

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EPOKSİ İLE ÇATLAK TAMİRİNDE KULLANILAN KURUTMA
SİSTEMLERİNİN DOĞAL TAŞLARIN YAPISAL ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Taner ÇELİK

**Danışman
Prof. Dr. Servet DEMİRDAĞ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA – 2022**



© 2022 [Taner ÇELİK]

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETLERİ	13
3. MATERYAL VE METOT	18
3.1. Materyal	18
3.2. Metot.....	23
3.2.1. Deney numunelerinin temini ve hazırlanması	25
3.2.2. Fiziksel özelliklerin belirlenmesi.....	27
3.2.3. Mekanik özelliklerin belirlenmesi.....	28
3.2.4. SEM analizleri.....	30
3.2.5. Katlı kurutma fırının termodinamik analiz hesapları.....	30
3.2.6. Sonuçların değerlendirilmesi ve öneriler.....	32
4. BULGULAR.....	33
4.1. Sağlam (Kırık-Çatlak içermeyen) Numunelerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	33
4.2. Kırık-Çatlak İçeren ve Farklı Ortamlarda Kurutulmuş Numunelerin Özellikleri.....	34
4.2.1. Birim hacim ağırlık, ağırlıkça ve hacimce su emme deney sonuçları	34
4.2.2. Sismik hız deney sonuçları.....	37
4.2.3. Tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları	38
4.2.4. SEM analizleri.....	40
4.2.5. Katlı kurutma fırının termodinamik analizi	42
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	46
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ.....	53

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EPOKSİ İLE ÇATLAK TAMİRİNDE KULLANILAN KURUTMA SİSTEMLERİNİN DOĞAL TAŞLARIN YAPISAL ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Taner ÇELİK

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Servet DEMİRDAĞ

Bu tez çalışmasında kırık-çatlak sistemleri epoksi ile tamir edilmiş bej örnekleri, ham, herhangi bir tamir işlemi uygulanmamış bej örnekleri ve kırık çatlak içermeyen sağlam bej örneklerinin fiziksel ve mekanik özellikleri teknik açıdan incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında aynı bloktan yapısal özellikleri hemen hemen aynı olan numuneler (kırık-çatlak ve doku özellikleri) alınarak 5 gruba ayrılmıştır. 1. gruba ait numuneler hiçbir işleme tabii tutulmayan kırık çatlak içeren (ham), 2. grup numuneler epoksi uygulanmış ve atmosfer şartlarında doğal kurumaya (DK) bırakılmıştır. 3, 4 ve 5. gruptaki numunelerde epoksi uygulaması yapılarak tünel (IR), katlı fırın (KF) ve mikro dalga (MD) fırınlarda kurutulmuştur. Sağlam numune (kırık-çatlak içermeyen), epoksi uygulanmayan ve epoksi uygulaması yapılarak farklı ortamlarda kurumaya bırakılmış numunelerin birim hacim ağırlık, atmosfer basıncında ağırlıkça ve hacimce su emme (görünür porozite) oranları, sismik hız, tek eksenli basınç dayanımı, üç nokta eğilme dayanım, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve termodinamik analizleri yapılarak, doğal taş örneklerindeki değişimler tespit edilmiştir.

Yapılan deneyler, incelemeler ve analizler sonucunda bej doğal taşların ağırlıkça ve hacimce su emme değerleri incelendiğinde, epoksinin kayda değer oranda kırık-çatlakları doldurduğunu, ağırlıkça ve hacimce su oranlarının 3-4 kat (yaklaşık %67-75) azaldığı görülmüş olup DK yönteminin daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Epoksi uygulanmış kayaçların sismik hız değerlerinde ise, KF ve DK kurumada yaklaşık % 4 oranında, diğer kurutma yöntemlerinde ise yaklaşık % 3 oranında iyileşme olduğu belirlenmiştir. Epoksi uygulaması ile bej doğal taşların tek eksenli basınç dayanımı değerlerinde IR kurutmada % 11, KF kurutmada % 17, MD kurutmada % 23 ve DK kurumada ise % 25, 3 nokta eğilme dayanım değerlerinde ise, IR kurutmada %56, MD kurutmada % 79, DK kurumada % 86 ve KF kurutmada ise % 93 oranlarında dayanım artışı olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen deneysel verilere ve termodinamik analizlere göre epoksi uygulanmış bej doğal taşların daha sağlam ve dayanıklı olduğu en uygun kurutma türünün ise KF ve DK kuruma olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Doğaltaş, bej, çatlak, epoksi, kurutma, kayaç özellikleri.

2022, 53 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATING THE EFFECT OF DRYING SYSTEMS USED IN CRACK REPAIR WITH EPOXY ON THE STRUCTURAL PROPERTIES OF NATURAL STONES

Taner ÇELİK

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mining Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Servet DEMİRDAĞ

In this thesis, the physical and mechanical properties of beige natural stone samples whose cracked systems were repaired with epoxy, untreated beige samples and intact beige samples without cracks were investigated. Within the scope of this study, samples with almost the same structural properties (crack systems and textures) were obtained from the same block and divided into 5 groups. The samples belonging to the 1st group were not applied to any treatment (raw), the 2nd group samples were epoxy applied and dried under atmospheric conditions. The samples in groups 3, 4 and 5 were dried in tunnel oven (IR), storehouses oven (KF), and microwave (MD) by applying epoxy. The changes in the natural stone samples of intact samples, treated and untreated samples with epoxy in different drying conditions were determined by performed the unit volume weight, water absorption at atmospheric pressure tests (ASE), open porosity (HSE), p-wave velocity, Uniaxial compressive strength, 3-point flexural strength, SEM and thermodynamic analyzes.

When the ASE and HSE values of beige natural stones were examined as a result of the experiments and analyzes, it was seen that the epoxy filled the cracks at a remarkable rate, the ASE and HSE ratios were reduced by 3-4 times (67-75%), and it was concluded that the DK method was better according to ASE and HSE results. In the seismic velocity values of the epoxy-treated rocks, it was determined that there was an improvement of approximately 4% in KF and DK drying, and approximately 3% in other drying methods. With epoxy application, it was determined that there was an increase in strength at the rate of the UCS values of beige natural stones are 11% in IR drying, 17% in KF drying, 23% in MD drying and 25% in DK drying, and at 3-point flexural strength values, 56% in IR drying, 79% in MD drying, 86% in DK drying and 93% in KF drying. According to the experimental data and thermodynamic analyzes, it was determined that epoxy-treated beige natural stones are more strong and durable, and the most suitable drying type is KF and DK drying.

Keywords: Natural stone, beige, crack, epoxy, drying, rock properties.

2022, 53 pages

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan, tezimin tüm deneysel süreçlerinde bir fiil benimle birlikte çalışan değerli Danışman Hocam Prof. Dr. Servet DEMİRDAĞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Deney numunelerinin temini ve hazırlanması aşamalarında vermiş oldukları desteklerden dolayı Üretim Müdürü Jeoloji Mühendisi İhsan KAYA'ya ve tüm Kur Mermer personeline teşekkür ederim.

Termodinamik analizlerin yapılmasında vermiş oldukları desteklerden dolayı Doç. Dr. Ahmet COŞKUN ve Arş. Gör. Dr. Karani KURTULUŞ'a teşekkür ederim

Çalışmalarım esnasında her türlü kolaylık ve çalışma ortamı sağlayan Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölüm Başkanı sayın Prof. Dr. Ata Utku AKÇIL'a ve bölüm çalışanlarına teşekkür ederim.

Tezin incelenmesine ve değerlendirilmesine katkı sağlayan jüri üyelerine teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Taner ÇELİK
İSPARTA, 2022

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. ST'lerde farklı ebatlarda kesilmiş plakalar.....	2
Şekil 1.2. Kırık-çatlak sistemlerinin genel görünümü	3
Şekil 1.3. Epoksi uygulama işlemi	4
Şekil 1.4. Sıcaklık-Zaman polimerizasyon ilişkisi (Epoksi 100:30).....	6
Şekil 1.5. Ön kurutma (katlı fırın)	7
Şekil 1.6. Ön kurutma sonrası epoksi uygulaması	8
Şekil 1.7. File uygulaması.....	8
Şekil 1.8. Epoksi uygulanmış levha ve plakaların stok alanına alınması	9
Şekil 1.9. Epoksi Reçinenin Kimyasal Reaksiyonu.....	9
Şekil 1.10. Epoksinin etki mesafesi.....	10
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan bej doğal taşların genel görünümü.....	18
Şekil 3.2. Tünel fırın hat	20
Şekil 3.3. Katlı fırın hat	21
Şekil 3.4. a) Mikro dalga fırın hat b) magnetron tüpler	22
Şekil 3.5. Tez çalışmasında uygulanan metodoloji	24
Şekil 3.6. Deney numunelerinin genel görünümü.....	26
Şekil 3.7. Numunelerin KBHA, ASE ve HSE deneylerinin genel görünümü.....	27
Şekil 3.8. Kayaçların P dalga hızı değerlerinin belirlenmesi.....	28
Şekil 3.9. Kayaçların TEBD değerlerinin belirlenmesi	28
Şekil 3.10. Kayaçların 3NED değerlerinin belirlenmesi.....	29
Şekil 3.11. 3NED deneylerinde kullanılan numune geometri ve boyutları.....	29
Şekil 3.12. Katlı kurutma fırınına giden taze hava ile baca gazının karışımı.....	31
Şekil 4.1. Numunelerdeki KBHA değişimleri	36
Şekil 4.2. Numunelerdeki ASE değişimleri.....	36
Şekil 4.3. Numunelerdeki HSE değişimleri	36
Şekil 4.4. Kurutma durumuna göre numunelerdeki V_p değişimleri.....	38
Şekil 4.5. Kurutma durumuna göre numunelerdeki TEBD değişimleri.....	39
Şekil 4.6. Kurutma durumuna göre numunelerdeki 3NED değişimleri	39
Şekil 4.7. DK kesit görünümü	40
Şekil 4.8. KF kesit görünümü.....	41
Şekil 4.9. MD kesit görünümü	41
Şekil 4.10. IR kesit görünümü	42
Şekil 4.11. Saatlik dış hava şartlarına göre fırın içi ve doğal kurutma havası bağıl nem değerlerinin değişimi.....	43
Şekil 4.12. Çevre hava sıcaklığına göre fırın içi bağıl neminin değişimi.....	44
Şekil 4.13. Çevre havanın bağıl nemine göre fırın içi bağıl neminin değişimi	45

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Numune boyutları ve sayıları.....	25
Çizelge 4.1. Kayacın fiziksel ve mekanik özellikleri	34
Çizelge 4.2. Numunelerin fiziksel özellikleri.....	35
Çizelge 4.3. P-dalga hızı değerleri	37
Çizelge 4.4. Numunelerin TEBD ve 3NED sonuçları.....	38



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

3NED	3 Nokta eğilme dayanımı
ASE	Ağırlıkça su emme oranı
DK	Doğal kuruma
EES	Engineering Equation Solver
HSE	Hacimce su emme oranı
IR	Infrared
KBHA	Kuru birim hacim ağırlık
KF	Katlı fırın
LNG	Sıvılaştırılmış doğalgaz
MD	Mikro dalga fırın
$\sigma_{3Neğ}$	Numunenin üç nokta eğilme dayanımı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SS	Standart sapma
ST	Dairesel testere
TEBD	Tek eksenli basınç dayanımı
UPR	Doymamış polyester reçine
UV	Ultraviole
V_p	P-dalga hızı

1. GİRİŞ

Doğal taşlar, eski çağlardan günümüze tarihi yapılarda ve anıtlarda albenisi, dayanıklılığı nedeniyle kullanılan en önemli yapı malzemeleri olmuştur. Gün geçtikçe farklı inşaat projelerinde aranan bir yapı malzemesi olan doğal taşlar özellikle iç ve dış mekân kaplama ve döşemelerde, heykeltçilik, mezar taşı ve süs eşyası yapımında önemli miktarlarda kullanılmaktadır. Doğal taş madenciliği, son 20 yıldır ivme kazanan, farklı yapı, renk ve dokuda çeşitliliğin arttığı hemen hemen her projeye uygun özelliklerde üretimin yapıldığı, ülkemiz ve dünya ticareti için önemli bir sektör haline gelmiştir (Demirdağ vd., 2018; İGM, 2021).

Dünyada özellikle yapı sektöründe doğal taş kullanımında artış görülmektedir. Çünkü doğal taşların; sağlıklı, farklı renk ve dokuya sahip olmaları, çevre ile uyumlu, atmosfer şartlarına dayanıklılığı ve geri dönüşümlü bir ürün olması, başlıca özelliklerindendir. Artıklarının da çeşitli alanlarda kullanılmasıyla önemli bir çevresel problemin önüne geçilerek doğal taşların kullanımının, önümüzdeki yıllarda dünya genelinde daha da artması beklenmektedir (Aydın ve Karakurt, 2020; Demirdağ vd., 2018).

Dünya doğal taş rezervinin yaklaşık %30'na sahip ülkemizde doğal taş ihracatı, 80'li yıllarda yaklaşık 4 milyon \$ iken, 90'lı yıllarda 40 milyon \$, 2000 yılında 189 milyon \$ ve 2006 yılında ise 1 milyar \$ olarak gerçekleşmiştir. 2008 yılında Çin'de inşaat sektörü yatırımlarının yoğunlaşması ile 2006 yılında Çin'e yapılan doğal taş blok ihracatını önemli derecede arttırmıştır. 2010 yılında ise 1,5 milyar \$ olan doğal taş ihracatı ilk defa 2013 yılında 2,2 milyar \$ olarak gerçekleşmiştir. 2020 yılında doğal taş ihracatımız 2019 yılına göre hem miktarda, hem de değerde azalış kaydederek, 1,74 milyar \$, 2021 yılı doğal taş ihracatı ise 7,779 milyon ton karşılığı 2,092 milyar \$ olarak gerçekleşmiştir (İGM, 2021; İMİB, 2021).

Mermer ve doğal taş ocaklarında farklı boyutlarda üretilen blok taşların piyasanın istediği ebat ve özelliklerde işlendiği, parlatıldığı yerler doğal taş fabrikalarıdır. Ocaklardan getirilen düzgün ve/veya düzgün geometriye sahip

olmayan bloklar kırık-çatlak yapıları, renk homojenliğine ve piyasanın istediği ebatlara bağlı olarak levha ve plaka hattı olarak tanımlanan ST (daireysel testerelerle plakadan blok kesimi) ve katrak makinelerinde kesim işlemleri gerçekleştirilmektedir. ST ve katrak makinelerinde uygun ebatlara getirilen levha ve/veya plakalar, baş kesme ve yan kesme makinelerinde kenar düzeltmeleri yapılarak sağlam, yüzeylerinin pürüzsüz ve parlak olması için tamir-dolgu-cila hatlarına gönderilirler (Şekil 1.1). Yüzeyleri parlatılan ve kullanıma hazır gelen ürünler kasalanarak müşteriye sunulur.



Şekil 1.1. ST'lerde farklı ebatlarda kesilmiş plakalar

Fakat oluşumundan kaynaklanan çatlaklı yapıdaki doğal taşlar ocaktan blok olarak üretilip fabrikalarda levha ve/veya plaka üretimleri esnasında önemli miktarlarda üretim kayıpları oluşmaktadır (Şekil 1.2). Üretim kayıplarının oluşması ile birim maliyetler artmakta ve en önemlisi de doğal kaynakların israfına neden olmaktadır (Acar, 2003; Zontur, 2012).



Şekil 1.2. Kırık-çatlak sistemlerinin genel görünümü

Ülkemiz doğal taş ihracatında son 20 yıldır en önemli ihraç malzemesi olan bej doğal taşların tamamına yakınında kırık-çatlak probleminden dolayı önemli kayıplar oluşmaktadır (Haber Teknik, 2016). Başlıca sorunlar;

- Kesim esnasında; birçok doğal taşta tozu ve nemi içine çeken, taş yüzeyini ve kesitini çaprazlamasına geçen ince, kılcal çatlaklar doğal taş bloklarının ST veya katrak ile kesim esnasında plaka ve levhaların parçalanmasına neden olmaktadır. Blok verimini olumsuz etkileyip, fire oranını artırmaktadır. Ayrıca mikro çatlaklara sahip olan doğal taş bloğu, ince ebatlarda kesilemediği için kalın kesilmek zorunda kalınmaktadır (Acar, 2003; Sarıışık ve Şentürk, 2003; Cevheroğlu, 2005; Öcal ve Dal, 2012).
- Taşıma esnasında; büyük çatlaklara sahip bloklar henüz fabrikaya ulaşmadan kırılarak fire vermeye başlayabilmektedir. Ayrıca plakalara ayrıldıktan sonra işçiler tarafından taşıma esnasında da kırılmalar meydana gelebilmektedir. Üretim kapasitesini düşürdüğü gibi iş güvenliğini de tehdit etme durumu ortaya çıkmaktadır (Acar, 2003).
- Honlama ve cilalama esnasında; kalibrasyon öncesinde güçlendirilmeyen doğal taşlar honlama ve cila makinesinde kırılmaya başlamaktadır. Kırılan taşları aradan çıkartmak ve dağıttıkları abrasivleri değiştirmek için makineleri sık sık durdurmak gerekir. Etrafa dağılan kırık taş parçaları hem diğer taşların

cila kalitesinin bozulmasına hem de zaman ve ekonomik kayba sebep olmaktadır (Acar, 2003).

