

Ayasofya'nın Osmanlı ve Cumhuriyet Dönemi Onarımları

1453 yılında İstanbul'un fethiyle birlikte Türklerin eline geçen Ayasofya, Fatih Sultan Mehmet'in ilk namazını (1 Haziran 1453) burada kılmasıyla birlikte camiye çevrilmiştir.

Çeşitli tarihi belgelerden, İstanbul'un fethini izleyen günlerde Fatih Sultan Mehmet'in İstanbul'u ve Ayasofya Kilisesi'ni çok harap bulduğunu öğreniyoruz. Bu dönemde İstanbul'u ziyaret eden seyyahlar 15. yüzyıl İstanbul'undan bahsederken, Şehrin en önemli yapıları olan Ayasofya'nın bazı kapılarının yere düştüğünü, içinin harap durumda olduğunu ve çevresinde hatta yapıya bitişik yerlerde gecekondular gibi evler bulunduğunu yazmışlardır.

İstanbul'un fethiyle birlikte Fatih Sultan Mehmet şehrin imarına hemen başlamış bu arada Ayasofya'ya da ayrı bir önem vermiştir. Ayasofya için bir vakıf kurmuş ve çeşitli mülklerin gelirlerini bakım ve onarım için Ayasofya'ya bağlamıştır. Fatih Sultan Mehmet'in El-Cami'ül Kebir-ül Atik ismi ile tanımlanan vakfiyeden Ayasofya'nın onarımına çok önem verdiği anlaşılmaktadır.

Ayrıca Edirne Kadısı Muhammet bin Aliyi'l Fereri tarafından (H: 926) Miladi 1519 tarihinde hazırlanan Ayasofya Vakıfları tahrir defterinde caminin işleri için 62 kişilik bir ekip görevlendirildiği öğrenilmektedir. Padişahın bu Vakfiyesi ile de Ayasofya'nın yüzyıllar boyunca yaşaması sağlanmıştır.

Osmanlı döneminde yapılan onarımlarla Muslihiddin Mimar Sinan'ın Atik'in, Mimar Ayas'ın, Mimar Hayrettin ve Mimar Sinan'ın Ayasofya'ya büyük emekleri geçmiştir.

Ayasofya Kilisesi'nin camiye çevrilmesiyle birlikte bazı değişiklikler yapılmış, ancak binanın esas yapısı olduğu gibi korunmuştur. Hatta insan figürlü mozaiklerin üzerleri bile Fatih döneminde kapatılmıştır. Absise bir mihrap yapılmıştır. Yapının genel temizliği ve bazı küçük onarımlar yapılmıştır. Camiye çevrilişinden hemen sonra yarım kubbelerden birisi üzerine ahşap bir minare yapıldığı bilinmektedir. Bir rivayete göre, İstanbul'un fethinden önce Ayasofya'yı onarmak üzere gelen Ali Necar isimli bir Türk mimarı galeriye çıkışı sağlayan dört köşedeki rampalardan birinin içine merdivenler yaparak gelecekteki minarenin kaidesini hazırlamıştır. Daha önceden yapılan dış narteksin üzerinde bulunan çan kulesi fetihden sonra da korunarak 17. yüzyıla kadar gelmiştir. Ancak bu kulenin minare olarak kullanılıp kullanılmadığı bilinmemektedir. Ancak Fatih Sultan Mehmet'in, Ayasofya'ya bir minare yaptırdığı bilinmektedir. Bugünkü tuğla minarenin o devre ait olduğu iddia edilmektedir.



Ayasofya'nın ana giriş kapıları

Ancak bazı tarihi kaynaklardan ve belgelerden de Sultan II. Selim döneminde Fatih minaresinin yıkıldığı daha sonra bugünkü tuğla minarenin yapıldığı, Fatih minaresinin de Sultan II. Beyazıt zamanında onarım gördüğü bilinmektedir.

Ayrıca Fatih Sultan Mehmet Ayasofya'nın kuzeyine bir medrese yaptırdı. Sultan II. Beyazıt (1481-1512) devrinde yapının içindeki bazı mozaikler 1506 tarihinde kireçle kapatıldı. Medrese üzerine de bir kat ilave yapıldı. Kanuni Sultan Süleyman döneminde (1520-1566), Macaristan-Budin seferinden sonra 1526 tarihinde mihrabın sağ ve solunda bulunan şamdanlar Ayasofya'ya vakfedildi. Ufak tefek onarımlar olmasına rağmen en önemli restorasyonlar Sultan II. Selim döneminde (1566-1574) yapıldı.

Sultan II. Selim'in hükümdarlığının son yıllarında Ayasofya'nın duvarları dışı doğru açılmaya başlamış ve bunun sonucu olarak da yapı yıkılma tehlikesiyle karşı karşıya gelmiştir. Tarihçi Selanikli Mustafa Efendi yapının bir buçuk zirâ kadar yana meylettğini kaydetmiştir. Padişah yanına devlet büyüklerini ve hassa mimarları ve Mimar Si-

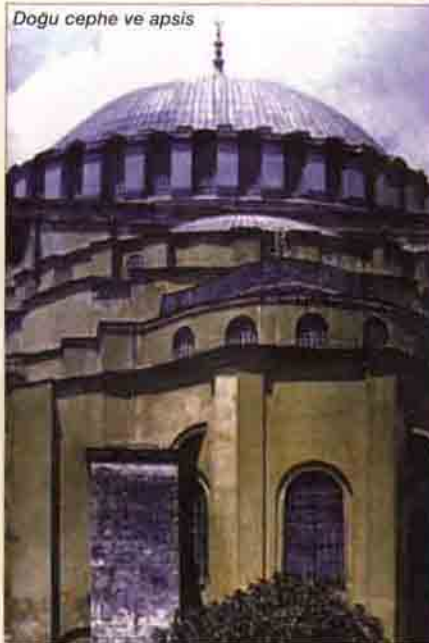
nan'ı alarak yapıya gelmiş, durumu görerek önlem alınmasını istemiştir. Ayrıca Peçevi İbrahim Efendi'den de, Sultan II. Selim'in kubbeyi sağlamlaştırdığı, bazı koruyucu payandalar ve iki minare yaptırdığını öğrenmekteyiz.

