısı iletkenlik değerleri

Şekil 4.34’te görülen ısı iletkenlik değerlerine göre numune grupları arasında 1 litre granüler ve 5 litre toz kullanılarak hazırlanan GP esaslı numune gruplarında en iyi değerler A10, C9, ve B9 numunelerinde sırasıyla 49,19, 53,33 ve 53,75 mW/m.K olarak ölçülmüştür. Genel olarak Na₂SiO₃/NaOH oranı arttıkça ısı iletkenlik değerleri de artmıştır ancak sadece A grubu 1,5:1 oranında ısı iletkenlik değeri önemli ölçüde düşüş göstermiştir. 1 litre granüler ve 5 litre toz GP kullanılan numuneler içinde 6 M sodyum hidroksit kullanılan numuneler 1:1 bağlayıcı oranı dışında her oranda en düşük ısı iletkenlik değerine sahipken, 12 M sodyum hidroksit kullanılan numuneler her bağlayıcı oranı için en yüksek ısı iletkenlik değerine sahiptir. Ek olarak, D grubu numunelerinde bağlayıcı oranı 2,5:1 için ısı iletkenlik düşüş göstermiştir.

Tüm gruplar aynı granüler:toz GP oranında ısı iletkenlik değerleri incelendiğinde, genel olarak en düşük değerlere 6 M sodyum hidroksit içeren karışımlarda rastlanırken en yüksek değerlere 12 M sodyum hidroksit içeren karışımlarda rastlanmıştır. Ek olarak aynı derişim oranında bağlayıcı oranının artması numunelerin ısı iletkenliğini olumsuz yönde etkilemiştir. Ancak 1:5, 2:4 ve 3:3 granüler:toz GP içeren A grubu numunelerinde bağlayıcı oranı 1,5 olduğunda ısı iletkenlik değerinde ani düşüşler gözlenmiştir. Son olarak, tüm gruplar arasında en yüksek ısı iletkenlik değerini D8 ve D4 numaralı numunelerinde sırasıyla 66,97 mW/m.K ve 65,42 mW/m.K olarak ölçülmüştür.

4.4. Matematiksel Model ile Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Gözenekli ortamların ısı iletkenliğini etkili bir şekilde tahmin etmek için farklı modeller literatürde yer almaktadır. Literatürde bulunan Seri Model, Paralel Model, Geometrik Ortalama Model, Maxwell Modeli, Nielsen Modeli, Levy Modeli, Russel Modeli, Cheng ve Vachon Teorik Modeli kullanılarak granüler ve toz GP oranına göre tahmini ısı iletkenlik değeri belirlenmiştir. Matematiksel modellerle ısı iletkenlik değeri hesaplanırken, granüler GP hacim oranı baz alınmıştır. Bu nedenle hacimsel oran 2 (4 litre granüler, 2 litre toz), 1 (3 litre granüler, 3 litre toz), 0,5 (2 litre granüler, 4 litre toz) ve 0,2 (1 litre granüler, 5 litre toz) olarak kullanılmıştır. Daha sonra matematiksel model sonuçlarıyla deneysel verinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 4.35'te karşılaştırmalar verilmiştir.



Şekil 4.31. Matematiksel model ve deneysel verilerin karşılaştırılması

Şekil 4.35 incelendiğinde, matematiksel modellerle deneysel sonucun farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Deneysel verilerin karşılaştırılması için en düşük ısı iletkenlik değerine sahip A grubu numuneleri tercih edilmiştir. Deneysel veriler ile teorik hesaplamalarla elde edilen değerler için en yakın sonuç Levy modeli ile elde edilmiştir. Hacimsel oranda (0,2) en düşük ısı iletkenlik değeri 46,39 mW/m.K olarak tespit edilirken, deneysel veride aynı

hacim oranında en düşük değer 49,19 mW/m.K olarak ölçülmüştür. Birçok ısı iletkenlik modelleri, sadece bileşenlerin ısı iletkenlikleri ve hacim oranlarını kullanarak tahmin etmektedir. Bazı ısı iletkenlik modelleri ise, bileşenlerin ısı iletkenlikleri ve hacim oranlarına ilaveten yeni parametreler kullanmaktadır. Bu parametreler, yapıdaki bileşenlerin şekil, boyut, düzen, temas etkisi veya faktörü gibi verilmektedir. Bu nedenle, elde edilen bu sapmanın modellerde malzeme özelliklerinin yanı sıra kalıplama şartlarını da (sıkıştırma kuvveti, ütüleme süresi vb.) içerecek şekilde geliştirilmesiyle azaltılabileceği tespit edilmiştir. Ek olarak, seri model, geometrik ortalama model, Nielsen modeli, paralel model, Maxwell modeli, Russel modeli ve deneysel veri sonuçları incelendiğinde, granüler GP'nin hacimsel oranı azaldıkça, ısı iletkenlik değeri de düşmüştür. Buna karşın, genel olarak granüler GP'nin hacimsel oranı azaldıkça ısı iletkenlik değerleri düşerken Cheng ve Vachon teorik modeli ve Levy modelinde hacim oranı azaldıkça ısı iletkenlik değeri artmıştır.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ülkemizde %70 oranında rezerve sahip GP malzemesinden geopolimer bağlayıcı kullanılarak ısı yalıtım paneli geliştirilmesi amaçlanmıştır. Granüler ve toz GP farklı oranlar olacak şekilde (1:5, 2:4, 3:3, 4:2) kullanılmıştır. Yapılan ön çalışmalar neticesinde belirlenen bağlayıcı karışımında sodyum silikat (Modül 2) ve sodyum hidroksit (6, 8, 10 ve 12 M) kullanılmıştır. Deneysel çalışmada granüler ve toz GP oranı, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı, NaOH derişimi gibi faktörlerin ısı iletkenlik değeri üzerinde etkisi 64 farklı numunede fiziksel, mekanik ve ısı iletkenlik testleri yapılarak belirlenmiştir.

Bu çalışma sonucunda çıkarılan tespitler şunlardır;

- Farklı bölgelerden temin edilen GP, genleştirme sıcaklığı, GP tanelerin farklı gözeneklere sahip olması, tane sıkıştırma basıncı, taşların morfolojik yapısından etkilenmektedir. Bu nedenle, kullanılması planlanan GP için mutlaka birden fazla bölgeden numune istenmeli ve en düşük sonuçların alındığı bölgeden GP temin edilmelidir.
- Bu çalışmada, literatür çalışmalarından farklı olarak iki tane boyutunda (5mm ve 12mm) GP kullanılmıştır. GP, birden fazla tane boyutunda üretilmektedir. Tane boyutuna bağlı olarak malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri farklılık gösterdiği için ısı iletkenlik değeri de değişmektedir. Bu nedenle, geliştirilmesi planlanan ısı yalıtım panelinde iki farklı tane boyutu için en düşük ısı iletkenlik sonucunun elde edildiği ham maddeler kullanılmıştır. Ayrıca, aynı tane boyutu için farklı çuvallardan alınan numunelere yapılan testlerde ısı iletkenlik değerleri %1-3 arasında değişmiştir.
- Granüler (P12mm) ve toz (P05mm) halde bulunan GP'ye ait fiziksel ve kimyasal özellikler incelendiğinde, iki tane boyutu için yangın sınıflarının A1, yanmaz sınıf olduğu görülmüştür. GP numunelerinde görülen yapısal bozulma sıcaklıkları toz ve granüler numune için sırasıyla 885 °C ve 900 °C'dir. Bozulma sıcaklıklarının yüksek olması, GP kullanılarak üretilecek yapı veya ısı yalıtım panellerinde oluşacak istenmeyen bir yangın durumunda yapının kararlılığını koruyarak binanın tahliye edilmesini sağlayacak zamanı tanıyacaktır. Ayrıca, GP kuru birim hacim ağırlığının düşük olması, GP kullanılarak üretilecek yapı panellerinin hafif olmasını ve böylelikle yapının ölü yük ağırlığının

