

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KLASİK DÖNEM OSMANLI ANIT MİMARİSİNDE
KULLANILAN STRÜKTÜREL DEMİR ELEMANLARIN
MALZEME ÖZELLİKLERİNİN VE KONUMLARININ
TESPİTİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

Ömer Faruk SERT

DOKTORA TEZİ
Mimarlık Anabilim Dalı
Rölöve ve Restorasyon Programı

Danışman
Prof. Dr. Can Ş. BİNAN

Kasım, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KLASİK DÖNEM OSMANLI ANIT MİMARİSİNDE
KULLANILAN STRÜKTÜREL DEMİR ELEMANLARIN
MALZEME ÖZELLİKLERİNİN VE KONUMLARININ
TESPİTİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA**

Ömer Faruk SERT tarafından hazırlanan tez çalışması 13.11.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı, Rölöve ve Restorasyon Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Can Ş. BİNAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Can Ş. BİNAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Gülsün TANYELİ, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Banu ÇELEBİOĞLU YERGÜN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Tülay ÇOBANCAOĞLU, Üye
Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Uzay YERGÜN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Can Ş. BİNAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Klasik Dönem Osmanlı Anıt Mimarisinde Kullanılan Strüktürel Demir Elemanların Malzeme Özelliklerinin ve Konumlarının Tespiti Üzerine Bir Araştırma başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ömer Faruk SERT

İmza



Eşim

ve

kızım Öykü'ye...

TEŞEKKÜR

Klasik Dönem Osmanlı Anıt Mimarisinde Kullanılan Strüktürel Demir Elemanların Malzeme Özelliklerinin ve Konumlarının Tespiti Üzerine Bir Araştırma başlıklı tez çalışması restorasyon konusunda yetkin birçok kamu kurumu, tüzel kişilikler, akademisyenler ve konusunda uzman kişilerin katkısı ile oluşmuştur.

Akademik duruşunun yanında sahip olduğu saha ve detay bilgisi ile kendisini rol model aldığım Prof. Dr. Can. Ş. Binan'a tez çalışmam boyunca yapmış olduğu değerli katkıları nedeniyle sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Yine tez izleme jürimde yer alan ve katkıları ile teze değer kattıklarını düşündüğüm Dr. Öğr. Üyesi Gülsün Tanyeli ve Banu Çelebioğlu Yergün'e ayrı ayrı gönülden teşekkür ederim.

Tez çalışması kapsamında kullanılan tahribatsız muayene cihazlarını sağlayan Troy-Met Kalite Kontrol Sistemleri San. ve Tic. Ltd. Şti. ve çalışanları Noyan Özdemir, Mesutcan Tepe, Berk Savaş ve Murat Tepebaş'a, Hilti İnşaat Malzemeleri Tic. A.Ş. ve çalışanları Özge Sayılır, Betül Türker ve Çağlar Ilgaz Şenel'e ve laboratuvar imkanlarını sağlayan Malzeme Test ve İnovasyon Laboratuvarları A.Ş. ve çalışanları başta Sinan Aras olmak üzere, Çetin Bağlan ve Özkan Kesen'e sundukları katkılardan dolayı ayrı ayrı teşekkür ederim.

Saha çalışmalarının yapıldığı Sultan Ahmet Camii, Selimiye Camii, Süleymaniye Külliyesi, Hekimoğlu Ali Paşa Camii ve Karadeniz Medresesi şantiye ekibine yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Son olarak gösterdikleri anlayış için değerli dostlarıma, mesai arkadaşlarıma ve aileme sonsuz teşekkür ederim.

Ömer Faruk SERT

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xiv
HARİTA LİSTESİ	xv
ÖZET	xvi
ABSTRACT	xviii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	8
1.3 Hipotez	9
1.4 Kapsam ve Yöntem	10
2 KLASİK DÖNEM OSMANLI ANIT MİMARİSİNDE STRÜKTÜREL DEMİR KULLANIMI	13
2.1 Demir Üretim Merkezleri	13
2.2 Demirin Üretim Süreci	14
2.3 Demirin Geleneksel Şekillendirme Yöntemleri ve Dövme Demir	17
2.4 Klasik Dönem Osmanlı Anıt Mimarisinde Strüktürel Demir Kullanımı ...	18
3 ANITSAL YAPILARDA ANALİZ YÖNTEMLERİ	28
3.1 Laboratuvar Çalışmaları	28
3.1.1 Numune Hazırlık İşlemleri	29
3.2 Tahribatsız Muayene Yöntemleri	32
3.2.1 Radar	32
3.2.2 Manyetik İndüksiyon	35
3.2.3 Radyografi	36
3.2.4 Ultrasonik Dalga Hızı	37
3.2.5 Ultrasonik Tomografi	39
3.2.6 Termografi	40
3.2.7 Darbe Yansıma	40
3.2.8 Videoskop	41
3.2.9 XRF (X-Işını Floresan Spektrometrisi)	42
3.2.10 Phased Array	43

4 ARAŞIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	46
4.1 Laboratuvar Çalışmaları.....	46
4.1.1 Numunelerin Fiziki Durumları.....	47
4.1.2 Makroyapı İncelemeleri	54
4.1.3 Makro Sertlik Testleri	55
4.1.4 Mikroyapı İncelemeleri.....	58
4.1.5 Mikro Sertlik Testleri.....	70
4.1.6 Kimyasal Analiz.....	73
4.1.7 Değerlendirme.....	79
4.2 Tahribatsız Muayene Yöntemleri.....	93
4.2.1 Radar	94
4.2.2 Manyetik İndüksiyon	109
4.2.3 Radyografi.....	112
4.2.4 Ultrasonik Dalga Hızı	116
4.2.5 Ultrasonik Tomografi.....	119
4.2.6 Termografi.....	123
4.2.7 Darbe Yansıma.....	126
4.2.8 Videoskop	135
4.2.9 XRF (X-Işını Floresan Spektrometrisi).....	136
4.2.10 Phased Array	141
4.3 Tartışma	143
4.3.1 Laboratuvar Çalışmaları.....	143
4.3.2 Tahribatsız Muayene Yöntemleri.....	145
5 SONUÇ	157
5.1 Sonuç.....	157
5.1.1 Laboratuvar Çalışması Sonuçları	158
5.1.2 Saha Çalışması Sonuçları	158
5.2 Öneriler	166
KAYNAKÇA	168
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	174

SİMGELİSTESİ

ϵ_r	Dielektrik Sabiti
σ	Elektrik İletkenliği
μ_r	Manyetik Geçirgenlik



KISALTMA LİSTESİ

EM	Elektro Manyetik
GPR	Ground Penetrating Radar
MATİL	Malzeme Test ve İnovasyon Laboratuvarları A.Ş.
XRF	X-Işını Floresan Spektrometrisi



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Odun kömürü üretimi (Tok, 2017)	15
Şekil 2.2	Su çarkı ve körükler (Danışman, 2007)	16
Şekil 2.3	Bazı kenet çeşitleri (Tanyeli, 2017)	20
Şekil 2.4	Sıralı kesme taş duvar örgüsü (Tanyeli vd., 1990)	20
Şekil 2.5	Revaklı avlu	21
Şekil 2.6	Gergi sütun başı mesnet detayı	22
Şekil 2.7	Sultan Ahmet Camii açıklık gergileri (Tuna, 2021)	23
Şekil 2.8	Mesnetleme Sistemleri (Tanyeli, 1990)	23
Şekil 2.9	Simidli birleşme detayı (Kurugöl & Küçük, 2015)	24
Şekil 2.10	Kuşaklama detayı (Tanyeli tarafından Yavuz Sultan Selim Camii verilerine dayalı oluşturulan çizim üzerinden düzenlenmiştir)	25
Şekil 2.11	Klasik Dönem anıt yapılarının kubbe örgüsünde kullanılan strüktürel demir elemanlar	26
Şekil 2.12	Sultan Ahmet Camii kubbe kuşaklaması simid detayı	26
Şekil 2.13	Kirişli döşeme	27
Şekil 3.1	Sultan Ahmet Camii yapımında kullanılan çeşitli dövme demir elemanlar	28
Şekil 3.2	Demir numunenin kesilmesi	29
Şekil 3.3	Sıcak kalıplama cihazı	30
Şekil 3.4	Zımparalama ve partlatma cihazı	31
Şekil 3.5	Verici antenden çıkan radar dalgalarının alıcı antene ulaşması (Conyers & Goodman, 1997)	33
Şekil 3.6	Manyetik indüksiyon muayene yöntemi	35
Şekil 3.7	Elektromanyetik spektrum	36
Şekil 3.8	Radyografi yönteminin basitleştirilmiş çalışma görseli	37
Şekil 3.9	a) Doğrudan b) Yarı doğrudan c) Yüzeyden iletim (ktu.edu.tr, 20224)	38
Şekil 3.10	Ultrasonik dalga hızı yöntemiyle süreksizliklerin tespiti (insapedia.com, 2024)	38
Şekil 3.11	Ultrasonik tomografi yönteminde ses dalgalarının iletilmesi (Popovics, vd., 2017)	39
Şekil 3.12	Kubbe oluşan çatlağın termal kamera ile tespiti (Akveren, 2010)	40
Şekil 3.13	Darbe yansıma yöntemi ile yer altı kablo arızası tespiti (kontrolkalemi, 2024)	41
Şekil 3.14	Tarihi yapıda endoskopi uygulaması (Ahunbay vd., 2017)	42
Şekil 3.15	XRF yöntemi ile tespit edilebilen sarı ve mavi işaretli elementler	43
Şekil 3.16	Konvansiyonel ultrasonik muayene ve phased array yöntemi	44
Şekil 3.17	Demir içerisinde yer alan boşlukların tespiti (ndt.net, 2024)	45
Şekil 4.1	Selimiye Cami'ne ait numune	47
Şekil 4.2	Rüstem Paşa Cami'ne ait numune	48
Şekil 4.3	Valide Sultan Cami'ne ait numune	50
Şekil 4.4	Beyazıd Medresesi'ne ait numune	51
Şekil 4.5	Uzun Kemer'e ait numune	52
Şekil 4.6	Süleymaniye Darışşifası'na ait numune	52
Şekil 4.7	Sultan Ahmet Cami'ne ait numune	53
Şekil 4.8	Numunelerin yüzey ve merkez makro sertlik değerleri	57

Şekil 4.9	Makro sertlik ölçüm değerlerine göre çekme dayanımı (MPa)	58
Şekil 4.10	Mikroyapı görüntülerinin incelenmesi	59
Şekil 4.11	Bakalite alınan numunelerin kesit görüntüleri.....	60
Şekil 4.12	Mikro sertlik ölçüm değerlerine göre çekme dayanımı (MPa).....	72
Şekil 4.13	Selimiye Camii numunesi SEM-EDAX analizleri- 1	85
Şekil 4.14	Selimiye Camii numunesi SEM-EDAX analizleri – 2	86
Şekil 4.15	Sementasyon tabakasının 50x yakınlaştırılmış görüntüsü	88
Şekil 4.16	Rüstem Paşa Camii numunesi SEM-EDAX analizleri – 1	89
Şekil 4.17	Rüstem Paşa Camii numunesi SEM-EDAX analizleri- 2.....	90
Şekil 4.18	Rüstem Paşa Camii numunesi SEM-EDAX analizleri – 3	91
Şekil 4.19	Valide Sultan Camii numunesi SEM-EDAX analizleri – 1.....	93
Şekil 4.20	Betonarme kolonun üç boyutlu radar ölçümü ve donatıların tespiti....	94
Şekil 4.21	Deney düzeneği planı ve deney düzeneği	95
Şekil 4.22	Deney düzeneği radar ölçümü	95
Şekil 4.23	Deney düzeneğinin içerisindeki gergi elemanının radar görüntüsü	96
Şekil 4.24	Sultan Ahmet Camii İç Görünüşü (Özcan, 2019).....	97
Şekil 4.25	Sultan Ahmet Camii fil ayakları (F), yarım (Y) ve çeyrek (Ç) kubbeleri	98
Şekil 4.26	Sultan Ahmet Camii fil ayağı radar taraması	99
Şekil 4.27	Sultan Ahmet Camii fil ayağı iki boyutlu radar görüntüsü.....	100
Şekil 4.28	Sultan Ahmet Camii fil ayağı üç boyutlu radar görüntüsü	100
Şekil 4.29	Sultan Ahmet Camii fil ayağı mermer kaplamalarının demir elemanlar ile çekirdeğe ankrajı	101
Şekil 4.30	Üsküdar Ayazma Camii inşaatında kullanılan demir elemanlar (Bayram & Tüzen, 1991)	101
Şekil 4.31	Radar yöntemi ile tespitine çalışılan Sultan Ahmet Camii strüktürel kuşaklama elemanının bulunduğu taşıyıcı duvar alanı	102
Şekil 4.32	Sultan Ahmet Camii harim taşıyıcı duvarında radar ölçümü	102
Şekil 4.33	Sultan Ahmet Camii harim taşıyıcı duvarında yer alan demir kuşaklamanın radar görüntüsü	103
Şekil 4.34	Sultan Ahmet Camii Ç5 çeyrek kubbesi radar görüntüsü	104
Şekil 4.35	Selimiye Camii demir gergileri	104
Şekil 4.36	Süleymaniye Camii ana kubbesi radar ölçümü	105
Şekil 4.37	Selimiye Camii ana kubbesi radar görüntüsü	105
Şekil 4.38	Karadeniz Baş Çifte Kurşunlu Medresesinde radar yöntemi ile demir tespitine çalışılan alan	106
Şekil 4.39	Karadeniz Medresesi demir kılıçlamaların tespit çalışmaları.....	107
Şekil 4.40	Karadeniz Medresesi demir kılıçlamaların üç boyutlu radar ölçümü ile tespiti.....	108
Şekil 4.41	Karadeniz Medresesi demir kılıçlamanın 3 boyutlu radar görüntüsü	108
Şekil 4.42	Deney düzeneğinde yer alan demir elemanların manyetik indüksiyon yöntemi ile tespiti.....	109
Şekil 4.43	Sultan Ahmet Camii fil ayağı manyetik indüksiyon yöntemi ile tespit çalışmaları	110
Şekil 4.44	Manyetik indüksiyon yöntemi ile tespit yapılan alanlar	111
Şekil 4.45	Sultan Ahmet Camii revaklı avlu kubbesinde yer alan demir elemanı.....	112
Şekil 4.46	Radyografi yönteminin test çalışmasının yapıldığı alan.....	113

Şekil 4.47	Sultan Ahmet Camii sütun başlarında radyografi yöntemi ile tespit çalışması.....	114
Şekil 4.48	Sütun başı ve radyografi görüntüsü	115
Şekil 4.49	Kesme taşın içinde yer alan demir elamana ait radyografi görüntüsü.....	115
Şekil 4.50	Kesme taş içinde yer alan demir zıvananın radyografi görüntüsü.....	116
Şekil 4.51	Deney düzeneği içerisinde yer alan demir elemanların ultrasonik dalga hızı yöntemiyle tespit çalışması	117
Şekil 4.52	Sultan Ahmet Camii fil ayağında ultrasonik dalga hızı tespit çalışması.....	118
Şekil 4.53	Ultrasonik dalga hızı cihaz ekran görüntüsü	119
Şekil 4.54	Deney düzeneği planı ve deney düzeneği	120
Şekil 4.55	Deney düzeneği ultrasonik tomografi ölçümü.....	121
Şekil 4.56	Sultan Ahmet Camii fil ayağı ultrasonik tomografi ölçümü	122
Şekil 4.57	Sultan Ahmet Camii fil ayağı ultrasonik tomografi görüntüsü	123
Şekil 4.58	Özgün gergi demirinin ısıtılması	124
Şekil 4.59	a) Gergi demirinin yaydığı ısı b) Deney düzeneği taş yüzeyinin yaydığı ısı.....	125
Şekil 4.60	Tuğla örgü deney düzeneği	125
Şekil 4.61	Tuğla örgü deney düzeneğinin yüzey ısı farkları	126
Şekil 4.62	Karadeniz medresesinde darbe yansıma yöntemi ile tespit yapılan kılıçlama elemanları	127
Şekil 4.63	Karadeniz Medresesi demir kılıçlama elemanlarının darbe yansıma yöntemi ile tespiti.....	128
Şekil 4.64	Süleymaniye İmaret darbe yansıma yönteminin test edildiği gergiler	128
Şekil 4.65	Süleymaniye İmaret revaklı avlu sütun başı gergi mesnet detayı	129
Şekil 4.66	a) Kurşunun elektrik iletkenliğinin testi b) Revak gergilerinin darbe yansıma yöntemi ile devamlılığının araştırılması	130
Şekil 4.67	Darbe yansıma yöntemi ile Süleymaniye İmaret yapısının gergilerinin devamlılığının araştırılması	130
Şekil 4.68	a) Sultan Ahmet Camii gergi mesnet detayı b) Duvar içi gergi mesnet detayı (Tanyeli, 1990)	131
Şekil 4.69	Gazi Atik Ali Paşa Cami'nde darbe yansıma yöntemi ile yapılan araştırmalar	132
Şekil 4.70	Gazi Atik Ali Paşa Cami'nde darbe yansıma yöntemi ile yapılan araştırmalar	133
Şekil 4.71	Kubbe kasnak kotunda yer alan kılıçlama detayı	134
Şekil 4.72	Sultan Ahmet Camii ana kubbe kuşaklama simid bağlantı noktası...	134
Şekil 4.73	Videoskop kamera ile fil ayağında yapılan inceleme	135
Şekil 4.74	Fil ayağında tespit edilen demirin videoskop görüntüleri	136
Şekil 4.75	XRF yöntemi ile testlerin gerçekleştirildiği gergi elemanları	137
Şekil 4.76	Sultan Ahmet Camii gergilerinin XRF ile kimyasal içeriklerinin tespiti.....	137
Şekil 4.77	F15-F2 aksında yer alan gerginin kimyasal içeriği.....	138
Şekil 4.78	F15-F2 aksında yer alan gerginin 9 no'lu analiz sonuçları.....	139
Şekil 4.79	a) Gergi yüzeyinin boya ve pas tabaksından arındırılması b) Gergi elemanı üzerinde XRF ölçümü	140
Şekil 4.80	Sultan Ahmet Camii demir gergileri XRF ölçüm sonuçları	140

Şekil 4.81	Phased Array yönteminin test edildiği gergi elemanı.....	142
Şekil 4.82	Sultan Ahmet Camii gergilerinde phased array cihazı ile süreksizliklerin araştırılması	142
Şekil 4.83	Phased Array cihazı ile röntgeni çekilen gergiye ait ekran görüntüsü	143
Şekil 4.84	Yeterince ısıtılmadan şekillendirildiği düşünülen Sultan Ahmet Cami’ne ait demir kenet	156
Şekil 5.1	Tahribatsız Muayene Yöntemleri	159
Şekil 5.2	Demir tespitinde önerilen akış diyagramı	161
Şekil 5.3	Radar cihazı ile tespiti mümkün olan demir elemanlar (Tanyeli tarafından Yavuz Sultan Selim Camii verilerine dayalı oluşturulan çizim üzerinden düzenlenmiştir)	164



TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Tarihi dökme ve dövme demirin malzeme özellikleri (Jung vd., 2018)	17
Tablo 2.2	Osmanlı döneminde piyasada bulunan kenet türleri (Sönmez, 1997).19	
Tablo 3.1	Bazı malzemelere ait dielektrik, iletkenlik, hız ve soğrulma değerleri (Wilchek, 2000)	34
Tablo 4.1	Numune alınan yapılar ve mahalleri	46
Tablo 4.2	Selimiye Camii numune ölçümü (mm)	48
Tablo 4.3	Rüstem Paşa Camii numune ölçümü (mm).....	49
Tablo 4.4	Valide Sultan Camii numune ölçümü (mm)	50
Tablo 4.5	Beyazıt medresesi numune ölçümü (mm).....	51
Tablo 4.6	Uzun kemer numune ölçümü (mm)	52
Tablo 4.7	Süleymaniye Darüşşifası numune ölçümü (mm)	53
Tablo 4.8	Sultan Ahmet Camii numune ölçümü (mm)	54
Tablo 4.9	Stereo mikroskop üst yüzey makroyapı görüntüleri	55
Tablo 4.10	Makro sertlik ölçüm değerleri (yüzey ve merkez)	56
Tablo 4.11	Yüzey ve merkezlerin ortalama sertlik değerleri ve farkları.....	57
Tablo 4.12	Merkez bölgesinden alınan mikroyapı görüntüleri	65
Tablo 4.13	Kenar bölgesinden alınan mikroyapı görüntüleri.....	66
Tablo 4.14	Merkez bölgesinden alınan 50x,100x,200x mikroyapı görüntüleri	67
Tablo 4.15	Elektron mikroskopta 1000x büyütme alınan kenar bölge mikroyapı görüntüleri.....	68
Tablo 4.16	Elektron mikroskopta 1000x büyütme alınan merkez bölge mikroyapı görüntüleri.....	69
Tablo 4.17	Numunelerin mikro sertlik ölçümü	70
Tablo 4.18	Kimyasal analiz sonuçları	77
Tablo 4.19	II. Beyazıt Camii numuneleri kimyasal analiz sonuçları	76
Tablo 4.20	Günümüz inşaat demirleri örnek kimyasal analizi	77
Tablo 4.21	Nuruosmaniye Camii çivi numunesi SEM-EDAX analizleri ile tespit edilen elementler	78
Tablo 4.22	Mikroyapı görüntüleri alınan numunelerin faz oranları.....	80
Tablo 4.23	Tarihi yapılardan alınan numuneler üzerinde yapılan mikroyapı analizleri karşılaştırılması	82
Tablo 4.24	Selimiye Camii numunesi SEM-EDAX analizleri – 1 ile tespit edilen elementler.....	85
Tablo 4.25	Selimiye Camii numunesi SEM-EDAX analizleri – 2 ile tespit edilen elementler.....	87
Tablo 4.26	Rüstem Paşa Camii numunesi SEM-EDAX analizleri – 1 ile tespit edilen elementler	89
Tablo 4.27	Rüstem Paşa Camii numunesi SEM-EDAX analizleri – 2 ile tespit edilen elementler	90
Tablo 4.28	Rüstem Paşa Camii numunesi SEM-EDAX analizleri - 3 ile tespit edilen elementler	92
Tablo 4.29	Valide Sultan Camii numunesi SEM-EDAX analizleri – 1 ile tespit edilen elementler	93
Tablo 4.30	Radar ve ultrasonik tomografi yöntemi karşılaştırması	151

HARİTA LİSTESİ

Harita 2.1	Osmanlı Devleti demir üretim merkezleri (Tanyeli, 1990)	13
-------------------	---	----



Klasik Dönem Osmanlı Anıt Mimarisinde Kullanılan Strüktürel Demir Elemanların Malzeme Özelliklerinin ve Konumlarının Tespiti Üzerine Bir Araştırma

Ömer Faruk SERT

Mimarlık Anabilim Dalı

Rölöve ve Restorasyon Programı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Can Şakir BİNAN

Klasik Dönem (15. yy - 17. yy) Osmanlı mimarisi dönemin yapım ve yapı malzemesi teknolojilerinde yaşanan gelişmeler neticesinde anıtsal boyutlara ulaşmıştır. Bu dönemde mimarının anıtsal boyutlara ulaşmasında strüktürel demir elemanların kullanımı büyük rol oynamıştır. Strüktürel demir elemanların yapıya etkiyen çekme kuvvetlerine karşı yüksek dayanım sağladığı bilinmektedir (Calderini & Lagomarsino, 2015; Demir, 2012; Çelik, Tanrıverdi, Ural, & Fırat, 2021). Ancak bu demir elemanlar çoğu zaman yapı bünyesinde gömülü olduklarından konum ve durumlarının tespiti zor olmakta ve bu nedenle koruma çalışmalarında genellikle göz ardı edilmektedir.

Bu çalışma Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinde kullanılan strüktürel dövme demir elemanların bilinmezliklerine cevap arayarak koruma çalışmalarına katkı sunmayı amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında strüktürel dövme demir elemanlarının malzeme özellikleri Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinden alınan

demir numuneler üzerinde yapılan laboratuvar testleri ile belirlenmiştir. Ayrıca demir elemanların yapı içerisindeki konum ve mevcut durumları, radar, manyetik indüksiyon, radyografi, ultrasonik dalga hızı, ultrasonik tomografi, termografi, darbe yansıma, videoskop, XRF ve phased array tahribatsız muayene yöntemleri kullanılarak, öncelikle deney düzeneğinde, ardından tarihi yapılar üzerinde tespit edilmeye çalışılmıştır. Laboratuvar ve saha çalışmaları Sultan Ahmet Camii, Selimiye Camii, Süleymaniye Darüşşifası, Hekimoğlu Ali Paşa Camii, Karadeniz Medresesi, Rüstem Paşa Camii, Valide Sultan Camii, Beyazıd Medresesi ve Uzun Kemer yapıları üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Laboratuvar çalışmaları ile tarihi yapılarda kullanılan demir elemanların benzer koşullar altında üretildiği ve karbon çeliği olduğu belirlenmiştir. Tahribatsız muayene yöntemleri kullanılarak demir elemanların yapı içerisindeki konum ve mevcut durumlarının tespitinin mümkün olduğu, ancak doğru ve güvenilir sonuçlara ulaşabilmek için genellikle birkaç yöntemin bir arada kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Çalışmanın sonucunda elde edilen veriler ile günümüzde bilinmezlikleri nedeniyle yapının koruma çalışmalarına konu edilmeyen demir elemanların daha bilinir hale gelmesine katkı sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Restorasyon, Klasik Dönem Osmanlı mimarisi, dövme demir, tahribatsız muayene yöntemleri, laboratuvar deneyleri.

A Research on Determination of Material Properties and Locations of Structural Iron Elements Used in Classical Period Ottoman Monument Architecture

Ömer Faruk SERT

Department of Architecture

Programme in Building Survey and Restoration

Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Prof. Dr. Can Şakir BİNAN

The Classical Period of Ottoman architecture (15th-17th centuries) reached monumental scales due to advancements in construction techniques and building material technologies. The use of structural iron elements played a significant role in achieving these monumental dimensions, as these elements are known to provide high tensile strength to counteract the forces acting on the structure. However, these iron elements are often embedded within the structure, making it challenging to determine their position and condition, which results in them frequently being overlooked in conservation efforts.

This study aims to contribute to conservation practices by addressing the unknown aspects of structural wrought iron elements used in Classical Ottoman monumental architecture. The material properties of these structural wrought iron elements were determined through laboratory tests conducted on iron samples taken from Classical Ottoman monuments. Additionally, non-destructive testing (NDT) methods were

employed to identify the location and current condition of these iron elements, initially in a controlled experimental setup and subsequently on historical structures.

Laboratory and field studies were conducted on the Sultan Ahmed Mosque, Selimiye Mosque, Süleymaniye Hospital, Hekimoğlu Ali Paşa Mosque, Karadeniz Madrasa, Rüstem Paşa Mosque, Valide Sultan Mosque, Beyazıt Madrasa, and the Uzun Aqueduct. The laboratory analyses revealed that the iron elements used in these historic structures were produced under similar conditions and were made of carbon steel. The study concluded that it is possible to determine the location and condition of these iron elements within the structures using non-destructive testing methods. However, to achieve accurate and reliable results, it is generally necessary to use multiple methods in combination.

The data obtained from this research contribute to increasing the understanding of iron elements, which are often excluded from preservation projects due to their obscured nature, thus supporting more effective conservation of these structural components in Ottoman monumental architecture.

Keywords: Restoration, Classical Ottoman architecture, wrought iron, nondestructive inspection methods, laboratory experiments.

1.1 Literatür Özeti

Osmanlı Devleti yükselme döneminde topraklarını genişleterek büyük bir imparatorluk haline gelmiştir. İmparatorluğun geniş bir coğrafyaya yayılmasının yanı sıra, kültürel, mimari ve sanatsal alanlarda da yüksek bir seviyeye ulaşılmıştır. Bu dönemde Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinin en güzel örnekleri olan Sultan Ahmet Camii, Süleymaniye Camii ve Rüstem Paşa Camii gibi eserler, bulundukları konumlara değer katan yapılar olarak günümüze miras kalmıştır. Bu zengin tarihî miras günümüzde dahi Osmanlı İmparatorluğu'nun ileri mühendislik anlayışının bir yansıması olarak hayranlık uyandırmaktadır.

Osmanlı Klasik Dönem mimarisinin ihtişamlı boyutlara ulaşmasında demir teknolojisinde yaşanan gelişmeler önemli bir rol oynamıştır. Bu dönemde Osmanlı İmparatorluğu demir üretiminde Avrupa'ya kıyasla öncü konumda olmuştur. Günümüz sınırlarında Bulgaristan'da yer alan Samakov'da, Osmanlı Devleti dönemin en ileri imkânları ile demir üretimi gerçekleştirmiştir. Üretilen demirin başlıca kullanım alanı savaş sanayisi olmakla birlikte, mimari alanda kullanımı da önemli bir potansiyel sunmuştur. 15. Yüzyıl itibari ile yapım ve yapı malzemesi teknolojisindeki gelişmeler neticesinde, strüktürel amaçlı büyük demir elemanlar kullanılmaya başlanmıştır (Tanyeli, 1990).

Söz konusu strüktürel demir elemanların hem statik hem de sismik yüklere karşı büyük fayda sağladığı belirlenmiştir (Calderini & Lagomarsino, 2015; Demir, 2012; Çelik, Tanrıverdi, Ural, & Fırat, 2021). Yatay yüklerin karşılanması adına önem arz eden söz konusu demir elemanlarda kendi bünyesindeki olumsuzluklardan veya dış etkenlerden kaynaklanan nedenler dolayısıyla hasarlar meydana gelebilmektedir. Hasarların önlenmesi, tarihi eserlerin onarımı ve güçlendirilmesi, evrensel nitelikteki kültür mirasının korunması açısından önem taşımaktadır (Kaftan, 2006).

Bu bağlamda yapılacak müdahalenin belirlenmesinde eserlerin bünyesinde bulunan demir elemanların dayanımlarının ve konumlarının tespiti önem arz etmektedir. Tespitlerin bir kısmı laboratuvar ortamında yapılmakla birlikte bir kısmı eser bünyesinde yer alan elemanlar üzerinde yapılmaktadır.

Çalışma kapsamında yerli ve yabancı birçok kaynaktan tez, makale, kitap ve çeşitli yayınlar incelenmiştir. Literatür araştırması strüktürel demir elemanların durumlarının tespitinde kullanılan laboratuvar testleri ve tahribatsız muayene yöntemleri olmak üzere iki ana grup altında yapılmıştır.

İlk grupta Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinde demir elemanların tespitinde kullanılan laboratuvar testlerini konu alan kaynaklar incelenmiştir.

Tanyeli ve diğerleri (1990) 15-18. Yüzyıl Osmanlı mimarisinde kullanılan demir elemanların malzeme karakteristiklerini ve üretim teknolojilerini araştırmıştır. Bu bağlamda Topkapı Sarayı, Davutpaşa Medresesi, Selimiye Camii, Sultan Ahmet Camii ve Tütünsüz Baba Türbesi'nden olmak üzere toplam yedi adet demir numune alınmıştır. Numunelerin laboratuvar ortamında mikroyapıları incelenmiş ve sertlikleri ölçülmüştür. Demir elemanların Vickers mikro-sertlik değerleri 92 ile 249 arasında bulunmuştur. Bu durumun incelenen malzemelerin heterojen mikroyapıya sahip olmalarından kaynaklandığı belirtilmiştir. Mikroyapı incelemesinde demir elemanların potasyum ve fosfor açısından günümüz çeliğine nazaran daha zengin olduğu tespit edilmiştir.

Ray ve diğerleri (1997) yaptıkları çalışmada Hindistan'da antik demir sütunları inceleyerek dövme demirin karakteristik özelliklerini ortaya koymaya çalışmıştır. Dövme demirin tipik işaretlerinden başlıcasının çok düşük karbon içeriği olduğu tespit edilmiştir. Karbon elementine göre nispeten yüksek Fosfor içeriği de diğer karakteristik özellik olarak ortaya çıkmaktadır. Çalışma kapsamında Dhar'da yer alan 11. yüzyıla ait bir sütun üzerinde yapılan kimyasal testler sonucu demir elemanın kimyasal içeriğinde, %0,013 Karbon, %0,06 Silikon, %0,072 Fosfor, %0,003 Kükürt ve Mangan kalıntıları tespit edilmiştir.

Elban ve diğerleri (1998) Amerika'nın Virginia eyaletinde yer alan 1800'lü yıllara ait Wheeling gümrük binasını incelemiştir. Binanın taşıyıcı kirişleri dövme demirden üretilmiştir. Söz konusu kirişler üzerinden alınan beş numune mikroskop altında incelenmiş ve üzerlerinde sertlik taramaları ve çekme testleri yapılmıştır.

Mikroskop incelemesinde malzemenin son derece heterojen bir yapıya sahip olduğu ve bazı bölgelerinde boylu boyunca çatlakların varlığı tespit edilmiştir. Çatlakların dövme işlemi ile birbirlerine birleştirilen demirlerin sınırları olduğu düşünülmektedir. Çekme testi sonuçları sırasıyla, 482,6, 351,6, 434,4, 393,0, 337,8 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değerler kırılgan malzemesinin mekanik özelliklerinin değişken olduğunu ortaya koymuştur.

Gordon ve Knopf (2005) yaptıkları çalışmada Amerika’da yer alan ve 19. yüzyılda dövme demirden inşa edilen Aldrich Change, Schoellkopf, Eck ve Cotton Hill köprülerinin strüktürel malzemesini incelemiştir. Köprülerden temin edilen dövme demir malzemenin kimyasal içeriği araştırıldıktan sonra sertlik taramaları gerçekleştirilmiştir. Mikroskop altında incelenen numunelerin bünyesinde yer alan cürufaların genellikle düzensiz bir dağılıma sahip olduğu görülmüştür. Numunelerin çekme dayanımları ise 332 MPa ile 458 MPa değerleri arasında olduğu görülmüştür. Rockwell B ve Brinell sertlik ölçümleri sonucu elde edilen değerlerin malzemenin mekanik özellikleri ile anlamlı bir ilişki içinde olmadığı tespit edilmiştir. Çalışma ile günümüzde kullanılan sertlik ölçekleri arasındaki standart dönüşümlerin dövme demirler için uygun olmadığı ortaya konmuştur.

Danışman ve diğerleri (2006), Dervişoğlu (2007), Danışman ve diğerleri (2007), Özbal ve diğerleri (2007), Özbal (2008) ve Özbal (2009) çalışmalarında Kırklareli, Demirköy Fatih Dökümhanesinden elde ettikleri demir ögelerin ve cüruf kalıntılarının SEM analizleri ile mikroyapılarını ve EDAX ile kimyasal içeriklerini incelemiştir. Numunelerin yoğun miktarda inklüzyon içerdiği ve yüzeylerinin demir oksit tabakası ile kaplandığı görülmüştür. Ayrıca, incelenen numunelerden Demirköy Dökümhanesinde hem dövme hem dökme yöntemiyle demir üretimi gerçekleştirildiği anlaşılmıştır.

Buonopane ve Kelton (2008) 1886 yılında dövme demir malzeme ile inşa edilen Penns Creek köprüsünde alınan numuneler üzerinde çekme, basınç ve sertlik testleri yapmıştır. Testler sonucu elde edilen değerlerin günümüz çeliği mekanik özelliklerine göre düşük olduğu ortaya koymuş ve bu durumu dövme demirin homojen olmayan içeriğine bağlanmıştır.

Demir (2012) tarihi taş duvarların deprem yükleri altındaki davranışlarını araştırdığı doktora çalışması kapsamında Edirne II. Beyazıd Camii yapımında

kullanılmış özgün iki adet demir kenet elemanı üzerinde mekanik ve kimyasal testler uygulamıştır. İncelediği numunelerin deney sonuçlarını yine benzer yapılan çalışmaların sonuçları ile karşılaştırmıştır. Ayrıca, yaptığı testler sonucu elde ettiği veriler doğrultusunda özgün tarihi dövme demirin özelliklerini piyasada en yakın yansıtan demirin günümüz teknolojisi ile Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları T.A.Ş tarafından üretilmiş Erdemir 6222 demiri olduğunu tespit etmiş ve üzerinde deneyler gerçekleştirmiş.

Şengün (2015) Topkapı Sarayı içerisinde yer alan Darphane-i Amire yapılarının özgün dövme demir üst örtü strüktürünü incelemiştir. Çatının taşıyıcı dövme demirlerinin taşıma kapasitelerini günümüz yönetmeliklerini baz alarak belirlemeye çalışmıştır. Bunun için yapıdan alınan özgün demir numuneleri üzerinde kimyasal ve mekanik testler gerçekleştirmiştir. Numunelerin çekme dayanımları 292 MPa ile 346 MPa olarak belirlenmiştir. Değerlerin farklı çıkmasının sebebi dönemin üretim teknolojisinin gelişmemiş olması nedeniyle dövme işleminin yetersizliğine bağlanmıştır.

Dabanlı (2016) Nuruosmaniye Camii deprem performansının değerlendirilmesine yönelik yaptığı çalışma kapsamında özgün bir demir çivi numunesini incelemiştir. Numune laboratuvar ortamında mikroskop yardımıyla incelenmiş ve sertlik ölçümü yapılmıştır. Numunenin ortalama sertliğinin 110 HV olarak tespit edildiği, bu değer ise 350 MPa çekme dayanıma denk geldiği belirtilmiştir. Ayrıca, numunenin SEM-EDS görüntüsü alınmış ve malzemenin neredeyse tamamının demir oksitten oluştuğunun tespiti yapılmıştır.

Bellanova ve diğerleri (2019) Milano Katedrali'nde (15. yüzyıl) kopan bir gergi demirini incelemiştir. Oluşan hasarın sebeplerini araştırmak için bir dizi laboratuvar testi yapılmıştır. Malzemenin mikroyapısı incelenmiş ve cüruf oluşumları belirlenmiştir. SEM analizi ile demir elemanın içeriğindeki elementler araştırılmıştır. Mekanik özelliklerini belirlemek için vickers ve Rockwell sertlik testleri yapılmıştır. Gergide oluşan hasarın nedeni dövme işleminden kaynaklı kusurlardan kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır.

Yücel (2022) yapılarda kullanılan demir elemanların atmosferik koşullar altında korozyon dayanımlarının araştırılmasının demir eserlerin korunmasına yönelik ileriki çalışmalara katkı sağlayacağını belirtmektedir. Bu doğrultuda çalışmasın da

Gazi Mihal ve Kılıç Ali Paşa Hamamında kullanılmış demir objeleri incelemiştir. İnceleme kapsamında demir öğelerin metalurjik özellikleri, brinell sertlik değerleri, elementel bileşimleri ve mikro yapısı araştırılmıştır. Atmosfer koşullarına maruz kalan demir elemanların yüzeyinde oluşan korozyon tabakasının götit birleşimde olduğu tespit edilmiştir.

Agasti ve Pani (2023) çalışmaları kapsamında Hindistan'ın çeşitli bölgelerinden farklı dönemlere, bölgelere ve hanedanlara ait olan antik sütun ve kirişler başta olmak üzere çeşitli demir elemanları incelemiştir. Demir elemanların yüksek korozyon direncinin altında yatan sebepler yazarların araştırma konusu olmuştur. Bu bağlamda demir elemanların kimyasal birleşenlerini ve mikroyapısını anlamak için XRD, PIXE, EDS, FTIR, SEM, TEM gibi farklı karakterizasyon teknikleri kullanılarak antik demirlerin analizi yapılmıştır. Demir sütunun korozyona dayanıklı olmasının nedeni, demir sütununun bileşiminde yer alan yüksek cüruf, fosfor ve düşük kükürt içeriğine bağlanmıştır.

İkinci grupta Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinde kullanılan strüktürel demir elemanların tespitinde kullanılan tahribatsız muayene yöntemleri araştırılmıştır. Tarihi yapılarda demir elemanların tespitine yoğunlaşmış bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Yapılan çalışmalarda genelde tahribatsız muayene cihazları ile tarihi yapının bünyesinde yer alan hasarların tespitine yönelik araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Literatürde çoğunlukla tarihi yapılarda hasar tespiti amaçlı radar, manyetik indüksiyon, sonik muayene ve termografi yöntemi kullanıldığı görülmüştür.

Binda ve Saisi (2001) çalışmasında San Nicolò l'Arena Kilisesi, Noto Katedrali ve SS. Crocifisso Kilisesi taşıyıcı ayaklarının mevcut durumunu sonik testler ile belirlemeye çalışmıştır. Sonik testler aracılığı ile ayakları oluşturan malzemenin heterojen yapısı kesitlere işlenerek ayakların zayıf noktaları belirlenmiştir. Ayrıca sonik testler ile elde edilen verileri desteklemek amacıyla kayma testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda iki yöntemin birlikte kullanımı ile ses hızları ve malzemenin elastisite modülü arasında bir korelasyonun sağlanabileceği ortaya konmuştur.

Akveren (2010) 16. yüzyıl yapısı olan Cenabi Ahmet Paşa Cami'ni termografi ve ultrasonik muayene yöntemleri ile incelemiştir. Termografi yöntemi ile tespit ettiği

yüzey çatlaklarının derinlik farklarının varlığını görebilmiştir. Fakat bunu nicel veriye dökebilme kabiliyeti olmayan termografi yöntemini ultrasonik muayene yöntemi ile destekleyerek çatlakların derinliklerini nicel veri olarak elde etmiştir.

Castillo ve diğerleri (2012) çalışması kapsamında San Juan Bautista Kilisesi'nin hasar alan sıva katmanının XRD ile kimyasal analizini yaparak aynı malzeme ile yenilemiştir. Yenilediği sıva ve özgün sıva katmanının termal kamera ile görüntülerini ayrı ayrı belli aralıklar ile almıştır. Üzerinden altı ay geçmesine rağmen yeni yapılan sıva katmanı farklı ısı yaymaya devam etmiştir. Castillo ve diğerleri (2012), söz konusu yöntem ile yapıya sonradan yapılan müdahalelerin termal kamera ile tespit edilebileceğini yaptığı çalışma ile ortaya koymuştur.

Meola (2013) Pompei Villa Imperiale'nin fresk bulunan duvarındaki çatlakları termal kamera yardımıyla tespit etmeye çalışmıştır. 0,0125 hertz, 0,005 hertz ve 0,00085 hertz frekans değerleri altında aldığı görüntüleri karşılaştırmıştır. Özellikle 0,005 hertz frekansında alınan görüntünün daha önce yaptığı radar ölçüm verileriyle daha uyumlu olduğunu belirtmiştir. Ayrıca çalışmada betonarme bir kirişin içindeki donatıyı termal kamera ile tespit etmeyi başarmıştır.

Moropoulou ve diğerleri (2013) tahribatsız muayene yöntemi olan radar ile Ayasofya yapısının duvar yüzeylerini taramıştır. Tarama sonucu sıva tabakasının altında farklı katmanların varlığı belirlenmiştir. Yapılan araştırma rasparları sonucu sıva tabakasının altından özgün mozaiklere ulaşılmıştır. Bunun yanında günümüzde yok olan bazı bölgelerde önceden mozaik tabakasının mevcut olduğunu tespitini radar taramaları sonucu ortaya koymuştur. Ayrıca çalışması kapsamında radar yönteminin yanında termografi, ultrasonik muayene ve videoskop yöntemlerini kullanarak tarihi yapılarda incelemelerde bulunmuştur.

Prof. Dr. Eser Çaktı ile yapılan yarı yapılandırılmış görüşmede (Çaktı, 2024), 1990 yılı itibari ile Ayasofya yapısının deprem performansının değerlendirilmesi kapsamında sağ ve sol mahfil altı taşıyıcı kemerlerinde yer alan gergi elemanlarına titreşim ölçerler yerleştirilerek çeşitli çalışmalar yürütüldüğü öğrenilmiştir. Bunun yanı sıra Ayasofya'nın çeşitli bölümleri ultrasonik muayene yöntemi ile taranmış ancak bu taramalardan anlamlı veriler elde edilemediği belirtilmiştir.

Yalçiner ve diğerleri (2017) Ayasofya yapısının galeri katını taşıyan tonozların mevcut durumunu radar yöntemi ile incelemiştir. Radar ölçümleri sonucu

tonozların formlarında bozulmalar tespit edilmiştir. Söz konusu bozulmaların beraberinde galeri katında döşemesinde deformasyona neden olduğu belirtilmiştir. Ayrıca radar ölçümleri ile Mimar Sinan'ın Ayasofya'yı güçlendirme çalışmaları sırasında döşemeye yerleştirdiği demir kirişler radar yöntemi ile görüntülenmiştir. Döşemedeki deformasyonun demir kirişler ile ilişkisini anlamak için yine radar ölçümleri yapılmış ve söz konusu bozulmaların demir kirişler ile ilişkisi olmadığı görülmüştür. Belce ve diğerleri (2019) yine Ayasofya yapısının galeri katında yaptığı radar taramalarında mermer döşemedeki çatlakların görüntüsünü çıkarmıştır.

Casarin (2017) Trento Katedrali'nin 14 adet taşıyıcı ayağın üç kotta sonik tomografi yöntemi ile malzeme yoğunluk haritasını çıkarmıştır. Malzeme yoğunluğunun en az olduğu 8 numaralı ayakta ses geçiş hızı 851 m/sn, en fazla olduğu 5 numaralı ayakta ses geçiş hızı 4697 m/sn olarak tespit edilmiştir. Casarin ve diğerleri (2007) Reggio Emilia Katedrali'nde yaptığı ultrasonik ses geçiş hızı testinde ortalama ses geçiş hızını 1394 m/sn, S. Zeno Bazilikası taşıyıcı duvar ve sütunlarında yaptığı ultrasonik ses geçiş hızı testinde ise 1800 ila 2500 m/sn olarak tespit etmiştir.

Moropoulou ve diğerleri (2018) çalışmasında termografi yöntemini kapsamlı şekilde tarihi yapılar üzerinde test etmiştir. 11. yüzyıl yapım tarihli Kaisariani Manastırında yaptığı araştırmada yapı cephesinde yer alan tuğlaların dönem farkını termal kamera yardımıyla tespit etmiştir. Özgün tuğlalar ile son dönem restorasyon uygulamasına ait tuğlalar arasında yaklaşık 4 derece ısı farkı tespit etmiştir. Ayasofya yapısında yaptığı araştırmada ise 1990 müdahalesi olarak belirttiği sıva katmanlarını incelemiştir. Ölçümler öncesi çalışma alanı olan sıva katmanı 1000 watt güce sahip optik lambalar ile 50 cm mesafeden ısıtılmıştır. Ardından yaptığı termal kamera ölçümlerinde bazı bölgelerde 0,8 ila 1,0 derece ısı farkı tespit etmiştir. Isı farkı olan sıva katmanlarının altında özgün mozaik tabakasının varlığını ortaya çıkarmıştır.

Rucka ve diğerleri (2020) çalışması kapsamında Polonya'da bulunan St. Nicholas Kilisesi'nin mezar odalarının yer aldığı zemin döşemesinde radar ve ultrasonik muayene yöntemleri ile taramalar gerçekleştirmiştir. Yapılan tarama verilerinin doğruluğunu anlamayabilmek için iki noktadan sondaj çukuru açılmıştır. Ayrıca açılan sondaj çukuru laboratuvar ortamında modellenerek çalışma desteklenmiştir.

Radar verileri ile açılan sondaj çukurunda yer alan katmanlar karşılaştırıldığında radar yöntemi ile malzeme süreksizliklerinin tespitinin verimli şekilde yapılabildiği ortaya konmuştur. Ancak hava boşlukların tespitinde ultrasonik muayene yönteminin radar yöntemine göre daha etkili olduğunu görülmüştür.

Pehlivan (2021) Iasos Antik Kenti Bouleuterion yapısında bulunan hasarları günün farklı saatlerinde oluşan ısı farklarından yararlanarak termal kamera yardımıyla tespit etmeye çalışmıştır. Gün içinde yaptığı ölçümler neticesinde söz konusu yöntem ile yapıda mevcut hasarların tespitinde en uygun zamanın gündeğüm vakti olduğunu ortaya koymuştur. Benzer bir çalışma Kaplan ve diğerleri (2016) tarafından yapılmıştır. Eskişehir’de yer alan Cumhuriyet Tarihi Müzesi’nin duvarları ocak ayından itibaren mayıs ayına kadar her ay düzenli şekilde termal kamera ile ölçülmüştür. Termal kamera ile en net verilerin sağlandığı zaman sıcaklığın arttığı mayıs ayı olmuştur.

1.2 Tezin Amacı

15. yüzyıl itibari ile gelişen teknolojinin sağladığı imkanlar ile yapılarda strüktürel demir kullanımı artarak devam etmiştir. Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinin bu denli ihtişamlı boyutlara ulaşmasında demir kullanımının kuşkusuz payı büyüktür. Diğer yandan tarihi yapıların taşıyıcılığı konusunda önem arz eden demir elemanların çeşitli sebeplerden dolayı hasara uğrayarak işlevini yitirmesi yapının statüğünde zafiyete yol açmaktadır. Bayraktar’a (2005) göre kagir yapı bünyesinde bulunan ve çekme gerilmelerini karşılayan demir elemanlar dayanımlarını kaybetmiş olma ihtimaline karşı tarihi eserin güçlendirme uygulamalarında hesaba katılmamalıdır. Bu görüşü doğrularcasına çoğu zaman tarihi yapılarda güçlendirme uygulamaları yanal kuvvetleri karşılayan ve yapı bünyesinde gömülü oldukları için tespit edilmeleri kolay olmayan demir elemanların varlığı hesaba katılmadan gerçekleşmektedir. Diğer yandan yeterli ön çalışma yapılmadan verilen hatalı kararlar sonucu yapılan uygulamalar eserin özgünlüğüne zarar vermektedir.

Çalışmanın amacı, kültürel mirası gelecek nesillere özgün haliyle aktarabilmek için eserleri bilimsel yöntemlerle inceleyerek strüktürel demir elemanlar hakkında restorasyon çalışmalarına veri sağlamaktır. Bu kapsamda eserlerin bünyesinde bulunan özgün strüktürel dövme demir elemanların malzeme özelliklerinin

laboratuvar ortamında belirlenmesi önemli bir adımdır. Laboratuvar çalışmaları sonucu strüktürel dövme demir elemanların fiziksel ve kimyasal özelliğinin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Laboratuvar çalışmalarının yanı sıra eserin bünyesinde yer alan ve işlevini devam ettiren strüktürel demir elemanların dayanımlarının ve konumlarının tespiti de yapıya yapılacak müdahalenin belirlenmesinde önem arz etmektedir. Eser üzerinde uygulanacak tespit yöntemlerinin kültürel mirasa zarar vermeyecek şekilde seçilmesine dikkat edilmesi gerekmektedir. Özellikle tarihi yapıların sürdürülebilirliğini sağlamak için yapıda yapılacak müdahalelerin tespitinde tahribatsız muayene yöntemlerinin kullanılması ön plana çıkmaktadır. Son dönemde yaşanan teknolojik gelişmeler ile tahribatsız muayene yöntemleri, kültürel miras alanında malzemenin fiziki yapısını bozmadan bünyesinde bulunan süreksizliklerin tespitinde vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. (Moropoulou vd., 2013).

Tahribatsız muayene yöntemleri ile yapılan ölçümler sonucu,

- Strüktürel demir elemanların duvar içinde varlıklarının tespit edilmesi,
- Duvar içinde mesnetlenme noktalarının tespit edilmesi,
- Bünyelerinde barındırdıkları süreksizliklerin belirlenmesi,
- Kimyasal ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi,

amaçlanmaktadır.

1.3 Hipotez

Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinde yapıların anıtsal boyutlara erişmesinde şüphesiz kullanılan strüktürel demir elemanların payı büyüktür. Bundan dolayı kültürel mirasımız olan bu yapıların koruma çalışmalarında strüktürel demir elemanların durumunu incelemek önem arz etmelidir.

Ancak özgün dövme demir elemanların malzeme özelliklerinin yeteri kadar bilinmemesi, içerdiği olası süreksizliklerin ne gibi davranışlara neden olacağının tahmin edilememesi koruma çalışmaları sırasında tereddüt yaşanmasına neden olmaktadır. Diğer yandan yapıda gözle görülen demir elemanlar ile beraber bir o

kadarda duvar içinde yer alan ve tespit edilemeyen strüktürel dövme demir elemanın varlığı da bilinmektedir.

Literatür araştırmasından ve saha tecrübelerinden yola çıkarak demir elemanlar söz konusu bilinmezliklerinden dolayı koruma çalışmalarında hesaba katılmamaktadır.

- Strüktürel dövme demir elemanların yapı içindeki konumları ve dayanımları günümüz teknolojisi ile tespit edilebilir mi?
- Dönemin imkânları ile üretilen strüktürel dövme demir elemanlar taşıyıcı özelliklerini koruyor mu?

soruları tezin çıkış noktası olmuştur.

1.4 Kapsam ve Yöntem

Osmanlı mimarisinde 15. yüzyıl itibari ile kullanılmaya başlanılan sıralı kesme taş örgü tekniğinde taşlar birbirlerine demir bağlantı elemanları ile bağlanmıştır. Bu tarihten sonra yapı ve yapım teknolojisinde yaşanan gelişmeler neticesinde demir kullanımı giderek artmıştır. Balkanlara yakın olmasının yanında dönemin başkenti olan Edirne’de Üç Şerefeli Camii avlu kemerlerinde açıklık gergilerinde büyük boyutlu demirin erken kullanımına rastlanılmaktadır. 16. yüzyıla gelindiğinde artık demir kullanımı standart hale gelmiş ve demirin çekme kuvvetlerine karşı dayanımı sayesinde ihtişamlı boyutlarda yapılar inşa edilmeye başlanılmıştır. Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisi olarak adlandırabileceğimiz 15.- 17. yüzyıl kamu yapıları tezin inceleme alanı olacaktır.

Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinde dönemin teknolojisinin verdiği imkanlar neticesinde yapıların inşasında dövme ve dökme demir kullanılmıştır. Dövme demir yapısı itibariyle çekme kuvvetlerini karşılama konusunda anıt mimaride etkin rol oynamaktadır. Dönem yapılarında yanal açılmaları engellemek için kullanılan gergi, kuşaklama gibi elemanlar dövme demirden imal edilmiştir. Tez kapsamında incelenecek olan demir elemanlar söz konusu çekme kuvvetlerini karşılayan strüktürel dövme demir elemanlardır. Dönemin yapılarında genellikle süsleme amaçlı mimari öğelerin yapımında kullanılan dökme demir tezin inceleme kapsamında değildir.

Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinde kullanılan strüktürel dövme demir elemanlar laboratuvar ortamında ve sahada olmak üzere iki farklı alanda

incelenmiştir. Anıt mimaride kullanılan dövme demir elemanların laboratuvar testlerinin gerçekleştirilebilmesi için numune temini Vakıflar Genel Müdürlüğü ve Matil Malzeme Test ve İnovasyon Laboratuvarları A.Ş. arasında imzalanan “Vakıf Kültür Varlıklarının Korunması ve Geliştirilmesi alanında iş birliği protokolü” ile sağlanmıştır. Protokol kapsamında 11 adet Sultan Ahmet Camii, 7 adet Süleymaniye Külliyesi, 4 adet Selimiye Camii, 2 adet Valide Sultan Camii, 2 adet Beyazıt Külliyesi, 1 adet Rüstem Paşa Camii, 2 adet Uzun Kemer yapısından görevini yitirmiş toplam 29 adet özgün strüktürel dövme demir eleman laboratuvar testlerini gerçekleştirmek için alınmıştır. Tez kapsamında her yapıdan bir adet dövme demir elemanın laboratuvar test sonuçları incelenmiştir.

Laboratuvar testleri Matil A.Ş. bünyesinde bulunan TS EN ISO/IEC 17025 standardına göre akredite olan laboratuvarda gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler tarihi yapıların restorasyonları sürecinde yapıdan çıkarılmış ve işlevini yitirmiş dövme demir elemanlar üzerinde yapılmıştır. Laboratuvar çalışmaları, Osmanlı Klasik Dönem anıt eserlerinde bulunan demir elemanların kimyasal, mikroyapısal ve fiziksel özelliklerini test ederek bu demir elemanların malzeme karakteristik özelliklerini belirlemeyi amaçlamaktadır.

Bu kapsamda anıt mimaride kullanılan strüktürel demir elemanların mikroyapısal analizleri yapılmış ve optik mikroskop kullanılarak malzeme yapısı içerisindeki kalıntılar ve fazlar tespit edilmiştir. Bu fazlar hakkında daha fazla bilgi edinmek ve elementel içeriklerini belirlemek için SEM analizleri yapılmıştır. Mikroyapısal ve kimyasal analizler birbirleriyle ilişkilendirilerek dövme demir elemanların üretim teknolojisi hakkında daha fazla bilgi edinilmeye çalışılmıştır. Bunun yanında, malzemelerin sertlik analizleri gibi mekanik testler yapılmış ve elde edilen veriler, mikroyapıdaki fazlarla ilişkilendirilerek malzemelerin genel dayanımı hakkında bilgi edinilmiştir.

Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinde kullanılan strüktürel dövme demir elemanlar sahada tahribatsız muayene yöntemleri ile incelenmiştir. İncelemeler radar, manyetik indüksiyon, radyografi, ultrasonik dalga hızı, ultrasonik tomografi, termografi, darbe yansıma, videoskop, XRF ve phased array muayene yöntemleri ile yapılmıştır. Söz konusu yöntemlere ait cihazların temini için İstanbul Kalkınma Ajansı Yaratıcı Endüstriler Mali Destek Programına, Tübitak 1001 Bilimsel ve

Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programına ve Tübitak 1005 Ulusal Yeni Fikirler ve rnler Araştırma Destek Programına başvurulmuş fakat olumlu sonuç alınamamıştır. Bunun zerine saha çalışmaları için ihtiyaç duyulan tahribatsız muayene cihazları görüşmeler neticesinde Troy-Met Kalite Kontrol Sistemleri San. ve Tic. Ltd. şti. ve Hilti İnaaat Malzemeleri Tic. A.ř. tarafından sağlanmıştır.

Tahribatsız muayene yöntemlerinin tarihi yapıda bulunan strüktürel dövme demir elemanların tespitinde işlevselliğini araştırmak için deney düzeneği kurulmuştur. Deney düzeneği Klasik Dönem anıt mimari duvar örgüsü olan sıralı kesme taş örgü sisteminin birebir modelinden oluşmaktadır. Doğal kesme taş ile örülen duvar düşeyde zıvana yatayda kenet ile berkitilmiştir. Duvarın bir yüzüne duvar içinde gömülü olacak şekilde gergi demiri yerleştirilmiştir. Duvar örgüsünde tarihi yapılardan çıkan özgün strüktürel demir elemanlar kullanılmıştır.

Tahribatsız muayene yöntemleri ile deney düzeneğinde n testlerin gerçekleştirilmesinin ardından Klasik Dönem anıt mimari yapılarında strüktürel dövme demirlerin konum ve dayanımlarının tespitlerine çalışılmıştır. Tespitlerin yapılacağı yapılar seçilirken ölçümlerin gerçekleştirileceği strüktürel demir elemanların ulaşılabilir olması ana kriterlerden biri olmuştur. Restorasyon sürecinde bulunan Sultan Ahmet Camii, Selimiye Camii, Süleymaniye Kllyesi, Hekimoğlu Ali Paşa Camii ve Karadeniz Medresesi'nde bulunan iskeleler yapıların her noktasına ulaşılarak ölçümlerin yapılabilmesine olanak sağlamıştır.