- Görünüm ve estetik olarak standartı yakalayamama ve kalite düşüklüğü; doğal taşın sahip oldukları çatlaklara ve gözeneklere kil gibi yabancı maddeler dolabilmekte ve iyi cila almasına engel olabilmektedir. Aynı bloktan elde edilen plakalarda farklı parlaklık değerleri elde edilmekte olup üretimde homojenlik olmadığı durumlarda ise hak ettiği ekonomik değere ulaşamamakta ve işletmeye gereksiz bir maliyet getirmektedir. Ayrıca kullanıcıya satılan ürünler uygulama alanlarında daha çabuk deformasyona uğradığından üretici firmaların satış performansını düşmesine ve zamanla talep azalmasına hatta yok olmasına neden olabilmektedir (Acar, 2003).

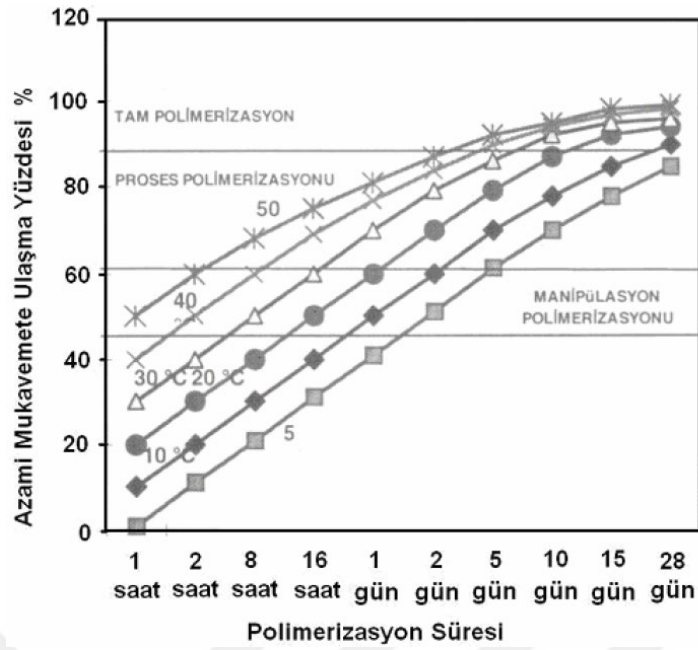
Özellikle bej doğal taş üretiminde bu özellikteki çatlaklı ve kırılğan taşlarda kayıp ve fire oranları oldukça yüksektir. Fire oranını düşürerek ekonomikliliği artırmak için çatlak tamirinde kullanılan en önemli malzemeler epoksi esaslı reçinelerdir. Epoksi, çatlakların içerisine nüfuz edebilen kuvvetli ve akışkan bir malzemedir. Taşın durumuna göre gerekirse file ile birlikte de kullanılabilir. Suya, aside ve alkaliye direnci çok iyidir ve zamanla direnç özelliğini yitirmez. Epoksi, reçine ve katalizör olmak üzere iki bileşenli bir malzemedir. Reçine ve katalizör uygulama öncesi belirli oranlarda birbirleriyle karıştırılır ve doğal taşın çatlak yapısına göre yüzeyin tamamına veya sadece belli bir bölgeye uygulanabilir (Şekil 1.3) (Haber Teknik, 2016; Cevheroğlu, 2005).



Şekil 1.3. Epoksi uygulama işlemi

Çatlak tamirinde mukavemet, ısı genleşme, viskozite, fiyat/kalite paritesi gibi özelliklerin uygun olması sebebi ile günümüzde yaygın olarak kullanılan epoksinin uygulamada önemli noktaları, doğal taşta uygulanan epoksinin yüzeyde reaksiyona girerken, donma sıcaklığı, mikro gözeneklere nüfuziyeti (epoksinin akışkanlığı) ve manipölasyon süresidir. Bu nedenle epoksi uygulamada en önemli husus, taşın içindeki tüm kılcal çatlakların derinlemesine kurutulmasıdır. Aksi takdirde kılcal çatlak içinde kalan en küçük nem, epoksi reçinenin çatlağa girmesine; girse bile çatlak cidarına nüfuz etmesine (penetrasyonuna) engel olacaktır. Bu durumda çatlak epoksi uygulansa bile tamir olmaz (Sarışık ve Şentürk, 2003; MEGEB, 2008).

Epoksi ile çatlak tamir işlemi doğal taşta mukavemet kazandırmakta ve özellikle taşın üretimden çıkıp uygulanacağı yere ulaşınca kadar ki taşınma işlemlerinde zarar görmesine büyük ölçüde engel olmaktadır (Haber Teknik, 2016). Çatlak tamiri genel olarak kesme işleminden hemen sonra yapılır. Çatlak taşlar ayrılır, hattın başına getirilir. Çatlakların derinlemesine kurutulması için taşı alt ve üst yüzeylerden aynı anda çift taraflı kurutulması gerekmektedir. Uygun epoksi karışımı çatlaklar tamamen epoksi ile doluncaya kadar tatbik edilir. %25 katalizörlü epoksi kullanılıyor ise taşların üzeri naylon ile örtülerek fabrika içindeki doğal ortamda yazın 1 gün, kışın 2 gün bekletilir. Bekleme sonunda epoksi polimerize olduktan (katılaştıktan) sonra taşlar cila makinesine verilir. Polimerizasyon süresini kısaltmak ve epoksi uygulanan taşları bir araya toplamak (depolamak) için, uygulama sonrasında taşlar fırınlarda bekletilebilir. Bu fırınlarda yüksek sıcaklık uygulanırsa çok hızlı jelleşme oluşur. Bu da reçinenin daha hızlı nüfuz etmesini engelleyen, istenmeyen bir durum olabilmektedir. Epoksi uygulama sonrası fırınlama dikkatli yapılması gereken bir işlemdir. Bu nedenle bazı durumlarda fırınsız, doğal ortamda polimerizasyon tercih edilebilmektedir (Şekil 1.4).



Şekil 1.4. Sıcaklık-Zaman polimerizasyon ilişkisi (Epoksi 100:30) (Acar, 2003)

Çatlak tamir hatlarında en önemli aşama, epoksi uygulanacak taşın yüzeyinin ve bulundurduğu çatlakların içinin de kurutulmuş olması gerekmektedir. Dolayısıyla doğal kurumaya bırakılan striplerin istenilen ölçüde kurumasi zaman almaktadır. Bunun için kurumayı kolaylaştırıcı ve hızlandırıcı fırın sistemleri kullanılmaktadır. Çatlak tamir hattı fırınlarında daha çok gazlı ve elektrik rezistanslı ısıtıcılar kullanılmaktadır. Hat boyunu bir miktar kısaltmak için bazı durumlarda Infrared (IR) ısıtıcılar kullanılmaktadır (MEGEB, 2008). Doğal taş bloklarından ST'lerde veya katraklarda istenilen boyutlara ayrılan plakalar/levhalar öncelikle bünyelerindeki nemi atmak için ön kurutma işlemine tabi tutulurlar (Şekil 1.5). Ön kurutma, epoksi reçinenin mermer yüzeyinde daha iyi bir yapışma sağlaması için önemlidir. Ön kurutmadan çıkan plakalar, işçiler tarafından fırça yardımıyla fileli veya filesiz olarak epoksi uygulaması yapılır (Şekil 1.6 ve Şekil 1.7). Kırılma oranı fazla olan plakalarda iki taraflı file uygulanır. Daha sonra 2. kurutma için fırına gönderilir. Genel olarak bu işlemler 3m/dak hızla devam etmektedir. İstenirse konveyörler daha hızlı veya daha yavaş hareket ettirilebilir. Doğal taş plakasının üretim hattında kalış süresi istenildiği şekilde ayarlanabilir. Fakat daha az süre kalması güçlendirme işleminin istenilen kalitede olmasına engel olabilmektedir. Daha uzun süre kalması ise üretim kapasitesinin azalmasına ve gereksiz enerji sarfiyatına neden

olur. Bej doğal taş üzerine çalışan firmalarda genel olarak bu süre dakikada 3 m olacak şekilde ayarlanmıştır. Doğal taşlarda epoksi manipölasyon süresi doğal ortamda 4 saattir. Fırınlar kullanılarak bu süre 1-1,5 saate kadar indirilmektedir. Böylelikle hem zamandan hem de alandan tasarruf sağlanmış olmaktadır. İkinci kurutmadan çıkan plakalar paletlere alınarak ortamın sıcaklığına ve nem oranına göre 12-24 saat süreyle kurumaya bırakılır (Şekil 1.8). Tam kuruma sağlandıktan sonra cilalama işlemiyle birlikte üretime devam edilir (Sarışık ve Şentürk, 2003; Acar, 2003; Cevheroğlu, 2005).



Şekil 1.5. Ön kurutma (katlı fırın)



Şekil 1.6. Ön kurutma sonrası epoksi uygulaması

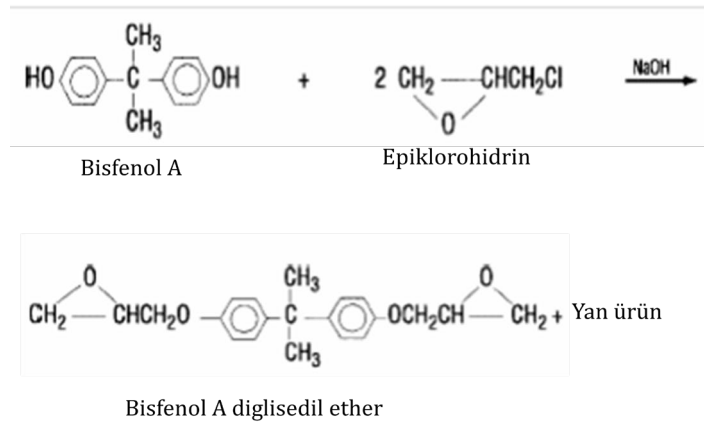


Şekil 1.7. File uygulaması



Şekil 1.8. Epoksi uygulanmış levha ve plakaların stok alanına alınması

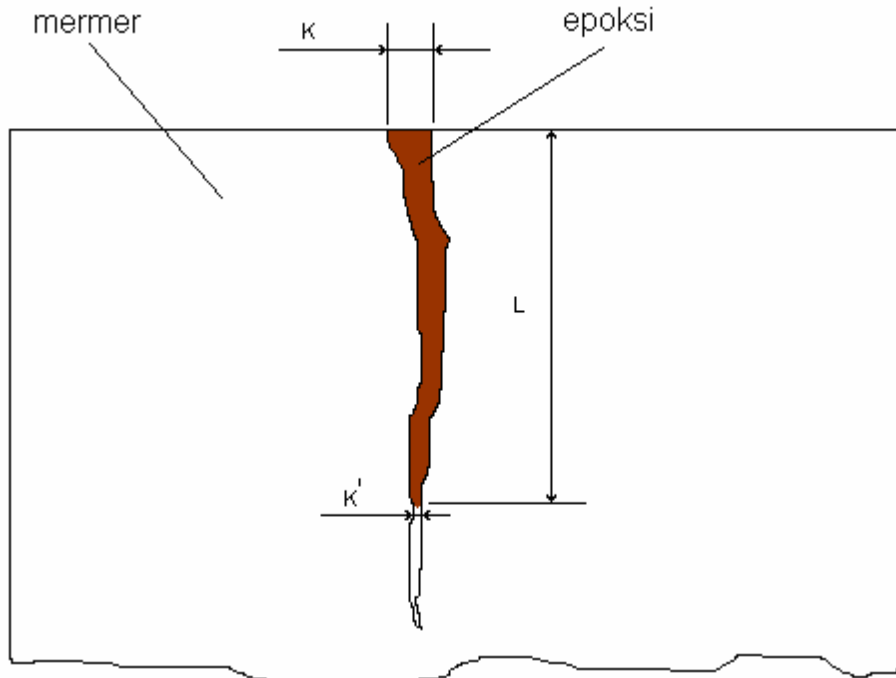
Kürlenmiş (yani epoksi reçinedeki zincir moleküller birbirlerine bağlanarak malzemenin üç boyutlu bir ağ yapısına kavuşmuş halindeki) reçinelerin son özellikleri reçinenin türüne, kürlleme işleminde kullanılan maddeye ve kürlleme sürecine bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir (Baydemir, 2020). Epoksi bileşiğinin yapısının değiştirilmesi ile farklı özellikte kürlenmiş reçineler elde etmek mümkündür. Fakat doğal taşı sağlamlaştırmak için kullanılan ürünlerin hemen hepsi eşitlikte görülen bisfenol A diglisedil (diglycidyl) eterine (DGEBA) dayanmaktadır (Şekil 1.9). Bisfenol A, fenolün aseton ile tepkimesinden oluşmaktadır (Selwitz, 1992; Cevheroğlu, 2005).



Şekil 1.9. Epoksi Reçinenin Kimyasal Reaksiyonu (Selwitz, 1992)

Reçineler veya epoksi polimerler sodyum hidroksit varlığında epiklorohidrin ile bisfenol A'nın yoğunlaşma tepkimesi ile oluşmaktadır. Bu şekilde molekül ağırlığı düşük olan ve “sıvı epoksi” olarak adlandırılan reçineler meydana gelir. Sıvı epoksiler endüstriyel doğal taşları sağlamlaştırma işlemi için kullanılan kimyasal maddelerdir. Akışkanlığının yüksek, yoğunluğunun düşük olması nedeni ile doğal taşta bulunan çatlaklara derinlemesine nüfuz ederek uygulandığı taşı güçlendirip çatlaklarını tamir ederler (Kotasek, 2004, Cevheroğlu, 2005; Sarıışık ve Şentürk, 2003).

Öztekin (2007) yaz aylarında iyi kurutulmuş numune üzerinde yaptığı bir çalışmada çatlak boyunun (L değerinin) epoksinin etki derinliğine bir tesiri olmadığını fakat çatlak genişliğinin (K' değerinin) etki derinliğinde önemli olduğunu vurgulamıştır. Numuneler üzerinde yapılan mikroskopik ölçümlerden 225, 120, 60, 45 mikron gibi değerler ölçüldüğünü ve bu değerlerden 225 mikron civarı çatlak aralığına kadar epoksinin bolca geçtiğini, 120, 60, 45 mikron aralıklarına kadar epoksinin sızdığını, bu çatlakların altında kalan değerlerde ise epoksi izine rastlanılmadığını belirtmiştir (Şekil 1.10).



Şekil 1.10. Epoksinin etki mesafesi (Öztekin, 2007)

Çatlak tamiri işlemleri, doğal taş üretiminin son aşamalarındandır. Bundan dolayı bu aşamada yaşanan üretim kayıplarının önemi daha da artmaktadır. Çünkü kesilip ticari hale getirilecek olan taş, epoksi benzeri uygulamalar yapılmadığı takdirde; plaka haline getirilmiş doğal taşlar kullanılamaz hale gelebilir. Kaybedilen malzeme ve emek maliyetine bakıldığında, malzeme ve dolgu işlemlerinin sanıldığı kadar yüksek maliyetli olmadığı, tam tersine ilave katma değer sağlayarak kar elde etmede önemli avantajlar sağladığı görülmektedir. Yüksek verimliliği esas alarak çatlak tamiri için kullanılan epoksi esaslı kimyasal malzemelerin genel özelliği, donma sürelerinin uzun olmasıdır. Buradaki amaç çatlak tamiri olduğundan taşın yüzeyine uygulanan epoksinin çatlağın içine nüfuz etmesidir (Haber Teknik, 2016). Çatlağın yarattığı süreksizlik ortamını sürekli duruma dönüştürür, çatlağın her iki yüzünü çatlak boyunca sürekli olarak bir birine bağlar ve gerilme birikimlerini önler (İnframak, 2022).