Sultan II. Selim'in emriyle Mimar Sinan yapıya bitişik olan evleri kaldırtarak yapının etrafını temizlemiş ve caminin iki yanında 35 şer arşınlık (yaklaşık 24 metre) yeri boş bırakarak yollar açtırmış, Fatih Sultan Mehmet'in yaptırdığı minareyi kaldırtmış, kuzey-batı ve güney-batıya aynı zamanda payanda işlevi de görecek iki minareyi yaptırmıştır. Ayasofya'nın kuzeyinde yıkılan evlerden boş kalan yere dayanak olmak üzere iki payanda yaptırmıştır. Sultan II. Selim'in başlattığı bu restorasyon çalışmaları oldukça uzun sürmüş, ancak Sultan III. Murat'ın saltanatının ilk yıllarında tamamlanabilmiştir.

Sultan III. Murat döneminde (1574-1595) güney cephe-deki Bizans döneminden kalan payanda duvarları yükseltilmiştir. Yine yapının içinde de bazı değişiklikler olmuş, çinilerle bezeli hüsnar mahfili mimber, vaaz kürsüsü, müezzin mahfili bu yıllarda yapılmıştır. Sultan III. Ahmet (1703-1730) zamanına kadar Ayasofya'ya küçük çaplı onarımlar yapılmış, özellikle kuzun örtüleri yenilenmiştir.

Sultan III. Ahmet döneminde sıvalar yenilenmiş, eski gravürlerde ve resimlerde görülen kubbeye asılı muhteşem bir top kandil asılmıştır.

Sultan I. Mahmut (1730-1754) döneminde, Ayasofya'nın ana mekanında iki payanda arasına saray kütüphanesini halka açmak amacıyla bir kütüphane yapılmıştır. Ayrıca bahçeye imaret, sıbyan mektebi ve şadırvan yaptırılmıştır. Hazine binası erzak deposuna çevrilmiş ve çan kulesi de kaldırılmıştır. Sultan II. Mahmut (1808-1839) dö-



Doğu cephe ve absis

minde, 1809 yılında Ayasofya'nın genel bakımı yapılmış ve 800 kese altın harcanmıştır (1 kese= 25 altın, 1 altın= 1 gr. 60 cm dir)

Ayasofya Sultan III. Mustafa döneminde (1754-1774) meydana gelen depremde (1766) büyük hasar görmüş ve onarılmıştır. Ancak bu onarımlarla ilgili hiçbir belge günümüze ulaşamamıştır.

Ayasofya 2. büyük onarımı Sultan Abdulmecid döneminde (1839-1861) görülmüştür. Malları Beytülmal'e kalan Şeyhülislam Mekkiade Ahmet Efendi'nin parasına bir miktar da padişah eklemiş ve İsviçreli mimar G.T. Fossati'ye Ayasofya'nın restorasyonu verilmiştir. Bu restorasyon için toplam 200 bin altın harcanmış (1 altın= 7 gr 61 cm) ve onarında 800 işçi çalıştırılmıştır. Onarımlar 1847 de başlamış 1849 tarihinde tamamlanmıştır. Yapının iç ve dış sıvaları tamamen değiştirilmiştir. Mozaikleri meydana çıkarılarak temizlenmiş ve onarıldıktan sonra haçlı ve insanlı olanların üzerleri yeniden ince bir badana tabakası ile kapatılmıştır. Sultan III. Ahmet ve I. Mahmut dönemlerinde değişiklikler gören Hünkar mahfili bugünkü şeklini almış, binanın dışı sıvanarak kırmızı yollu sarı boya ile boyanmıştır. Kubbeyi dıştan destekleyen kemerler de bu dönemde yapılmıştır. Ayrıca çift demir çemberlerle kubbe takviye edilmiş, üst galeride 13 adet sütun düzeltilmiştir. Bazı kapılar da yenilenmiştir.

Yapının bahçesine namaz saatlerinin ayarlanması için, içinde saatlerin topluca bulunduğu muvakkidhane binası yapılmıştır. (Bugün büro olarak kullanılmaktadır). İsviçreli Mimmar G. T. Fossati Ayasofya'nın tam bir rölevesini çıkarmak için bazı ölçüler almıştır. G. T. Fossati Ayasofya'nın büyük bölümünü kapsayan bir albüm hazırlamış ve daha sonra bunları Torino'da açılan mimari sergide sergilemiştir.

Fossati'nin Ayasofya'daki çalışmaları sürerken, bu kez Prusyalı mimar W. Salzenberg, padişahın özel izniyle İstanbul'a gelerek yapıyı incelemiş,

meydana çıkarılan mozaiklerin desenlerini Fossati'nin kurduğu iskeleden yararlanarak çizmiştir. Fossati'den önce yayınlanmaya kalkınca da iki mimarın arası açılmıştır.

19. yüzyılın başlarında Ayasofya'nın detaylı planlarının çizilmesi ve kesitlerinin hazırlanmasını H. Prost yapmıştır. 1904 yılında İstanbul'a gelen bu genç Fransız mimar Ayasofya'nın yalnızca Bizans döneminin değil Türk döneminde eklenen imaret, türbeler ve medrese gibi yapıların da planlarının hazırlanması amacıyla Paris Akademisi'nden ödenek istemiş, önce kabul görmemesine karşın 1906 yılında bu isteği kabul edilerek kendisine 2000 frank verilmiştir. 2 yıl süren çalışma süresinde plan, kesit ve cephe görünümleri çizilmiştir.