KLASİK DÖNEM OSMANLI ANIT MİMARİSİNDE STRÜKTÜREL DEMİR KULLANIMI

16. yüzyılda Balkanlarda demir üretiminde ana merkez Samakov olmakla birlikte Eğri Palanga, Kratova, Dobniçe, Klisura, Köstendil, Rodamir, Sofya, Etrebolu, Tatarpazarı ve Flibe üretim merkezlerinde de demir üretimi yapılmaktaydı (Harita 2.1). 17. yüzyıl sonlarında Trakya’da bulunan Samakocuk bugünkü adıyla Demirköy ve Trulya’dan tersane ve tophaneye demir gönderilmeye başlanmıştır (Tanyeli, 1990).



Harita 2.1 Osmanlı Devleti demir üretim merkezleri (Tanyeli, 1990)

Rumeli demir üretiminde Anadolu'ya göre her dönem daha önde olmuştur. Bunun başlıca nedenleri demir üretimi için gerekli üç etmen olan cevher, odun kömürü ve sabit debili su gücünün Rumeli'de daha kolay ulaşılır olmasıdır. Bu etmenler Rumeli'de demir üretimini daha kolay hale getirmektedir. Ayrıca başkent İstanbul'a yakın konumda yer alması ve ulaşımın kolay oluşu Rumeli'de yer alan demir ocakları için bir avantajdı (Tanyeli, 1990).

Üretim ocaklarından temin edilen demir İstanbul'a çeşitli yollarla taşınmaktaydı. Genellikle Flibe üzerinden Selanik'e getirilen demirler gemilere yüklenerek İstanbul'a ulaştırılmaktaydı. Diğer bir yol ise Ahyolu ve Süzebolu'ya öküz arabaları ile taşınan demirler gemiler ile Karadeniz kıyılarını takip ederek İstanbul'a getirilmekteydi. Samakocuk ve Trulya'da üretilen dövme ve dökme demir yine Karadeniz üzerinden gemiler ile İstanbul'a taşınmaktaydı (Tanyeli, 1990).

Samakov'da üretilen demir ile öncelikle askeri ihtiyaçlar karşılanmaktaydı. Bunun yanında önemli yapılar için de strüktürel demir buradan temin edilmekteydi. Süleymaniye Camii ve Külliyesinin yapımında kullanılan demir elemanlar Samakov'da üretilmiştir (Barkan, 1979). Yine Edirne ve İstanbul'da yer alan birçok Osmanlı anıt mimarisinde kullanılan demir elemanların buradan getirildiği bilinmektedir.

18. yüzyılda Demirköy'de üretilen demirin yapılarda kullanıldığı görülmektedir. Belgelerde Nuruosmaniye Camii'nin yapımında Demirköy'den getirilen demirin kullanıldığı yer almaktadır. Bu tarihten sonra Osmanlı Devleti'nin gelişen teknolojiye ayak uyduramaması nedeniyle bir zamanlar Avrupa'ya göre ileride olduğu demir üretiminde geride kaldığı ve artık demir ithal ettiği döneme girilmiştir. Yine Nuruosmaniye Camii'nde İngiliz ve İsveçli tüccarlardan alınan karbon oranı yüksek yeni teknoloji ürünü demirler kullanılmıştır. Karbon oranı nedeniyle gününüzde korozyona uğrayan demirlerin oluşturduğu iç gerilmeler nedeniyle yapı zarar görmüştür (Tanyeli, 1990; Dabanlı, 2016).

2.2 Demirin Üretim Süreci

Demirin üretim sürecinde cevher, odun kömürü ve su gücüne ihtiyaç vardır. Süreç cevherin çıkarılması ile başlamaktadır. Osmanlı'da cevherin elde edilmesi için birkaç farklı yöntem kullanılmıştır. Bununla birlikte Samakov'da çoğunlukla demir

cevheri yüzey ve yüzeye yakın bölgelerden toplanmıştır (Tanyeli, 1990; Doğan, 2023).

Çıkarılan cevherin toprağından ve diğer organik maddelerden arındırılması için suya ihtiyaç duyulmaktadır. Tabi suya sadece elde edilen cevherin toprağından arındırmak için değil cevherin ergitilmesi esnasında da ihtiyaç vardır. Su belli bir noktadan alınarak yer yer ahşap bentlerden yardımıyla belli bir kottan demir ocağına ulaştırılmaktadır. Demir ocağında yer alan dolaplara dökülen suyun gücü ile körük ve döven kollar çalışmaktadır.

Demir üretim sürecinde bir diğer temel ihtiyaç ise odun kömürüdür. Demir cevherini ergitmek için ihtiyaç olan enerji odun kömürü ile sağlanmaktadır. Odun kömürü üretiminde genellikle meşe odunları kullanılmaktadır. Meşe odunları belli bir noktaya kadar ısıtılıp kömürleştirilmektedir. Asıl enerji kömürleşen odunun tekrar yakılması sırasında çıkmaktadır (Şekil 2.1).

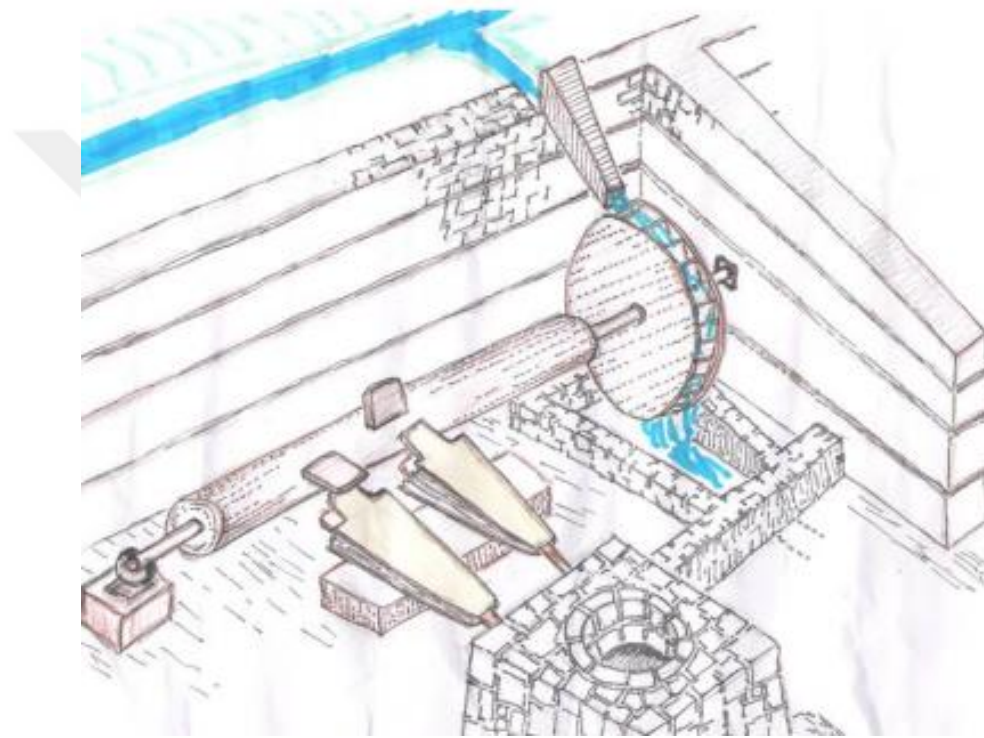


Şekil 2.1 Odun kömürü üretimi (Tok, 2017)

Demirin ergitildiği vigne olarak adlandırılan üretim fırınlarının yükseklikleri iki metreyi bulmaktadır. En geniş yerinde çapı 80 cm'i bulan silindirik bir forma sahiptir. İçerisine odun kömürü ve cevher konulduktan sonra ağzı kapatılmaktadır. Fırının yakılma aşamasında üfleç denilen körük ile içerisine oksijen verilmektedir. Ateşin harlanması için ihtiyaç duyulan oksijen, su gücü ile çalışan körükler ile sağlanmaktadır. Fırının içinde oluşan ısı 1200 dereceyi bulmaktadır. Yaklaşık 16 saat boyunca yanan fırından luppe ya da bloom olarak adlandırılan bir tür yarı eriyik

halinde bulunan takribi 23 kg cevher elde edilmektedir (Tanyeli, 1990; Özbal, 2009).

Fırından çıkan cevher yine su gücü ile çalışan büyük çekiç başlı kollar ile dövülürdü (Şekil 2.2). Osmanlı demir üretimi konusunda Avrupa'nın gerisinde olmakla birlikte demir işleme konusunda 16. yüzyılın sonlarına kadar Avrupa'nın ilerisindeydi. Dönemin Avrupa'sının 100 kg ağırlığındaki demiri ancak 18. yüzyılda dövebilecek kapasiteye eriştiği görülmektedir. Osmanlı ise 16. yüzyılda bir tonun üzerinde ağırlığa sahip yapısal demir elemanları işleyebilmektedir.



Şekil 2.2 Su çarkı ve körükler (Danışman, 2007)

Osmanlı'da böylesine büyük ebatlı yapısal elemanların yapılabilmesini sağlayan su gücü ile çalışan büyük çekiçlerdir. Evliya Çelebi seyahatnamesinde Samakov'da demir üretimine tanıklık etmiş ve

Bu Samakov şehrinde ve çevredeki nahiyelerde toplam 110 adet demir işleyen işliklere bu diyarda samakov derler. Nemrud ateşinin yakan körüğünü 10 adam çekemez, su değirmeni körüğü çekip Nemrud ateşi hasıl olur. Fil karnı kadar demir örsler üzere Yemen akîki gibi kırmızı demirler ki ateşten çıkmıştır, o demirleri demirci ustaları birer çeşit sanatlı dolaplar ile kızgın demirleri örs üzerine koyup camız kellesi kadar çekiçleri yine bir sanat ile su dolapları çekiçleri kırmızı demire vurunca zemin titrer. İş başında ancak iki usta, örs üzerine dolap ile birer ikişer kantar demirleri çekiç altına koyup çekiç vermede olup demir uzayıp bir çubuk olunca yine bir sanat ile çekiç dolap çarkının suyunu kesip gece gündüz böyle bir iş işler ki böyle bir işi demirciler piri Hazret-i Davud etmemiştir. Nice yüz bin gezgin böyle dev gibi işi görmemiştir.

ifadesi ile oradaki üretimi betimlemiştir.

2.3 Demirin Geleneksel Şekillendirme Yöntemleri ve Dövme Demir

Demir cevheri ergitildikten sonra dövme ve döküm olmak üzere iki farklı geleneksel yöntem ile şekillendirilmektedir. Yapılarda hem dövme hem dökme demirin kullanıldığı görülmektedir. Genel itibari ile çekme kuvvetlerini karşılamak amacıyla kullanılan demirler dövme yöntemiyle, basınç kuvvetlerini karşılamak amacıyla kullanılan demirler dökme yöntemiyle şekillendirilmiştir (Tablo 2.1). Dökme demir ise daha çok askeri amaçlı kullanılmıştır. Dökme yöntemiyle üretilen demir başta yuvalak adı verilen güllerin yanı sıra top ve gemi yapımında kullanılmıştır (Doğan, 2023).

Tablo 2.1 Tarihi dökme ve dövme demirin malzeme özellikleri (Jung vd., 2018)

Malzeme	Kimyasal İçeriği	Malzeme Özelliği
Döküm Demir	Karbon (C)= 2.0-4.0%, Manganez (Mn)=0.2-1.2%, Silisyum (Si)=0.3-3.0% Kükürt (S)<=1.2% P (Fosfor)<=1.0%	$f_u = 90-135 \text{ MPa}$ $\varepsilon_u = 0\%$
Dövme Demir	Karbon (C)<=0.8% Manganez (Mn)<=0.4%, Kükürt (S)<=0.04% P (Fosfor)<=0.6%	$f_y = 220-310 \text{ MPa}$ $f_u = 280-400 \text{ MPa}$ $\varepsilon_u = 5-20\%$

f_u = Çekme Dayanımı

f_y = Akma Dayanımı

ε_u = Süneklik

E = Elastisite Modülü

Dövme yöntemi asırlardır demirin şekillendirilmesi için kullanılmaktadır. Çıkarılan cevher vigne fırınlarında odun kömürü ile yarı eriyik haline getirilmektedir. Ardından elde edilen yarı eriyik cevher yüksek derecelere kadar ısıtılarak çekiç yardımıyla dövülmektedir. Yapısal demir elemanlar fırından çıkan cevherin dövme yöntemiyle birbirine eklenerek şekillendirilmesi sonucu ortaya çıkmaktadır.

Osmanlı dövere demir şekillendirme konusunda dönemin ileri teknolojisine sahipti (Tanyeli, 1990).

Dövme demirin kimyasal içeriğinde karbon elementi yok denecek kadar azdır. Bu özelliği dövme demire korozyona karşı dirençli olmasını sağlamaktadır. Ayrıca karbon oranının az olması dövme demirin çekme kuvvetlerine karşı dayanımını artırmaktadır. Dövme demire bu özellikleri Osmanlı mimarisinde strüktürel amaçlı geniş kullanım alanı sağlamıştır. Osmanlı anıt mimarisinde kullanılan ve yapıda oluşan çekme gerilmeleri karşılayan kenet, zıvana, gergi gibi strüktürel demir elemanlar dövme demirden üretilmiştir. Bu sayede uzun zaman korozyona karşı direnç gösterebilmişler, çekme dayanımları sayesinde yapıların ayakta kalmasını sağlamışlardır.

2.4 Klasik Dönem Osmanlı Anıt Mimarisinde Strüktürel Demir Kullanımı

Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinin inşasında taşıyıcı olarak taş, tuğla, harç ve demir elemanlar kullanılmıştır. Yapıda oluşan basınç gerilmeleri taş malzeme ile oluşturulan duvar, sütun vb. taşıyıcı elemanlar ile karşılanırken çekme gerilmeleri ise taş elemanları birbirine bağlayan strüktürel demir elemanlar ile karşılanmaktadır. Tarihi eserlerin yapımında demir öğelere ilk olarak kenet ve zıvana formunda rastlanılmaktadır. Erken Dönem Osmanlı anıt mimarisinde kagir yapı elemanları birbirlerine harç ile bağlanırken Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinde taşlar birbirlerine sıralı kesme taş duvar örgüsü olarak adlandırılan sistemde demir bağlantı elemanları ile bağlanmıştır. 15. yüzyıl sonlarına kadar kenet kullanımı kısıtlı olmuştur. 16. yüzyıl itibari ile yapılarda kullanılan kenetlerin sayısı ile birlikte kesitleri de artmıştır (Tanyeli, 2017).

Mimaride kullanılan demir elemanlar genelde demir ocaklarında üretimi ve şekillendirilmesi yapıldıktan sonra şantiye alanına gelmekle birlikte bazen kenet ve zıvana gibi ufak boyutlu demir elemanların inşaat alanında da şekillendirildiği bilinmektedir. Basit öğeler olan kenet ve zıvana şekillerinin kullanımına başlanıldığından itibaren neredeyse değişmeden kaldığı söylenebilir (Tanyeli, 2017).

Kenetler iki elemanı birbirine yatayda bağlayan “U” formunda demir elemanlardır. Kenetler Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinde genellikle taş öğelerin birbirine bağlanması amacıyla kullanılmış olup bazı durumlarda taş ve ahşabın bağlantısında da kullanılmıştır. Osmanlı’da kenetler türlerine ve boyutlarına göre isimlendirilmiştir (Tablo 2.2).

Tablo 2.2 Osmanlı döneminde piyasada bulunan kenet türleri (Sönmez, 1997)

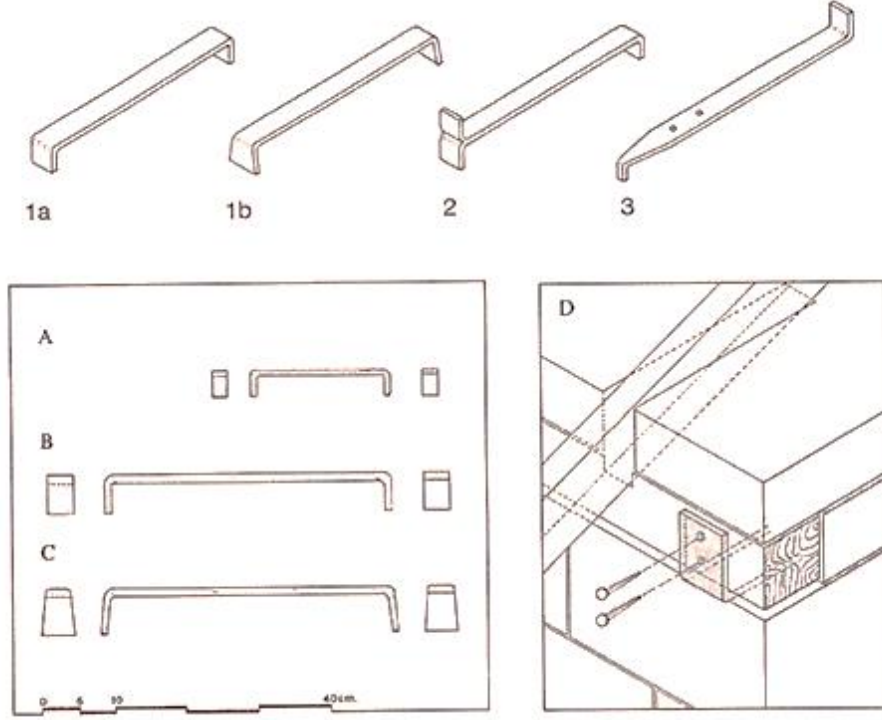
Kenet Türleri	Boyuna Göre Adları
Kened-i ahen (kenet demiri)	Kened-i büzürk (büyük kenet)
Kened-i nev (yeni kenet)	Kened-i vasat (orta büyüklükte kenet)
Kened-i hurda (hurda kenet)	Kened-i küçek (küçük kenet)
Kened-i köhne (köhne kenet)	
Kened-i Frengi (Avrupa kenedi)	
Kenedha-i mütenevvia (çeşitli kenetler)	

Kenetler taşta iki ucu kıvrılarak kurşun yardımıyla mesnetlenmektedir. Kenet uçları genellikle düz ve trapez olarak şekillendirilmiştir. Kenet boyutları bağladığı taşların büyüklüğüne bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Genellikle Klasik Dönem Osmanlı mimarisinde karşılaşılan kenet uzunluğu 30 ila 40 cm arasında olmakla birlikte çok daha uzun kenet boylarına rastlanılmaktadır. Kenet kalınlıkları ise karşılaşılan örneklerde genellikle 5 ila 10 mm arasında değişmektedir (Şekil 2.3).

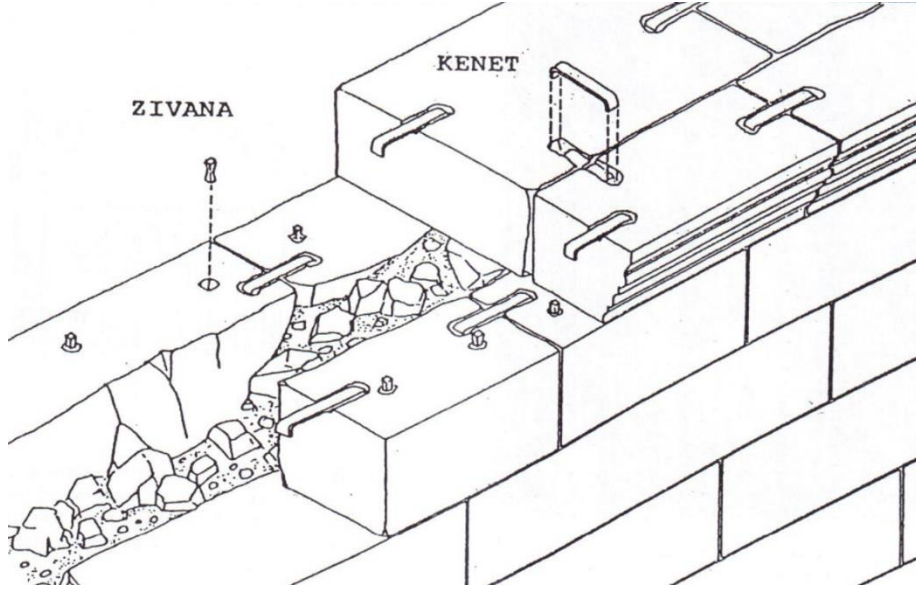
Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinde kullanılan sıralı kesme taş örgü sistemi içinde yer alan kenet yapıya deprem gibi dış kuvvetlere karşı mukavemet kazandırmaktadır. Yapılan deneysel araştırmalar kenet ile örülen kagir örgünün kenetsiz örülen kagir örgüye göre çekme kuvvetlerini karşılamakta daha üstün olduğunu ortaya koymuştur (Demir, 2012).

Diğer bağlantı elemanı olan zıvana taş elemanları düşeyde birbirine bağlayarak yapıya gelecek yanal yüklere karşı yapının taşıyıcılığına katkı sağlamaktadır (Şekil 2.4). Kenet gibi zıvanada dövme demirden üretilmiştir. Zıvanalar uçlara doğru kalınlaşan çubuk formunda bağlantı elemanlarıdır. Zıvana formunun bu şekilde olması zıvananın taşta kurşun aracılığı ile daha sağlam şekilde mesnetlenmesini sağlamaktadır. Uzunlukları yerine göre 15 cm’i bulabilmektedir. Kesitleri ise

genellikle 3 ila 6 cm arasında değişmektedir. Özellikle minare çekirdeklerinde ve sütun başlarının bağlantısında daha kalın kesitli zıvana kullanılmaktadır.



Şekil 2.3 Bazı kenet çeşitleri (Tanyeli, 2017)



Şekil 2.4 Sıralı kesme taş duvar örgüsü (Tanyeli vd., 1990)

Osmanlı mimarisinde 15. yüzyıl sonlarına doğru yapım ve yapı malzemesi teknolojinde yaşanan gelişmeler neticesinde kenet ve zıvanalar harici büyük

boyutlu strüktürel demir elemanlar kullanılmaya başlanmıştır. Edirne Üç Şerefeli Camii ile demir elemanlara ilk defa kenet ve zıvana dışında avlu kemer gergilerinde rastlanılmaktadır (Tanyeli, 1990).

16. yüzyıldan itibaren Osmanlı anıt eserlerinde strüktürel demir kullanımı giderek artmıştır. Samakov başta olmak üzere demir ocaklarından yapılarda kullanılan ahşap hatıllar yerine kullanılmak üzere, demir elemanlar getirtilmiştir. Bu dönemde artık demir elemanlar yardımcı yapı malzemesi olmaktan çıkmış ana yapı malzemesi haline gelmiştir. Yapım aşamasında kullanılan söz konusu strüktürel demir elemanlar sayesinde Klasik Dönem mimarisinde yapılar yüksek ve ihtişamlı şekilde inşa edilerek anıtsal boyutlara ulaşmıştır. Şüphesiz Klasik Dönem mimarisinin anıtsal boyutlara ulaşmasında gergi demirlerinin rolü büyüktür. Tanyeli (1990) gergi demirlerini duvar içi ve açıklık gergileri olmak üzere iki kısımda incelemiştir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Revaklı avlu

Açıklık gergileri genellikle iki sütunun taşıdığı kemerlerin arasında görülmekle beraber az da olsa tonoz açıklıklarında da görülmektedir (Şekil 2.6). Gergiler kemer ve tonozların maruz kaldıkları yatay ve düşey yükler etkisinde açılmadan stabilitelerini korumalarını sağlamaktadır. Açıklık gergilerinde 15. yüzyıla kadar kullanılan ahşap malzeme 16. Yüzyıla gelindiğinde yerini demir malzemeye bırakmıştır. Demirin kolay ulaşılabilir olmaması nedeniyle bu geçiş hızlı bir şekilde gerçekleşmemiştir.



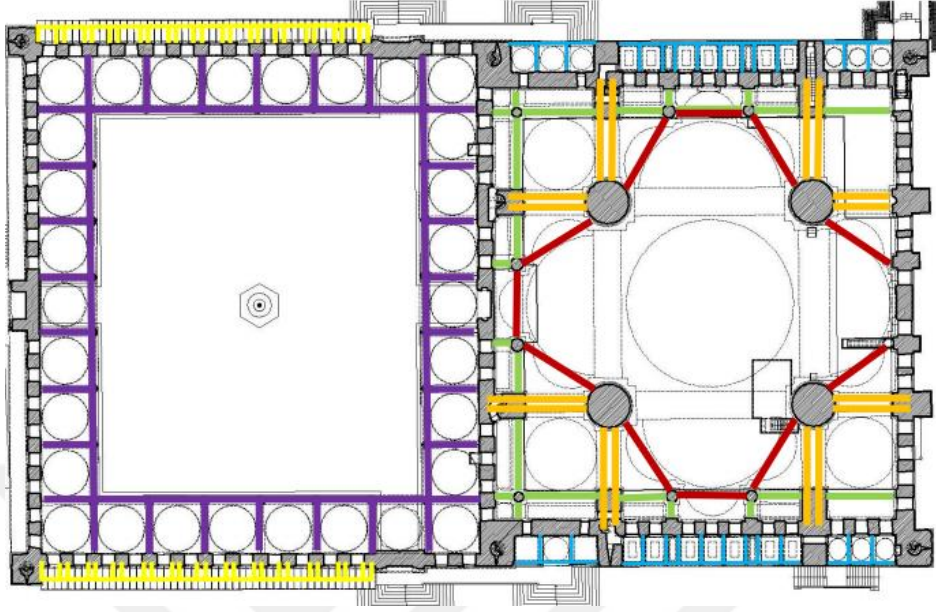
Şekil 2.6 Gergi sütun başı mesnet detayı

Demir gergi kullanımının ilk örnekleri özellikle padişah yapılarında görülmektedir. Daha sonraları vezir yapılarında da demir gergi kullanımı görülse de miktar olarak azdır. Edirne'nin başkent olmasının yanında Balkanlara yakın olmasının da etkisiyle avlu kemer açıklık gergilerinde demir eleman ilk defa Edirne Üç Şerefeli Camii'nde kullanılmıştır. Demirin ulaşımının zor olmasından olsa gerek bazı yapıların inşasında hem ahşap hem demir gergilerin bir arada kullanıldığı da görülmektedir. Azapkapı Sokullu Mehmet Paşa Camii'nin alt kotunda yer alan kemer açıklıklarında iki sıra ahşap gergi arasında bir sıra demir gergi kullanılmıştır.

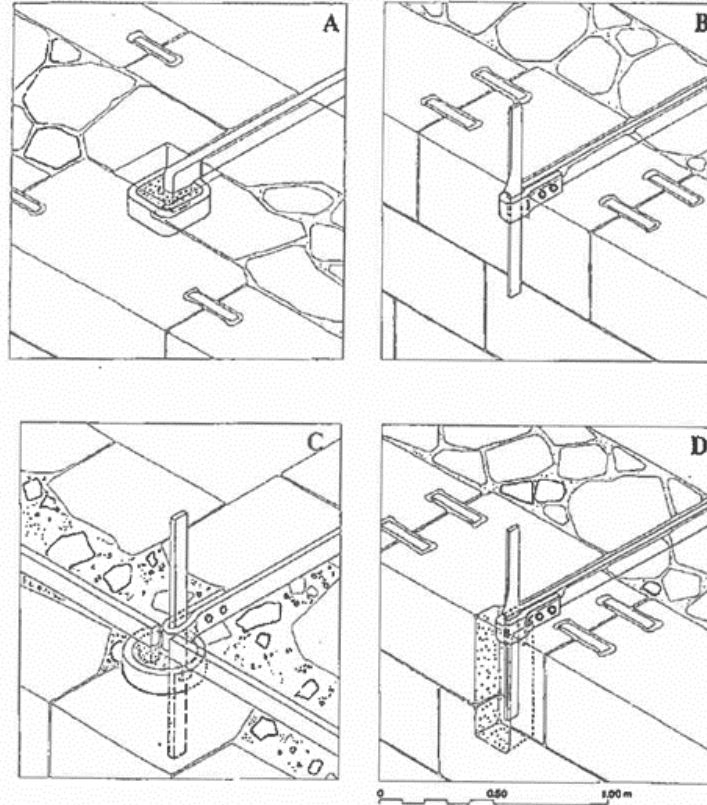
Osmanlı mimarisinde açıklık gergilerinin ilk kullanım örneklerinin kalın kesitli olduğu daha sonraki dönemlerde kesitlerin giderek azaldığı görülmektedir. Diğer yandan kesitleri azalan açıklık gergilerinin yapıların neredeyse her noktasında kullanım alanı bulduğu görülmektedir (Şekil 2.7).

Duvar içi gergileri ise duvar bünyesi boyunca genellikle gömülü şekilde ilerleyen tekil demir hatıl elemanlardır. Duvar gergileri bir çerçeve oluşturmadan yapıya mesnetlenmekte ve bünyesinde bulunduğu duvarın çekme kuvvetlerine karşı dayanımını artırmaktadır. Duvar içi gergileri duvara birkaç farklı yöntem ile mesnetlenmektedir. Bu yöntemlerin bazıları duvar içerisinde kalmaktadır. Dolayısıyla bu durum gergilerin tespitini zorlaştırmaktadır. 18. yüzyıla gelindiğinde duvar içi gergileri duvarın dış yüzeyine kılıçlama adı verilen yöntem ile mesnetlenmeye başlamıştır (Şekil 2.8). Bu uygulama duvar içi hatılların tespitlerini kolaylaştırmıştır. Bu dönemde 16. yüzyılda sadece padişah ve vezir

yapılarında görülen demir malzeme ile berkitme durumu neredeyse bütün kagir yapılarda duvar içi gergi uygulaması ile yer bulmuştur.



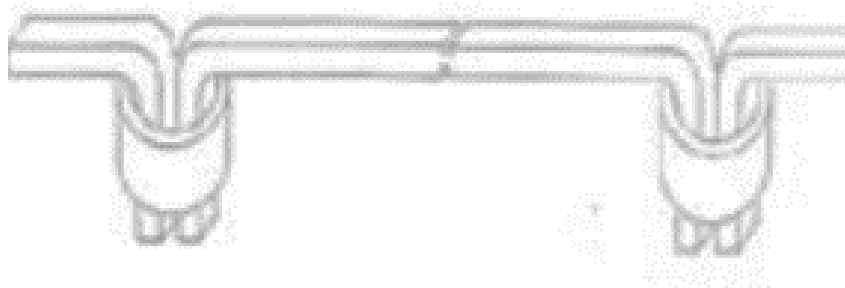
Şekil 2.7 Sultan Ahmet Camii açıklık gergileri (Tuna, 2021)



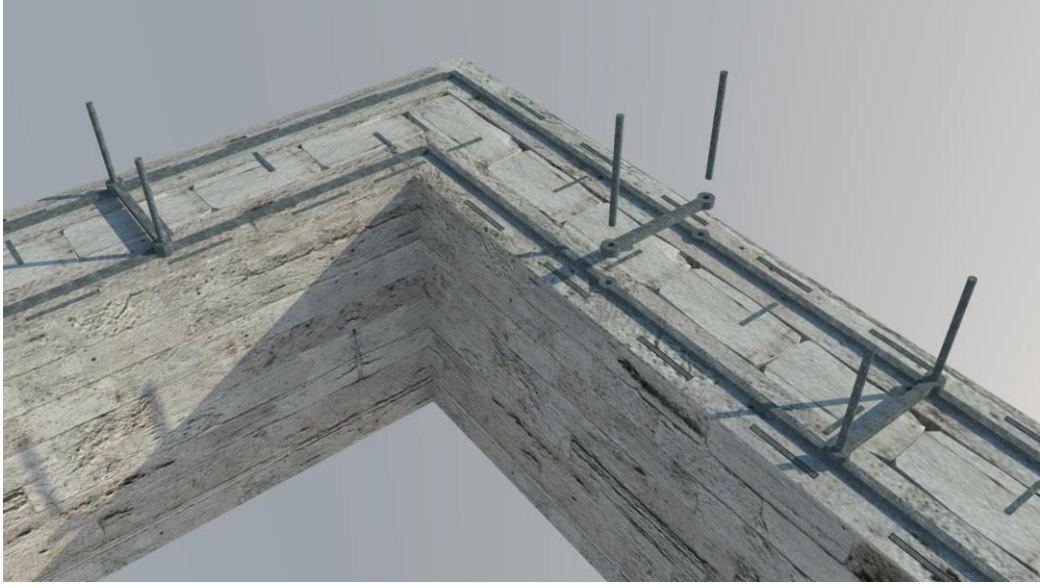
Şekil 2.8 Mesnetleme Sistemleri (Tanyeli, 1990)

Duvar içi gergilerini dönemin imkanlarında tek parça üretmek mümkün olmamıştır. Belli bir uzunluktan sonrasını Samakov'dan İstanbul'a getirmekte nakliye konusunda sıkıntı oluşturmaktadır. Dolayısıyla duvar içi gergilerinin mütemadi şekilde çalışması için birbirlerine bağlanması hususunda bir detay geliştirilmesi gerekmiştir. Osmanlı gergi demirleri birbirine simid adı verilen genelde yuvarlak veya kare forma sahip demir elemanlar aracılığı ile bağlamıştır (Şekil 2.9). Bağlantı noktaları arası kalan boşluklar genellikle kurşun eritilerek doldurulmuştur. İhtimal ki kurşundan tasarruf etmek için olsa gerek dolgunun içine konulmuş ufak taş parçalarına da rastlanılmaktadır.

Duvar gergilerinin bir sistem içinde yapıyı çepeçevre sarması durumu Tanyeli (1990) tarafından kuşaklama olarak adlandırılmaktadır. Kuşaklama berkitme sisteminde gergiler birbirlerine simitler yardımıyla eklenerek duvar köşelerinden yapıyı sarmaktadır. Kuşaklama bazen duvar içi gergilerinin birbirine dört duvar köşesinde bağlanmasından oluşmakla birlikte bazen de açıklık gergilerini de sistem içine alarak oluşabilmektedir. Kuşaklama uygulamasının ilk örneğinin hangi yapıda kullanıldığı söylemek duvar içi gergilerinin duvar bünyesinde gömülü olmasından dolayı oldukça zordur. Duvar içi gergilerinin duvar köşelerinde birbirilerine bağlantısının varlığının tespiti mümkün olmamasından dolayı erken dönem duvar içi gergileri ile berkitilmiş yapılarda kuşaklamanın varlığından söz etmek doğru olmayacaktır. Tanyeli (1990) ilk kuşaklama uygulamasının Yavuz Sultan Selim Camii'nde kullanıldığını belirtmektedir. Çalışmasında yapının birçok noktasından duvar içi gergilerinin birbirine bağlantılı şeklinde devam ettiğini görsel olarak tespit etmiştir.



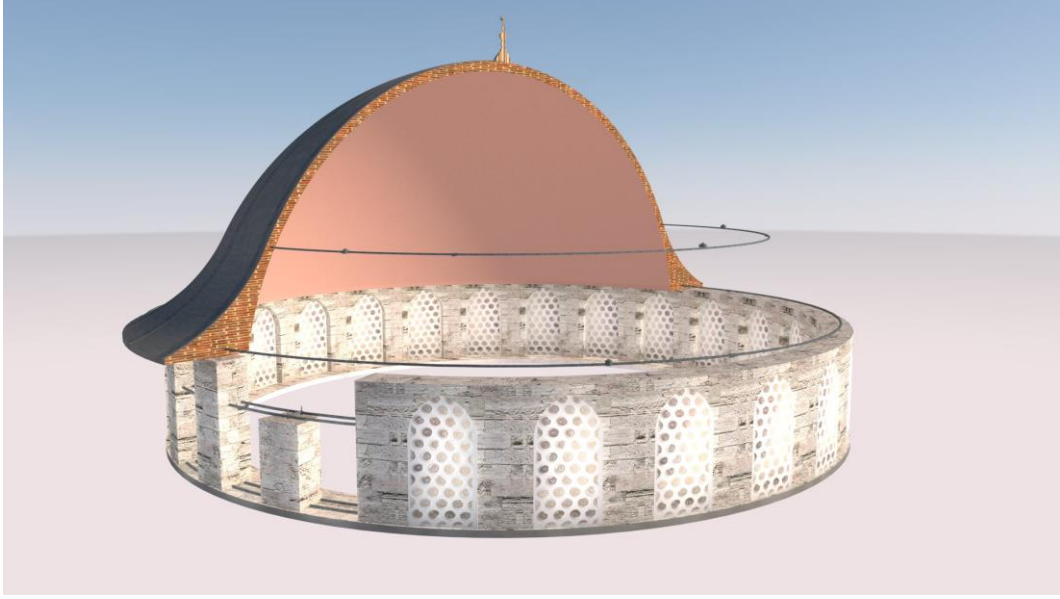
Şekil 2.9 Simidli birleşme detayı (Kurugöl & Küçük, 2015)



Şekil 2.10 Kuşaklama detayı (Tanyeli tarafından Yavuz Sultan Selim Camii verilerine dayalı oluşturulan çizim üzerinden düzenlenmiştir)

Kuşaklama elemanları taşıyıcı duvar içinde Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinde genellikle iki sıra halinde bulunmaktadır. İhtimal duvar içinde kuşaklama elemanları yatayda birbirine bağlanmaktadır. Bu detayın ipuçları birden çok yapıda pencere açıklıklarında kendini göstermektedir. Pencere açıklığından geçen bazı demir kuşaklama elemanlarında delikler görülmektedir. Bu noktalar kuşaklama elemanlarının birbirine bir nevi kılıç yardımıyla bağlandığını düşündürmektedir (Şekil 2.10).

Kuşaklama berkitme sistemi yapıyı birden çok kotta sarmaktadır. Taşıyıcı duvarların yanında yapının kubbesinde de kuşaklama elemanları kullanılmıştır. Osmanlı erken dönem mimarisinde demir kullanımı öncesinde kubbede oluşan çekme gerilmelerine karşı kubbe çekme bölgesi kalın şekilde örülürdü. Pencere boşluklarına da bu nedenle mümkün mertebe yer verilmezdi. Demir kullanımı ile birlikte Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinde kubbe çekme bölgesinin kesiti incelmış ve açılan pencere boşlukları ile yapının daha aydınlık olması sağlanmıştır (Şekil 2.11).



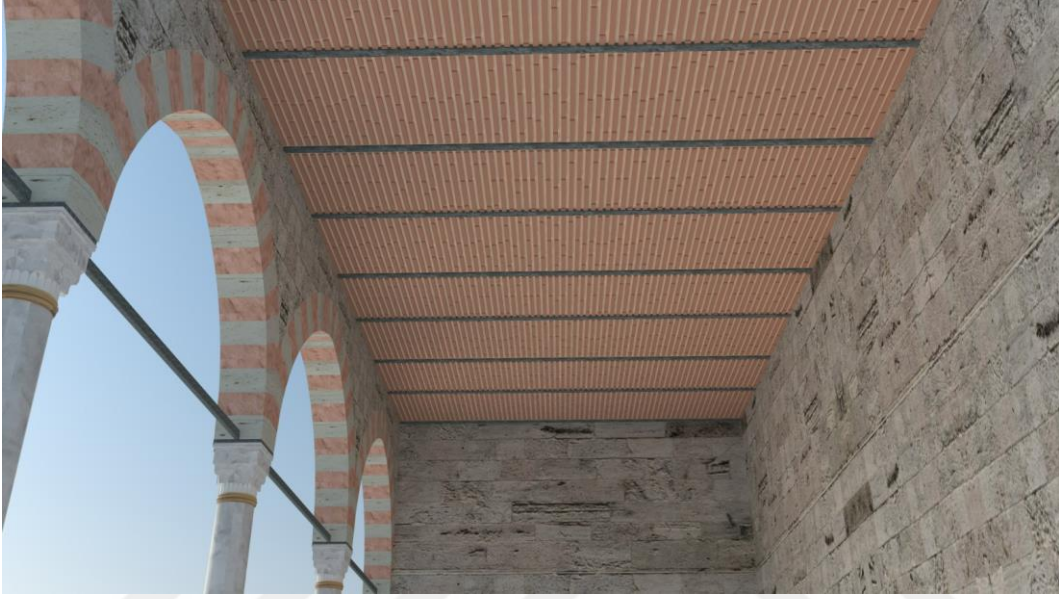
Şekil 2.11 Klasik Dönem anıt yapılarının kubbe örgüsünde kullanılan strüktürel demir elemanlar

Kubbe çekme bölgesinde bazı örneklerde birden çok kotta kuşaklama elemanı tespit edilmiştir. Kubbesinde birden çok kotta kuşaklama elemanı bulunan Sultan Ahmet Camii'nin restorasyonu sırasında kubbe kuşaklamasının simit bağlantı elemanı açığa çıkartılmıştır (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 Sultan Ahmet Camii kubbe kuşaklaması simid detayı

Diğer berkitme yöntemi olan kirişler 16. yüzyılda anıtsal yapılarda genellikle mahfil döşemelerini oluşturmak için kullanılmıştır (Şekil 2.13). Kirişlerin arası tuğla ile doldurularak döşeme oluşturulmaktadır. Dolgunun genel bir uygulamasından bahsetmek zordur. Sultan Ahmet Camii restorasyonu sırasında dış sofada yer alan kirişli döşemede tuğlanın kertilerek demir kiriş üzerine konulduğu görülmüştür.



Şekil 2.13 Kirişli döşeme

Kirişli döşemelerde demir elemanlar arası mesafe 50 santimetre civarındadır. Bazı örneklerde ise ana demir kirişler üzerine tali demir kirişler konularak döşeme oluşturulduğu görülmektedir. 1665 yılı Topkapı sarayı harem yangını sonrası padişahın fermanı ile ahşap kirişli döşemeler yerine ana demir kirişler üzerine tali demir kirişler konularak döşeme yeniden yapılmıştır.

Asli eleman olan taşlara destek amaçlı kullanılan kirişleri Tanyeli (1990) yardımcı kiriş olarak tanımlamıştır. Yardımcı kirişler 16. yüzyılın ikinci yarısı itibariyle standart uygulama olarak görülmektedir. Pencere ve kapı üstü taş lentolarının ve taş döşemelerin altında sıklıkla demir yardımcı kirişler kullanılmıştır (Şekil 2.13). Ayrıca merdiven basamaklarının altına destek olarak da kullanıldığı görülmektedir. Yardımcı demir kirişler malzeme özelliği sayesinde taş elemanların çekme kuvvetlerine karşı koymalarına destek olmaktadır.

3

ANITSAL YAPILARDA ANALİZ YÖNTEMLERİ

3.1 Laboratuvar Çalışmaları

Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinde kullanılan strüktürel dövme demir elemanların laboratuvar ortamında malzeme özellikleri incelenmiştir. İncelenen demir elemanlar Vakıflar Genel Müdürlüğü ve Matil Malzeme Test ve İnovasyon Laboratuvarları A.Ş. arasında imzalanan “Vakıf Kültür Varlıklarının Korunması ve Geliştirilmesi alanında iş birliği protokolü kapsamında temin edilmiştir (Şekil 3.1). Temin edilen özgün demir elemanların metalografik numune hazırlama işlemleri yapıldıktan sonra laboratuvar testlerine geçilmiştir.



Şekil 3.1 Sultan Ahmet Camii yapımında kullanılan çeşitli dövme demir elemanlar

Laboratuvar testleri Matil A.Ş. bünyesinde bulunan TS EN ISO/IEC 17025 standardına göre akredite olan laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler, tarihi yapıların restorasyonları sürecinde yapıdan çıkarılmış ve işlevini yitirmiş

dövmе demir elemanlar üzerinde yapılmıştır. Laboratuvar çalışmaları, Osmanlı klasik dönemi anıt eserlerinde bulunan demir elemanların kimyasal, mikroyapısal ve fiziksel özelliklerini test ederek bu demir elemanların malzeme karakteristik özelliklerini belirlemeyi amaçlamaktadır.

3.1.1 Numune Hazırlık İşlemleri

Metalografi metal malzemenin iç yapısını inceleyen bilim dalıdır. Metalografik çalışmalar ile demirin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri tespit edilebilmektedir. Başarılı bir metalografi çalışması doğru numune alımına bağlıdır. Alınan numune ana parçayı her yönden temsil etmelidir. Numune alım süreci beş aşamadan oluşmaktadır; kesme, kalıplama, zımparalama, parlatma, dağlama.

Kesme işlemi numune hazırlamanın ilk aşamasıdır (Şekil 3.2). Ana parçadan numune keserken malzemenin iç yapısına zarar vermemeye özen gösterilmelidir. Uygun kesme ucunun kullanılmaması kesme işlemi sırasında yüksek ısının oluşmasına neden olarak numunenin iç yapısına zarar verebilmektedir. Malzemenin incelenecek özelliğine göre kesme işlemi enine ya da boyuna yapılmaktadır.



Şekil 3.2 Demir numunenin kesilmesi

Kesilen numunenin karmaşık geometrisinden ya da boyutundan dolayı kalıplamaya ihtiyaç duyulabilmektedir. Kalıplamadaki ana amaç numunenin elle tutulabilir

olmasını sağlamaktır. Kalıplama iki farklı yöntem ile gerçekleştirilmektedir. Sıcak ve basınç altında kalıplama yönteminde bakalit tozu 150 derece sıcaklıkta eritildikten sonra 30 MPa basınç altında numunenin etrafına kaplanmaktadır. (Şekil 3.3). Söz konusu yüksek sıcaklığın kurşun gibi bazı metallerin içyapısını bozmasından dolayı bu tür durumlarda soğuk kalıplama yöntemi tercih edilmektedir. Soğuk kaplama yönteminde basınç ve sıcaklık uygulanmamaktadır.



Şekil 3.3 Sıcak kalıplama cihazı

Kalıplanan malzemeler zımparalama işlemine tabi tutulur. Kesme işlemi esnasında numune yüzeyinde deformasyon meydana gelmektedir. Zımparalama işleminin amacı, teste tabi tutulacak numunenin yüzeyindeki pürüzlü tabakayı gidermektir. Laboratuvar testlerinden doğru sonuçlar elde edilebilmesi için numune yüzeyinin düzgün ve pürüzsüz olması gerekmektedir. Numuneler, sırasıyla 80, 150, 240, 320, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 numaralı zımpara işlemlerinden geçirilir. Her bir işlemten sonra zımparalama yönü 90 derece döndürülerek yüzeyin pürüzsüz hale getirilmesi sağlanır. Zımparalama işlemi sırasında numunenin aşırı ısınmasını önlemek amacıyla işlem su kullanılarak gerçekleştirilir.

İnce zımpara işleminin ardından parlatma aşamasına geçilir. Numune zımparalama işlemin ardından muhakkak yıkanmalıdır. Bu aşamada numunenin yüzeyi sıvı bir

solüsyon yardımıyla bir çeşit bez kaplı mekanik disk ile silinmektedir (Şekil 3.4). Parlatma işleminin sonunda numune aynayı andıran yüzeye sahip olmaktadır.



Şekil 3.4 Zımparalama ve parlatma cihazı

Numunenin malzeme özelliklerini ve içerdiği fazları belirginleştirmek amacıyla özel bir sıvı kullanılarak yüzeyin dağlanması işlemi gerçekleştirilir. Dağlama işlemi genellikle asit veya alkaliler ile yapılmaktadır. Metallerin özelliklerine bağlı olarak, dağlama işlemi bazı metaller için saniyeler sürerken, bazı metaller için daha uzun sürebilmektedir. Dağlama işleminin verimli bir şekilde gerçekleştirilmesi, uygun malzemeye uygun çözelti kullanmakla mümkündür. Alkol ve nitrik asit karışımından oluşan nital, demir numunelerinin dağlanmasında kullanılan uygun bir çözeltilidir. Dağlama işleminin ardından numune yüzeyinde tepkimenin sonlanması için numune bol su ile yıkanır ve ardından kurulanır.

Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinde kullanılan strüktürel demir elemanlarının laboratuvar testleri için numune hazırlık işlemlerinin tamamlanmasının ardından numuneler üzerinde kimyasal analiz, makro yapı incelemesi, mikro yapı

incelemesi, makro sertlik ölçümü, inklüzyon analizi, tane boyut analizi, faz analizi, mikro sertlik taraması ve sem analizi yapılmıştır.

3.2 Tahribatsız Muayene Yöntemleri

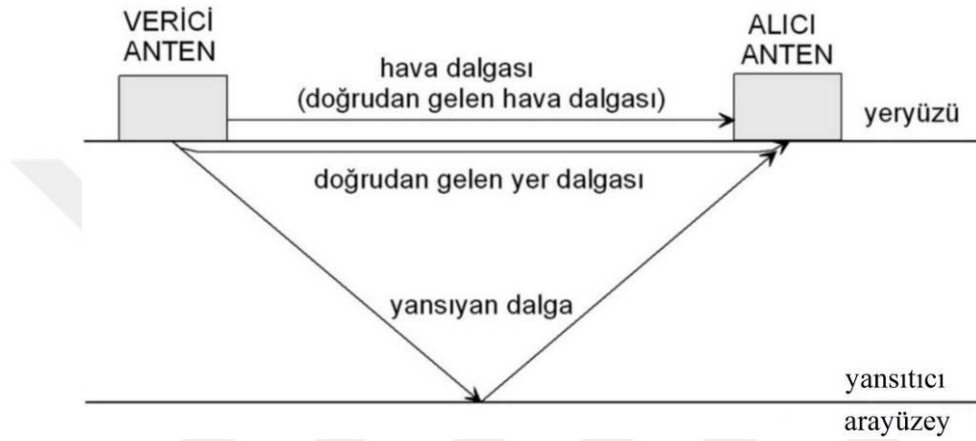
Tarihi yapıların bünyesinde yer alan ve işlevini devam ettiren strüktürel dövme demir elemanların dayanımlarının ve özellikle konumlarının bilinmesi koruma çalışmaları için önem arz etmektedir. Eser üzerinde uygulanacak tespit yöntemlerinin kültürel mirasa zarar vermeyecek şekilde seçilmesine dikkat edilmesi gerekmektedir. Özellikle tarihi yapıların gelecek kuşaklara aktarılabilmesi için yapıda yapılacak müdahalelerin tespitinde tahribatsız muayene yöntemlerinin kullanılması ön plana çıkmaktadır. Son dönemde yaşanan teknolojik gelişmeler ile tahribatsız muayene yöntemleri kültürel miras alanında malzemenin fiziki yapısını bozmadan bünyesinde bulunan süreksizliklerin tespitinde vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir (Moropoulou vd., 2013). Bunun yanı sıra hasarlı yöntemlere kıyasla tahribatsız muayene yöntemleri maliyet ve zaman açısından da ön plana çıkmaktadır (Peker, 2019).

Tahribatsız muayene yöntemi yapının malzeme özelliğine, şekline ve aranan hatanın tipine göre seçilmektedir. Muhakkak her yöntemin bir diğer yönteme göre artıları ve eksileri bulunmaktadır. Tespitin doğru ve güvenilir olduğundan bahsedebilmek için çoğu kez birden fazla yöntemin bir arada kullanılması gerekmektedir. Çalışma kapsamında sahada radar, manyetik indüksiyon, radyografi, ultrasonik dalga hızı, ultrasonik tomografi, termografi, darbe yansıma, videoskop, XRF ve phased array tahribatsız muayene yöntemleri ile strüktürel dövme demir elemanların konum ve durumlarının tespitine çalışılmıştır.

3.2.1 Radar

Radar yönteminde faydalanılan elektro manyetik dalgalar Alman bilim insanı Hertz tarafından 1886 yılında keşfedilmiştir. Gömülü cisimlerin tespitinde radar yöntemi ilk olarak 1911 yılında Lowy tarafından kullanılmıştır. Başlarda askeri amaçlı kullanılan yöntem ikinci dünya savaşı döneminde büyük gelişme göstermiştir. Sonraki yıllarda yöntem jeolojik araştırmalar, madencilik çalışmaları, arkeolojik kazılar gibi alanlarda kullanılmıştır (Skolnik, 1981).

Radar sığ yüzeylerde (0 – 40 metre) gömülü cisimlerin/süreksizliklerin tespiti amaçlı yapılan araştırmalarda kullanılan jeofizik bir yöntemdir. Radar cihazı verici anteninden yüksek frekanslı elektro manyetik (EM) dalgalar göndermektedir. Gönderilen EM dalgalar araştırma yapılan ortamda malzeme katmalarına ve/veya süreksizliklere maruz kalarak farklı şekilde yansımalar yaparak verici antenine dönüş yapmaktadır (Şekil 3.5). Yansıyan dalgalar zamanın fonksiyonu olarak kaydedilmektedir. Söz konusu EM dalgaların yansımalarının kaydedilmesi ile oluşan iki boyutlu görüntülere radar gram denilmektedir.



Şekil 3.5 Verici antenden çıkan radar dalgalarının alıcı antene ulaşması (Conyers & Goodman, 1997)

Tespiti amaçlanan cismin ve/veya süreksizliğin tahmini konumuna göre verici anten seçimi önem arz etmektedir. Anten frekansı 10 MHz ile birkaç GHz arasında değişkenlik göstermektedir. Frekans ne kadar yüksek ise çözünürlük o derece yükselmekte, tespitler santimetre hassasiyetinde yapılabilmektedir. Bununla beraber cihazın faydalı derinliği o derece düşüş göstermektedir. Diğer yandan düşük frekanslı anten yüzeyden daha derin alanları araştırma imkânı tanısa da elde edilen görüntülerin çözünürlükleri düşük olmaktadır. (Davis & Annan, 1989; Annan, 2003).

Ayrıca araştırma yapılan alanın fiziksel özellikleri EM dalgaların yayılma kabiliyetini etkilemektedir. Söz konusu fiziksel özellikler malzemenin dielektrik davranışını belirleyen dielektrik sabiti (ϵ_r), elektrik iletkenliği (σ) ile birlikte malzemenin manyetik geçirgenliğidir (μ_r) (Ulriksen, 1982). Bu parametreler nemli ortamlardan önemli oranda etkilenecek radarın verimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir (Griffin & Pippett, 2002).

Tablo 3.1’de bazı jeolojik malzemelere ait dielektrik sabit, iletkenlik, yayılma hızı ve soğrulma değerleri verilmiştir.

Tablo 3.1 Bazı malzemelere ait dielektrik, iletkenlik, hız ve soğrulma değerleri
(Wilchek, 2000)

Malzeme	Dielektrik Sabiti (ϵ_r)	Elektrik İletkenliği (δ)	Yayılma Hızı (v)	Soğrulma Sabiti (α)
Hava	1	0	0,3	0
Su (saf)	80	0,5	0,033	0,1
Su (tuzlu)	80	3000	0,01	1000
Kil	5-40	2-1000	0,06	1-300
Kum (kuru)	3-5	0,01	0,15	0,01
Toprak (doygün)	20-30	0,1-1	0,06	0,03-0,3
Kireç Taşı	4-8	0,5-2	0,12	0,4-1
Kum Taşı	4,7-12	0,00005-0,7	0,09-0,14	0,00000005-0,6
Bazalt	12	0,000008-0,025	0,01	0,000004-0,01
Granit	4,6	0,01-1	0,01-1	0,01-1

Elektro manyetik dalgalar yüksek iletkenliğe sahip malzemeler tarafından soğurulmaktadır. Kil oranı fazla diğer bir deyişle yüksek iletkenli zeminde faydalı ölçüm derinliği 1 metrenin altına kadar inebilmektedir. Düşük iletkenliğe sahip doğal taş veya kuru kum içeren zeminde faydalı ölçüm derinliği 50 ila 60 metreye kadar çıkmaktadır (Griffin & Pippett, 2002). Görüleceği üzere malzemenin iletkenliği radar çalışmalarının verimliliği ile ters orantılıdır.

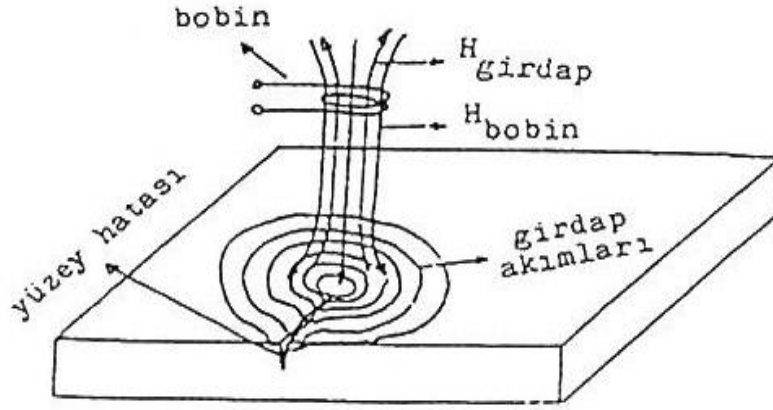
Radar çalışmasının yapıldığı malzemenin dielektrik sabiti de malzemenin iletkenliğinde olduğu gibi EM dalgalarının yayılması ile ters orantılıdır. Nemli zeminlerde dielektrik sabiti artmakta ve dalga hızına olumsuz etki etmektedir (Weeds, 1994).

Yüksek frekanslı anten seçimi ile cisim ve/veya süreksizliklerin santimetre hassasiyetinde tespiti yer radarı yöntemini günümüzde zemin araştırmalarının yanı sıra yapı elemanlarının durumlarının tespitinde de tercih edilen yöntemlerden birisi haline getirmiştir. Tahribatsız bir yöntem olması özellikle tarihi yapılarda kullanımı için tercih sebebi olmakta ve görüntüleme ve bilgi toplamak amacıyla gün geçtikçe kullanımı artmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte radar yöntemi ile yapıların iki boyutlu kesitlerinin yanı sıra üç boyutlu görüntüleri de elde edilmektedir.

3.2.2 Manyetik İndüksiyon

Girdap akımı yönteminin tarihçesi elektromanyetik indüksiyonun 1831 yılında Michael Faraday tarafından keşfi ile başlamaktadır. İkinci dünya savaşında özellikle mayın tespitinde kullanılmasıyla birlikte yöntemde gelişmeler yaşanmıştır. 20. yüzyılın ikinci yarısı itibari ile yöntem artık sanayi endüstrisinde kullanılmaya başlamıştır.

Elektrik akımına maruz bırakılan bir iletken çubuğun çevresinde manyetik alan oluşur. Söz konusu elektrik akımı ne derece güçlü ise çubuk çevresindeki manyetik alanda o derece genişlemektedir. Eğer iletken çubuk bobin formundaysa manyetik alan bobin içerisinde oluşacaktır. Oluşan manyetik alana elektrik iletkenliğine sahip bir malzeme temas ettirildiğinde malzemenin yüzeyinde bir akım indüklenir. Bu akıma girdap akımı denilmektedir. Söz konusu girdap akımı bobin çevresinde oluşan manyetik alana ters yönde ve farklı doğrultuda başka bir manyetik alan oluşturur. Temas ettirilen malzemede oluşan manyetik alan içerisinde herhangi bir süreksizlik olması durumunda girdap akımları yörüngelerinden saparak hatanın tespitini sağlamaktadır (Baygut & Durmuş, 2019) (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Manyetik indüksiyon muayene yöntemi

Manyetik indüksiyon yöntemi elektrik iletkenliği olan malzemenin yüzey ve yüzey altı süreksizlikleri tespit etmekte kullanılmaktadır. Elektrik akımını iletmeyen malzemenin süreksizliğini tespit etmekte girdap akımı yöntemi işlevsiz kalmaktadır. Bununla birlikte söz konusu yöntem ile iletken olmayan malzemelerin bünyesinde yer alan iletken malzemeler tespit edilebilmektedir.