Doğal taş fabrikalarında kurutma işlemlerinde yaygın olarak tünel, katlı ve mikro dalga fırınlar kullanılmaktadır. Günümüzde en yaygın kullanılan yöntemler ise tünel ve katlı fırınlardır. Epoksi kurutmada da önemli noktalardan biri, plakaların optimum ve ideal bir sıcaklıkta, en uygun enerji maliyetleri ile homojen ve eşit bir şekilde ısıtılarak, nemin plakadan uzaklaştırılmasıdır. Diğer bir önemli kriter ise havalandırmadır. Çünkü fırınların içinde ideal bir havalandırmanın sağlanması ve nem oranının buna bağlı olarak ideal seviyeye düşürülmesi havalandırma ile sağlanmaktadır. Havalandırma sisteminin kalitesi ve başarısı, doğal taş plakaların kurutulmasında ve nemin uzaklaştırılmasında, fırın içindeki sıcaklığın ve plaka yüzeylerindeki sıcaklığın eşit ve homojen dağılmasında oldukça önemlidir (İnframak, 2022).

IR kurutma tünel fırınları bu özelliklerin hepsini iyi bir biçimde gerçekleştirmektedir. İnfrared teknolojisi ısıyıyla ısıya yaptığından dolayı havayı hiçbir şekilde kurutmamaktadır. Fırın içindeki ısıtma grubunun düzenli ve simetrik bir şekilde dizayn edilmesi sonucunda maksimum verimle ve homojenlikle kurutma imkanı sağlanmaktadır. Yeni teknoloji Epoksi kaplamalar artık daha hızlı kürlenebilen tipte de üretilebildiğinden üretimin hali hazırda

sürdüğü tesislerde bekleme sürelerini kısaltmakta, dolayısıyla uygulama esnasında oluşabilecek üretim kayıplarını da en aza indirmektedir (İnframak, 2022).

Katlı fırın hatlar ise tünel fırınların çok yer kaplaması ve üretim kapasitelerinin düşük olması sebebiyle tasarlanmıştır. Üretim kapasiteleri daha yüksek olup günümüzde doğal taş tamir hatlarında, özellikle levha epoksi tamir sistemlerinde daha çok tercih edilmektedirler. Çünkü, ideal bir sıcaklıkta, en uygun enerji maliyetleri ile ısıtmanın etkinliği ve kalitesinin sağlanmasıdır (Mermerepoksi, 2020).

Mikrodalga fırınlar, elektromanyetik enerjinin termal enerjiye dönüştürülmesi prensibi ile çalışmaktadırlar. Elektromanyetik enerji, birbirine dik olarak salınan bir elektrik alanı ve manyetik alan içeren radyasyon dalgalarını ifade eder. Bir polar molekül, yani zıt yükler içeren bir molekül, bu elektromanyetik radyasyonların yoluna düştüğünde, onlarla hizalanmak üzere salınım yapar. Bu enerjinin dipolden moleküler sürtünme ve çarpışma ile kaybolmasına neden olarak ısınmaya neden olur. Ürünün içinde bulunan su molekülleri, mikrodalga radyasyonlarıyla temas ettiklerinde, içten dışa ısıtılırlar. Mikrodalgalar, frekansları 300 MHz (0,3 GHz) ile 300 GHz arasında ve karşılık gelen dalga boyları sırasıyla 0,9 m ile 0,0009 m arasında değişen elektromanyetik radyasyonlardır. Fırınların çoğunda kullanılan mikrodalga 2.24 GHz frekansındadır (dalga boyu=12,2 cm). Bu boyutlar, mikrodalgaların ısıtılmak istenen ürünün derinliklerine nüfuz etmesine ve içeriden pişirmesine/ısıtılmasına izin verirken, etrafındaki havanın sıcaklığını sabit kalmasını sağlamaktadır (Studios, 2022).

2. LİTERATÜR ÖZETLERİ

Doğal taşlar, hem yapısından kaynaklanan, hem de üretim, nakliye ve işçilik esnasında ortaya çıkan kırık ve çatlaklara sahip olabilmektedirler. Doğal taşlar bu gibi deformasyonlara ve üretim kayıplarına uğradığında farklı prosesler uygulanması gerekebilmektedir. Bu tez çalışmasında doğal taş fabrikalarında yaygın olarak kırık-çatlak tamirinde kullanılan epoksinin farklı kurutma ortamlarına maruz kalmasından sonra kayacın yapısal özelliklerine etkisini belirlemek için mevcut uygulanan plaka tamir aşamasındaki kurutma sistemleri incelenerek farklı kurutma ortamlarına bağlı olarak epoksinin polimerizasyonu ile bej türü doğal taşların fiziksel ve mekanik özelliklerinin nasıl değiştiği belirlenmiştir. Doğal taş ve mermer kırık çatlak tamir sistemleri ve uygulamaları hakkında yapılmış geçmiş çalışmaların bazıları aşağıda verilmiştir.

Pomakis ve Mecik (2001) yaptıkları incelemelerde, yeni akemi teknolojilerinin geliştirilmesinden dolayı bloklardaki, kesilmiş ve yarı mamul durumdaki doğal taşlarda kırık-çatlak, gözenek gibi kusurların giderilmesinde, büyük aşama kaydettiklerini ve böylece sadece üretimde artış değil, aynı zamanda üretilen malzemenin kalitesinde de büyük bir artış olduğunu belirtmişlerdir.

Çetin (2001) çalışmasında, doğal taşların oluşumundan kaynaklanan gözenek, boşluk ve çatlaklardan dolayı doğal taşın ekonomiye kazandırılmadan kullanılamaz hale geldiğini bu nedenle hangi malzeme ve yöntemle bu problemlerin çözülebileceğini belirtmiştir.

Acar (2003) yaptığı çalışmada, kayaç oluşum sürecindeki doğal hareketler sonucunda taş kütlelerinin yapısında çatlaklar ve gözenekler meydana getirdiği, taşların yapısındaki çatlaklar, üretim sürecindeki fire oranını ve dolayısıyla maliyetleri arttırdığını, gelişen teknoloji ve artan rekabetin sonucu olarak taşlardaki çatlaklar nedeniyle artan fire oranını minimuma indirecek sağlamlaştırıcı reçineler; gözenek dolgu malzemeleri, yüzey sorunlarını çözen ve koruyan kimyasallar geliştirildiğini, tamir ve dolgu malzemelerinin en iyi ve kolay şekilde uygulanmasını sağlayacak fırınlı çatlak tamir ve gözenek dolgu

hatlarının tasarlandığını belirtmiştir. Yapılan çalışmada uygulamada dikkat edilecek hususlar ve tamir-dolgu uygulamalarının ekonomik boyutu incelenmiştir.

Sarışık ve Şentürk (2003) yaptıkları çalışmada, Denizli, Afyon ve İscehisar yöresindeki mermer fabrikalarında epoksi, polyester, mastik, UV reçine ve çimento dolgu uygulamalarındaki pratik bilgileri sunarak, epoksi reçinenin doğal taşların kırılma oranını maksimum derecede azaltarak çok kırılğan doğal taşların kırılğanlığını %40 dan %7 oranına kadar azaltabildiğini belirtmişlerdir.

Acar (2003) yaptığı çalışmada taşlardaki iyileşme sonucunda; pazar bulma şansının çok daha yüksek olduğunu, daha ince boyutlarda işlenebildiğini, firelerde azalma olduğunu, işlemdeki tıkanıkların giderildiğini, standart ürün, kaliteli üretim, nakliye problemlerinin azaldığını ve müşteri memnuniyetinin arttığını belirtmiştir.

Cevheroğlu (2005) çalışmasında, Diyarbakır Bölgesi'nde yoğun olarak üretimi yapılan kireçtaşı kökenli Orient Pink, Sand Wave ve Tigre Bej grubu mermerlere uygulanan dolgu yöntemlerinin performans değerlendirmesini yapmıştır. Mermerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin uygulanan yöntemleri nasıl etkilediğini laboratuvar çalışmaları ile ortaya koymuştur.

Fernández vd. (2005) doğal taş endüstrisinde kullanılan hem geleneksel hem de ultraviyole (UV) kürlleme sistemleri için uygun bir alternatif olarak yeni mikrodalga ısıtma prosedürünü sunmuşlardır. Hem termal simülasyonlar hem de deneysel testler, mikrodalga enerjisinin ürünün nihai kalitesini korurken kürlleme ve depolama sürelerini büyük ölçüde azalttığını belirtmişlerdir. Ayrıca geleneksel proste kürlleme sürelerini 2 saatten 80 saniyeye düşürmenin mümkün olduğu sonucuna varmışlardır.

Akçakoca vd. (2006) yaptıkları çalışmada, mermer ve traverten ürün (fayans, levha/plaka vb.) üretimi yapan fabrikalarda, kalite kontrolü sırasında belirlenen sorunlar ve bu sorunların giderilmesine yönelik çözüm önerilerini

değerlendirmiştir. Bunun için fabrikada üretim sürecinde, ürün kalitesini etkileyen problemleri tespit ederek bu problemlerin giderilmesi için yapılması gereken işlemleri açıklamıştır.

Öztekin (2007) tez çalışmasında, doğal taşlara uygulanan tamir malzemelerinin maliyetlerini ve uygulanan bu malzemelerin hangi doğal taşlarda kullanılması gerektiğini ve birbirlerine göre avantajlarını irdelemiştir.

Gökdemir (2010) tez çalışmasında, Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde üretilen farklı ticari isimlere sahip doğal taşlardan elde edilen blok, plaka ve levhalara uygulanan tamir yöntemlerinin kesme-işleme verimliliğine etkisini ve işletmeye sağladığı ekonomik katkıyı belirlemiştir.

Efe vd. (2012) kırık-çatlak sistemleri epoksi ile tamir edilmiş bej mermerleri ve ham, herhangi bir tamir işlemi uygulanmamış bej mermer örneklerinin termal şok ve donma-çözülme çevrimlerine tabi tutulması suretiyle yapılarında oluşan değişimleri teknik açıdan incelemişlerdir. Elde edilen bulgulara göre epoksi tamir işlemlerinin kayaçların mekanik dayanımlarını attırdığını ve epoksi uygulamasının maliyeti m² başına 1-1,4 \$, taşın arka yüzüne uygulanan file maliyetinin de yaklaşık olarak 1-1,2 \$ olduğu düşünüldüğünde üretim esnasında fire vermeyen kayaçlarda uygulanmasının gerekliliği belirtmişlerdir.

Zontur (2012) Burdur ve Isparta yöresinde üretimi yapılan kireçtaşlarının bulundurduğu çatlakları epoksi ile tamir ettikten sonra verim artışını ve kayacın yapısal özelliklerindeki değişimleri incelemiştir.

López-Buendía vd. (2013) Crema Marfil levhalarına vakum şartlarında epoksi reçine ile güçlendirme uygulamış ve zayıflık düzlemlerinin mekanik davranışının iyileştiğini ve böylece nihai ürünün güvenliğinin ve mekanik homojenliğinin daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır.

Feng vd. (2016) yüksek güçlü mikrodalga sertleştirme sisteminin kurulması ile doymamış polyester reçine (UPR) suni mermerin endüstriyel üretim verimliliğini 300 kat arttırdığı sonucunu elde etmişlerdir.

Özkahraman (2017) epoksi uygulanmış bej doğal taş plakalarının daha sağlam ve dayanıklı olduğunu ve epoksi ile tamir edilmiş doğal taş plakaların, yorulma ve mikro çatlama karşı daha iyi direnç gösterdiğini ve su girişinden kaynaklanan bozulmaları azalttığını vurgulamıştır.

Kahraman vd. (2020) mikrodalga işleminin dokuz farklı magmatik kayacın mukavemeti üzerindeki etkilerini araştırmışlar. Bu kapsamda işlem görmemiş ve mikrodalga ile farklı sıcaklıklara maruz kalmış numuneler üzerinde basınç dayanımı ve Brezilya çekme dayanımı testlerini yapmışlardır. Sonuç olarak, mikrodalga gücü ve işlem süresi arttıkça kaya dayanımının genel olarak azaldığını ve mikrodalga ışımasının, uygulanan enerjiye, maruz kalma süresine ve mineralojiye bağlı olarak magmatik kayaçların mukavemeti üzerinde önemli etkileri olduğu sonucuna varmışlardır.

Bu tez kapsamında Batı Akdeniz bölgesinde yoğun olarak üretimi yapılan bej doğal taşlar, sahip olduğu kırık ve çatlaklar dolayısıyla tamir ve güçlendirmeye ihtiyaç duymaktadır. Genel itibariyle plaka halinde yapılan tamir çalışmaları mevcuttur. Bazı fabrikalarda blok halinde de güçlendirme işleminin yapıldığı da görülmüştür. Gerçekleştirilen bu tamir işlemlerinde özellikle de kurutma aşamasında her fabrikada farklılıklar görülmektedir. Her fabrikanın tecrübe ve maliyet açısından kendine uygun tamir ve/veya dolgu maddesi ve kurutma sistemi kullanmaktadır. En uygun epoksi karışımı ve türü ile kurutma sistemlerini deneme yanılma yoluyla doğruyu bulma çalışmaları vardır. Doğal taş fabrikalarında uygulanan epoksinin kuruması işlemlerinde kullanılan tünel, katlı ve mikrodalga fırınların hangisinin daha uygun olduğu ve fiyat/performans açısından değerlendirmesi, üretim hızları, kayaç özelliklerine etkisi ve kapasiteleri gibi değişkenlerin herhangi bir kıyaslaması ve/veya değerlendirmesi çok fazla çalışılmamıştır. Bu tez çalışmasında daha önce yapılmamış olan değişkenler incelenecek, epoksi uygulanmış nihai ürünlerde

kurutma yöntemlerinin kayacın fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi belirlenerek en uygun kurutma yöntemi belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar ile doğal taş fabrikalarında yaygın olarak kullanılan kurutma yöntemlerinin teknik ve bilimsel olarak karşılaştırması yapılmıştır.



3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Bu bölümde; tezde kullanılan kayaç türü, deneylerde kullanılan kurutma fırınları ve cihazlar ile ilgili bilgiler yer almaktadır.

Tez kapsamında Burdur ili, Merkez ilçesine bağlı Karaçal köyünde üretimi yapılan sedimanter kökenli mikritik dokulu bej doğal taş üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bej doğal taşların oluşumundan kaynaklanan oldukça sık çatlaklı olması ve epoksi kullanılmadan ekonomiye kazandırılması zor olduğundan bu kayaç türü seçilmiştir (Şekil 3.1). Doğal taşa ait fiziksel ve mekanik özellikler bulgular bölümünde ayrıntılı olarak verilmiştir. Çalışma kapsamında aynı bloktan ST ile kesilmiş 5,2x63x63 cm boyutlarında plakalar kullanılmıştır. Plaka seçiminde kırık-çatlak sistemlerinin yoğunluğunun homojen ve birbirine çok yakın olan numunelerin seçilmesine dikkat edilmiştir.

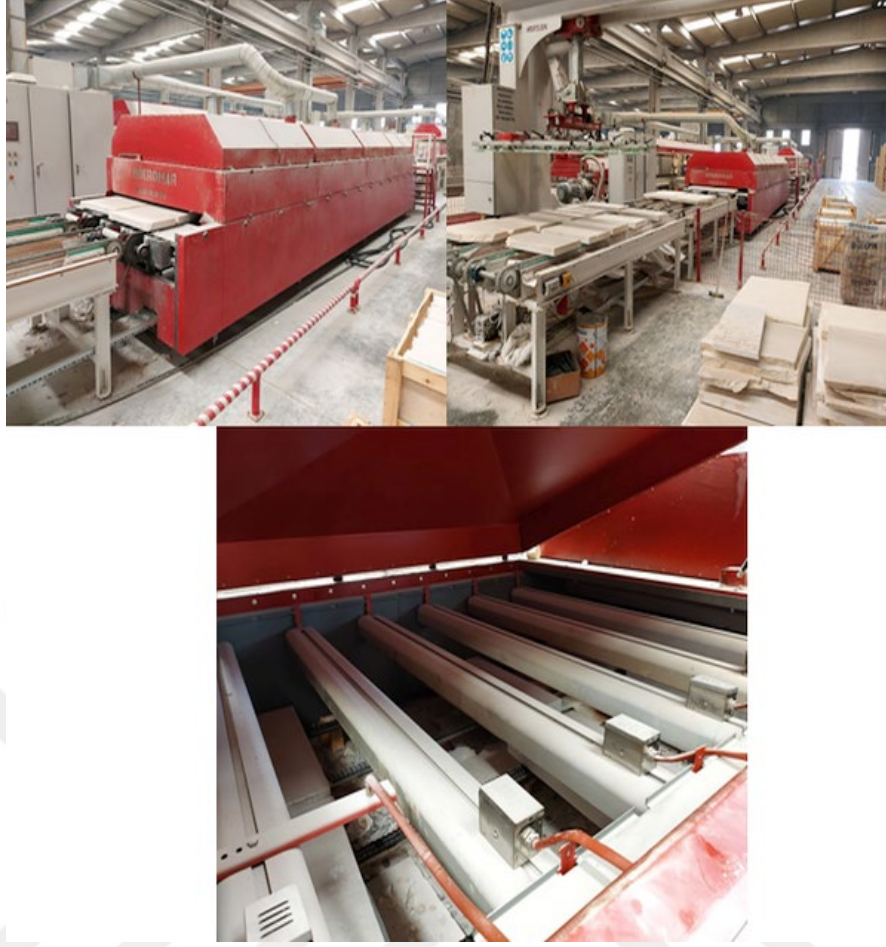


Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan bej doğal taşların genel görünümü

Kurutma fırını üreticileri, doğal taş üreticileri için farklı hatlara sahip sistemler geliştirmektedirler. Ülkemizde genel olarak 3 çeşit fırın ön plana çıkmaktadır. Bunlardan mikrodalga fırınlar piyasa da daha az bulunmaktadır. Tez kapsamında numunelerin kurutma işlemleri aynı fabrikada bulunan 3 farklı fırında yapılmıştır.