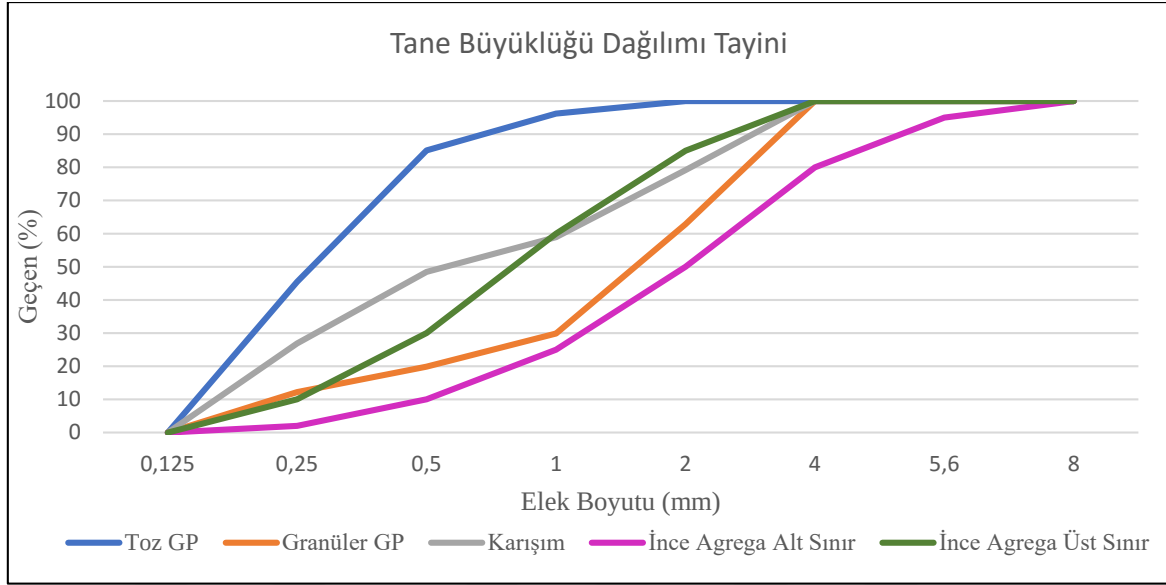
azaltılmasını sağlayacaktır. GP tanecikleri kimyasal bileşimleri incelendiğinde ise %70'den daha fazla oranda SiO_2 ve Al_2O_3 bulunmaktadır. Bu da malzemeye puzolanik özellik kazandırmaktadır.

GP esaslı ısı yalıtım paneli geliştirilmeden çok sayıda ön numune dökülmüştür. Bu ön çalışmada elde edilen veriler şunlardır;

- Literatür çalışmalarının bazılarında bağlayıcı 1 gün oda koşullarında beklerken, bazılarında bekletilmeden karışımlar hazırlanıp harç oluşturulmaktadır (Morsy ve Aglan, 2007; Ramasamy ve diğerleri, 2015). Yapılan ön çalışmalarda aynı koşullarda ve aynı oranda malzeme kullanılarak hazırlanan iki numunede sadece bağlayıcı karışımın bekleme süresi değiştirilerek elde edilen ısı iletkenlik değerlerinde beklemeden hazırlanan panellerde ısı iletkenlik değerleri daha düşük olduğu için bağlayıcı karışımın bekletilmemesi gerekmektedir.
- Literatür çalışmalarında $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı genellikle 0,5, 1, 2, 2,5 oranlarında kullanılmıştır (Yahya ve diğerleri, 2015; Erdoğan, 2011). Yapılan ön çalışmalarda bu oranın 1:1'den daha düşük kullanılması, GP malzemelerini bağlamakta yetersiz kalmış, kür uygulamasından sonra numunelerin neredeyse hepsi çatlamış ve birçoğu kırıldığı için bu oran kullanılmamıştır. Bu oranın 2,5:1'den daha yüksek kullanımı ise GP malzeme özelliklerini iyileştirse de hem yoğunluğunun artmasına hem de ısı iletkenlik değerinin $>65 \text{ mW/m.K}$ 'den fazla çıkmasına neden olduğu için bu oran kullanılmamıştır.
- Literatür çalışmalarında ısı yalıtım panelinin hazırlanması kadar kür uygulaması da istenilen panel özelliklerinin elde edilmesi için önemli bir paya sahiptir. Literatür çalışmaları incelendiğinde farklı kür sıcaklıkları uygulansa da yaygın olarak 60°C ve 105°C tercih edilmiştir (Usha, Nair ve Vishnudas, 2014; (Wang, Li ve Yan, 2005; Zeybek, 2009; Swanepoel ve Strydom, 2002). Yapılan ön çalışmalar neticesinde, 105°C 'de kür uygulandığında panellerin kısa bir süre sonra hızlı buharlaşma etkisiyle çatladığı ve kullanılamaz hale geldiği görülmüştür. Bu nedenle kür uygulama sıcaklığı 60°C olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, geopolimerizasyona bağlı reaksiyonun devam etmesi için kür süresi 48 saate uzatılmıştır.

Deneysel çalışmalarla birlikte panellerin fiziksel, mekanik ve ısı özellikleri belirlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen veriler şunlardır;

- Deneysel çalışmaların neticesinde, panellerin ilk olarak görünür yoğunlukları belirlenmiştir. 300*300*50 mm kalıptan çıkarılan ve 60 °C'de kür uygulanan panellerin ağırlık kayıpları %13 ila %23 arasında değişmiştir. Bu ağırlık kayıpları numune içerisinde bulunan sudan kaynaklanmaktadır. Kür sonrası ölçülen ağırlık, uzunluk, genişlik ve kalınlıklarının değişimine bağlı olarak görünür yoğunluk değerlerinde değişiklikler görülmüştür.
- Çalışmalarda özellikle sodyum hidroksit derişimi ve bağlayıcı miktarı arttıkça görünür yoğunluğun da aynı oranda arttığı tespit edilmiştir. Farklı oranlarda granüler ve toz GP kullanılan karışımlarda en düşük yoğunluk değerleri 1 litre granüler ve 5 litre toz içeren karışımlarda görülürken, en yüksek yoğunluk değerleri 2 litre granüler ve 4 litre toz içeren karışımlarda rastlanmıştır. Karışımların tane boyutları incelendiğinde, granüler:toz GP oranının azalmasıyla görünür yoğunluk değerleri de azalmıştır. 4 grup arasında en düşük görünür yoğunluk 1:5 granüler:toz GP, 6M sodyum hidroksit ve Na₂SiO₃/NaOH oranı 2,5 olan A10 numaralı numunede 133,267 kg/m³ olarak ölçülmüştür. Ayrıca, görünür yoğunluğun ısı iletkenlik değeri üzerinde doğrudan bir etkisi vardır.
- GP esaslı panellerde fiziksel özellikler için panel genişlik, uzunluk ve kalınlık değerleri 240*240*50 mm'ye göre tasarlanmıştır. Ancak, panellere ait uzunluk, genişlik ve kalınlık değerlerinde üretim aşamalarında değişimler gözlenmiştir. Bu farklılıklara harcın düzgün kalıplanamaması, kür işlemi sonrasında daralan panel, kalıptan çıkarılırken panelin hasar görmesi ve etüv fırınında yaşanan olumsuzluklar neden olmaktadır. Ek olarak, panellerin yüzeylerinde herhangi bir sapma olmamıştır.
- Şekil 5.1'de Granüler ve toz GP taneciklerine, bu iki taneyi içeren karışıma ve ASTM C33 standardına göre ince agrega alt ve üst sınır tane büyüklüğü dağılımı sonuçları gösterilmiştir. Şekil 5.1 incelendiğinde, granüler ve toz GP tanecikleri çok ince yapıları malzemeler olmakla birlikte, en iri taneli GP taneciği en fazla 4 mm elek boyutu kadardır. Ek olarak ince agrega sınır değerleri incelendiğinde, sınır değerleri arasında uygun granülometri granüler GP numunesinde elde edilmiştir.



Şekil 5.1. Tane büyüklüğü dağılımı tayini sonuçları

- Gevşek yığın yoğunluğu ve boşluk yüzdesinin belirlenmesi için yapılan test sonucunda, Toz GP'nin boşluk yüzdesi %24,303 iken, granüler GP'nin boşluk yüzdesi %3,093 olarak tespit edilmiştir. Tane boyu dağılımı farkı çok fazla olmamasına rağmen, boşluk yüzdesi iki tür tanecik için değişiklik göstermiştir. Isı yalıtım panellerinin düşük ısıl iletkenliğe sahip olmasını sağlayan boşluk yüzdeleri olduğu düşünülürse, en düşük ısıl iletkenlik değerlerine toz GP içeren panellerde rastlanılması mümkündür.
- GP içeren 64 farklı panelin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için eğilme ve basınç deneyleri uygulanmıştır. Paneller arasında en yüksek basınç dayanımı, 2 litre granüler, 4 litre toz GP, 12 M sodyum hidroksit ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 2,5 oranı kullanılarak hazırlanan D8 numaralı panelde 147,7398 kPa ve eğilme dayanımı 9,4271 kPa olarak ölçülmüştür. Veriler incelendiğinde, en yüksek basınç değerleri sodyum hidroksit derişimi ve bağlayıcı oranının artmasıyla elde edilmiştir. Ayrıca, granüler:toz GP oranının artması basınç dayanımını arttırmıştır. Ayrıca, panellerin bağlayıcı oranına bağlı olarak değişen basınç dayanımları arasındaki yüzdesel ilişki Çizelge 5.1'de verilmiştir. Çizelge 5.1 incelendiğinde, bağlayıcı oranının ve yoğunluğun basınç dayanımı üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. Bağlayıcı oranın en yüksek olduğu 2,5:1 oranında genellikle değişimin daha fazla olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.1. Numunelerin basınç dayanımlarındaki yüzdesel değişim değerleri