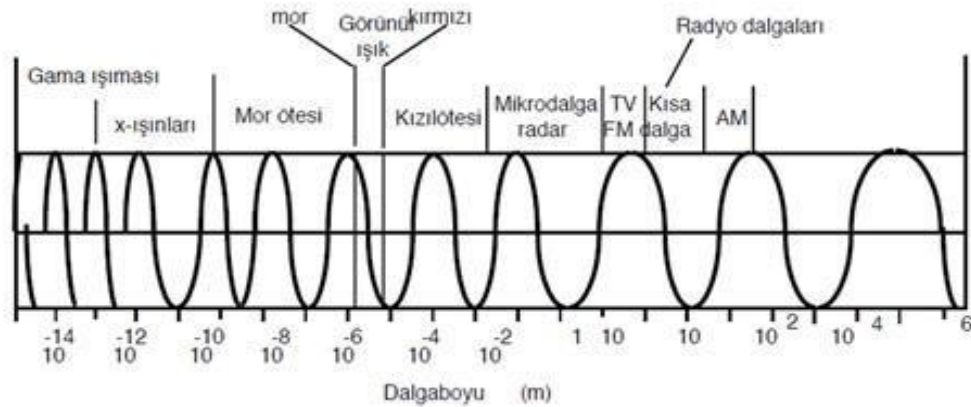
Yapı sektöründe girdap akımı prensibini kullanan cihazlar, iletken olmayan beton malzemenin bünyesinde bulunan iletken metal elemanların yapıya zarar vermeden konumları ve kesitlerinin tespiti için kullanılmaktadır.

3.2.3 Radyografi

X ışınları Alman fizikçi Wilhelm Conrad Röntgen tarafından 1895 yılında keşfedilmiştir. Tıp alanında ilk defa yine Röntgen tarafından kendi eşinin el röntgenini çekmek için kullanılmıştır. Daha sonra ikinci dünya savaşında özellikle kurşunlar vb. metallerin vücutta tespiti amaçlı kullanılmıştır (Tosun, 2011).

Radyografi yönteminde günümüzde en çok X ve gama ışınları kullanılmaktadır. X ışınları, elektronların bir engele çarptırılması sonucu elde edilir. Elektron kaynağından çıkan elektronlara hızlandırılarak kinetik enerji kazandırılır ve ardından bir engele çarptırılır. Bu çarpışma sonucu ortaya çıkan enerjinin %99 u ısı enerjine %1'i X ışınına dönüşür (Yıldırım, 2015).

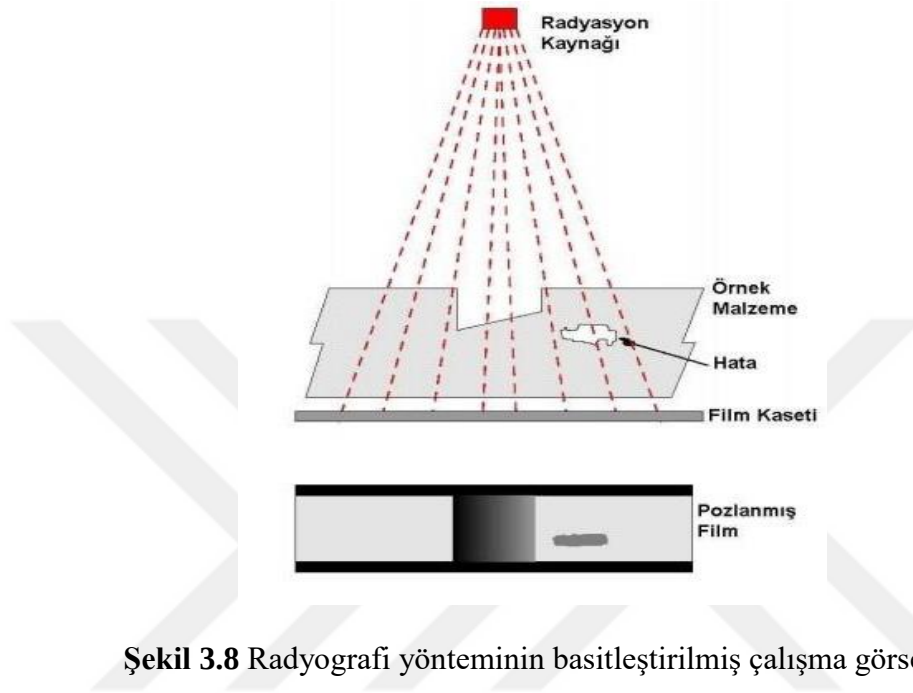
Gama ışınları radyoaktif izotop çekirdeklerinin bozunması ile oluşur. En düşük elektromanyetik dalga boyuna sahip olan gama ışınları, aynı zamanda en yüksek enerjiye sahip ışın olarak bilinmektedir (Şekil 3.7). Bu yönüyle X ışınından daha güçlüdür. Diğer yandan insan sağlığına daha zararlıdır.



Şekil 3.7 Elektromanyetik spektrum

Radyasyon ışınları malzemenin bünyesine nüfuz ederek malzemenin içyapısı ile ilgili bilgi sağlamaktadır. Radyasyona maruz bırakılan malzemenin özelliğine göre ışınlar belli oranlarda enerjilerini kaybederek malzemeden ayrılmaktadırlar. Söz konusu ışınlar, şiddetlerine bağlı olarak test malzemesinin arka yüzeyine yerleştirilen film tabakasının üzerinde kararmalar oluşturmaktadırlar. Film

tabakasının üzerinde oluşan kararmalar malzeme bünyesinde bulunan süreksizliklerin iki boyutlu geometrik şekilleridir. Süreksizliğin yoğunluğu ne kadar az ise ışınlar o derece az emilirler ve film tabakasına koyu renk leke bırakırlar. Süreksizliğin yoğunluğu ne kadar fazla ise de ışınlar film tabakasında o derece açık renk leke bırakırlar (Şekil 3.8).

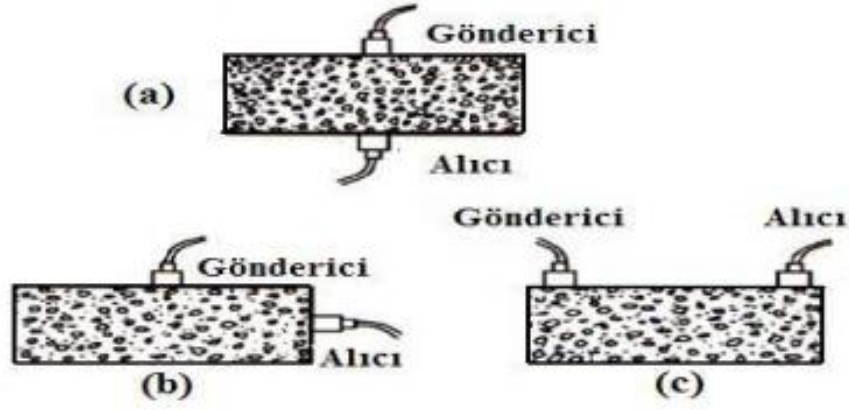


Şekil 3.8 Radyografi yönteminin basitleştirilmiş çalışma görseli

Günümüzde radyografi yönteminin teste tabi tutulan malzemeye zarar vermeden tespit yapma imkânı sunması nedeniyle tarihi eser restorasyonunda daha çok da taşınır kültür varlıklarının konservasyonuna yönelik çalışmalarda kullanımı yaygınlaşmıştır.

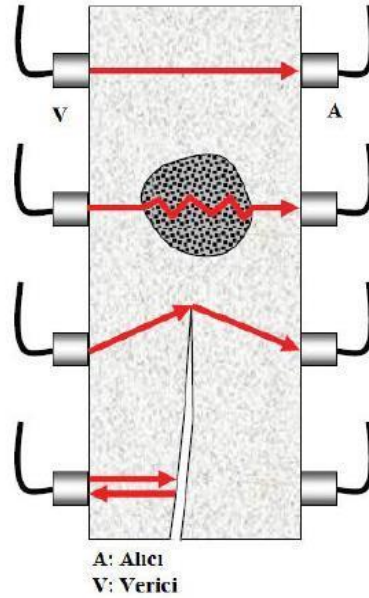
3.2.4 Ultrasonik Dalga Hızı

Ultrasonik dalgaların yapı bünyesinde zaman içerisinde kat ettiği mesafeye göre test malzemesinde yer alan süreksizliklerin tespiti mümkün olmaktadır. Yöntem temel olarak bir verici ve bir alıcı probtan oluşmaktadır. Çalışma prensibi verici probtan gönderilen ses dalgasının alıcı proba yansıma süresinin hesabına dayanmaktadır. Söz konusu problemler test numunesinin yüzeyine üç farklı şekilde konumlandırılabilir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 a) Doğrudan b) Yarı doğrudan c) Yüzeyden iletim (ktu.edu.tr, 20224)

Ultrasonik dalgaların en hızlı ilerlediği ortam malzemenin en yüksek yoğunluğa sahip olduğu ortamdır. Örneğin verici proptan çıkan ve beton numunesi bünyesinde yer alan yoğunluğu betona göre daha düşük bir süreksizliğe denk gelen ses dalgasının alıcı proba ulaşma süresi uzayacaktır. Bir kısım ses dalgası ise süreksizlikten yansıyarak geri dönmektedir. Geri dönen ses dalgalarının kat ettiği mesafeler üzerinden yapılan hesaplara numunenin bünyesinde yer alan kusurların konumları tespit edilebilmektedir (Binda vd., 2000) (Şekil 3.10).



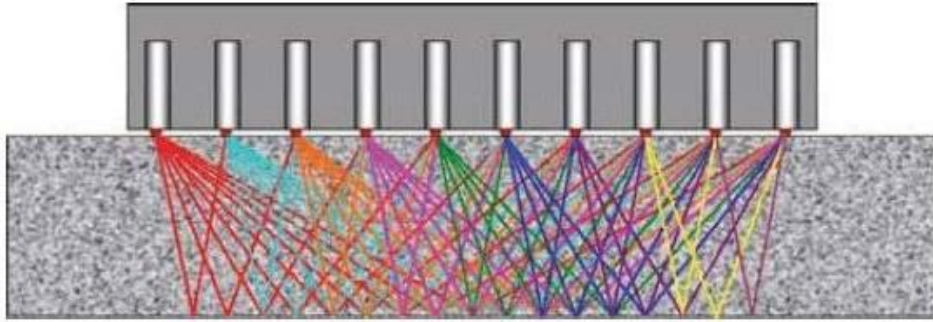
Şekil 3.10 Ultrasonik dalga hızı yöntemiyle süreksizliklerin tespiti
(insapedia.com, 2024)

Homojen bir test numunesinin bünyesinde ilerleyen ses dalgasının geri dönüş hızından numunenin derinliği de bu yöntem ile hesaplanabilmektedir. Ayrıca söz

konusu yöntem ile betonun kalitesi de dolaylı yoldan tespit edilebilmektedir. Beton bünyesinde ilerleyen ses dalgasının hızı beton yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Ses dalgası ne kadar hızlı ilerliyorsa betonun yoğunluğu dolayısıyla mukavemeti o derece yüksektir.

3.2.5 Ultrasonik Tomografi

Tomografi kelimesi tomo ve grafi sözcüklerinden meydana gelmektedir. Tomo kelime anlamı olarak kesit, grafi ise görüntü demektir. Tomografi yöntemi de ultrasonik dalga hızı yönteminde olduğu gibi ses dalgalarından faydalanır ve test numunesinin iki boyutlu kesit görüntüsünü ortaya çıkartır. (Peker, 2019). Ultrasonik dalga hızı yönteminden farkı tek bir alıcı ve tek bir verici prob ile çalışmak yerine birden fazla probtan faydalanılır (Şekil 3.11). Cihazdan cihaza prob sayısı değişmekle birlikte genellikle cihazlarda 24 ila 48 prob bulunmaktadır. Yöntemin ultrasonik dalga hızına göre avantajı sahip olduğu çok sayıda prob sayesinde test numunesine ait çıkarılan kesitleri birleştirerek üç boyutlu görüntü ortaya koyabilmesidir (Pekmezci vd., 2019).



Şekil 3.11 Ultrasonik tomografi yönteminde ses dalgalarının iletilmesi (Popovics, vd., 2017)

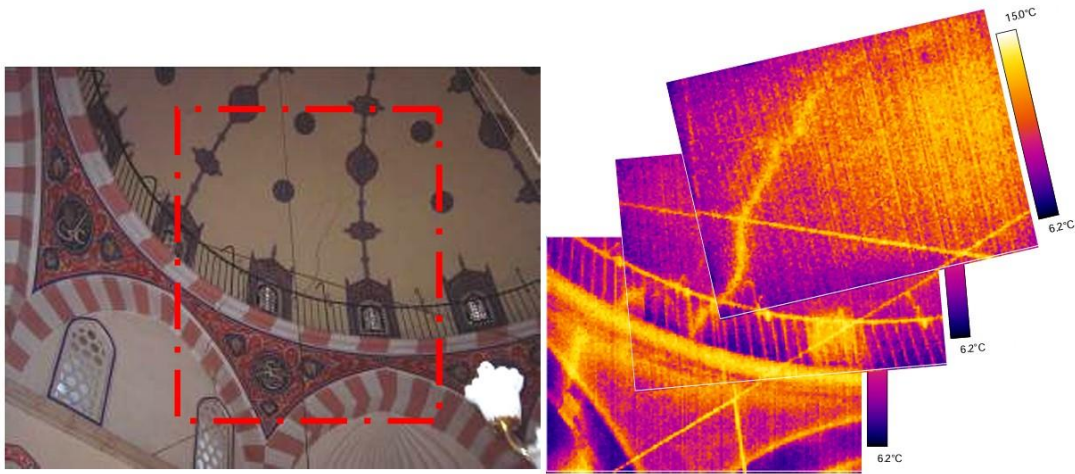
Ultrasonik tomografi yöntemi ile betonarme öğelerin kalınlıkları, donatıları ve betonarmede bulunan kusurlu bölgelerin konum ve kesitleri iki ve üç boyutlu olarak tespit edilebilmektedir. Tespitlerin doğruluğu yöntem sırasında düşük frekans kullanımı ile doğru orantılıdır. Kullanılan ses dalgasının frekans değeri ne kadar düşükse tespit o derece hassas ölçülerde gerçekleştirilmektedir (Peker & Pekmezci, 2022).

3.2.6 Termografi

Kızıl ötesi elektromanyetik dalgalar ilk olarak 1800 yılında William Herschel tarafından keşfedilmiştir. 1900’lü yıllarda askeri amaçlı kullanılmaya başlanılmıştır. Günümüzde termografinin tarım, sanayi, sağlık, askeri, yapı denetimi alanları başta olmak üzere geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır (Kaplan vd., 2016).

Termografi yöntemi ile cisimlerin yaydığı kızıl ötesi radyasyon görüntüye dönüştürülerek gözle görülebilir hale getirilmektedir. Söz konusu kızıl ötesi radyasyonun dalga boyu yaklaşık 7-14 μm aralığında olup insan gözünün algılayamayacağı elektromanyetik dalga boyu bant aralığındadır (Bayraktar & Kishali, 2017).

Termografi yöntemi ile tarihi eserlerin bünyesinde oluşan hasarlarının tespiti gerçekleştirilebilmektedir. Tarihi eserin yapımında kullanılan malzemelerin (taş, tuğla, harç, demir) yüzeylerinden yansıttıkları farklı sıcaklık dereceleri nedeniyle yöntem başarı sağlamaktadır (Binda vd., 2000) (Şekil 3.12).



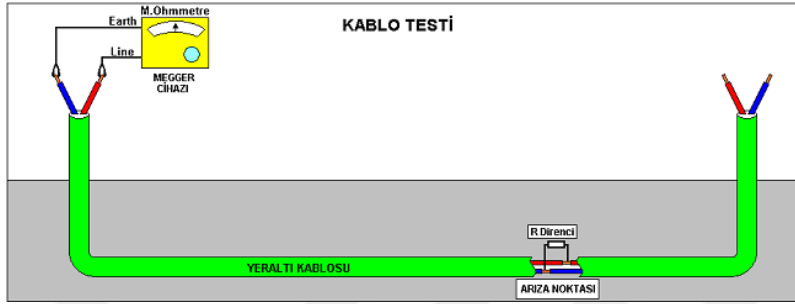
Şekil 3.12 Kubbe oluşun çatlağın termal kamera ile tespiti (Akveren, 2010)

Yöntemin tahribatsız tespit yapma imkânı sunması tarihi eserlerin restorasyonu sırasında kullanımını avantajlı kılmaktadır. (Bayraktar & Kishali, 2017).

3.2.7 Darbe Yansıma

Darbe yasıma yöntemi, elektrik kablolarındaki arızaların tespiti amacıyla geliştirilmiş bir yöntemdir. Yer altı ve yer üstü elektrik kablolarında oluşun

temassızlık, ezilme, nem alma, kısa devre gibi arızalar söz konusu yöntem ile başarı ile tespit edilebilmektedir. Temelde yöntem kablo üzerinden gönderilen darbenin, kablo üzerinde oluşan empedans değişiminde tamamen ya da kısmen yansması üzerinden yapılan hesaba dayanır. Empedansın değiştiği noktada kabloda arıza olduğu belirlenir ve bu arızanın çeşidi cihaz ekranına yansır (Clegg, 1993) (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 Darbe yansıma yöntemi ile yer altı kablo arızası tespiti (kontrolkalemi, 2024)

Bu yöntemde darbenin kablo üzerindeki yayılma hızı sabit kabul edilmektedir. Darbenin kabloya verildiği andan itibaren yansımaya kadar geçen süre üzerinden yapılan hesap ile kabloda arızanın bulunduğu konum belirlenmektedir (Turan, 2009).

Darbe yansıma yöntemi tarihi eser bünyesinde bulunan demir elemanların tespiti amacıyla çalışma kapsamında ilk defa sahada denenmiştir. Yapılan saha çalışmalarında taşıyıcı demir elemanların uzunlukları, olası kopuklukları ya da birleşim noktaları tespit edilmeye çalışılmıştır.

3.2.8 Videoskop

Videoskop 20. yüzyılın ortalarında Narinder Kapany ve Brian O'Brien tarafından icat edilmiştir. İlk modeli oldukça büyük olması nedeniyle kullanım alanı kısıtlı kalmıştır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte videoskop modelleri giderek küçülmüştür. Günümüzde askeriye ve sanayi endüstri alanı başta olmak üzere geniş bir kullanım alanı vardır.

Videoskop, tarihi eserlerde de ulaşılamayan bölgelerde bulunan malzemelerin cinslerinin, boyutlarının ve durumlarının tespitinde kullanılan tahribatsız muayene

yöntemlerinden biridir (Ahunbay vd., 2017) (Şekil 3.14). Özellikle diğer hasarsız muayene yöntemlerini desteklemek amaçlı kullanılmaktadır.



Şekil 3.14 Tarihi yapıda endoskopi uygulaması (Ahunbay vd., 2017)

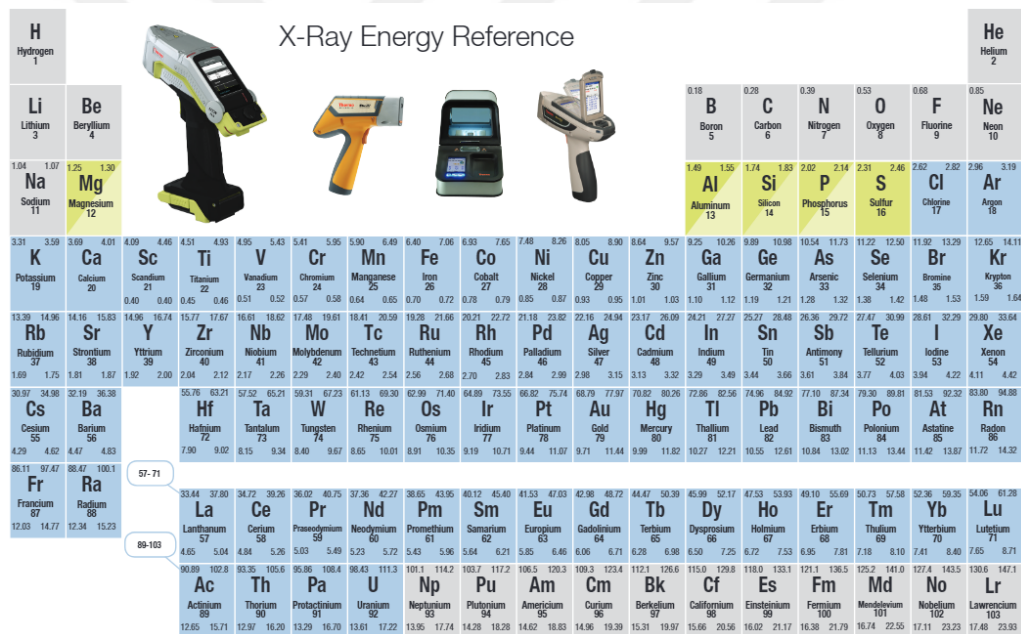
Kullanılacak videoskop kameranın çapı yapıya zarar vermekle doğru orantılı olacağı için olabildiğince ufak kamera çaplı bir cihaz seçimi tarihi eserin korunması için önem arz etmektedir. Taşların birbirlerine bağlandığı derz aralarından açılan bir santimetre çapını geçmeyen delikler içinden sürülen kamera ile duvar bünyesinde yer alan demir elemanların görüntüsünün alınması mümkün olmaktadır.

3.2.9 XRF (X-Işını Floresan Spektrometrisi)

Taşınabilir X-ışını floresan spektrometresinden (XRF) 1976 yılından beri saha uygulamalarında faydalanılmaktadır. Taşınabilir olması, kolay uygulama ve anında sonuç çıktılarını sunması gibi avantajları sayesinde yöntem son yıllarda karakterizasyon çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle temassız uygulama sunması, kültür varlıkları üzerinde yapılan çalışmalarda XRF yöntemini tercih sebebi kılmaktadır (Işık, 2018).

Yöntemin temelinde test malzemesine kaynaktan x ışınları gönderilir ve malzemedeki elektronların yer değiştirmesi sağlanır. X ışınlarını absorbe eden elementler enerji kaybına uğrar ve kendi karakteristik x ışınlarını yayarlar.

Taşınabilir X-ışını floresan spektrometresi cihazlarının x ışını üreten tüplerinin güçlerine bağlı olarak atom numarası 11'den büyük elementlerin analizi yapılabilmektedir (Yıldız Temur, 2019) (Şekil 3.15). Bu durum tarihi eser bünyesinde yer alan taşıyıcı dövme demir elemanların tespiti yönünden bir dezavantajdır. Tarihi eserlerde kullanılan taşıyıcı dövme demir elemanların içeriğinin %99'undan fazlasını Fe (demir) elementi oluşturmaktadır. Geri kalan %1'lik kısmın büyük bir bölümünü ise C (karbon) elementinden oluşmaktadır. Dövme demir içreğinde en fazla orana sahip ikinci element olan karbon atom numarasının 6 olması nedeniyle XRF cihazı ile tespit edilememektedir.

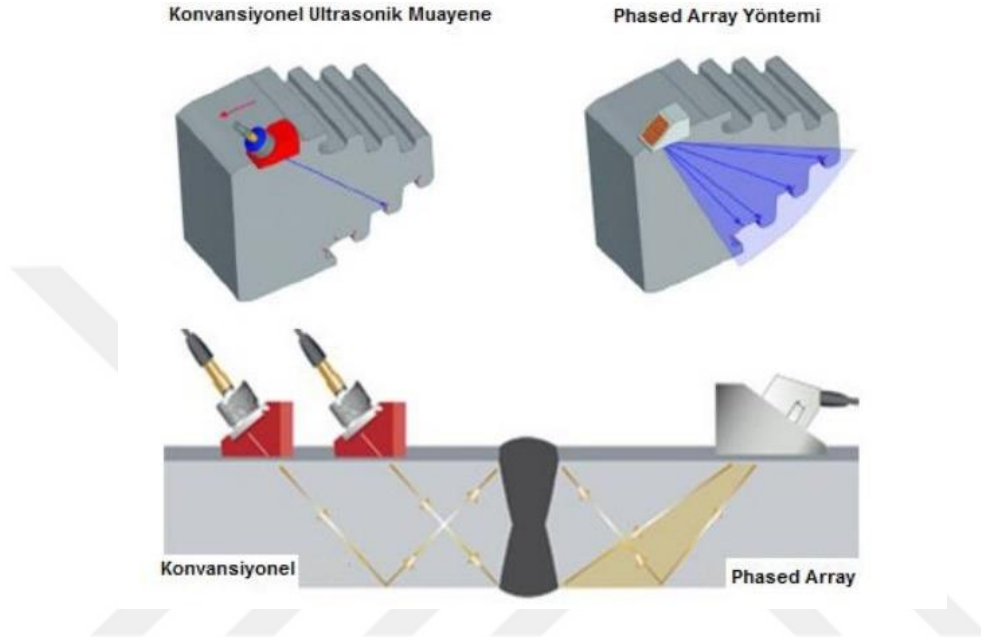


Şekil 3.15 XRF yöntemi ile tespit edilebilen sarı ve mavi işaretli elementler

3.2.10 Phased Array

Teknolojide yaşanan gelişmeler ile birlikte konvansiyonel probalar yerine phased array muayene yönteminde olduğu gibi çok kristalli probalar kullanılmaya başlanmıştır. Phased array yöntemi ilk olarak 1980’li yıllarda tıp alanında kullanılmıştır. Daha sonra endüstri alanında tahribatsız muayene yöntemi olarak kullanılmaya başlanmıştır (Çelik, 2013).

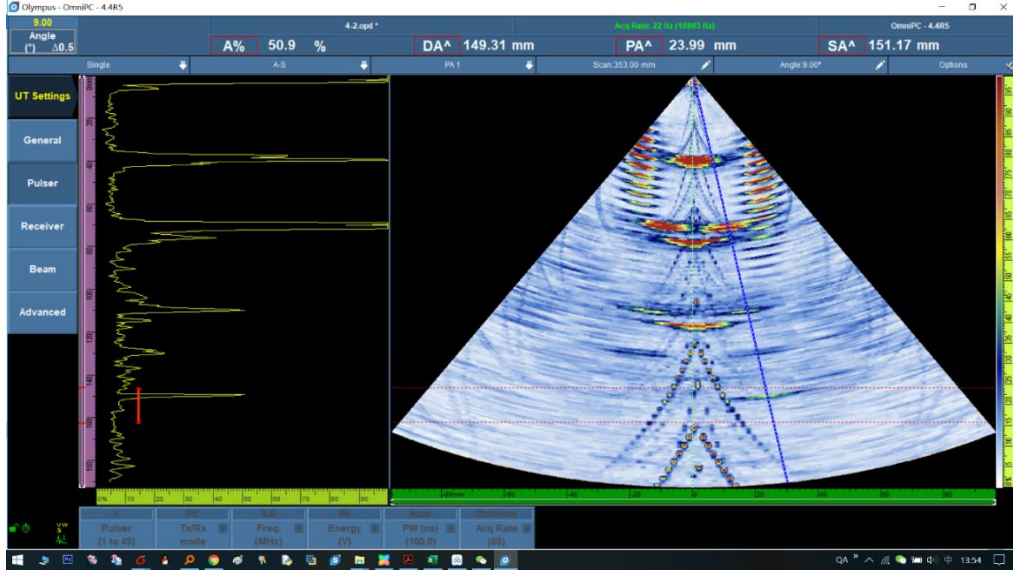
Yöntemde kullanılan problarda yer alan kristal sayısı 16 ila 256 adet arasında değişmektedir. Problarda yer alan kristallerin her birinden aynı anda ya da birbiri ardına gönderilen ses dalgalarının açıları ve mesafeleri özel yazılım sayesinde kontrol edilerek test numunesinin istenilen bölgesi taranabilmektedir (Şekil 3.16). Probların ucuna takılan takozlar sayesinde her formda numunenin süreksizlikleri tespit edilebilmektedir (Yılmaz, 2010).



Şekil 3.16 Konvansiyonel ultrasonik muayene ve phased array yöntemi

Birden çok ses dalgasının senkrona şekilde test numunesine nüfuz ederek tarama yapması sonucu elde edilen çıktı radar ve ultrasonik tomografi yönteminde olduğu gibi üç boyutludur. Test numunesinin yüzeyinde veya içerisinde bulunan bir mm çapındaki süreksizliklerin dahi konumları ve kesitleri phased array muayene yönteminin yüksek ayırt etme gücü sayesinde net bir şekilde tespit edilebilmektedir (Özbek Yaralı & Emre, 2019) (Şekil 17).

Tarihi yapıların bünyesindeki strüktürel demir elemanların içerdiği süreksizlikler, phased array yöntemi sayesinde yerinde ve tahribat vermeden tespit edilebilmektedir. Ayrıca eserlerde güçlendirme amaçlı kullanılan gergi, çekme çemberi gibi yapıya sonradan eklenen günümüz demir elemanlarının içerdikleri kusurlarda söz konusu yöntem ile tespit edilebilmektedir.



Şekil 3.17 Demir içerisinde yer alan boşlukların tespiti (ndt.net, 2024)

ARAŞIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu kısım tarihi yapılardan alınan dövme demir numunelerin üzerinde yapılan laboratuvar çalışmalarını ve tahribatsız muayene yöntemleri ile sahada yapılan araştırmaları içermektedir.

4.1 Laboratuvar Çalışmaları

Tez çalışması kapsamında Klasik Osmanlı Dönemi anıt mimarisinde kullanılan dövme demir elemanların malzeme özelliklerini belirlemek için bir takım laboratuvar testleri gerçekleştirilmiştir. Dönemin malzeme özelliğini doğru yansıtabilmek adına olabildiğince çok sayıda yapıdan numune toplanmıştır. Sultan Ahmet Camii, Süleymaniye Darüşşifası, Selimiye Camii, Valide Sultan Camii, Beyazıt Külliyesi, Rüstem Paşa Camii, Uzun Kemer yapısının daha önce müdahale görmediği düşünülen kısımlarından mümkün mertebe özgün olduğuna kanaat getirilen numuneler temin edilmiştir (Tablo 4.1). Temin edilen numunelerin laboratuvar testleri Matil A.Ş. bünyesinde bulunan TS EN ISO/IEC 17025 standardına göre akredite olan laboratuvarda gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.1 Numune alınan yapılar ve mahalleri

Numune Alınan Yapı	Numunenin Alındığı Mahal
Sultan Ahmet Camii	Revaklı Avlu Kubbe Kasnağı
Rüstem Paşa Camii	Şadırvan Avlusu Duvar Temeli
Valide Sultan Camii	Ana Kubbe Kasnağı
Süleymaniye Darüşşifası	Revaklı Avlu Sütun Başı
Uzun Kemer	Taşıyıcı Ayak
Beyazıt Medresesi	Kubbe kasnağı
Selimiye Camii	Ana Kubbe Kasnağı

4.1.1 Numunelerin Fiziki Durumları

Bu bölümde Sultan Ahmet Camii, Süleymaniye Külliyesi, Selimiye Camii, Valide Sultan Camii, Beyazıt Külliyesi, Rüstem Paşa Camii, Uzun Kemer yapılarından temin edilen numunelerin boyutları belirlenmiştir. Selimiye Camii, Rüstem Paşa Camii ve Valide Sultan Camii özelinde numunelerinin fiziki durumları detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Selimiye Camii

Yüzeyde heterojen bir kalınlık dağılımı gözlemlenmiştir. Girinti ve çıkıntılar, çentik izleri, yırtıklar, korozyon oluşumları ve renk farklılıkları tespit edilmiştir. Yüzeyde beyazımsı, grimsi, kahverengi ve daha koyu kahverengi olmak üzere çeşitli renk farklılıkları gözlemlenmiştir. Uç kısımlarında harç birikintileri mevcuttur. Yüzey genelinde yoğun bir oksit tabakası bulunmakta olup korozyona bağlı çukurlaşmalar gözlemlenmiştir. Şekil verme amacıyla gerçekleştirilen dövme işlemi neticesinde kalınlık farklılıkları meydana gelmiştir. Dövme işlemi ile mikroyapıda değişimler meydana gelmiş olabileceği düşünülmektedir. Yüzeyde kalkmış ve dökülmeye meyilli oksit tabakaları görülmektedir. İç kısımda yırtıklar bulunmaktadır. Elle temas edildiğinde yüzeyin oldukça pürüzlü bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.1 Selimiye Cami'ne ait numune

Şekil 4.1'de yer alan kenet numunesi Selimiye Camii restorasyon sürecinde camii ana kubbe kasnağından alınmıştır. Kenet numunesinin boyu yaklaşık 25 cm civarındadır. Numuneye ait en ve kalınlık ölçüm değerleri Tablo 4.2'de yer almaktadır.

Tablo 4.2 Selimiye Camii numune ölçümü (mm)

En Boyut Ölçümü				
Ölçüm Alınan Bölge	Dar Kesit	Ortalama	Geniş Kesit	Ortalama
1	27,03	27,51	30,95	30,51
2	26,62		30,63	
3	28,88		29,96	
Kalınlık Boyut Ölçümü				
Ölçüm Alınan Bölge	Dar Kesit	Ortalama	Geniş Kesit	Ortalama
1	10,48	10,47	11,09	11,19
2	10,53		11,11	
3	10,42		11,38	

Rüstem Paşa Camii

Kenet numunesinin uç kısımları yaklaşık olarak 4,5 ve 5,5 santimetre civarındadır. 5,5 cm olan uç kısmında, 2 cm kalınlığında harç birikintisi bulunmaktadır. Söz konusu harç hafif turuncu bir renge sahiptir. Harç bölgesinde parlaklık gözlemlenmektedir. Diğer uçta da harç kalıntıları bulunmakta olup iç kısımda birikintilere rastlanmıştır. Yüzeyde belirgin renk farklılıkları gözlemlenmiştir; koyu kahverengi oksit tabakası ve beyaz harç bölgesi gibi. Çukurlaşma korozyonu daha az görülmektedir. İç kısımda pürüzlü bir yüzey mevcuttur. Yüzey genelinde yoğun bir oksit tabakası bulunmaktadır. Dövme işlemi nedeniyle kalınlık farklılıkları oluşmuştur.



Şekil 4.2 Rüstem Paşa Cami'ne ait numune

Şekil 4.2’de yer alan kenet numunesi Rüstem Paşa Camii restorasyon sürecinde camii şadırvanı avlu duvarı temelinden alınmıştır. Kenet numunesinin boyu yaklaşık 25 cm civarındadır. Numuneye ait en ve kalınlık ölçüm değerleri Tablo 4.3’te yer almaktadır.

Tablo 4.3 Rüstem Paşa Camii numune ölçümü (mm)

En Boyut Ölçümü				
Ölçüm Alınan Bölge	Dar Kesit	Ortalama	Geniş Kesit	Ortalama
1	23,68	24,09	25,83	25,83
2	24,23		25,54	
3	24,36		26,12	
Kalınlık Boyut Ölçümü				
Ölçüm Alınan Bölge	Dar Kesit	Ortalama	Geniş Kesit	Ortalama
1	13,14	13,55	17,26	16,79
2	14,17		16,50	
3	13,34		16,61	

Valide Sultan Camii

Yüzeyin üstten görünümünde yeşil ve beyaz renkler gözlemlenmektedir. Yanlar ve alt kısımda kahverengi ve beyaz renkler ile çukurlaşma korozyonu mevcuttur. Yüzeyde engebeli bir yapı bulunmaktadır. İç kısımda oyuklar gözlemlenmiştir. Yüzeyden beyaz tozların döküldüğü görülmektedir. Dövme işlemi nedeniyle kalınlık farklılıkları meydana gelmiş olup bu dövme işleminin mikroyapısal farklılıklara yol açmış olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.3 Valide Sultan Cami'ne ait numune

Şekil 4.3'te yer alan kenet numunesi Valide Sultan Camii restorasyon sürecinde ana kubbe kasnağından alınmıştır. Kenet numunesinin boyu yaklaşık 35 cm civarındadır. Numuneye ait en ve kalınlık ölçüm değerleri Tablo 4.4'te yer almaktadır.

Tablo 4.4 Valide Sultan Camii numune ölçümü (mm)

En Boyut Ölçümü				
Ölçüm Alınan Bölge	Dar Kesit	Ortalama	Geniş Kesit	Ortalama
1	28,19	28,07	32,14	32,32
2	28,61		31,60	
3	27,42		33,23	
Kalınlık Boyut Ölçümü				
Ölçüm Alınan Bölge	Dar Kesit	Ortalama	Geniş Kesit	Ortalama
1	8,67	8,50	10,99	10,64
2	8,46		10,72	
3	8,39		10,21	

Beyazıd Medresesi

Şekil 4.4'te yer alan kenet numunesi Beyazıd Medresesi restorasyon sürecinde kubbe kasnaklarında yapılan çalışma sırasında temin edilmiştir. Kenet numunesinin boyu yaklaşık 30 cm civarındadır. Numuneye ait en ve kalınlık ölçüm değerleri Tablo 4.5'te yer almaktadır.



Şekil 4.4 Beyazıt Medresesi'ne ait numune

Tablo 4.5 Beyazıt medresesi numune ölçümü (mm)

En Boyut Ölçümü				
Ölçüm Alınan Bölge	Dar Kesit	Ortalama	Geniş Kesit	Ortalama
1	30,90	30,50	32,88	32,88
2	30,50		32,65	
3	30,12		33,11	
Kalınlık Boyut Ölçümü				
Ölçüm Alınan Bölge	Dar Kesit	Ortalama	Geniş Kesit	Ortalama
1	3,67	3,90	6,83	6,66
2	3,74		6,15	
3	4,30		7,00	

Uzun Kemer

Şekil 4.5'te yer alan kenet numunesi Uzun kemer restorasyon sürecinde kemer taşıyıcı ayaklarından alınmıştır. Kenet numunesinin boyu yaklaşık 30 cm civarındadır. Numuneye ait en ve kalınlık ölçüm değerleri Tablo 4.6'da yer almaktadır.



Şekil 4.5 Uzun Kemer'e ait numune

Tablo 4.6 Uzun kemer numune ölçümü (mm)

En Boyut Ölçümü				
Ölçüm Alınan Bölge	Dar Kesit	Ortalama	Geniş Kesit	Ortalama
1	28,11	28,69	30,75	29,65
2	28,97		28,87	
3	28,99		29,33	
Kalınlık Boyut Ölçümü				
Ölçüm Alınan Bölge	Dar Kesit	Ortalama	Geniş Kesit	Ortalama
1	12,63	12,47	13,34	14,17
2	12,17		14,21	
3	12,62		14,97	

Süleymaniye Darüşşifası



Şekil 4.6 Süleymaniye Darüşşifası'na ait numune

Şekil 4.6’de yer alan demir kuşaklama numunesi Süleymaniye Darüşşifası restorasyon sürecinde revaklı avlu sütun başından alınmıştır. Demir numunesinin boyu yaklaşık 60 cm civarındadır. Numuneye ait en ve kalınlık ölçüm değerleri Tablo 4.7’de yer almaktadır.

Tablo 4.7 Süleymaniye Darüşşifası numune ölçümü (mm)

En Boyut Ölçümü				
Ölçüm Alınan Bölge	Dar Kesit	Ortalama	Geniş Kesit	Ortalama
1	36,78	37,40	37,14	37,61
2	37,51		37,30	
3	37,93		38,41	
Kalınlık Boyut Ölçümü				
Ölçüm Alınan Bölge	Dar Kesit	Ortalama	Geniş Kesit	Ortalama
1	12,61	12,66	13,45	13,09
2	12,66		12,95	
3	12,72		12,87	

Sultan Ahmet Camii

Şekil 4.7’de yer alan demir kuşaklama numunesi Sultan Ahmet Camii restorasyon sürecinde revaklı avlu kubbe kasnaklarında yapılan çalışma sırasında alınmıştır. Demir numunesinin boyu yaklaşık 60 cm civarındadır. Numuneye ait en ve kalınlık ölçüm değerleri Tablo 4.8’de yer almaktadır.



Şekil 4.7 Sultan Ahmet Cami’ne ait numune

Tablo 4.8 Sultan Ahmet Camii numune ölçümü (mm)

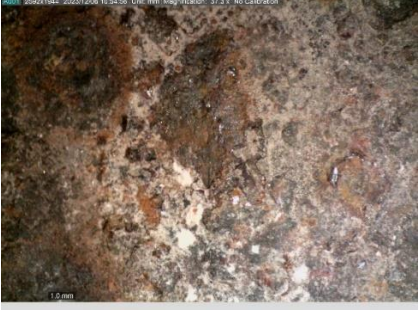
En Boyut Ölçümü				
Ölçüm Alınan Bölge	Dar Kesit	Ortalama	Geniş Kesit	Ortalama
1	36,01	36,96	41,03	40,39
2	37,42		39,10	
3	37,45		41,06	
Kalınlık Boyut Ölçümü				
Ölçüm Alınan Bölge	Dar Kesit	Ortalama	Geniş Kesit	Ortalama
1	13,67	13,55	12,01	13,82
2	12,50		13,45	
3	14,48		16,02	

4.1.2 Makroyapı İncelemeleri

Makroyapı incelemeleri kapsamında sahadan alınan numunelerin belirli bölgelerinden örnekler alınmıştır. Bu örneklerin üst yüzeyleri stereo mikroskop kullanılarak görüntülenmiş ve analiz edilmiştir. Tüm numunelerden elde edilen örneklerin karşılaştırmalı analizi amacıyla stereo mikroskopta yaklaşık 20x büyütme ile elde edilen makroyapı yüzey görüntüleri Tablo 4.9’da verilmiştir.

Stereo mikroskop kullanılarak alınan numune yüzey görüntülerinde demirin oksitlenmesi sonucunda oluşan demir oksit tabakası tespit edilmiştir. Bu tabaka üzerinde harçlar ve yağmur gibi çevresel faktörler nedeniyle meydana gelen renk değişimleri gözlemlenmiştir. Tüm numune yüzeylerinde oluşan demir oksit tabakalarının yüzeyde bir kaplama tabakası oluşturduğu saptanmıştır. Yüzeylerin pürüzlü ve oyuklu olduğu belirlenmiş olup yüzeydeki çukurların sıcak dövme sırasında demir oksit tabakalarının kopması, yıllara bağlı oksitlenme sonucu oluşan tabakanın kopması ya da harç veya taş vb. tarafından koparılması sonucu meydana geldiği düşünülmektedir.

Tablo 4.9 Stereo mikroskop üst yüzey makroyapı görüntüleri

Selimiye Camii			Uzun Kemer
Rüstem Paşa Camii			Süleymaniye Darüşşifası
Valide Sultan Camii			Sultan Ahmet Camii
Beyazıd Medresesi			

4.1.3 Makro Sertlik Testleri

Makro sertlik testleri Bulut Makine firmasına ait UMS model cihazı kullanılarak ISO 6507-1 standardına göre HV5 Vickers sertlik metoduyla gerçekleştirilmiştir. Tarihi yapılardan temin edilen demir elemanların dış yüzeylerinde önemli miktarda

demir oksit tabakası ve kirlilik bulunduğundan elemanların yüzey ve merkezinden örnekler alınarak bakalit numuneleri oluşturulmuştur. Makro sertlik testleri numunelerin parlatılan yüzeylerinde gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin yüzey ve merkezinden alınan makro sertlik test sonuçları Tablo 4.10'da verilmiştir.

Tablo 4.10 Makro sertlik ölçüm değerleri (yüzey ve merkez)

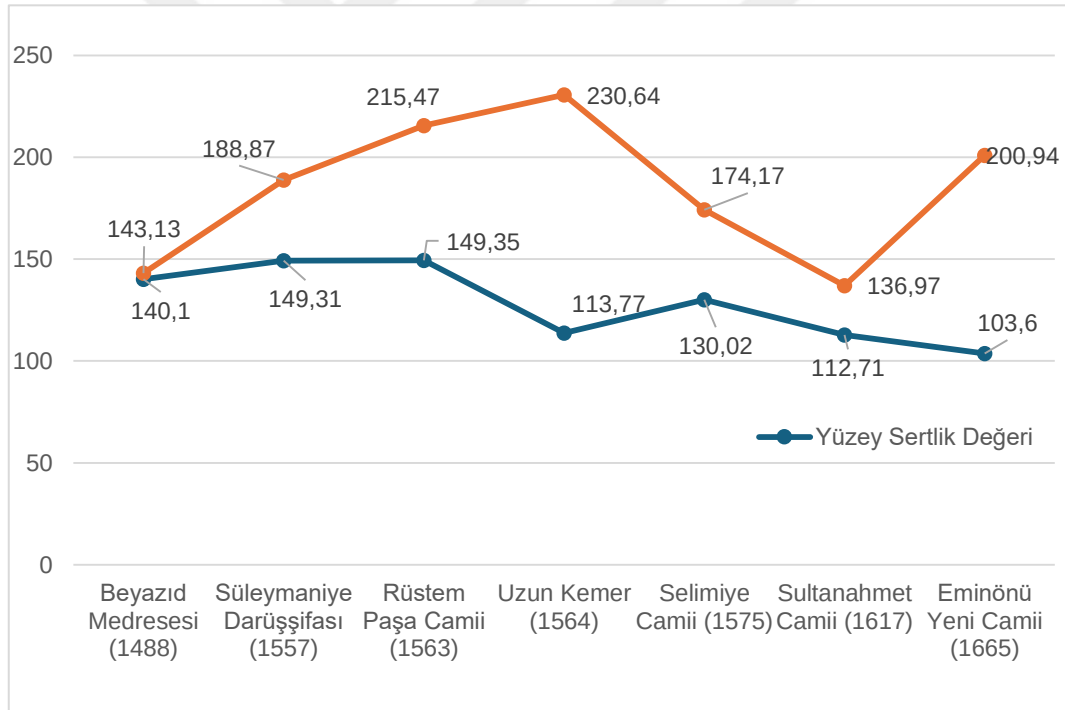
Numune Tipi	Ölçüm Sonuçları					Ortalama <i>HV5</i>
	1	2	3	4	5	
Selimiye Camii (Merkez)	228,66	172,25	172,25	161,50	160,37	174,17
Selimiye Camii (Yüzey)	216,76	109,28	90,62	120,36	113,11	130,02
Rüstem Paşa Camii (Merkez)	229,61	177,64	120,69	280,05	269,34	215,47
Rüstem Paşa Camii (Yüzey)	243,31	125,27	160,54	113,09	104,55	149,35
Valide Sultan Camii (Merkez)	294,48	233,47	161,81	151,54	163,38	200,94
Valide Sultan Camii (Yüzey)	112,20	102,18	93,49	108,69	101,46	103,60
Beyazıt Medresesi (Merkez)	160,26	114,28	136,68	152,93	151,90	143,13
Beyazıt Medresesi (Yüzey)	144,74	140,67	145,76	127,03	142,31	140,10
Uzun Kemer (Merkez)	187,81	129,11	171,51	304,11	360,65	230,64
Uzun Kemer (Yüzey)	151,72	105,96	104,56	104,93	101,68	113,77
Süleymaniye Darüşşifası (Merkez)	193,87	182,12	172,53	195,87	199,98	188,87
Süleymaniye Darüşşifası (Yüzey)	174,94	160,50	160,28	122,74	128,09	149,31
Sultanahmet Cami (Merkez)	151,49	158,75	122,71	115,90	136,00	136,97
Sultanahmet Cami (Yüzey)	103,77	98,46	106,21	121,69	133,41	112,71

Makro sertlik incelemesinde Beyazıt Medresesi'ne ait numune hariç bütün numunelerin yüzey ve merkezin farklı sertlik değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Numuneler yüzey bölgelerinde ferritik yapıya sahipken merkezlerinde perlit fazların bulunması makro sertlik değerleri arasında farklılıklara neden olmaktadır. Bütün numunelerin mikroyapı analizlerinde ana yapının ferrit / perlit olduğu varsayımıyla dövme demir numunelerinde makro

sertlik değerlerindeki ani düşüşlerin boşluklar ve inklüzyonlardan kaynaklandığı öngörülmektedir.

Tablo 4.11 Yüzey ve merkezlerin ortalama sertlik değerleri ve farkları

Makro Sertlik (HV 10)	Yüzey	Merkez	Fark
Selimiye Camii	130,02	174,17	44,15
Rüstem Paşa Camii	149,35	215,47	66,12
Valide Sultan Camii	103,6	200,94	97,34
Beyazıd Medresesi	140,1	143,13	3,03
Uzun Kemer	113,77	230,64	116,87
Süleymaniye Darüşşifası	149,31	188,87	39,56
Sultanahmet Cami	112,71	136,97	24,26

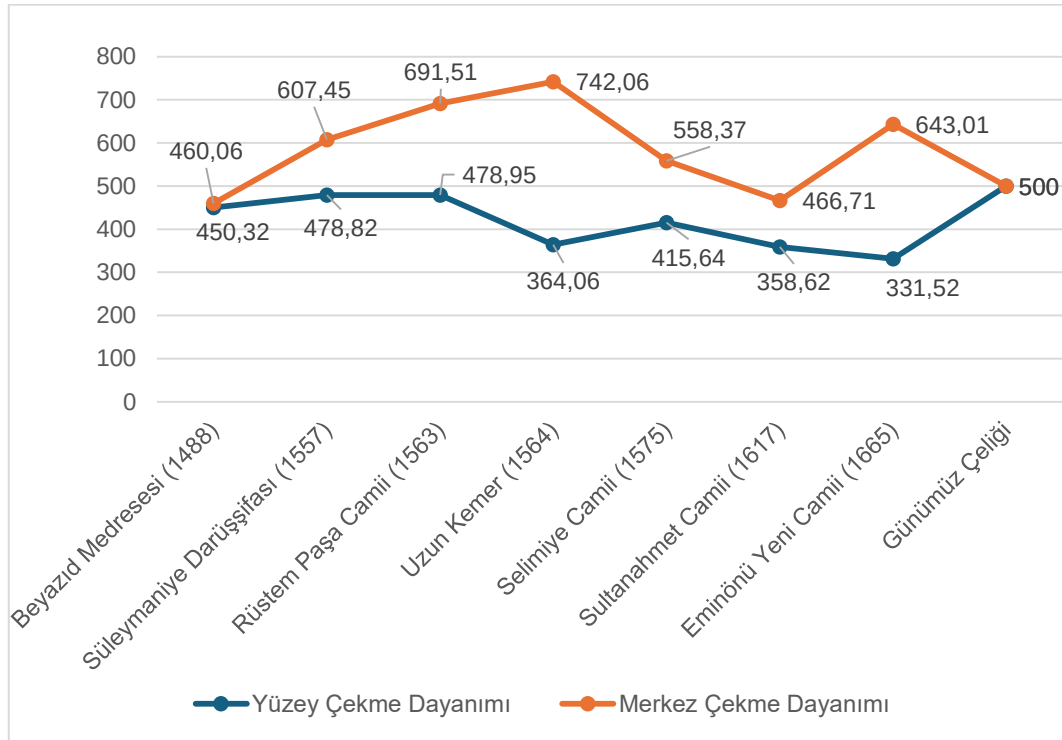


Şekil 4.8 Numunelerin yüzey ve merkez makro sertlik değerleri

Tablo 4.11 ve şekil 4.8’de yüzey ve merkezden alınan makro sertlik ölçümlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 4.8’de hazırlanan numune kesitlerinde farklı fazların ve boşlukların meydana getirdiği bantlaşmalar gözlemlenmektedir. Numune yüzey bölgelerinde sementasyon tabakasına benzeyen yapılar görülmesine

rağmen bu bölgelerin dövme esnasında kot farkı yaptığı ve bu nedenle karanlık alanların oluştuğu düşünülmektedir. Bu bölgelerde alınan sertlik değerlerine göre yüzey bölgelerinde oksidasyonla birlikte perlitik yapının azaldığı ve sertlik farkının ortaya çıktığı gözlemlenmektedir.

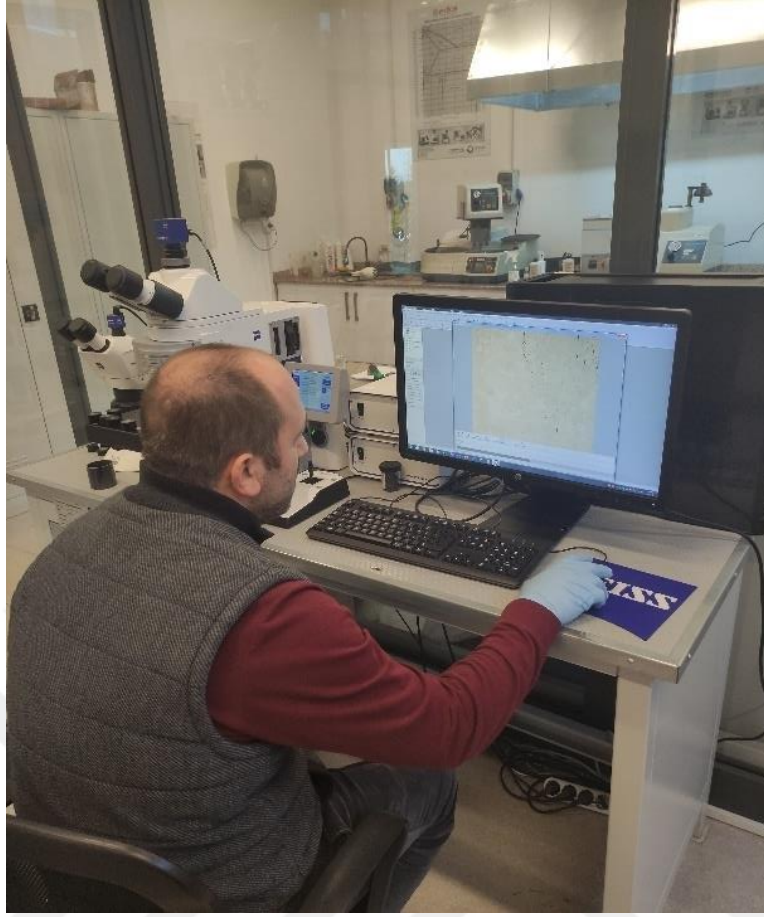
Yapılan sertlik ölçümlerinden alınan ortalama değerler ile EN ISO 18265 standardına göre çekme dayanımına dönüşüm yapıp tarihi yapılarda kullanılan demir elemanların çekme dayanımları hakkında bilgi sahip olunmuştur (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 Makro sertlik ölçüm değerlerine göre çekme dayanımı (MPa)

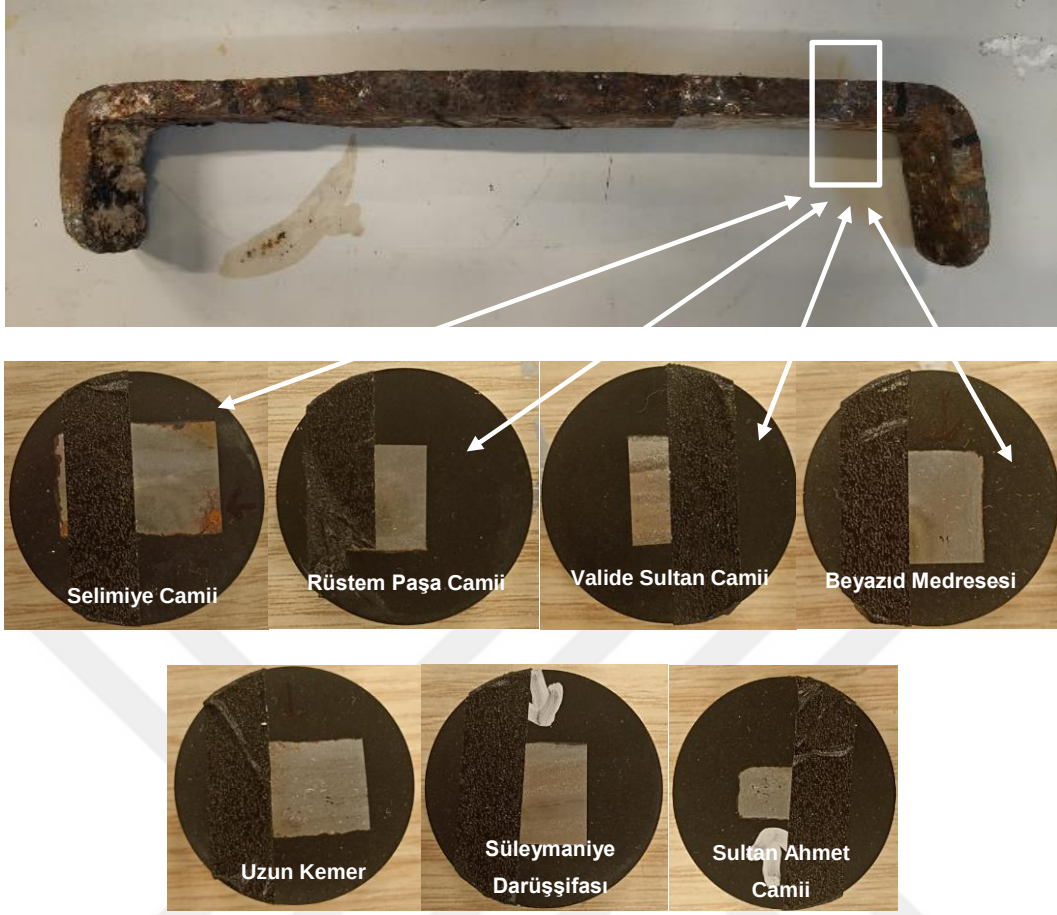
4.1.4 Mikroyapı İncelemeleri

Mikroyapı incelemeleri kapsamında her numunenin aynı bölgelerinden örnekler alınmıştır. Bu örnekler dilimlenerek kesilmiş ve sıcak bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numunelere önce kaba zımpara ve ardından parlatma işlemleri uygulanmıştır. Parlatılan numunelere %4'lük Nital çözeltisi içinde 12 saniye boyunca daldırma yöntemiyle dağlama yapılmıştır. Dağlanan numunelerin mikroyapı analizlerinde Carl Zeiss Axio Imager M2M model optik mikroskop kullanılmıştır. Numunelerin merkez ve kenar bölgelerinden 50x, 100x ve 200x büyütmelemlerde mikroyapı görüntüleri alınmıştır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 Mikroyapı görüntülerinin incelenmesi

Alınan görüntüler üzerinden numuneler dış yüzeyinden başlanarak diğer yüzeyine kadar taranmış olup numune kesiti boyunca her bölgenin görüntüsü alınmasa da incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Mikro yapı incelemelerinde ayrıca sıcak dövme yapılan malzemelerde tane boyutu değişimleri, inklüzyon analizleri ve alınan görüntülerde fazların ve boşlukların oranlarının tespiti için faz analizleri oranlaması yapılmıştır. Ayrıca mikroyapı testlerinde tespit edilen inklüzyonlar, boşluklar ve sıcak birleştirmeler SEM analizi ile detaylı olarak incelenmiştir. İncelemelerde kullanılan bakalit numuneleri Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Şekilde görülen kenet numunesi tüm örneklerin kenetlerin aynı bölgesinden alınarak incelendiğini göstermek amacıyla verilmiştir.



