

KAYNAK İŞLEMİ NEDENİYLE OLUŞAN KALINTI GERİLMELERİN MİKRO-MANYETİK TEKNİKLE TAHRİBATSIZ OLARAK ÖLÇÜLMESİ

Tuğçe Kaleli¹, H. İlker Yelbay¹, C. Hakan Gür^{1,2}

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

¹Teknolojisi ve Tahribatsız Muayene Araştırma/Uygulama Merkezi

²Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü

tkaleli@metu.edu.tr, yelbay@metu.edu.tr, chgur@metu.edu.tr

ÖZET

Bütün imalat yöntemleri, parçalarda kalıntı gerilmeler oluşturmaktadır. Kalıntı gerilmeler, parçaya etkiyen dış gerilmelerle toplam bir etkiye sebep olduğundan, imalat aşamalarında veya kullanım sırasında çarpılma veya erken hasarlanma riski artmaktadır. Kalıntı gerilmeleri ölçmek için çeşitli tahribatlı ve tahribatsız teknikler geliştirilmiş, imalat işlemlerini modelleyerek kalıntı gerilme dağılımını tahmin eden ticari yazılımlar kullanıma alınmıştır.

Son yıllarda Manyetik Barkhausen Gürültüsü metodu yardımıyla ferromanyetik malzemelerin yüzeyinde oluşan kalıntı gerilmelerin tahribatsız olarak ölçülmesi ilgi çekmektedir. Bu bildiriye, kaynaklı birleştirme işlemi sonrasında çeliklerde meydana gelen kalıntı gerilmelerin Manyetik Barkhausen Gürültüsü yöntemi ile ölçülmesi üzerine literatürdeki mevcut çalışmalar özetlenmekte ve ODTÜ'de tamamlanan yüksek lisans ve doktora tezlerinde elde edilen sonuçlar örnek olarak sunulmaktadır.

1. GİRİŞ

Kaynaklı birleştirme işlemi uygulanmış parçaların bütünlüğünün değerlendirilmesinde, kalıntı gerilmelerin durumu oldukça büyük bir öneme sahiptir. Parça içerisindeki çekme yönündeki gerilmeler kayda değer büyüklüklere ulaştığında, çevre koşullarına da bağlı olarak sürünme, yorulma ve gerilimli korozyon çatlaklarına yol açabilir. Kaynaklı imalat işlemi uygulanmış parçalardaki kalıntı gerilmeler sadece kaynaklı imalat sürecine değil aynı zamanda parçanın tüm üretim geçmişine bağlı olarak değişmektedir. Kalıntı gerilmelere sebep olan ana faktörler kaynak-öncesinde uygulanan işlemler (döküm, dövme, haddeleme, ısı/yüzey işlemleri, kesme, bükme vs.), kaynak metalinin ve ana malzemenin özellikleri, parçanın geometrisi, kaynak sırasında parçanın sabitlenmesi nedeniyle oluşan gerilmeler, kaynak prosedürü (kaynak koşulları, paso sayısı ve sıraları vs.) ve kaynak sonrası uygulanan işlemlerdir (kaynak tamiri, tutucuların sökülmesi, takip eden kaynak işlemi, bilyalı dövme,

talaşlı imalat işlemleri, kaynak sonrası ısıl işlemler, titreşimle gerilim giderme vs.). Kaynaklı parçalardaki kalıntı gerilimlerin değerlendirilmesi yapılırken bütün bu etkenler ile birlikte kalıntı gerilimlerin kaynak işleminden önce parçanın içerisinde var olma ihtimali göz önünde bulundurulmalıdır. Öte taraftan kaynak sonrası parçaya uygulanan işlemlerin parçada mevcut olan kalıntı gerilimleri önemli ölçüde değiştirebileceği unutulmamalıdır [1].