Na ₂ SiO ₃ /NaOH	6M	8M	10M	12M
4 litre granüler ve 2 litre toz				
1:1 - 1,5:1	57,02	12,94	30,31	27,47
2:1 - 1,5:1	13,89	5,52	7,68	8,03
2,5:1 - 2:1	-7,37	21,72	16,23	2,47
3 litre granüler ve 3 litre toz				
1:1 - 1,5:1	-4,29	4,33	4,33	0,31
2:1 - 1,5:1	28,84	24,16	39,77	6,03
2,5:1 - 2:1	14,86	5,90	16,87	17,64
2 litre granüler ve 4 litre toz				
1:1 - 1,5:1	-0,17	0,00	49,80	7,60
2:1 - 1,5:1	0,33	3,30	1,85	2,68
2,5:1 - 2:1	13,02	19,17	13,00	31,66
1 litre granüler ve 5 litre toz				
1:1 - 1,5:1	-28,27	-3,00	30,70	27,99
2:1 - 1,5:1	39,63	6,19	18,89	7,60
2,5:1 - 2:1	3,30	17,78	3,43	2,47

- Deneysel çalışma sonucunda hazırlanan, granüler ve toz GP içeren paneller arasında ısı iletkenlik değerinin 49 mW/m.K ile 67 mW/m.K arasında değiştiği tespit edilmiştir. Tüm gruplar arasında en düşük ısı iletkenlik 1 litre granüler ve 5 litre toz GP içeren, 6 M sodyum hidroksit ve Na₂SiO₃/NaOH 1,5 oranı kullanılarak hazırlanan A10 numaralı panelde 49,19 mW/m.K olarak ölçülmüştür. Tüm veriler incelendiğinde, en düşük ısı iletkenlik değerlerine 6M sodyum hidroksit, Na₂SiO₃/NaOH 1:1 olan panellerden elde edilmiştir. Buradan hareketle, ısı iletkenlik ile görünür yoğunluk ve basınç dayanımı arasında doğru orantılı bir bağıntı olduğu tespit edilmiştir. Görünür yoğunluk azaldıkça ısı iletkenlik değeri azalırken, basınç dayanımı da azalmıştır. Ancak görünür yoğunluğun artması hem ısı iletkenlik değerini hem de basınç dayanımını arttırmaktadır. Bununla birlikte, panellerin bağlayıcı ve GP oranına bağlı olarak değişen ısı iletkenlik değerleri arasındaki yüzdesel ilişki Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2 incelendiğinde, ısı iletkenlik değerlerinin bağlayıcı oranının artmasına bağlı olarak yüzdesel değişimi ayrıntılı olarak görülmektedir. Değerler arasında ısı iletkenlik artışı en çok Na₂SiO₃/NaOH oranı 1,5:1’den 2:1’e çıktığında gözlenmiştir.

Çizelge 5.2. Numunelerin ısı iletkenlik değerlerindeki yüzdesel değişim değerleri

Na ₂ SiO ₃ /NaOH	6M	8M	10M	12M
4 litre granüler ve 2 litre toz				
1:1 - 1,5:1	5,96	2,26	6,45	3,22
2:1 - 1,5:1	2,58	5,96	3,67	1,40
2,5:1 - 2:1	-0,74	0,20	0,96	0,79
3 litre granüler ve 3 litre toz				
1:1 - 1,5:1	-0,39	1,55	0,90	4,16
2:1 - 1,5:1	1,55	7,04	6,29	7,46
2,5:1 - 2:1	4,03	1,23	2,01	1,19
2 litre granüler ve 4 litre toz				
1:1 - 1,5:1	-0,44	6,62	5,82	1,71
2:1 - 1,5:1	1,03	2,30	0,72	4,04
2,5:1 - 2:1	2,50	4,02	3,44	6,25
1 litre granüler ve 5 litre toz				
1:1 - 1,5:1	-8,65	4,76	2,59	10,00
2:1 - 1,5:1	11,47	1,10	3,18	0,08
2,5:1 - 2:1	4,72	1,91	0,83	-2,76

- Gözenekli ortamların ısı iletkenliğini etkili bir şekilde tahmin etmek için Seri Model, Paralel Model, Geometrik Ortalama Model, Maxwell Modeli, Nielsen Modeli, Levy Modeli, Russel Modeli, Cheng ve Vachon Teorik Model kullanılarak granüler ve toz GP oranına göre tahmini ısı iletkenlik değerleri belirlenmiştir. Çizelge 5.3'te deneysel veri ile matematiksel model sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.3. Matematiksel modeller ile elde edilen ısı iletkenlik değerleri

Matematiksel Model (mW/m.K)	Hacimsel Oran			
	2	1	0,5	0,2
Seri Model	46,321	45,533	44,771	44,034
Paralel Model	46,428	45,652	44,875	44,098
Geometrik Ortalama Model	46,375	45,592	44,822	44,065
Maxwell Modeli	47,514	46,428	45,368	44,333
Nielsen Modeli	47,180	46,036	45,019	44,116
Levy Modeli	41,831	43,318	44,838	46,393
Russel Modeli	43,216	43,100	42,970	42,885
Cheng and Vachon Teorik Modeli	46,789	51,034	57,480	69,938
Deneysel Veri	56,92	53,02	54,63	49,19

- Çizelge 5.3 incelendiğinde, oranları teorik ısı iletim katsayısı tespit modelleri ile belirlenen farklı tane boyutuna ve ısı iletim katsayısına sahip GP malzemelerin karışımı yapılarak elde edilen panellerin ısı iletim katsayıları deneysel olarak da ölçüldüğünde, sonuçların birbirlerine yakın olduğu görülmüştür. Fakat harç bünyesine katılan bağlayıcının harç aşamasında sıvı ve kür sonrasında form değiştirerek jel formunu alması, buna bağlı olarak özelliklerinin değişmesi, kür şartlarına bağlı olarak bünyedeki nem

dengesinin ve/veya oranının değişmesi, kalıplama sonrası yoğunluk değişimlerinin yaşanması nedeniyle; son ürünün ısı iletim katsayısını tespit etmede modellerin sapmalar gösterdiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, deneysel veriler ile teorik hesaplamalarla elde edilen değerlerde en düşük ısı iletkenlik değeri için en yakın sonuç Levy modeli ile elde edilmiştir. Hacimsel oranda (0,2) en düşük ısı iletkenlik değeri 46,39 mW/m.K olarak tespit edilirken, deneysel veride aynı hacim oranında en düşük değer 49,19 mW/m.K olarak ölçülmüştür. Ek olarak, seri model, geometrik ortalama model, Nielsen modeli, paralel model, Maxwell modeli, Russel modeli ve deneysel veri sonuçları incelendiğinde granüler GP'nin hacimsel oranı azaldıkça, ısı iletkenlik değeri de azalmıştır. Buna karşın, genel olarak granüler GP'nin hacimsel oranı azaldıkça ısı iletkenlik değeri azalırken Cheng ve Vachon teorik modeli ve Levy modelinde hacim oranı azaldıkça ısı iletkenlik değeri artmıştır. Levy modeli 0,2 hacimsel oranında en yakın değeri verse de diğer oranlar için uygun değildir.

- Genel olarak hacimsel oranlara bağlı ısı iletkenlik değerleri incelendiğinde, seri model, geometrik ortalama model, Nielsen modeli, paralel model, Maxwell modeli, Russel modeli daha uygundur. Ek olarak, bu modeller arasında değerlerin farkı çok düşük seviyededir. Birçok ısı iletkenlik modelleri, sadece bileşenlerin ısı iletkenlikleri ve hacim oranlarını kullanarak tahmin etmektedir. Bazı ısı iletkenlik modelleri ise, bileşenlerin ısı iletkenlikleri ve hacim oranlarına ilaveten yeni parametreler kullanmaktadır. Bu parametreler, yapıdaki bileşenlerin şekil, boyut, düzen, temas etkisi veya faktörü gibi verilmektedir. Bu nedenle, elde edilen bu sapmanın modellerde malzeme özelliklerinin yanı sıra kalıplama şartlarını da (sıkıştırma kuvveti, ütüleme süresi vb.) içerecek şekilde geliştirilmesiyle azaltılabileceği tespit edilmiştir.
- GP içeren ısı yalıtım panellerinde en düşük ısı iletkenliğe sahip numunelerin düşük dayanıma sahip olduğu için basınç dayanımı iyileştirmek amacıyla numunelere ilave olacak şekilde silis dumanı, toplam bağlayıcı miktarının %5, %10 ve %15'i olacak şekilde karışıma ilave edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, silis dumanı yüzdesi arttıkça ısı iletkenlik değeri de artmıştır. Ancak, A6 panelinde %5 silis dumanı ilavesi ile ısı iletkenlik %6 oranında azalmıştır. Ek olarak, silis dumanı ilavesinin basınç dayanımını olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir. Ancak, basınç dayanım değerleri incelendiğinde, önemli derecedeki artış %10 silis dumanı ilavesinde görülmüştür. Genel olarak ısı iletkenlik, mekanik ve fiziksel özellikler incelendiğinde, silis dumanı ilavesinin

genel olarak numunelerin yoğunluğu ve buna bağlı olarak basınç dayanımını arttırdığı ancak ısı iletkenlik değerini olumsuz etkilediği tespit edilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde, GP'in ısı yalıtım paneli olarak kullanımındaki üstün özelliklerinin yanında olumsuz özelliklere de sahiptir. Bu özellikler;