Ayasofya 10 Temmuz 1894 yılında meydana gelen depremde son derece hasar görmüş, onarımı için birçok Avrupalı mimarla bağlantıya geçilmesine rağmen, Balkan Savaşı'nın başlaması nedeniyle onarım uzun süre yapılamamıştır. Ancak dış ülkelerin basınında Ayasofya ile ilgili bazı haberlerin çıkması Osmanlı hükümetini rahatsız etmiş ve Ayasofya'nın onarımı tekrar gündeme gelmiştir. Fransa'dan, İtalya'dan ve İngiltere'den yine birçok mimarın davet edildiği ve bunlara restorasyon projesi hazırlatıldığını Vakıflar'da bulunan bazı belgelerden biliyoruz. Ancak bu defa da I. Dünya Savaşı patlak verince çalışmalar durmuştur.

Ayasofya'nın Cumhuriyet Dönemi Onarımları

Ayasofya 1934 yılında Atatürk'ün isteği ve Bakanlar Kurulu'nun da 14 Kasım 1934 gün ve 94041 sayılı kararı ile 1 Şubat 1935'den itibaren müze olmuştur.

Ayasofya'nın onarımına başlanmadan önce etrafındaki yapılar yine Bakanlar Kurulu kararı ile kamulaştırılarak yıkılmış ve etrafı temizlenmiştir. Ayasofya'nın batı cephesinin siva ve badanaları yenilenmiş dış

narteks ele alınmış, iki yerde açılan tuğla kemerler kapatılmıştır. Bahçede de sıbyan mektebi onarılmıştır. Ayrıca İstanbul Arkeoloji Müzeleri'nden getirilen İstanbul'daki yıkılmış ya da harabe olmuş diğer Bizans yapılarına ait mimari parçalar teşhir için Ayasofya'nın bahçesine yerleştirilmiştir.

Ayasofya müze haline getirildikten sonra Amerikan Bizans Enstitüsü üyelerinden R. Van Nice binanın son derece hassas rölevelerini çizmiştir. Ayrıca Alman Arkeoloji Enstitüsü İstanbul Şubesi'nden A.M. Schneider 1936 yılında Ayasofya'nın batı cephesinde bir kazı yaparak II. Theodosius döneminde yapıldığı kabul edilen II. Ayasofya'nın girişini ortaya çıkartmıştır. İşlenmiş büyük mermer mimari parçalar bugün Ayasofya'nın bahçesinde sergilenmektedir. Bugünkü yapıya zarar vereceği endişesiyle kazı durdurulmuştur.

Ayasofya'nın restorasyonu 1982 yılından sonra büyük önem verilmiş, kubbe kurşunları değiştirilerek bazı çatlaklar onarılmış ve galeriye çıkan rampalar yeniden düzenlenmiştir. Ayrıca bu dönemde Fatih Sultan Mehmed'in bahçeye yaptırdığı ve 1935'de çok harap durumda olduğu için yıktırılan medresenin kazısı yapılmıştır. Zamanla toprak dolgu altında kalan bu medrese temizlenmiş, medresenin temel duvarları ortaya çıkınca onarılmış ve rölevesi çıkarılmıştır.

1982 yılına gelene kadar Ayasofya'da çok önemli restorasyon çalışmaları olmamış, ancak 1934 yılında yapı müzeye çevrildikten sonra üzeri sıvalı olan mozaiklerin üzerlerinin açılması için Amerikalı Whittemare görevlendirilmiştir. Yapı 1953-1957 yıllarında Y. Mimar Cahide Taner tarafından da onarım görmüştür. Bu dönem çalışmalarında ağırlık siva ve kurşun tamirlerine verilmiştir. Batı yönündeki payandalar siva raspaları yapılarak yenilenmiş, daha önceki onarımlarda payandaların bozulan eksenleri siva ile düzeltilmiştir. Hünkar mahfili girişindeki döşemeler tamamıyla yenilenmiştir.



1982 yılından sonra Kültür Bakanlığı tarafından Ayasofya'nın restorasyonuna büyük önem verilmiş ve çalışmalar hiç durmadan günümüze kadar devam ettirilmiştir. Kurşun örtünün yenilenmesi kırk pencerelerin tamir edilmesi, mermerlerin temizlenmesi gibi çalışmalar devamlı olarak yapılmaktadır.

Sürekli bakım ve onarımla yaşatılan Ayasofya bugün birçok yabancı bilim adamının ilgisini çekmektedir. Değişik üniversitelerden bilim adamları, özellikle yapısal açıdan Ayasofya ile ilgilenmektedir. Taşıyıcı sistemin deprem karşısındaki davranışı, deformasyonları, eski onarımları, malzemedeki kimyasal bozulmalar araştırma konularını oluşturmaktadır.

ABD'den Princeton Üniversitesi'nden Prof.Dr. Ahmet Çakmak ve Boğaziçi Üniversitesi'nden Prof.Dr. Mustafa Erdik başkanlığında bir ekip 1989 yılından bu yana sürdürdükleri proje ile strüktürün deprem karşısındaki davranışını incelemekte ve gerekli tahkim ve takviye gereksinimlerini araştırmaktadırlar.

Yine Japonya'dan Tsukuba Üniversitesi'nden Prof.Dr. Kenichiro Hidaka ile İTÜ'den Prof.Dr. Müfit Yorulmaz başkanlığında bir ekip 1991-1993 yılları arasında yaptıkları çalışmalarla kubbenin mevcut du-



rumunu belgeleyen fotogrametrik çalışmaların yanı sıra malzeme ile ilgili ve yapısal araştırmaları içeren bir çalışma yapmışlardır. Japon ekip 1994-1996 döneminde de araştırmalarına devam etmiş, metal detektörlerle galeri ve kubbe seviyesindeki demir takviye elemanlarının durumlarını araştırmışlardır. Ayrıca yapı içinde belirlenen 50'nin üzerindeki noktalardan bilgisayar yardımıyla bir yıllık ısı, nem ve hareket ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler halen devam etmektedir.

İstanbul Restorasyon ve Konservasyon Merkez Laboratuvarı Müdürlüğü tarafından UNESCO desteği ile 1992'den bu yana sürdürülmekte olan mozaik sağlamlaştırma çalışmaları kubbenin kuzey doğu çeyreğinde devam etmektedir. 1992-1996 yılları arasında kubbenin mevcut durumu çizim ve fotoğraflarla belgelenmiş tarihi dönemleri ve onarım teknikleri hakkında veriler toplanmıştır. Bu çalışmalar yalnızca kubbe mozaikleri ile kalmamış, aynı zamanda ana kubbenin ortasındaki kalem içi de onarılmıştır.