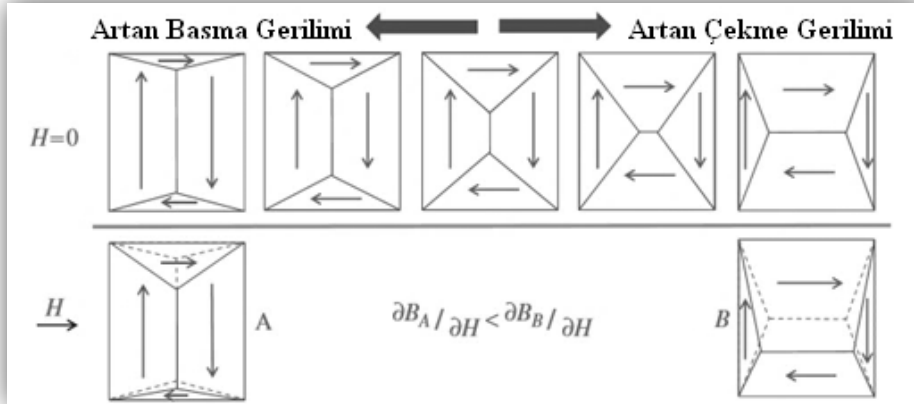
Kaynaklı imalatın neden olduğu kalıntı gerilimlerin dağılımı, bu gerilimlerin oluşum mekanizmalarına (soğuma sırasında oluşan çekinti kökenli mekanizma ve faz dönüşümü kökenli mekanizma) bağlı olarak değişmektedir. Kaynak metalinden ısıdan etkilenmiş bölgeye (IEB) doğru olan ısı girdisi akmaya sebep olacak büyüklükte olduğunda, bu bölgelerde ısıl yumuşama ve iç gerilimler oluşur. Bu oluşum mekanizması ile oluşan kalıntı gerilimler kaynak kökenli kalıntı gerilimler olarak sınıflandırılır. Kaynak bölgesinden daha da uzaklaşıldığında, kaynaklı birleştirme sonrasında oluşacak toplam kalıntı gerilimler kaynak kökenli kalıntı gerilimler ile kaynak öncesinde var olan kalıntı gerilimlerin birleşimine bağlı bir fonksiyon olarak değerlendirilir. Gerilim giderme ısıl işlemleri, kaynak işleminden dolayı oluşan kalıntı gerilimlerin miktarını önemli ölçüde azaltır. Fakat ısıl işlemlerden sonra kalan kalıntı gerilimler düşük değerlerde bile olsa, kayda değer etkilere sebep olabileceğinden göz önünde bulundurulmalıdır. Kalıntı gerilimleri hassas bir şekilde dikkate alıp yapısal bütünlük değerlendirmesi yapan analiz yöntemleri henüz mevcut değildir. Buna ek olarak, kalıntı gerilimlerin iki ve üç boyutlu nicel dağılımları hakkında yeterli veri olmaması, parçaların tahmini kullanım ömrünü hesaplarken oldukça genel değerler kullanılmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, gerçeğe yakın kalıntı gerilim dağılımlarını elde etmek için yeni kalıntı gerilim ölçüm metotlarına ihtiyaç vardır.

Bilgisayar ve yazılım teknolojilerindeki gelişmeler, sonlu elemanlar yöntemi ile kaynaklı imalat işleminin analizinin edilebilmesine ve bu yöntemin gelişmesine imkân sağlamaktadır. Diğer bir husus ise tahribatsız muayene yöntemlerini en uygun maliyetli olacak hale getirebilmektir [2]. Kalıntı gerilimleri ölçmek için çeşitli tahribatlı ve tahribatsız yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerin her birinin çeşitli üstünlükleri olduğu gibi kullanım sınırları da vardır. Örneğin X-ışını kırınımı yöntemi kalıntı gerilim miktarlarını gerçeğe çok yakın ölçen bir yöntem olmasına rağmen tek bir noktadan ölçüm almak göreceli olarak uzun süren bir işlemdir. Endüstri, daha hızlı, kolay uygulanabilen ve ucuz bir yöntem arayışı içindedir. Günümüzde ferromanyetik malzemelerin kalıntı gerilimlerinin ölçülmesinde, mikromanyetik teknikler X-ışını kırınımı yöntemine alternatif bir yöntem olarak görülmesinden dolayı önem kazanmıştır. Uygulanma kolaylığı, taşınabilirliği, saniye mertebesinde ölçüm süresi ve zorlu çevre koşullarında dahi uygulanabilir olması bu yöntemin avantajları arasındadır.