- Ham perlite uygulanan genleştirme işlemi sonucunda GP'nin hacmi 10 ila 30 kat oranında genleştiğinden kütle ve hacim arasında çok büyük farklar meydana gelmektedir. Bu nedenle, GP'nin maden ocağından kullanıcıya ulaştırılma maliyeti yükselmektedir.
- Diğer yalıtım panellerine kıyasla düşük yoğunluğa sahip GP'nin özellikle katkı malzemesi olarak kullanıldığı uygulamalarda, karışım içerisinde homojen olarak dağılımı olumsuz etkilemektedir.
- GP esaslı paneller, genellikle gevrek yapıdadırlar ve bu nedenle ürünlerin hem nakliyesi hem de son kullanıcı tarafından uygulanması sırasında polimer esaslı malzemelere göre daha titiz çalışılması gerekmektedir.
- Doğal gözenekli yapısı nedeniyle, GP su emme özelliğine sahiptir. Son ürüne dönüştürülme sırasında, bu özelliği ortadan kaldıracak birtakım önlemlerin alınması gerekmektedir.
- Mevcut ısı yalıtım panellerinin uzun zamandır kullanılıyor ve kısmen ihtiyaçları karşılıyor olması, yeni bir ısı yalıtım panelinin toplum tarafından benimsenmesini ve tercih edilmesini zorlaştırmaktadır.

Tespit edilen bu olumsuz sayılabilecek özellikler, toplum tarafından benimsenen ısı yalıtım panellerinin kullanımı sırasında karşılaşılan “tutuşma ve yanma sonucunda ortaya çıkan zararlı gazlar gibi” olumsuz özellikler düşünüldüğünde, bu olumsuz etkinin önüne geçmektedir. Tutuşma ve yanma sonucunda ortaya çıkan toksisite, zehirli gaz çıkışı, ısının artması hem insan hayatına ve sağlığına hem de mal kaybına sebep olmaktadır. Bu ve buna benzer durumlar, GP esaslı ısı yalıtım panellerinin birim maliyetlerini daha avantajlı hale getirmektedir.

Yapılan çalışma ile yeni nesil, istenilen ısı dirençleri sağlayabilecek, projelendirme aşamasında TS 825 standardına uygun olarak kullanılabilir, ısı iletim katsayısı 49,19 mW/m.K değerinde olan ve büyük ölçüde yerli hammaddeler kullanılarak bir ısı yalıtım paneli geliştirilmiştir. Geliştirilen bu ısı yalıtım malzemesi 133,267 kg/m³ yoğunluğunda, 58,77 KPa basınç dayanımına sahip ve yanmaz (organik madde miktarı ortalama %7) özelliğe sahip, ısı yalıtım paneli olarak kullanılabilir. Bu tez çalışması ile hem literatüre yeni bir ürün hem de ülkemize yerli bir ürün kazandırılmıştır.

Mevcut çalışma sonuçlarına bağlı olarak aşağıdaki konular üzerinde ilave çalışmalar da gerçekleştirilebilir;

- GP esaslı ısı yalıtım paneli düşük dayanım değerlerine sahip olduğu için kullanımı sınırlanmaktadır. Bu kapsamda karışım içerisine veya panel üzerine uygulanabilir malzemelerle dayanım özelliğinin iyileştirilmesi
- GP esaslı ısı yalıtım panelinin kullanılabilirliğinin artırılması amacıyla su emme sorununa çözüm getirilmesi



KAYNAKLAR

- Abdulkareem, O., Mustafa Al Bakri, A., Kamarudin, H., Nizar, I. ve Saif, A. (2014). *Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolymer paste, mortar and lightweight concrete*. Construction and Building Materials, 50, 377-387.
- Abdullah, M., Hussin, K., Bnhussain, M., Ismail, K. ve Ibrahim, W. (2011). *Mechanism and chemical reaction of fly ash geopolymer cement- a review*. International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology, 6(1), 35-44.
- Aditya, L., Mahlia, T., Rismanchi, B., Ng, H., Hasan, M., Metselaar, H. ve Aditiya, H. (2017). *A review on insulation materials for energy conservation in buildings*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 73(C), 1352-1365.
- Aglan, H., Morsy, M., Allie, A. ve Fouad, F. (2009). *Evaluation of fiber reinforced nanostructured perlite-cementitious surface compounds for building skin applications*. Construction and Building Materials, 23(1), 138-145.
- Akıncı, H. (2007). *Günümüzde, uygulanan ısı yalıtım malzemeleri, özellikleri, uygulama teknikleri ve fiyat analizleri*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Al-Bakri, A.M., Kamarudin, H., Bnhussain, M., Rafiza, A. ve Zarina, Y. (2012). *Effect of $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratios and NaOH molarities on compressive strength of fly ash based geopolymer cement*. A Journal of the American Concrete Institute, 109(5), 503-508.
- Alama, M., Singh, H., Brunner, S. ve Naziris, C. (2014). *Experimental characterisation and evaluation of the thermo-physical properties of expanded perlite—Fumed silica composite for effective vacuum insulation panel (VIP) core*. Energy and Buildings, 69, 442-450.
- Al-Homoud, M. (2005). *Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials*. Building and Environment, 40(3), 353-366.
- Altınışik, K. (2006). *Isı Yalıtımı*. Ankara:Nobel Yayınları.
- Argunhan, Z., Oktay, H. ve Dogmus, R. (2016). *Investigation of the thermal and acoustic performance of perlite based building materials*. European Journal of Technic, 6(1), 26-36.
- Arifuzzaman, M. ve Kim, H. (2014). *Development of new perlite/sodium silicate composites*. International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering, 94-101.
- Arifuzzaman, M. ve Kim, H. (2015). *Novel mechanical behaviour of perlite/sodium silicate composites*. Construction and Building Materials, 93, 230-240.
- Astutiningsih, S. ve Liu, Y. (2005). *Geopolymerisation of Australian slag with effective dissolution by the alkali*. Proceedings of the World Congress Geopolymer, Saint Quentin, 69-73.