1993 yılında Kültür Bakanlığı Anıtlar ve Müzeler Genel Müdürlüğü Ayasofya Müzesi ve bağlı binalarında sürdürülen restorasyon çalışmalarına görüş ve öneriler hazırlaması amacıyla üniversite öğretim üyelerinin de katıldığı bir bilimsel kurul oluşturmuştur. Kurulun ilk toplantısında Ayasofya ile ilgili tüm çalışmaların bir araya getirilmesi, şimdiye kadar yapılan onarımların belgelerinin derlenmesi önerilmiştir. Böylece bir Ayasofya Araştırma Merkezi'nin çekirdeğinin oluşturulması, başvuru kitaplığı ve bel-

geleri ile bu merkezin Ayasofya ile ilgili tüm kaynakları barındırması hedeflenmiştir. Tüm hedeflenenler tam anlamıyla başarılamamış olmasına rağmen bu bilimsel kurul şu anda Ayasofya'da yapılan tüm restorasyonları yönlendirmektedir.

Bu bilimsel kurul kubbenin geleneksel yöntemde olduğu gibi çamur harcıyla sıvanarak 2 mm lik kolayca delinen kurşun levhaların 3 mm lik olmasına karar vermiş ve 1994/1995 döneminde ana kubbenin kurşun örtüsü tamamen yenilenmiştir. 1996 yılında da batı yarım kubbenin örtüsü değişmiştir.

Yine Kurul'un kararı ile, Fossati onarımlarıyla cephede oluşan almasıık duvar izleri yok olmuş cephelerin çimentolu harçla sıvanarak bir zamanlar sarıya daha sonra da kırmızıya boyanan cephelerin su tutan ve kimyasal olarak hasar veren yeni sıva tabakasının bir program dahilinde yerini horasan harçlı bir sıvaya bırakması uygun görülmüş ve çimento harçlı sıvanın sökülmesi önerilmiştir. İlk önce güney cephenin sıvaları sökülüştür.

Bütün bu araştırmalara ve girişimler rağmen Ayasofya gibi 'Dünya Kültürel Mirası' listesine girmiş bir yapının hâlâ ciddi bir onarım projesi bulunmamaktadır. Yapılan bu araştırmalar göz önüne alınarak hazırlanacak bir restorasyon programı ile Ayasofya'nın daha yüz yıllar boyunca ayakta kalmasının sağlanması gereklidir.

Nilay Yılmaz Emre
Ayasofya Müzesi Müze Araştırmacısı

Kaynaklar:

Eyler, S. "Fossati Caspore ve Giuseppe", *İstanbul Anıtlar ve Müzeler* XI 3818-3823

Fossati, G. *Ayasofya Constantinople, As recently restored by order of H.M. Sultan Abdul Mejid II*, London, 1952.

Yücel, E. "Ayasofya Çalışmaları ve Yapılan Onarımlar" *Sanat Tarihi Araştırmaları*, 6 (1989): 26-30

Kömür Kökenli Doğal Gaz

Kömürleşme ile başlayan metan gazı oluşumu, kömür yatakları için özellikle işletme sırasında büyük tehlike oluşturmaktadır. Ancak bu potansiyelin tehlikesiz duruma getirilmesi ve ekonomiye kazandırılması mümkündür.

Biyojenik kökenli doğal gazlar grubu içinde yer alan kömür kökenli doğal gaz, aynı zamanda çevre dostu olması nedeniyle günümüzde özellikle gelişmiş ülkelerde özel bir ilgi görmektedir.

Kömür kökenli doğal gazın rezerv tahminleri ve üretimi, petrol kökenli doğal gaz çalışmalarından farklılıklar gösterdiğinden tüm dünyada bu konuda araştırmalar sürmektedir. Çevreciler ve yeşiller kabul etmemekle beraber, yapılan enerji projeksiyonları, sanayileşme sürecindeki ülkemizde enerji gereksiniminin her geçen gün arttığını göstermektedir. Ayrıca enerji üretim ve tüketim istatistikleri bu artışın önümüzdeki yıllarda daha da fazla olacağını ortaya koymaktadır.

Jeotermal, güneş, rüzgâr, dalga gibi temiz enerji kaynakları günümüzde özellikle gelişmiş ülkelerin dillerinden düşürmedikleri çevre kavramı ile iyi dost olmalarına karşın kendine özgü enerji dönüşüm sistemleri ve teknolojiler gerektirdiğinden gereken ilgiyi görememektedirler. Bunun yanı sıra nükleer enerji konusundaki tartışmalar ve özellikle gelişmiş ülkelerde bu enerjiye karşı oluşan tepkiler, henüz bu santrallara sahip olmayan ancak yapımını planlayan ülkeleri düşündürmektedir. Bu yüzden çevresel etkileri bakımından bazı dezavantajları bulunmasına rağmen fosil yakıtlar günümüzde ilgi odağı olmaya devam etmektedirler.

Kömür, bitümlü şeyl, petrol gibi fosil yakıtlar grubu içinde bulunan doğal gaz, grubunun en temiz yakıtı olması nedeniyle özel bir ilgi görmektedir ve önemi her geçen gün daha da artmaktadır.

Dünyada yaygın olarak enerji üretiminde, sanayide ve evlerde kullanılan petrol kökenli doğal gaz gibi, kömür kökenli doğal gazın da ekonomik olarak kullanılabilirliğini araştıran çalışmalar son yıllarda yoğunlaşmıştır. Başta Amerika Birleşik Devletleri olmak üzere Çin, Avustralya, Polonya, İngiltere ve Almanya'da bu konuda önemli çalışmalar yapılmaktadır.