2. MANYETİK BARKHAUSEN GÜRÜLTÜSÜ METODU

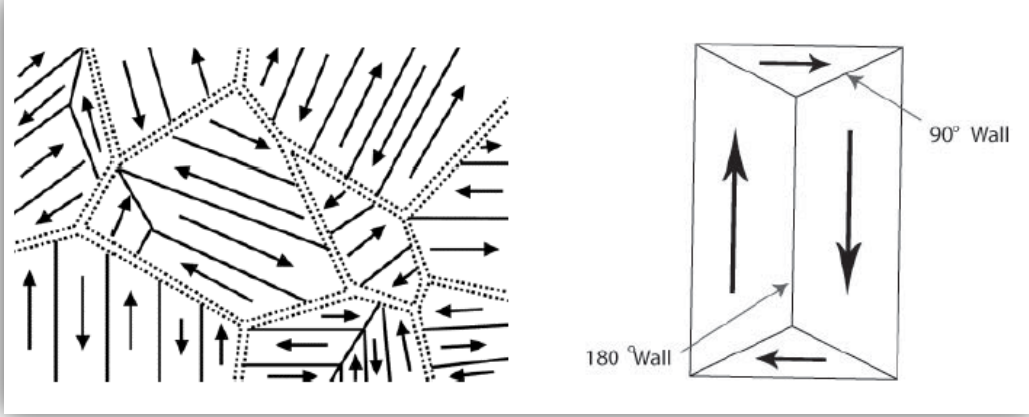
Atomik seviyede mıknatıslık, elektronların spin hareketleriyle veya elektron orbital hareketlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkabilir. Bir atomun manyetik momenti elektronlarının manyetik momentlerinin toplamına, bir ortamın manyetik momenti ise tüm atomların manyetik momentlerinin vektörel toplamına eşittir. Eşleşmemiş elektronlardan kaynaklanan net manyetik momente ve bu momentlerin hizalanması için kristal örgü komşularıyla yeterli oranda etkileşme kapasitesine sahip malzemelere ferromanyetik malzemeler denir. Atomların manyetik momentleri birbirine paralel durumdayken etkileşmeleri yönsel anizotropiye yol açar ve manyetik domenler minimum enerji koşulunu sağlamak için etkileşirler. Manyetik momentlerin kolay manyetik eksenlere dönme eğilimleri kritik bir faktördür. Kristalografik anizotropi, gerilim anizotropisi ve şekil anizotropisi kolay eksenlerin yönlerini ve enerji farklarını belirler.

Ferromanyetik malzemeler, mikron boyutlarında manyetik bölgelerden oluşur. Domen adı verilen bu bölgeler birbirlerinden domen duvarları ile ayrılırlar. Domenlerin içerisindeki manyetik alan vektörleri malzemenin toplam magnetizasyon döngüsünü sıfırlayacak şekilde rastgele yönlendirilmişlerdir. Dışarıdan bir yük veya manyetik alan uygulandığında, domen duvarları hareket ederek doğal konumlarını değiştirerek dış alan yönüne paralel olacak şekilde hizalanırlar. Bir domen duvarının hareket etmesi için, duvarın bir tarafındaki bölgenin büyümesi diğer tarafındaki de küçülmesi gerekmektedir. Şekil 1’de artan basma ve çekme gerilimi yönlerine bağlı olarak domen boyutlarındaki değişim gösterilmektedir.