1. Tünel fırın hatlar
2. Katlı fırın hatlar
3. Mikrodalga fırın hatlar

Tünel fırın hatlar; sabit bir hat üzerine yerleştirilmiş, yaklaşık 20-30 m uzunluğa sahiptir. İşletmenin büyüklüğüne ve istenilen kapasiteye göre boyutları üretici firmalar tarafından daha uzun olabilmektedir (Şekil 3.2). Enerji olarak doğal gaz veya elektrikle çalışabilirler. Ekonomiklik açısından doğalgaz kullanmak %20 maliyeti azaltmaktadır. Fakat birçok işletmenin şehir merkezine olan uzaklığından dolayı işletmeler elektrik enerjisi ile çalışan fırınları tercih etmektedir. Fırının içerisinde farklı materyallerden yapılmış rezistanslar bulunmaktadır. Rezistanslar IR, seramik, serpantin, tüp, mika vb. olabilmektedir. Hat üzerinde sabit hızla hareket eden konveyör doğal taşın kuruması veya reçine uygulanmış yüzeyin kurlenmesi için belirli hızla hareket etmektedir. İşletmeler kendi ürünleri için optimum süreyi uygulamakta olup genellikle maksimum 3 m/dak'dır. Hava sirkülasyonunu sağlamak için kullanılan fan, ısı sirkülasyonu oluşturarak daha dengeli bir ısıtma sağlar. Doğal taş işletmelerinde üretim yöntemleri ve kapasitelerine göre birden fazla tünel fırınlar bulunmaktadır (Akras Makine, 2020). Genellikle 2 fırınlı hatlar daha çok kullanılmaktadır. Bu hatlar temel olarak yükleme ünitesi, ön kurutma fırını, reçine veya epoksi uygulama hattı, polimerizasyon için 2. fırın ve boşaltma ünitesi bulunmaktadır (Acar, 2003; Sarıışık ve Şentürk, 2003).



Şekil 3.2. Tünel fırın hat

Bu çalışmada numunelerin kurutma işlemleri 1200 cm uzunlukta, 140 cm eninde ve 64 adet IR lamba (230 v, 4000 Watt) bulunan tünel fırında gerçekleştirilmiştir. Tünel fırının nominal ısı girişi 94 kW, ısı çıkışı 82,2 kW, havanın hacimsel debisi (20 °C) 6000 m³/h, statik basıncı 250 Pa'dır.

Katlı fırın hatlar, tünel fırınların çok yer kaplaması ve üretim kapasitelerinin düşük olması sebebiyle tasarlanmış olup günümüzde özellikle epoksi tamir sistemlerinde daha çok tercih edilmektedirler (Şekil 3.3). Tercih edilmelerinin en önemli sebeplerinden birisi, ısıtmanın etkinliği ve kalitesidir. Burada önemli nokta, plakaların optimum ve ideal bir sıcaklıkta, en uygun enerji maliyetleri ile homojen ve eşit bir şekilde ısıtılarak, nemin plakadan uzaklaştırılmasıdır. Sistemde şartlara göre gerek doğalgaz (ya da LNG) ya da elektrikli ısıtma sistemleri kullanılmaktadır. Son teknolojiler kullanılarak tasarlanan katlı fırınlarda ısınan havayı tekrar kullanmak yolu ile doğal taş plakalarının en

uygun ve ideal şekilde ısıtılmasını, enerji kaybını ve maliyetlerini en aza indirilmesi sağlanmıştır (Mermerepoksi, 2020).



Şekil 3.3. Katlı fırın hat

Tez kapsamında kullanılan numunelerin kurutma işlemleri, toplam boy uzunluğu 96 m, LNG ile çalışan 40 katlı fırınlarda yapılmıştır.

Mikrodalga fırın hatlar, çalışma prensibi yiyecek ve diğer malzemeleri ısıtması ile aynı konseptte dayanmakta olup farklı alanlarda üretim operasyonlarında kullanılmış ve günümüzde nadir olsa da doğal taş işletmelerinde kullanılmaktadır (Şekil 3.4). Doğal taş plakaları, epoksi-file uygulamasından sonra ılık hava havalandırması ile birlikte çalışan mikrodalga ünitesine girer. Plaka otomatik olarak mikrodalga ünitesinde birkaç dakika (genellikle 4 dakika) ileri geri hareket eder ve daha sonra bir saat kurur. Geleneksel bir reçine hattında tamir görmüş plakalar 2 ile 3 saat ısıtılmış bir kurutucuya yerleştirilir ve daha sonra 24 ile 72 saat arasında herhangi bir yerde kürlenir. İşlem sırasında doğal taştaki reçine ve nem ısıtılırken, taş ısıtılmamaktadır. Daha hızlı ve kapasitesinin yüksek olmasına ek olarak, mikrodalga teknolojisinin kullanımı reçine uygulamasının etkinliğini arttırmaktadır. Mikrodalga ünitesine yerleştirildiğinde, tipik bir vakum reçine uygulama sisteminin aksine reçine

ısınır ve akar. Reçine daha düşük bir viskoziteye ulaştığından, plakanın daha derinlerine nüfuz eder ve en derin çatlaklara epoksi ulaşır (Stoneworld, 2020).



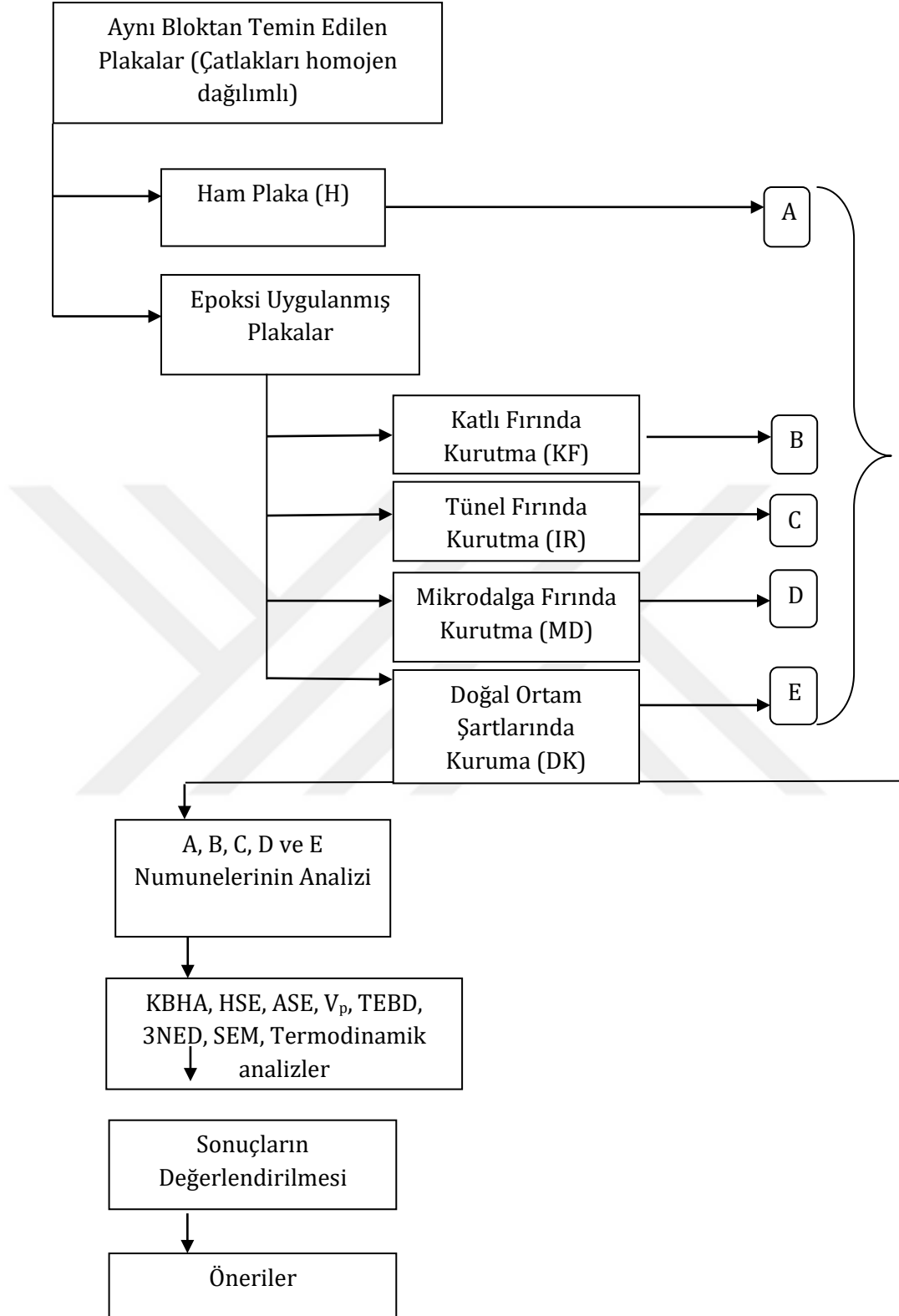
Şekil 3.4. a) Mikro dalga fırın hat ve b) magnetron tüpler

Mikrodalga ile ısıtma, ürünün derinliklerine nüfuz edebilen elektromanyetik enerji formunda olduğu için klasik ısıtmadan farklıdır. Doğal taş işleme tesislerinde bazı ülkelerde plaka ve/veya levhalarda epoksi kürlendirme amaçlı aynı teknolojiye sahip makineler kullanılsa da, yerli üretim, plaka ve fayanslar için kurutmada mikrodalga teknolojisi oldukça yenidir. Mikrodalga kurutma konusunda sağladığı avantajlar olmakla birlikte doğal taş sektörü için yeni bir yöntem olduğundan uygulamalarda yetersiz kalınmakta ve problemlerin çözümünde uzman personel ve/veya yatırımcı bulmakta güçlük çekilmektedir.

Bu tez kapsamında kullanılan mikrodalga fırın 13 m uzunluğunda olup 1,2-1,8 m/dak arasında sistemin çalışması öngörülmüştür. Mikrodalga hattının kurutma fırınında ürün kurutma işlemini gerçekleştiren 96 adet magnetron tüp bulunmaktadır. Mikrodalga üreteçleri tam kapasite de yaklaşık 5000 saat çalışması öngörülmektedir. Oluşacak dalga kaçaklarına ait güvenlik limitleri maksimum 5 miliwatt/cm²'dir.

3.2. Metot

Tez çalışması, literatür araştırmalarını da kapsayan dört ana aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada tez konusu ile ilgili literatür taraması yapılmış ve bu çalışmaların ışığından yararlanılmaya çalışılmıştır. İkinci aşamada, aynı doğal taş bloğundan alınan plakaların iki yüzeyi de filesiz olarak doğal taş fabrikasında rutin uygulanan epoksi ile kırık-çatlaklar tamir edilerek 5 gruba ayrılmış; ham (epoksi uygulanmamış), epoksili havada kurumuş (fırınlanmamış), tünel, katlı ve mikrodalga fırınlarında kurutulmuş plakalar hazırlanmıştır. Üçüncü aşamada standartlara uygun geometriye getirilen numuneler üzerinde laboratuvarda kuru birim hacim ağırlık (KBHA), hacimce (HSE) ve ağırlıkça su emme (ASE) oranları, sismik hız (V_p), Tek eksenli basma dayanımı (TEBD), Yoğun yük altında bükülme dayanımı tayini (3 nokta eğilme dayanımı (3NED)), SEM analizleri ve termodinamik analizler yapılmıştır. Son aşamada ise analizler sonucu değerlendirmeler ve öneriler yapılarak bej doğal taş için en uygun kurutma türü belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında uygulanacak metodoloji Şekil 3.5'te verilen akım şemasıyla özetlenmeye çalışılmıştır.



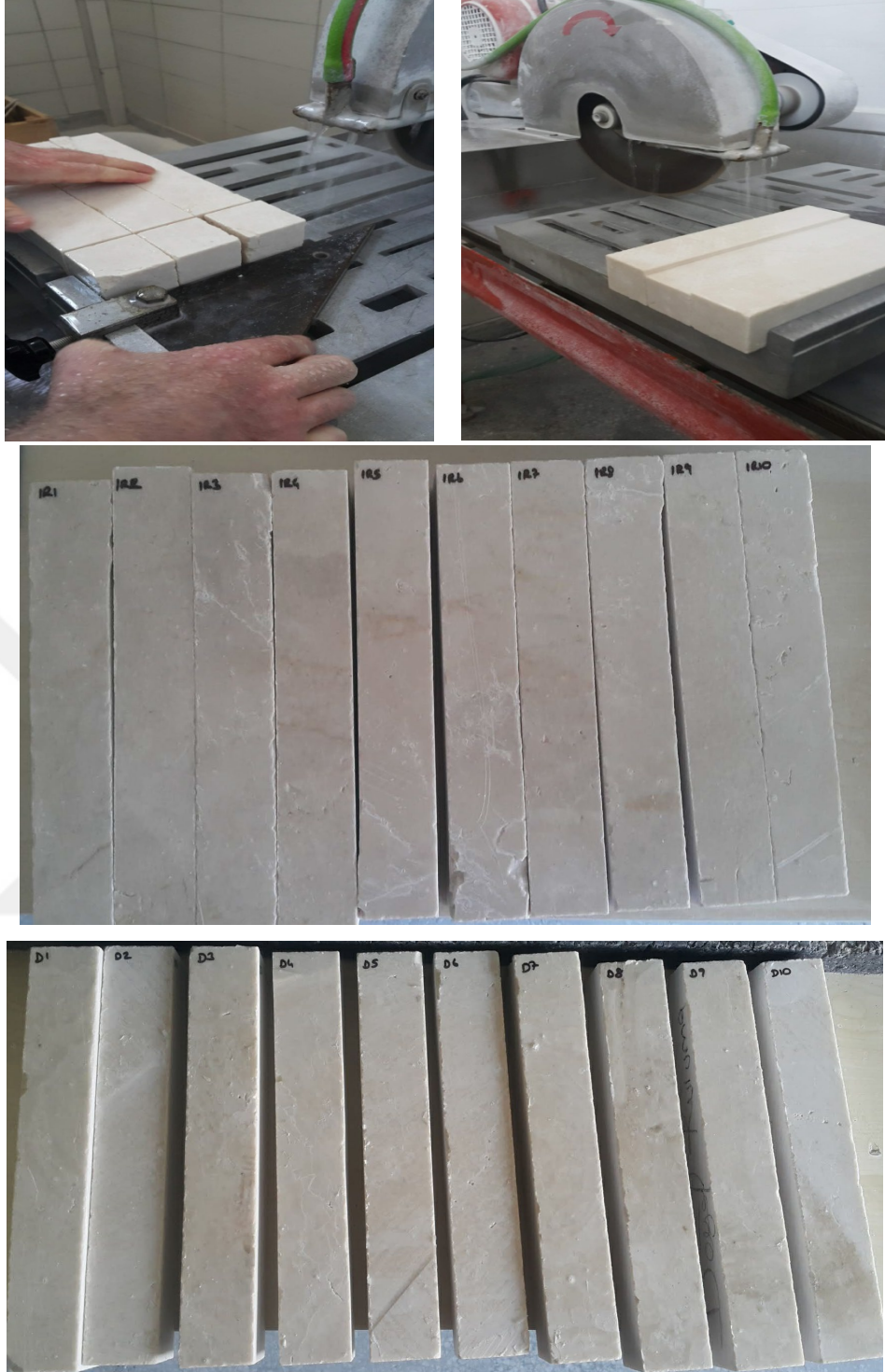
Şekil 3.5. Tez çalışmasında uygulanan metodoloji

3.2.1. Deney numunelerinin temini ve hazırlanması

Tez kapsamında kullanılan doğal taş plakaları aynı bloktan doğal taş fabrikasında ST (dairesele testereli) ile 5,2x63x63 cm boyutlarında kesilmiştir. Kesilen bu plakalar doğal taş fabrikasında ön ve arka olmak üzere iki tarafına da fabrikada standart olarak uygulanan epoksi uygulaması (100:25) yapılmış ve akım şemasında belirtilen süreç işlemiştir. Numunelerin mümkün olduğunca her birinin benzer homojenlikte kırık-çatlak içermesine dikkat edilerek kayaçtan kaynaklanan problemler elimine edilmeye çalışılmıştır. Fabrikada doğal ortam şartlarında kuruyan numuneler 48 saat boyunca ortalama 14.5 °C sıcaklıkta ve % 55 nem ortamında bekletilmiştir. Tünel, katlı ve mikrodalga fırınlarında ise 45 °C sıcaklıkta 15 dakika boyunca kurumaları sağlanmış daha sonra fabrika ortamında 12-24 saat bekletilmiştir. Fabrikada hazırlanan numuneler SDÜ Maden Mühendisliği Kazı Mekaniği ve Doğal Taşlar Laboratuvarında baş kesme makinası ile ilgili standartlar doğrultusunda ham ve her bir kurutma işlemi için gerekli adet ve boyutlara getirilerek deneyler yapılmıştır (Çizelge 3.1 ve Şekil 3.6).