- Ayberk, M. (1995). *Perlitin yapı gereci olarak kullanımı ve yapı maliyetine etkisi*. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, 203-206.
- Azimi, E., Mustafa Al Bakri Abdullah, M., Ming, L., Yong, H., Hussin, K. ve Aziz, I. (2016). *Processing and properties of geopolymers as thermal insulating materials: A review*. Reviews on advanced materials science, 44(3), 273-285.
- Balo, F., Ucar , A. ve Yücel, H. (2010). *Development of the insulation materials from coal fly ash, perlite, clay and linseed oil*. Ceramics – Silikáty, 54(2), 182-191.
- Barnett, M.K. (1958). *Sadi Carnot and the second law of thermodynamics*. Osiris, 13, 333-357.
- Bart, G. (1994). *Thermal conduction in nonhomogeneous and phase change media*. Doktora Tezi. The Netherlands, Delft University of Technology, Netherlands.
- Bayraktar, D. ve Bayraktar, E. (2016). *Mevcut binalarda ısı yalıtımı uygulamalarının değerlendirilmesi*. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7(1), 59-66.
- Beck, A. (1976). *An improved method of computing the thermal conductivity of fluid-filled sedimentary rocks*. Geophysics, 41, 133-144.
- Bektaş, V., Çerçevik, A. ve Yerel Kandemir, S. (2017). *Binalarda ısı yalıtımının önemi ve ısı yalıtım malzemesi kalınlığının yalıtıma etkisi*. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 4(1), 36-42.
- Belova, I. ve Murch, G. (2004). *Monte carlo simulation of the effective thermal conductivity in two-pase material*. Journal of Materials Processing Technology, 741-745.
- Bıykoğlu, A. (2012). *Türkiye İklimlendirme Sanayi Sektör Raporu*. TOBB İklimlendirme Meclisi.
- Bing-hui, M., Zhu, H., Xue-min , C., Yan, H. ve Si-yu, G. (2014). *Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers*. Applied Clay Science, 99, 144-148.
- Binici, H. ve Kalaycı, F. (2015). *Production of perlite based thermal insulating material*. International Journal of Academic Research and Reflection, 3(7), 47-54.
- Bulgurcu, H. (2009). *Genleşmiş perlit içeren çimento ve alçı bağlayıcılı yapı malzemelerinin ısı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*. ULIBTK 09 17.Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Sivas.
- Bulut, Ü. ve Tanaçan, L. (2009). *Perlitin puzolanik aktivitesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi Dergisi, 8(1), 81-89.
- Can, A. (2013). *Enerji verimli bina ısıtılmasının termodinamik ve ekonomik değerlendirilmesi*. 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, 1073-1090.
- Candan , N. (2007). *Isı yalıtım sistemleri ve özelliklerinin karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- Carson, J. (2006). *Review of effective thermal conductivity models for foods*. International Journal of Refrigeration, 29, 958-967.
- Carson, J., Lovatt, S., Tanner, D. ve Cleland, A. (2003). *An analysis of the influence of material structure on the effective thermal conductivity of therotical porous materials using finite element simulations*. International Journal of Refrigeration, 26, 873-880.
- Carson, J., Lovatt, S., Tanner, D. ve Cleland, A. (2005). *Thermal conductivity bounds for isotropic porous materials*. International Journal Heat and Mass Transfer, 48(11), 2150-2158.
- Cernuschi, F., Ahmaniemi, S., Vuoristo, P. ve Mantyla, T. (2004). *Modelling of thermal conductivity of porous materials: Application to thick thermal barrier coatings*. Journal of the European Ceramic Society, 24, 2657-2667.
- Chaipanich, A., Rianyai, R. ve Nochaiya, T. (2017). *The effect of carbon nanotubes and silica fume on compressive strength and flexural strength of cement mortars*. Materials Today: Proceedings, 4(5), 6065-6071.
- Cheng , T. ve Chiu, J. (2003). *Fire-resistant geopolymers produced by granulated blast furnace slag*. Minerals Engineering, 16, 205-210.
- Cheng, S. ve Vachon, R. (1970). *A technique for predicting the thermal conductivity of suspensions, emulsions and porous materials*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 13, 537-546.
- Çelik, A., Kılıç, A. ve Çakal, G. (2013). *Expanded perlite aggregate characterization for use as a lightweight construction raw material*. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 49(2), 689-700.
- Çelik, A., Kılıç, A. ve Akkurt, F. (2014). *Yapı malzemesi üretiminde genişletilmiş perlit agregası kullanılabilirliğinin araştırılması*. Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29, 451-458.
- Çomaklı, K. ve Yüksel, B. (2003). *Optimum insulatio hickness of external walls for enery saving*. Applied Thermal Engineering, 23, 473-479.
- Dağsöz, A., Bayraktar, K. ve Ünveren, H. (2001). *Enerji tasarrufu yönünden standartların yetersizliği*. Mühendis ve Makina, 506(1), 45-48.
- Davidovits, J. (1988). *Geopolymer chemistry and properties*. Proceedings of the 1st International Conference on Geopolymer '88, Compiegne, 25-48.
- Demirboğa, R. ve Gül, R. (2003a). *The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete*. Cement and Concrete Research, 33, 723-727.
- Demirboğa, R. ve Gül, R. (2003b). *Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures*. Energy and Buildings, 35, 1155-1159.

- Devlet Planlama Teşkilatı. (2001). *Madencilik özel ihtisas komisyonu raporu*. Ankara: Devlet Planlama Teşkilatı.
- Dikici, T. (2010). *Taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Doğan, H. ve Şener, F. (2004). *Hafif yapı malzemelerinin kullanımının yaygınlaştırılmasına yönelik sonuç ve öneriler*. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Haber Bülteni, 1, 51-53.
- Doğan, H. ve Yılankırkan, N. (2015). *Türkiye'nin enerji verimliliği potansiyeli ve projeksiyonu*. Gazi University Journal of Science Part C, 3(1), 375-383.
- Dubois, S. ve Lebeau, F. (2013). *Design, construction and validation of a guarded hot plate apparatus for thermal conductivity measurement of high thickness crop-based specimens*. Materials and Structures, 48(1-2), 407-421.
- Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi. (2014). *Enerji raporu 2013*. Ankara: Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2010). *2010-2014 Stratejik planı*. Ankara: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.
- Engin, S. (2012). *Binaların ısıtılmasında enerji verimliliğinin termodinamik değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Erdoğan, S. (2011). *Use of perlite to produce geopolymers*. 31st Cement and Concrete Science Conference Novel Developments and Innovation in Cementitious Materials, London.
- Eti Maden İşletmesi Müdürlüğü. (2015). *Faaliyet raporu*. Ankara: Eti Maden İşletmesi Müdürlüğü.
- Feng, J., Zhang, R., Gong, L., Li, Y., Cao, W. ve Cheng, X. (2015). *Development of porous fly ash-based geopolymer with low thermal*. Materials and Design, 65, 529-533.
- Fitzpatrick-Schmidt, K., Horsley, C., Tsakopoulos, D. ve Zhang, Y. (2015). *Geopolymer - The Green Cement*. Faculty of Worcester Polytechnic Institute, 1-50.
- Fu, S. ve Mai, Y. (2003). *Thermal conductivity of misaligned short-fiber-reinforced polymer composites*. Journal of Applied Polymer Science, 88, 1497-1505.
- Gandage, A., Vinayaka Raob, V. R., Sivakumar, M. V., Vasan, A., Venu, M. ve Yaswanth, A. (2013). *Effect of perlite on thermal conductivity of self compacting*. 2nd Conference of Transportation Research Group of India, 188-197.
- Gemci, R. (1996). *Lif Takviyeli polimer kompozit malzeme, melerde aşınma ve ısı iletimlerinin iyileştirilmesi*. Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

- Görhan, G. ve Kürklü, G. (2014). *The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures*. Composites: Part B, 58, 371-377.
- Granizo, M., Blanco-Varela, M. ve Martí'nez-Ramí'rez, S. (2007). *Alkali activation of metakaolins: parameters affecting mechanical, structural and microstructural properties*. Journal of Material Science, 42(9), 2934-2943.
- Guades, E. J. (2016). *Experimental investigation of the compressive and tensile strengths of geopolymer mortar: The effect of sand/fly ash (S/FA) ratio*. Construction and Building Materials, 127, 484-493.
- Gündeşli, U. (2008). *Uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun beton ve çimento katkısı olarak kullanımı üzerine bir kaynak taraması*. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Gündüz, L., Şapçı, N. ve Bekar, M. (2006). *Bims betonların genleştirilmiş perlit agregalar ile teknik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine teknik bir analiz*. 4. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, 1-12.
- Halphin, J. (1969). *Stiffness and expansion estimates for oriented short fiber composites*. Journal of Composite Materials, 3(4), 732-734.
- Hemra, K. ve Aungkavattana, P. (2016). *Effect of cordierite addition on compressive strength and thermal stability of metakaolin based geopolymer*. Advanced Powder Technology, 27, 1021-1026.
- Hoşkara, E. (2007). *Ülkesel koşullara uygun sürdürülebilir yapı için stratejik yönetim modeli*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Isı Su Ses ve Yangın Yalıtımcıları Derneği. (2017) *Isı Yalıtımı*. İstanbul:İZODER Yayınları, 52.
- İlkeda, K. (1988). *Consolidation of mineral powders by the geopolymer binder technique for materials use*. Journal of the Mining and Materials Processing Institute of Japan, 144, 497-500.
- İMO Yapı Malzemeleri Komisyonu. (2015). *Binalarda ısı yalıtımı ve ısı yalıtım malzemeleri*. Türkiye Mühendislik Haberleri, 487, 62-75.
- İmrak, E. ve Özer, D. (2010). *Binalarda enerji tasarrufu ve asansörlerin enerji tüketimi*. Asansör Sempozyumu. İzmir: TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası.
- İnternet: Aytaş Alçı, Perlitli Sıva Alçısı. (2018, Nisan 15). URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.aygips.com.tr%2Ffiles%2F5a265cd635e1f.pdf+&date=2018-11-14> ,Son Erişim Tarihi: 18.08.2018.
- İnternet: Çimento Araştırma ve Uygulama Merkezi. (2018, Nisan 15). *ÇİMSA*. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.cimsa.com.tr%2Fca%2Fdocs%2F4FE58AA58E3A4B7B85FA9E4EE011A8%2F212BE9BF0EB04DABBEADC1CD76DACEF9.pdf+&date=2018-11-14> , Son Erişim Tarihi: 18.08.2018.