Şekil 4.11 Bakalite alınan numunelerin kesit görüntüleri.

Selimiye Camii

Alınan mikroyapı görüntülerinde ana yapının ferrit ve perlit fazlarından oluştuğu tespit edilmiştir. Tablo 4.11’de merkez bölgesinden alınan numunenin perlitik yapıda olduğu, Tablo 4.12’de kenar bölgesinin ise karbon (C) ile dövme yapıldığı için sementasyon tabakasına benzer bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Yapılan SEM analizlerinde bu bölgede karbon tespit edilmemiş olup sadece demir (Fe) tespit edilmiştir. Optik mikroskop altında yapılan aydınlatma ile bu bölgelerin ferritik yapıda olduğu ve yalnızca dövme işlemi nedeniyle yükseklik farkı gösterdiği belirlenmiştir.

Rüstem Paşa Camii

Mikroyapı incelemelerinde ana yapının ferrit ve düşük oranda perlit fazlarından meydana geldiği tespit edilmiştir. Rüstem Paşa Camii’nden alınan numunenin dövme işlemi nedeniyle dış yüzeye yakın bölgesinde kararma olduğu gözlemlenmiştir. Merkez bölgesinden alınan mikroyapı görüntülerinde çizgiler

tespit edilmiştir. Bu çizgilerin dövme ile birleştirmeden kaynaklandığı ve çizgilerin iki tarafındaki tanelerin farklı özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Tablo 13'te tanelerin farklı dizildiğini gösteren mikroyapı görüntüleri farklı büyütmelelerde verilmiştir. Tablo 4.14'te numuneden alınan 1000x büyütmedeki görüntüde demir oksit tabakasının üzerinde çatlakların bulunduğu ve bu çatlakların kopmaya hazır durumda olduğu görülmektedir. Tablo 4.15'te merkez bölgesinden alınan görüntülerde ise birleştirme bölgesinin olduğu ve bu bölgede yapılan element analizlerinde Fe ve O piklerinin tespit edildiği görülmüştür. Birleşim bölgesinde oksitlenme ile beraber demir oksit tabakasının oluştuğu belirlenmiştir. Alınan SEM-EDX analizleri de merkez bölgede demir oksit tabakasının varlığını kanıtlamıştır. Demir oksit tabakası dışında dövme yönünde uzayan inklüzyonlara yapılan analizlerde Ti, Ca, Al, Si ve O pikleri tespit edilmiştir. SEM-EDX element analizlerinde kalsiyum alümina silikat inklüzyonları ile birlikte TiO_2 inklüzyonlarının bir arada bulunduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, oksitlenmiş bölgelerde Cl elementi tespit edilmiş olup bu durumun korozyon ile birlikte kütle kaybını artırdığı düşünülmektedir. Rüstem Paşa Camii'nden alınan numunenin mikroyapısının homojen olmadığı çok sayıda inklüzyon içerdiği ve dövme işlemleri sırasında birleştirme yapıldığı tespit edilmiştir.

Valide Sultan Camii

Valide Sultan Camii'ne ait numune en küçük tane boyutuna sahip numunelerden biridir. Bu özelliğin numuneye yüksek mukavemet kazandırdığı öngörülmektedir. Yapılan mikroyapı analizlerinde yaklaşık %44 ferrit ve %56 perlit fazları içerdiği ve daha homojen bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Dövme işlemlerine bağlı olarak mikroyapı görüntülerinde kararmış bölgeler tespit edilmiştir. Sıcak dövme işlemlerinde soğumaya bağlı olarak perlit fazlarının heterojen bir dağılım sergilediği Tablo 4.13'te açıkça gözlemlenmektedir. Tablo 4.14'te 1000x büyütmede alınan SEM analiz görüntülerinde demir oksit tabakasında çatlak olmadığı gözlemlenmiştir. Yapılan SEM-EDX elementer analizinde Fe ve O pikleri tespit edilerek bu bölgede demir oksit tabakasının oluştuğu doğrulanmıştır. Demir oksit tabakası altında dövme işlemine bağlı olarak tanelerin yönlendiği tespit edilmiştir. Merkez bölgesine yapılan SEM-EDX analizlerinde ise yaklaşık 300 mikrondan daha uzun inklüzyonların bulunduğu ve dövme sırasında bu fazların

şekillendiği düşünülmektedir (Tablo 4.15). İnküzyon üzerinde yapılan SEM-EDX analizlerinde Ca, Al, Si ve Mg pikleri tespit edilmiştir. Bu analizler kalsiyum alüminyum silikat fazlarının oluşturduğu kompleks bir inküzyonun varlığını ortaya koymuştur. Ayrıca Ti, K ve P pikleri de tespit edilmiştir. DIN 50602 k2 sabitine göre yapılan inküzyon sayımlarında oksit inküzyonlarının en az olduğu numune olarak tespiti yapılmıştır. Ancak ana yapısı içinde yer alan ve 300 mikrondan daha büyük olması nedeniyle sayıma girmeyen inküzyonların numunenin yük altında performansının düşmesine neden olacağı düşünülmektedir.

Beyazıt Medresesi

Beyazıt Medresesi'nden alınan numune üzerinde yapılan mikroyapı incelemelerinde yapının %82 ferrit ve %18 perlit fazlarından oluştuğu belirlenmiştir. Ana yapı ferritik olup tane boyut numarası 6,5 ve ortalama tane boyutu 35,36 mikron olarak ölçülmüştür. Kaba taneli bir ferritik yapıya sahip olan numunede tane sınırlarında sıcak dövme sırasında oluşan çok sayıda demir oksitin dövme yönünde uzadığı tespit edilmiştir. Alınan mikroyapı görüntülerinde dövme yönünde uzamış olan inküzyon ve boşluklar Tablo 4.13'te gösterilmiştir. SEM analizlerinde kenar bölgede demir oksit tabakasına dik şekilde çatlak meydana geldiği tespit edilmiştir. SEM-EDAX analizinde Fe ve O elementleri tespit edilerek diğer örneklerde olduğu gibi demir oksit tabakasının oluştuğu görülmüştür. Tablo 15'te 1000x büyütmede alınan mikroyapı görüntüsünde demir oksit tabakası üzerinde yaklaşık 100 mikron boyutunda bir boşluk tespit edilmiştir. Bu bölgeden alınan SEM-EDAX analizlerinde Al, Si ve O elementleri tespit edilmiştir. Beyazıt Medresesi'ne yapılan DIN 50602 k2 sabitine göre inküzyon sayımları gerçekleştirilmiştir.

Uzun Kemer

Uzun Kemer'den alınan numune üzerinde yapılan mikroyapı analizlerinde ana yapının ferrit olduğu tespit edilmiştir. Mikroyapı görüntüsü üzerinden renklendirme yöntemiyle yapılan faz analizinde yapının %72,54 ferrit ve %27,46 perlit fazından oluştuğu belirlenmiştir. Tablo 4.11'de görülen merkez bölgesi mikroyapı görüntülerinde ferritik yapının eş eksenli tanelerden meydana geldiği gözlemlenmiştir. Tablo 4.12'de kenar bölgesinde diğer numunelerde olduğu gibi dövmeyle bağlı çukurlaşma meydana geldiği ve bu bölgenin karanlık olarak

görüldüğü gözlemlenmiştir. Kenar bölgede dövmeyle ilgili çukurlaşmanın meydana gelmesi yapıda karbon artışına bağlı perlitik bir yapının oluştuğunu düşündürmektedir.

Alınan EDAX elementer analizlerinde Fe ve O pikleri oksitlenmiş demir oksit tabakasını doğrulamıştır. Mikroyapı görüntülerinde ana yapı içinde inklüzyonların diğer yapılardan alınan numunelere göre daha az kirlilik içerdiği görülmüştür. 1000x büyütme ile elde edilen mikroyapı görüntülerinde dövme yönünde uzamış kirlilikten alınan EDAX analizinde yüksek şiddete sahip Al, Si, Ca ve O pikleri ile beraberinde düşük şiddete sahip P, Ti ve Mg pikleri tespit edilmiştir. Ana yapı bileşiminde oluşan inklüzyonların kalsiyum alüminyum silikat formunda kompleks bir inklüzyon olduğu belirlenmiştir. Yapıda tespit edilen fosforun (P) giderilemediği ve bileşimde kaldığı düşünülmektedir. Yapılan OES analizinde de fosfor oranının yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yapıda magnezyumun (Mg) bulunması ise cüruf yapıcı olarak kireç yerine beyaz renkli dolomit malzemesi kullanımıyla ilişkilidir. Dolomit $MgCO_3$ bileşiminden meydana gelmektedir.

Tablo 4.14'te Uzun Kemer'in dış kabuk yüzeyine yapılan SEM-EDAX analizlerinde Fe ve O pikleri ile beraber Pb piki tespit edilmiştir. Bu bölgede meydana gelen kabuk tabakasının kopmak üzere olduğu ve ana yapıya paralel olarak boşluk olduğu gözlemlenmiştir.

Süleymaniye Darüşşifası

Numunenin merkez bölgesinden alınan mikroyapı görüntülerinde ana yapının ferrit olduğu ve düşük oranda perlit fazı içerdiği gözlemlenmiştir. Tablo 4.11'de sunulan mikroyapı görüntüsünde numunenin iç yüzeyinde çok sayıda boşluk ve inklüzyon olduğu ve bunların dövme yönünde uzama gösterdiği görülmüştür. ISO 643 standardına göre yapılan tane boyut analizinde ortalama tane boyutunun 19,37 mikron olduğu tespit edilmiştir. Bu boşluklara yapılan SEM-EDAX elementer analizlerinde düşük şiddete sahip Al, Si, S ve P pikleri tespit edilmiştir. Mikroyapı görüntülerindeki kirliliğe yapılan SEM-EDAX analizinde Fe ve O pikleri ile eser miktarda Al, Si, S ve P pikleri görülmüştür. 1000x büyütmede alınan mikroyapı görüntülerinde dış yüzeyde demir oksit tabakası ile ana yapı arasında paralel bir boşluk meydana geldiği ve demir oksit tabakasının kopmak üzere olduğu gözlemlenmiştir. Diğer numunelere göre birleştirme bölgesi net bir şekilde tespit

edilmiş olup bu tabakanın 20 mikron boyutunda olduğu alınan ölçümlerle belirlenmiştir (Tablo 4.15).

Bu tabakaya yapılan analizlerde numune kesit yüzeyi merkez bölgesinde dövme boşluğu meydana geldiği ve demirin oksitlenerek boylu boyunca bir tabaka oluşturduğu görülmüştür. Numunedeki bu tür oksitlenmiş birleştirme bölgeleri demir oksit tabakası olup gevrek bir yapıya sahiptirler. Yük altında bu gevrek bölgeden kırılmanın başlayacağı tahmin edilmektedir.

Sultan Ahmet Camii

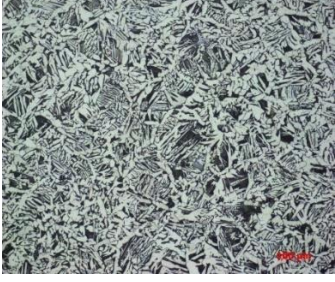
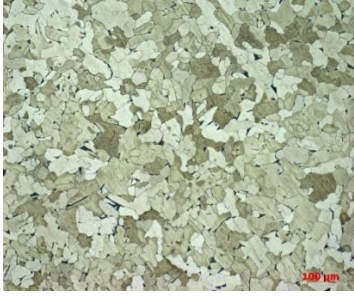
Sultan Ahmet Cami'nden alınan mikroyapı görüntülerinde ana yapının ferritik olduğu ve merkez bölgesinde dövme işlemi sonucunda tanelerde bir yönelme olmadığı belirlenmiştir. Tablo 4.12'de numunenin kenar bölgesinde dövme yapılan alanlarda ezilmeye bağlı karanlık bir bölge olduğu ancak SEM-EDAX analizinde karbon tespit edilmediği için bu bölgede bir perlit tabakası bulunmadığı görülmüştür. Mikroyapı görüntülerinde ana yapı içinde inklüzyon elementlerinin yok denecek kadar az olduğu saptanmıştır. DIN 50602 k2 sabitine göre yapılan inklüzyon analizinde toplam 318,33 ile oranın en düşük değerde olduğu tespit edilmiştir. Alınan mikroyapı görüntüleri inklüzyonların yok denecek kadar az olduğunu doğrulamaktadır.

Tablo 4.12'de numunenin kenar bölgesinde uygulanan ısıtma işlemi birlikte ferrit tanelerinin büyüme gösterdiği belirlenmiştir. ISO 643 standardına göre yapılan tane boyut analizinde yapının 30,04 mikron ortalama tane boyutuna sahip kaba yapılı bir ferritik yapı olduğu gözlemlenmiştir. Tablo 4.12'de kenar bölgeden alınan mikroyapı görüntülerinde tanelerde deformasyonla birlikte ezilme olmadığı görülmektedir. Tane boyutunun homojen olması, dövme sonrasında malzemeye tekrar ısıtma işlemi yapıldığını düşündürmektedir.

SEM analizinde mikroyapı görüntülerinde inklüzyon ve boşlukların çatlak oluşumuna sebep olduğu tespit edilmiştir. Ana matriste yapılan SEM-EDAX analizlerinde yüksek şiddete sahip Al, Si, Ca ve O pikleri tespit edilmiş, ayrıca K, P ve Ti de belirlenmiştir. Kirlilikler diğer numunelerde tespit edilen kirlilik element bileşimleri ile benzer olup sadece ana yapı bileşiminde bulunma oranları farklıdır. Sultan Ahmet Camii'nden alınan numunede de benzer inklüzyon elementleri tespit

edilmiş fakat bu inklüzyonların bahsedildiği üzere diğer numunelere göre daha az olduğu gözlemlenmiştir.

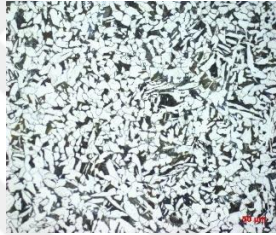
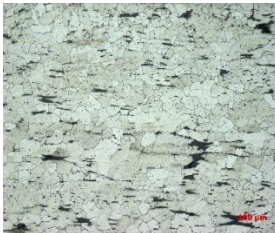
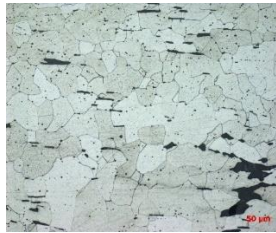
Tablo 4.12 Merkez bölgesinden alınan mikroyapı görüntüleri

Kesit	Merkez	Merkez	100x
Selimiye Cami			Uzun Kemer
Rüstem Paşa Camii			Süleymaniye Darüüşşifası
Valide Sultan Camii			Sultan Ahmet Cami
Beyazıt Medresesi			

Tablo 4.13 Kenar bölgesinden alınan mikroyapı görüntüleri

Kenar Kesit	50x	50x	
Selimiye Cami			Uzun Kemer
Rüstem Paşa			Süleymaniye Darüşşifası
Valide Sultan Camii			Sultan Ahmet Cami
Beyazıt Medresesi			

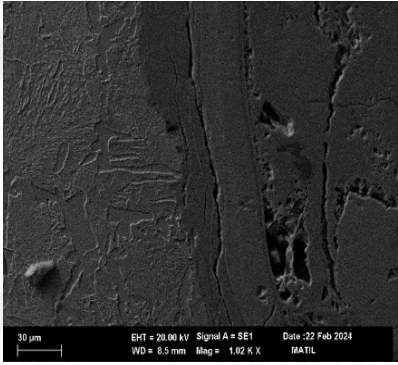
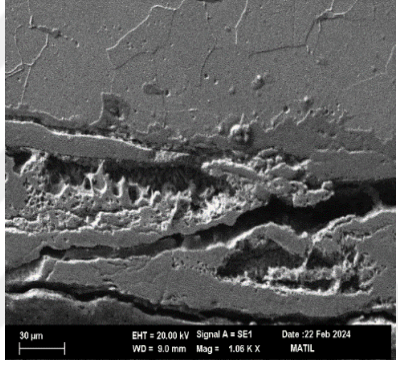
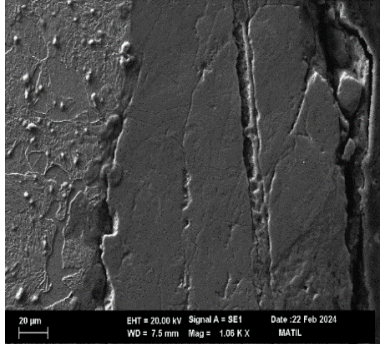
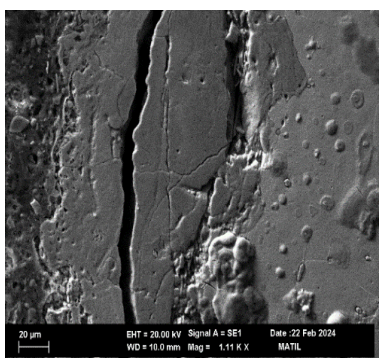
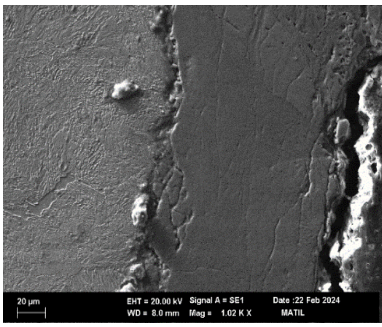
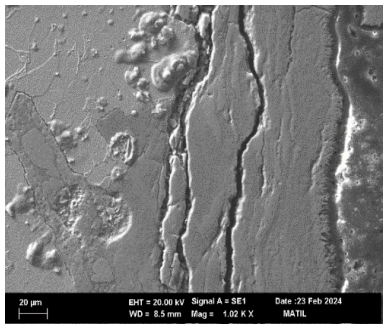
Tablo 4.14 Merkez bölgesinden alınan 50x,100x,200x mikroyapı görüntüleri

Merkez Kesit	50X	100X	200X
Selimiye Cami			
Rüstem Paşa Camii			
Valide Sultan Camii			
Beyazıt Medresesi			
Uzun Kemer			
Süleymaniye Darüşşifası			

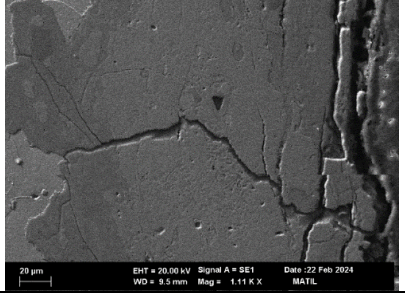
Tablo 4.14 Merkez bölgesinden alınan 50x,100x,200x mikroyapı görüntüleri
(devamı)

Sultan Ahmet Cami			
-------------------------	---	--	---

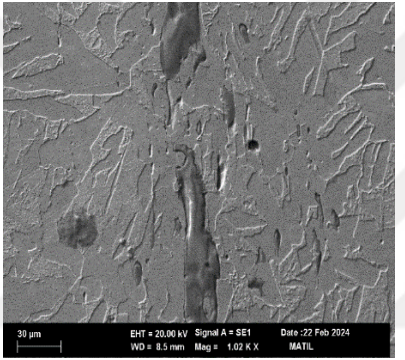
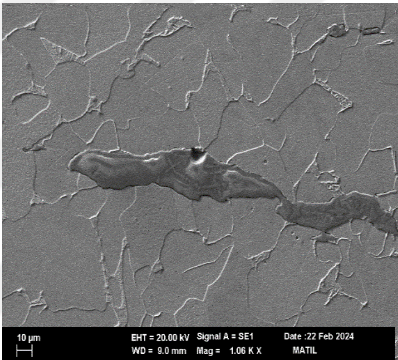
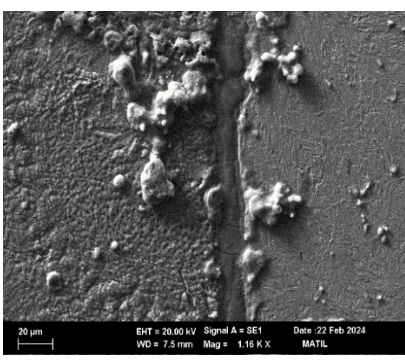
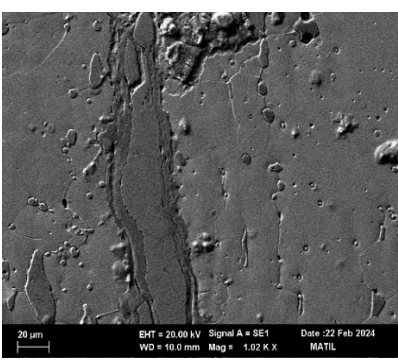
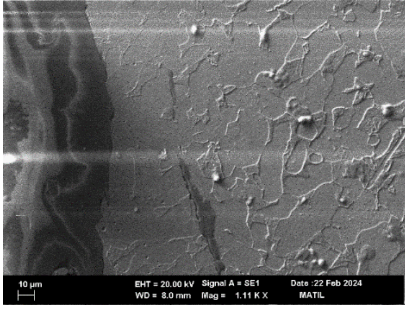
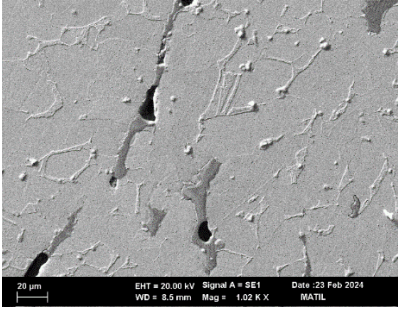
Tablo 4.15 Elektron mikroskopta 1000x büyütme alınan kenar bölge mikroyapı görüntüleri

Selimiye Cami			-Uzun Kemer
Rüstem Paşa			Süleymaniye Darüşşifası
Valide Sultan Camii			Sultan Ahmet Cami

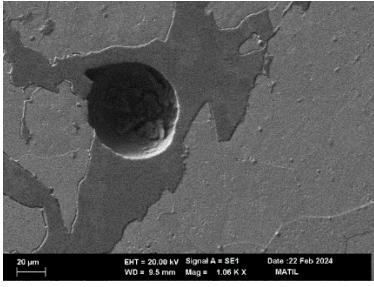
Tablo 4.15 Elektron mikroskopta 1000x büyütme alınan kenar bölge mikroyapı görüntüleri (devamı)

Beyazıt Medresesi		
-------------------	---	--

Tablo 4.16 Elektron mikroskopta 1000x büyütme alınan merkez bölge mikroyapı görüntüleri

Selimiye Camii			Uzun Kemer
Rüstem Paşa			Süleymaniye Darüüşşifası
Valide Sultan Camii			Sultan Ahmet Camii

Tablo 4.16 Elektron mikroskopta 1000x büyütme alınan merkez bölge mikroyapı görüntüleri (devamı)

Beyazıt Medresesi			
-------------------	---	--	--

4.1.5 Mikro Sertlik Testleri

Laboratuvar çalışması kapsamında yapılan mikro sertlik ölçümlerinde numunelerin kendi içinde farklı değerlere sahip olduğu belirlenmiştir (Tablo 4.17). Mikro sertlik ölçümlerinde elde edilen sonuçların farklılığı yapının homojen bir mikroyapı düzenine sahip olmadığını göstermektedir. Dönemin şartları dikkate alındığında, demire şekil verilmesi sırasında eşit olmayan kuvvet uygulaması bazı bölgelerde boşluklar, çatlaklar veya yırtıklar oluşturarak yapının farklı bölgelerinde farklı sertlik değerlerinin ölçülmesine neden olmaktadır.

Tablo 4.17 Numunelerin mikro sertlik ölçümü

Numune Tipi	Ölçüm Sonuçları					Ortalama HV0,3
	1	2	3	4	5	
Beyazıt Medresesi (Merkez)	156	143	147	155	157	151,6
Süleymaniye Darüşşifası (Merkez)	186	140	149	189	167	166,2
Rüstem Paşa Camii (Merkez)	125	126	137	130	113	126,2
Uzun Kemer (Merkez)	125	100	107	110	121	112,6
Selimiye Camii (Merkez)	124	131	124	125	130	126,8
Sultanahmet Camii (Merkez)	111	144	89	84	109	107,4
Valide Sultan Camii (Merkez)	192	177	202	204	151	185,2

Selimiye Cami'ne ait numunede yapılan mikro sertlik taramasında homojen değerler elde edildiği görülmüştür. Nitekim Selimiye Cami numunesi ferrit / perlit

fazlarından meydana gelmiş olup mikroyapın incelemelerinde alınan görüntülerinde homojen olduğu görülmektedir.

Rüstem Paşa Camii numunesi merkezinde yapılan mikro sertlik taramasında sertlik değerinin 113'e kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Mikroyapısı incelendiğinde merkezinde dövme yönünde boşlukların bulunduğu görülmektedir. Tespit edilen değerin iç yapıda bulunan boşluklar nedeniyle düşük olduğu öngörülmektedir.

Valide Sultan Camii'ne ait numuneye bakıldığında perlitik yapının etkisi görülmekte olup en yüksek sertlik değerinin 204 olduğu tespit edilmiştir. En düşük 151 olan mikro sertlik değeri normal ferrit fazına ait sertlik değeridir. Elde edilen sonuçlar mikroyapı görüntüleri ile uyumludur.

Beyazıt Medresesi numunesinin merkez taramasında elde edilen sertlik değerlerinin birbirine yakın olması ferritik yapının homojen bir dağılıma sahip olduğunu göstermektedir. Yapılan mikro sertlik ölçümlerinin numune bünyesinde yer alan boşluklara denk gelmemesi de söz konusu sonuçların elde edilmesinde etkilidir.

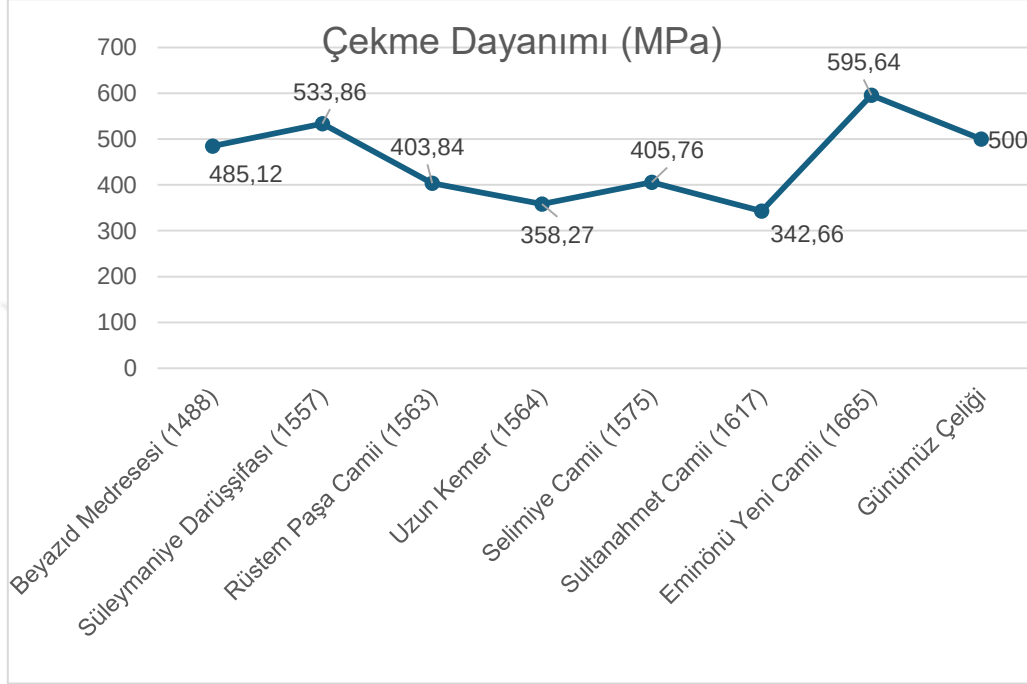
Uzun Kemer'den alınan numunenin iç kısımları tamamen ferritik bir mikroyapıya sahipken kenar bölgelerinde perlitik bir yapı gözlemlenmektedir. Bu nedenle merkeze yakın bölgelerde mikro sertlik değerleri 121-125 arasında değişirken, diğer bölgelerde 100, 110 ve 107 değerleri elde edilmiştir. Alınan mikro yapı görüntüleri mikro sertlik taramalarını doğrulamaktadır.

Süleymaniye Darüşşifasına ait numune merkezinde kaba ferrit taneleri içeren bir mikroyapıya sahip olup numunenin bünyesinde dövme yönünde uzama gösteren boşluklar bulunmaktadır. Numunenin dış yüzeyinde ferritik bir yapı bulunmasına rağmen 186 mikro Vickers sertlik değeri ölçülmüştür. Mikroyapı görüntülerinde numunenin merkezine doğru kaba ferrit tanelerinin dövme yönünde şekillendiği gözlemlenmiştir. Numunenin iç bölgelerinde normal ferritik yapının hâkim olmasına bağlı olarak daha düşük sertlik değerleri tespit edilmiştir.

Mikroyapı incelemelerinde Sultan Ahmet Cami numunesinin ferritik yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Dış bölgelerin mikro sertlik değerlerinin iç bölgelere göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

Numunelere uygulanan mikro Vickers sertlik testlerinde mikroyapıların ferrit ve perlit fazlarından oluştuğu belirlenmiştir. Ferritik ana yapıda mikro sertlik değerlerinin ferrit tane boyutlarına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir.

Sertlik değerlerinin ISO 18265 standardına göre çevrilmiş çekme mukavemeti değerleri Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12 Mikro sertlik ölçüm değerlerine göre çekme dayanımı (MPa)

Literatürde yer alan çalışmalardan Tanyeli ve diğerleri (1990) 15-18. Yüzyıl Osmanlı mimarisinde kullanılan demir elemanların malzeme karakteristiklerini ve üretim teknolojilerini araştırmıştır. Bu bağlamda Topkapı Sarayı, Davutpaşa Medresesi, Selimiye Camii, Sultan Ahmet Camii ve Tütünsüz Baba Türbesi’nden temim ettiği toplam yedi adet numune üzerinde yaptığı inceleme sonucu vickers mikro-sertlik değerlerini 92 ile 249 arasında bulmuştur. Elde edilen dağınık sonuçları demir elemanların dağınık mikroyapına bağlamıştır.

Elban ve diğerleri (1998) Amerika’nın Virginia eyaletinde yer alan 1800’lü yıllara ait Wheeling gümrük binasını incelemiş ve üzerinde testler gerçekleştirdiği demir elemanların çekme dayanımlarını sırasıyla, 482,6, 351,6, 434,4, 393,0, 337,8 MPa olarak tespit etmiştir.

Gordon ve Knopf (2005) yaptıkları çalışmada Amerika’da yer alan ve 19. yüzyılda dövme demirden inşa edilen Aldrich Change, Schoellkopf, Eck ve Cotton Hill

köprülerinin strüktürel malzemesini incelemiştir. Laboratuvar ortamında incelenen dövme demir numunelerine ait çekme dayanımları 332 MPa ile 458 MPa değerleri arasında olduğunu gözlemlenmiştir. Gordon ve Knopf (2005) ayrıca çalışmasında günümüzde kullanılan sertlik ölçekleri arasındaki standart dönüşümlerin dövme demirler için uygun olmadığı savunmuştur.

Demir (2012) tarihi taş duvarların deprem yükleri altındaki davranışlarını araştırdığı doktora çalışması kapsamında Edirne II. Beyazıd Camii yapımında kullanılmış özgün iki adet demir kenet elemana ait vickers mikro-sertlik değerlerini 112 ile 129 değerleri arasında tespit etmiştir.

Şengün (2015) Topkapı Sarayı içerisinde yer alan Darphane-i Amire yapılarından aldığı özgün dövme demir elemanların çekme dayanımlarını 292 MPa ile 346 MPa arasında, Dabanlı (2016) Nuruosmaniye Cami'ne ait demir elemanın çekme dayanımını 350 MPa olarak tespit etmiştir. Değerlerin farklı çıkmasının sebebi dönemin üretim teknolojisinin gelişmemiş olması nedeniyle dövme işleminin yetersizliğine bağlanmıştır.

Literatürde yer alan çalışmalardan da görüleceği üzere demir elemanların çekme dayanımları geniş aralıklarda tespit edilmiştir. Bu durum söz konusu yapılara ait demir elemanların muhakkak belli bir standarta bağlı olmayan üretim koşullarında üretilmesine bağlanabilir. Numunelerin yüzeyinde oluşan demir oksit tabakası, ana yapının ferrit ya da perlit fazda olması, dövme işlemine bağlı şekillenen tane boyutları, numunelerin içeriğinde bulunan inklüzyonlar ve boşluklar sertlik değerlerinde sapmalara neden olmaktadır. Dolayısıyla literatürde yer alan bazı çalışmalarda da belirtildiği üzere elde edilen sertlik değeri üzerinden demir elemanların çekme dayanımına gitmek sorgulanması gereken bir durumdur (Gordon & Knopf, 2005; Buonopane & Kelton, 2008).

4.1.6 Kimyasal Analiz

Kimyasal analizler ARL-İSPARK 8860 model OES cihazı kullanılarak, düşük alaşımlı çelikler için kullanılan ASTM E415 standardına uygun şekilde akredite laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonuçları Tablo 4.18'de verilmiştir.

Tablo 4.18 Kimyasal analiz sonuçları

Element	Selimiye Camii	Rüstem Paşa Camii	Valide Sultan Camii	Beyazıd Medresesi	Uzun Kemer	Süleymaniye Darüşşifası	Sultan Ahmet Camii
Cu	0,0001	0,0112	0,0152	0,0001	0,0131	0,0001	0,0123
Si	3,6963	0,1546	0,049	2,7665	0,0027	1,2038	0,0001
Mn	0,0906	0,0029	0,0024	0,0259	0,0008	0,0844	0,0001
P	0,0174	0,0516	0,0783	0,0124	0,0939	0,0202	0,1401
Sn	0,0202	0,0009	0,0006	0,0077	0,0003	0,0124	0,0004
Pb	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	0,0003	0,0001	0,0007
Zn	0,0017	0,0001	0	0,0011	0,0001	0,0013	0,0001
Ni	0,0001	0,0008	0,0033	0,0001	0,0034	0,0001	0,0015
Sb	0,0001	0,0001	0,0003	0,0001	0,0003	0,0001	0,0004
Cr	0,0288	0,0018	0,0017	0,0067	0,0012	0,0445	0,0004

Tablo 4.18 Kimyasal analiz sonuçları (devamı)

C	0,1557	0,7431	0,0609	0,0404	0,0586	0,0414	0,0574
Al	0,4537	0,0404	0,01	0,3924	0,0011	0,1486	0,0001
Ca	2,2342	1,169	0,4705	0,2454	0,0909	1,4686	0,0045
N	0,058	0,0001	0,0001	0,034	0,0001	0,0287	0,0001
O	1,4332	0,0161	0,0143	0,8768	0,0086	0,7942	0,0042
S	0,024	0,0053	0,0037	0,0201	0,0062	0,0596	0,0064
La	3,9511	0,0033	0,0003	1,0372	0,0002	1,9214	0,0002
Fe	87,1865	97,7427	99,2542	94,295	99,7034	93,756	99,7691

Yapılan kimyasal analizlerde numune yüzeylerinin çok bozuk olması nedeniyle sağlıklı sonuçlar elde edilememiştir. Numune yüzeyleri taşlandığında alt yüzeylerden çıkan döküm boşlukları analiz sonuçlarının sapmasına neden olmuştur. Analiz esnasında karşılaşılan diğer bir problem ise dövme işlemi ile birleştirilen bölgelerde demir oksitlenmesine bağlı olarak kabuk şeklinde demir oksit tabakasının oluşmasıdır. Bu tabaka malzemenin işlenmesi sırasında meydana gelen oksitli bir yapıdır. Ayrıca dövme işlemleri sırasında çukurlaşmaların meydana gelmesi de analiz sonuçlarını olumsuz etkilemiştir.

Öncelikli olarak çeliklerin mukavemeti üzerinde etkisi olan çeliğin en önemli alaşımı karbon (C) elementi incelenmiştir. Günümüz inşaat yapı çeliklerinde karbon oranı 0,19-0,30 aralığında değişim göstermektedir. Alınan yedi adet numunede meydana gelen C değişimleri incelendiğinde en yüksek C oranının %0,74 ile Rüstem Paşa Camii'nden alınan numunede tespit edilmiştir. Selimiye Camii'ne ait numunede %0,15 olarak tespit edilen karbon oranının normal aralıkta olduğu görülmektedir. Diğer numunelerin karbon oranlarının çok düşük olduğu ve yapının ferritik mikro yapıda olduğu düşünülmektedir. Karbon oranı yüksek olan Rüstem Paşa Camii'nde ise şekillendirme işlemleri yapılırken sıcak dövme aşamasında kömürün difüzyonu ile numune dış yüzeylerinde karbonca zengin bir bölge oluştuğu ve bunun karbon oranını yükselttiği tahmin edilmektedir. Bir diğer olasılık ise söz konusu dövme demir elemanın yapıya sonraki dönemlerde yerleştirilmiş olmasıdır. Bu oran taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri ile kontrol edilmiştir.

Tablo 4.19 II. Beyazıd Camii numuneleri kimyasal analiz sonuçları

	C	Si	S	P	Mn	Ni	Mo	Cu
Sample 1	0.0029	0.0077	0.0040	0.0542	0.0000	0.0007	0.0006	0.0145
Sample 2	0.0333	0.1077	0.0033	0.0590	0.0033	0.0000	0.0009	0.0116
	Ti	As	Sn	Co	Al	Pb	Nb	Fe
Sample 1	0.0027	0.0002	0.0005	0.0227	0.0059	0.0001	0.0002	99.883
Sample 2	0.0218	0.0010	0.0009	0.0079	0.0296	0.0006	0.0009	99.696

Demir (2012) tarihi taş duvarların deprem yükleri altındaki davranışlarını araştırdığı doktora çalışması kapsamında laboratuvar ortamında incelediği Edirne II. Beyazıd Camii yapımında kullanılmış özgün iki adet demir elemanın içeriğinde %0.0029 ve %0.0333 oranında karbon (C) elementi tespit etmiştir (Tablo 4.19).

Ray ve diğerleri (1997) yaptıkları çalışmada Hindistan'da antik demir sütunları inceleyerek dövme demirin karakteristik özelliklerini belirlemiştir. Yaptıkları kimyasal testler sonucu demir elemanın kimyasal içeriğinde %0,013 Karbon, %0,06 Silikon, %0,072 Fosfor, %0,003 Kükürt ve Mangan kalıntıları gözlemlenmiştir.

Mangan (Mn) oranında ise çok fazla bir değişim olmadığı ve tüm numunelerin birbirine yakın mangan değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Mangan, çelik üretiminde çok çabuk oksitlenen bir alaşım elementi olup tarihi yapılarda kullanılan demirin bünyesine cevherden geldiği düşünülmektedir.

Kimyasal analiz sonuçlarına göre numunelerde yüksek oranda fosfor tespit edilmiştir. Günümüz demir üretimi sırasında fosfat giderme işlemleri yapıldığı için fosfor (P) oranını %0,01 civarında demir içeriğinde yer almaktadır (Tablo 4.20). Tarihi yapılarda fosfor oranlarının yüksek olması, geçmişte bazik esaslı cüruf işlemlerinin sağlıklı yapılamaması ve oksijen üfleyerek fosfat giderme işleminin gerçekleştirilmemesinden kaynaklanmaktadır. Bilindiği üzere, fosfor çelik mukavemetini düşüren ve gevreklik kazandıran tehlikeli bir elementtir. Bileşim içinde fazla olması, tokluğun azalması ile düşük darbe enerjisinde kırılmaya neden olmaktadır. İncelemelerde en yüksek fosfor oranı %0,14 ile Sultan Ahmet Camii'ne ait numunede görülmüştür. Beyazıt Medresesi ve Selimiye Camii haricindeki diğer yapılarda fosfor oranının günümüz teknolojisiyle üretilen inşaat demirlerine göre yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu numuneler korozyonla beraber çok düşük darbe enerjisine sahip olduğu için kırılğan bir yapı sergilemektedir.

Tablo 4.20 Günümüz inşaat demirleri örnek kimyasal analizi

C	Mn	Si	S	P	Cu	N	Fe	O
0,19	0,74	0,24	0,015	0,01	0,04	0,005	98,59	0,0026

Tanyeli ve diğerleri (1990) 15-18. Yüzyıl Osmanlı mimarisinde kullanılan demir elemanların laboratuvar ortamında kimyasal özelliklerini incelemiştir. Demir elemanların bol miktarda fosforca zengin cüruf içerdiğini ve bunun ergime sıcaklığını düşürerek demirin sıcak işlenebilirlik özelliğini artırdığını belirtmiştir. Diğer yandan fosforun miktarca çok olması demirin sert ve soğukta gevrek olmasına neden olduğunu vurgulamıştır.

Dabanlı (2016) Nuruosmaniye Camii deprem performansının değerlendirilmesine yönelik yaptığı çalışma kapsamında özgün bir demir çivi numunesi üzerinden SEM-EDS incelemesi yapmış ve %0,21 oranında fosfor (P) elementi tespit etmiştir (Tablo 4.21).

Tablo 4.21 Nuruosmaniye Camii çivi numunesi SEM-EDAX analizleri ile tespit edilen elementler

Element Adı	Line Type	Ağırlık %	Ağırlık % Sigma	Atomik %	Oksit Adı	Oksit %	Oksit % Sigma
Fe	K serisi	77.25	0.04	49.47	FeO	99.39	0.06
P	K serisi	0.21	0.01	0.24	P ₂ O ₅	0.48	0.02
Si	K serisi	0.04	0.01	0.05	SiO ₂	0.09	0.02
Ti	K serisi	0.00	0.01	0.00	TiO ₂	0.00	0.01
V	K serisi	0.01	0.01	0.01	V ₂ O ₅	0.02	0.02
Cr	K serisi	0.00	0.00	0.00	Cr ₂ O ₃	0.00	0.00
Mn	K serisi	0.00	0.00	0.00	MnO	0.00	0.00
Mo	L serisi	0.02	0.02	0.01	MoO ₃	0.02	0.03
O		22.47	0.04	50.22			
Toplam		100.00		100.00		100.00	

Ray ve diğerleri (1997) yaptıkları çalışmada karbon elementine göre nispeten yüksek Fosfor içeriğini dönemin dövme demir malzemesinin karakteristik özelliği olarak görmüştür. Malzemenin kimyasal içeriğinde %0,013 Karbon ve %0,072 Fosfor tespit edilmiştir.

Teste tabi tutulan numunelerde nikel (Ni) elementinin eser miktarda bulunduğu tespit edilmiştir. Krom (Cr) oranının Selimiye Camii ve Süleymaniye Darüşşifasına ait numunelerde düşük miktarda olduğu belirlenmiştir. Analizlerde tespit edilen nikel ve kromun kullanılan demir cevheri ile birlikte geldiği düşünülmektedir.

Laboratuvar çalışmalarında alüminyum (Al) ve silisyum (Si) alaşımlarının numuneler içerisinde farklı oranlarda bulunduğu gözlemlenmiştir. Selimiye Camii, Beyazıt Medresesi ve Süleymaniye Darüşşifası yapılarında yüksek oranda Si ve Al cürufu görülmektedir. Tanyeli ve diğerleri (1990) Osmanlı mimarisinde kullanılan demir elemanların günümüz demirine göre Si, Al ve Ca yönünden fakir olduğu belirtilmiştir.

Tanyeli ve diğerleri (1990) kimyasal analizlerini yaptıkları demir elemanların bünyesinde potasyum elementine rastlamış ve bunu demir üretim sürecinde odun kömürü kullanıldığına işaret olarak görmüştür.

Tokluğu düşüren ve mukavemetin azalmasına neden olan bir diğer element ise kükürttür. Günümüzde kükürt (S) elementinin cevherden üretim yapılırken oksijen üfleme ile CaSO_4 olarak cürufa geçmesi sağlanmaktadır. Yapılan analizlerde kükürt oranı en yüksek Süleymaniye Darüşşifasında %0,024 oranında tespit edilmiştir. Diğer değerlerin günümüz inşaat demirleri ile benzer olduğu görülmüştür. Numunelerin bünyesinde tespit edilen kükürtün cüruftan gelmiş olduğu öngörülmektedir.

Yapılan kimyasal analizlerde numunelerde kalsiyum (Ca) oranının çok yüksek olduğu görülmektedir. Ca kaynağının demir eleman ile bir arada duran taş, harç ya da bağlayıcılardan gelmiş olabileceği öngörülmektedir. Kalsiyumun cüruftan gelmiş olması da diğer bir olasılıktır.

Oksijen konsantrasyonunun Selimiye Cami, Beyazıt Medresesi ve Süleymaniye Darüşşifasında sırası ile %1,43, %0,87 ve %0,79 oranında olduğu tespit edilmiştir. Oksijen konsantrasyonun diğer numunelerde de Tablo 4.19’da (%O 0,0026) verilen referans değere göre çok yüksek olduğu görülmektedir.

4.1.7 Değerlendirme

Makro ve mikroyapı incelemelerinden elde edilen analiz sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 4.23’de sunulmuştur. Bu karşılaştırma numunelerin benzer koşullar altında üretildiğini ve karbon çeliği olduğunu göstermektedir. Ortalama tane boyutları değerlendirildiğinde en düşük tane boyutunun 11,69 mikron ile Selimiye Camii numunesinde tespit edilmiştir. Buna karşılık en yüksek tane boyutu 35,26 mikron ile Beyazıt Medresesi’ne ait numunede tespit edilmiştir. Tane boyutlarındaki bu farklılıklar, kimyasal analizleri benzer olan numunelere uygulanan dövme işlemlerinin farklı olduğunu işaret etmektedir. Uygulanan çeşitli dövme işlemi parametreleri ve optimize edilemeyen dövme süreleri, tane boyutu analizleri üzerinde doğrudan etkili olmuştur.

İnklüzyon analizleri DIN 50602 k2 standartına göre gerçekleştirilmiştir. İnklüzyon oluşumları çelik üretiminde kullanılan cüruf yapma işlemleri ve deoksidanlara bağlı olarak değişiklik gösterir. Osmanlı mimarisinde kullanılan demir elemanlarda tespit edilen inklüzyonların ergitme ve alaşımlama süreçlerinde meydana geldiği düşünülmektedir. Dövme işlemi sırasında hava ve su gibi etkilerin numunelerde

demir oksit oluşumuna neden olduğu ve cüruf içine inklüzyon elementlerinin bağlanmaması nedeniyle inklüzyonların yüksek olduğu değerlendirilmektedir. Sultan Ahmet Camii ve Valide Sultan Camii numunelerinde diğer yapılarla kıyaslandığında çok düşük oranda inklüzyon elementleri tespit edilmiştir. Bu durum o dönemde daha temiz dövme demir yapılabildiğini göstermektedir.

Faz analizlerinde alınan mikroyapı görüntüleri üzerinde tespit edilen fazlar renklendirilmiştir. Bütün numunelerde tespit edilen mikroyapılar ferrit ve perlit yapısından oluşmaktadır (Tablo 4.22).

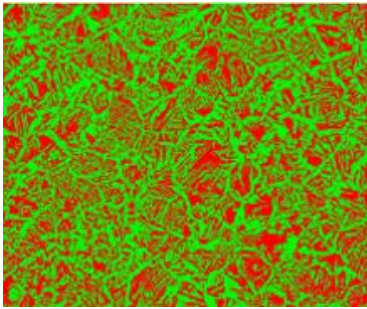
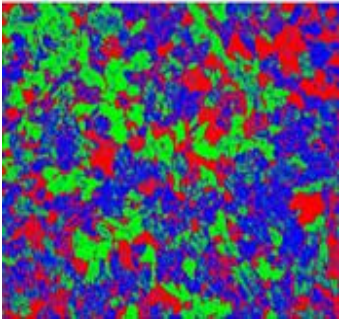
Tanyeli ve diğerleri (1990) 15-18. Yüzyıl Osmanlı mimarisinde kullanılan demir elemanların malzeme karakteristiklerini ve üretim teknolojilerini incelemiş ve dövme demir elemanların ferritik yapıda olduğunu gözlemlemiştir.

Demir (2012) tarihi taş duvarların deprem yükleri altındaki davranışlarını araştırdığı doktora çalışması kapsamında laboratuvar ortamında incelediği Edirne II. Beyazıd Camii yapımında kullanılmış özgün iki adet demir kenet elemanın ferritik yapıda olduğunu tespit etmiştir.

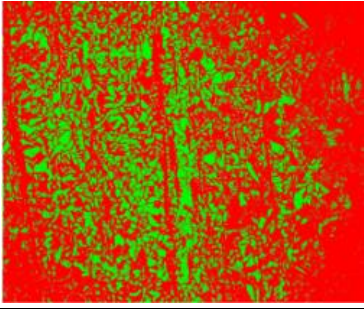
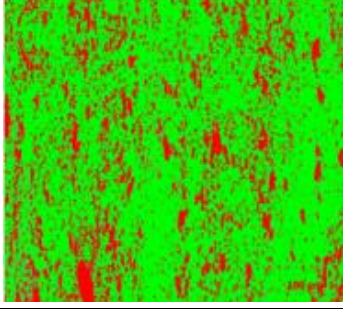
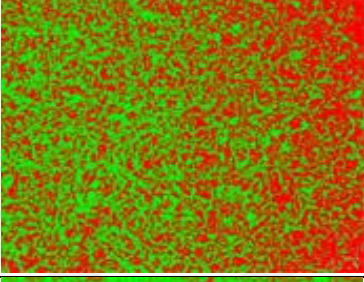
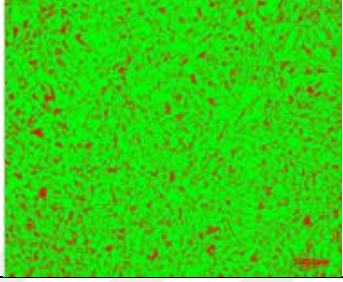
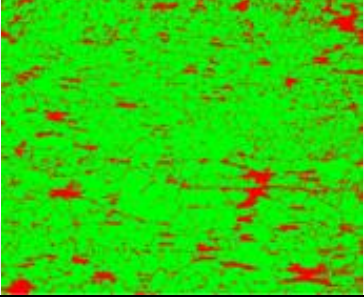
Şengün (2015) Topkapı Sarayı içerisinde yer alan Darphane-i Amire yapılarının özgün üst örtü strüktüründen temin ettiği dövme demirlerin mikroyapılarının yüksek oranda ferrit fazda olduğunu yaptığı laboratuvar çalışması ile belirlemiştir.

Mikroyapı ve SEM analizlerinden elde edilen sonuçlar yapılan yorumların anlaşılması amacıyla Selimiye Camii, Rüstem Paşa Camii ve Valide Sultan Camii için detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Tablo 4.22 Mikroyapı görüntüleri alınan numunelerin faz oranları

Kenar Kesit	50x	50x	
Selimiye Cami %51,07 Ferrit + %43,23 Perlit			Uzun Kemer %72,54 Ferrit + %Kalan Boşluk

Tablo 22 Mikroyapı görüntüleri alınan numunelerin faz oranları (devamı)

Rüstem Paşa %51,07 Ferrit + %43,23 Perlit			Süleymaniye Darüşşifası %72,39 Ferrit + %27,61 Perlit ve boşluk inklüzyon
Valide Sultan Camii %44 Ferrit + %52,82 Perlit			Sultan Ahmet Camii %83,02 Ferrit + %12,85 Perlit
Beyazıt Medresesi %82,07 Ferrit + %16,60 Boşluk			

Tablo 4.23 Tarihi yapılardan alınan numuneler üzerinde yapılan mikroyapı analizleri karşılaştırılması

Test Analiz	Selimiye Camii (1575)	Rüstem Paşa Camii (1563)	Valide Sultan Camii (1665)	Beyazıd Medresesi (1488)	Uzun Kemer (1564)	Süleymaniye Darüşşifası (1557)	Sultanahmet Camii (1617)
Makro Sertlik (HBW 2,5/187,5)							
Makro sertlik kesit	174,17	215,47	200,94	143,13	230,64	188,87	136,97
Ortalama Tane Boyutu							
Ortalama Tane Boyutu No	9,5	9,0	9,5	6,5	7,0	8,0	7,0
Ortalama Tane Boyutu (µm)	11,69	15,37	12,74	35,36	27,73	19,37	30,04
Demir Oksit Kaplama Ölçümleri							
Demir Oksit Kalınlığı Ölçümleri (µm)	53,11	142,96	355,98	319,85	100,49	75,03	119,92
İnklüzyon Tayini							
Toplam	1687,21	6359,94	590,04	11215,91	1320,65	7756,87	318,33
Oksit İnklüzyonları	33,80	754,42	152,20	1365,48	154,32	420,85	0
Sülfür İnklüzyonları	1653,41	5605,52	437,83	9850,43	1166,29	7336,02	318,33
Faz Analizi							

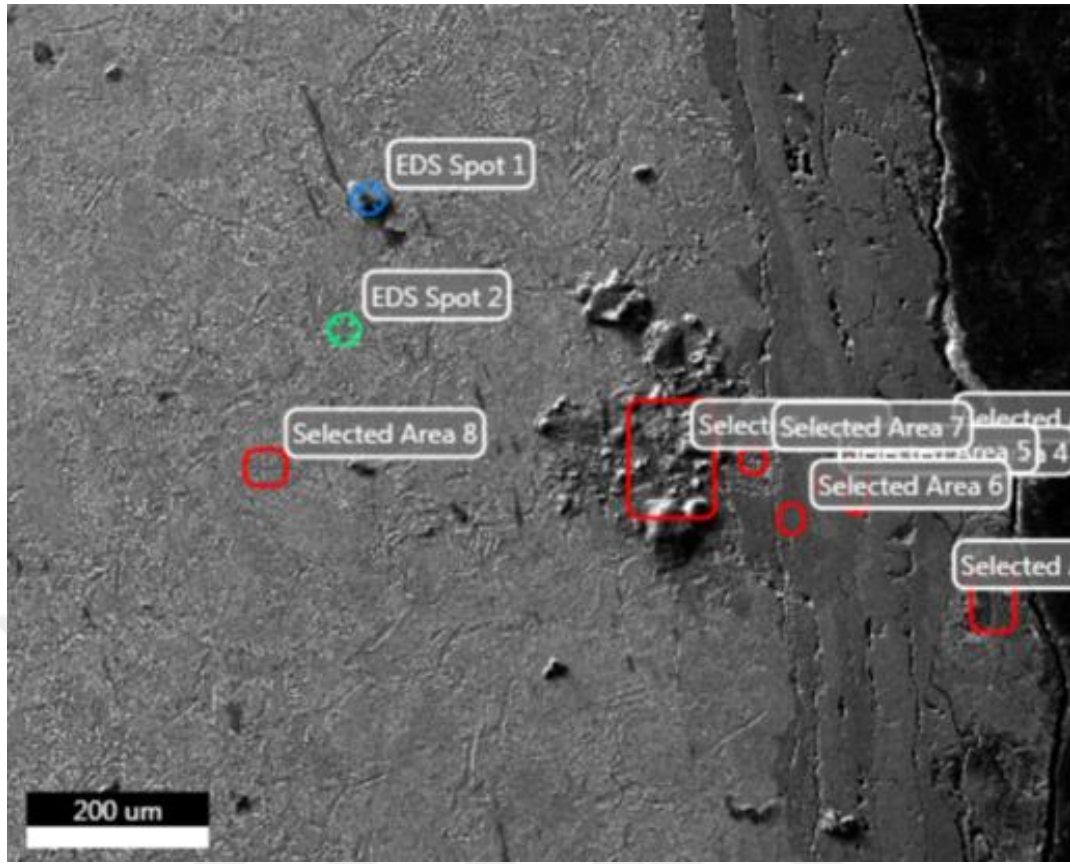
Tablo 4.23 Tarihi yapılardan alınan numuneler üzerinde yapılan mikroyapı analizleri karşılaştırılması (devamı)

Ferrit	51,07	68,80	44,72	82,07	72,54	72,39	83,02
Perlit	43,23	28,79	52,82		27,46	21,30	12,85
Boşluk / inklüzyon				16,60			

Selimiye Camii

Selimiye Camii'ne ait bakalit numunesi kesit yüzeyi dış demir oksit tabakasından diğer yüzeye kadar incelenmiştir. En üst katmanda ortalama 53,11 μm kalınlığında demir oksit tabakası gözlemlenmiştir. Demir oksit tabakasının hemen altında çukurlaşma ile kararan bir tabaka bulunmaktadır. Bu tabaka yaklaşık olarak 2 mm kalınlığındadır ve demir oksit tabakasından iç bölgeye doğru karbon açısından zengin olan perlitik bir mikroyapıya sahiptir. Bu bölgede yapılan SEM-EDAX element analizlerinde yüksek miktarda karbon tespit edilmiştir. Dövme işlemi sırasında odun kömürü kullanılmasından dolayı dış kısımda karbon açısından zengin bir tabaka meydana geldiği düşünülmektedir. Dış yüzeyde demir oksit tabakasının altında oluşan yapının sıcak dövme sırasında meydana gelmiş olduğu tahmin edilmektedir. Dış yüzeyden 2 mm derinliğe inildiğinde ferrit ve perlit fazlardan oluşan ana yapının başladığı gözlemlenmiştir. Ana yapının mikroyapıda %51,07 oranında ferrit ve %43,23 perlit fazdan oluştuğu tespit edilmiştir. Dış kesit yüzeyden alınan HV 5 makro sertlik testinde karbon açısından zengin bölgenin 228 HV5 sertliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Optik mikroskopta alınan mikroyapı görüntülerinde ana yapı içinde boşluklar olduğu tespit edilmiştir. Bu boşlukların dövme işlemi sırasında meydana geldiği tahmin edilmektedir.

Ferrit ve perlit mikroyapı diğer kesit yüzeyine kadar devam ederek ana yapıyı oluşturmaktadır. Kesit yüzeyden alınan makro sertlik ölçümünde 174,17 sertlik değeri tespit edilmiş olup ferrit ana yapısı için beklenen bir değerdir. Ana yapı bünyesinde dövme işlemi sırasında meydana gelen boşluklar ve inklüzyonların SEM-EDAX analizleri ile bileşimleri belirlenmiştir (Şekil 4.13). Kesit yüzeyinde yapılan SEM analizinde dış kabuk yüzeyinde Fe, O, Si ve Ca elementleri tespit edilmiştir (Tablo 4.24). Dış kabuk yüzeyinde demir elemanın tamamen oksitlendiği ve demir oksit oluşturduğu belirlenmiştir. Dış yüzeyde tespit edilen Ca ve Si elementlerin demir elemanın harç, tuğla vb. gibi malzemelerle temasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Malzeme iç yüzeye doğru analiz edildiğinde ferrit fazı spot 2'de, perlit fazı spot 1'de tespit edilmiştir. Spot 1'de yapılan analizde C, O, Fe, Na, Cl ve S pikleri tespit edilmiştir. Ana yapı içinde tespit edilen S'nin inklüzyon elementi olduğu ve bu bölgede dış etkilere kaynaklanan su ile temas sonucunda Na ve Cl tuzunun oluştuğu öngörülmektedir.