Ülkemizde TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Yer Bilimleri Bölümü 1991 yılında kömür kökenli doğal gaz (Coalbed Methane) konusunda bir araştırma başlatmıştır. MTA Genel Müdürlüğü ve Türkiye Taşkömürü Kurumu işbirliği de sağlanarak Zonguldak Havzası'ndaki kömür kökenli doğal gazın oluşumu, göçü ve birikmesi araştırılmış ve sonuçta havzada gaz potansiyelinin varlığı ortaya konmuştur.

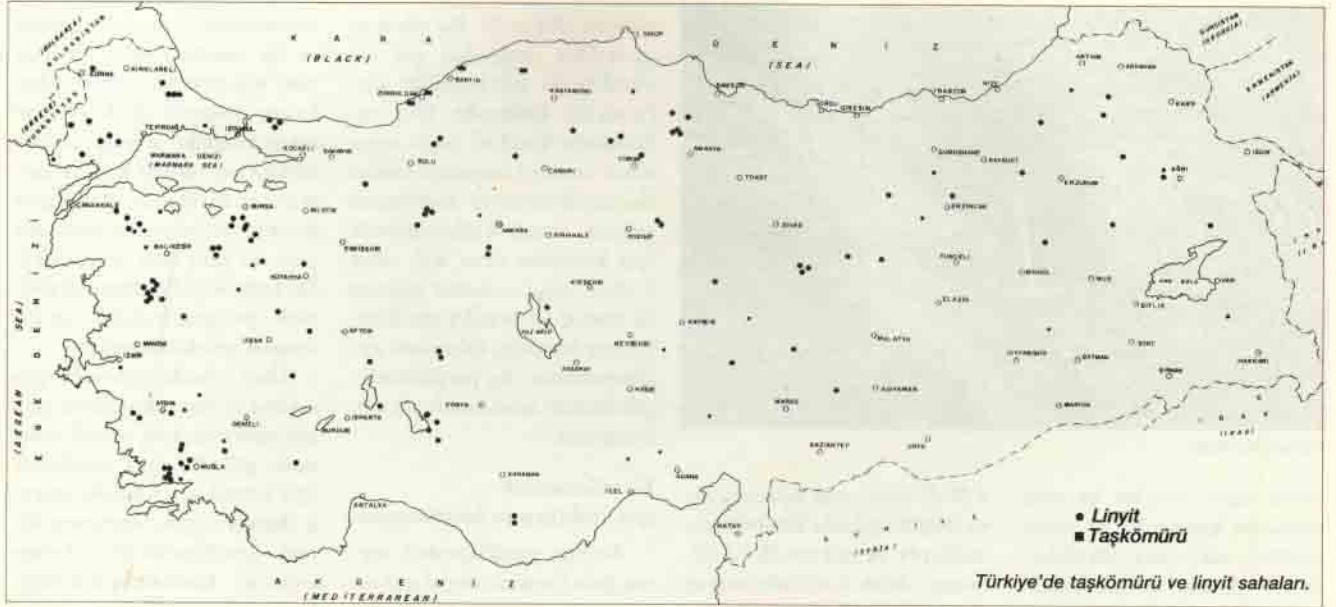
Doğal Gazlar

Oluşum koşulları ve bileşimlerine göre doğal gazları üç grupta toplamak mümkündür. Bunlar biyojenik kökenli doğal gazlar, magmatik ve metamorfik kökenli doğal gazlar ile radyoaktif kökenli doğal gazlardır.

Biyojenik kökenli doğal gazlar

Biyojenik kökenli doğal gazlar, organik maddenin biyolojik ve fizikokimyasal proseslerle hidrokarbonlara dönüşmesi sonucu oluşur. Bunlar; bataklık gazları, kömür kökenli gazlar, petrol kökenli gazlar, tuz tabakalarında oluşan gazlar ve çamur volkanı gazları olarak sınıflandırılır.

Bataklık gazları, eski ve yeni bataklıklar ile delta ve alüvyonlarda görülür. Ülkemizde buna en güzel örnekler Bafra, Çarşamba ve Adana Ovaları'dır. Kömür kökenli gazlar, kömürü oluşturan bitkisel maddelerin turbiyelerde depolanarak bozulmasıyla oluşmaya başlar ve kömürleşme derecesi (rank) arttıkça gaz oluşumu artar. Buna en iyi örnek Zonguldak kömür havzasıdır. Petrol kökenli gazlar, petrol olu-



şum prosesleri ile meydana gelir, bileşiminde ağırlıklı olarak bulunan metan yanında, metandan daha ağır hidrokarbonlar da içerir. Ülkemizde Hamitabat ve Çamurlu sahaları petrol kökenli doğal gazlara örnek olarak verilebilir.

Tuz tabakalarında oluşan gazlar azot, metan ve karbondioksit gazları olup ağır hidrokarbon içermezler. Petrol ve kömür sahalarında oluşan gazlar basınçları nedeniyle çatlak boyunca yüzeye çıkarlar. Çıktıkları sırasında basınçları oranında killi malzemeyi yüzeye taşıyarak, çıktıkları noktada oluşan kraterleri çevresinde bir koni oluştururlar ve bu koni nedeniyle çamur volkanı olarak adlandırılırlar. Bileşiminde metan, karbondioksit, azot ve hidrojen sülfür bulunan bu gazı örnek olarak ülkemizde Muş Ovası'nda yıllardan beri çıkmakta olan gazlar gösterilebilir.

Magmatik ve metamorfik kökenli doğal gazlar

Magmatik ve metamorfik kökenli doğal gazlar karbondioksit, karbonmonoksit, hidrojen sülfür, azot gibi gazların yanında su buharı ve asal gazları da içerir. Ülkemizde Orta ve Doğu Anadolu'daki genç volkanlar ile Kuzey Anadolu Fayı ve Doğu Anadolu Fayı'na bağlı değişik açılı faylar boyunca karbondioksit çıkışları yaygındır.