İnternet: Doğusan Boru Sanayi ve Ticaret A.Ş. (2018, Nisan 14). *Perlit*. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.seraper.com.tr%2Fperlit.pdf&date=2018-11-14>, Son Erişim Tarihi: 18.08.2018.

İnternet: Dünya Bankası. (2018, Nisan 21). *Türkiye'de Enerji Tasarrufu Potansiyelini Kullanmak*. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fsiteresources.worldbank.org%2FTURKEYEXTN%2FResources%2F3617111294661147811%2FTurkeyEEtr.pdf+&date=2018-11-14>, Son Erişim Tarihi: 18.08.2018.

İnternet: Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü. (2018, Nisan 25). *Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.eie.gov.tr+&date=2018-11-14> Son Erişim Tarihi: 18.08.2018.

İnternet: Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. (2017, Temmuz 31). *Aylık Enerji İstatistikleri Raporu*. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.eigm.gov.tr%2FFile%2F%3Fpath%3DROOT%252f4%252fDocuments%252f%25C4%25B0statistik%2520Raporu%252f2017%2520Nisan%2520Ay%25C4%25B1%2520Enerji%2520Raporu.pdf&date=2018-11-14>, Son Erişim Tarihi: 18.08.2018.

İnternet: *Euopen Insulation Manufacturers Association*. (2017, Kasım 26). URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Feurima.org+&date=2018-11-14>, Son Erişim Tarihi: 18.08.2018.

İnternet: Isı yalıtımı sanayicileri derneği. (2018, Nisan 20). *xpstürkiye*. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.xpsturkiye.org%3Ahttp%3A%2F%2Fwww.xpsturkiye.org%2Fsayfa.asp%3FID%3D133+&date=2018-11-14>, Son Erişim Tarihi: 18.08.2018.

İnternet: İnşaat Mühendisleri Odası. (2018, Nisan 15). *Yapı Malzemeleri ve Yapı Kısımlarının Birim Hacim Ağırlıkları*. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.imo.org.tr%2Fresimler%2Fdosya_ekler%2F4acc04c7da3e0b6_ek.pdf+&date=2018-11-14, Son Erişim Tarihi: 18.08.2018.

İnternet: LINSEIS Thermal Analysis. (2018, 07 21). *Our products*. LINSEIS Thermal Analysis. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.linseis.com%2Fen%2Four-products%2Fthermal-diffusivity-thermal-conductivity%2Fhfm-heat-flow-meter%2F&date=2018-11-14>, Son Erişim Tarihi: 18.08.2018.

İnternet: MTA Genel Müdürlüğü. (2016, Ocak 1). *Türkiye Maden Yatakları Haritaları, Perlit-Pomza Yatakları Haritası*. MTA Genel Müdürlüğü. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.eie.gov.tr+http%3A%2F%2Fwww.mta.gov.tr%2Fv2.0%2Fimages%2Fturkiye_maden%2Fmaden_yataklari%2Fb_h%2Fperlit_pomza.jpg+&date=2018-11-14, Son Erişim Tarihi: 18.08.2018.

İnternet: Onuncu Kalkınma Planı. (2014, Nisan 21). *Onuncu Kalkınma Planı*. Resmigazete. URL:

- <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.resmigazete.gov.tr%2Feskiler%2F2013%2F07%2F20+130706M1-1.htm+&date=2018-11-14>, Son Erişim Tarihi: 18.08.2018.
- İnternet: Orhun, O. (1969). Şubat 24, 2018 tarihinde Maden Mühendisleri Odası. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.maden.org.tr%2Fesimler%2Fekler%2F498.pdf&date=2018-11-14>, Son Erişim Tarihi: 18.08.2018.
- İnternet: Perlite, P. C. (2018, Nisan 15). *Perlite*. Perlite. URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.perlite.org%2Flibrary-perlite-info%2Fgeneral-info%2FPhysicalCharacteristics_Perlite.pdf&date=2018-11-14, Son Erişim Tarihi: 18.08.2018.
- İnternet: PERYUM. (2018, Nisan 28). PERYUM. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.peryum.com.tr%2Findex.php%3Fpg%3Durun_&date=2018-11-14, Son Erişim Tarihi: 18.08.2018.
- İnternet: Report, I. P. (2018, 03 06). *ipcc.ch*. International panel on climate change. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.ipcc.ch%2Findex.htm+&date=2018-11-14>, Son Erişim Tarihi: 18.08.2018.
- İnternet: Türk Standartları Enstitüsü. (2018, Nisan 20). *TSE.NET*. Türk Standartları Enstitüsü Web Sitesi. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fintweb.tse.org.tr%2FStandard%2FStandard%2FStandard.aspx%3F08111805111510805110411911010405504806508207705510307607605608411808508711706812108111411806710511107809811305306606508610205608108011306611906807707611008607510708508612206607005111706908212208907&date=2018-11-14>, Son Erişim Tarihi: 18.08.2018.
- İnternet: Türkiye Cumhuriyeti Kalkınma Bakanlığı. (2016, Eylül 1). *Madencilik özel ihtisas komisyonu raporu, Perlit çalışma grubu rezervler ve üretim*. Türkiye Cumhuriyeti Kalkınma Bakanlığı. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.kalkinma.gov.tr%2FLists%2Fzel%2520htisas%2520Komisyonu%2520Raporlar%2FAttachments%2F140%2Foik628.pdf&date=2018-11-14>, Son Erişim Tarihi: 18.08.2018.
- İnternet: Türkiye İstatistik Kurumu. (2016). *Seragazi emisyon envanteri, 2014*. Haber Bülteni. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.tuik.gov.tr%2FPreHaberBultenleri.do%3Fid%3D21582&date=2018-11-14>, Son Erişim Tarihi: 18.08.2018.
- İnternet: Türkiye İstatistik Kurumu. (2018, Nisan 27- Mayıs 5). *İllere ve yıllara göre konut satış satış sayıları 2013-2017*. Haber Bültenleri. Türkiye İstatistik Kurumu. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.tuik.gov.tr%2FUstMenu.do%3Fmetod%3Dtemelist&date=2018-11-14>, Son Erişim Tarihi: 18.08.2018.
- İnternet: U.S. Department of the Interior, & U.S. Geological Survey. (2018, Nisan 15). *Mineral Commodity Summaries 2004*. USGS Minerals Periodicals. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fminerals.usgs.gov%2Fminerals%2Fpubs%2Fmcs%2F2004%2Fmcs2004.pdf&date=2018-11-14>, Son Erişim Tarihi: 18.08.2018.

İnternet: USGS Minerals Periodicals. (2018, Nisan 15). *2014 minerals yearbook statictical summary*. USGS Minerals Periodicals. URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fminerals.usgs.gov%2Fminerals%2Fpubs%2Fcommodity%2Fstatistical_summary%2Fmyb1-2014-stati.pdf&date=2018-11-14, Son Erişim Tarihi: 18.08.2018.

İşbilir, D. (2009). *Binalarda ısı yalıtımı uygulamaları ve sorunlarının araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

İZODER Isı, Su, Ses ve Yangın Yalıtımcıları Derneği. (2005). *Binalarda ısı yalıtımı*.

Jelle, B. (2011). *Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities*. Energy and Buildings, 43, 2549-2563.

Jelleab, B., Gustavsenc, A., Grynninga, S., Wegger, E., Sveipe, E. ve Baetens, R. (2010). *Nanotechnology and possibilities for the thermal building insulation materials of tomorrow*. Zero Emission Buildings - Proceedings of Renewable Energy Conference, 121-132, Trondheim, Norway.

Jonker, A. (2006). *Insulating refractory materials from inorganic waste resources*. Doctor Technologiae, Faculty of Science Tshwane University of Technology, Poland.

Kabra , S., Katara , S. ve Rani, A. (2013). *Characterization and Study of Turkish Perlite*. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 2(9), 4319-4326.

Kandil, U. (2014). *Uçucu kül ve silis dumanı içeren betonların geçirimsizlik özelliklerinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Kara, Ç., Karacasu, M., Canbaz, M. ve Akalın, K. (2015). *Genleştirilmiş perlit agregalı asfalt betonun performans özelliklerinin incelenmesi*. 1st. International Workshop on Construction and Electricity Applications on Vocational Education, Eskişehir.

Karaağaç, İ., Durmuş, G., Uluer, O. ve Tülü, A. (2016). *Kompozit ısı yalıtım levhalarında ısı iletim katsayısı tespit yaklaşımları*. El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, 3(1), 133-142.

Karagöz, N. (2004). *Konutlarda çift duvar arası ısı yalıtım uygulamalarının incelenmesi ve değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

Kawade, U., Salunkhe, P. and Kurhade, S. (2014). *Fly ash based geopolymer concrete*. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 3(4), 135-138.

Kibert, C. (1994). *Establishing Principles and a modal for sustainable construction*. Proceedings of First International Conference of CIB TG16 on Sustainable Construction, Florida, 3-12.