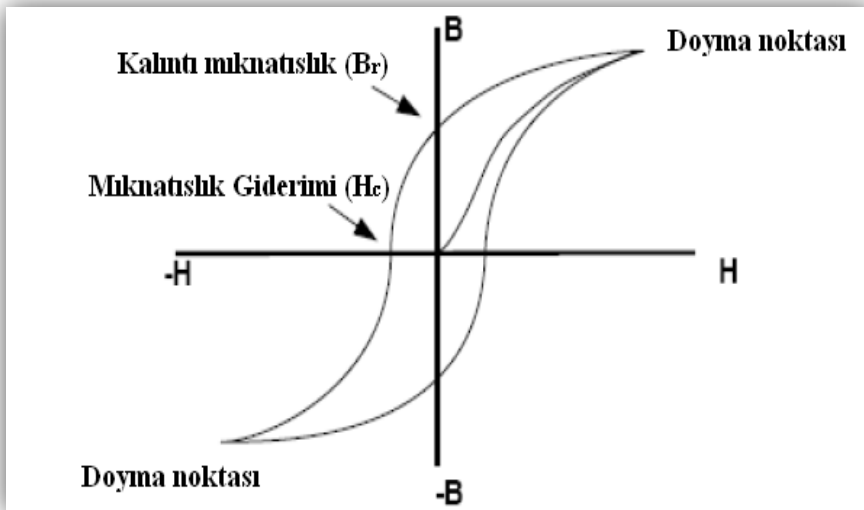
Şekil 1. Artan Basma ve Çekme Gerilimi Yönlerinin Domen Boyutuna Etkisi

Ferromanyetik çeliklerde komşu domenlerin manyetizasyon yönleri arasındaki açı genelde Şekil 2’de gösterildiği gibi 90° veya 180° derecedir. Kristal örgüsündeki gerilmeden dolayı 180° olan domen duvarlarının etki alanlarının hareketliliği 90° olanlardan fazladır. Kalıntı gerilimler 180° ve 90° olan manyetik domen duvarlarının hareketini etkilerken, malzemenin içyapısı domen duvarlarının hareketini zorlaştıran engellerin yoğunluğunu etkileyerek Barkhausen gürültüsünün şiddetini değiştirir [3,4].



Şekil 2. Ferromanyetik Malzemelerde Domenler ve Domen Duvarları

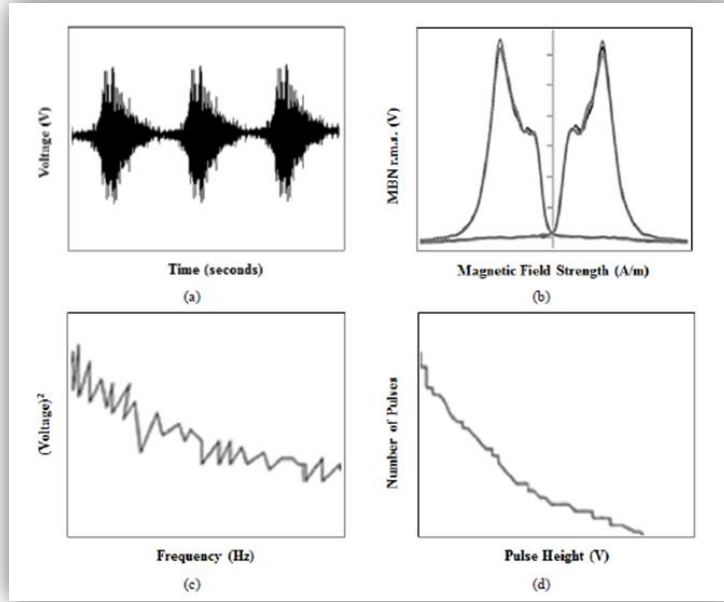
Ferromanyetik bir malzeme a.c. manyetik alana maruz kaldığında manyetik indüksiyon (B) ve manyetik alan kuvveti (H) arasında histeresis dōngüsü denilen karakteristik bir ilişki gözlemlenir (Şekil 3). Dış manyetik alan olmadığında dōmenlerdeki manyetik alan yönleri rastgele olup parçadaki toplam mıknatıslık sıfırdır. Ancak, parça sürekli artan bir manyetik alanın etkisi altındayken yönü dış manyetik alana paralel olan dōmenler artarken diğērleri azalır ve yok olurlar. Dış manyetik alan şiddeti yeterince arttığında ise parça manyetik doygunluğa ulaşır, yani tüm dōmenlerin manyetik alan yönleri uygulanan manyetik alana paralel hale gelir. Takiben, uygulanan manyetik alanın şiddeti aşamalı olarak azaltıldığında malzemenin mıknatıslık özelliği azalmaya başlar. Ancak, azalma eğrisi başlangıçtaki artma eğrisini takip etmez.