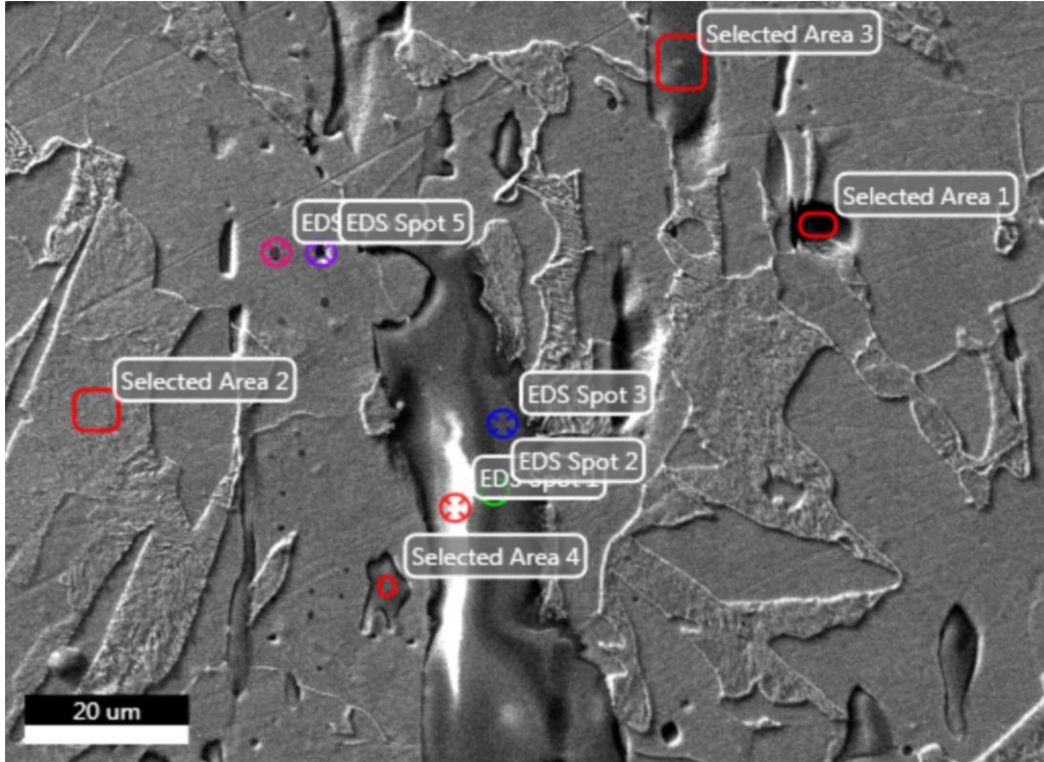
Şekil 4.13 Selimiye Camii numunesi SEM-EDAX analizleri- 1

Tablo 4.24 Selimiye Camii numunesi SEM-EDAX analizleri – 1 ile tespit edilen elementler

Element	Area 1	Area 2	Area 3	Area 4	Area 5	Area 6	Area 7	Area 8	Spot 1	Spot 2
C K		6.99							56,47	
O K	42.56	46,58	33.58	39.13	32.08	42.15	31.71		22,20	
FeK	56.53	34,95	66.42	60.87	67.92	57.85	68.29	100	20,02	100
SiK	0.91	5,85								
CaK		5,64								
S K									0,40	
NaK									0,48	
ClK									0,23	

SEM-EDAX analizlerinde numunenin iç bölgesinde bulunan boşluk ve inklüzyonların bileşimleri detaylı olarak incelenmiştir (Şekil 4.14). Spot 1’de beyaz bölgeden alınan elementer analizde Ca, Mg, Al ve O pikleri tespit edilmiştir (Tablo 4.25). Bu bölgede CaO esaslı inklüzyonların varlığı saptanmıştır. Aynı bölgede ayrıca P, K, Ti, Na ve Fe elementleri de düşük şiddette tespit edilmiştir. Spot 2’de koyu bölgede gerçekleştirilen SEM-EDAX analizinde yine Ca, Mg, Al ve O pikleri gözlemlenmiştir. Spot 3’te koyu bölgeden alınan elementer analizde ise farklı olarak Si elementi tespit edilmiş olup bu durum sıcak dövme işlemi sırasında kalsiyum alüminyum silikat formunda bir yapının çelik içerisinde kaldığını göstermektedir.

Area 3’te Ca, Al, Si, Ti, Na ve O piklerinin ağırlıklı olduğu tespit edilmiştir. Bu bölgede kalsiyum alüminyum silikat fazının meydana geldiği ve beraberinde Rutil (TiO₂) fazının da bulunduğu belirlenmiştir. Spot 4 ve Spot 5 analizlerinde yüksek oranda Fe tespit edilmiştir. Area 4’te yapılan analizde ise Area 3’ten farklı olarak Na elementi tespit edilmemiştir.



Şekil 4.14 Selimiye Camii numunesi SEM-EDAX analizleri – 2

Tablo 4.25 Selimiye Camii numunesi SEM-EDAX analizleri – 2 ile tespit edilen elementler

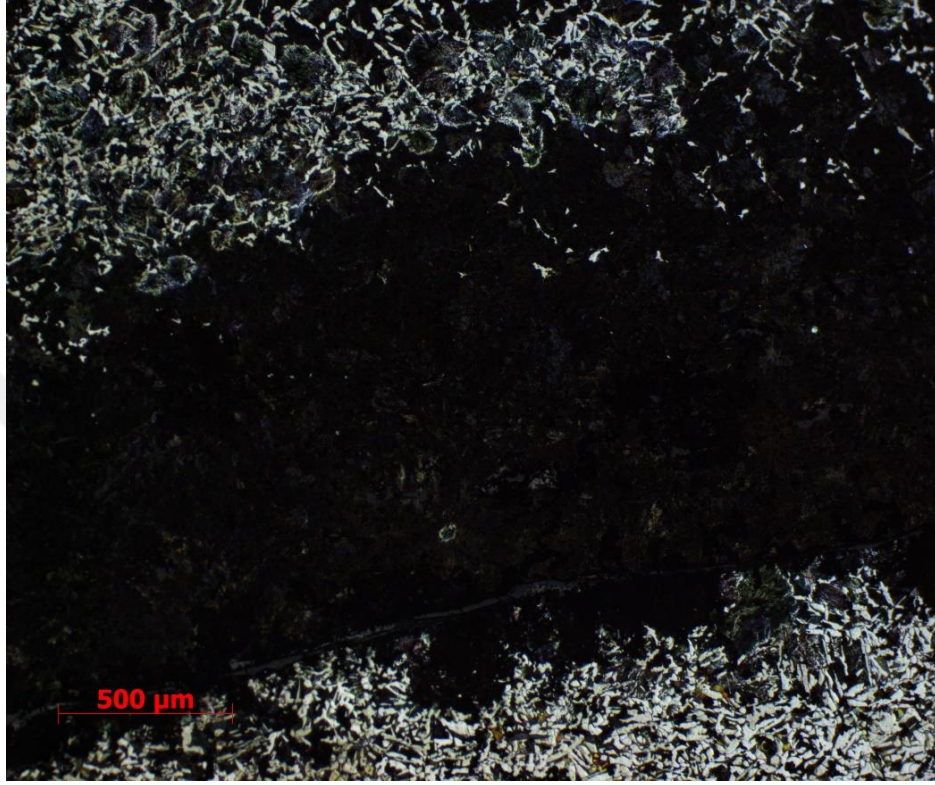
Element	Spot 1	Spot 2	Spot 3	Area 1	Spot 4	Area 2	Spot 5	Area 3	Area 4
C K									
O K	45,54	49,65	45,94	27,38				19,94	31,17
FeK	2,23			32,08	99,27	100	100	53,17	36,07
SiK			21,76	14,62	0,73			11,30	14,66
CaK	14,69	15,14	14,78	15,11				4,77	8,34
NaK	1,31		1,33					3,21	
ClK									
MgK	2,23	2,60	2,43	1,37				2,11	2,11
AlK	6,31	6,92	6,15	4,12				4,14	4,68
P K	1,05		1,02						0,57
K K	1,18		1,28	1,42				0,51	0,68
TiK	2,94	2,93	3,1	3,91				0,84	1,71

Rüstem Paşa Camii

Rüstem Paşa Camii'nde yapılan mikroyapı incelemelerinde ana yapının %68,80 ferrit ve %28,79 perlit fazlarından oluştuğu tespit edilmiştir. Ortalama 142,36 mikron kalınlığında bir demir oksit tabakası ölçülmüştür. Demir oksit tabakasının altında dövme işlemi sırasında oluştuğu düşünülen ve yaklaşık 800 mikron kalınlığında olan karbonca zengin bir sementasyon tabakasına benzer bir yapı gözlemlenmiştir (Şekil 4.15). Numunenin kararmış tabaka alt bölgesinde ferrit ve perlit fazlarını içeren ana yapı bulunmaktadır.

Numune kesit mikroyapısı incelendiğinde siyah bölgenin her iki tarafın farklı mikroyapı özelliklerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu bölgede sıcak dövme işlemi ile birleştirilen farklı demir numunelerin farklı mikroyapısal görüntüler sergilediği ve tane yönelmelerinin farklı olduğu gözlemlenmektedir. Merkez bölgesinden alınan mikroyapı görüntülerinde 50x, 100x ve 200x büyütmelemlerde dövme ile birleştirme sırasında meydana gelen çizgiler ve çevresinde bulunan farklı

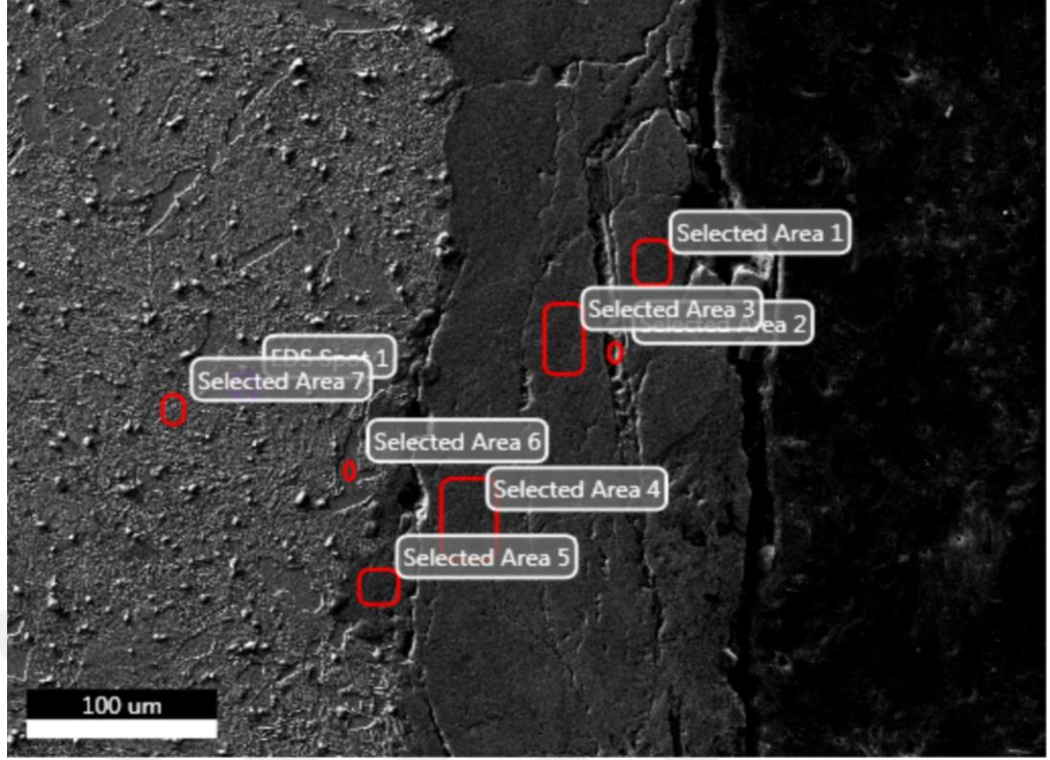
tane şekilleri görülmektedir. Yapılan makro sertlik ölçümlerinde ortalama 215,47 HV5 sertlik değeri tespit edilmiştir. Sertliğin yüksek olması numunenin birleşme bölgesinde meydana gelen sementasyon ve bu bölgelere yakın konumdaki perlit tabakasının varlığına bağlanmaktadır.



Şekil 4.15 Sementasyon tabakasının 50x yakınlaştırılmış görüntüsü

Kesit bölgesinde elde edilen mikroyapı sırasıyla sementasyon, ferrit+perlit, sementasyon+ferrit/perlit ve en dış tabakada sementasyon tabakası şeklinde heterojen bir yapı sergilemektedir. Birleştirme yapılan yerlerde inklüzyon ve boşluklar gözlemlenmiştir.

Demir oksit tabakasına yapılan elementer analizlerde Area 1-2-3-4 ve 5 numaralı alanlarda Fe ve O pikleri tespit edilmiştir (Şekil 4.16) (Tablo 4.26). Sadece Area 2'de Pb piki tespit edilmiştir. Bu elementin dış yüzeyden sisteme kirlilik olarak girdiği düşünülmektedir. Yaklaşık 150 mikron kalınlığa sahip demir oksit tabakasında gevrek olması nedeniyle çatlaklar meydana geldiği gözlemlenmiştir. En dış yüzeyde demir oksit tabakasında kopmaya hazır durumda ince bir kabuk tabakası ve altında meydana gelen boşluklar görülmüştür. Area 7'de yapılan SEM-EDAX analizinde %100 Fe tespit edilmiştir.



Şekil 4.16 Rüstem Paşa Camii numunesi SEM-EDAX analizleri – 1

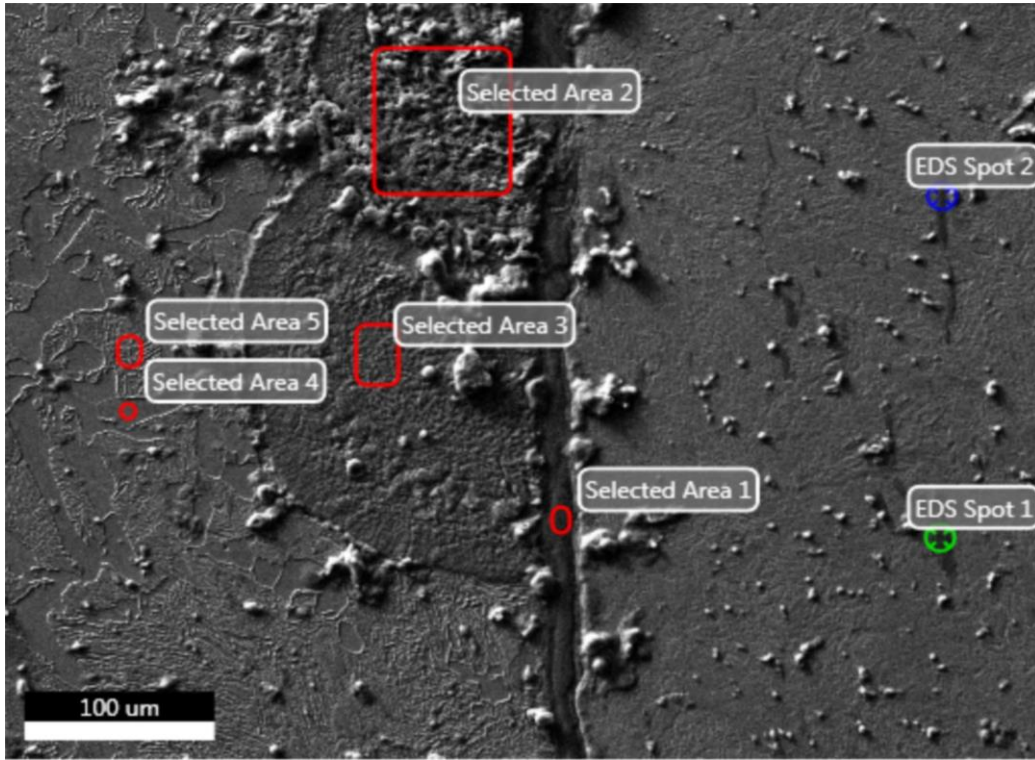
Tablo 4.26 Rüstem Paşa Camii numunesi SEM-EDAX analizleri – 1 ile tespit edilen elementler

Element	Area 1	Area 2	Area 3	Area 4	Area 5	Area 6	Spot 1	Area 7
O K	43,11	49,85	41,46	40,65	40,36		38,46	
FeK	56,89	34,43	58,54	50,35	58,68	100	61,54	100
SiK		5,71						
CaK		6,96			0,96			
PbK		3,05						

Yapılan SEM analizinde kesit bölgede dövme ile gerçekleştirilen sıcak birleştirme sonucunda oluşan çizgi net bir şekilde gözlemlenmiştir (Şekil 4.17). Area 1’de yapılan SEM-EDAX analizlerinde yüksek şiddette Fe, O, Si ve Al pikleri ile birlikte düşük şiddette Ca, Cl, P ve Ti pikleri tespit edilmiştir (Tablo 4.27). Ara bölgede demirin dövme sırasında oksitlendiği ve yaklaşık 10 mikron kalınlığında bir demir oksit tabakası oluştuğu belirlenmiştir. Spot 1 ve Spot 2’de, Ca, Al ve Si

elementlerinden oluşan ve dövme yönünde uzama gösteren kompleks inklüzyonlar gözlemlenmiştir.

Area 2 ve Area 3 bölgelerinden alınan SEM-EDAX analizlerinde birleştirme bölgesine yakın olan sınır bölgelerde demirin oksitlendiği ve demir oksit tabakasının numunenin iç bölgelerine doğru ilerleme gösterdiği tespit edilmiştir. Area 4 ve Area 5 bölgelerinden alınan SEM-EDAX analizlerinde bu bölgelerin ferrit fazlı ana yapı olduğu görülmüştür. Optik mikroskopta karanlık bölgeden alınan SEM-EDAX analizi ile dövme yapılarak birleştirilen bölgede demir oksit demir oksit tabakasının oluştuğu ve numune kesiti boyunca devam ettiği tespit edilmiştir.



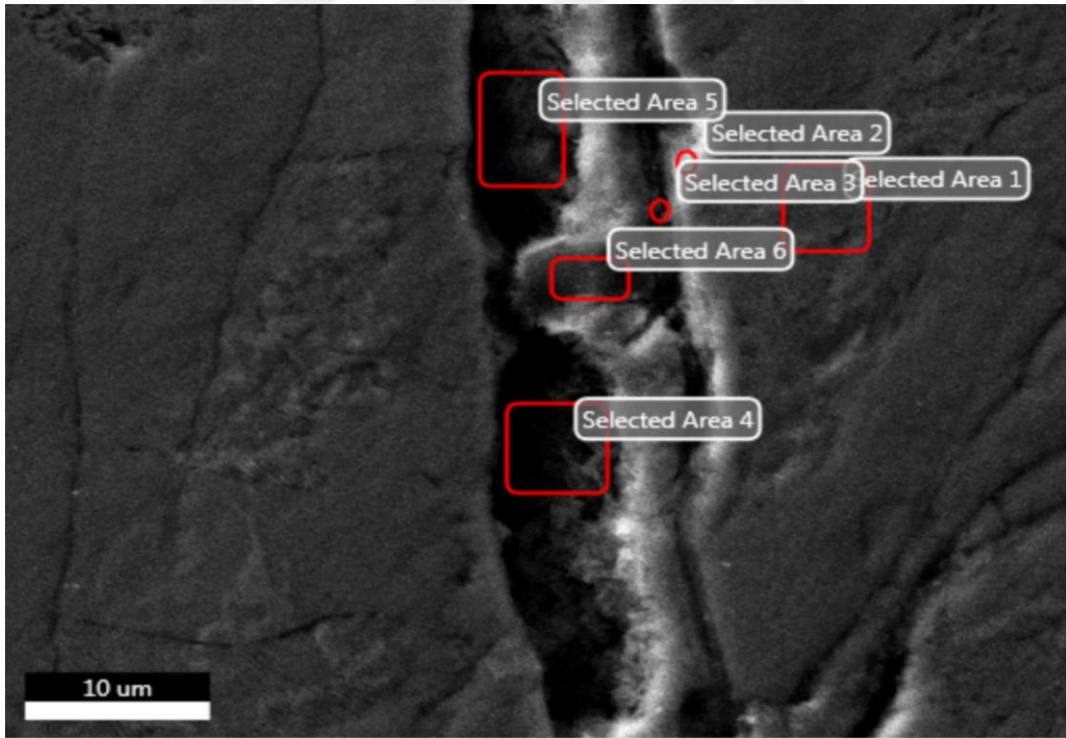
Şekil 4.17 Rüstem Paşa Camii numunesi SEM-EDAX analizleri- 2

Tablo 4.27 Rüstem Paşa Camii numunesi SEM-EDAX analizleri – 2 ile tespit edilen elementler

Element	Area 1	Spot 1	Spot 2	Area 2	Area 3	Area 4
C K		6,38				
O K	46,33	43,54	44,25	34,76	28,68	

Tablo 4.27 Rüstem Paşa Camii numunesi SEM-EDAX analizleri – 2 ile tespit edilen elementler (devamı)

FeK	26,58		4,98	63,89	71,32	100
SiK	14,54	23,68	25,20			
CaK	2,71	8,29	8,66			
NaK		2,45	2,39			
ClK	0,72			1,46		
MgK		2,36	2,20			
AlK	5,39	6,80	7,04			
P K	0,87	1,02				
K K	0,93	3,20	3,25			
TiK	1,93	2,27	2,04			



Şekil 4.18 Rüstem Paşa Camii numunesi SEM-EDAX analizleri – 3

Numune kesit yüzeyinde yapılan SEM-EDAX analizinde Ca, Si ve S inklüzyon elementleri tespit edilmiştir (Şekil 4.18) (Tablo 4.28). Area 1 analizine göre boşluk bölgesinin dövme işlemi sırasında oluştuğu ve çevresinde demir oksit tabakasının

meydana geldiği anlaşılmaktadır. Area 2’de tespit edilen kurşun pikinin sıcak birleştirme işlemi sırasında boşluk içinde kaldığı öngörülmektedir.

Tablo 4.28 Rüstem Paşa Camii numunesi SEM-EDAX analizleri - 3 ile tespit edilen elementler

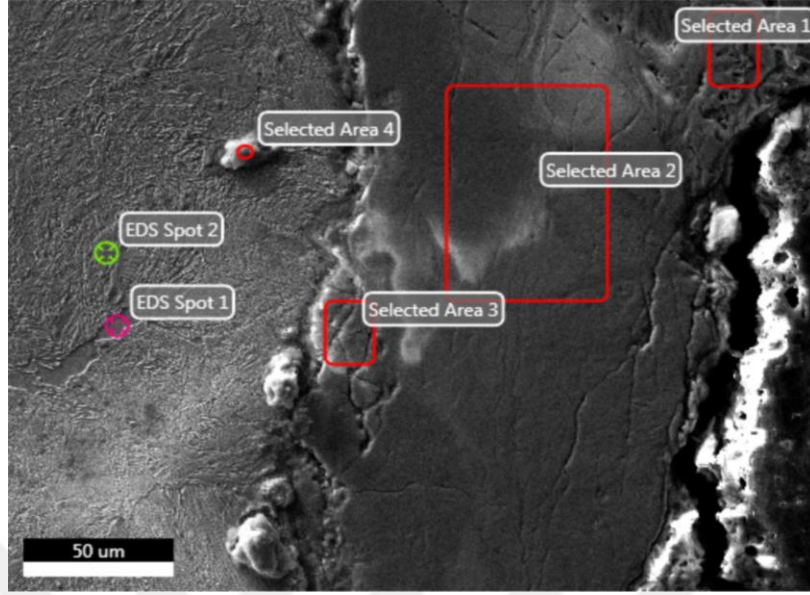
Element	Area 1	Area 2	Area 3	Area 4	Area 5	Area 6
OK	38,55	44,49	36,09	45,74	44,82	42,37
FeK	61,45	53,33	54,46	21,70	15,86	41,27
SiK		0,71	5,46	1,83	1,47	8,00
CaK		1,28	2,99	28,59	36,45	5,73
NaK						
SK			1,00	2,13	1,40	
PbK						2,64

Valide Sultan Camii

Valide Sultan Cami’nden alınan numunenin mikroyapı analizinde ana yapının ferrit ve perlit fazlarından oluştuğu belirlenmiştir. Diğer mikroyapı örneklerinde olduğu gibi kesit bölgesinde dövme işlemi sırasında oluşan çukur bölgelerde kararma gözlemlenmiştir. Bu bölgelerde sıcak dövme ile birleştirme yapıldığı düşünülmektedir. Mikroyapı görüntülerinde ferrit yapının içinde bulunan perlitlerin homojen olarak dağılmadığı gözlemlenmiştir. Bu durumun sıcak dövme işlemine bağlı olarak oluştuğu düşünülmektedir.

Yapılan makro sertlik testlerinde ortalama 200,94 değeri tespit edilmiştir. Değerin yüksek olması perlit oranının diğer fazlara göre daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum elde edilen mikroyapı görüntüleri ile doğrulanmıştır. Ortalama tane boyutunun daha düşük olması diğer numunelere kıyasla çekme dayanımının daha yüksek olduğunu göstermektedir. Numunenin dış yüzeyinde 355,98 mikron kalınlığında bir demir oksit tabakası oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu değer diğer karşılaştırma yapılan numunelere göre en yüksek kalınlık değeridir. Valide Sultan Camii’ne ait numunede toplam inklüzyon oranın 590,04 değeri ile diğer numunelere göre düşük mertebede olduğu tespit edilmiştir. SEM analizlerinde dış yüzeyde meydana gelen demir oksit tabakasında Fe ve O pikleri tespit edilmiştir

(Şekil 4.19) (Tablo 4.29). Demir oksit tabakasının gevrek olduğu ve üst yüzeye yakın bölgelerde kopmaya hazır parçaların bulunduğu görülmüştür.



Şekil 4.19 Valide Sultan Camii numunesi SEM-EDAX analizleri – 1

Tablo 4.29 Valide Sultan Camii numunesi SEM-EDAX analizleri – 1 ile tespit edilen elementler

Element	Area 1	Area 2	Area 3	Area 4	Spot 1	Spot 2
O K	38,22	39,09	38,67	36,13		
FeK	57,93	60,91	61,33	68,87	100,00	100,00
SiK	2,50					
CaK	1,35					

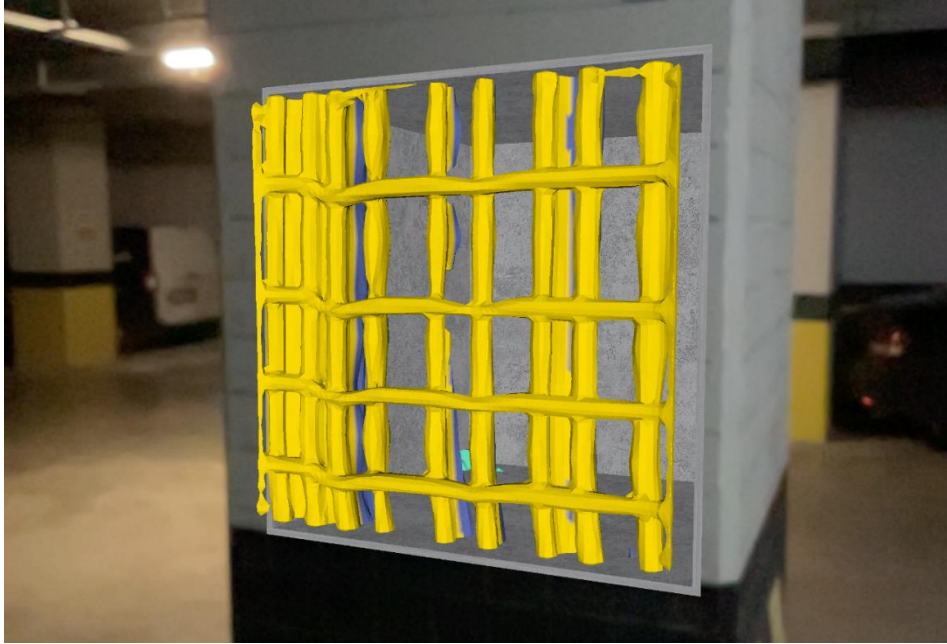
4.2 Tahribatsız Muayene Yöntemleri

Saha araştırmaları tarihi yapıya hasar vermeden tespit yapma imkânı sağlayan radar, manyetik indüksiyon, radyografi, ultrasonik dalga hızı, ultrasonik tomografi, termografi, darbe yansıma, videoskop, XRF ve phased array tahribatsız muayene yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. Araştırmalar tespitlerin daha verimli yapılabilmesi adına restorasyon sürecinde bulunan ve bu sayede yapıların neredeyse her noktasına ulaşılabilme imkânı bulunan Sultan Ahmet Camii, Selimiye Camii, Süleymaniye Külliyesi, Hekimoğlu Ali Paşa Camii ve Karadeniz Medresesi'nde yapılmıştır.

4.2.1 Radar

Saha çalışlarında Hilti PS 1000 X-Scan ve Proseq GP 8000 radar cihazları kullanılmıştır. Hilti PS 1000 X-Scan cihazının faydalı ölçüm derinliği 300 mm'dir. Proseq GP 8000 cihazının ise faydalı ölçüm derinliği 800 mm'dir.

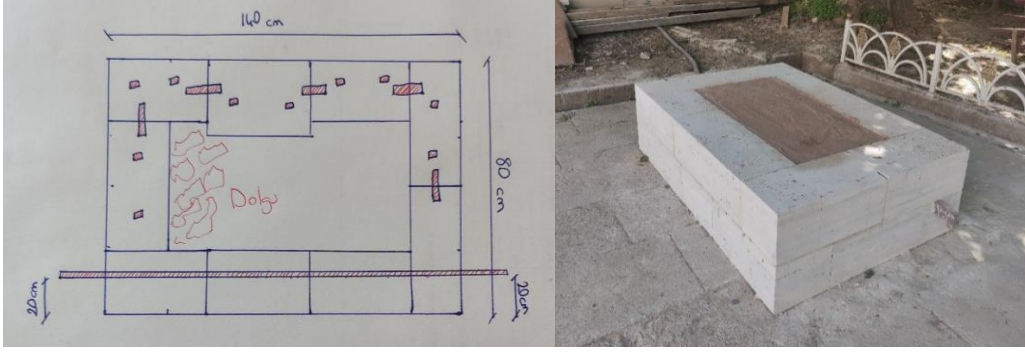
Söz konusu yöntem ile görüleceği üzere cihazdan cihaza fark olmakla birlikte betonarme yapılarda yüzeyden 80 cm derinliğe kadar olan çelik donatıların, paspayı kalınlığının ve yapıdaki kusurların tespiti yapılabilmektedir. Yapı bünyesinde bulunan farklı yoğunluğa sahip malzemelerden yansıyan elektromanyetik dalgalar farklı renklere bürünerek cihaz ekranına düşmektedir. Betonarme yapıda kullanılan malzemenin homojen şekilde dağılması ve bünyesindeki demir elemanların tahmin edilebilir konum ve boyutta olması yapılan radar okumasının kolay yorumlanabilmesini sağlamaktadır (Şekil 4.20). Diğer yandan tarihi yapılarda kullanılan örgü sisteminin kendi içinde heterojen bir dağılıma sahip olması nedeniyle cihaz ekranına düşen renklerin hangi malzemeye ait olduğunun yorumlanabilmesi ölçümü okuyan kişinin Osmanlı anıt mimarisi yapım tekniğine hâkim olması ile birebir ilişkilidir.



Şekil 4.20 Betonarme kolonun üç boyutlu radar ölçümü ve donatıların tespiti

Radar yönteminin tarihi yapılarda kullanılan strüktürel demir elemanların tespitinde kullanılabilirliğini test etmek amacıyla deney düzeneği duvar oluşturulmuştur (Şekil 4.21). Duvar içerisine belli aralıklar ile taşları birbirine yatayda ve düşeyde

bağlayan kenet ve zıvana yerleştirilmiştir. Duvarın bir yüzüne ise duvar boyunca devam eden gergi elemanı yerleştirilmiştir. Kullanılan tüm demir elemanlar tarihi yapılardan işlevini yitirmesi nedeniyle uzaklaştırılmış özgün dövme demir elemanlardır.



Şekil 4.21 Deney düzeneği planı ve deney düzeneği

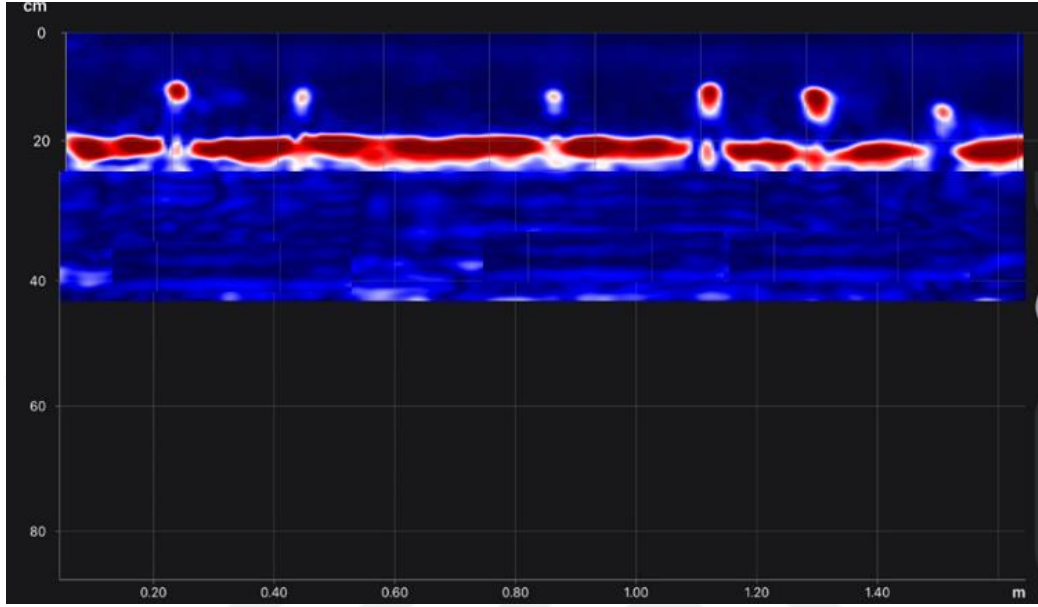
Gergi elemanı duvar yüzeyinden 20 cm derinliğe konumlandırılmıştır. Kenet ve zıvanalar ise 10 cm ila 20 cm arası derinliğe rastgele yerleştirilmiştir. Ayrıca bazı bölgelerde kenet ve zıvana boşlukları bırakılmış fakat boşluklara demir eleman yerleştirilmemiştir. Deney düzeneğinin ortası özgün sıralı kesme taş duvar örgü sisteminde olduğu şekilde moloz taş ve horasan harç ile doldurulmuştur.



Şekil 4.22 Deney düzeneği radar ölçümü

23.05.2022 tarihinde sahaya davet edilen Hilti ekibi ve 11.08.2022 tarihinde sahaya davet edilen Troy-Met ekibi ile oluşturulan deney düzeneği üzerinde radar ölçümleri yapılmıştır (Şekil 4.22).

Deney düzeneği bünyesinde yer alan demir elemanların yüzeyden gömülü oldukları derinlik en fazla 20 cm olması sebebiyle faydalı ölçüm derinliği 30 cm olan PS 1000 X-Scan cihazı ve faydalı ölçüm derinliği 80 cm olan Proseq GP 8000 cihazı ile demir elemanların tespitleri yapılabilmektedir (Şekil 4.23).



Şekil 4.23 Deney düzeneğinin içerisindeki gergi elemanının radar görüntüsü

Duvarda bırakılan kenet ve zıvana boşlukları ise yine cihazlar tarafından süreksizlik olarak algılanmış olup tıpkı demir elemanlarda olduğu gibi cihaz ekranına kırmızı renk olarak düşmüştür. Bu gibi durumlara karşı tarihi eser bünyesinde bulunan ve radar cihazı ekranına düşen görüntülerin her ne kadar yorumlayan kişiler tarafından demir elemana ait olduğu belirtilse de tespitin doğru ve güvenilir olduğundan bahsedebilmek için çoğu kez birden fazla yöntemin kullanılması gerekmektedir.

Deney düzeneğinde cihazların deneme ölçümleri gerçekleştirildikten sonra tarihi eserler üzerinde ölçümlere geçilmiştir. İlk ölçümler restorasyonun devam etmesinden dolayı caminin birçok noktasına ulaşma imkânı bulunan Sultan Ahmet Camii'nde yapılmıştır.

1985 yılında UNESCO Dünya Miras Listesi'ne "İstanbul'un Tarihi Alanları" adı altında dahil edilen Sultan Ahmet Camii, 20 binden fazla çini ve mavi tonlu kalem işleri ile dikkat çeken yapısı nedeniyle yabancılar tarafından "Blue Mosque" olarak da anılmaktadır. Bu camii, Osmanlı Padişahı I. Ahmet tarafından Mimar Sinan'ın öğrencisi Sedefkar Mehmet Ağa'ya yaptırılmıştır. Sedefkar Mehmet Ağa, Mimar

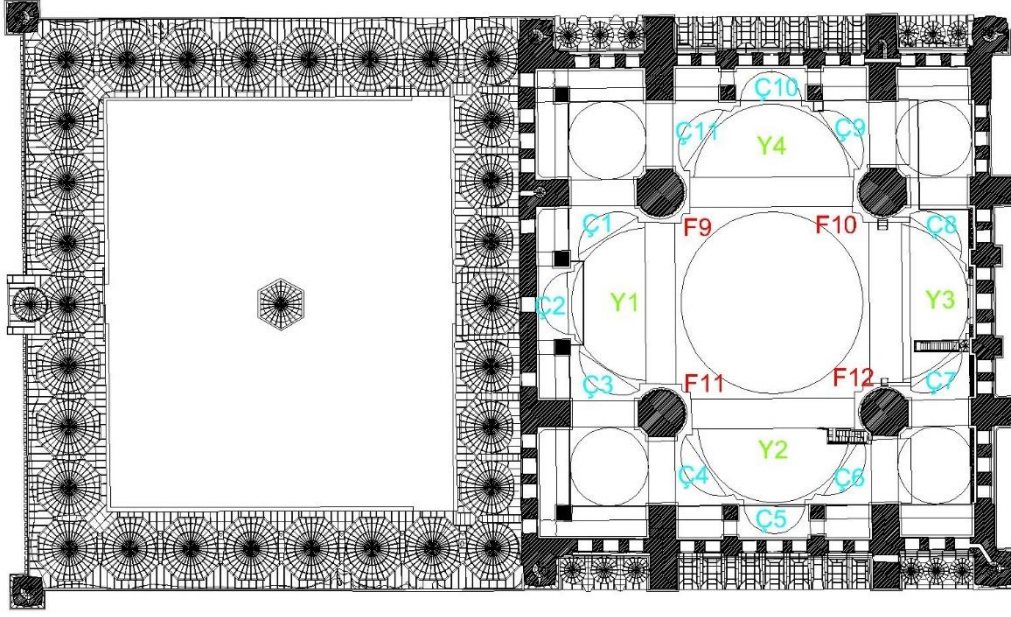
Sinan'ın etkisi altında yetişmiş olup bu etki, Sultan Ahmet Camii'nin tasarımında belirgin bir şekilde kendini göstermiştir. Caminin ana kubbesi ve etrafındaki dört yarım kubbenin oluşturduğu mekânsal düzen, Mimar Sinan'ın çıraklık döneminde yaptığı Şehzade Camii'nin bir yansımasıdır. Kütle elemanlarının düzeni ve sıralanışı ile sofaların ve payandaların biçimleri ise, Mimar Sinan'ın kalfalık döneminde inşa ettiği Süleymaniye Camii'nden izler taşımaktadır (Nayır, 1975).

Sultan Ahmet Külliyesi'nin bir parçası olan cami, külliye yapıları arasında inşasına başlanan ilk yapıdır ve 1616 yılında ibadete açılmıştır. Bu yapı, Osmanlı Devleti'nin ilk altı minaresine sahip camisi olmasıyla dikkati çekerken, büyüklüğü ve ihtişamıyla klasik dönem Osmanlı anıt mimarisinin son örneği olarak günümüze kadar varlığını sürdürmüştür (Şekil 1). Caminin anıtsal boyutlara ulaşmasında, şüphesiz strüktürel demir elemanların kullanımı önemli rol oynamaktadır (Şekil 4.24).



Şekil 4.24 Sultan Ahmet Camii İç Görünüşü (Özcan, 2019)

Caminin ibadet alanı, 64 x 72 metre ölçülerinde olup, ana kubbenin yüksekliği 43 metre ve çapı 23,5 metredir. Ana kubbeden gelen yükler, dört ana askı kemer ve bu kemerlere oturan dört temel taşıyıcı fil ayağı aracılığıyla temele iletilmektedir (Şekil 4.25). Yarım ve çeyrek kubbelerden gelen yüklerin bir kısmı ana kemerler üzerinden fil ayaklarına iletilirken, diğer bir kısmı ise harim duvarları üzerinden temele iletilmektedir.



Şekil 4.25 Sultan Ahmet Camii fil ayakları (F), yarım (Y) ve çeyrek (Ç) kubbeleri

23.05.2022 tarihinde sahada bulunan Hilti ekibi, 11.08.2022 ve 01.09.2022 tarihlerinde Troy-Met ekibi ile Sultan Ahmet Camii fil ayakları, harim duvarları, kubbe örtüsü ve revaklı avluda ölçümler gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak Sultan Ahmet Camii'nin ana taşıyıcı dört fil ayağının içerisinde yer alan demir elemanlar radar yöntemi ile tespit edilmeye çalışılmıştır. Dairesel kesitli ve yivli formda olan fil ayakları, kubbeyi taşıyan ana kemerlerin üzengi noktasından başlayarak kubbe üst örtüsüne kadar olan bölümde, yapı içine gömülü bir şekilde ilerlemektedir. Kubbe üstünde ise fil ayakları ağırlık kuleleri formunda görülmektedir. Ağırlık kuleleri, kubbe eteğinde yer alan uçan payandalar ile birlikte kubbeye destek sağlamaktadır. Bu tasarım, Sultan Ahmet Camii'nin mimarisinde estetik bir bütünlük ve yapısal sağlamlık oluşturmak amacıyla kullanılmıştır.

Sultan Ahmet Camii fil ayakları 5,50 metre çapında olup dıştan yazı kuşağının üst kotuna kadar mermer malzeme ile kaplanmıştır. Bu yükseklikten sonra taş malzeme ile kaplanan fil ayaklarının iç kısımlarında dolgu malzeme olduğu düşünülmektedir.

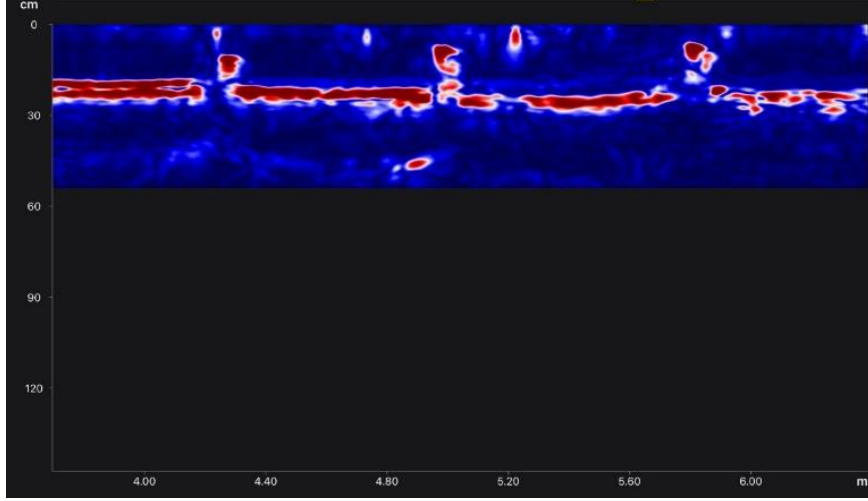
Radar ölçümleri restorasyon sırasında kurulan platform kotuna isabet eden fil ayağı üzerinde yer alan yazı kuşağı üzerinde yapılmıştır (Şekil 4.26). Yazı kuşağı fil ayağı üzerine kaplanmış mermer plakalar üzerinde yer almaktadır. Mermer plakalar kavisli formda olup düşeyde aynı boyutta olmakla birlikte yatayda değişik ölçülerde aralarında derz boşluğu olacak şekilde fil ayağına kaplanmıştır.



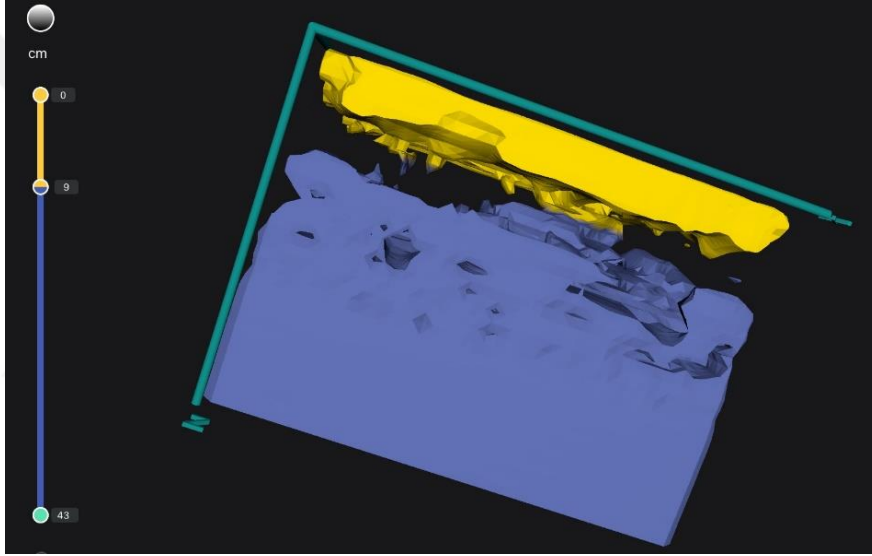
Şekil 4.26 Sultan Ahmet Camii fil ayağı radar taraması

Yapılan ölçümler sonucunda takribi 20 cm derinliğinde mermer plakalar boyunca devam eden bir süreksizlik tespit edilmiştir (Şekil 4.27). İlk yapılan yorumlamada fil ayağını çepeçevre saran bir kuşaklama elemanın varlığı düşünülmüştür. Ön çalışma kapsamında örülen deney düzeneği ölçümlerinde de bırakılan boşluklar radar cihazı tarafından aynı demir elemanlarda olduğu gibi kırmızı renkte tespit edilmiştir. Bu durum teyit amaçlı üç boyutlu tarama yapma ihtiyacını doğurmuştur. Üç boyutlu taramada mermer kaplama ile kaplandığı yüzey arasında bir boşluk tespit edilmiştir (Şekil 4.28). Cihaz ekranında beliren ve ilk bakışta demir elaman ait olduğu düşünülen süreksizliklerin aslında hava boşluğuna ait olduğu görülmüştür.

Diğer yandan mermer plakaların arasındaki derz boşluklarına denk gelen noktalarda yüzeyden yaklaşık 10 cm derinlikte yine bir süreksizlik tespit edilmiştir (Şekil 4.27). Bu süreksizliğin ise yüzeyden derine doğru giden ve mermer plakaları fil ayağının çekirdek kısmına bağlayan demir elemana ait olduğu yorumu yapılmıştır (Şekil 4.29).



Şekil 4.27 Sultan Ahmet Camii fil ayağı iki boyutlu radar görüntüsü

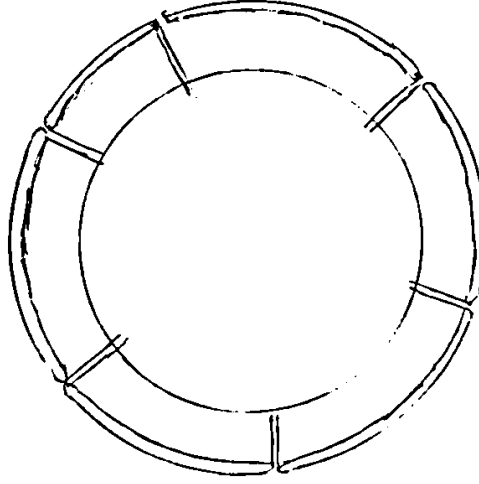


Şekil 4.28 Sultan Ahmet Camii fil ayağı üç boyutlu radar görüntüsü

Literatürde camii taşıyıcı ayaklarında demir kullanıma ait bilgiye Bayram ve Tüzen (1991) tarafından hazırlanan Üsküdar Ayazma Camii ve Ayazma Camii İnşaat Defteri adlı çalışmada rastlanılmaktadır (Şekil 4.30). Camiye ait inşaat defterinde demir kullanım yeri olarak camii ayakları derini tariflenmektedir. Ayaklarda belirli aralıklarda yerleştirilmiş demir elemanın varlığından bahsedilmektedir.

Fil ayağının ardından ölçümlere camii taşıyıcı duvarlarında devam edilmiştir. Caminin harim mahali taşıyıcı duvarları yaklaşık 2 metre genişliğinde olup iki taraftan sıralı kesme taş örgüye sahiptir. Duvarın çeşitli kotlarından duvar içine gömülü taşıyıcı demir kuşaklamalar geçmektedir. Bulundukları konumlara göre

değişmekle beraber tespitine çalışılan strüktürel demir eleman duvar yüzeyinden takribi 30 cm derinde yer almaktadır.

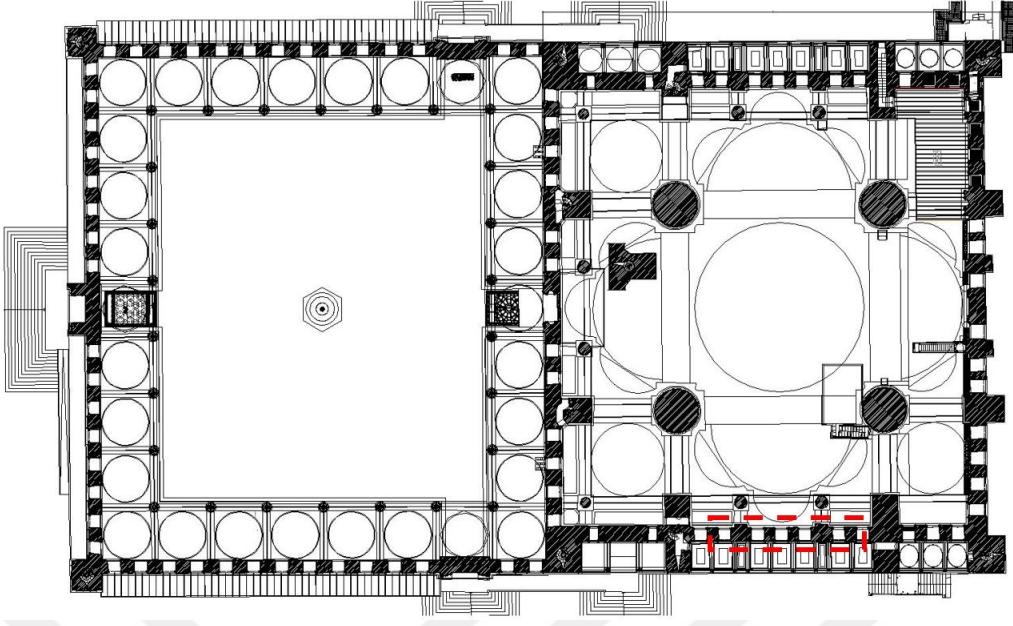


Şekil 4.29 Sultan Ahmet Camii fil ayağı mermer kaplamalarının demir elemanlar ile çekirdeğe ankrajı

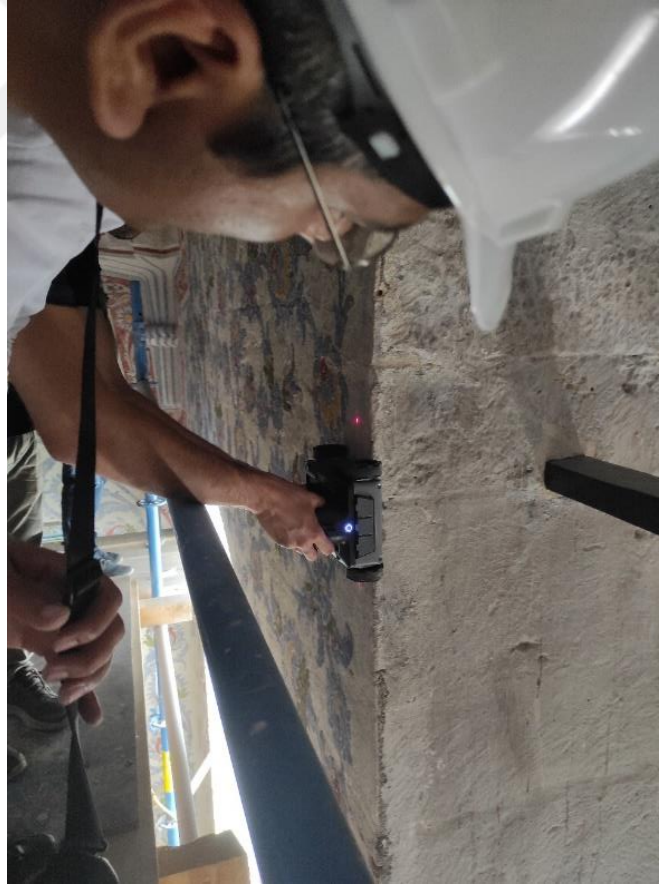
AN-LEVAZİM-I AHEN, KİRİŞ VE CİVATA VESAIR			
SIRA	CİNSİ	ADEDİ	KIYMETİ
1	Çar duvarlarına hatlık için kebir giriş simit ve etek takım (4)	549 parça 30.243.5 kıyye	37
2	Camii ayakları derununa ve kırmalar üzerine timur giriş	29 Adet 907,5 kıyye	kıyyesi 36
3	Abdest oda-t humâyunu altına bağlama ve mahfel yollarına ve direk başlıklarına demir civata ve giriş fazladan	43 adet 2295 kıyye — 1241 Fazladan = 1054	kıyyesi 36
4	Camii Şerif dergâh kapusunun kafe tahtası üzerine timur giriş	3 adet 155 kıyye	kıyyesi 36
5	Camii Şerif'in son cemaat kemerlerinin üzerine ve kubbe kafe tahtası üzerine demir giriş	32 adet 1722 kıyye	kıyyesi 36
YEKUN			1.268.788
İki defa Canib-i miriden alınan ücret-i cam 880x700			— 616.000
			= 652.788
BE-HESABI KURUŞ 5.439 KURUŞ 108 AKÇE			

Şekil 4.30 Üsküdar Ayazma Camii inşaatında kullanılan demir elemanlar
(Bayram & Tüzen, 1991)

Strüktürel demir elemanın bir kısmının pencere açıklığından geçmesi nedeniyle gözle tespiti yapılabilmektedir. Duvar içinden devam eden söz konusu demir elemanın tespiti yapı radar cihazı ile yapılmaya çalışılmıştır (Şekil 4.31, Şekil 4.32).

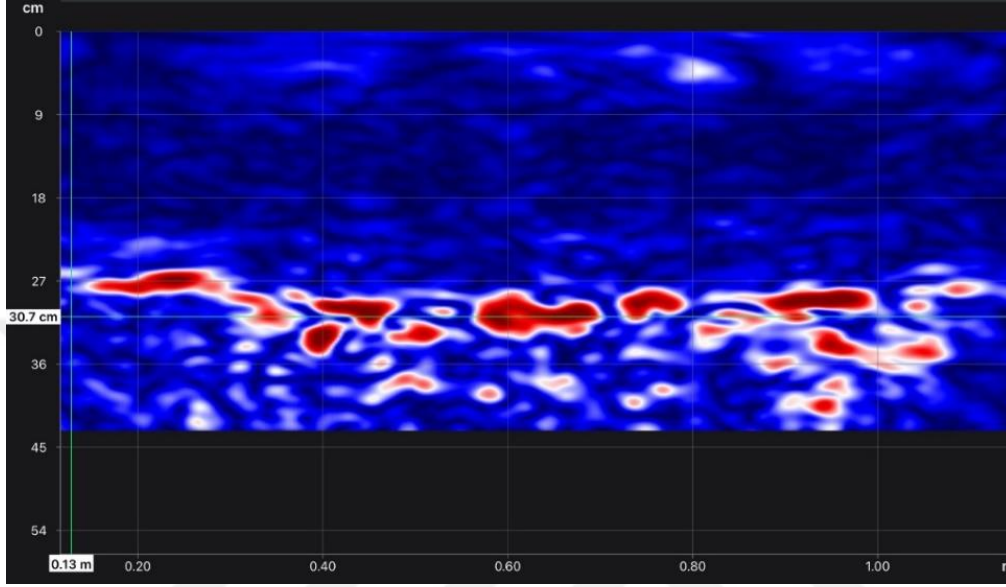


Şekil 4.31 Radar yöntemi ile tespiti çalışılan Sultan Ahmet Camii strüktürel kuşaklama elemanının bulunduğu taşıyıcı duvar alanı



Şekil 4.32 Sultan Ahmet Camii harim taşıyıcı duvarında radar ölçümü

Yapılan ölçüm neticesinde kuşaklamanın geçtiği derinlikte cihaz ekranında mütemadi giden bir süreksizlik tespit edilmiştir (Şekil 4.33). Her ne kadar ekrandaki süreksizlik yer yer netliğini yitirse de duvar boyunca gittiği yorumlanabilmektedir. Fakat ekrana düşen süreksizliğe ait görüntüden santimetre hassasiyetinde kesit bilgisi almak mümkün olmamıştır.