- Komljenovic, M., Bascarevic, Z. ve Bradic, V. (2010). *Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers*. Journal of Hazardous Materials, 181, 35-42.
- Korniejenko, K., Fraczek, E., Pytlak, E. ve Adamski, M. (2016). *Mechanical properties of geopolymer composites reinforced with natural fibers*. International Conference on Ecology and New Building Materials and Products, Procedia Engineering, 388-393.
- Köse, B., Isıkan, O. ve İnan, T. (2006). *Isı yalıtım uygulamalarının üç bölge için enerji verimliliği açısından incelenmesi*. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 3, 1-9.
- Krischer, O. (1963). *The scientific fundamentals of drying technology*. Springer-Verlag.
- Kulaksızoğlu, Z. (2006). *Isı yalıtım sektör araştırması*. İstanbul Ticaret Odası, 242, 1-81.
- Kumlutaş, D. ve Tavman, İ. (2003). *Alüminyum tane katkılı polietilen matrisli kompozitlerin ısı iletim katsayısı*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 5(2), 19-25.
- Kurt, E. (2007). *Silis Dumanının betonun durabilite özelliklerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kürekçi, A., Bardakçı, A., Çubuk, H. ve Emanet, Ö. (2012). *Türkiye'nin tüm illeri için optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesi*. Tesisat Mühendisliği, 131, 5-21.
- Kürklü, G. (2016). *The effect of high temperature on the design of blast furnace slag and coarse fly ash-based geopolymer mortar*. Composites Part B, 92, 9-18.
- Lach, M., Korniejenko, K. ve Mikula, J. (2016). *Thermal insulation and thermally resistant materials made of geopolymer foams*. International Conference on Ecology and New Building Materials and Products, Procedia Engineering, 410 – 416.
- Lemougna, P., MacKenzie, K. ve Melo, U. (2011). *Synthesis and thermal properties of inorganic polymers (geopolymers) for structural and refractory applications from volcanic ash*. Ceramics International, 37, 3011-3018.
- Levy, F. (1981). *A modified Maxwell-Eucken equation for calculating the thermal conductivity of two-component solutions or mixtures*. International Journal of Refrigeration, 4(4), 223-225.
- Li, T.T., Chuang, Y.C., Huang, C.H., Lou, C.W. and Lin, J.H. (2015). *Applying vermiculite and perlite fillers to sound-absorbing/thermal-insulating resilient polyurethane foam composites*. Fibers and Polymers, 16(3), 691-698.
- Li, Y., Cheng, X., Cao, W. ve Gong, L. (2016). *Development of adiabatic foam using sodium silicate modified by boric acid*. Journal of Alloys and Compounds, 666, 513-519.
- Li, Y., Cheng, X., Cao, W., Gong, L., Zhang, R. ve Zhanga, H. (2015). *Fabrication of adiabatic foam at low temperature with sodium silicate as raw material*. Materials and Design, 26, 1008-10014.

- Luz-Granizo, M., Blanco-Varela, M. ve Martinez-Ramirez, S. (2007). *Alkali activation of metakaolins: Parameters affecting mechanical, structural and microstructural properties*. Advances in Geopolymer Science & Technology, 42(9), 2934-2943.
- Maqsood, A. ve Kamran, K. (2005). *Thermophysical properties of porous sandstones: measurements and comparative study of some representative thermal conductivity models*. International Journal of Thermophysics, 26(5), 1617-1631.
- Maxwell, J. (1954). *A treatise on electricity and magnetism*. New York: Dover Publications Inc.
- Morsy, M. ve Aglan, H. (2007). *Development and characterization of nanostructured-perlite-cementitious surface compounds*. Journal of Material Science, 42(24), 10188-10195.
- Nielsen, L. (1974). *Mechanical properties of polymers and composites*, 2. New York: Marcel Dekker.
- Oh, T. ve Chua, S. (2010). *Energy efficiency and carbon trading potential in Malaysia*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(7), 2095-2103.
- Ojanena, T., Pinto Seppäa, I. ve Nykänena, E. (2015). *Thermal insulation products and applications - future road maps*. Energy Procedia, 78, 309-314.
- Okoye, F., Durgaprasad, J. ve Singh, N. (2016). *Effect of silica fume on the mechanical properties of fly ash based-geopolymer concrete*. Ceramics International, 42, 3000-3006.
- Olgun, B., Kurtuluş, O., Gültek, S. ve Heperkan, H. (2015). *Enerji verimliliği ve Türkiye'deki mevzuat*. IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, 397-408.
- Ong, H., Mahlia, T. ve Masjuki, H. (2011). *A review on energy scenario and sustainable energy in Malaysia*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 639-647.
- Özer, M. (1982). *Yapılarda ısı-su yalıtımları: yapı fiziksel tanım hesaplama usulleri*. İstanbul: Özer Yayınları.
- Öziç, İ. (2013). *Binalarda ısı yalıtımı üzerine deneysel bir çalışma*. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Özkan, D., Onan, C. ve Erdem, S. (2009). *Effect of insulation material thickness on thermal insulation*. Journal of Engineering and Natural Sciences, 190-196.
- Özyurt, G. (2009). *Enerji verimliliği binaların enerji performansı ve Türkiye'deki durum*. İnşaat Mühendisleri Odası, 457(54), 32-34.
- Pamuk, R. ve Kuruoğlu, M. (2016). *İnşaat sektöründe sürdürülebilirlik ve bina inşaatlarında evrensel uygulama örnekleri*. Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9, 161-177.

- Panagiotopoulou, C., Kontori, E., Perraki, T. ve Kakali, G. (2007). *Dissolution of aluminosilicate minerals and by-products in alkaline media*. Journal of Material Science, 42(9), 2967-2973.
- Pangdaeng, S., Phoo-ngernkham, T., Sata, V. ve Chindaprasirt, P. (2014). *Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ashgeopolymer containing Portland cement as additive*. Materials and Design, 53, 269-274.
- Papadopoulos, A. (2005). *State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments*. Energy and Buildings, 37, 77-86.
- Pelesen, L. (2013). *İki nükleer santrale eş değer tasarrufu*. Global Enerji Dergisi, 109, 1-36.
- Provis, J. ve van Deventer, J. (2009). *Geopolymers; Structure, processing, properties and industrial applications*. Woodhead Publishing in Materials.
- Ramasamy, S., Hussin, K., Al Bakri Abdullah, M., Ghazali, C., Sandu, A., Binhussain, M. ve Shahedan, N. (2015). *Recent dissertations on kaolin based geopolymer materials*. Reviews on Advanced Material Science, 42, 83-91.
- Rangan, V. (2010). *Fly ash-based geopolymer concrete*. Proceedings of the International Workshop on Geopolymer Cement and Concrete, Allied Publishers Private Limited, Mumbai, 68-106.
- Rattanasak , U. ve Chindaprasirt, P. (2009). *Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer*. Minerals Engineering, 22(12), 1073-1078.
- Resmi Gazete. (2007). *Enerji verimliliği kanunu*. Ankara: Resmi Gazete, Sayı 26510.
- Rostami, M. ve Behfarnia , K. (2017). *The effect of silica fume on durability of alkali activated slag concrete* . Construction and Building Materials, 134, 262-268.
- Sengul, O., Azizi, S., Karaosmanoglu, F. ve Tasdemir, M. (2011). *Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete*. Energy and Buildings, 42(2-3), 671-676.
- Sezer, F. (2005). *Türkiye'de ısı yalıtımın gelişimi ve konutlarda uygulanan dış duvar ısı yalıtım sistemleri*. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 10(2), 79-85.
- Shastri, D. ve Kim, H. (2014). *A new consolidation process for expanded perlite particles*. Construction and Building Materials, 60, 1-7.
- Singh, K., Singh, R. ve Chaudhary, D. (1998). *Heat conduction and a porosity correction term for spherical and cubic particles in a simple cubic packing*. Journal of Physics D: Applied Physics, 31, 1681-1687.
- Skubic, B., Lakner, M. ve Plazl, I. (2012). *Microwave drying of expanded perlite insulation board*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 51(8), 3314-3321.