Şekil 3. Karakteristik Manyetik Histeresis Eğrisi

MBN ölçümlerinde tekrarlayan manyetizasyon ve demanyetizasyon döngüleri elde etmek için üçgen veya sinüzoidal olarak değişen manyetik alanlar a.c. akım uygulanarak oluşturulur. Bölgesel manyetizasyon, domen duvarlarının adım adım engellerden kurtulmasıyla değişir ve girdap akımlarının oluşmasına neden olur. Bu akımlar elektriksel voltaj darbelerini indükler. Bu voltaj darbelerinin bobinler vasıtası ile toplanması ile ortaya çıkan sinyaller Barkhausen gürültüsü (MBN) olarak adlandırılır. Bu işlem sırasında malzemenin toplam mıknatıslık değerinde bir değişim görülür.

İşlenmemiş MBN verileri voltaj darbe dizilerinden ve bunların zamana bağlı olarak elde edilmiş etki alanlarından oluşur. Düzeltme, amplifikasyon ve filtrelemeden sonra bazı parametreler hesaplanır ve malzemenin karakteristik özellikleriyle karşılaştırılır. MBN ölçümleri sonucunda elde edilen bu manyetik parametreler sinyalin ortalama karekökü (MBN_{rms}), MBN profili, frekans spektrumu, darbe-yükseklik dağılımı, temsili B-H eğrileri olarak sınıflandırılabilir (Şekil 4).



Şekil 4. a) İşlenmemiş MBN Verisi b) MBN Profili c) Frekans Spektrumu d) Darbe-Yükseklik Dağılımı

MBN sinyalleri darbe yükseklik dağılımı ile veya uygulanan manyetik alana göre fonksiyonel olarak değişen MBN_{rms} gürültü seviyesi ile ölçülebilir. Bu alanda yapılan çalışmalar çekme nitelikli kalıntı gerilim olan malzemelerde MBN_{rms} voltaj değerlerinin arttığını, basma nitelikli kalıntı gerilim durumunda ise azaldığını göstermektedir [5]. Diğer taraftan MBN sinyalleri malzemenin içyapısına bağlı olarak da değişiklikler göstermektedir. Örneğin Saquet vd., içyapıdaki ferrit ve sementit fazlarının MBN sinyallerinin yüksekliğini arttırırken, martensit yapısının daha düşük genlikte ve daha yüksek frekans aralığında sinyaller verdiği gözlemlenmiştir [4].

3. KAYNAKLI PARÇALARDA KALINTI GERİLMELERİN ÖLÇÜLMESİ

Kaynaklı parçalardaki kalıntı gerilimlerin Manyetik Barkhausen yöntemi ile ölçülmesi üzerine yapılan çalışmalar 1990lü yıllarda başlamıştır. Lindgren ve Lepisto kaynaklı çelik borulardaki kalıntı gerilim dağılımlarını sabit hızla hareket eden tekerlekli MBN probu kullanarak değerlendirmiş ve elde ettikleri sonuçları X-ışını kırınımı yöntemi ile elde edilen kalıntı gerilim sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Yumuşak manyetik özellik gösteren çeliklerde, yüzeyde oluşan kalıntı gerilimleri -400 MPa ve +400 MPa değer aralığında MBN yöntemi ile kontrol edebildikleri sonucuna varmışlardır [6]. Aynı araştırmacılar kaynaklı birleştirme uygulanmış çelik borularda MBN sinyalleri ve iki eksenli eğme gerilimi arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Hem MBN hem de X-ışını kırınımı yöntemleri ile bulunan kalıntı gerilim değerlerinin birbirleri ile uyumlu oldukları gözlemlenmiştir [7]. Moorthy vd. 2.25Cr-1Mo ve 9Cr-1Mo çelik kaynaklarda IEB'de olan içyapı değişimlerini karakterize edebilmek için MBN metodunu kullanmışlar ve içyapının sertliği arttıkça MBN gürültü sinyallerinin seviyesinin düştüğünü tespit etmişlerdir. Kritik sıcaklıklar arasında kalan bölge ile ana metal bölgesini birbirinden ayırt etmek için MBN sinyalinin tepe noktasının pozisyonuna bakılabileceğini bulmuşlardır. Aynı zamanda farklı içyapılara sahip bölgelerin genişliğinin ölçülmesinde minyatür MBN probunun ön kalibrasyon ile birlikte kullanılabileceği rapor edilmiştir [8].