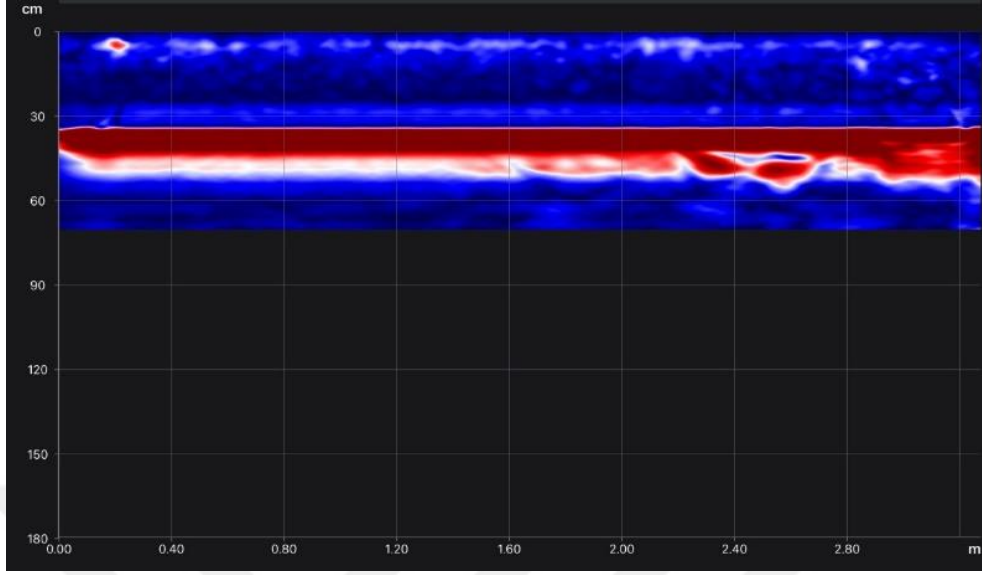


Şekil 4.33 Sultan Ahmet Camii harim taşıyıcı duvarında yer alan demir kuşaklamanın radar görüntüsü

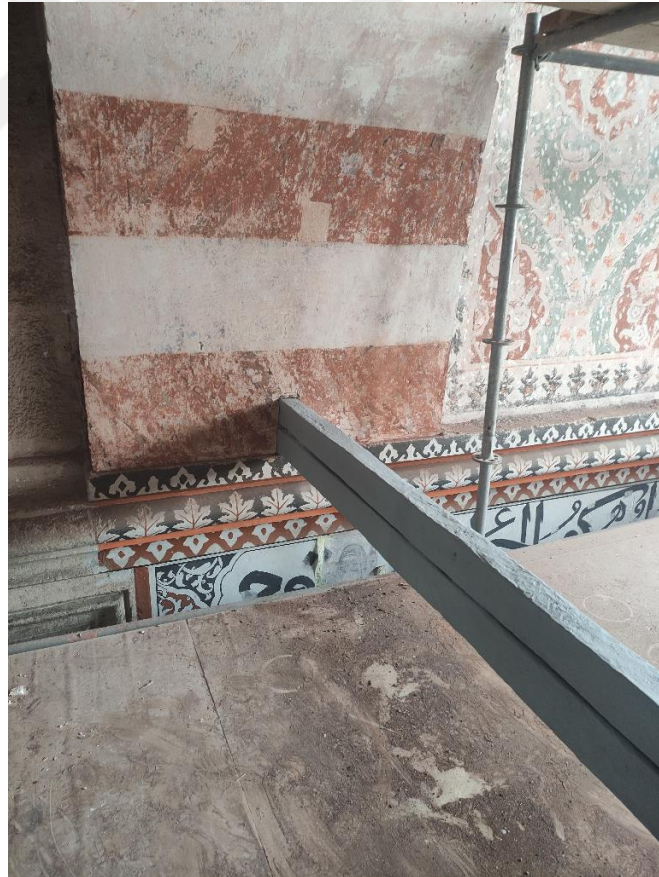
Sultan Ahmet Cami'nde yapılan son ölçüm çeyrek kubbe üst örtüsünde gerçekleştirilmiştir. Camii ana kubbesinde restorasyon sırasında strüktürel demir kuşaklama tespit edilmiştir. Aynı durumun çeyrek kubbede olması ihtimaline karşın radar ile Ç5 çeyrek kubbesinde tarama yapılmıştır (Şekil 4.25). Yapılan tarama sonucu demir elemana rastlanılmamıştır. Radar görüntüsünde net bir şekilde kubbe sathı sonrası yüzeyden yaklaşık 35 cm ileride yer alan kurşun örtüsünün tespiti yapılmıştır (Şekil 4.34).

Radar cihazı ile ölçümlerin gerçekleştirildiği diğer tarihi yapı Edirne'de yer alan ve 2011 yılında UNESCO Dünya Miras Listesine alınan Selimiye Camii'dir. 1575 yılında yapımı tamamlanan eserin mimarı Mimar Sinan olup Osmanlı klasik dönem anıt mimarisinin en güzel örneklerinden biridir. Camii duvarları çift taraftan sıralı kesme taş örgü yapım tekniği ile örülmüştür. Camiye etki eden çekme kuvvetlerini karşılamak amacıyla harim duvarlarını birçok kotta çepeçevre saran strüktürel demir elemanlar kullanılmıştır (Şekil 4.35). Caminin tümünde çekme gerilmelerini

karşılayan 240 adet çeşitli kesit ve boylarda taşıyıcı demir eleman tespit edilmiştir (Avunduk, 2021).



Şekil 4.34 Sultan Ahmet Camii Ç5 çeyrek kubbesi radar görüntüsü

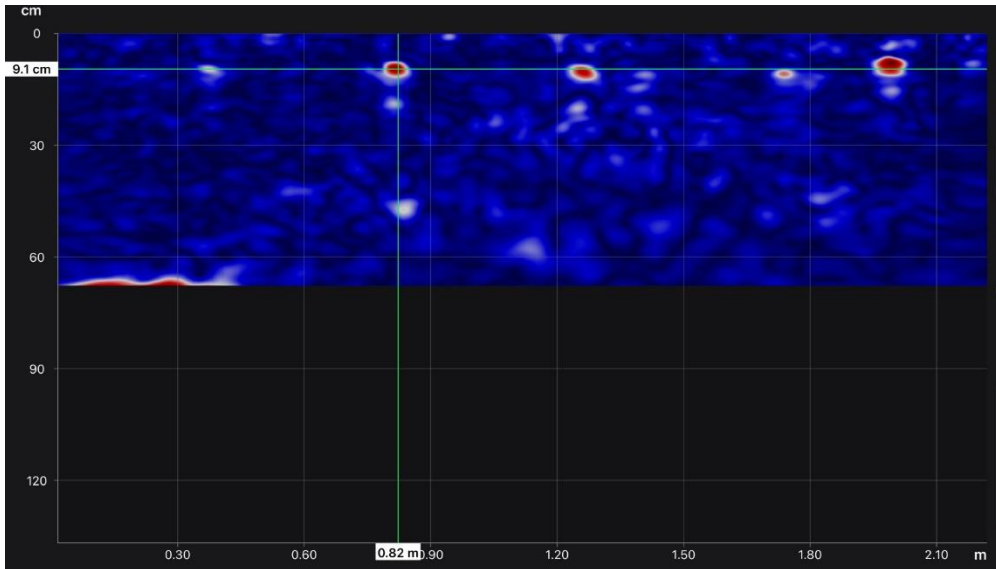


Şekil 4.35 Selimiye Camii demir gergileri

Restorasyon sürecinde olan Selimiye Cami'nde 04.03.2023 tarihinde camii ana kubbe, yarım kubbe, pandantif ve revaklı avlu kubbelerinde radar ölçümleri yapılmıştır (Şekil 4.36). Gerçekleştirilen ölçümler neticesinde yapının taşıyıcı duvarlarında yer alan ve çekme gerilmelerini karşılayan mütemadi demir elemanlara üst örtüde yer verilmediği tespit edilmiştir. Bununla birlikte cihaz ekranında bölgesel süreksizlikler belirlenmiştir (Şekil 4.37).



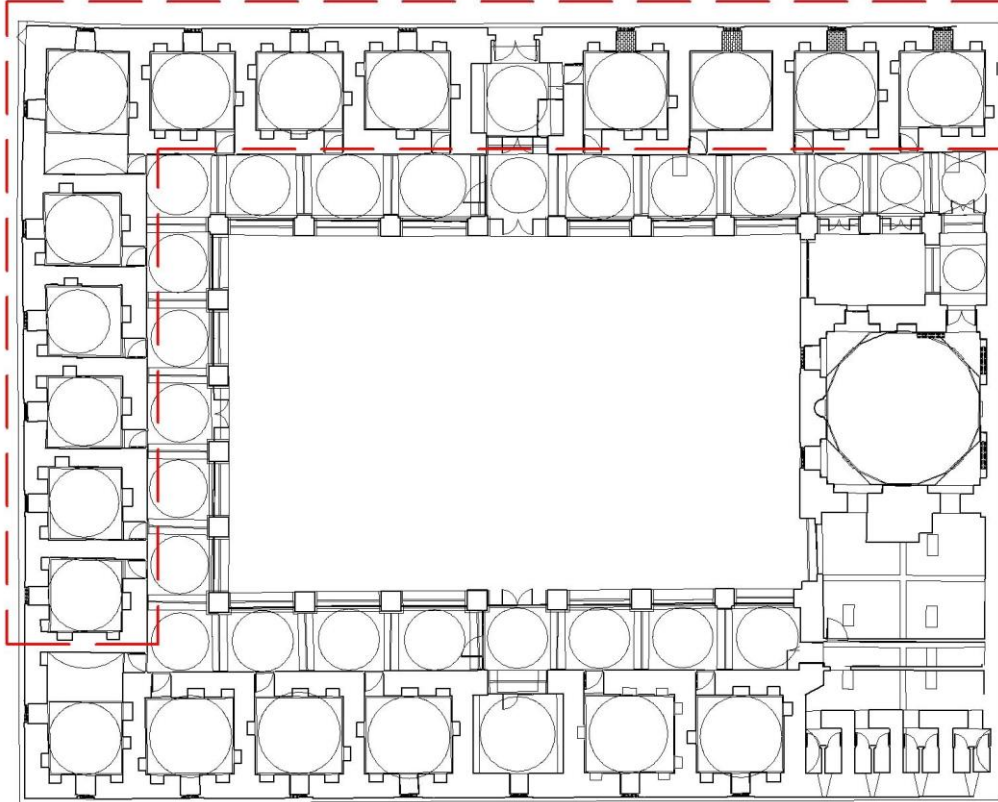
Şekil 4.36 Süleymaniye Camii ana kubbesi radar ölçümü



Şekil 4.37 Selimiye Camii ana kubbesi radar görüntüsü

Süreksizliklerin kesitleri göz önünde bulundurulduğunda bunların zıvana ya da kenet formunda demir elemanlar olabileceği düşünülmektedir. Diğer yandan belirlenen süreksizliklerin hava boşlukları ya da başka bir malzeme olabileceği göz ardı edilmemelidir. Söz konusu durumun netleştirilmesi için diğer tahribatsız muayene cihazları ile radar ölçümünün desteklenmesi gerekmektedir.

Edirne’de yer alan Selimiye Cami’nde yapılan ölçümlerin ardından radar cihazının denemelerine İstanbul ili, Fatih ilçesinde yer alan Karadeniz Medreselerinde devam edilmiştir. Karadeniz medreseleri Fatih Külliyesi bünyesinde yer alan iki medrese topluluğundan biridir. Karadeniz medreseler topluluğunda baş kurşunlu, çifte baş kurşunlu, çifte ayak kurşunlu ve ayak kurşunlu medresesi yer almaktadır. Her medrese on dokuz oda ve bir dershaneye sahiptir (islamansiklopedisi, 2024).



Şekil 4.38 Karadeniz Başı Çifte Kurşunlu Medresesinde radar yöntemi ile demir tespitine çalışılan alan

06.03.2023 tarihinde radar cihazı ile eser bünyesinde yer alan demirlerin tespitinin yapılması amacıyla sahaya gelinmiştir. Sahada yapılan ilk tespit yapıda özgün dönemine ait olmayan, dönem eki olarak adlandırabileceğimiz çok sayıda kılıçlama elemanın varlığı olmuştur. Duvar içinde yüzeyden çeşitli derinliklerde geçen

kılıçlamalar cephede kendini göstermektedir. Radar cihazı ile söz konusu kılıçlamaların duvar içinde mütemadi şekilde devamlılığı tespit edilmeye çalışılmıştır (Şekil 4.38, Şekil 4.39).



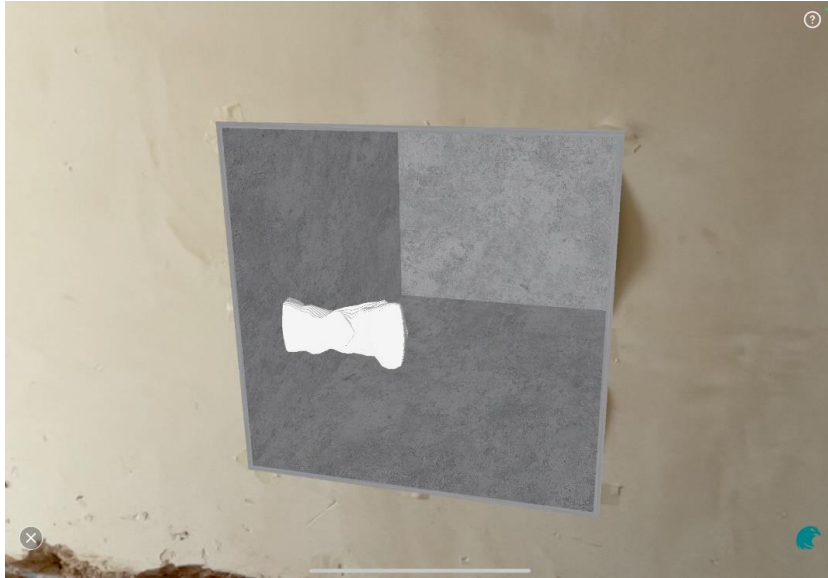
Şekil 4.39 Karadeniz Medresesi demir kılıçlamaların tespit çalışmaları

Yapının moloz taş örgü olması radar ölçümlerini zorlaştırmıştır. Duvar malzemesinin heterojen dağılıma sahip olması doğru yorumlamayı güçleştirmekte dolayısıyla radar ölçümlerinin verimliliği azaltmaktadır. Eserde en net ölçüm verileri üç boyutlu tarama yöntemiyle duvar yüzeyine yakın kılıçlama elemanlarından sağlanmıştır (Şekil 4.40).

Duvar yüzeyinden yaklaşık 10 cm derinlikte yer alan kılıçlama elemanının duvar içerisinde net olarak mütemadi şekilde devam ettiği görülmüştür. Fakat demir elemanların kesitlerinden doğru şekilde bahsetmek mümkün olmamaktadır. Yapılan bir tespitte ise kılıçlama elemanın bir noktada son bulduğu görülmektedir (Şekil 4.41).



Şekil 4.40 Karadeniz Medresesi demir kılıçlamaların üç boyutlu radar ölçümü ile tespiti



Şekil 4.41 Karadeniz Medresesi demir kılıçlamamanın 3 boyutlu radar görüntüsü

Radar cihazı ile birçok klasik dönem Osmanlı eserinde tespitler yapılmıştır. Fakat tez de yer alan çalışmaların üzerine verilecek diğer örneklerin konuyu tekrardan öteye taşımayacağı düşüncesi ile yapılan ölçümlerin aktarımına burada son verilmiştir.

4.2.2 Manyetik İndüksiyon

Tahribatsız muayene yöntemlerinin bir diğer yöneme göre avantajları olduğu gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Radar cihazı duvar içine gömülü her çeşit malzemenin tespitini yapılabilse de malzemenin cinsine yönelik bir veri verememektedir. Diğer yandan manyetik indüksiyon yöntemi ile sadece metal elemanların tespiti yapılabilmekte olup demir elamanın varlığını veri olarak sağlamaktadır. Bu noktada manyetik indüksiyon yönteminin duvar yüzeyinden faydalı ölçüm derinliğinin yalnızca 18 cm olması karşımıza yöntem adına bir handikap olarak karşımıza çıkmaktadır. Osmanlı anıt mimarisi yapım tekniğinde kullanılan duvar içerisindeki demir elemanların konumları nedeniyle söz konusu faydalı ölçüm derinliği bazı durumlarda yetersiz kalmaktadır.



Şekil 4.42 Deney düzeneğinde yer alan demir elemanların manyetik indüksiyon yöntemi ile tespiti

Yöntemin saha denemelerinde manyetik indüksiyon prensibini kullanan muayene cihazları olan Proceq Profometer 630 AI ve Hilti PS 300 kullanılmıştır. Ölçümlerin yapılması için Hilti firması ekipleriyle 17.03.2022, Troy-Met firması ekipleriyle 11.08.2022 restorasyon uygulamalarının devam ettiği Sultan Ahmet Camii'nde toplanılmıştır.

İlk uygulama şantiye alanında hazırlanan deney düzeneği üzerinde yapılmıştır (Şekil 4.42). Deney düzeneğinin örümü sırasında yerleştirilen demirlerin konumları bilindiğinden dolayı cihazın doğruluğu test edilebilmiştir. Yüzeyden takribi 20 cm derinliğe kadar yerleştirilmiş olan demir elemanlar manyetik indüksiyon cihazı ile tespit edilmiştir. Cihaz demir elemanların varlığının yanında yüzeyden olan derinliğini de veri olarak sağlamıştır.

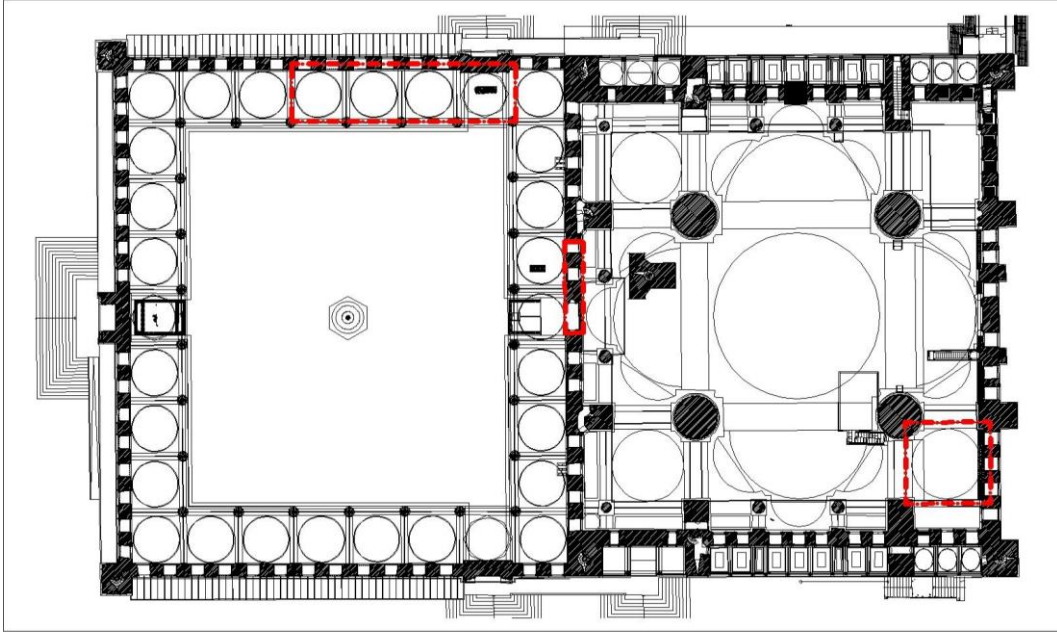
Deney düzeneği üzerinde yapılan ön çalışmanın ardından Sultan Ahmet Camii üzerinde testlere geçilmiştir. Daha öncesinde camii fil ayaklarında radar çalışması ile tespit edilen malzemelerin demir olup olmadığı manyetik indüksiyon yöntemi ile teyit edilmeye çalışılmıştır (Şekil 4.25). Radar cihazı ile yapılan tespit sonucu fil ayaklarının çepeçevre demir olduğu düşünülen bir eleman ile sarıldığı yorumu yapılmıştır. Söz konusu demir eleman plakaların derz aralarına denk gelen kısımda son bulmuştur. Derz aralarında ise tekil fakat derine doğru ilerleyen demir elemanlar tespit edilmiştir (Şekil 4.43).



Şekil 4.43 Sultan Ahmet Camii fil ayağı manyetik indüksiyon yöntemi ile tespit çalışmaları

Yapılan manyetik indüksiyon ölçümü neticesinde plakalar boyunca devam eden ve derz aralarında son bulan elemanların demir olmadığı cihazın ölçüm sırasında tepki vermemesi nedeniyle anlaşılmıştır. Radar cihazının gösterdiği süreksizliğin aslında hava boşluğuna ait olduğu kanaatine varılmıştır. Diğer yandan derz aralarına denk gelen tekil elemanların ise demir olduğu teyit edilmiştir. Söz konusu demir elemanların mermer plakaları fil ayağının merkezine bağladığı düşünülmektedir.

Fil ayağında yapılan ölçümlerin ardından restorasyon sırasında tespit edilen camii harim üst örtü kubbeleri ve revaklı avlu kubbelerinde yer alan demir çekme çemberlerinin manyetik indüksiyon yöntemi ile tespitine yönelik taramalar yapılmıştır (Şekil 4.44).



Şekil 4.44 Manyetik indüksiyon yöntemi ile tespit yapılan alanlar

Restorasyon sırasında tespit edilen çekme çemberleri gerekli konservasyon çalışmaları yapıldıktan sonra etrafı kireç ile doldurulmuş ardından yüzey horasan harcı ile sıvanmıştır. Yapılan uygulamaların ardından demir eleman yüzeyden 10 ila 15 cm derinde kalmıştır (Şekil 4.45).



Şekil 4.45 Sultan Ahmet Camii revaklı avlu kubbesinde yer alan demir elemanı

Revaklı avlu kubbe yüzeyinde yapılan manyetik indüksiyon ölçümü sonucu cihaz uyarı vermiş ve mütemadi demir elamanın varlığını ortaya koymuştur. Bu ölçüm kubbe satırlarında yer alan çekme çemberlerinin herhangi bir söküm yapmadan söz konusu yöntem ile tespitin yapılabilceğini göstermektedir.

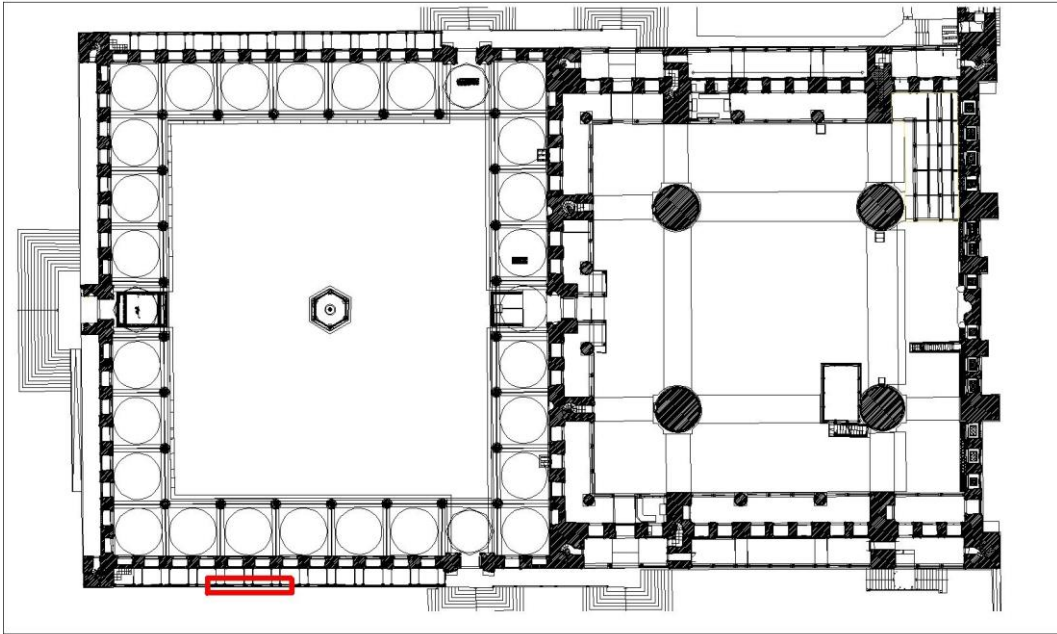
Son olarak harim duvarlarında manyetik indüksiyon yöntemi ile taramalar gerçekleştirilmiştir. Sultan Ahmet Camii'nin birçok kotunda duvar içine gömülü strüktürel kuşaklama elemanı yapıyı çepçevre sarmaktadır. Söz konusu demir elemanlar pencere kotları gibi bazı noktalarda görülür hale gelmektedir. Yüzeyden takribi 30 cm derinden geçmekte olan demir elemanların tespiti ne yazık ki cihazın faydalı ölçüm derinliğinin 18 cm olması nedeniyle mümkün olmamıştır. Fakat duvar içinde sıralı kesme taş örgünün birleştirici elemanları olan kenet ve zıvanaların olduğunu tahmin ettiğimiz tekil demir elemanların tespiti mümkün olmuştur.

4.2.3 Radyografi

Radyografi yöntemi ile saha ve fabrika ortamında taş elemanların bünyesinde bulunan demir elemanların tespitine yönelik denemeler gerçekleştirilmiştir. Sahada gerçekleştirilen uygulamada Baltospot markasına ait Ceram35 model x-ray cihazı

kullanılmıştır. Ceram35 300 kV ve 5 Ma özelliklerine sahip portatif bir x-ray cihazıdır. Fabrikada GE Sensing & Inspection Technologies firmasına ait Eresco 52 Mf4-C1 model portatif cihaz kullanılmıştır. Cihaz 300 kV ye kadar güç üretebilme kapasitesine sahiptir. Söz konusu cihazlar ile yapılan ölçüm sonuçları The Cr Specialists marka bilgisayarlı radyografi cihazı ile film ortamından bilgisayar ortamına alınmıştır.

Sahada ölçümler gerçekleştirmek için 09.09.2022 tarihinde Troy-Met firması ile restorasyon çalışması devam eden Sultan Ahmet Camii'nde toplanılmıştır. Sahada ilk ölçüm yeri olarak camii revaklı avlu dışında yer alan şadırvanların üst kotunda bulunan sütun başları seçilmiştir (Şekil 4.46).



Şekil 4.46 Radyografi yönteminin test çalışmasının yapıldığı alan

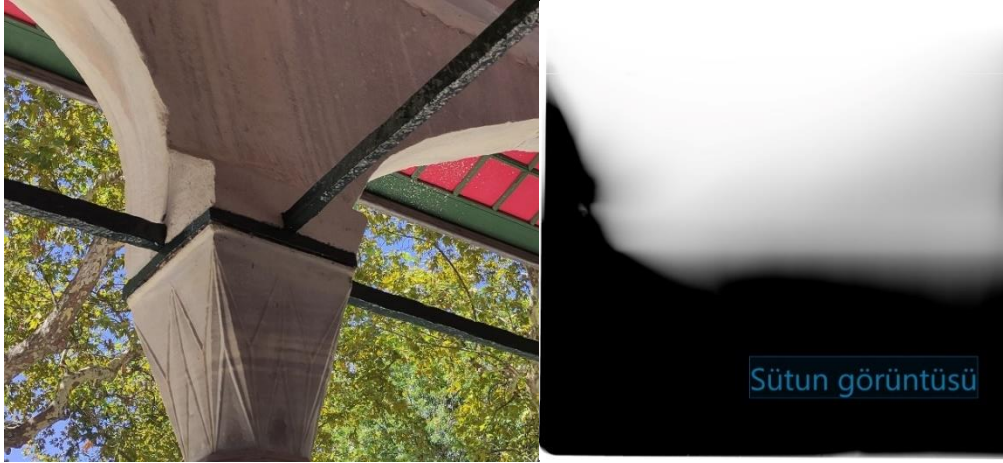
Sütun başlarına iki doğrultuda gergi demirleri saplanmaktadır. Sütun başlarına saplanan gergi demirlerinin uç kısımları 90 derece eğilerek sütun başında yer alan ve simit olarak isimlendirilen yuvarlak demir eleman içine yerleştirilmektedir. Sonrasında simidin içi harç ya da kurşun ile doldurulmaktadır. Radyografi yöntemiyle bahse konu detayın tespiti yapılmaya çalışılmıştır (Şekil 4.47).



Şekil 4.47 Sultan Ahmet Camii sütun başlarında radyografi yöntemi ile tespit çalışması

Radyografi yönteminde görüntünün düştüğü film tabakası ölçümün gerçekleştirileceği sütun başının arkasına yerleştirilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken bir husus film tabakası üzerinde öncesinde kalan bir görüntü olması ihtimaline karşı test öncesi yüzeyi silinmelidir. Test yüzeyinin hazırlanmasının ardından X ray tüpü çalıştırılmıştır. Ölçüm sırasında X ray cihazının yaydığı ışınların insan sağlığına zarar vermesi nedeniyle güvenlik önlemleri alınmıştır. Ölçüm sahası etrafına güvenlik şeridi çekilmiş ve ölçüm boyunca çevrede zararlı ışınların değerleri ölçülmüştür.

Toplam on beş dakika süren ölçümden sonra film tabakası bilgisayarlı radyografi ölçüm cihazına yerleştirilerek görüntü bilgisayar ekranına aktarılmıştır. Elde edilen görüntüde sütun başı içinde yer alan simit detayına ulaşamamıştır. Görüntü tamamen tek bir kütle olarak oluşmuştur. 40 x 40 cm kesite sahip mermer sütun başı X ray ışınlarının neredeyse tamamını absorbe ederek film tabakasına ulaşmasını engellemiştir (Şekil 4.48).



Şekil 4.48 Sütun başı ve radyografi görüntüsü

Sütun başında yapılan testin ardından daha ince kesitli numune üzerinde test yapılmasına karar verilmiştir. 20 cm kesitinde olan bir taşın orta aksına iki adet zıvana yerleştirilmiştir. Zıvanalar taşa yerleştirilirken birinin boşluğu daha uzun bırakılmış ve boşluğun tespiti de yapılması amaçlanmıştır. Söz konusu taş üzerinde yapılan toplam beş dakikalık bir ölçüm sonrası film tabakası bilgisayarlı radyografi ölçüm cihazına yerleştirilmiş ve görüntü bilgisayar ortamına alınmıştır. Şekil 4.49'da görüleceği üzere 20 cm kesitindeki taş malzemenin içerisine yerleştirilen zıvanaların tespiti bu ölçümde başarıyla yapılmıştır. Ayrıca hava boşluğunun bulunduğu kısımda radyografi ölçümü ile tespit edilebilmiştir.

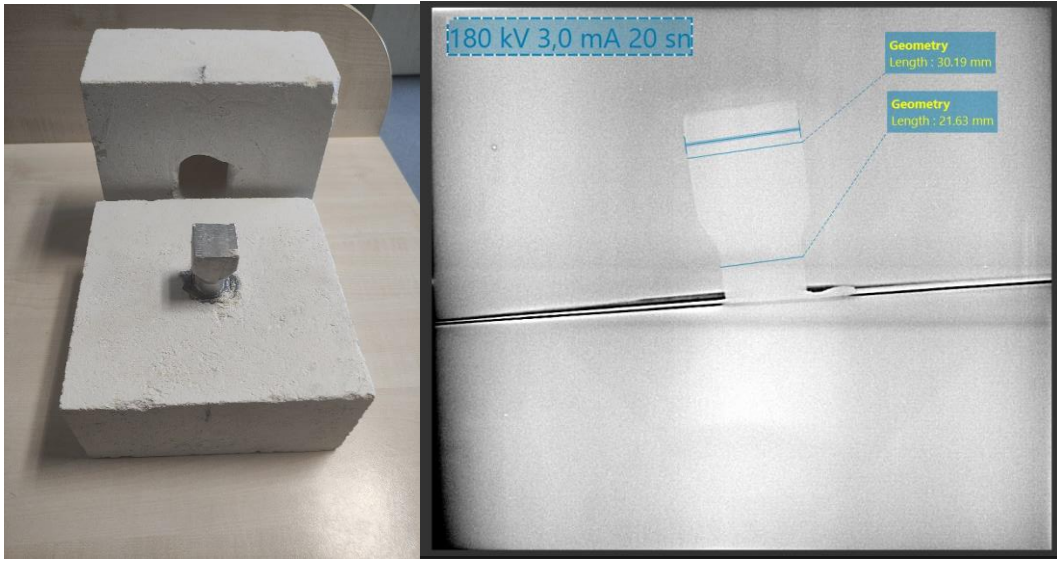


Şekil 4.49 Kesme taşın içinde yer alan demir elamana ait radyografi görüntüsü

Sahada yapılan ölçümlerin ardından radyografi yöntemiyle kurşuna gömülü demir elemanın tespitine yönelik çalışma gerçekleştirmek adına numune hazırlanmıştır. Numune 20 cm x 20 cm x 20 cm boyutlarında taş olup tam orta aksında demir

zıvana eleman içermektedir. Zıvananın bir ucu taşın içinde boşa iken diğer ucu kurşun ile kaplanmıştır.

Numune üzerindeki testler fabrika ortamında GE Sensing & Inspection Technologies firmasına ait Eresco 52 Mf4-C1 model portatif radyografi cihazı ile gerçekleştirilmiştir. 20 saniyelik bir ölçümün ardından elde edilen görüntüde net şekilde zıvananın etrafında yer alan kurşun ve hava boşluğunun ayrımı yapılabilmektedir (Şekil 4.50). Diğer yandan etrafı kurşun ile doldurulmuş olan kesitin demir ve kurşun kısımlarının ayrımını yapmak mümkün olmamıştır.



Şekil 4.50 Kesme taş içinde yer alan demir zıvananın radyografi görüntüsü

4.2.4 Ultrasonik Dalga Hızı

Ultrasonik dalga hızı yönteminde yüksek frekanslı ses dalgaları kullanılmaktadır. Ses dalgalarının teste tabi tutulan malzemenin bünyesinde bulunan süreksizlikten yansımaları sonucu söz konusu süreksizliğin konumu ve kesiti tespit edilmektedir.

Ultrasonik tomografi cihazının 200 cm olan faydalı ölçüm derinliğine nazaran ultrasonik dalga hızı faydalı ölçüm derinliği çok daha fazladır. Tarihi yapıların kesitleri göz önünde bulundurulduğunda söz konusu yöntem ile yapılacak ölçümlerin önünde mesafe anlamında herhangi bir kısıt bulunmamaktadır.

Proceq PI 8000 (Pundit Impact) cihazı ile ultrasonik dalga hızı yönteminin tarihi yapılarda demir elemanların tespitinde kullanılabilirliği test edilmiştir. Bu amaçla

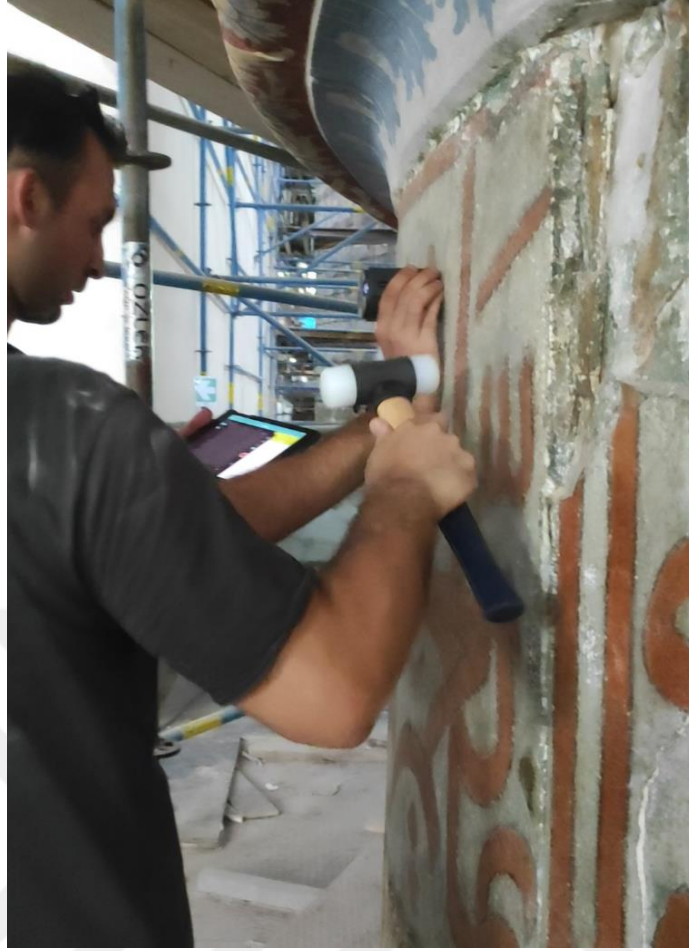
Troy-Met ekibi ile birlikte 01.09.2022 tarihinde restorasyon sürecinde bulunan Sultan Ahmet Camii şantiyesinde toplanılmıştır.

Cihaz ile ilk ölçüm denemesi tahribatsız muayene yöntemlerinin deneme ölçümlerinin yapılması için oluşturulan ve içerisinde yer alan demir elemanların konum ve boyutlarının bilindiği deney düzeneği duvar üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.51).



Şekil 4.51 Deney düzeneği içerisinde yer alan demir elemanların ultrasonik dalga hızı yöntemiyle tespit çalışması

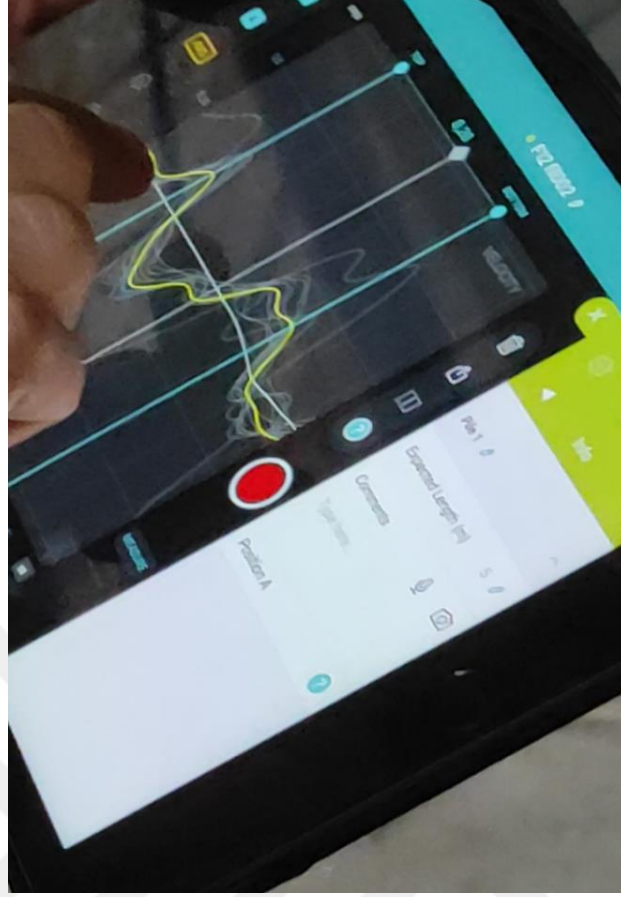
Deney duvarı üzerinde yapılan ölçümlerde demir elemanların konumlarının bilinmesi nedeniyle cihaz ekranında görünen ses dalgalarındaki kırılmaların sebebi demir elemanların varlığına bağlanmıştır. Daha sonra Sultan Ahmet Camii yapısı üzerinde ultrasonik dalga hızı yöntemi ile ölçümlere geçilmiştir (Şekil 4.25, Şekil 4.52).



Şekil 4.52 Sultan Ahmet Camii fil ayağında ultrasonik dalga hızı tespit çalışması

Fil ayağında yapılan ölçüm sonuçları deney düzeneğinde elde edilen sonuçlar kadar rahat yorumlanamamıştır. Deney düzeneğinde bilinen malzemeler ve konumları, ölçüm sonuçlarının kolay yorumlanabilir olmasını sağlamıştır.

Cihaz ekranında fil ayağında yer alan ve farklı yoğunluklara sahip malzemeden dolayı ses dalgalarındaki kırılmalar görülmektedir (Şekil 4.53). Dalga hızındaki artış ve azalışlardan muhakkak malzemenin yoğunluk tahminleri yapılabilir. Bu tahminler doğrultusunda fil ayağı kesitindeki malzeme dağılımları üzerinde yorumlar yapılabilmiştir. Örneğin orta kısmının moloz dolgu olabileceği daha sonra malzeme yoğunluğunun az olduğundan dolayı aderansını kaybetmiş bir harç tabakasının bulunabileceği gibi yorumları yapmak mümkündür. Fakat söz konusu yöntem ile yapılan çalışmalar neticesinde diğer yöntemlere nazaran bir demir elemanı tespit etmek, onun hakkında boyut tahmininde bulunmak mümkün görülmemektedir.



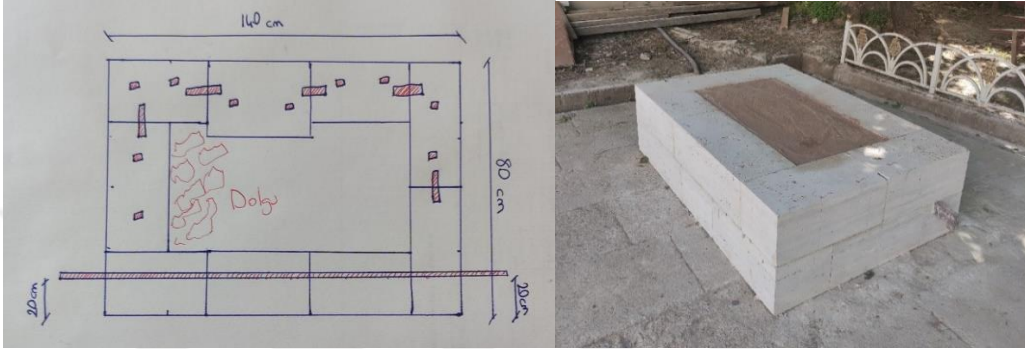
Şekil 4.53 Ultrasonik dalga hızı cihaz ekran görüntüsü

4.2.5 Ultrasonik Tomografi

Ultrasonik Tomografi yönteminin sahada denemeleri Proceq PD 8050 (Pundit Array) Beton Tomografi Cihazı ile gerçekleştirilmiştir. 24 adet proba sahip olan cihaz ile 200 cm derinliğe kadar malzemenin bünyesinde bulunan süreksizliklerin tespiti mümkündür.

Cihazdan gönderilen ses dalgaları malzeme bünyesinde bulunan farklı yoğunluğa sahip malzemelerden yansıyarak cihaz ekranına düşmektedir. Betonarme yapıda kullanılan malzemenin homojen şekilde dağılması ve bünyesindeki demir elemanların tahmin edilebilir konum ve boyutta olması yapılan ultrasonik tomografi okumasının kolay yorumlanabilmesini sağlamaktadır. Diğer yandan tarihi yapılarda kullanılan örgü sisteminin kendi içinde heterojen bir dağılıma sahip olması nedeniyle radar yönteminde olduğu gibi cihaz ekranına düşen renklerin hangi malzemeye ait olduğunun yorumlanabilmesi ölçümü okuyan kişinin Osmanlı anıt mimarisi yapım tekniğine hâkim olması ile birebir ilişkilidir.

Ultrasonik tomografi yönteminin tarihi yapılarda kullanılan strüktürel demir elemanların tespitinde kullanabilirliğini test etmek amacıyla deney düzeneği duvar oluşturulmuştur (Şekil 4.54). Duvar içerisine belli aralıklar ile taşları birbirine yatayda ve düşeyde bağlayan kenet ve zıvana yerleştirilmiştir. Duvarın bir yüzüne ise duvar boyunca devam eden gergi elemanı yerleştirilmiştir. Kullanılan tüm demir elemanlar tarihi yapılardan işlevini yitirmesi nedeniyle uzaklaştırılmış özgün dövme demir elemanlardır.



Şekil 4.54 Deney düzeneği planı ve deney düzeneği

Gergi elemanı duvar yüzeyinden 20 cm derinliğe konumlandırılmıştır. Kenet ve zıvanalar ise 10 cm ila 20 cm arası derinliğe rastgele yerleştirilmiştir. Ayrıca bazı bölgelerde kenet ve zıvana boşlukları bırakılmış fakat boşluklara demir eleman yerleştirilmemiştir. Deney düzeneğinin ortası özgün sıralı kesme taş duvar örgü sisteminde olduğu şekilde moloz taş ve horasan harç ile doldurulmuştur.

24.08.2022 ve 01.09.2022 tarihlerinde sahaya davet edilen Troy-Met ekibi ile deney düzeneği ve Sultan Ahmet Camii üzerinde söz konusu yöntem ile ölçümler yapılmıştır (Şekil 4.55).

İlk olarak cihazın kalibrasyonunu sağlamak için ölçüm yapılmıştır. Daha sonra kalibrasyonu sağlanan cihaz ile esas ölçümlere geçilmiştir. Ölçüm sonuçlarında radar cihazının aksine faydalı ölçüm derinliğinin 200 cm olması nedeniyle deney amaçlı hazırlanan duvarın alt yüzeyi de tespit edilebilmiştir.

Duvarda bırakılan kenet ve zıvana boşlukları ise radar yönteminde olduğu gibi tomografi cihazı tarafından süreksizlik olarak algılanmış olup tıpkı demir elemanlarda olduğu gibi cihaz ekranına kırmızı renk olarak düşmüştür.



Şekil 4.55 Deney düzeneği ultrasonik tomografi ölçümü

Radar cihazı için demir tespit uzmanı demek gerekirse bu cihaz için boşluk tespit uzmanı demek yanlış olmayacaktır. Radar cihazı teste tabi tutulan yapı bünyesinde yer alan farklı malzemeleri hava boşluklarına nazaran ön plana çıkararak ekrana yansıtmaktadır. Fakat ultrasonik tomografi cihazı farklı malzemelere nazaran yapı bünyesinde yer alan hava boşluklarını ön plana çıkartmaktadır. Tabi bunun yanında radar yöntemi kadar başarılı olmasa da ultrasonik tomografi yöntemi de muhakkak diğer malzemelerin tespiti amaçlı kullanılabilmektedir.

Diğer konu radar cihazı ile tespitin ultrasonik tomografi cihazına göre çok daha hızlı olmasıdır. Radar cihazı bir hat üzerinde tekerlekleri sayesinde rahat bir şekilde dakikada ortalama beş metre kadar ölçüm yapabilmenize imkân sağlamaktadır. Fakat tomografi cihazı nokta ölçümleri gerçekleştirebilmektedir. Her noktada cihazın alacağı ölçüm ne kadar uzun olursa elde edilecek çıktının o derece doğru veri sağladığı söylenebilir.

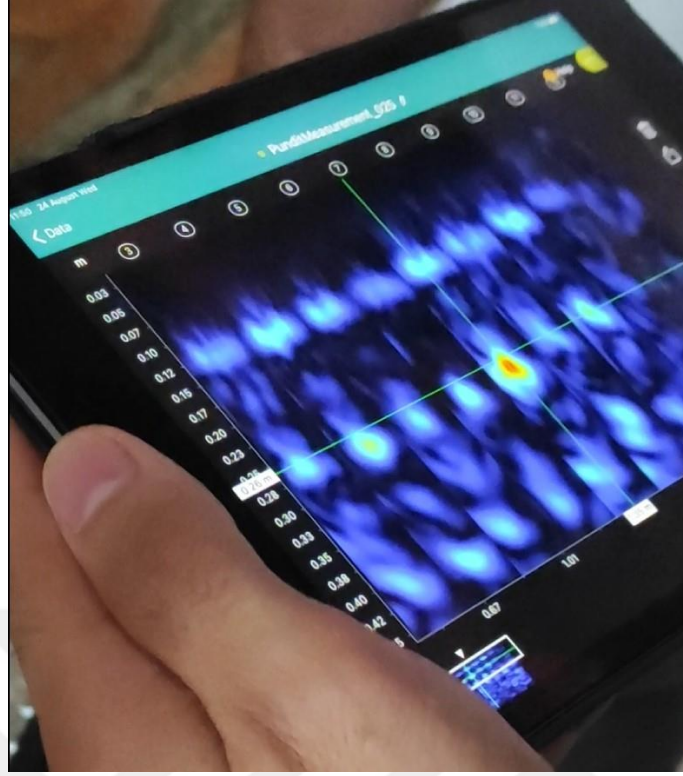
Cihaz ile deney amaçlı örülen duvarda deneme ölçümleri gerçekleştirildikten sonra Sultan Ahmet Camii üzerinde ölçümlere geçilmiştir. Daha önce radar cihazı ile taraması yapılan fil ayağında ultrasonik tomografi cihazı ile ölçüm yapılmıştır (Şekil 4.25, Şekil 4.56).



Şekil 4.56 Sultan Ahmet Camii fil ayağı ultrasonik tomografi ölçümü

Ölçüm sonucu radar cihazı ile yapılan ölçümlere çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Yalnız daha önce bahsedildiği üzere tomografi cihazı ile daha çok boşlukların tespiti ön planda olmuştur. Cihaz tarafından 12 ve 26 cm derinliklerinde hava boşluklarına ait olduğu düşünülen süreksizlikler tespit edilmiştir (Şekil 4.57). İhtimal ki kavisli mermer plakalar 12 cm kalınlığa sahip olup ardından başka bir malzeme devam etmektedir. Arada kalan boşluk arası bulunan bağlayıcı malzeme zamanla çözünerek mukavemetini kaybetmiş ve dökülmüştür. Ya da bağlayıcı malzeme hiç kullanılmamış sadece demir elemanlar ile mermer plakalar arka cidara bağlanmıştır.

Mütemadi şekilde yapılan ölçümlerin hepsinde 26 cm derinliğinde yer alan diğer boşluk ise bizlere mermer plaka sonrası gelen diğer katman kalınlığının takribi 14 cm olduğunu ve sonrasında son bulunduğu bilgisini vermektedir.



Şekil 4.57 Sultan Ahmet Camii fil ayağı ultrasonik tomografi görüntüsü

Radar cihazında mermer kaplamanın altındaki boşluk tespit edilmiş olsa da ikinci boşluğun tespiti tomografi cihazının kullanımı ile olmuştur. Bu noktada aslında tekrar anlaşıyor ki tahribatsız muayene yöntemleri muhakkak birbirleri ile desteklenerek kullanılmalıdır.

4.2.6 Termografi

Termografi yöntemi ile tarihi eser bünyesinde bulunan taşıyıcı demir elemanların tespitini gerçekleştirmek adına Flir C5 marka termal kamera kullanılmıştır. Tarihi yapılarda gerçekleştirilen birçok ölçüm sonucu açıkta bulunan demir elemanların cihaz ekranında tespiti yapılabilmesine karşın söz konusu yöntem ile taşın bünyesinde gömülü demir elemanların tespiti yapılamamıştır. Bunun üzerine demir elemanların ölçüm öncesi belli bir sıcaklığa kadar ısıtıldıktan sonra yapılacak ölçüm sonucu yöntemin verimliliğinin araştırılmasına karar verilmiştir. Strüktürel demir elemanların ısıtılması sonucu yapıya zarar verilmesi ihtimaline karşı ölçümler taş ve tuğla olmak üzere oluşturulan iki deney düzeneği duvar üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Daha önce radar gibi diğer tahribatsız muayene yöntemlerinin denendiği deney düzeneği duvar üzerinde bulunan gergi elemanın ısıtılması sonucu duvar yüzeyine yansıyacak olası ısı değişimi incelenmiştir. Duvar içerisindeki gergi elemanı yüzeyden 20 cm derinliğe yerleştirilmiş ve iki ucu takribi on santimetre dışarıda bırakılmıştır. Sonrasında gergi elemanın bir ucu ısı tabancası ile diğer ucu şalama yardımıyla ısıtılmıştır (Şekil 4.58).



Şekil 4.58 Özgün gergi demirinin ısıtılması

Yaklaşık iki saat boyunca ısıtma işlemine devam edilmiştir. Demir elemanın ısıtılması süresince termal kamera ile yüzeyde ısı farkının oluşup oluşmadığı takip edilmiştir.

Termal kamera ölçümlerinde gergi demiri sıcaklığının cihazın tespit edebildiği en yüksek sıcaklık olan 410 derecenin üstüne çıktığı görülmüştür. Fakat bu süreçte gergi demirinden yüzeye yansıyan ısı farkı tespit edilememiştir (Şekil 4.59). Dolayısıyla taş duvar bünyesinde gömülü demir elemanların termografi yöntemi ile tespiti verimli bulunmamıştır.



Şekil 4.59 a) Gergi demirinin yaydığı ısı b) Deney düzeneği taş yüzeyinin yaydığı

ısı

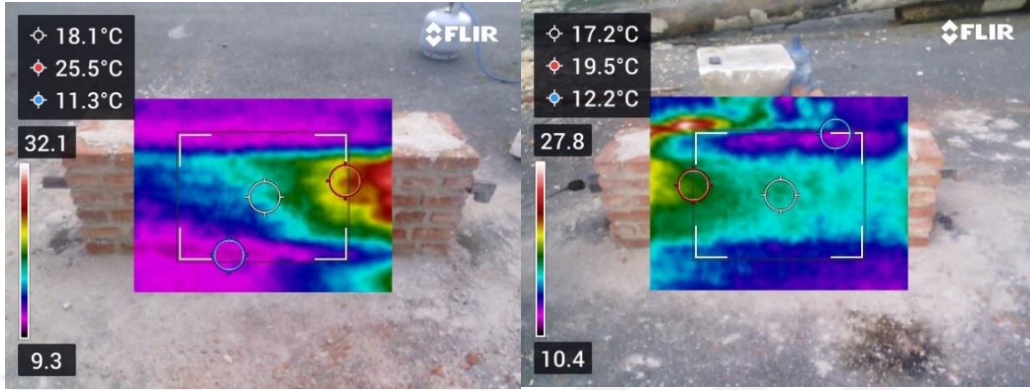
Taş duvar numunesinde termal kamera ile yapılan deneysel çalışmanın ardından tuğla duvar bünyesinde demir elemanın söz konusu yöntem ile tespitine yönelik çalışma yapılmıştır. Bu bağlamda örülen bir buçuk metre uzunluğundaki tuğla duvar bünyesine demir gergi elemanı yerleştirilmiştir (Şekil 4.60). Gergi elemanı bir yüzeye 10 cm diğer yüzeye 20 cm mesafede olacak şekilde duvar içine konumlandırılmıştır.



Şekil 4.60 Tuğla örgü deney düzeneği

Tuğla duvar bünyesindeki gergi elemanın iki ucu duvardan takribi 15 cm dışarıda bırakılmıştır. Yaklaşık bir saat boyunca şalama yardımıyla demir eleman ısıtılmış ve termal kamera ile ısı farkları takip edilmiştir. Taş duvardaki deneyde olduğu şekilde demir eleman cihazın ölçebildiği en yüksek sıcaklık olan 410 derecenin üzerinde bir sıcaklığa ulaşmıştır.

Bir saatin sonunda yapılan ölçümde demir gerginin yüzeye daha yakın olduğu duvar yüzünde demirin uzak olduğu duvar yüzüne göre daha fazla ısı farkı olduğu tespit edilmiştir. Fakat bu fark demirin ısıtıldığı noktadan takribi yarım metreden sonra anlamını yitirerek azalmıştır (Şekil 4.61).



Şekil 4.61 Tuğla örgü deney düzeneğinin yüzey ısı farkları

Yapılan deney sonucu tuğla duvar bünyesinde bulunan demir gerginin açık kısmının bu şekilde bir saat boyunca ısıtılmasının, gerginin yüzeyden 10 cm derinden geçmesi durumunda yalnızca yarım metrelik kısmının mütemadi şekilde devam ettiğinin tespitinde fayda sağladığı görülmüştür.

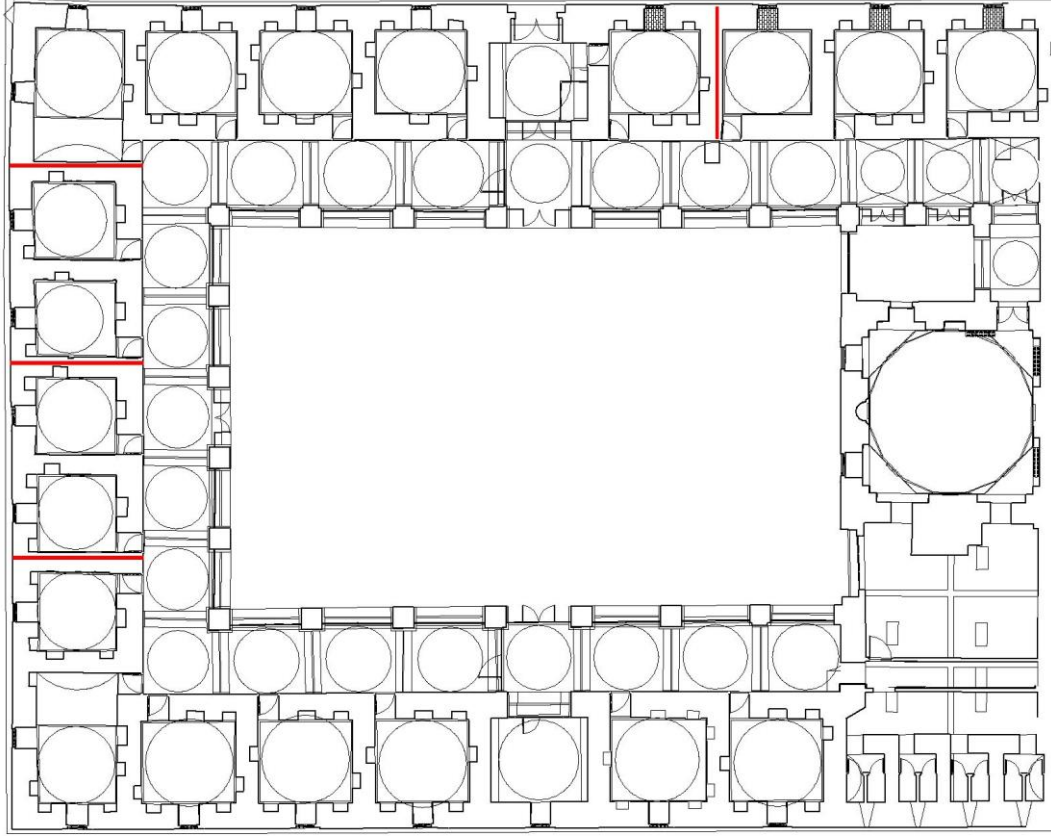
4.2.7 Darbe Yansıma

Darbe yansıma yöntemi günümüzde kablo arızalarının tespitinde kullanılmaktadır. Söz konusu yöntem tarihi yapılarda duvar içerisinde gömülü bulunan strüktürel demir elemanların sürekliliğinin tespiti için sahada denenmiştir. Tahribatsız muayene imkânı sunan darbe yansıma yöntemine ait saha çalışmalarında TT Technic Dt-266 Digital Pensampermetre ve Sonel marka TDR- 420 kablo arıza tespit cihazı kullanılmıştır.

07.03.2023 tarihinde restorasyonu devam eden Karadeniz Medresesinde pensampermetre cihazı ile ölçümler gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.62).

Pensampermetre cihazı iki adet pens adı verilen uca sahiptir. Pensler devre boyunca geçen akımı ölçmektedir. Söz konusu penslerden biri demir elemanın bir ucuna diğeri ise demir elemanın bir ucuna temas ettirilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken demir elemanın yüzeyinde bulunan kir, pas ve boya tabakası temizlenmeli ve pensin demir yüzeye temas ettiğinden emin olunmalıdır. Pensten verilen akımın

demir eleman boyunca ilerleyerek diğer pens tarafından algılanması durumunda yapı bünyesinde gömülü demir elemanın sürekliliği tespit edilmiş olacaktır. Karadeniz Medresesi duvarlarında bulunan kılıçlama elemanları üzerinde darbe yansıma yöntemi ile yapılan deneylerde elemanların sürekli şekilde devam ettikleri tespit edilmiştir (Şekil 4.63).