- Skubic, B., Lakner, M. ve Plazl, I. (2013). *Sintering behavior of expanded perlite thermal insulation board: Modeling and experiments*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 52(30), 10244-10249.
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P. ve Chindaprasirt, P. (2011). *NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature*. Fuel, 90(6), 2118-2124.
- Suman, B. (2015). *Thermal conductivity measurement of powder material and its optimum application for energy efficient cold storage*. International Journal of Applied Engineering and Technology, 5(1), 78-83.
- Sun, D. ve Wang, L. (2015). *Utilization of paraffin/expanded perlite materials to improve mechanical and thermal properties of cement mortar*. Construction and Building Materials, 60, 791-796.
- Swanepoel, J. ve Strydom, C. (2002). *Utilisation of fly ash in a geopolymeric material*. Applied Geochemistry, 17(8), 1143-1148.
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2015). *Isı yalıtım uygulama klavuzu*. Ankara: T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- Taherishargh, M., Belova, I., Murch, G. ve Fiedler, T. (2014). *On the mechanical properties of heat-treated expanded perlite–aluminium syntactic foam*. Materials and Design, 63, 375-383.
- Tavman, I. (1998). *Effective thermal conductivity of isotropic polymer composites*. International Common Heat Mass Transfer, 25(5), 723-732.
- Tekin, İ. (2016). *Properties of NaOH activated geopolymer with marble, travertine and volcanic tuff wastes*. Construction and Building Materials, 127, 607-617.
- Tıkansak, T. (2013). *Konutlarda enerji etkinliği*. International Journal of Architecture and Planning, 1(2), 189-200.
- Tian, Y., Guo, X., Wu, D. ve Su, S. (2013). *A study of effect factors on sodium silicate based expanded perlite insulation board strength*. Applied Mechanics and Materials, 405, 2771-2777.
- TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası. (2012). *Enerji verimliliği raporu*. Ankara: TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası.
- TMMOB Makina Mühendisleri Odası. (2008). *Dünya'da ve Türkiye'de enerji verimliliği oda raporu*. TMMOB Makina Mühendisleri Odası.
- TMMOB Makina Mühendisleri Odası. (2012, Nisan 21). *Dünya'da ve Türkiye'de enerji verimliliği oda raporu*. TMMOB Makina Mühendisleri Odası. TMMOB Makina Mühendisleri Odası.
- Tohumcu, İ. ve Bingöl, A. (2013). *Silis dumanı ve uçucu kül katkılı kendiliğinden yerleşen betonların taze beton özellikleri ve basınç dayanımları*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15(2), 31-44.

- Topçu, İ. ve Canbaz, M. (2002). *Microstructural analysis of concrete with silica fume*. 9th International Conference on Comp. Engineering, San Diego, 793-794.
- Topçu, İ. ve Işıkdag, B. (2007). *Manufacture of high heat conductivity resistant clay bricks containing perlite*. Building and Environment, 42, 3540-3546.
- Topçu, İ. ve Toprak, M. (2009). *Alkalilerle aktive edilen taban küllü hafif harç üretimi*. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22(2), 153-164.
- TS 825. (1999). *Binalarda ısı yalıtım kuralları*. Ankara: Mecburi Standart Tebliği.
- Tsoutsos, T., Tournaki, S., De Santos, C. ve Vercellotti, R. (2013). *Nearly zero energy buildings application mediterranean hotels*. Energy Procedia, 42, 230-238.
- Türkmen, İ. ve Kantarcı, A. (2007). *Effects of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete*. Building and Environment, 42(6), 2378-2383.
- U.S. Geological Survey. (2015). *Mineral commodity summaries*.
- Urhan, S. (1991). *Silisin alkali ortamda çözünmesine etki eden faktörler*. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Çimento Bülteni, 15-21.
- Usha, S., Nair, D. ve Vishnudas, S. (2014). *Geopolymer binder from industrial wastes: a review*. International Journal of Civil Engineering and Technology, 5(12), 219-225.
- Ülker, S. (2009). *Isı yalıtım malzemelerinin özelliklerinin uygulamaya etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Vaou, V. ve Panias, D. (2010). *Thermal insulating foamy geopolymers from perlite*. Minerals Engineering, 23, 1146-1151.
- Vimmrová, A., Keppert, M., Svoboda, L. ve Cerny, R. (2011). *Lightweight gypsum composites: Design strategies for multi-functionality*. Cement & Concrete Composites, 33, 84-89.
- Wang, H., Li, H. ve Yan, F. (2005). *Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer*. Colloids and Surfaces A: Physicochem and Engineering Aspects, 268, 1-6.
- Xu, H. ve Van Deventer, J. (2000). *The geopolymerisation of alumino-silicate minerals*. International Journal Of Mineral Processing, 59, 247-266.
- Xu, H. ve Van Deventer, J. (2002). *Minerals engineering*. Geopolymerisation of Multiple Minerals, 15(12), 1131-1139.
- Yahya, Z., Al Bakri Abdullah, M., Hussin, K., Ismail, K., Razak, R. ve Sandu, A. (2015). *Effect of solids-to-liquids, Na₂SiO₃-To-NaOH and curing temperature on the palm oil boiler ash (Si + Ca) Geopolymerisation System*. Materials, 8(5), 2227-2242.

- Yalgın, S. (1985). *Isı yalıtımında genleştirilmiş perlit ve genleştirilmiş perlit ürünleri kullanımı*. Türkiye Mühendislik Haberleri, 314, 58-85.
- Yeğinobalı, A. (2009). *Silis dumanı ve betonda kullanımı*. Ankara: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 27-36.
- Yerlici, V. (1966). *Perlit hafif agregası*. Türkiye Mühendislik Haberleri, 30-34.
- Yıldız, S., Yalınbaş, M. ve Keleştemur, O. (2006). *Silis dumanı katkılı yapı alçılarında basınç dayanımının araştırılması*. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 11(2), 15-21.
- Yılmaz, A. (2002). *Antalya ferrokrom işletmesinin elektrik-ark fırını cüruflarının ve baca tozu atıklarının asfalt betonunda kullanılabilirliğinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya.
- Yılmaz, A. (2005). *Enerji tasarrufunda bor ve perlit*. Ankara: Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü.
- Yılmaz, A. (2008). *Ferrokrom ve silikoferrokrom cürufları ile silis dumanının yol üstyapısında kullanımının incelenmesi*. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Yılmaz, Z. (2017). *Türkiye'nin mevcut enerji durumu*. 8. Enerji Verimliliği Forumu ve Fuarı, İstanbul.
- Yılmaz, S. ve Özdeniz, M. (2005). *The effect of moisture content on sound absorption of expanded perlite plates*. Building and Environment, 40, 311-318.
- Yip, C. K., Lukey, G. C., Provis, J. ve van Deventer, J. S. (2008). *Effect of calcium silicate sources on geopolymerisation*. Cement and Concrete Research, 38, 554-564.
- Yun-Leong, H., Ek-Leong-Ong, D., Sanjayan, J. ve Nazari, A. (2016). *The effect of different Na₂O and K₂O ratios of alkali activator on compressive strength of fly ash based-geopolymer*. Construction and Building Materials, 106, 500-511.
- Yunsheng, Z., Wei, S., Qianli, C. ve Lin, C. (2007). *Synthesis and heavy metal immobilization behaviors of slag based geopolymer*. Journal of Hazardous Materials, 142(1-2), 206-213.
- Yüksek, İ. (2016). *Yapılarda ısı yalıtım malzemeleri seçimi üzerine bir araştırma*. Tesisat Dergisi, 242.
- Zeybek, O. (2009). *Uçucu kül esaslı geopolimer tuğla üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Zhang, Z., Yao, X. ve Zhu, H. (2010). *Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete II. Microstructure and anticorrosion mechanism*. Applied Clay Science, 49, 7-12.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÇELİK, Damla Nur
 Uyruğu : TC.
 Doğum tarihi ve yeri : 18/09/1992 Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0(5506)9247786
 e-mail : damla.clk.92@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/ İnşaat Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Gaziantep Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2015
Lise	İncirli Lisesi	2010

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2016-Devam ediyor	Antalya Bilim Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Durmuş, G., Uluer, O., Aktaş, M., Karaağaç, İ., Khanları, A., Ağbulut, Ü. ve Çelik, D. N., (2017). *A study on some factors affecting on CO2 curing of expanded perlite based thermal insulation panel*. 3rd International Sustainable Buildings Symposium, Sözlü Sunum.
2. Uluer, O., Aktaş, M., Karaağaç, İ., Durmuş, G., Khanları, A., Ağbulut, Ü. ve Çelik, D. N., (2017). *Manufacturing of expanded perlite based heat insulation material using theoretical thermal conductivity prediction model results*. International Conference on Progress in Applied Science, 156-161, Sözlü Sunum.
3. Uluer, O., Aktaş, M., Karaağaç, İ., Durmuş, G., Khanlari, A., Ağbulut, Ü. ve Çelik, D.N., (2018). Mathematical calculation and experimental investigation of expanded perlite based heat insulation materials' thermal conductivity values. *Journal of Engineering*, 4(5), 2274-2286.



4. Uluer, O., Karaağaç, İ., Aktaş, M., Durmuş, G., Ağbulut, Ü., Khanları, A. ve Çelik, D. N., (2018). Genleştirilmiş perlitin ısı yalıtım teknolojilerinde kullanılabilirliğinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi*, 24(1), 36-42.

Hobiler

Halk Oyunları





GAZİ GELECEKTİR