Çizelge 3.1. Numune boyutları ve sayıları

Numune Boyutları (mm)		Min. Num. Adedi	Deney
En*boy*yük.	50*50*50	10	KBHA, ASE, HSE
	50*50*50	10	TEBD, V _p
	50*50*300	10	3NED



Şekil 3.6. Deney numunelerinin genel görünümü

3.2.2. Fiziksel özelliklerin belirlenmesi

Kayaçların KBHA ve HSE deneyleri, TS EN 1936 standardına göre, ASE ise TS EN 13755 standardına göre yapılmıştır. Deneylerde kullanılan cihazlara ve numunelere ait fotoğraflar Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Numunelerin KBHA, ASE ve HSE deneylerinin genel görünümü

Kayaçların P dalga hızı değerleri TS EN 14579 standardına göre Pundit marka cihaz ile kenar uzunluğu 50 mm olan küp şeklinde numuneler üzerinde belirlenmiştir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Kayaçların P dalga hızı değerlerinin belirlenmesi

3.2.3. Mekanik özelliklerin belirlenmesi

Kayaçların TEBD deneyleri TS EN 1926 standardına göre 200 ton kapasiteli hidrolik pres ile 50x50x50 mm boyutlarına sahip numunelerde 0.5-1.0 MPa/s yükleme hızlarında yapılmıştır (Şekil 3.9).

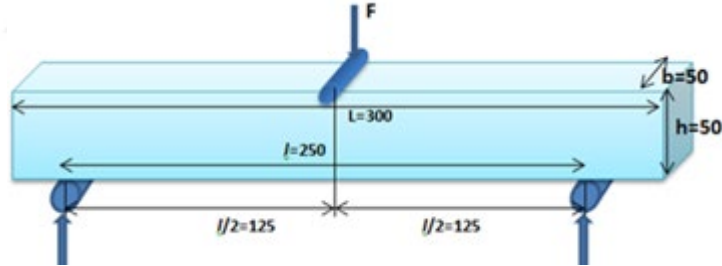


Şekil 3.9. Kayaçların TEBD değerlerinin belirlenmesi

Kayaçların 3NED deneyleri TS EN 12372 standardına göre 50x50x300 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde 66 N/s yükleme hızında, UTEST marka 100 kN kapasiteli ve bilgisayar kontrollü “Elektromekanik Üniversal Test Cihazı” kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.10 ve Şekil 3.11).



Şekil 3.10. Kayaçların 3NED değerlerinin belirlenmesi



Şekil 3.11. 3NED deneylerinde kullanılan numune geometri ve boyutları

TSEN standartlarına göre kayaçların 3NED değerleri aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{3NED} = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (3.1)$$

σ_{3NED} = Eğilme dayanımı, MPa

F = Yenilme yük değeri, N

l = Mesnetler arası mesafe, mm

b = Numunenin genişliği, mm

h = Numunenin kalınlığı, mm

3.2.4. SEM analizleri

SEM analizleri Süleyman Demirel Üniversitesi, Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan FEI Quanta FEG 250 marka model cihaz kullanılarak hizmet alımı ile elde edilmiştir.

3.2.5. Katlı kurutma fırının termodinamik analiz hesapları

Çalışmada kullanılan bej doğal taşın ön kurutma sonrası yüzeyi epoksi ile kaplandıktan sonra katlı kurutma fırınına girmektedir. Fırın sıvı doğalgaz (LNG) yakıtlı olup, fırında kullanılan sıvı yakıtlı brülörün ısı kapasitesi 94 kW değerindedir. Kurutma fırınındaki maksimum yakıt tüketimi,

$$\dot{m}_{y,maks} = \frac{\dot{Q}_{brülör}}{H_u \eta_{yanma}} \quad (3.2)$$

denklemleri ile elde edilmektedir. Burada; $\dot{Q}_{brülör}$, brülörün ısı kapasitesi (kW), H_u , sıvılaştırılmış doğalgazın alt ısı değeri olup, 11190 kcal/kg değerindedir. η_{yanma} , yanma verimi olup 0.92 değerinde alınmıştır (Habas, 2022). $\dot{m}_{y,maks}$, maksimum yakıt tüketimini (kg/s) kütleli olarak ifade etmektedir. Maksimum yakıt tüketimi hacimsel olarak (Nm^3/h) ise,

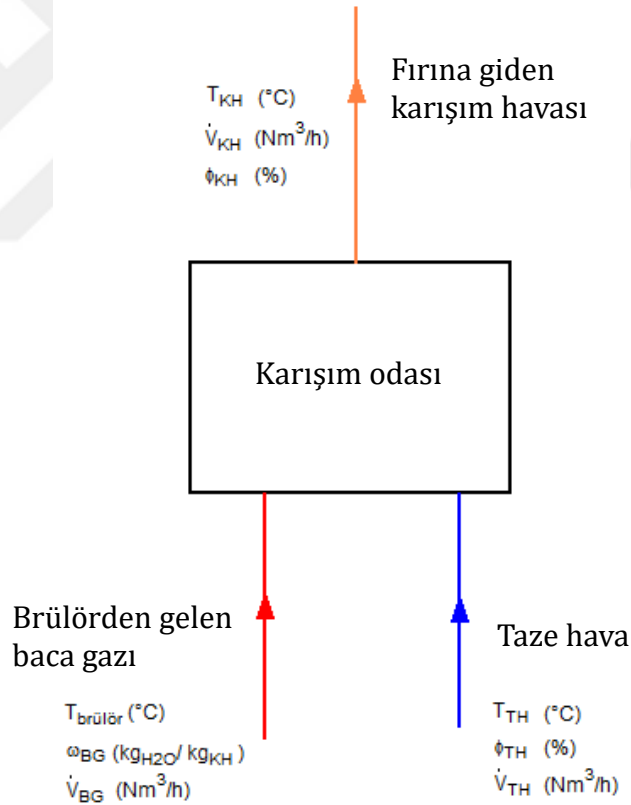
$$\dot{V}_{y,maks} = \frac{\dot{m}_{y,maks}}{\rho_{LNG}} 3600 \quad (3.3)$$

ile hesaplanmaktadır. ρ_{LNG} normal koşullar altındaki LNG' nin yoğunluğunu ifade etmektedir (kg/m^3). Brülör kapasitesine göre teorik baca gazı üretimi (Nm^3/h),

$$\dot{V}_{BG} = \dot{V}_{y,maks} V_{BG} \quad (3.4)$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır. Burada, V_{BG} birim Nm^3 LNG yakıtı başına oluşan baca gazı hacmi olup, yakma havasının koşullarına göre 11,1 ile 12 $\text{Nm}^3\text{BG}/\text{Nm}^3\text{LNG}$ değeri arasında değişmektedir. Bu çalışmada 11,8 $\text{Nm}^3\text{BG}/\text{Nm}^3\text{LNG}$ değeri alınmıştır.

Katlı kurutma fırınına ait karışım odasının şematik görünümü Şekil 3.12’ de gösterilmektedir. Buna göre, brülör baca gazı ile çevre hava bir karışım odasında karışıp 45 °C sıcaklıkta kurutma havası elde edilmektedir. Şekil 3.12’de görüldüğü üzere, $T_{brülör}$, brülörde yanma esnasında meydana gelen alevin sıcaklığını, ω_{BG} , birim kg kuru baca gazındaki su buharı miktarını göstermektedir. LNG yakıtının yanması sonucu oluşan baca gazındaki ω_{BG} değeri ise 0.11 kg_{H2O}/kg_{KH} olarak alınmıştır (Wang vd., 2013). T_{TH} , karışım odasına giren taze havanın sıcaklığını, ϕ_{TH} , taze havanın bağıl nemini, $\dot{V}_{TH}$, taze havanın hacimsel debisini ifade etmektedir. Burada, taze havanın hacimsel debisi hesabında katlı kurutma fırınının üreticisi tarafından belirlenen teknik veriler kullanılmıştır. $\dot{V}_{KH}$, katlı kurutma fırınına giden karışım havasının hacimsel debisini, T_{KH} , karışım havasının sıcaklığını, ϕ_{KH} ise karışım havasının bağıl nemini göstermektedir.



Şekil 3.12. Katlı kurutma fırınına giden taze hava ile baca gazının karışımı

Katlı kurutma fırınına giden havanın bağıl neminin hesaplanabilmesi için kütlenin korunumu ile termodinamiğin I. yasasından faydalanılarak,

$$\dot{V}_{BG} + \dot{V}_{TH} = \dot{V}_{KH} \quad (3.5)$$

$$\dot{V}_{BG}h_{BG} + \dot{V}_{TH}h_{TH} = \dot{V}_{KH}h_{KH} \quad (3.6)$$

denklemleri elde edilmektedir. Burada, h_{BG} , h_{TH} , h_{KH} (kJ/kg) sırasıyla baca gazı, taze hava ve karışım havasının entalpileridir. Baca gazı ve taze havanın termodinamik özellikleri nemli hava kabulü ile Engineering Equation Solver (EES) (Klein, 2008) programı yardımıyla hesaplanmıştır. Buna ilave olarak karışım odasının iyi bir şekilde yalıtıldığı, bunun sonucunda çevreyle ısı alışverişinin olmadığı kabul edilmiştir.

3.2.6. Sonuçların değerlendirilmesi ve öneriler

Son aşama olarak, çalışma boyunca elde edilen veriler ışığında ham ve epoksi uygulanmış bej doğal taşların farklı kurutma ortamlarında kurumaya bağlı olarak yapısal özellikleri karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılmıştır.

4. BULGULAR

Tez kapsamında kullanılan bej doğal taşların yapı itibariyle kırık, çatlak ve süreksizliklerinin fazla olmasından dolayı, üretimde zorluklara ve maliyetlerin artmasına neden olmaktadır. Ocaktan üretilen doğal taş blokları hem işletmeye ait fabrikalarda işlenip ihraç edilmekte, hem de dış ülkelere ham blok olarak ihracı yapılmaktadır. Bu çalışmada bej doğal taşın epoksi ile çatlak tamiri yapıldıktan sonra uygulanan 4 farklı kurutma yöntemi; doğal, katlı, tünel ve mikro dalga fırınlarında yapılan kurutma işlemlerinden sonra kayacın fiziksel ve mekanik özelliklerinin nasıl değiştiği konularında deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre en uygun kurutma yöntemi belirlenerek termodinamik analizler ile ispatlanmaya çalışılmıştır. Doğal taş fabrikalarında kurutma türünün, süresinin ve verimliliğinin iyileştirilmesi, fire oranlarını ve maliyetleri düşürerek işletmelerin karlılığını arttırmaktadır. Bej doğal taşın tamirinde kullanılan kurutma türleri sonucunda elde edilen verilere göre aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

4.1. Sağlam (Kırık-Çatlak içermeyen) Numunelerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Üretimi yapılan doğal taşın fiziksel ve mekanik özellikler ilgili standartlara göre SDÜ Maden Mühendisliği Bölümü Doğal Taşlar Teknolojisi Laboratuvarında yapılmış ve Çizelge 4.1’de verilmiştir. Bu özellikler herhangi bir kırık-çatlak içermeyen sağlam numuneler üzerinde belirlenmiştir.

Çizelge 4.1. Sağlam (kırık-çatlak içermeyen) bej doğal taşların fiziksel ve mekanik özellikleri

Özellik	Ortalama	Standart
Sertlik (Mohs)	3-3,5	TS 6809
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2,701±0,004	TS EN 1936
Görünür yoğunluk (g/cm ³)	2,681±0,006	TS EN 1936
HSE (%)	0,340±0,018	TS EN 1936
ASE (%)	0,122±0,014	TS EN 13755
P – Dalga Hızı (m/sn)	6390±90	TS EN 14579
Basınç dayanımı (MPa)	95±22	TS EN 1926
Yoğun yük altında bükülme dayanımı (MPa)	12,9±3	TS EN 12372

4.2. Kırık-Çatlak İçeren ve Farklı Ortamlarda Kurutulmuş Numunelerin Özellikleri

Tez kapsamında kullanılan bej doğal taşların (kırık çatlak vb. yapısal kusurları bulunduran) fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemeye yönelik deneyler ilgili standartlara göre SDÜ Maden Mühendisliği Bölümü Doğal Taşlar Teknolojisi Laboratuvarında yapılmış ve sonuçlar aritmetik ortalama (Ort.), standart sapma (SS) ve değişim katsayısı (DK) değerleri ile birlikte verilmiştir.