Radyoaktif kökenli doğal gazlar

Radyoaktivite nedeniyle oluşan gazlar olup başlıcası helyumdur. Helyum, iki proton ile iki nötrondan oluşan bir çekirdeğe sahip asal gazdır. Helyum atmosfer, manto ve kabuk kökenli olarak meydana gelebilmekte ve bu köken izotop çalışmaları ile belirlenebilmektedir.

Kömür Kökenli Doğal Gaz

Kömürleşme prosesleri ile oluşan ve kömürün moleküler yapısında adsorbe edilmiş olarak bulunan doğal gazın bileşiminde ağırlıklı olarak metan ile karbondioksit, oksijen, nitrojen, metandan daha ağır

hidrokarbonlar (etan vb), hidrojen, helyum bulunur.

Kömürleşme sürecinde vitrinit yansımaya değeri %2 ye ulaşıncaya kadar ortalama olarak metan 63 - 157 cm³/gr, karbondioksit 63 - 157 cm³/gr, nitrojen ise 8 - 16 cm³/gr dır.

Kömür kökenli doğal gaz (metan) oluşum koşullarına göre ya biyojenik ya da termojenik olmaktadır. Biyojenik metan gazı, yüzeye çok yakın sulu ortamda bitkilerin bozuşması ile oluşan turba, linyit ve subbitümlü kömürler olarak isimlendirilen kömürleşme derecesi düşük kömürlerde meydana gelebildiği gibi, esas olarak kömürleşme derecesi yüksek olan bitümlü kömürler ve antrasitlerde oluşur. Kö-

mürleşme derecesi yüksek olan kömürlerin oluşturduğu metan gazı ekonomik rezervler sunabilir.

Biyojenik kömür kökenli gaz, oluşum açısından birincil ve ikincil olarak ikiye ayrılır. Birincil biyojenik metan nispeten düşük sıcaklıklarda ve gömülme derinliklerinde (Rm %0,3) turbalardan oluşur. Bu metan denizel çökellerde gömülmeden kısa süre sonra oluşan biyojenik gaz ile büyük benzerlik göstermektedir. İkincil biyojenik metan ise meteorik suların kömüre nüfuz etmesi ile ortamda başlayan metabolik faaliyetler sonucu oluşur. Bu esnada gömülme ve kömürleşme tamamlanmış olup kömürün vitrinit yansımaya değeri %0,30 - 1,50 arasında bir değere ulaşmış ve hatta %1,50 yi bile geçmiştir. Bu yüzden ikincil biyojenik metan ile birincil biyojenik metan oluşum açısından farklıdır.

Termojenik kömür kökenli gaz oluşumu da iki grupta değerlendirilir. Erken termojenik metan yüksek uçuculu bitümlü kömürlerden (Rm %0,5 - 0,8) oluşur ve etan, propan ile hidrojen zengin kömürlerden türeyen diğer ıslak gaz bileşenlerini içerir. Termojenik metan oluşumu vitrinit yansımaya değeri %0,74 olan kömürlerde gerçekleşir. Kömür kökenli doğal gazın bileşimi, kömürleşme derecesi ile doğ-

Açık ocak kömür işletmesi





Kömür mostrası

rudan ilgili olmakla beraber havzanın hidrolojisi de bunu kontrol eden ana faktörlerdendir. Gazın bileşimindeki karbondioksit önemli bir bölümü ilk kömürleşme süreci içinde oluşur ve kömürleşme arttıkça gaz oluşumu genellikle azalır. Avustralya da Sydney ve Bowen havzalarındaki Permiyen yaşlı bitümlü kömürlerde yapılan izotop çalışmaları karbondioksit mikrobiyolojik indirgenmesinin geleneksel termojenik reaksiyonlardan daha çok, gazın bileşimi ile ilgili olduğunu göstermiştir.

Kömürleşme proseslerinin ilk dönemlerinde kömürün üzerini örten tabaka ince ve geçirimsiz olduğundan oluşan gazın çok az bir kısmı depolanır. Kömürleşme proseslerine bağlı olarak sıcaklık, basınç yanında üzerindeki ve çevresindeki kayalar da geçirimsizleştiğince gazın büyük bölümü kömürde tutulmaya başlar. En fazla metan gazı oluşumu orta uçuculu bitümlü kömürlerden, düşük uçuculu kömürlere geçişte gerçekleşir. Bu sırada ortamın sıcaklığı yaklaşık 150°C dir.

Kömürün maseral bileşimi, kömürde adsorbe olacak metan gazı miktar ile doğrudan ilgilidir. Vitrinitce zengin kömürlerde metan adsorpsiyonu genellikle yüksektir. İnertinit içeriği arttıkça metan adsorpsiyonu azalmaktadır.

Kömürleşme derecesi arttıkça kömürün bünyesinde bulunan su tedrici olarak tabaka dışına atılır. Yüksek uçuculu bitümlü kömürlerde su mikta-

rı % 27 iken, orta uçuculu veya düşük uçuculu bitümlü kömürlerde su miktarı % 12 dir. Sonuç olarak kömürde oluşan metan gazı miktarının, kömür tabakasının yüzeyden derinliğine, kömürleşme derecesine (rank) ve diğer jeolojik koşullara bağlı olduğu söylenebilir.

Rezerv Tahmini

Konvansiyonel yöntemlerle üretimi planlanan gaz rezervi tahmini iki ayrı değerlendirme gerektirmektedir. Bunlar; yerinde gaz miktarı ve üretilebilecek gaz miktarıdır.

Yerinde gaz miktarının belirlenmesi

Yerinde gaz miktarı genellikle hacimsel hesaplamalar ile yapılır. Yerinde gaz miktarının hesaplanmasında iki önemli parametre vardır. Bunlar yerinde kömür miktarı ve metan içeriğidir. Metan içeriği, kömürde ton başına bulunan gaz miktarını ifade etmekte olup doğru bir rezerv tahmini yapılabilmesi için çok iyi hesaplanmalıdır. Metan içeriğini çeşitli yöntemler ile hesaplamak mümkündür.