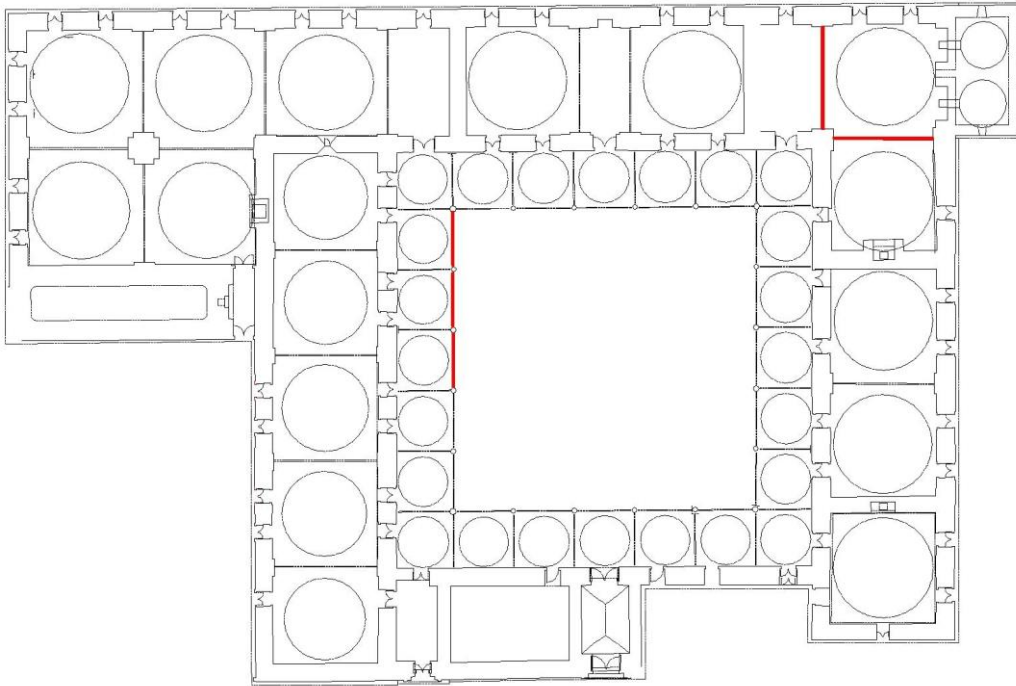


Şekil 4.62 Karadeniz medresesinde darbe yansıma yöntemi ile tespit yapılan kılıçlama elemanları

Cihaz ile diğer bir deneme çalışması Süleymaniye Külliyesi İmaret yapısında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.64). Süleymaniye İmareti revaklı avluya sahip olup revak kemerleri birbirlerine gergiler ile bağlanmıştır. Revak gergileri sütun başlarında simid olarak adlandırılan yuvarlak demir elemanlar ile bağlanmaktadır. Gergi uçları 90 derecelik dönüşler ile simid yuvasına yerleştirilmektedir. Simid yuvasında kalan boşluk harç veya kurşun ile doldurulmaktadır.



Şekil 4.63 Karadeniz Medresesi demir kılıçlama elemanlarının darbe yansıma yöntemi ile tespiti



Şekil 4.64 Süleymaniye İmaretı darbe yansıma yönteminin test edildiği gergiler

Süleymaniye imaret yapısındaki kemer gergilerinin saplandığı simid detayı hasarlı olan üzengi taşının alınması ile gün yüzüne çıkmış ve simid boşluğunun kurşun akıtılarak doldurulduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.65). Tabi çoğu zaman gergi elemanlarının birbirlerine simid ile bağlantısının tespiti mümkün olmamaktadır. Bu

durumda gerginin sütün başına saplanarak diğer gergi elemanı ile bir şekilde bağlantısının olduğu kabulü yapılarak restorasyon kararları alınmaktadır. Darbe yansıma yöntemi ile söz konusu durum araştırılmıştır.



Şekil 4.65 Süleymaniye İmaret revaklı avlu sütün başı gergi mesnet detayı

Revaklı avlu gergileri üzerinde yapılan ölçümler sonucu cihazın pensinden verilen akım bazı durumlarda diğer pens tarafından algılanamamıştır. Bahsedildiği üzere gergiler sütün başında simid elemanı ile birleştirilmekte olup simid boşluğu harç ya da kurşun ile doldurulmaktadır. İmaret yapısında yapılan araştırmada boşluğun kurşun ile doldurulduğu anlaşılmaktadır. Kurşun malzemenin akım iletkenliği şantiyede bulunan kurşun plakalar üzerinde test edilmiştir. Kurşun malzemesinin de tıpkı demir elemanlar gibi akımı ilettiği tespit edilmiştir (Şekil 4.66). Dolayısıyla gergi üzerinde yapılan ölçümlerde akımın iletilmediği durumlarda bilezik boşluğunun kurşun ile doldurulduğu kabulü yapılırsa başka bir sorunun varlığından bahsetmek gerekmektedir.

Akımın diğer pens tarafından tespit edilememesi gergi üzerinde yer alan kir, pas veya boya kalıntısından da kaynaklanabilmektedir. He ne kadar gergi üzerinde yapılan ölçümler sırasında penslerin uçlarının temas ettiği kısımlar zımparalanarak yüzey uygun hale getirilmiş olsa dahi simid kısmında var olan kir, pas veya boya kalıntılarının test sonucunu etkileyebileceği unutulmamalıdır. Diğer bir ihtimal ise bazı sütün başlarında yer alan simid bağlantılarının harç ile doldurulmuş

olabileceğidir. Bu durumda akımın iletilmesi mümkün değildir. Tabi olması ihtimal bir durumda simid bağlantısının hasar görmüş olması ya da herhangi bir bağlantının olmama olasılığıdır. Söz konusu durumda diğer tahribatsız muayene yöntemlerinden destek alınarak sonucu ulaşılabilir.



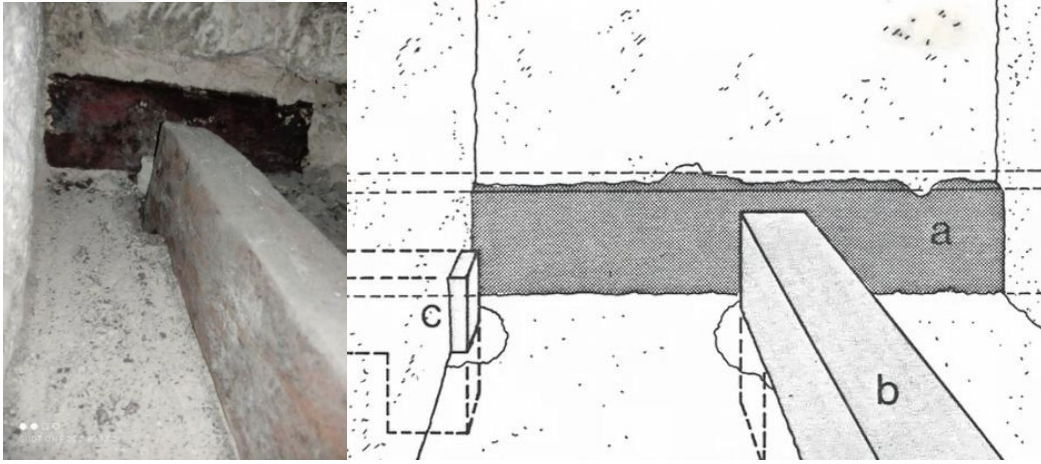
Şekil 4.66 a) Kurşunun elektrik iletkenliğinin testi b) Revak gergilerinin darbe yansıma yöntemi ile devamlılığının araştırılması



Şekil 4.67 Darbe yansıma yöntemi ile Süleymaniye İmaret yapısının gergilerinin devamlılığının araştırılması

Diğer ölçüm imaret yapısının ocaklarının bulunduğu oda da gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.67). Ocaklardan yayılan ısı zamanla oda da yer alan gergi elemanlarına zarar vererek akmalarına sebep olmuştur. Gergilerin duvar içinde birbirlerine olan bağlantıları yine darbe yansıma yöntemi ile tespit edilmeye çalışılmıştır.

Farklı iki doğrultuda duvara saplanan gergi elemanları üzerinde yapılan ölçümler sonucunda cihazdan verilen akım pensler tarafından algılanamamıştır. Muhtemelen aynı kotta duvar içerisine giren gergilerden biri diğeri ile kesişmeden önce son bularak duvar içine ankre edilmiş olmalıdır. Buna benzer bir durum Şekil 4.68’de görüldüğü üzere Sultan Ahmet Camii restorasyonu sırasında tespit edilmiştir. Farklı doğrultuda ilerleyen gergilerden biri mütemadi şekilde devam ederken diğer doğrultuda ilerleyen gergi demiri duvar içine gömülü bileziğe doğru kıvrılarak duvara ankre edilmiştir.



Şekil 4.68 a) Sultan Ahmet Camii gergi mesnet detayı b) Duvar içi gergi mesnet detayı (Tanyeli, 1990)

Diğer darbe yansıma cihazı olan TDR- 420 kablo arıza tespit cihazı ile demir elemanın devamlılığından öte santimetre hassasiyetinde uzunluğu da tespit edilebilmektedir. Cihaz aynı zamanda ölçümünü yaptığı demir elemanın başka bir demir ile olan temasını da konum olarak bulabilmektedir. Cihazın denemeleri 09.03.2023 tarihinde restorasyon sürecinde bulunan Gazi Atik Ali Paşa Camii’nde gerçekleştirilmiştir.

Cihazın çalışma prensibi malzeme üzerinde ilerleyen akımın ölçümü üzerinedir. İlk olarak üzerinde deney yapılacak malzemeden geçen akımın yayılım hızının

belirlenmesi gerekmektedir. Her malzemenin üzerinden geçen akım farklı yayılım hızları ile ilerlemektedir.

Özgün gergi demirleri üzerinde testlere başlanılmadan önce bir iskele profili üzerinde ön çalışma yapılmasına karar verilmiştir. Bu sayede daha önce demir elemanın devamlılığının tespitinde kullanılmamış olan bu yöntemin işlevselliği anlaşılmaya çalışılmıştır. İskele profil malzemesinin akım yayılım hız değeri 48 m/ μ s olarak bulunmuştur. Bu değer üzerinden yapılan ölçüm neticesinde 2 metre uzunluğa sahip iskele profili cihaz ile %1 hata payı ile 2,02 metre olarak tespit edilmiştir.

Söz konusu ölçümün ardından camii kubbe kasnağında bulunan pencerelerin kotundan geçen demir gergilerin duvar içindeki devamlılığını tespit etmek amacıyla ölçümler yapılmıştır. İlk olarak gergi demirlerinin akım yayılım hızının belirlenmesi gerekmiştir. Her ne kadar iskele profili de gergi gibi demir eleman olsa da farklı üretim teknikleri ile oluşturuldukları bilinmektedir. Bunun için gergi demirleri gibi aynı şekilde dövme demirden üretilmiş özgün kubbe yolu korkulukları üzerinde bazı ölçümler gerçekleştirilmiştir (Şekilde 4.69).



Şekil 4.69 Gazi Atik Ali Paşa Cami’nde darbe yansıma yöntemi ile yapılan araştırmalar

Nitekim ölçümler neticesinde iskele profilinin akım yayılım hızından farklı olarak dövme demirin akım yayılım hızı 37 m/ μ s olarak bulunmuştur. Söz konusu değere göre kubbe yolu korkuluklarında yapılan ölçümde 1,5 metre mesafede akım verilen

demir elemanın başka bir demir eleman ile temas ettiği tespit edilmiştir. Açıkta bulunan korkuluk elemanı cihazın tespit ettiği şekilde 1,50 metre mesafede diğer korkuluk elemanı ile birleşmektedir. Gözle görülen demir elemanlar üzerinde yapılan deney ile cihazın dövme demir elemanların tespitinde fayda sağladığı kanaatine varılmıştır.

Kubbe yolu korkuluklarında yapılan denemenin ardından kubbe pencere boşluklarından geçen gergi demirleri üzerinde ölçümlere geçilmiştir (Şekil 4.70). Kubbe kasnak gergileri pencere altı ve pencere üstü olmak üzere iki kottan geçmektedir. Cihaz pensinin doğru ölçüm alması için ilk olarak gergiler zımparalanarak özgün dövme demir ortaya çıkarılmıştır. Zımparalanan kısımlara cihazın pensi dokundurularak ölçüm alınmıştır.



Şekil 4.70 Gazi Atik Ali Paşa Cami'nde darbe yansıma yöntemi ile yapılan araştırmalar

Cihazın dokundurulduğu noktadan 1,56 cm ileride kısa devre tespit etmiştir. Yani demir eleman başka bir demir elemana temas etmektedir. Söz konusu mesafede gergi demirinin duvar içinde ilerlemekte olması nedeniyle bu detayı göz ile görmek mümkün olmamıştır. Fakat takribi aynı mesafeye denk gelen kısımda duvar

yüzeyinde kılıçlama detayı bulunmaktadır (Şekil 4.71). Muhtemelen kılıçlama detayı ile ölçüm yapılan gergi elemanı bu noktada birbirlerine temas etmektedir.



Şekil 4.71 Kubbe kasnak kotunda yer alan kılıçlama detayı

Diğer bir ihtimal ise kasnak kotunda ilerleyen gergi elemanları birbirlerine simid yardımıyla birleştirilmişlerdir. Söz konusu benzer durum Sultan Ahmet Camii restorasyonu sırasında ana kubbe kuşaklaması detayında tespit edilmiştir (Şekil 4.72).



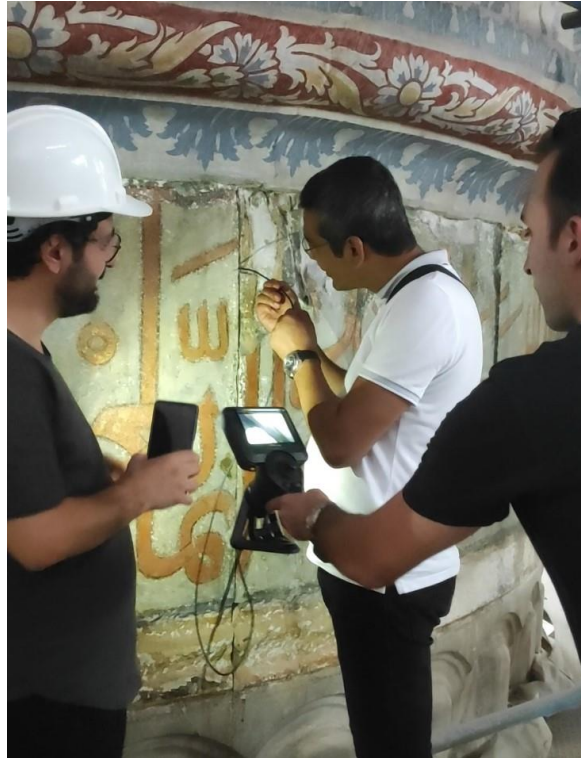
Şekil 4.72 Sultan Ahmet Camii ana kubbe kuşaklaması simid bağlantı noktası

4.2.8 Videoskop

Videoskop kamera yardımıyla tarihi yapılarda yer alan fakat göz ile görülemeyen noktalardaki demir elemanların tespiti amaçlanmıştır. Tespitler sırasında Mitcorp X750 marka cihaz kullanılmıştır. Cihazın probu iki adet kameraya sahip olmakla birlikte kafa çapı yalnızca 3,9 milimetredir. Bu özelliği sayesinde en ufak derz boşluklarından dahi çok yönlü tespit imkânı sağlamaktadır.

Sahada videoskop kamera ile tespitler gerçekleştirmek için 01.09.2022 tarihinde Troy-Met firması ile restorasyon çalışmaları devam eden Sultan Ahmet Camii'nde toplanılmıştır. Cihaz ile daha önce radar ve manyetik indüksiyon ölçümü yapılan F10 fil ayağında ölçümler yapılmıştır (Şekil 4.25). Radar ölçümleri neticesinde fil ayağını çepeçevre saran mermer plakaların derz boşluklarına denk gelen noktalarda yüzeyden yaklaşık 10 cm derinlikte demir elemana ait olduğu düşünülen bir süreksizliğin tespiti yapılmıştır.

Videoskop kamera ile mermer plakaların derz boşluklarından içeriye salınan kamera ile incelemelerde bulunulmuştur (Şekil 4.73). Probun başında yer alan iki adet kameranın kayıt görüntüsü cihazın kumandasında yer alan ekrana aynı anda yansımaktadır.



Şekil 4.73 Videoskop kamera ile fil ayağında yapılan inceleme

Videoskop kamera ile elde edilen görüntüler ile daha önce radar cihazı ile tespit edilen süreksizliklerin demir elemanlara ait olduğu anlaşılmıştır. Derz aralarında bulunan demir elemanların bir ucunun kavisli mermer kaplamaya mesnetlendiği, diğer ucunun ise fil ayağının derinine doğru ilerlediği videoskop kamera görüntülerinden anlaşılmaktadır (Şekil 4.74). Demir elemanın mermer plakaya saplanan kısmı kurşun ile doldurulmuştur. Diğer ucunun ise mesnet detayı tespit edilmemiştir.

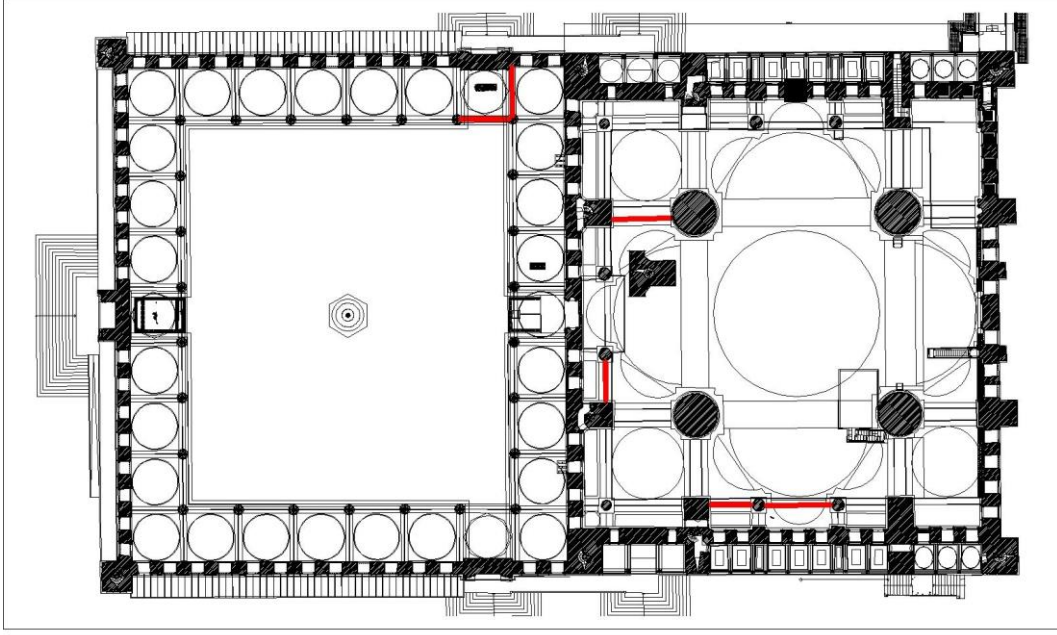


Şekil 4.74 Fil ayağında tespit edilen demirin videoskop görüntüleri

4.2.9 XRF (X-Işını Floresan Spektrometrisi)

X-Ray Florans Spektrometrisi kültürel mirasın yerinde tahribatsız olarak tespit ve teşhisine yönelik, niteliksel ve yarı niceliksel veriler elde edilmesine imkân tanıyan bir yöntemdir. Saha çalışmalarında Olympus firmasına ait Vanta VCR ve X-MET 8000 Expert Portatif XRF Spektrometresi cihazı kullanılmıştır.

Sultan Ahmet Camii'nde yer alan taşıyıcı demir elemanların XRF Spektrometresi ile malzeme içeriklerinin tespitlerinin yapılması adına İstanbul Restorasyon ve Konservasyon Merkez ve Bölge Laboratuvarı ile resmi yazışmalar yapılmıştır. Yazışmalar neticesinde 12.04.2022 tarihinde laboratuvar personeli Olympus firmasının Vanta VCR model rodyum tüp ve slikon drift dedektöre sahip el tipi x-ray floresans spektrometresi ile saha ziyaretinde bulunmuştur (Şekil 4.75).



Şekil 4.75 XRF yöntemi ile testlerin gerçekleştirildiği gergi elemanları

Yürütülen incelemeler sırasında 9 örnek üzerinde her biri bir cm^2 olan 120'şer saniyelik çift ışınlama şeklinde toplam 9 set ölçüm gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.76). Analizler “AlloyPlus – Turkish Museum Mode” kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 4.76 Sultan Ahmet Camii gergilerinin XRF ile kimyasal içeriklerinin tespiti

AlloyPlus- Turkish Museum Mode ile tespit edilebilen elementler aşağıda sıralanmıştır.

- AlloyPlus-Turkish Museum Mode 1. Işın (40.0 kV)

Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Br, Rb, Sr, Zr, Nb, Mo, Ru, Pd, Ag, Cd, Sn, Sb, Hf, Ta, W, Re, Pt, Au, Hg, Pb, Bi, LE

- AlloyPlus- Turkish Museum Mode 2. Işın (13.0 kV)

Mg, Al, Si, P, S, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Sn

- AlloyPlus- Turkish Museum Mode 3. Işın (8.4 kV)

Mg, Al, Si, P, S, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Mo, Sn

Analiz tekniğine bağlı olarak bazı elementlerin karakteristik floresans enerjileri aynı olduğundan piklerde spektral çakışmalar meydana gelebilmektedir. Bu nedenle analiz sonuçlarına yansıyan sayısal veriler spektrum grafikleri üzerinden kontrol edilmiştir. Yapılan ölçümlerin analiz sonucunda elementlerin yüzdesel dağılımlarına ait sayısal verileri ve spektrum grafiği belirtilmiştir. Analiz sonuçlarının spektrum grafiğinde, sayısal verilerde belirtilen elementlerden yüksek oranda olan demir (Fe) ve kurşun (Pb) elementleri işaretlenmiştir (Şekil 4.77, Şekil 4.78).

Chemistry

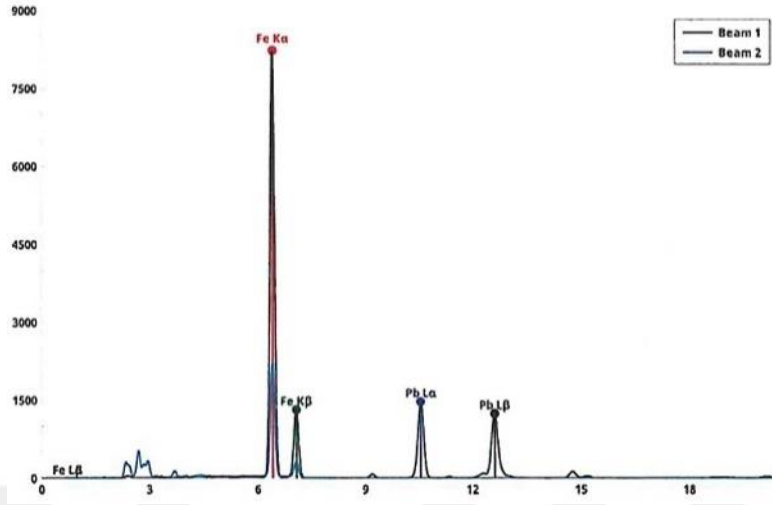
El	%
Si	1.000
Fe	82.23
Co	0.116
As	0.888
Sr	0.004
Zr	0.006
Sn	0.016
Hf	0.233
Ta	0.066
W	0.104
Re	0.278
Pb	15.057

Method : Alloy Plus- Turkish Museum Mode
Daily ID : 9

Elapsed Time : 120 s



Şekil 4.77 F15-F2 aksında yer alan gerginin kimyasal içeriği



Şekil 4.78 F15-F2 aksında yer alan gerginin 9 no’lu analiz sonuçları

F15-F2 aksında yer alan gerginin 9 no’lu analiz sonuçlarında yapılan spektrum incelemesinde demir (Fe) ve kurşun (Pb) pikleri tespit edilmiştir. Analiz çalışmalarıyla elde edilen yüzdesel dağılımlara ait sayısal veriler spektrum grafiği ile karşılaştırılmış niteliksel ve yarı niceliksel ilişkisi bakımından değerlendirilmiştir.

Analiz sonuçlarında yapılan incelemelerde örnek 1-2-3-4’teki kurşun oranının; metal üzerindeki kırmızı boyadan kaynaklı olarak örnek 5-6-7-8-9’a göre daha yüksek oranda olduğu gözlemlenmiştir. Boyasız, temizlenmiş alanda yapılan analiz sonuçlarında demir (Fe) oranının daha yüksek olduğu görülmektedir. Örneklerin ölçüm yüzeylerinin homojen olmaması nedeniyle yüzdesel dağılımlara ait sayısal veriler değişiklik göstermiştir.

24.08.2022 tarihinde Troy-Met firması ekipleriyle Sultan Ahmet Camii restorasyon çalışması kapsamında X-MET 8000 Expert Portatif XRF Spektrometresi cihazı ile demir elemanlar üzerinde ölçümler yapılmıştır. Ölçümler öncesi demir elemanın yüzeyi kir, pas ve boya katmanından temizlenmiş ve özgün demir yüzey ortaya çıkartılmıştır (Şekil 4.79).



Şekil 4.79 a) Gergi yüzeyinin boya ve pas tabaksından arındırılması b) Gergi elemanı üzerinde XRF ölçümü

Demirin üstündeki tabakanın temizlenmesi yapılan ölçüm sonuçlarını etkilemiştir. Yapılan ölçümler ile dövme demirin içeriğinde Fe (demir) oranının %99,50'nin üzerinde olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.80). Ölçümlerin sonucu literatürü destekler nitelikte olmuştur. Literatürde dövme demirin içeriğinde Fe (demir) elementinin %99'un üzerinde olduğu yer almaktadır. Dövme demir diğer demir çeşitlerine göre daha az oranda karbon elementi barındırmaktadır. Bu durum dövme demire çekmeye karşı dayanım kazandırmakla birlikte demirin korozyona karşı da dirençli olmasını sağlamaktadır.

ELEMENT	% ↑	+/-	LIMIT
Fe	99.50	0.098	98.85 - 100.00
Si	0.23	0.007	
S	0.12	0.002	
Cr	0.04	0.004	0.00 - 0.20
As	0.03	0.002	
P	0.03	0.003	
Cu	0.03	0.004	0.00 - 0.25
Pb	0.02	0.003	

ELEMENT	% ↑	+/-	LIMIT
Fe	99.81	0.104	98.85 - 100.00
Pb	0.07	0.004	
As	0.04	0.002	
Cr	0.04	0.004	0.00 - 0.20
Cu	0.03	0.004	0.00 - 0.25
Co	0.01	0.002	
Al	0.01	0.000	
Mn	0.00	0.005	0.00 - 0.50

ELEMENT	% ↑	+/-	LIMIT
Fe	99.54	0.091	98.85 - 100.00
Si	0.17	0.005	
Al	0.16	0.014	
Cr	0.04	0.003	0.00 - 0.20
P	0.04	0.002	
S	0.04	0.001	
Mn	0.01	0.005	0.00 - 0.50
Co	0.01	0.002	

Şekil 4.80 Sultan Ahmet Camii demir gergileri XRF ölçüm sonuçları

Tarihi yapılarda kullanılan demir elemanların içeriğinde Fe (demir) elementinden sonra en fazla C (karbon) elementi bulunmaktadır. Karbon elementinin tespiti bize

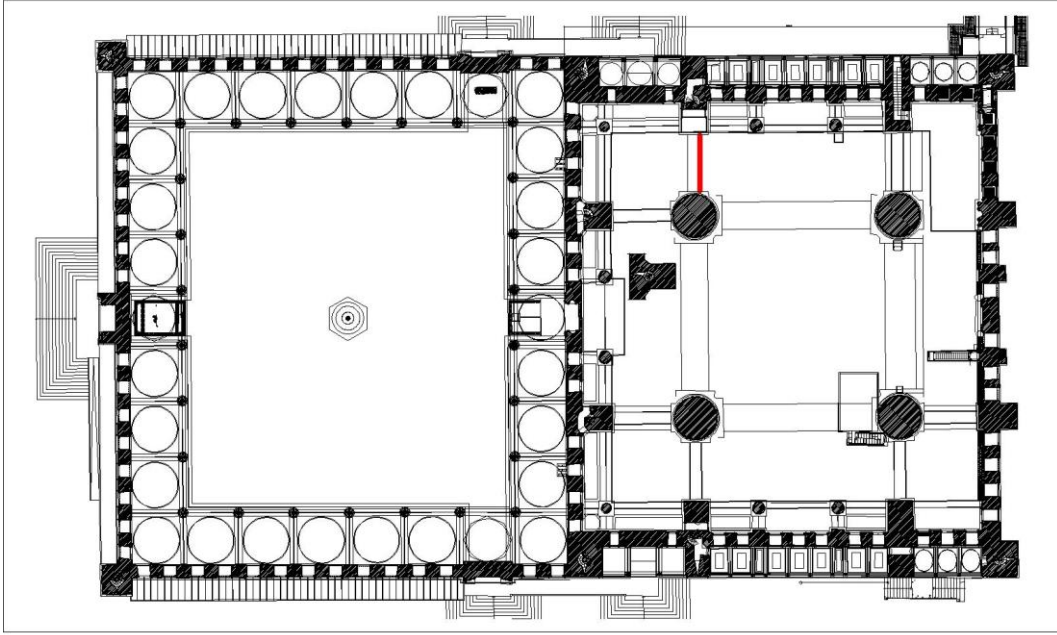
söz konusu demir elemanın şekillendirme yöntemi hakkında fikir veren kıstaslardan biridir. Karbon oranına göre demirin dövme ya da dökme demir olduğu anlaşılabilir. Aynı zamanda bu oran dövme demirin üretim dönemi ya da yeri hakkında da bilgi vermektedir. Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinde kullanılan dövme demirin karbon oranı yapılan testlerde de görüleceği üzere çok düşüktür. Fakat özellikle 18. yüzyılda yurt dışından gelen ve mimaride kullanılan demir elemanların karbon oranları daha yüksektir. Söz konusu demir elemanların korozyona uğrayarak yapılara zarar verdiği görülmektedir. Bu demir elemanlar Klasik Dönem mimarisinde de sonraları dönem eki olarak güçlendirme amaçlı kullanılmıştır. Karbon elementinin tespit edilebilir olması durumunda dönem eki olan demir elemanların yerinde tespitleri yapılabilecektir.

Fakat günümüz teknolojisinde karbon elementinin portatif XRF cihazı ile tespit edilmesi mümkün olmamaktadır. Atom numarası 6 olan karbon elementi XRF yöntemi ile tespit edilebilmesi için fazla hafiftir. İleride teknolojinin gelişmesi ile birlikte ihtimal ki karbon elementi XRF cihazı tespit edilebilir olacaktır. Karbon oranı tespit edilen demirin hangi döneme ait olduğu ve korozyona yatkınlığı konusunda fikir sahibi olunacaktır. Bu durum bizlere demirin korozyona uğrayarak yapıya hasar verme ihtimaline karşı önceden müdahale etme imkânı sunacaktır.

4.2.10 Phased Array

Phased Array yöntemi tahribatsız şekilde strüktürel demir elemanların yerinde röntgenini çekme imkânı sağlamaktadır. Yöntemin saha deneme çalışmalarında Topaz16 PA&TOFD cihazı kullanılmıştır. Cihaz aynı anda 16 kristalden ses dalgası gönderebilmektedir. Bu özellik cihaza daha detaylı tespit yapabilme özelliği kazandırmaktadır.

09.09.2022 tarihinde Troy-Met ekibi ile restorasyon çalışmaları devam eden Sultan Ahmet Camii'nde toplanılmıştır. Cihaz ile ölçümler harim kısmında yer alan strüktürel gergi elemanı üzerinde yapılmıştır (Şekil 4.81).



Şekil 4.81 Phased Array yönteminin test edildiği gergi elemanı

Ölçümlere geçilmeden önce prob ile testin yapılacağı malzeme yüzeyine iletkenliği sağlayan özel sıvı sürülmesi gerekmektedir (Şekil 4.82). Doğru bir sonuç almak için mümkün mertebe prob ile malzeme arasının pürüzsüz olmasına özen gösterilmelidir.

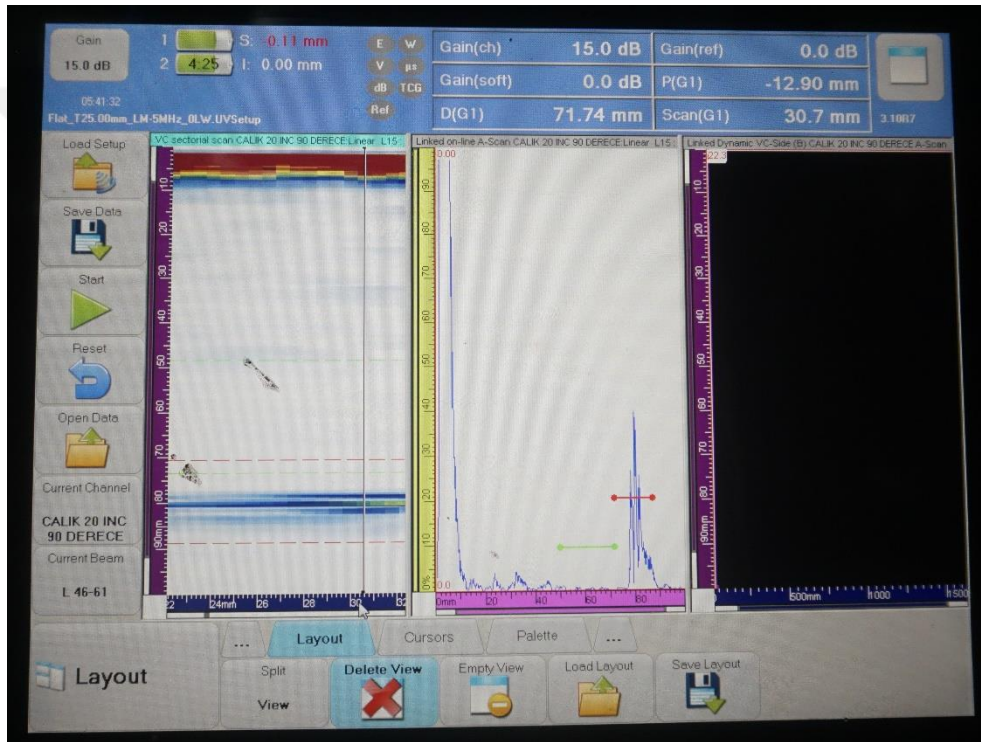


Şekil 4.82 Sultan Ahmet Camii gergilerinde phased array cihazı ile süreksizliklerin araştırılması

Cihazdan gönderilen ses dalgaları aracılığı ile teste tabi tutulan malzeme bünyesindeki süreksizliklerin tespiti milimetre hassasiyetinde sağlanabilmektedir.

Ayrıca malzeme bünyesinde bulunan süreksizliklerin dışında malzemenin kesitine dair veride elde edilmektedir.

Sultan Ahmet Camii hariminde yer alan gergi üzerinde cihaz ile ölçüm gerçekleştirilmeden önce özel sıvı sürülmüş ardından prob aracılığı ile tarama yapılmıştır. Cihaz ekranında malzemenin arka duvarının yüzeyden 80 mm uzaklıkta olduğu görülmüştür. Yerinde yapılan gözlem ile cihazın tespiti doğrulanmıştır. Cihaz ekranında gergi bünyesinde 48 mm – 55 mm ve 72 mm – 76 mm aralığında iki adet süreksizlik görülmüştür (Şekil 4.83). Bu süreksizliklerin dövme işlemi sırasında meydana gelen hava boşluklarına ait olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.83 Phased Array cihazı ile röntgeni çekilen gergiye ait ekran görüntüsü

4.3 Tartışma

Bu kısımda laboratuvar çalışmaları ile tahribatsız muayene yöntemleri ile elde edilen sonuçlar derlenip yorumlanmıştır.

4.3.1 Laboratuvar Çalışmaları

Laboratuvar analizleri sonucu Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinde kullanılan dövme demir elemanların üretim süreçlerine ve mikroyapısına dair veriler elde edilmiştir. Elde edilen veriler maddeler halinde değerlendirilmiştir.

- Numuneler üzerinde yapılan mikroyapı analizlerinde ana yapının ferrit ve düşük oranda perlit fazlarından oluştuğu tespit edilmiştir.
- Mikroyapı incelemelerinde ana yapıda boşlukların olduğu gözlemlenmiştir.
- Numunelerin farklı tane boyutlarına sahip olması uygulanan ısıtma işlem süreçlerinin farklı olduğunu göstermektedir.
- Mikroyapı incelemelerinde ana yapı içinde Sultan Ahmet Camii ve Valide Sultan Camii numuneleri haricinde inklüzyon değerlerinin yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- Inklüzyonların dövme işlemleri ile birlikte uzama gösterdiği ve ana yapı içinde yoğun bir şekilde yayıldığı gözlemlenmiştir.
- Mikroyapı incelemesi ile tespit edilen inklüzyon bileşimlerinin SEM analizlerinde yoğun olarak Ca, Al, Si ve O elementlerinden oluştuğu görülmüştür.
- Makro sertlik değerleri tane boyutuna göre değişim göstermektedir.
- Makro ve mikro sertlik değerlerinden numunelerin çekme dayanımları yorumlanmıştır.
- Sertlik değerlerinin geniş bir değer aralığında tespit edilmesi çekme dayanımlarının sorgulanmasına neden olmuştur.
- Yoğun inklüzyon ve boşluklar sertlik değerleri sapma yaratarak aynı numune üzerinde yapılan ölçümler arasında yüksek farklılıklara neden olmuştur.
- Numune dış yüzeyinde yapılan makro yapı incelemelerinde yüzeyde demir oksit tabakası oluştuğu gözlemlenmiştir.
- Gevrek demir oksit tabakasının zamanla kırılıp ufalanmasıyla kütle kaybına ve demir elemanların kesitinin azalmasına neden olduğu görülmüştür.
- Yapılan SEM analizlerinde tüm numunelerin dış yüzeyinde gevrek demir oksit tabakasının oluştuğu gözlemlenmiştir.
- Bazı numunelerde demir oksit tabakası ile ana yüzey arasında boşluk bulunduğu ve demir oksit tabakanın kopmak üzere olduğu tespit edilmiştir.
- Tüm yapılarda SEM-EDX elementer analizinde Fe ve O pikleri tespit edilmiştir.

- Numunelerin mikroyapı incelemelerinde dövme işlemi ile birleştirme yapılan bölgelerinde oksitlenen demirin kalın bir demir oksit tabakası oluşturduğu tespit edilmiştir.
- Demir oksit tabakası gevrek olup numunelerin üzerine gelecek kuvvetle beraber ilk kırılmanın yaşanacağı bölgeler olarak düşünülmektedir.
- Kimyasal analizler incelendiğinde O konsantrasyonunun yüksek olduğu ve numunelerin boşluklar içerdiği görülmüştür.
- Bütün numunelerde günümüz çelik numunelerine göre yüksek oranda S, P, Al, Si ve Ca elementleri tespit edilmiştir.

4.3.2 Tahribatsız Muayene Yöntemleri

Sahada yapılan incelemelerde radar, manyetik indüksiyon, radyografi, ultrasonik dalga hızı, ultrasonik tomografi, termografi, darbe yansıma, videoskop, XRF ve phased array muayene yöntemleri kullanılmıştır. Tahribatsız muayene yöntemleri olarak bilinen bu yöntemlerin Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinde kullanılan strüktürel demir elemanların tespitinde kullanılabilirliği gerçekleştirilen saha çalışmaları ile araştırılmıştır. Bu süreçte her yöntemin demir tespitinde avantajları olduğu gibi dezavantajlarının da olduğu görülmüştür. Bu bölümde yöntemlerin eksileri, artıları ve birbirleri ile olan ilişkileri aktarılmaya çalışmıştır.

Radar

Radar yöntemi yapılarda yer alan demir elemanların tespitinde kullanılan işlevsel bir yöntemdir. Radar yöntemi ile taranacak yapının betonarme bir yapı olması ölçüm sonuçlarını yorumlayan kişinin işini oldukça kolaylaştırmaktadır. Betonarme elemanın içerisinde beton ve demir olmak üzere iki farklı malzeme bulunmaktadır. Ayrıca demir donatının beton içerisinde hangi şekilde yerleştirildiği kolaylıkla tahmin edilebilmektedir. Sahada yapılan incelemede sırasında radar cihazı ile betonarme bir kolonda gerçekleştirilen ölçümde net bir şekilde beton içerisindeki demir donatılar tespit edilebilmiştir. Ancak tarihi yapıların inşasında kullanılan yöntemin doğası gereği betonarmede olduğu gibi homojen bir örgü sistemi yoktur. Tarihi yapılarda taş, harç, demir ve hava boşlukları homojen olmayan bir dağılım ile taşıyıcı öğeleri oluşturmaktadır.

Tarihi yapılar üzerinde radar yöntemin kullanılabilirliğini test etmek için deney düzeneği oluşturulmuş ve ön çalışma gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğine belli aralıklar ile özgün dövme kenet, zıvana ve gergi elemanı yerleştirilmiştir. Kesme taş örgünün yüzeyden 20 cm derinine yerleştirilen gergi demiri radar ekranında net bir şekilde görülmüştür. Aynı şekilde kenet ve zıvanalara ait süreksizlikler de radar ekranına düşmüştür. Oluşturulan deney düzeneğinde yer alan demir elemanların konumları net bir şekilde bilindiğinden dolayı radar cihaz ekranında beliren süreksizliklerin yorumu kolaylıkla yapılabilmektedir.

Cihaz ekranında oluşan rengin hangi malzemeye ait olduğu tamamen yoruma bağlıdır. Örneğin deney düzeneğinde bırakılan kenet ve zıvana boşluklarına ait süreksizlikler de cihaz ekranında dövme demir eleman süreksizliği gibi kırmızı renkte görülmüştür. Diğer bir deyişle aynı ekranda hem demir malzeme hem hava boşluğu aynı renkte gözükmemektedir. Dolayısıyla radar cihazı ile yapılan ölçümlerin Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisine hâkim bir uzman tarafından yorumlanması sonuçların doğru şekilde değerlendirilmesi açısından önem arz etmektedir.

Sultan Ahmet Cami fil ayağında yapılan radar ölçümünde demir elemanlara ait olduğu düşünülen süreksizlikler tespit edilmiştir. İlk yorumlamada fil ayaklarını çepeçevre saran bir demir kuşaklamanın varlığı üzerinde durulmuştur. Fakat deney düzeneğinde karşılaşılan durum çıkan sonucun sorgulanması gerekliliğini hatırlatmıştır. Bunun üzerine fil ayağında üç boyutlu radar taraması yapılmış ve fil ayağı üzerinde yer alan kaplamanın arkasında bir hava boşluğu olduğu tespit edilmiştir. Aslında ilk bakışta demir kuşaklamaya ait olduğu düşünülen süreksizliğin hava boşluğuna ait olduğu görülmüştür. Söz konusu durum daha sonra manyetik indüksiyon, ultrasonik tomografi ve videoskop yöntemleriyle de irdelenmiştir.

Radar yöntemi ile yine kesme taş duvar içerisinde 30 cm derinden geçen kuşaklama elemanının tespiti yapılmıştır (Şekil 4.31). Radar cihazının ekranına düşen demir elemana ait görüntü kalitesinin derinlikle doğru orantılı olarak düştüğü görülmüştür. Derinlikle beraber duvar örgüsünün heterojen malzeme dağılımına ve çoklu malzeme yapısına sahip olması da radar yönteminin faydalı ölçüm derinliğini olumsuz etkilemektedir. Karadeniz medresesinin moloz taş örgü duvarlarına sonraki dönemde güçlendirme amacıyla yerleştirilmiş demir kılıçlamalarının

tespitinde bu durum net bir şekilde görülmüştür (Şekil 4.31). Kesme taş duvarda 50 cm derinde bulunan demir elemanın tespiti mümkün olurken moloz taş örgüde söz konusu derinlikten geçen demir kılıçlama tespit edilememiştir. Duvar içerisinde heterojen şekilde yayınlan harç ve taş malzemeye ait ekranda beliren dağınık renkler demir malzemeye ait süreksizliğin tespitini zorlaştırmıştır. Özellikle moloz taş duvar içerisinde demir elemanın tespitinde görüntüleri yorumlayacak kişinin tarihi yapılarda kullanılan demir elemanlar konusunda uzman olması gerekmektedir. Moloz taş duvar örgüsünde demir elemanın varlığı radar yöntemiyle takribi 20 cm derinliğe kadar mümkün olabilmektedir. Söz konusu faydalı ölçüm derinliğinin radar cihazı ile yapılacak üç boyutlu tarama ile bir miktar daha artırılabilmesi mümkündür.

Kesme taş ve moloz taş örgünün ardından yöntemin tuğla örgüde işlevselliği Sultan Ahmet Camii revaklı avlu kubbesinde test edilmiştir. Restorasyon sürecinde gözle tespit edilen demir kubbe kuşaklamalarının radar cihazı taramaları ile tespiti yapılmıştır. Tespiti yapılan kuşaklamanın ardında bir sıra daha demir kuşaklama ya da başka bir demir elemanın varlığı radar cihazının çalışma prensibinden dolayı tespit edilememiştir. Demir eleman arkasında bulunan bir diğer demir eleman üzerinde gölgeleme yaparak radar görüntüsünün önüne geçmektedir.

Sahada yapılan ölçümler sonucu radar yöntemi sırası ile kesme taş, tuğla ve moloz taş örgüde faydalı ölçüm derinliğine sahip olduğu görülmüştür. Tüm bu yapılan saha çalışmaları sonucu Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinde yer alan strüktürel demir elemanların tespitinde kullanılan en faydalı yöntemin radar yöntemi olduğunu göstermiştir. Faydalı olmasının yanında radar yöntemi diğer yöntemlere nazaran hızlı şekilde tespit imkânı da sunmaktadır. Bunun yanında radar yönteminin tarihi yapılarda yer alan strüktürel demir elemanların tespitinde tek başına yeterli bir yöntem olmadığı unutulmamalıdır.

Manyetik İndüksiyon

Manyetik indüksiyon yöntemi demir tespitinde var yok mantığı ile çalışmaktadır. Radar cihazında olduğu gibi yoruma ihtiyaç duymamaktadır. Bu özelliği ile radar yöntemine göre avantajlıdır. Fakat faydalı ölçüm derinliği yöntemin doğası gereği 18 cm'i geçememektedir (Şekil 4.56). Bu derinlik hazırlanan deney düzeneğindeki demir elemanların tespiti için yeterli olmuştur. Cihaz ayrıca tespit ettiği demir

elemanın bulunduğu konuma ait derinlik bilgisini de veri olarak sağlamaktadır. Yöntem takribi olarak demir kesiti hakkında da bilgi vermektedir. Fakat tarihi yapılarda kullanılan demir elemanların kesitlerinin standart ölçülerde olmaması cihazın kesit hakkında verdiği bilgiyi teyide muhtaç kılmaktadır.

Daha önce radar ve ultrasonik tomografi yöntemi ile yapılan ölçümlerde tıpkı demir eleman gibi algılanan deney düzeneğindeki kenet ve zıvana boşlukları içlerinde demir olmadığı için manyetik indüksiyon cihazı tarafından görülmemiştir. Bu durum gösteriyor ki radar ve ultrasonik tomografi yönteminin yoruma açık olan verilerini manyetik indüksiyon yöntemi ile desteklemek mümkündür.

Radar yöntemi ile fil ayağında yapılan ölçüm sonucunda demir kuşaklamanın var olduğu düşünülen alan manyetik indüksiyon cihazı ile taranmış ve demir eleman tespit edilememiştir. Üç boyutlu radar ölçümü sonucu elde edilen görüntü ile hava boşluğu olduğu düşünülen süreksizliğin manyetik indüksiyon yöntemi ile de demir olmadığı teyit edilmiştir.

Yöntemin faydalı ölçüm derinliğinin 18 cm olması nedeniyle taşıyıcı harim duvarlarında bulunan kuşaklama elemanlarının tespiti yapılamamıştır. Ancak manyetik indüksiyon yöntemi ile tuğla kubbede yapılan taramada yüzeye yakın konumda bulunan demir kuşaklamanın varlığı tespit edilebilmiştir.

Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinde yapının birçok noktasına çekme gerilmelerini karşılamak amacıyla strüktürel demir elemanlar yerleştirilmiştir. Yapı içerisinde gömülü olan bu demir elemanların radar ve manyetik indüksiyon yöntemleri bir arada kullanılarak yapıya tahribat vermeden tespitleri mümkündür. Tespit edilecek strüktürel demir elemanlar tarihi yapının güçlendirme uygulaması statik hesaplarına katılmalı ve yapının güçlendirilme ihtiyacı bu durumda sorgulanmalıdır. Unutulmamalıdır ki yapıya yapılacak her müdahale yapının özgünlüğüne zarar vermektedir.

Radyografi

Radyografi yöntemi diğer tahribatsız muayene yöntemlerine göre meşakkatli bir hazırlık sürecine ihtiyaç duymaktadır. Fakat şartların radyografi yöntemine uyması halinde demir elemana ait en net görüntü bu yöntem ile sağlanmaktadır. Teste tabi tutulacak yapı elemanının iki yüzüne de ulaşılabilir olması yöntemin olmazsa

olmazdır. Bir yüzünden radyoaktif ışına maruz bırakılan elemanın diğer yüzünde içerisinden geçen ışınların düştüğü film tabaksı yer almaktadır. Sonucunu etkileyen diğer unsur ise ölçüm yapılan elemanın kalınlığıdır. Sahada 40x40 cm kesite sahip mermer sütun başında yer alan gergi mesnet detayı tespit edilmeye çalışmış fakat başarılı olunamamıştır. Sütun başı ışınların tamamını absorbe etmiştir. Ardından 20 cm kalınlığa sahip kesme taş deney düzeneğinde yapılan ölçüm neticesinde taşın içerisine yerleştirilen zıvanalar radyografi yöntemi ile milimetre hassasiyetinde tespit edilebilmiştir. Görüldüğü üzere her ne kadar ölçüm yapılacak elemanın iki yüzüne erişilse dahi sonuç alınabilmesi için kalınlık önem arz etmektedir. Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinin bir metreyi aşan taşıyıcı duvar kalınlıkları göz önünde bulundurulduğunda söz konusu yöntem ile duvarlarda tespit yapmak mümkün gözükmemektedir.

Radyografi yöntemi ile sahada yapılan tespitlerin bir saati bulan ölçüm süreleri yöntemi diğer yöntemlere göre dezavantajlı kılmaktadır. Söz konusu ölçüm süresi kullanılan cihazın özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Ölçüm süresini etkileyen diğer unsur ise yapı elemanının kalınlığıdır. Ölçüm süresi yapı elemanının kalınlığı ile doğru orantılı şekilde artmaktadır.

Diğer yandan net görüntülerin elde edilmesi yöntemi avantajlı kılmaktadır. Yöntemi mümkün mertebe nokta ölçümlerde kullanmak daha doğru olacaktır. Yoksa tüm yapıyı bu yöntem ile taramak günler hatta aylar sürecektir.

Tüm bunların yanında yöntemin insan sağlığına zararlı olduğu bilinmelidir. Sahada yapılan ölçümler sırasında radyasyon seviyesi sürekli kontrol edilmiştir. Güvenlik önlemleri alınmış ve uyarı bantları çekilmiştir. İnsanların uzaklaştırılamayacağı noktalarda x-ray tüpünün etrafı kurşun plakalar ile kapatılmıştır.

Ultrasonik dalga hızı

Ultrasonik dalga hızı yönteminin diğer yöntemlere göre avantajı faydalı ölçüm derinliğidir. Fil ayakları ve kalın harim taşıyıcı duvarları söz konusu yöntem ile rahatlıkla ölçülebilmektedir. Yöntem daha çok duvar kesitinde yer alan düzensizlikleri ölçmek için kullanılmaktadır. Kesme taş örgünün arkasındaki moloz dolgu ultrasonik dalga hızı yöntemiyle rahatlıkla tespit edilebilir. Duvar örgüsü içerisinde zamanla oluşmuş yoğun boşlukların tespiti içinde kullanılabilmektedir.

Boşluk oranı yüksek olan duvara yapılacak olan enjeksiyon uygulamasının ardından tekrar yapılacak ölçüm ile uygulamanın etkinliği teyit edilebilmektedir.

Duvar bünyesinde yer alan büyük düzensizliklerin tespiti için kullanılan yöntemin daha ufak düzensizliklerin tespitinde kullanılması uygulanabilir bulunmamıştır. Duvar içerisinde yer alan demir kuşaklama elemanının ya da taşları birbirine bağlayan kenet ve zıvananın ultrasonik dalga hızı yöntemiyle verimli şekilde tespiti mümkün gözükmemektedir. Yapı bünyesinde blok şeklinde bulunan bir demir elemanın söz konusu yöntem ile tespiti mümkün olabilmektedir. Fakat Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinde bu tarz bir strüktürel demir eleman kullanımı bulunmamaktadır.

Ultrasonik tomografi

Ultrasonik tomografi yöntemi tıpkı radar yönteminde olduğu gibi çıktılarının yorumlanmasına ihtiyaç duyulan bir yöntemdir. Betonarme yapıda yorumlamanın kolay olduğu yöntem çıktıları tarihi yapılar için kolay olmamaktadır. Homojen olmayan bir dağılıma sahip duvar örgüsü ve malzeme çeşitliliği cihaz görüntülerinin karmaşık olmasına neden olmaktadır. Çıktıları yorumlayacak kişinin Osmanlı yapı tekniğine hâkim olması gerekmektedir. Buna rağmen yorumun yetersiz kaldığı noktalarda diğer tahribatsız muayene cihazları ile ultrasonik tomografi yöntemi desteklenmelidir.

Sahada kullanılan cihaz sahip olduğu 24 prob sayesinde detaylı görüntü alma imkânı sunmaktadır. Cihaz her probtan ayrı gönderilen ses dalgalarından elde edilen verileri birleştirerek malzemeye ait kesitler oluşturmaktadır. Elde edilen görüntüler her ne kadar radar cihazı ile elde edilen görüntüler ile benzerlik gösterse de ultrasonik tomografi cihazı daha çok boşlukların tespiti amaçlı kullanılmaktadır. Radar cihazına metal bulma uzmanı, ultrasonik tomografi cihazına boşluk tespit etme uzmanı demek yanlış olmayacaktır. Radar cihazı ufak kesitli boşlukları tespit edememekle beraber ufak kesitli metal elemanları tespit edebilme becerisine sahiptir. Ultrasonik tomografi cihazı ise kılcal çatlakların oluşturduğu hava boşluklarını dahi tespit edebilirken ufak kesitli donatıları tespit etme konusunda radar cihazına göre etkisiz kalmaktadır. Radar cihazı tespit ettiği demir elemanların arkasında kalan süreksizlikleri göremezken ultrasonik tomografi cihazı hava boşluğu arkasında kalan süreksizlikleri tespit edememektedir (Tablo 4.30).

Tablo 4.30 Radar ve ultrasonik tomografi yöntemi karşılaştırması

Radar Yöntemi	Ultrasonik Tomografi Yöntemi
Demir nesnelerden %100 oranında yansır	Hava boşluklarından %99 oranında yansır
Demirin arkasındaki nesneleri göremez	Hava boşluğunun arkasındaki nesneleri göremez
%55 oranında hava boşluğundan geçer	%57 oranında demir nesnelerinden geçer
Büyük hava boşluklarından %45 oranında yansır	Büyük demir nesnelerinden %43 oranında yansır
Hava boşluğunun arkasındaki nesneleri görebilir	Demir nesnelerin arkasındaki nesneleri görebilir

Ultrasonik tomografi yöntemi ile yapılan tespit radar yöntemine göre çok daha yavaş gerçekleşmektedir. Radar cihazı bir hat üzerinde tekerlekler üzerinde hareket ettirilerek tarama gerçekleştirirken ultrasonik tomografi cihazı yüzeye belli bir süre temas ettirilerek tarama gerçekleştirmektedir. Saha da yapılan ölçümler neticesinde iki cihazın tarama hızı arasında ciddi farklar olduğu görülmüştür. Örneğin bir metre karelik bir alan radar yöntemi ile maksimum iki dakikada taranıyorsa bu süre ultrasonik tomografi cihazı için on dakikanın üzerindedir.

Ultrasonik tomografi yöntemi radar yöntemine göre dezavantajlarının yanı sıra faydalı ölçüm derinliği yönünden avantajlı konumdadır. Piyasada yer alan radar cihazlarının faydalı ölçüm derinliği en yüksek olanı 80 cm derinliğe kadar ölçüm yapabilmektedir. Ultrasonik tomografi cihazının faydalı ölçüm derinliği ise 200 cm'dir. Radar cihazında da olduğu gibi bu derinlik betonarme yapılar için geçerlidir. Tarihi yapılar da bu değer düşmektedir. Yapı duvarının heterojen malzeme dağılımının ve malzeme çeşitliliğinin artması radar ve ultrasonik tomografi cihazlarının faydalı ölçüm derinliklerini olumsuz etkilemektedir.

Termografi

Termografi yönteminin çalışma prensibi maddeden yayılan ısınn görüntüye dönüştürülmesi üzerinedir. Literatürde yer alan çalışmalarda ölçüm öncesi çeşitli ısı kaynakları ile yapının ısıtıldığı görülmüştür. Tarihi yapının ısıtılmasının özgün

malzeme yapısını bozma ihtimalinden dolayı yöntemin ön çalışmaları oluşturulan kesme taş ve tuğla duvar deney düzenekleri üzerinde yapılmıştır. Deney düzeneklerinin içerisine iki ucu dışarıda kalacak şekilde özgün gergi demiri yerleştirilmiştir. Yerleştirilen gergi demiri iki ucundan şalama ve ısı tabancası yardımıyla ısıtılmıştır. Özellikle taş duvar içerisinde yer alan demir gergi iki saat boyunca cihazın ölçebileceği en yüksek sıcaklık olan 410 derecenin üstüne kadar ısıtılmıştır. Buna rağmen ısıtılan gergi demiri kesme taş örgünün yüzeyinde herhangi bir ısı farkı oluşturamamıştır. Isıtma işlemi sırasında taş örgü zarar görmüş ve kapak atmıştır. 20 cm derinde yer alan gerginin daha yüzeye yakın olması durumunda ihtimal ısı farkı elde edilebilecektir. Fakat tarihi yapılarda demir kuşaklama elemanları yüzeye daha yakın konumda yerleştirilmemiştir. Dolayısıyla bunun denemesinin yapılmasına gerek duyulmamıştır. Sonuç olarak taş duvar içerisinde yer alan kuşaklama elemanının termografi yöntemi ile tespitinin mümkün olmadığı kanaatine varılmıştır.

Taş duvarın ardından termografi yöntemi ile strüktürel demir eleman tespitine tuğla duvar üzerinde çalışmıştır. Tuğla deney düzeneğinde özgün dövme gergi demiri bir yüzeye 10 cm diğer yüzeye 20 cm mesafede olacak şekilde yerleştirilmiştir. Yerleştirilen gergi demiri yaklaşık bir saat boyunca ısıtılmıştır. Isıtılan gergi demiri yüzeye 10 cm olan cephede yaklaşık 50 cm boyunca yüzeyde sıcaklık farkı oluşmuştur. 20 cm derinde bulunan cephede ise yüzeyde kayda değer bir ısı farkı oluşmamıştır.

Tuğla duvar içerisinde bulunan demirin tespiti bir saate yakın ısıtma ile yaklaşık 50 cm yapılabilmiştir. Tespiti yapılan demir 10 cm derinde yer almaktadır. Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinde bu durum ile üst örtüde karşılaşılmaktadır. Tuğla kubbe örtüsünde yer alan demir kuşaklama elemanlarına 10 cm derinde rastlanabilmektedir. Fakat kubbede yer alan demir kuşaklama elemanının ısıtılabilceği açık bir noktası yoktur. Diğer yandan demir elemanın bir saat ısıtıldıktan sonra yalnızca yarım metre devamlılığının tespit edilecek olması fayda sağlamayacaktır. Tüm bunların yanında yapının bir saat boyunca ısıtılması tuğla, harç ve demir elemanın hem fiziksel hem kimyasal özelliğine zarar verecektir. Dolayısıyla söz konusu yöntem tarihi yapılarda demir elemanların tespitinde kullanışlı bulunmamıştır.