4.2.1. Birim hacim ağırlık, ağırlıkça ve hacimce su emme deney sonuçları

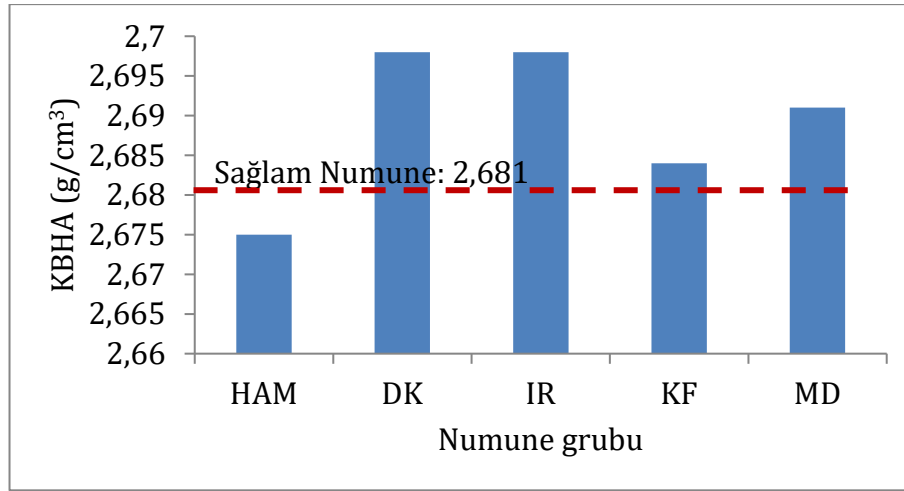
Kayaçların KBHA deneyleri TS EN 1936 standardına göre kenar uzunluğu 50 mm olan küp numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Su emme deneyleri belirli bir geometriye sahip ve/veya olmayan numunelerin ağırlıklarına ve hacimlerine oranla, boşluklarının alabileceği su miktarının belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Bu çalışma kapsamında kullanılan numunelerin, ağırlıkça su emme (ASE) ve görünür gözeneklilik/hacimce su emme (HSE) deneyleri TS EN 13755 ve TS EN 1936 standartlarına göre yapılarak sonuçlar Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Numunelerin fiziksel özellikleri

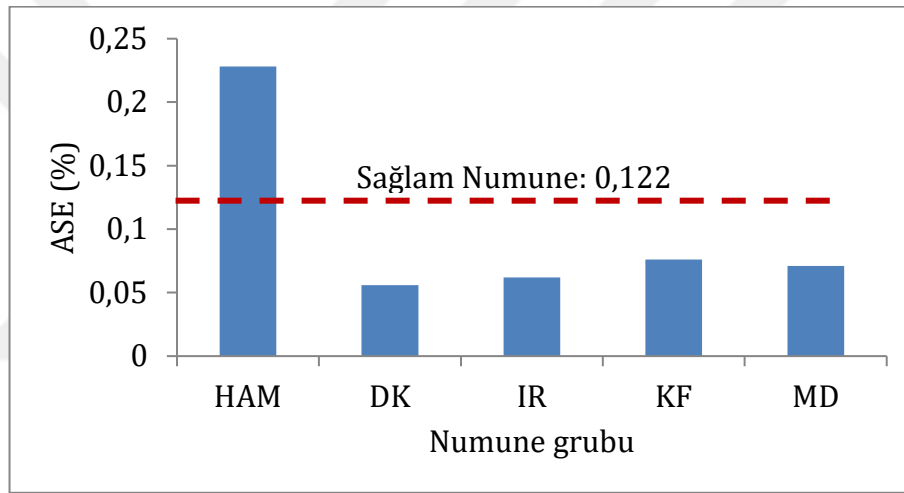
Kurutma Türü	KBHA (g/cm ³)		ASE (%)		HSE (%)	
	Ort.	SS	Ort.	SS	Ort.	SS
Ham	2.675	0.008	0.228	0.053	0.610	0.139
DK	2.698	0.004	0.056	0.014	0.152	0.039
IR	2.698	0.003	0.062	0.011	0.166	0.031
KF	2.684	0.002	0.076	0.010	0.202	0.026
MD	2.691	0.005	0.071	0.026	0.192	0.068

KBHA: Kuru birim hacim ağırlık, ASE: Ağırlıkça su emme, HSE: hacimce su emme (Görünür porozite)

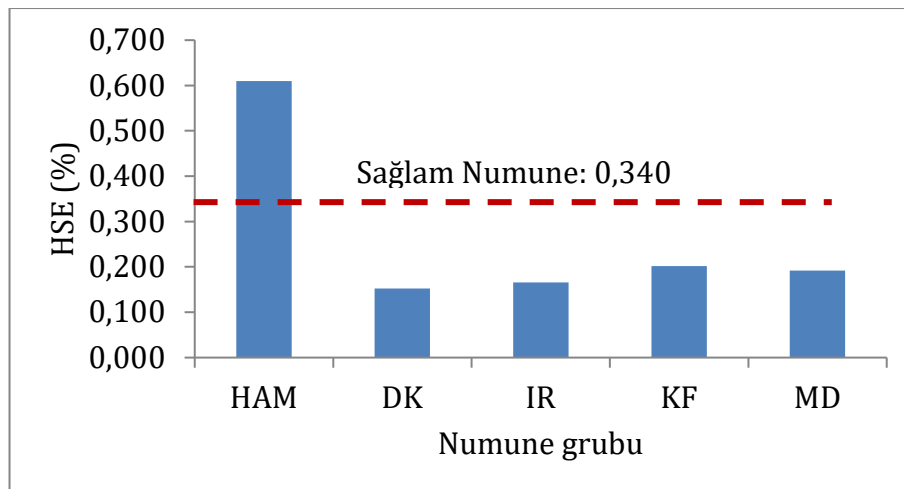
Sonuçlar incelendiğinde en yüksek KBHA değeri DK ve IR kurutma yönteminde, en düşük KBHA ise epoksi işlemi uygulanmamış ham numunelerde elde edilmiştir. ASE ve HSE değerleri incelendiğinde ise ham numunelerle epoksi uygulanmış numuneler kıyaslandığında epoksinin kayda değer oranda kırık-çatlakları doldurduğunu ve su emme oranlarında önemli derecede azalma olduğu görülmekte olup sağlam numuneden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 4.1-4.3). Bu durum şu şekilde açıklanabilir; her ne kadar sağlam numune olarak tanımlansa da mikro boyutta gözenek ve fisür vb. yapısal kusurlar içerdiği, kırık-çatlaklı numunelerde ise bu kusurların bir kısmına epoksinin ulaştığı bir kısmına da epoksinin ulaşamadığı ve/veya yüzeylerinin epoksi ile kaplanmasından dolayı su emme oranının azaldığı şeklinde yorumlanabilir. ASE ve HSE sonuçlarına kurutma tekniğinin etkisi incelendiğinde ise DK yönteminin daha iyi olduğu görülmektedir. Ayrıca epoksi sayesinde bej doğal taşların ağırlıkça ve hacimce su emme oranları 3-4 kat (% 67-75) azalarak dayanım ve dayanıklılıkları artmakta ve bundan dolayı daha uzun ömürlü olabilecekleri öngörülmektedir.



Şekil 4.1. Numunelerdeki KBHA değişimleri



Şekil 4.2. Numunelerdeki ASE değişimleri



Şekil 4.3. Numunelerdeki HSE değişimleri

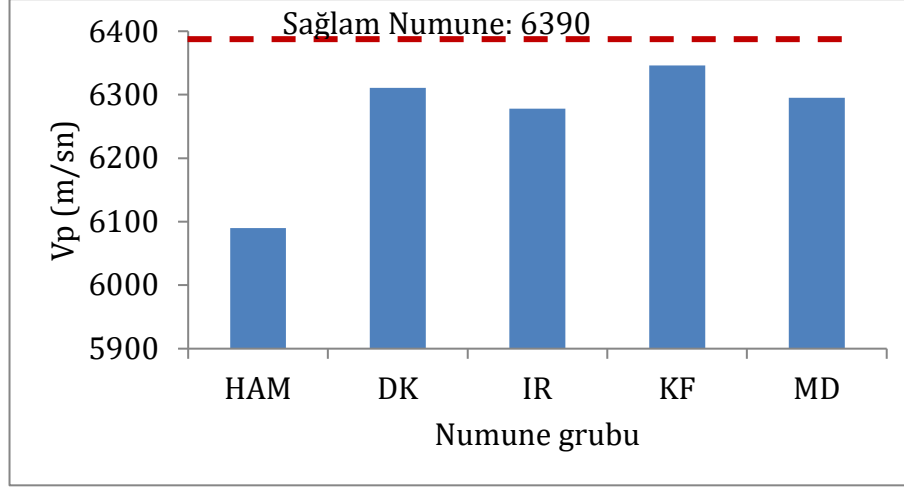
4.2.2. Sismik hız deney sonuçları

P-dalga hızı kayaçların elastiklik ve çatlaklılığının bir ölçüsü olarak kayacın yapısal özellikleri açısından da bir gösterge olabilmektedir. Deneylerde kullanılan kayacın içerdiği kırık-çatlak, boşluk-gözenek gibi süreksizliklerin miktarı fazla ise numuneden geçen ses dalgaları daha fazla yol kat etmekte ve geçme süresi artmaktadır. Kayaçların P-dalga hızları (V_p) 50x50x50 mm boyutlarında 10'ar adet küp numune kullanılarak TS EN 14579 standardına göre belirlenmiş olup sonuçlar Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. P-dalga hızı değerleri

Kurutma Türü	V _p (m/s)		DK (%)
	Ort.	SS	
Ham	6090	76	1.25
DK	6311	40	0.63
IR	6278	35	0.56
KF	6346	58	0.91
MD	6295	74	1.18

Sonuçlara göre en yüksek V_p değerleri doğal kuruma ve katlı fırında kurutulmuş numunelerde, en düşük V_p değerleri ise ham numunelerde elde edilmiştir. Elde edilen sonuçların Çizelge 4.2'te verilen ASE ve HSE değerleri ile uyumlu olduğu, kırık-çatlak sistemleri fazla olan ham numunelerin V_p değerlerinin düşük olduğu görülmektedir. Epoksi uygulanmış kayaçların sismik hız değerleri birbirine oldukça yakın değerler olduğu görülmüş olup, KF ve DK kurutmada yaklaşık % 4 oranında sismik hız değerlerinde bir iyileşme var iken, diğer kurutma yöntemlerinde yaklaşık % 3 oranında iyileşme olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, değişim katsayıları incelendiğinde ise DK, IR ve KF yöntemlerinde daha homojen kuruma ve/veya epoksinin çatlaklara daha düzenli işlediği düşünülebilir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Kurutma durumuna göre numunelerdeki V_p değişimleri

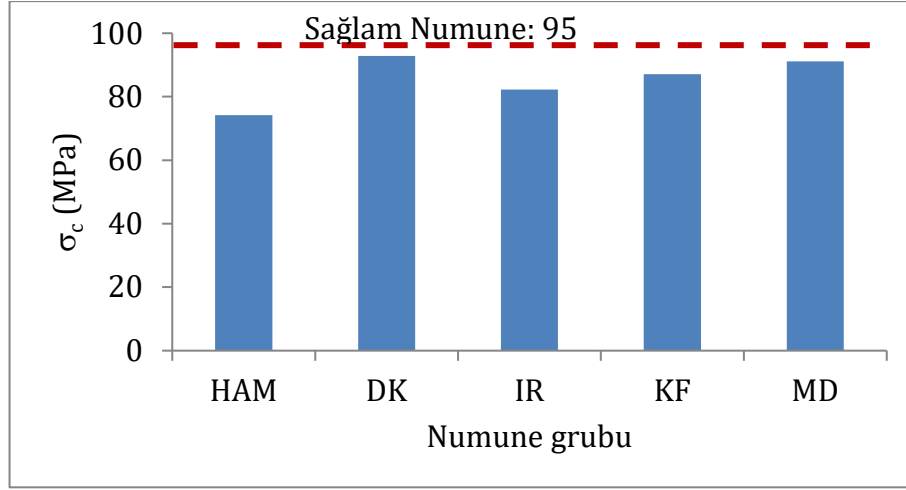
4.2.3. Tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları

TEBD deneyleri, TS EN 1926 standardına göre 50x50x50 mm boyutlarında 10'ar adet küp numune kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.4'te verilen sonuçlara göre TEBD değerleri en yüksek bulunan kayaçlar epoksi uygulanmış kayaçlar, en düşük ise epoksi uygulanmamış ham olarak kullanılan kayaçlardır (Şekil 4.5).

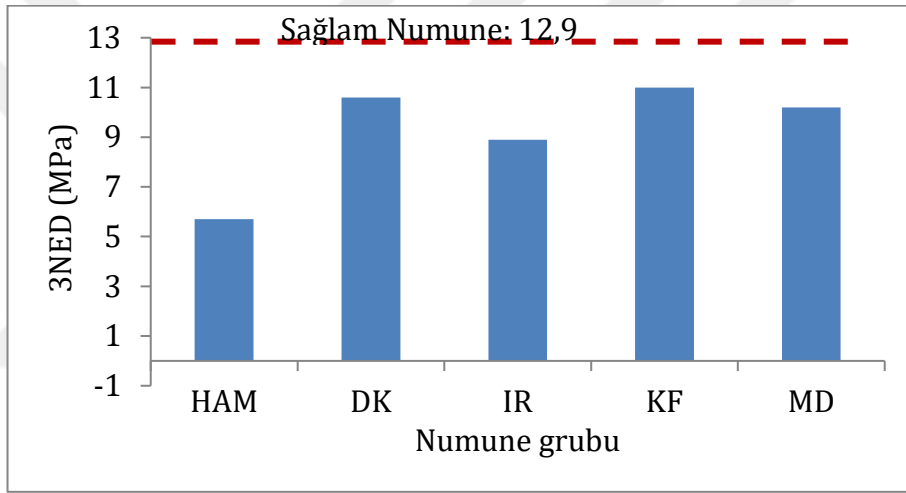
3NED deneyleri, TS EN 12372 standardına göre 50x50x300 mm boyutlarında 66 N/s yükleme hızında minimum 10 adet prizmatik numuneler üzerinde yapılmıştır (Çizelge 4.4). 3NED deney sonuçları incelendiğinde en düşük değerler epoksi uygulanmamış ham numunelerde, en yüksek değerler ise epoksi uygulanmış numunelerde elde edilmiştir (Şekil 4.6).

Çizelge 4.4. Numunelerin TEBD ve 3NED sonuçları

Kurutma Türü	TEBD (MPa)		DK (%)	3NED (MPa)		DK (%)
	Ort.	SS		Ort.	SS	
Ham	74.2	6.9	9.30	5.7	0.5	8.77
DK	92.8	12.8	13.79	10.6	2.0	18.87
IR	82.3	6.7	8.14	8.9	0.4	4.49
KF	87.1	10.1	11.60	11.0	2.5	22.73
MD	91.1	12.5	13.72	10.2	0.9	8.82



Şekil 4.5. Kurutma durumuna göre numunelerdeki TEBD değişimleri



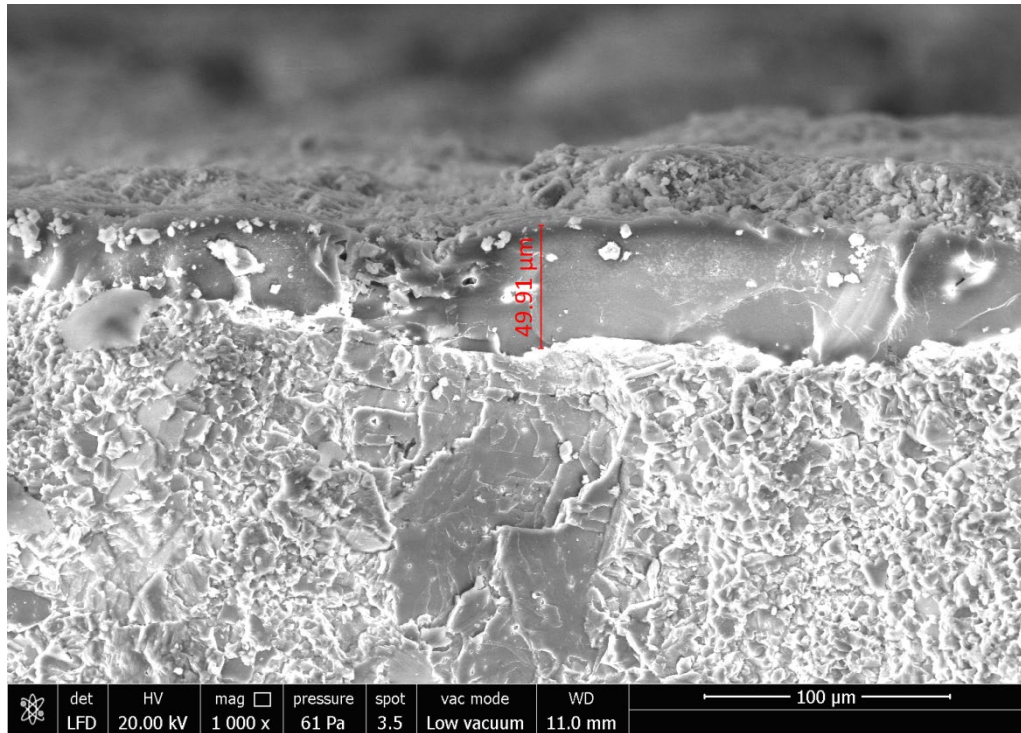
Şekil 4.6. Kurutma durumuna göre numunelerdeki 3NED değişimleri

Kırık çatlaklı plakalara epoksi uygulaması yapıldıktan sonra kayaç özellikleri sağlam (herhangi bir kırık-çatlak içermeyen) numunelerin TEBD ve 3NED dayanım değerlerine oldukça yaklaştığı görülmüştür. Epoksi sayesinde kullanılamayacak durumda kırık-çatlak içeren bej doğal taşlar sağlam kaya özelliklerine kavuşmuştur. Epoksi uygulaması ile, bej doğal taşların TEBD değerlerinde IR kurutmada % 11, KF kurutmada ise % 17, MD kurutmada % 23 ve DK kurutmada ise % 25, 3NED değerlerinde ise, IR kurutmada %56, MD kurutmada ise % 79, DK kurutmada % 86 ve KF kurutmada ise % 93 oranlarında dayanım artışı olduğu tespit edilmiştir. Böylece epoksi uygulanmış bej doğal taşların daha sağlam ve dayanıklı olduğu belirlenmiştir. En uygun kurutma türünün belirlenmesi için TEBD ve 3NED dayanım değerlerinin

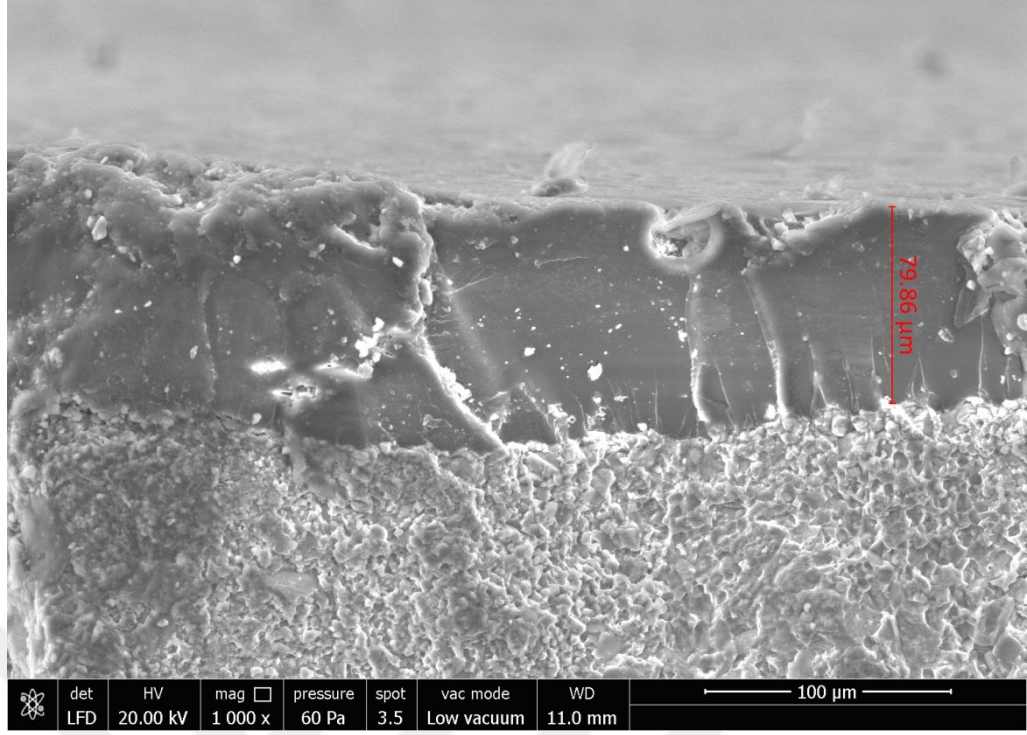
artışları birlikte değerlendirildiğinde DK, KF, MD ve IR olarak bir sıralama yapılabilir.