- 1) Doğrudan gaz desorpsiyon ölçümleri: Kömür numunesinden açığa çıkan gaz miktarı olup laboratuvarında ölçülür.
- 2) Metan emisyon debisi: Kömür ocaklarında, çalışılan damarda açığa çıkan metanın ton başına miktarıdır.
- 3) Sorpsiyon-izoterm bağıntısı: Deneyimlere dayalı bağıntılar olup belirli sıcaklıklarda değişen basınçlar ile teorik olarak kömürün ton başına tutabileceği maksimum gaz

miktarı ilişkisidir. Bu yöntem genellikle doğrudan gaz ölçümlerinin yapılamadığı durumlarda kullanılır. Her tip kömürün kendine özgü sorpsiyon-izoterm bağıntısı vardır. Sorpsiyon-izoterm bağıntısını sağlıklı olarak kullanabilmek için kömürün nem, kül, sabit karbon, uçucu madde miktarı ile basınç ve sıcaklık gradyanlarının önceden bilinmesi gerekmektedir. Bu parametreler gaz üretim aşamasında da çok önemlidir.

Üretilebilecek gaz miktarının belirlenmesi

Kömür yataklarından metan gazı üretimi, doğal gaz sahalarında yapılan sondaj ve benzeri çalışmalar ile gerçekleştirilmektedir. Ancak rezervuar üretim prosesleri açısından doğal gaz sahalarından büyük farklılıklar gösterdiğinden konvansiyonel üretim tahmin yöntemlerini burada kullanmak mümkün olmamaktadır.

Kömürde matriks boyunca difüzyon ile çatlaklardaki serbest gaz akışı üretimin gerçekleşmesinde çok önemli iki faktördür. Metan gazı kömürde adsorbe olarak bulunduğu uzun süreli üretimlerde özellikle difüzyonun önemli bir parametre olduğu unutulmamalıdır. Bununla beraber geçirimsizlik, statik rezervuar basıncı ve gaz desorpsiyon basıncı üretim üzerinde etkili olan diğer üç faktördür.

Kömür damarının kalınlığı ve içerdiği gaz miktarı, kömür kökenli doğal gaz rezervi açısından büyük önem taşımaktadır. Ayrıca geçirimsizlik, çatlak verimliliği ve akış kapasitesi diğer önemli faktörleri oluşturmaktadır.

Metan üretimi üç evrede olmaktadır. Birinci evrede, basınç düşmesi ile sadece suyun akışı söz konusudur. Tek fazlı akışın olduğu bu evrede su üretimi gerçekleşir. İkinci evre basınç düşmesine bağlı olarak oluşan desorpsiyon ile başlar. Bu evrede oluşan gaz kabarcıkları birbirleri ile bağlantılı olmadıklarından henüz akış gerçekleşemez. Yine sadece su

hareketlidir ve gaz kabarcıkları su ile taşınmaktadır. Üçüncü yani son evrede, devam eden basınç düşmesi ile kritik gaz doygunluğuna erişilir, çatlaklardaki gaz serbest kalarak akışa geçer. Bu evrede su ile gazın birlikte akışı söz konusudur yani iki fazlı akış gerçekleşir. İki fazlı akışı iyi tanımlayabilmek için geçirimsizliğin iyi bilinmesi gerekmektedir.

Özet olarak söylemek gerekirse ekonomik üretimi gerçekleştirmek için yeterli miktarda gaz, bu gazı alabilmek için yeterli geçirimsizlik, yeterli basınç, uygun sorpsiyon süresi gerekmektedir. Ayrıca izoterm karakteristiklerinin de iyi belirlenmesi çok önemlidir.

Dünyada Kömür

Kökenli Doğal Gaz Çalışmaları

ABD'de kömür kökenli doğal gaz çalışmaları 1980'li yıllarda devlet tarafından da desteklenerek yoğun bir şekilde sürdürülmüştür. 1986 yılında sadece 378 metan üretim kuyusu açılmışken, bu sayı 1991 yılında 4443 olmuştur. San Juan (New Mexico ve Colorado) ile Black Warrior (Alabama) bölgelerinde sondajlı üretim çalışmalarına 1990 ve 1991 yıllarında diğer havzalar da eklenmiştir. ABD'de de yeni sayılabilecek metan üretimi 1986 yılında 0,5.10⁹ m³ iken, 1991 de 9.10⁹ m³'e ulaşmıştır. Bugün için yıllık gaz tüketiminin sadece % 2'sini oluşturan metan üretiminin, 2000 yılında % 5-6 sını karşılaması planlanmaktadır.

ABD'de ispatlanmış metan rezervi 140.10⁹m³, tahmin edilen üretilebilir metan rezervi 4,2.10¹² m³, jeolojik rezerv ise 11,3.10¹² m³ dür. Son tahminlere göre, Avrupa'da kömür kökenli doğal gaz rezervi (Bağımsız Devletler Topluluğu hariç) yaklaşık 8,5.10¹² m³ dür. Avrupa'daki taşkömürü yatakları tektonizma, derinlik ve damar özellikleri bakımından ABD'deki yataklardan büyük farklılıklar göstermektedir. Bu nedenle Avrupa ülkelerinde

metan üretimi çalışmalarında ABD'de olduğu gibi ilerleme kaydedilememiştir. Almanya'da Saarland kömür sahasında 1960'lı yıllarda başlayan kömür kökenli doğal gaz çalışmaları, üretimde başarı sağlanamaması nedeniyle devam etmemiştir. İngiltere'de de benzer çalışmalar BCC (British Coal Corporation) tarafından yapılmıştır. Daha sonraları ara verilen çalışmalara, geliştirilen yeni teknolojiler ile Avrupa kömür ve çelik topluluğu'nun (European Coal and Steel Community- ECSC) sponsorluğunda araştırma projeleri ile yakın bir gelecekte yeniden başlanacaktır. Topluluğun enerji bölümü içinde yer alan Ticaret ve Sanayi Bölümü (Department of Trade and Industry) özellikle konvansiyonel olmayan bu gaz ve üretimi ile yakından ilgilenmekte ve büyük destek vermektedir.