Darbe yansıma

Darbe yansıma yöntemi kablo arızalarının tespitinde kullanılan bir yöntemdir. Söz konusu yöntem tarihi yapılarda açıkta giden ve ardından duvar içine gömülen demir elemanların tespiti için sahada denenmiştir. Karadeniz medresesi duvarlarında yer alan ve iki ucuna erişilebilen kılıçlama elemanlarında darbe yansıma yöntemi ile ölçümler yapılmıştır. Bir uçundan akım verilen dövme demir elemanın diğer uçundan yapılan ölçüm ile demir eleman boyunca akımın iletildiği tespit edilmiştir. İletilen akım demir elemanın duvar boyunca mütemadi şekilde devam ettiğinin ispatı olmuştur.

Darbe yansıma yöntemi ile yapılacak ölçüm için strüktürel dövme demir elemanın herhangi bir noktasına erişilebilir olması da yeterli olmaktadır. Cihazın pensinin dokundurulduğu noktadan itibaren demir elemanın uzunluğu tespit edilebilmektedir. Bu tespit santimetre hassasiyetinde gerçeklemektedir. Tespiti yapılan demir elemanın uzunluğunun yanı sıra başka bir demir elemanla olan temas noktası da belirlenebilmektedir. Örneğin kubbe kuşaklamasına bir noktadan erişilmesi durumunda kuşaklamanın simid bağlantı noktaları bu yöntem ile tespit edilebilecektir. Yapılan tespitler sonucu belirlenen simit noktaları açılarak bağlantı noktaları kontrol edilebilir. Bu sayede kubbe örtüsünde tahribat vermeden sadece lokal noktalardan müdahaleler ile kuşaklama elemanının kontrolü gerçekleştirilebilir.

Diğer yandan yöntemin sonuçları sorgulanmaya açıktır. Elde edilen sonuç diğer hasarsız muayene yöntemleri ile desteklenmelidir. Süleymaniye Külliyesi'nde yapılan testlerde revaklı avlu ve odalarda var olan gergi demirlerinin mesnet noktaları belirlenmeye çalışılmıştır (Şekil 4.61). Mesnet noktası olduğu tahmin edilen mahale saplanan bir yöndeki gergiden gönderilen akım diğer yöndeki gergiye ulaşmamıştır. Gergi elemanları muhakkak saplandıkları mahal içerisinde mesnetlenmektedir. Yöntem ile mesnet noktasının tespit edilememesinin birden çok sebebi olabileceği düşünülmektedir. Mesnet noktasına dökülen kurşunun akımı ilemediği üzerinde durulmuş fakat kurşun plaka üzerinde yapılan deneyde kurşunun akımı ilettiği görülmüştür. Literatürde görülen bazı mesnet noktası detaylarında bağlantının tek bir simidte yapılmadığı durumlarda akla gelmektedir. Diğer sebep ise akımın özgün dövme demir elemanın üzerindeki boya ve demir

oksit tabakasından geçmemiş olma olasılığıdır. Muhakkak cihazın uçlarının dokundurulduğu noktalar zımparalanarak özgün demire inilmektedir. Fakat bağlantı noktasında birbirine temas eden demirlerin yüzeyinde senelerce boyunca oluşmuş olan demir oksit tabakası akımın geçmesini muhtemelen engellemektedir.

Videoskop

Videoskop cihazları günümüzde ufak kamera çapları sayesinde her boşluktan girebilecek hale gelmiştir. Sahada yapılan testlerde videoskop yöntemi diğer yöntemler ile yapılan ölçüm sonuçlarını teyit etmek amacıyla kullanılmıştır. Yüzeyden 18 cm'e kadar olan kısımda radar ve ultrasonik tomografi cihazını manyetik indüksiyon yöntemi ile desteklemek daha kullanışlı olacaktır. Çünkü manyetik indüksiyon yöntemi videoskop yöntemine göre çok daha hızlı tarama imkânı vermektedir. Fakat 18 cm'den daha derin kısımlarda demir elemanın tespiti manyetik indüksiyon yöntemi ile mümkün olmamaktadır. Bu noktada videoskop yönteminden faydalanılarak tespitler gerçekleştirilmelidir.

Sultan Ahmet Camii fil ayağında radar, ultrasonik tomografi ve manyetik indüksiyon yöntemleri ile ölçüm yapılan alanda videoskop kamera yardımıyla da ölçüm gerçekleştirilmiştir. Söz konusu diğer yöntemler ile demir elemana ait olduğu tespit edilen süreksizliğin bulunduğu alan videoskop kamera yardımıyla da taranmıştır. Fil ayağı kavisli mermer kaplamalarının birleşim noktasında yer alan bir santimetre genişliğinde dahi olmayan derz boşluğundan içeriye sokulan videoskop kamera ile demir elemanın görüntüsü alınmıştır.

Radar ve ultrasonik tomografi yöntemleri ile tespiti yapılan malzemelerin cins tayinleri videoskop kamera aracılığı ile yapılabilmektedir. Manyetik indüksiyon yöntemi ile tespit edilen demir elemanın ise kesiti videoskop kamera ile tespit edilebilmektedir.

XRF

X-Işını Floresan Spektrometrisi demir elemanın konumunu tespit etmekten öte kimyasal içeriğini belirleme noktasında fayda sağlamaktadır. XRF cihazı yaydığı ışınlar aracılığı ile malzeme bünyesinde bulunan elementleri yüzdesel olarak tespit edebilmektedir. XRF cihazı ile yapılan ölçümlerde özgün demir yüzeye inilmesi gerekmektedir. Demir yüzeyinde yüzyıllar boyunca birikmiş kir, pas ve boya

katmanı yer almaktadır. Söz konusu katmandan dolayı ölçüm sonuçları yanıltıcı olabilmektedir. Çalışma kapsamında yapılan incelemelerin başında buna özen gösterilmemiş ve ölçüm sonucunda demir elementi harici örneğin kurşun gibi başka elementlerde yüksek oranda tespit edilmiştir. Diğer denemelerde tamamen özgün demir yüzeye inilerek ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen çıktılarda demir elementi oranının %99,50 üzerinde olduğu görülmüştür. Literatür çalışmaları da bulunan bu değeri desteklemektedir.

Günümüz teknolojisinde portatif XRF cihazı ile strüktürel dövme demir elemanların bünyesinde yer alan C (karbon) elementinin tespiti yapılamamaktadır. İlerleyen dönemde teknolojinin gelişmesiyle ihtimal karbon elementini tespit edebilecek portatif cihazlar geliştirilecektir. Bu sayede tarihi yapılarda sonradan yapılan müdahalelerin tespiti yapılabilecektir. Yapılan tespitler tarihi yapının özgün dönemine ait olmayan ve içerdiği yüksek karbon oranı nedeniyle korozyona yatkın demir elemanlara karşı önlem alma imkânı sağlayacaktır.

Phased array

Dövme demir elemanların şekillendirilmeleri sırasında veya kullanım ömürleri süresince bünyesinde bazı süreksizlikler oluşmaktadır. Örneğin yeterince ısıtılmadan şekillendirilmeye çalışılan demir elemanın bünyesinde çatlaklar meydana gelmektedir (Şekil 4.85). Ya da dövme işlemi sırasında bünyesinde yer alan oksijen elementlerinin oluşturduğu süreksizlikler de demirin içerisinde boşluklar meydana getirmektedir. Söz konusu boşluklar demirin mukavemetinde zafiyete neden olmaktadır.

Phased array yöntemi strüktürel demir elemanların içerisinde bulunan süreksizlikleri tespit etme imkânı sağlamaktadır. Uygulama sırasında testi yapılacak demir elemanın yüzeyine sürülecek özel sıvı sayesinde phased array cihazı ile demirin iç yapısının görüntüsü alınabilmektedir.

Yöntemin kullanılabilmesi için muhakkak demir elemanın açıkta olması gerekmektedir. Örneğin kemer yapısının açılmasını engelleyen kemer açıklık gergileri yöntemin kullanımı için uygun elemanlardır. Hasarlı bir kemer yapısına ait gergi elemanın taşıyacağı yükün hesabında phased array yönteminden faydalanılabilir. Statik hesaplarda gergi elemanının dışarıdan görünen kesiti phased

array yöntemi ile içeride tespit edilmesi ihtimal boşluklardan dolayı daha düşük ele alınması gerekebilir.



Şekil 4.84 Yeterince ısıtılmadan şekillendirildiği düşünülen Sultan Ahmet Cami'ne ait demir kenet

Saha da Sultan Ahmet Camii strüktürel gergi demiri elemanları üzerinde yapılan ölçümlerde kesit kayıpları tespit edilmiştir. Söz konusu kesit kayıplarına ait konum ve geometri de üç boyutlu olarak milimetre hassasiyetinde phased array cihazı ile tespit edilmiştir. Tespit edilen kayıpların toplam kesit alanının yanında anlamlı bir oran oluşturmadığı görülmüştür.

5.1 Sonuç

Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinin ihtişamlı boyutlara ulaşmasında strüktürel demir kullanımının rolü büyüktür. Özellikle 16. yüzyılda Osmanlı topraklarında Avrupa devletlerine göre daha ileri imkânlar ile demir üretimi gerçekleştirilmiştir. Demir üretim teknolojisindeki gelişme Osmanlı mimarisini de olumlu yönde etkilemiştir. Erken Osmanlı mimarisinde kullanılan ufak boyutlu strüktürel demir elemanların ardından 16. yüzyılda büyük boyutlu ve hatırı sayılır miktarda strüktürel demir kullanımı yapıları anıtsal boyutlara ulaştırmıştır.

Dönemin teknolojisi ile üretilen strüktürel dövme demir elemanlar çok düşük oranda karbon içeriğine sahiptir. Düşük karbon oranı dövme demire korozyona karşı direnç, çekme gerilmelerine karşı yüksek dayanım kazandırmaktadır. Gevrek malzeme olan taş elemanları birbirine bağlayan söz konusu demir elemanlar sahip oldukları malzeme özellikleri sayesinde yapıya esneklik kazandırarak deprem gibi dış etkenlerden kaynaklı yanal yükleri sönümlemede yapıya yardımcı olmaktadır.

Anıt eserlerin strüktüründe aldıkları önemli görev nedeniyle demir elemanların konservasyonu koruma çalışmalarının esas konularından biri olması gerekmektedir. Fakat yapıdaki konumu, mevcut durumu ve malzeme özellikleri hakkındaki bilinmezliklerinden dolayı koruma çalışmaları sırasında strüktürel dövme demirin varlığı göz ardı edilmektedir.

Anıt yapıların duvarlarına gömülü şekilde yerleştirilmiş demir elemanların tespiti günümüze değin elde olan imkanlar ile pek mümkün olmamıştır. Çalışma kapsamında yapılan saha ve laboratuvar çalışmaları ile yapı duvarına gömülü veya açıktan geçen demir elemanların konumu, mevcut durumu ve malzeme özellikleri gelişen günümüz teknolojisi yardımıyla tespit edilmeye çalışılmıştır. Çalışmalar sonucu elde edilen veriler ile günümüzde bilinmezlikleri nedeniyle yapının koruma çalışmalarına konu edilmeyen demir elemanların artık daha bilinir olmasına katkı sağlanmaya çalışılmıştır.

5.1.1 Laboratuvar Çalışması Sonuçları

Laboratuvar testleri restorasyon çalışmaları sırasında yapılardan alınan numune dövme demir elemanlar üzerinde yapılmıştır. Teste konu demirler Klasik Dönem Osmanlı anıt mimari yapıları olan Sultan Ahmet Camii, Süleymaniye Külliyesi, Selimiye Camii, Valide Sultan Camii, Beyazıt Külliyesi, Rüstem Paşa Camii, Uzun Kemer'den alınmıştır. Laboratuvar testleri tarihi yapıların bünyesinde yer alan demir elemanların düşünülenin ve uygulananın aksine dayanımlarını koruduklarını ortaya koymuştur.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen laboratuvar incelemeleri, tarihi yapıların bünyesinde kullanılan dövme demir elemanlarının malzeme özelliklerine dair önemli veriler sunmuştur. Vickers mikro sertlik değerleri üzerinden, EN ISO 18265 standardına uygun olarak demir elemanların çekme dayanımları belirlenmiştir. Tarihi yapılara ait demir elemanların çekme dayanımları şu şekilde tespit edilmiştir: Beyazıt Medresesi'nde 485,12 MPa, Süleymaniye Darüşşifası'nda 533,86 MPa, Rüstem Paşa Camii'nde 403,84 MPa, Uzun Kemer'de 358,27 MPa, Selimiye Camii'nde 405,76 MPa, Sultan Ahmet Camii'nde 342,66 MPa ve Eminönü Yeni Camii'nde 595,64 MPa. Bu çekme dayanımı değerleri, yapının koruma çalışmalarında olası güçlendirme hesaplamalarına önemli katkılar sağlayacaktır.

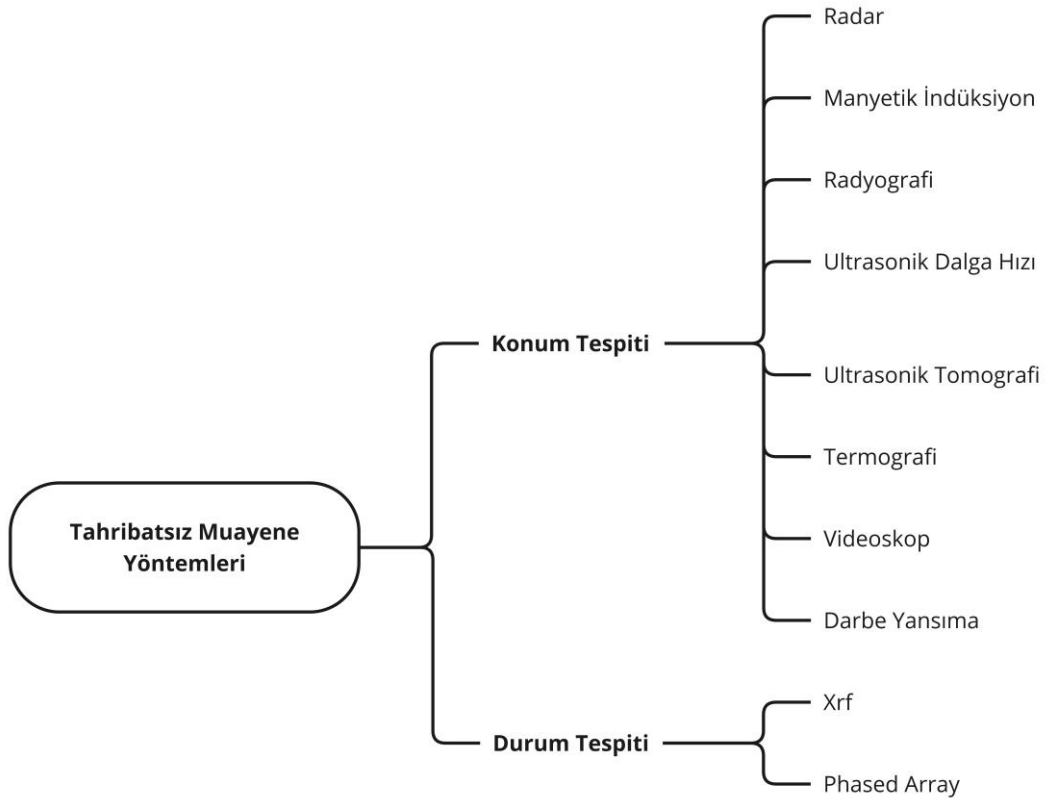
Çalışmalar neticesinde elde edilen değerlere bakıldığında özgün dövme demir elemanların çekme dayanım değerlerinin günümüz çeliğine yakın olduğu görülmüştür. Ancak dönemin yetersiz üretim teknolojisine bağlı özgün dövme demir elemanların bazı zayıf noktaları da bulunmaktadır. Homojen olmayan mikroyapı dağılımı demir elemanın davranışını olumsuz etkilemektedir. Ayrıca inklüzyon ve boşluk oranı yüksek olan demir elemanların kuvvet altında kolayca hasar görebileceği düşünülmektedir. Bu bulgular koruma ve güçlendirme çalışmalarında dikkate alınmalıdır.

5.1.2 Saha Çalışması Sonuçları

Saha çalışmaları Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisi örneklerinden olan Sultan Ahmet Camii, Selimiye Camii, Süleymaniye Külliyesi, Hekimoğlu Ali Paşa Camii ve Karadeniz Medresesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Söz konusu yapıların halihazırda restorasyon sürecinde olmaları yapının birçok noktasına ulaşım imkânı

sağlamıştır. Bu yapılarda yer alan strüktürel demir elemanların konumları ve mevcut durumları, radar, manyetik indüksiyon, radyografi, ultrasonik dalga hızı, ultrasonik tomografi, termografi, darbe yansıma, videoskop, XRF ve phased array muayene yöntemleri ile incelenmiştir.

Tahribatsız muayene yöntemlerinden radar, manyetik indüksiyon, radyografi, ultrasonik dalga hızı, ultrasonik tomografi, termografi, darbe yansıma, videoskop yapılarda yer alan demir elemanların yapı içindeki konumlarının tespitinde fayda sağlarken XRF ve phased array yöntemi demir elemanların kimyasal içerikleri ve bünyelerinde bulundurdıkları süreksizlikler gibi mevcut durumları hakkında bilgiler sağlamıştır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 Tahribatsız Muayene Yöntemleri

Tahribatsız muayene yöntemleri ile yapılan saha çalışmaları neticesinde strüktürel demir elemanların tespitinde radar yönteminin diğer yöntemlere nazaran daha işlevsel olduğu görülmüştür. Radar yöntemi ile yüzeyden 80 cm derinliğe kadar demir eleman tespiti yapılabilmektedir. Araştırmanın yapıldığı duvar örgüsünün heterojen malzeme dağılımı, malzeme çeşitliliği ve nem yöntemin faydalı ölçüm derinliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Diğer tarihi duvar örgülerine kıyasla

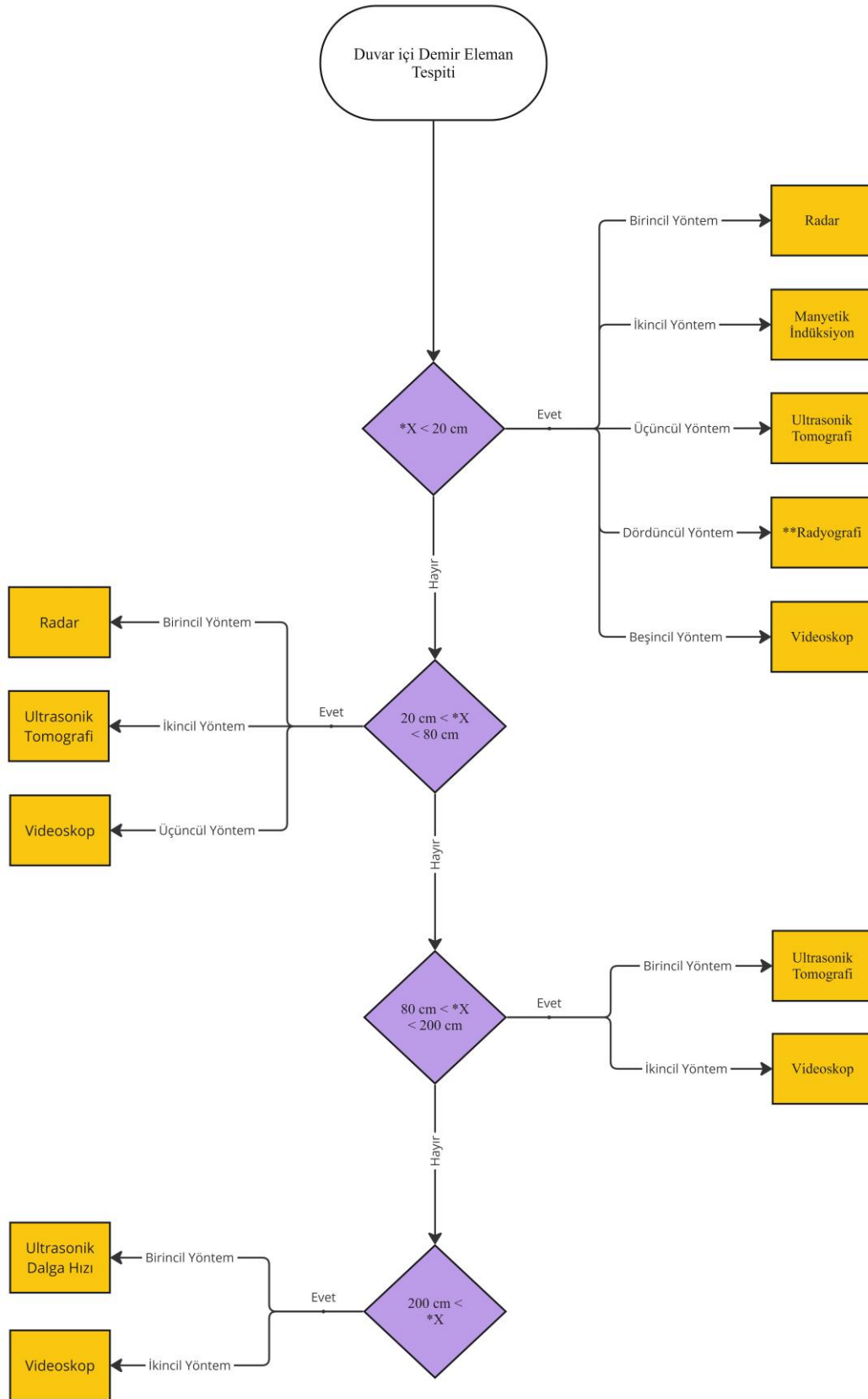
daha homojen bir yapıya ve öngörülebilir bir malzeme dağılımına sahip olan sıralı kesme taş duvar örgüsündeki demir elemanlar, örneğin moloz taş duvar örgüsünde yer alan demir elemanlardan daha kolay tespit edilebilmiştir.

Heterojen bir dağılıma sahip duvar örgüsü içerisinde yer alan diğer malzemelerinde demir gibi radar cihazı ekranında aynı renkte süreksizlik olarak görünmesi, yöntemin önemli handikaplarından biri olarak ortaya çıkmaktadır. Bu tür durumlarda, ölçümü yorumlayan kişinin Osmanlı anıt mimarisi yapım tekniğine hâkim olması, doğru sonuca ulaşabilmek adına büyük önem taşımaktadır.

Radar yönteminin, diğer yöntemlere kıyasla daha işlevsel olduğunu belirtmekle birlikte, her yöntemin kendine özgü eksiklikleri olduğu görülmektedir. Yapılan tespitlerin doğruluğu ve güvenilirliği açısından, çoğu durumda birden fazla yöntemin birlikte kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Çalışma kapsamında kullanılan tahribatsız muayene yöntemleri, faydalı ölçüm derinlikleri açısından; 0-20 cm, 20-80 cm, 80-200 cm ve 200 cm üzeri derinlikler olmak üzere dört grupta sınıflandırılmıştır (Şekil 5.2). Her bir derinlik grubunda kullanılan muayene yöntemlerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları olduğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda, demir tespiti amacıyla mümkün olduğunca her derinlik grubundaki yöntemlerin öncelik sırasına göre tamamının kullanılmasının en doğru yaklaşım olacağı değerlendirilmektedir. Ancak mevcut olanaklar doğrultusunda, öncelik sırası dikkate alınarak bir veya birden fazla muayene yöntemi ile demir tespiti yapılması da mümkündür.

Saha çalışmalarından elde edilen deneyimler, demir tespitinde yüzeyden 80 cm derinliğe kadar olan alanda birincil yöntem olarak radar yönteminin kullanılmasının en doğru yaklaşım olduğunu göstermiştir. Özellikle yüzeyden 20 cm derinliğe kadar olan derinliklerde demir elemanların tespitinde radar yöntemi birincil tercih olmalıdır; bunu sırasıyla ikincil yöntem olarak manyetik indüksiyon, üçüncül yöntem olarak ultrasonik tomografi, dördüncül yöntem olarak radyografi ve beşincil yöntem olarak videoskop takip etmelidir.



*X: Demir Elemanın Yüzeye Olan Mesafesi

Şekil 5.2 Demir tespitinde önerilen akış diyagramı

Manyetik indüksiyon yöntemi, radar yönteminin aksine herhangi bir yoruma ihtiyaç duyulmadan demir elemanların tespitine olanak tanımaktadır. Ancak bu yöntemin faydalı ölçüm derinliğinin yalnızca 20 cm ile sınırlı olması önemli bir dezavantaj teşkil etmektedir. Saha çalışmalarında bu yöntem yüzeyden 20 cm derinliğe kadar yapılan taramalarda radar yöntemi sonuçlarını doğrulamak amacıyla kullanılmıştır. Bununla birlikte Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinde kullanılan büyük boyutlu yapısal demir elemanların genellikle bu mesafeden daha derinde yer alması, yöntemin bu tür elemanların tespitinde yetersiz kalmasına neden olmaktadır.

Üçüncül yöntem olan ultrasonik tomografi ile elde edilen çıktılar, radar yönteminde olduğu gibi uzman bir kişi tarafından yorumlanmaya ihtiyaç duymaktadır. Sahada radar ve ultrasonik tomografi cihazları ile aynı alanlarda yapılan taramalar sonucunda yaklaşık olarak benzer görüntüler elde edilmiştir. İki yöntem arasındaki temel fark, birinin metal, diğerinin ise hava boşluğu tespitinde daha üstün olmasıdır. Bu bağlamda radar cihazı metal tespitinde, ultrasonik tomografi cihazı ise hava boşluğu tespitinde uzmanlaşmış cihazlar olarak değerlendirilebilir. Ultrasonik tomografinin 200 cm'ye kadar olan faydalı ölçüm derinliği, bu yöntemi radar yöntemine kıyasla avantajlı kılmaktadır. Ancak, ultrasonik tomografi ile yapılan ölçümlerin radar yöntemine göre oldukça uzun sürdüğü de dikkate alınmalıdır.

Dördüncül yöntem olan radyografi diğer yöntemlere kıyasla daha uzun ve zahmetli bir hazırlık sürecine ihtiyaç duymaktadır. Bununla birlikte demir tespitinde en net görüntüler bu yöntem ile sağlanmıştır. Ancak bu yöntemin sahada uygulanabilirliği için bazı gereksinimlerin karşılanması gerekmektedir. Öncelikle, ölçüm yapılacak yapı elemanının her iki cephesine ulaşım sağlanabilir olmalıdır. Ayrıca, ölçüm yapılan yapı elemanının kalınlığının yaklaşık 20 cm'yi geçmemesi de bir diğer önemli gerekliliktir. Sahada gerçekleştirilen çalışmalar malzeme kalınlığının artmasının yöntemin çıktıları üzerinde olumsuz bir etki yarattığını göstermiştir. Klasik Dönem mimarisindeki yapı elemanlarının kalınlıkları dikkate alındığında, bu yöntemin kullanım alanı oldukça sınırlı kalmaktadır. Ek olarak, yöntemin insan sağlığına zarar verebileceği göz önünde bulundurularak, saha uygulamaları sırasında gerekli güvenlik önlemlerinin alınmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Beşinci yöntem olarak videoskop, küçük kamera çapı sayesinde tarihi yapılarda tespit gerçekleştirme imkânı sağlamaktadır. Sahada yapılan incelemelerde

videoskop cihazı diğer yöntemlerle elde edilen sonuçların doğrulanması amacıyla kullanılmıştır. Radar ve ultrasonik tomografi yöntemleri ile belirlenen süreksizliklerin cinsi, 20 cm derinliğe kadar manyetik indüksiyon cihazı ile tayin edilirken; daha derin alanlardaki süreksizliklerin cinsi videoskop cihazı aracılığıyla belirlenmiştir. Ek olarak, videoskop cihazı ile ölçüm yapabilmek için gerektiğinde duvarda bir santimetre çapını aşmayan bir delik açılmasının gerekebileceği unutulmamalıdır.

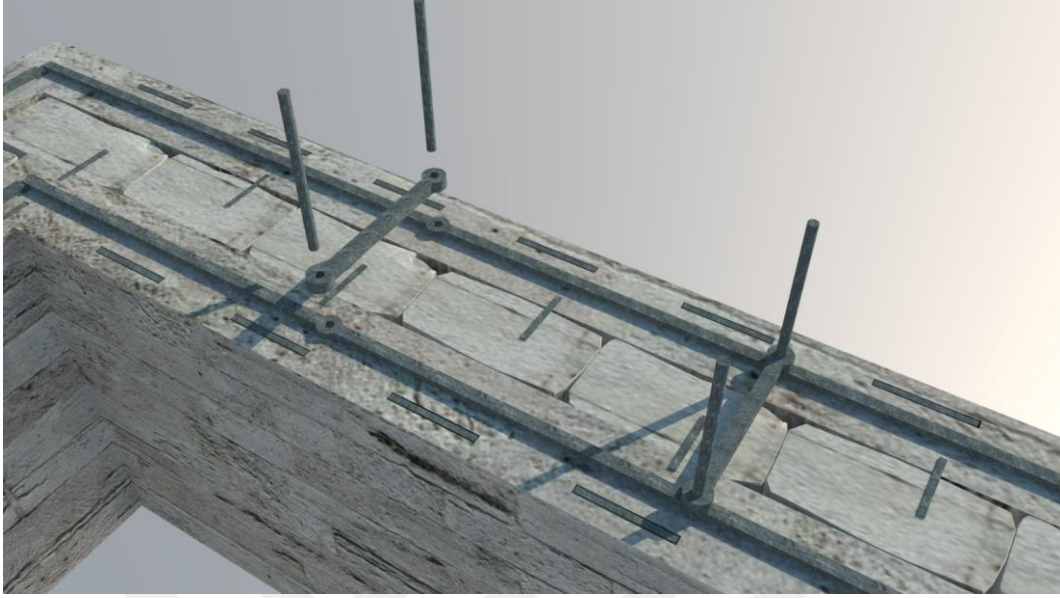
Yüzeyden 20 cm ila 80 cm derinlikte bulunan demir elemanların tespitinde ise birincil yöntem olarak yine radar kullanmak en işlevsel yaklaşım olacaktır. Manyetik indüksiyon ve radyografi yöntemlerinin faydalı ölçüm derinliklerinin kısıtlı olması nedeniyle bu yöntemler söz konusu derinliklerde işlevselliğini yitirmektedir. İkincil yöntem olarak ultrasonik tomografi, üçüncül yöntem olarak ise videoskop kullanılarak demir elemanların tespiti belirtilen derinlik aralıklarında gerçekleştirilebilmektedir.

Demir elemanının yüzeyden 80 cm ila 200 cm derinlikte bulunması durumunda, radar yöntemi faydalı ölçüm derinliği nedeniyle işlevselliğini yitirmektedir. Bu durumda, demir tespitinde birincil yöntem olarak ultrasonik tomografi tercih edilmelidir. Bahsedilen derinlik aralığında, ultrasonik tomografi yönteminin çıktılarının doğrulanması amacıyla ikincil bir yöntem olarak videoskop cihazı kullanılabilir.

Yüzeyden mesafenin 200 cm'i aşması durumunda, ultrasonik tomografi yöntemi demir tespitinde fayda sağlamayacaktır. Ancak duvarın diğer yüzeyinin ulaşılabilir olması durumunda ultrasonik tomografi yöntemi 400 cm duvar kalınlığına kadar tespit yapma imkânı sunmaktadır. Bu durum diğer muayene yöntemleri için de geçerlidir. Tahribatsız muayene yöntemlerinin faydalı ölçüm derinlikleri ölçüm yapılacak yapı elemanının diğer yüzeyine ulaşılması hâlinde iki katına kadar çıkabilmektedir. Bu sayede, radar cihazları aracılığıyla ortalama kalınlıktaki sıralı kesme taş duvar örgüsünde bulunan demir elemanların tespiti mümkün olmaktadır (Şekil 5.3).

Ancak söz konusu durum radyografi yönteminde geçerli değildir. Radyografi yönteminde ölçüm yapabilmek için duvarın diğer yüzeyinin her koşulda ulaşılabilir

olması ve verimli bir ölçüm gerçekleştirmek için duvar kalınlığının takribi 20 cm olması gerekmektedir.



Şekil 5.3 Radar cihazı ile tespiti mümkün olan demir elemanlar (Tanyeli tarafından Yavuz Sultan Selim Camii verilerine dayalı oluşturulan çizim üzerinden düzenlenmiştir)

Saha çalışmaları sırasında tahribatsız muayene yöntemleri arasında en yüksek faydalı ölçüm derinliğine sahip yöntemin ultrasonik dalga hızı yöntemi olduğu görülmüştür. Tarihi yapıların kalın taşıyıcı ayaklarında ses hızından faydalanılarak gerçekleştirilen ölçümlerde beş metreyi aşan derinlikte tespit yapılabilmektedir. Fakat yöntemin tekil elemanların tespitinden daha çok alan taramasında fayda sağladığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla bu yöntemin tekil strüktürel demir elemanlardan ziyade, taşıyıcı duvar ve ayakların malzeme yoğunluklarını ve oluşan boşlukları tespit etmek amacıyla kullanılması daha uygun olacaktır. Bununla birlikte zorunda kalınması durumunda yüzeyden 200 cm mesafeden daha derinde yer alan demir elemanların tespitinde söz konusu yöntem birincil yol olarak denenebilir. İkincil yöntem olarak kullanılacak olan videoskop cihazı, ultrasonik dalga hızı yönteminin çıktılarının doğrulanmasında fayda sağlayacaktır.

Yukarıda bahsedilen duvar içerisine gömülü demir elemanların tespitinde kullanılan yöntemlerin yanı sıra, daha önce demir tespiti amacıyla kullanılmamış olan kablo arıza tespit cihazı ile saha çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Darbe yansıma yöntemi aracılığıyla, demir elemanın uzunluğu ve başka bir demir eleman ile olan

temas noktasının konumu tespit edilebilmiştir. Bu yöntemin, tespit gerçekleştirebilmek için demir elemene temas etme gereksinimi bulunmaktadır. Bu nedenle, darbe yansıma yöntemi saha incelemelerinde, duvar içerisinden geçen ve pencere gibi açıklıklarda ulaşılabilir olan kuşaklama elemanlarının ya da kemer açıklıklarında yer alan gergi elemanlarının tespitinde fayda sağlamıştır. Bu yöntem demir elemanın bulunduğu derinlikten bağımsız olarak diğer tahribatsız muayene yöntemlerinin sonuçlarını doğrulamak amacıyla da kullanılabilir.

Bu noktaya kadar bahsedilen tahribatsız muayene yöntemleri ile demir elemanların duvar içerisindeki konumlarını tespit etmeye yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. XRF yöntemi ise demir elemanlarının kimyasal içeriğini belirlemek için kullanılmaktadır. Sahada yapılan XRF ölçümleri sonucunda özgün dövme gergi demirlerinin kimyasal içeriğinde %99,50'in üzerinde Fe (demir) elementi tespit edilmiştir. Günümüz teknolojisi henüz bu tür bir uygulamayı mümkün kılmasa da teknolojinin gelişimiyle birlikte portatif XRF cihazları aracılığıyla tarihi yapılarda kullanılan demir elemanların hangi döneme ait olduğunun yerinde tespitinin yapılabileceği düşünülmektedir.

Son olarak phased array yöntemi ile demir elemanların bünyesindeki süreksizliklerin tespitine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sahada çalışmalarında bu yöntemle demir elemanların içerisinde bulunan hava boşluklarına ait süreksizlikler belirlenmiştir. Phased array yönteminin statik hesaba konu olan strüktürel demir elemanların fiziksel yapısını inceleyerek güçlendirme uygulamalarında karar vericilere yol gösterici olabileceği görülmüştür.

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen laboratuvar ve saha araştırmaları sonucunda, Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisinde kullanılan strüktürel dövme demir elemanlara dair çeşitli veriler elde edilmiştir. Sahada uygulanan tahribatsız muayene yöntemleri aracılığıyla, demir elemanların konumları ve mevcut durumları belirlenmiştir. Laboratuvar çalışmaları ile bu demir elemanların malzeme özellikleri tespit edilmiştir. Bu çalışma ile, yapıya tahribat vermeden malzeme özellikleri, konumları ve mevcut durumları belirlenebilen demir elemanların, yapıların koruma ve güçlendirme çalışmalarına konu edilmesine katkı sağlamaya yönelik bir çaba ortaya konulmuştur.

5.2 Öneriler

Tez kapsamında, çeşitli tahribatsız muayene yöntemleri kullanılarak sahada kapsamlı araştırmalar gerçekleştirilmiş, özgün dövme demirin malzeme özelliklerini belirlemek amacıyla farklı yapılardan temin edilen demir elemanlar laboratuvar ortamında incelenmiştir. Sahada ve laboratuvarında mevcut olanaklar çerçevesinde yapılan çalışmalar, gelecekteki araştırmalara ışık tutacak nitelikte öncü bir çalışma olarak sunulmuştur. Araştırmanın daha derinleştirilebilmesi için yoğun çaba sarf edilmesine rağmen, çeşitli kısıtlamalarla karşılaşmıştır.

Çalışmayı etkileyen en önemli kısıt bütçe olmuştur. Bu kısıtın aşılması amacıyla, İstanbul Kalkınma Ajansı Yaratıcı Endüstriler Mali Destek Programı, TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı ve TÜBİTAK 1005 Ulusal Yeni Fikirler ve Ürünler Araştırma Destek Programı'na başvurular yapılmış, ancak başvurulardan olumlu bir sonuç elde edilememiştir. İhtiyaç duyulan tahribatsız muayene cihazları, yapılan görüşmeler sonucunda Troy-Met Kalite Kontrol Sistemleri San. ve Tic. Ltd. Şti. ve Hilti İnşaat Malzemeleri Tic. A.Ş. tarafından temin edilmiştir. Bu tür araştırmaların yürütülmesine maddi destek sağlayan kurumların, geçmişten günümüze miras niteliği taşıyan kültürel varlıkların korunmasına yönelik çalışmalara karşı daha duyarlı olmaları gerekmektedir.

Çalışmanın önündeki en büyük kısıt olan bütçe sorunlarının aşılması durumunda, incelemelerin kapsamının genişletilmesi mümkün olacaktır. Özellikle İstanbul genelinde ve Edirne'deki Selimiye Camii gibi yapıların incelendiği bu araştırma, farklı dönem yapılarının ya da çeşitli coğrafi bölgelerin dahil edilmesiyle daha da genişletilebilir. Örneğin, denizsel etkiler altında bulunan yapıların demir elemanlarının, kırsal bölgelerdeki yapılarda yer alan elemanlara kıyasla farklı çevresel koşullara maruz kaldığı açıktır. Bu durumun detaylı incelenmesiyle elde edilecek laboratuvar verileri, literatüre yeni ve önemli katkılar sağlayabilir. İmkanlar dahilinde demir kullanımının olduğu tüm Osmanlı yapılarının demir eleman tespitlerinin yapılması koruma alanında atılacak önemli bir adım olacaktır. Daha önceden tespit çalışması yapılmış restorasyon sürecine giren bir yapının içerdiği demir elemanların proje aşamasında bilinmesi olası güçlendirme çalışmasına veri sağlayacaktır.

Diğer yandan, günümüz teknolojik imkanları, özgün strüktürel demir elemanların bilinmezliklerini belirli bir ölçüde tespit etmeyi mümkün kılmaktadır. Piyasada mevcut olan yapı radarları, faydalı ölçüm derinliği açısından en fazla 80 cm derinliğe kadar demir tespiti imkânı sunmaktadır. Manyetik indüksiyon cihazları ise yaklaşık 20 cm derinliğe kadar demir okuması gerçekleştirebilmektedir. Bu değerler genel olarak betonarme yapılar için yeterli gelmektedir. Esasen bu tür cihazlar betonarme yapıların incelenmesi amacıyla geliştirilmiştir. Tarihi yapılarda kullanılan demir elemanlar ise genellikle bu ölçüm derinliklerinin ötesinde yer almaktadır. Ayrıca, tarihi yapıların duvar örgüsü, betonarme yapılara kıyasla daha heterojen bir yapı özelliği taşımaktadır. Tüm bu etkenler, söz konusu cihazların Klasik Dönem Osmanlı anıt mimarisi üzerindeki etkinliğini sınırlamaktadır. Tarihi yapılarda demir eleman tespitini daha verimli bir şekilde gerçekleştirebilecek cihazların geliştirilmesi koruma çalışmalarına önemli katkılar sağlayacaktır.

- Agasti, N., & Pani, B. (2023). Chemistry of ancient materials of iron in India . *Applied Surface Science Advances*.
- Ahunbay, Z., Altay, G., Arun, G., Aköz, F., Celep, Z., Erberik, A., . . . Ünal, Z. (2017). *Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu*. Ankara: T.C. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü.
- Akveren, S. (2010). Non-Destructive Examination Of Stone Masonry Historic Structures – Quantitative IR Thermography And Ultrasonic Testing.
- Annan, A. (2003). *Ground Penetrating Radar Principles, Procedures& Applications*. Mississauga, Canada: Sensors& Software Inc.
- Avunduk, A. (2021). Edirne Selimiye Camii Üzerinden Bir Yapı Malzemeleri Okuması. *Vakıf Restorasyon Yıllığı*, 7-32.
- Barkan, Ö. L. (1979). *Süleymaniye Camii ve İmaret-i İnşaatı (1550 - 1557)*. Ankara: Türk Tarihi Kurumu Basımevi.
- Baygut, A., & Durmuş, H. (2019). *Soğuk Dövme Yöntemi İle Üretilen Bağlantı Elemanındaki Kılcal Kafa - Kılcal Vida Dış Yüzey Çatlaklarının Girdap Akımları Metodu İle Analizi*. Sinop: Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi.
- Bayraktar, A. (2005). Tarihi Yığma Yapıların Depreme Karşı Güçlendirilmesi. *Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Artırılması Çalıştayı*. Ankara: Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- Bayraktar, N. T., & Kishali, E. (2017). Tarihi Yapılarda Hasarsız Testler Aracılığıyla Önleyici Korumanın Sağlanması: Kocaeli Ulugazi İlkokulu Örneği. *Mimar.ist dergisi*, 85-90.
- Bayram, S., & Tüzen, A. (1991). İstanbul Üsküdar Ayazma Camii ve Ayazma Camii İnşaat Defteri. *Vakıflar Dergisi*, s. 22: 199-288.
- Belce, E., Bekler, T., Kurban, Y. C., & Yalçın, C. Ç. (2019). Ayasofya Müzesi Zemin Yüzey Deformasyonlarının Yeraltı Radarı (GPR) İle İncelenmesi. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 362-366.
- Bellanova, M., Baggioli, A., Rivolta, B., & Felicetti, R. (2019). Metallurgical characterisation of a historical metal tie-rod from Milan Cathedral. *Construction and Building Materials*, 888-598.
- Binda, L. A., Saisi, A., & Tiraboschi, C. (2000). Construction and Building Materials. *Investigation Procedures for the Diagnosis of Historic Masonries*, s. Sayı:14 Sayfa:199-233.
- Binda, L., & Saisi, A. (2001). Non destructive testing applied to historic buildings: The case of some Sicilian Churches. *Historical Constructions* (s. 29-46). içinde Guimarães.

- Buonopane, S., & Kelton, S. (2008). Mechanical Properties of Wrought Iron from Penns Creek Bridge (1886). *Historic Bridges: Evaluation, Preservation, and Management* (s. 167-182). içinde New York: Crc Press.
- Calderini, C., & Lagomarsino, S. (2015). Seismic response of masonry arches reinforced by tie-rods: static tests on a scale model. *Journal of structural engineering*, 04014137.
- Casarin, F. (2017). *Relazione tecnica: indagini soniche tomografiche per la valutazione della consistenza dei pilastri*. Podova.
- Casarin, F., Valuzzi, M. R., Porto, F., & Modena, C. (2007). Evaluation of the structural behaviour of historic masonry buildings by using sonic pulse velocity method . *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture* (s. 227-236). içinde WIT Press.
- Castillo, R. V., Lara, M., Muñoz, E. R., Arjona, J. L., García, M. R., Osorio, A. A., & Ruiz, M. G. (2012). Thermal Imaging as a Non Destructive Testing Implemented in Heritage Conservation. *Journal of Geography and Geology*, 102-113.
- Clegg, B. (1993). *Underground Cable Fault Location*.
- Conyers, L. B., & Goodman, D. (1997). *Ground-Penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists*. Londra: AltaMira Press.
- Çaktı, E. (2024). Yarı Yapılandırılmış Görüşme.
- Çelik, M. (2013). Kaynak Bağlantılarında Konvansiyonel Ve Gelişmiş Ultrasonik Muayene Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Analizi (Yüksek Lisans Tezi). *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Malzeme ve İmalat Bilim Dalı, İstanbul*.
- Çelik, T., Tanrıverdi, Ş., Ural, A., & Fırat, F. K. (2021). Yığma Yapılarda Kullanılan Kenetlerin Yapı Davranışına Etkilerinin İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 650-659.
- Dabanlı, Ö. (2016). Nur-u Osmaniye Camii'nin deprem performansının belirlenmesi ve koruma önerileri (Doktora Tezi). *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Ana Bilim Dalı, Restorasyon Bilim Dalı, İstanbul*.
- Danışman, G. (2007). Kırklareli-Demirköy “Fatih” Dökümhanesi Su Enerjisi Düzenekleri Ön Değerlendirmesi. *Osmanlı Bilimi Araştırmaları* 9/2 1-2, 79-87. İstanbul: İstanbul Üniveristesi.
- Danışman, G., Gerritsen, F., Kaçar, M., Özbal, H., Özbal, R., Tanyeli, G., . . . Yılmaz, Z. (2007). Demirköy-Samakocuk Iron Foundry: An Industrial Archaeology Project At An Ottoman Metal Work-Shop Complex In Thrace. *TÜBA-AR Türkiye Bilimler Akademisi Arkeoloji Dergisi*, 91-110.
- Danışman, G., Özbal, H., Tanyeli, G., & Yalçın, Ü. (2006). Kırklareli-Demirköy Endüstri Arkeolojisi Çalışmaları: 2005 Sezonu İlk Çalışmaları. 22. *Arkeometri Sonuçları Toplantısı* (s. 1-22). Çanakkale: 2006.

- Davis, J., & Annan, A. (1989). Ground Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. *Geophysical Prospecting* (s. 37, 531-551). içinde
- Demir, C. (2012). Seismic Behaviour Of Historical Stone Masonry Multi-Leaf Walls (Doktora Tezi). *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yapı Mühendisliği Programı, İstanbul*.
- Dervişoğlu, R. (2007). Kırklareli, Demirköy Ottoman Ironworks: A Technological Investigation (Yüksek Lisans). *Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Ana Bilim Dalı, İstanbul*.
- Doğan, F. (2023). Istrancalarda Osmanlı Madenciligi: I. Viyana Kuşatması Sonrası Samakovcuk (Demirköy) Ve Turulya (Hamdibey) Demir Madenlerinde Yeni Düzenlemeler. *Istranca Tarih Araştırmaları Dergisi*, 46-60.
- Elban, W. L., Borst, M. A., Roubachewsky, N. M., Kemp, E. L., & Tice, P. C. (1998). Metallurgical Assessment of Historic Wrought Iron: U.S. Custom House, Wheeling, West Virginia. *APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology*, 26-34.
- Gordon, R., & Knopf, R. (2005). Evaluation of Wrought Iron for Continued Service in Historic Bridges. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 393-400.
- Griffin, S., & Pippett, T. (2002, Temmuz). Ground Penetrating Radar. *Geophysical and Remote Sensing Methods for Regolith Exploration*, s. 80-89.
- insapedia.com. (2024). <https://insapedia.com: https://insapedia.com/ultrasonik-gecis-hizi-deneyiyle-beton-dayanım-tayini/> adresinden alındı
- islamansiklopedisi. (2024). <https://islamansiklopedisi.org.tr: https://islamansiklopedisi.org.tr/sahn-i-seman> adresinden alındı
- Işık, İ. (2018). Karakterizasyon ve Tarihlendirme Çalışmalarının Arkeometrik Yöntemlerle İncelenmesi. *Cedrus*, Cilt: 6 , 713 - 736.
- Jung, K., Markova, J., Pokorny, P., & Sykora, M. (2018). Material Properties of Heritage Wrought Steel structure based on tests. *Çek Teknik Üniveritesi, Prag*, 128-137.
- Kaftan, M. A. (2006). Çelik Yapılarda Korozyon Oluşumu ve Korozyondan Korunma Yöntemlerinin Maliyet Açısından Karşılaştırılması (Yüksek Lisans Tezi). *Pamukkale Üniveritesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Denizli*.
- Kaplan, G., Avdan, U., & Kaplan, O. (2016). Tarihi Yapılarda Yapı Malzemelerinin Termografi Yöntemi İle Belirlenmesi. 6. *Uzaktan Algılama-Cbs Sempozyumu*, (s. 1130-1134). Adana.
- kontrolkalemi. (2024). <https://www.kontrolkalemi.com: www.kontrolkalemi.com: https://www.kontrolkalemi.com/forum/konu/kablo-ar%C4%B1za-tesbit-y%C3%B6ntemleri.28200/> adresinden alındı
- ktu.edu.tr. (20224). https://ktu.edu.tr: https://ktu.edu.tr/dosyalar/maden_98c1f.pdf adresinden alındı
- Kurugöl, S., & Küçük, S. G. (2015). Tarihi Eserlerde Demir Malzeme Kullanım ve Uygulama Teknikleri. 5. *Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe*

Güvenle Devredilmesi Sempozyumu (s. 521-536). Erzurum: TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası.

- Meola, C. (2013). Infrared Thermography in the Architectural Field. *The Scientific World Journal*.
- Moropoulou, A., Avdelidis, N., Karoglou, M., Delegou, E., Alexakis, E., & Keramidas, V. (2018). Multispectral Applications of Infrared Thermography in the Diagnosis and Protection of Built Cultural Heritage. *Applied Sciences*.
- Moropoulou, A., Labropoulos, K., Delegou, E., Karoglou, M., & Bakolas, A. (2013). *Non-Destructive Techniques As A Tool For The Protection Of Built Cultural Heritage*. Atina, Yunanistan: National Technical University of Athens.
- Nayır, Z. (1975). Omsanlı Mimarlığında Sultan Ahmet Külliyesi ve Sonrası (1609-1690). *İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, İstanbul*.
- ndt.net. (2024). <https://www.ndt.net/forum:https://www.ndt.net/forum/thread.php?msgID=76546> adresinden alındı
- Özbal, H. (2008). Preliminary Results from Industrial Archaeology Research at an Ottoman Iron Working Area in Turkish Thrace: Demirköy-Samakocuk. *Early in Europe Prehistoric, Roman and Medieval Iron Production*. Avusturya.
- Özbal, H. (2009). Demirköy Demirci İşliği. 25. *Arkeometri Sonuçları Toplantısı* (s. 237-262). Denizli: T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı.
- Özbal, H., Yalçın, Ü., & Dervişoğlu, R. (2007). Geç Osmanlı Döneminde Demir Üretim Teknolojileri: Demirköy 2016 Sezonu Buluntularının Analiz Sonuçları. 23. *Arkeometri Sonuçları Toplantısı* (s. 27-40). Kocaeli: Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü.
- Özbek Yaralı, Y., & Emre, S. (2019). Using Conventional Ultrasonic Testing and Phased Array Method for Nondestructive Testing of Railway Axles. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 489-495.
- Özcan, M. (2019). <https://mehmetozcan.com>. <https://mehmetozcan.com:https://mehmetozcan.com/works/sultanahmet/index.html> adresinden alındı
- Pehlivan, G. F. (2021). Arkeolojik alanlardaki belgeleme çalışmalarında bazı bozulmaların tespiti için termal kameranın kullanımı: İasos Bouleuterion'u örneği. 5. *Ulusal Yapı Kongresi ve Sergisi*. Ankara.
- Pehlivan, G. F. (2022). Kültürel Miras Yapılarında Taş Malzemenin Tahribatsız XRF Yöntemiyle Analizi: Şirinoğlu Hamamı Örneği. *KAPU Trakya Mimarlık Ve Tasarım Dergisi*, Cilt: 2 Sayı: 2, 57 - 68.
- Peker, M. A. (2019). Betonun Ultrasonik Tomografi Yöntemi ile İncelenmesinde Frekansın Etkisi (Yüksek Lisans Tezi). *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yapı Mühendisliği Programı, İstanbul*.

- Peker, M. A., & Pekmezci, B. (2022). Ultrasonik kayma dalgaları tomografisi ile beton kusurlarının incelenmesinde frekansın etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 58-67.
- Pekmezci, B. Y., Şeker, D. Z., Tavlı, E., Yorulmaz, B., Arabacı, E., Güler, F., & Gökpınar, F. (2019). Ultrasonik Kayma Dalgaları Tomografisi ile Betonda Kusur Tespiti. *Hazır Beton Dergisi*, 74-78.
- Popovics, J., Roesler, J., Bitner, J., Amirkhanian, A., Brand, A., Gupta, P., & Flowers, K. (2017). *Ultrasonic Imaging For Concrete Infrastructure Condition Assessment And Quality Assurance*. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Ray, A., Dhua, S. K., Prasad, R. R., Jha, S., & Banerjee, S. (1997). The ancient 11th century iron pillar at Dhar, India: a microstructural insight into material characteristics. *Journal of Materials Science Letters*, 371–375.
- Rucka, M., Wojtczak, E., & Zielińska, M. (2020). Integrated Application of GPR and Ultrasonic Testing in the Diagnostics of a Historical Floor. *Materials*.
- Sert, Ö. F., & Binan, C. Ş. (2023). Klasik Dönem Osmanlı Anıt Mimarisinde Kullanılan Strüktürel Demir Elemanların Tahribatsız Muayene Yöntemleri İle Tespiti. *Başkent 5. Uluslararası Multidisipliner Bilimsel Çalışmalar Kongresi*. Online.
- Sert, Ö. F., Binan, C. Ş., & Aras, S. (2024). Klasik Dönem (15. yy - 17. yy) Osmanlı Anıt Mimarisinde Kullanılan Strüktürel Demir Elemanların Tahribatsız Muayene Yöntemleri ile Tespiti, Sultan Ahmet Camii Üzerinden Bir Kesit. *Jass Studies-The Journal of Academic Social Science Studies*, 265-280.
- Shackley, S. M. (2014). *X-Ray Fluorescence (XRF): Applications in Archaeology*. New York: Encyclopedia of Global Archaeology.
- Skolnik, M. (1981). *Introduction to Radar Systems*. McGraw-Hill.
- Sönmez, N. (1997). *Osmanlı Dönemi Yapı ve Malzeme Terimleri Sözlüğü*. İstanbul: YEM Yayınları.
- Şengün, R. (2015). Darphane-İ Amire'nin Demir Üst Örtü Sistemlerinin İki Yapı Üzerinden İncelenmesi ve Koruma Önerileri (Yüksek Lisans Tezi). *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Ana Bilim Dalı, Restorasyon Programı, İstanbul*.
- Tanyeli, G. (1990). Osmanlı Mimarlığında Demirin Strüktürel Kullanımı (Yayınlanmamış Doktora Tezi). *İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul*.
- Tanyeli, G. (2017). *Hiçbir Üstad Böyle Kar Etmemiştir Osmanlı İnşaat Teknolojisi Tarihi*. İstanbul: Akın Nalça.
- Tanyeli, G., Geçkinli, E., & Ata, A. (1990). Osmanlı Mimarisinde Kullanılan Demir öğelerin üretim Teknolojisi. *VI. Arkeometri Sonuçları Toplantısı* (s. 109-125). Ankara: Ankara Üniversitesi Basımevi.
- Tok, A. (2017). From wood to coal: The energy economy in Ottoman Anatolia and the Balkans (1750–1914) (Doktora Tezi). *Boğaziçi Üniversitesi, Atatürk İlkeleri ve İnkılap Tarihi Enstitüsü, İstanbul*.

- Tosun, A. (2011). Wilhelm Conrad Röntgen'den Günümüze Radyografi. *Türkiye Klinikleri*, 57-59.
- Tuna, M. (2021). Yarı Yapılandırılmış Görüşme.
- Turan, S. (2009). Darbe Yansıma Yöntemi İle Kablo Arızalarının İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul*.
- Ulriksen, C. (1982). Application of Impulse Radar to Civil Engineering (Doktora Tezi). *University Technology, Lund, İsveç*.
- Weeds, R. (1994). *Geophysical Characterization of Sites*. Rotterdam: Balkema.
- Wilchek, L. A. (2000). Ground penetrating radar for detection of rock structure (Yüksek Lisans Tezi). *Alberta Üniversitesi, İnşaat ve Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kanada*.
- Yalçın, C. Ç., Gündoğdu, E., Kurban, Y. C., & Altunel, E. (2017). Eski Eserlerdeki Yapısal Tahribatların Termal Görüntüleme ve Mikrodalga Nem Ölçümleri ile Belirlenmesi: Ayasofya Müzesi Örnek Çalışması. *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 3447.
- Yalçın, C. Ç., Kurban, Y. C., & Altunel, E. (2017). Research using GPR into the cause of cracks and depressions in the floor of the gallery of Hagia Sophia Museum. *Construction and Building Materials*, 458-466.
- Yıldırım, H. (2015). *Karbon Çeliği Borularında Dijital Radyografi Kullanılarak Korozyon Tespiti*. İstanbul: Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Yıldız Temur, H. (2019). Kapadokya bölgesinde bulunan farklı dönem kaya oyma kiliselerin duvar resim pigmentlerinin elementel ve spektroskopik tekniklerle analizi (Yüksek Lisans Tezi). *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Ana Bilim Dalı, Nevşehir*.
- Yılmaz, U. (2010). Grup yayını ultrasonik tekniği kullanılarak kaynak hatalarının karakterizasyonu (Yüksek Lisans Tezi). *İstanbul Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul*.
- Yücel, N. (2022). The archaeometrical investigations of some iron components from the Ottoman period structures (Doktora Tezi). *Ortaoğlu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Arkeometri Ana Bilim Dalı, Ankara*.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Sert, Ö. F., & Binan, C. Ş. (2023). Klasik Dönem Osmanlı Anıt Mimarisinde Kullanılan Strüktürel Demir Elemanların Tahribatsız Muayene Yöntemleri ile Tespiti. Başkent 5. Uluslararası Multidisipliner Bilimsel Çalışmalar Kongresi. Online.

Makaleler

1. Sert, Ö. F., Binan, C.Ş. & Aras, S. (2024). Klasik Dönem (15. yy- 17. yy) Osmanlı Anıt Mimarisinde Kullanılan Strüktürel Demir Elemanların Tahribatsız Muayene Yöntemleri ile Tespiti, Sultan Ahmet Camii Üzerinden Bir Kesit. Jass Studies-The Journal of Academic Social Science Studies, 17(99), 265-280.

[Doi: 10.29228/JASSS.74271](https://doi.org/10.29228/JASSS.74271)