4.2.4. SEM analizleri

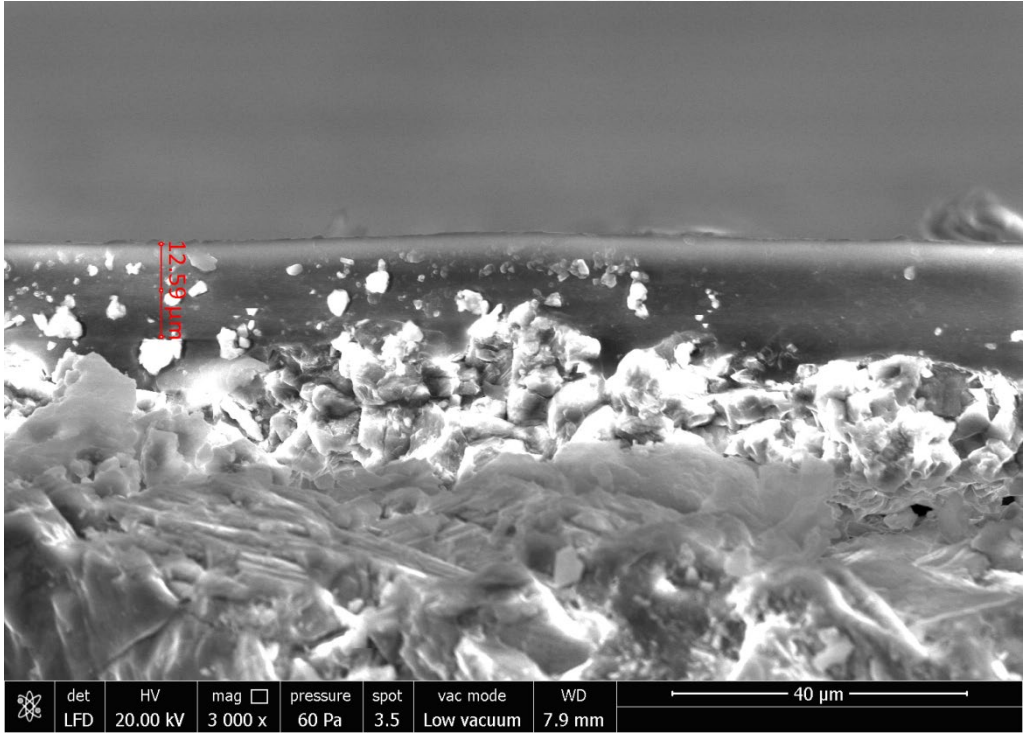
SEM analizlerinde numuneler üzerine herhangi bir iletken malzeme kaplanmamış iletkenlik cihazın Low Vacuum modu kullanılarak sağlanmıştır. Kabin basıncı 60 pascal olarak ayarlanmıştır. 4 farklı numune için farklı büyütme oranlarında kesit görüntüleri elde edilmiştir. Görüntüler incelendiğinde her bir numunenin epoksi kaplaması oldukça homojen fakat uygulamadan kaynaklı kaplama kalınlık değerleri farklılık göstermektedir. DK kurumada 49,91 μm , KF kurutmada 79,86 μm , MD kurutma 12,59 μm , IR kurutma ise 56,12 μm epoksi kalınlıkları belirlenmiştir. Çalışmanın amacı kaplanan epoksinin numune üzerindeki mikro çatlak kısımlardan iç kısımlara nüfuz edip numune dayanımını artırmaktır. Kesit yüzeylerden çatlak kısımlara odaklanılmış epoksinin numunenin iç kısımlarına nüfuz ettiği net bir şekilde görülememiştir (Şekil 4.7-4.10).



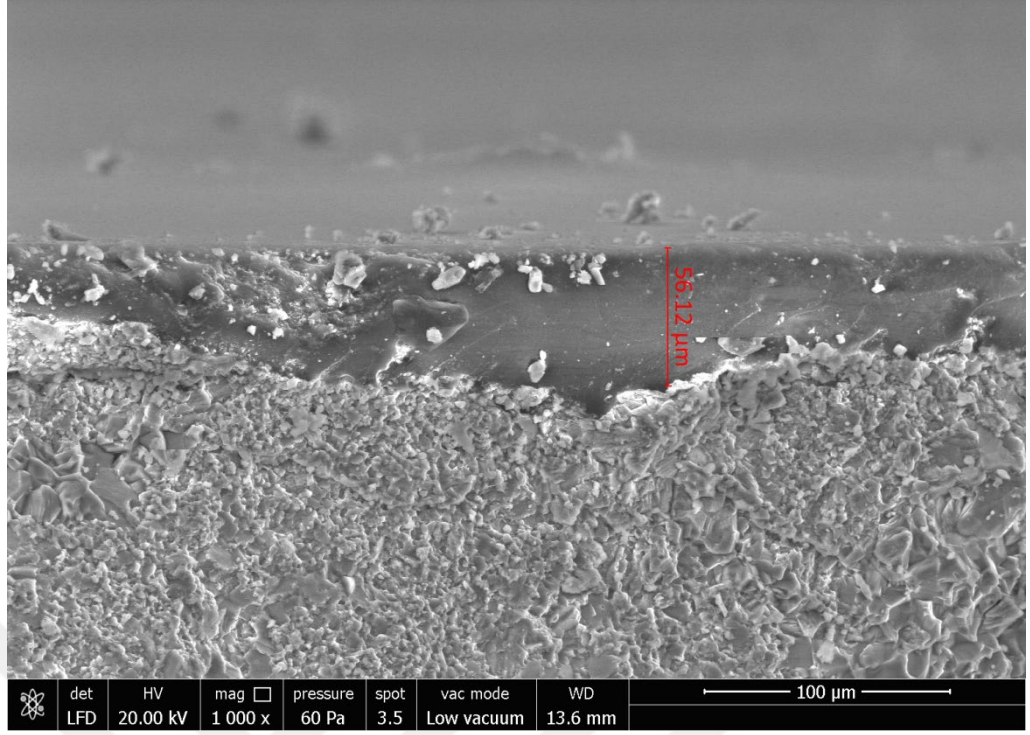
Şekil 4.7. DK kurutma SEM görünümü



Şekil 4.8. KF kurutma SEM görünümü



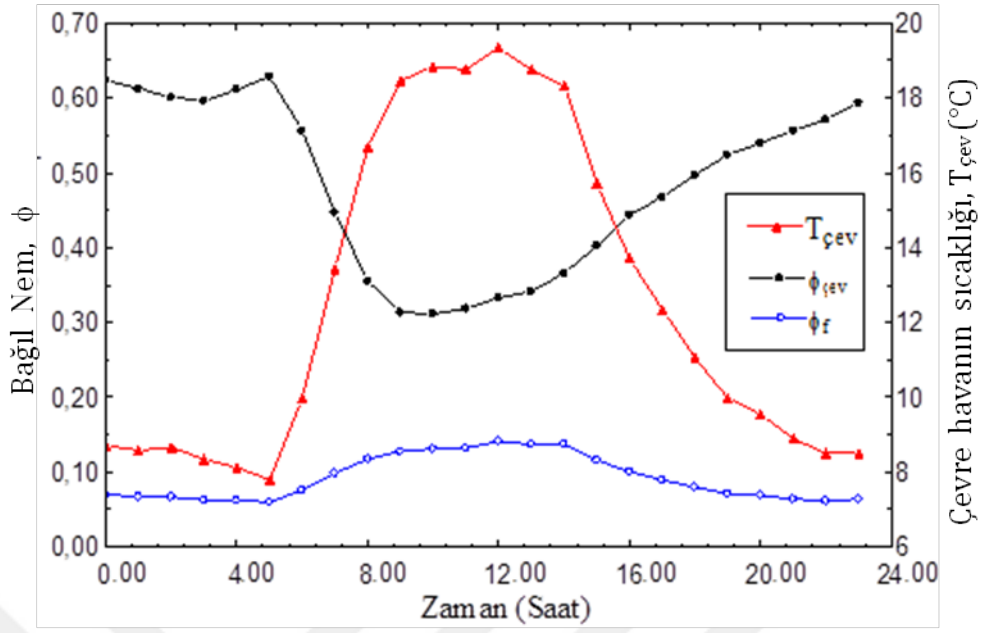
Şekil 4.9. MD kurutma SEM görünümü



Şekil 4.10. IR kurutma SEM görünümü

4.2.5. Katlı kurutma fırının termodinamik analizi

Farklı kurutma türleri sonucunda yapılan laboratuvar test sonuçlarına göre en uygun ve yaygın yöntem KF olduğu için termodinamik analizler yapılmıştır. Bu analizlerdeki amaç KF yönteminden elde edilen laboratuvar sonuçlarını desteklemek için gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda saatlik dış hava şartlarına göre fırın içi ve doğal kurutma havası bağıl nem değerlerinin değişimi Şekil 4.11’ de görülmektedir.

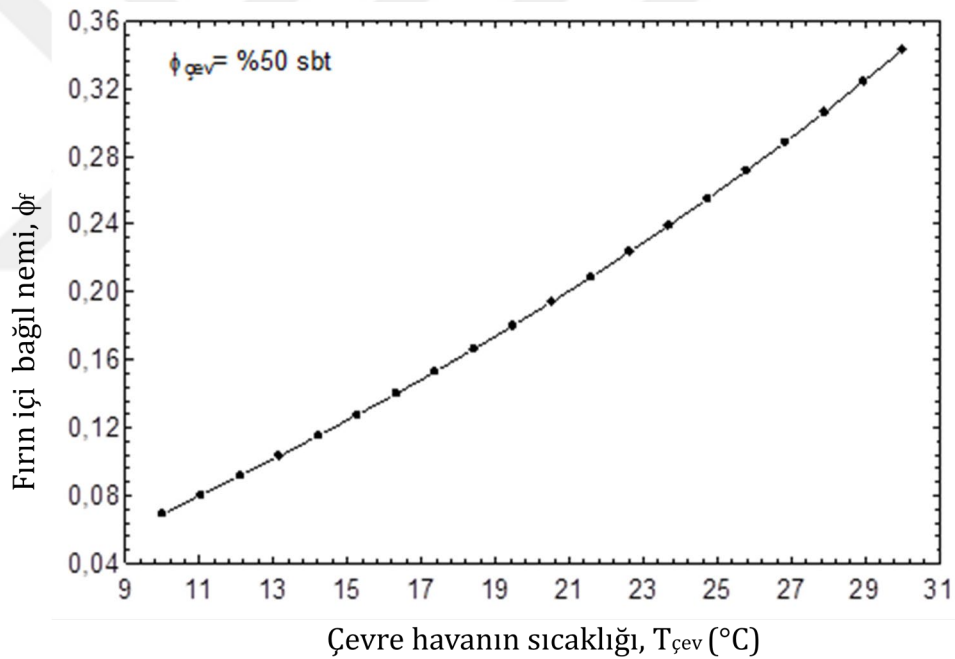


Şekil 4.11. Saatlik dış hava şartlarına göre fırın içi ve doğal kurutma havası bağıl nem değerlerinin değişimi

Numuneler 7-14 Kasım 2021 tarihleri arasında Denizli bölgesindeki bir fabrikada hazırlandığından dış havanın sıcaklık ve bağıl nem değerleri Meteoroloji Genel Müdürlüğünden saatlik olarak alınmıştır. Sıcaklık ve bağıl nem değerleri saatlik olarak 7 günlük dış hava şartlarının ortalamaları alınarak elde edilmiştir. Fırın içerisindeki havanın sıcaklığı 45 °C olarak alınmıştır. Çevre havanın sıcaklığı gün içerisinde (8:00-15:00 saatleri arasında) en yüksek değerlere ulaşmış olup, çevre havanın bağıl neminin ise bu saatler arasında en düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Söz konusu zaman aralığında çevre havanın bağıl neminin düşük olmasından dolayı bej doğal taşın epoksi kaplı yüzeyinde daha yüksek bir kütle taşınım hızı oluşmaktadır. Bunun sebebi, düşük bağıl nemli havanın daha kuru olmasından kaynaklanmaktadır. Dış havanın sıcaklık ve bağıl nem değerleri saatlik olarak esas alınarak LNG yakıtlı katlı kurutma fırınındaki havanın bağıl neminin doğal kurutma havasına göre daha düşük seviyelerde kaldığı açıkça görülmektedir. Bu durum, LNG yakıtlı katlı kurutma fırınında bej doğal taşın kütle taşınım hızının doğal kurutmaya göre daha yüksek olmasına ve kurutma süresinin kısılmasına sebep olmaktadır. Böylece, bej doğal taşın yüzeyinde meydana gelen epoksi sertleşmesinin katlı

kurutma fırınında doğal kurutmaya göre daha kısa sürede gerçekleştiği açıkça belirlenmiştir.

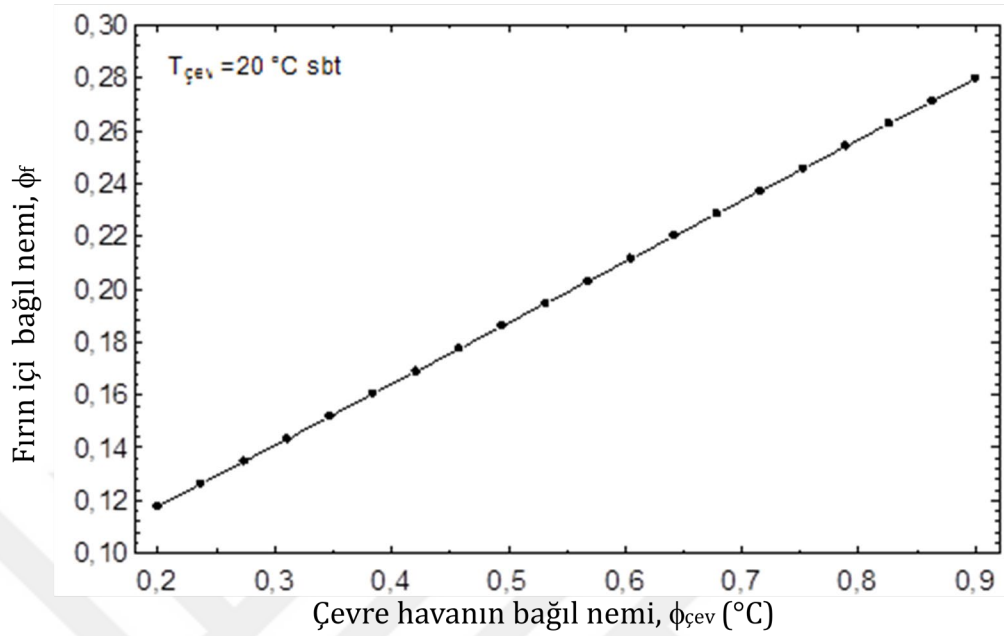
Çevre hava sıcaklığına göre fırın içerisindeki havanın bağıl neminin değişimi Şekil 4.12’ de verilmiştir. Çevre havanın bağıl neminin sabit kalması koşuluyla sıcaklığın artışı ile katlı kurutma fırını içerisindeki havanın bağıl neminin arttığı görülmektedir. Fırın içi bağıl neminin artışı ile kütle taşınım hızı düşmekte, böylece bej doğal taşın epoksi yüzey sertleşme süresinin artmasına yol açacağı söylenebilir. Sonuç olarak, sıcak mevsimlere doğru geçişte kurutma süresindeki artışın sınırlandırılması için fırında kullanılan sıvı yakıtlı brülörün oransal olarak kontrolünün sağlanması gereklidir. Böylece fırın içerisindeki kurutma havasının bağıl nemi düşürülmüş olacaktır.