Fransa'nın bugünkü enerji politikalarında fosil yakıtların önemi oldukça azdır. Ülkede kömür kökenli doğal gaz rezervlerine ilişkin resmi veriler bulunmamasına rağmen yaklaşık $0,3 \cdot 10^{12}$ m³ olduğu tahmin edilmektedir. Terkedilmiş olan Nord-Pas de Calais kömür sahasında HBNPC ve Gaz de France (GdF) arasında bir proje yapılmıştır. Benzer şekilde HBCM şirketi çalışmamış bir saha olan Cevennes Havzası'nda (South Massif Central) bir proje oluşturulmuştur. Burada iki araştırma kuyusu ile yapılan testler sonucunda 1200 m derinlikte 10^9 m³ metan gazı varlığı tahmin edilmektedir.

Belçika'da kömür sahalarının kapanmasından sonra gaz üretimine yönelik projeler gündeme gelmiştir. Hainaut Havzası'nın Charleroi Bölgesi'nde 1964 yılında kömür sahasının kapatılmasından sonra yaklaşık yılda 7 milyon m³, 8300 kcal/m³ ısı değere sahip metan gazı üretilmiştir. Söz konusu üretim düşük düzeyde gerçekleşmesine rağmen oldukça ekonomiktir. Eğer üretim aynı seviyede tutulursa bölgedeki gaz potansiyeli-

nin 25 yıl daha varlığını sürdüreceği tahmin edilmektedir. Tüm Hainaut Havzası'nın metan potansiyelinin 10^{12} m³ olduğu tahmin edilmektedir. Yine yapılan bir çalışmaya göre açılacak olan 100 üretim kuyusu ile yılda ancak metan potansiyelinin % 1'i alınabilecek olup bu da Belçika'nın yıllık gaz tüketiminin % 10'unu oluşturacaktır.

Ispanya'da ise kömür yataklarındaki gazın üretimi ve kullanımı projesi hem ekonomik nedenlerden hem de jeolojik nedenlerden dolayı büyük destek görmektedir. Oluşturulan konsorsiyumun çalışma planına göre sondajlar 2000 m. derinliğe ulaşacak olup beklenen metan gazı potansiyeli 12 m³/ton dur.

Polonya'da taşkömürü en önemli enerji kaynağıdır. Metan potansiyeli $3 \cdot 10^{12}$ m³ olarak tahmin edilmektedir. Ülkenin enerji potansiyeli Dünya Bankası ve EPA'nın (U.S. Environment Protection Agency) desteği ile Avrupa Topluluğu çevre standartlarına uygun olarak değerlendirilme kapsamına alınmıştır. Üst Silesian Havzası'ndaki metan potansiyeli $1,5 \cdot 10^{12}$ m³ olup, 1500 m derinlikte gaz içeriği 20 m³/ton dur. Buna karşın Alt Silesian Havzası'nın gaz içeriği 10 m³/ton un altında olduğundan şu anda diğer saha kadar ekonomik görülmemektedir.

Eski Çekoslovakya'nın enerji üretiminin % 60'ı yerli taşkömüründen ve linyitten gerçekleştirilmektedir. Ostra-

van taşkömürü sahasında 1500 m derinlikteki $500 \cdot 10^9$ m³ metan gazını çıkarmak için bir proje oluşturulmuştur.

Macaristan'da taşkömürünün gaz içeriği 15-40 m³/ton olup metanın ticari olarak kullanımı konusunda araştırmalar yapılmaktadır. Tahmin edilen gaz rezervi 1500 m derinlikte $85 \cdot 10^9$ m³ tür. Kanadalı enerji şirketi Fracmaster, Macaristan kömür şirketi Mecsek Szénbányak ile Mecsek Havzası'nda çalışma planları yapmaktadır.

Önümüzdeki yıllarda enerji gereksiniminin artacağı düşünülen ülkemizde, enerji temininde çeşitlilik ilkesi de gözetildiğinde, kömür kökenli doğal gaz yeni bir enerji kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca bu kaynağın, daha verimli olarak işletilmesine yönelik yeni modellerin arandığı Zonguldak kömür havzasında bulunması ve fosil yakıtlar içinde çevre dostu olarak bilinmesi, kömür kökenli doğal gazı ülkemiz enerji gündemine sokmuştur.

Gerçekten, fosil yakıtlar içerisinde en az çevresel etkilere sahip olan metan gazı, üretilebildiği taktirde ülkemiz için çok büyük kazanç olacaktır. Ancak, bu araştırmada sözü edilen gerek rezerv gerekse üretime ait tüm parametreler özenle araştırılmalıdır.

Gelişmiş ülkeler için dahi oldukça yeni bir enerji kaynağı olan kömür kökenli doğal gaz, ülkemiz enerji projeksiyonlarında yer almalı, başlatılan çalışmalar ve araştırmalar uygulamaya yönelik projeler ile geliştirilmelidir.

İlker Şengül

MTA Enerji Dairesi Ankara



Kaynaklar

- Ercan, T., Ölmez, E., Matsuda, J., Nagao, K., Kita, I. "Kuzey ve Batı Anadolu'da sıcak ve mineralize sular ile içerikleri gazların kimyasal ve izotopik özellikleri." *Türkiye Enerji Bülteni* c.1, s.2, Ankara, 1994.
- Gedik, A., 1994, *Türkiye Doğal Gazları*, MTA Enerji Hammaddesi Etüt ve Arama Dairesi Eğitim Semineri, Ankara.
- Smith, W.J., and Pallasser R.J. "Microbial origin of Australian Coalbed Methane." *AAPG Bulletin*, V. 80, No. 6 (June 1996), P. 891 - 897.
- Yalçın, M.N., "Kozlu-K20/G Kuyusunun Zonguldak Havzası'ndaki Bilgisayar Destekli Modelleme Çalışmalarına Katkısı, Kozlu-K20/G Araştırma Kuyusu," *Workshop, Program ve Özet*, TÜBİTAK, Marmara Araştırma Merkezi, Yer Bilimleri Bölümü, s.28, 1993.