Şekil 4.12. Çevre hava sıcaklığına göre fırın içi bağıl neminin değişimi

Çevre havanın bağıl nemine göre fırın içinin bağıl neminin değişimi Şekil 4.13’ te verilmiştir. Çevre havanın sıcaklığının sabit kalması koşuluyla bağıl nemin artışı ile katlı kurutma fırını içerisindeki havanın bağıl nemi artmaktadır. Benzer şekilde fırın içi bağıl nemin artışı ile kütle taşınım hızı düşmekte, bu durum epoksi yüzey sertleşme süresinin artmasına yol açacaktır. Özellikle nemin yüksek olduğu günlerde kurutma süresinin uzamaması için fırında kullanılan

yakma sisteminin debisinin oransal olarak değiştirilmesi sağlanarak fırın içerisindeki kurutma havasının bağıl nemi düşürülmelidir.



Şekil 4.13. Çevre havanın bağıl nemine göre fırın içi bağıl neminin değişimi

Katlı fırında gerçekleştirilen termodinamik analizler IR ve MD fırınlarında yapılamamıştır. Fırın içerisindeki havanın sıcaklığına göre IR ve MD fırınlarında kurutma zamanı içerisinde ısıtma kapasiteleri tam olarak belirlenemediği için söz konusu fırınlarda termodinamik analizler yapılamamıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Burdur bölgesinde üretimi yapılan bej doğal taşlarının epoksi ile çatlak tamiri yapıldıktan sonra uygulanan dört farklı kurutma yöntemi; doğal, katlı, tünel ve mikro dalga fırınlarda yapılan kurutma işlemlerinden sonra kayacın fiziksel ve mekanik özelliklerinin nasıl değiştiği konularında deneyler, SEM ve termodinamik hesaplamalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen veriler irdelenerek en uygun kurutma türü belirlenmeye çalışılmıştır. Doğal taş fabrikalarında kurutma hızının ve verimliliğinin arttırılması, fire oranlarını ve üretim maliyetlerini düşürerek doğrudan işletme kazançlarını etkilemektedir. Bej doğal taşın tamirinde kullanılan kurutma türlerinden elde edilen verilere göre aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

ASE ve HSE değerlerine göre kırık çatlak içeren ham numunelerle epoksi uygulanmış numuneler karşılaştırıldığında epoksinin önemli oranda kırık-çatlakları doldurduğunu ve su emme oranlarında önemli derecede azalma olduğu ve kırık çatlak içermeyen sağlam numunelerden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Çünkü her ne kadar sağlam numune olarak tanımlansa da oluşumundan kaynaklı mikro boyutta gözenek ve fisürler vb. yapısal kusurlar içermesi, kırık-çatlaklı numunelerde ise bu kusurların bir kısmına epoksinin ulaştığı bir kısmına da epoksinin ulaşamadığı ve/veya yüzeylerinin epoksi ile kaplanmasından dolayı su emme oranları azalmaktadır. Ayrıca epoksi sayesinde bej doğal taşların ASE ve HSE oranları 3-4 kat (% 67-75) azalarak dayanım ve dayanıklılıkları artmakta ve bundan dolayı daha uzun ömürlü olabilecekleri öngörülmektedir.

Sismik hız değerleri, ASE ve HSE değerleri ile uyumlu olduğu, kırık-çatlak sistemleri fazla olan ham numunelerin V_p değerlerinin düşük olduğu görülmektedir. Epoksi uygulanmış kayaçların sismik hız ölçümlerinin ise birbirine oldukça yakın değerlerde olduğu görülmüş olup, KF ve DK kurutmada yaklaşık % 4 oranında sismik hız değerlerinde bir iyileşme var iken diğer kurutma yöntemlerinde yaklaşık % 3 oranında iyileşme olduğu belirlenmiştir.

Bununla birlikte, değişim katsayıları incelendiğinde ise DK, IR ve KF yöntemlerinde daha homojen kuruma ve/veya epoksinin çatlaklara daha düzenli işlediği düşünölebilir.

Epoksi uygulaması ile bej doğal taşların TEBD değerlerinde IR kurutmada % 11, KF kurutmada ise % 17, MD kurutmada % 23 ve DK kurutmada ise % 25, 3NED değerlerinde ise, IR kurutmada %56, MD kurutmada ise % 79, DK kurutmada % 86 ve KF kurutmada ise % 93 oranlarında dayanım artışı olduğu tespit edilmiştir. Böylece epoksi uygulanmış bej doğal taşların daha sağlam ve dayanaklı olduğu belirlenmiştir.

Kırık çatlaklı plakalara epoksi uygulaması yapıldıktan sonra kayaç özellikleri sağlam (herhangi bir kırık-çatlak içermeyen) numunelerin TEBD ve 3NED dayanım değerlerine oldukça yaklaştığı görölmüştür. Epoksi sayesinde kullanılamayacak durumda kırık-çatlak içeren bej doğal taşlar sağlam kaya (95 MPa ve 12,9 MPa) özelliklerine kavuşmuştur.

Dış havanın sıcaklık ve bağıl nem değerleri saatlik esas alınarak LNG yakıtlı katlı kurutma fırınındaki havanın bağıl neminin doğal kurutma havasına göre daha düşük seviyelerde kaldığından, LNG yakıtlı katlı kurutma fırınında bej doğal taşın kütle taşınım hızının doğal kurutmaya göre daha yüksek olmasına ve kurutma süresinin kısılmasına sebep olmaktadır. Böylece, bej doğal taşın yüzeyinde meydana gelen epoksi sertleşmesinin katlı kurutma fırınında doğal kurutmaya göre daha kısa sürede gerçekleştiği belirlenmiştir.

Çevre havanın sıcaklığının sabit kalması koşuluyla bağıl nemin artışı ile katlı kurutma fırını içerisindeki havanın bağıl nemi artmaktadır. Benzer şekilde fırın içi bağıl nemin artışı ile kütle taşınım hızı düşmekte, bu durum epoksi yüzey sertleşme süresinin artmasına yol açacaktır. Özellikle nemin yüksek olduğu günlerde kurutma süresinin uzamaması için fırında kullanılan yakma sisteminin debisinin oransal olarak değiştirilmesi sağlanarak fırın içerisindeki kurutma havasının bağıl nemi düşürölmelidir. Bu duruma dikkat edilmediği zamanlarda

avantaj gibi görülen kurutma yöntemi zaman ve maliyet açısından dezavantaj oluşturabilir.

Bu çalışma kapsamında en uygun kurutma türünün belirlenmesi için TEBD, 3NED dayanım ve termodinamik analiz sonuçları birlikte değerlendirildiğinde KF, DK, MD ve IR olarak bir sıralama yapılabilir.

Bu çalışmada verilen rakamsal değerler, yalnızca çalışmanın yapıldığı bej doğal taşına ait olup benzer doğal taş işleyen farklı ocak ve fabrikalarda daha farklı rakamsal veriler elde edilebilir. Ayrıca bu çalışmada epoksi çeşidi ve oranları ile ilgili herhangi bir çalışma yapılmamış olup epoksi türü, karışım oranları, fırınlarda uygulanan bant hızları ve sıcaklıklar firmanın uyguladığı standart değerler kullanılmıştır. Bu açıdan farklı bej doğal taşlara uygun epoksi ve karışım oranları ile bant hızı ve uygulanan sıcaklık değerleri teknik elemanlar tarafından belirlenerek, çalışılan kayaca göre en uygun kurutma yöntem ve ortamları belirlenebilir.

KAYNAKLAR

- Acar, H., 2003. Doğal taşlarda çatlak tamir ve gözenek dolgu sistemleri. Türkiye IV. Mermer Sempozyumu, 18-19 Aralık 2003, Afyonkarahisar, 415-434.
- Akçakoca, H., Kaya, S., Ören, Ö., 2006. Mermer-traverten fabrikalarında ürün kalitesinde oluşan problemler. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Entitüsü Dergisi, 11, 131-142.
- Akras Makine, 2020. Erişim Tarihi: 17.01.2020.
www.akrasmakina.com/urunler/tunel-kurutma-firini-epoksi-tunel-mermer-kurutma-firini
- Aydın, G., Karakurt, İ. 2020. Doğaltaş üretim ve işleme tesisi atıklarının değerlendirilmesi. ALKU Fen Bilimleri Dergisi, 2(2): 62-77.
- Baydemir, T., 2020. Epoksi reçine teknolojileri. TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi, Aralık 2020, 22-33.
- Bilim Teknik, 2022. Erişim Tarihi:03.03.2022.
<https://bilimteknik.tubitak.gov.tr/system/files/makale/epoksi.pdf>
- Cevheroğlu, S., 2005. Diyarbakır yöresindeki bazı mermer türlerine uygulanan dolgu yöntemlerinin performanslarının değerlendirilmesi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 49s, Adana.
- Çetin, F., 2001. Gözenek ve çatlak uygulama örnekleri ve bu uygulamaların getirdiği kazançlar. Türkiye III. Mermer Sempozyumu, 3-5 Mayıs 2001, Afyonkarahisar, 445-449.
- Demirdağ, S., Altındağ, R., Şengün, N., Akbay, D., 2018. Isparta yerel ekonomik kalkınma vizyonu 2018 Isparta İli Mermercilik ve Doğal Taş Sektörü Analizi. Adım Matbaacılık, ISBN: 978-605-9454-27-8, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta-Aralık 2018, 85.
- Efe, T., Akbay, D., Demirdağ, S., Şengün, N., Altındağ, R., Uğur, İ., 2012. Bej mermerlerde epoksi uygulamasının atmosferik şartlar altında kayacın bazı fiziksel ve mekanik özelliklere etkisi. MERSEM 2012 8. Uluslararası Mermer ve Doğaltaş Kongresi, 13-15 Aralık 2012, Afyonkarahisar, 463-470.
- Feng, T., Ding, H., Gao, D., Zhang, Z., 2016. Numerical simulation and experiment of hardening behaviors in unsaturated polyester resin artificial marble blocks under microwave radiation. IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 44, No. 10, pp:2485-2492.

- Fernández, J.R., Cabrera, J.M., Pérez, M.E.R., Marín, M.P.V., González, A.M., (2005). Development of a new procedure for the application of microwave energy during marble slab production. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 40:4, 198-210, DOI: 10.1080/08327823.2005.11688547.
- Gökdemir, F., 2010. Doğal taş blok, plaka ve striplerine uygulanan kimyasal dolgu-güçlendirme yöntemlerinin verimliliklerinin araştırılması. Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 89s, Diyarbakır.
- Habas, 2022. Erişim Tarihi:17.05.2022.
<https://www.habas.com.tr/Category/Alias/lng/>
- Haber Teknik, 2016. Erişim Tarihi:03.04.2022.
<https://www.haberteknik.com.tr/katli-firinlarda-epoksi-uygulamaları/>
- İGM 2021. Doğal taşlar sektör raporu. Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı, İhracat Genel Müdürlüğü, Maden, Metal ve Orman Ürünleri Dairesi, 10s.
- İMİB, 2022. 2021 yılı çalışma raporu. İstanbul Maden İhracatçıları Birliği, İstanbul.
- İnframak, 2022. Erişim Tarihi:20.02.2022.
<https://inframak.com/UrunListesi/292/10/>
- Kahraman, S., Canpolat, A.N., Fener, M., 2020. The influence of microwave treatment on the compressive and tensile strength of igneous rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 129 (2020) 104303. doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104303.
- Kamacı, C., 2013. Traverten işlenmesi sırasında karşılaşılan problemler. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 113s, Eskişehir.
- Klein, S.A., 2008. Engineering equation solver (EES). Academic Commercial V10.40.FChart Software, 2008, www.fChart.com.
- Kotasek, V., 2004. Application of epoxy resins in consolidation of ornamental stone. <http://www.stoneworld.com/CDA/ArticleInformation>.
- López-Buendía, A.M., Guillem, C., Cuevas, J.M., Mateos, F., Montoto, M., 2013. Natural stone reinforcement of discontinuities with resin for industrial processing. *Engineering Geology*, Volume 166, 8 November 2013, pp:39-51.
- MEGEB 2008. Makine teknolojisi, mermer plaka cilalama ve dolgu. Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi, s:45, Ankara.

- Mermerepoksi, 2020. Erişim Tarihi:10.01.2020.
<http://www.mermerepoksikatlifirin.com/?pnum=5&pt=Mermer+Epoksi+Tamirat>
- Öcal, A.D., Dal, M., 2012. Doğal taşlardaki bozunmalar. Mimarlık Vakfı İktisadi İşletmesi, Muka Matbaası, s:128, İstanbul.
- Özkahraman, H.T., 2017. The advantages of epoxy resin in marble surface treatment. 9th International Marble and Natural Stones Congress and Exhibition of Turkey, MERSEM 2017, 13-15 Aralık - December 2017 Antalya-TURKEY, 115-119.
- Öztekin, L., 2007. Doğal taşlarda uygulanan kimyasallar epoksi ve polyester uygulanmış doğal taşlarda çekme ve eğilme dayanımı sıcaklık ilişkisi. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 69s, İstanbul.
- Pomakis, I., Mecik, A., 2001. Modern kimyasal uygulama işlemleri ile doğal taşların kalitesinin artırılması. Türkiye Taş Dünyası, Taş ve Taş Teknolojileri Dergisi, sayı:22, 92-98, İzmir.
- Sarıışık, A., Şentürk, A., 2003. Doğaltaş tamirinde epoxy, polyester, mastik dolgulu ve çimentolu dolguların uygulanma kriterleri. Türkiye IV. Mermer Sempozyumu, Mersem 2003, 18-19 Aralık 2003, Afyonkarahisar, 553-565.
- Selwitz, C., 1992. Epoxy resins in stone conservation. Research in Conservation, The Getty Conservation Institute, 103p, USA.
- Stoneworld, 2020. Erişim Tarihi:03.04.2020.
<https://www.stoneworld.com/articles/87501-microwave-resin-technology-elevates-italian-supplier>
- Studios, 2022. Erişim Tarihi:02.01.2022. <https://studiousguy.com/microwave-oven-working-principle/>
- TS EN 1926, 2013. Doğal taşlar-Deney yöntemleri-Tek Eksenli Basınç Dayanımı Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 1936, 2010. Doğal taşlar - Deney yöntemleri- Gerçek yoğunluk, Görünür Yoğunluk, Toplam ve Açık Gözeneklilik Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 12372, 2007. Doğal taşlar - Deney Metotları – Yoğun Yük Altında Bükülme Dayanımı Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 13755, 2014. Doğal taşlar-Deney yöntemleri - Atmosfer Basıncında Su Emme Tayini. TSE, Ankara.

TS EN 14579, 2006. Doğal taşlar-Deney yöntemleri - Ses Hızı İlerlemesinin Tayini. TSE, Ankara.

Wang, Y., Zhao, Q., Zhou, Q., Kang, Z., Tao, W., 2013. Experimental and numerical studies on actual flue gas condensation heat transfer in a left-right symmetric internally finned tube. International Journal of Heat and Mass Transfer, 64, 10-20.

Zontur, Ö., 2012. Zayıf kireçtaşı plakalarının kimyasal yöntemle iyileştirilmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 113s, Afyonkarahisar.