Aynı araştırma grubunun diğer bir çalışmasında 2.25Cr-1Mo kaynaklı çeliklerin bir kısmına kaynak sonrası ısıl işlemler uygulanmış bir kısmına uygulanmamıştır. MBN ölçümleri sonucunda, kaynak sonrası ısıl işlem görmemiş parçalarda MBN sinyallerinin tepe yüksekliklerinin kaynaklı parçanın farklı bölgelerinde önemli ölçüde değiştiği ve MBN sinyalinin tepe yüksekliği ile içyapının sertliği arasında ters doğrusal bir orantı olduğu gözlemlenmiştir. Kaynak sonrası ısıl işlem görmüş çeliklerde, farklı bölgelerdeki MBN sinyallerinin yüksekliğindeki değişim, sertlikteki düşüş ile birlikte önemli oranda düşmüştür. MBN sinyalinin tepe yüksekliğinin, kaynak sonrası uygulanan ısıl işlemin etkisinin hızlı ve tahribatsız bir şekilde değerlendirilmesinde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır [9]. Park vd. kaynaklı SA508-3 çeliğinin IEB bölgesinde MBN sinyallerinin martensitik bölgelerde düşerken beynit bölgelerinde karbür morfolojisinden ve kalıntı gerilimlerden dolayı arttığını ifade etmişlerdir [10].

Lachmann vd. kaynaklı S355 çelik bağlantılarda, yorulma yükü altında kalıntı gerilimlerin değişimlerine karar verebilmek için çok parametrelili regresyon yaklaşım tekniği kullanmışlardır. Kullandıkları yöntem ve X-ışını kırınımı yönteminden elde ettikleri sonuçlar uyumludur; mikro-manyetik parametrelerin, döngüsel yükleme sırasında kalıntı gerilimlerdeki azalmanın değerlendirilmesinde kullanılabileceğini göstermiştir. Ancak, MBN metodunun kolay uygulanabilir ve hızlı olmasına rağmen maliyetli ön kalibrasyon prosedürlerine ihtiyaç duyacağı belirtilmiştir [11].

Ju vd. MBN yöntemi kullanarak kaynaklı API X65 borularda kalıntı gerilim dağılımını elde etmeye çalışmışlardır. IEB içerisindeki içyapı değişimlerini daha iyi yansıtabilmek için

parçanın kaynak metali, iri taneli IEB, ince taneli IEB ve ana metal bölgelerinden kalibrasyon numuneleri hazırlamışlardır. IEB ve ana metalden aldıkları ön kalibrasyon sonuçlarının birbirlerinden farklı nicel kalıntı gerilim değerleri verdiğini belirtmişlerdir. Aynı zamanda IEB içerisindeki kalıntı gerilim dağılımlarının IEB bölgedeki içyapı esas alınarak yapılan kalibrasyon ile daha doğru bir şekilde ölçüldüğünü gözlemlemişlerdir [12].

Stewart vd. AS1548-7-460R çeliğine basma ve çekme yüklemeleri sırasında kaydedilen MBN sinyalleri arasında belirgin bir asimetrik ilişki olduğunu bulmuşlardır. Çok paso kaynaklı plakalarda yaptıkları MBN ölçümlerinde, MBN sinyalinin plakanın çekme yönünde gerilim oluşan alt yüzeyinde kaynak dikişine doğru yaklaşırlarken arttığını ve en yüksek değerine kaynak dikişi bölgesinde ulaştığını tespit etmişlerdir [13]. Kesevan vd. kaynaklı imalat ile üretilen yumuşak çelik plakalarda kaynak dikişi yakınında çekme nitelikli, IEB’de ise basma nitelikli kalıntı gerilimler tespit etmişlerdir. Kaynak dikişinden uzaklaştıkça kalıntı gerilim değerlerinin kaynaklı birleştirme işlemi öncesindeki gerilim değerleri ile neredeyse aynı değere ulaştığını gözlemlemişlerdir. X-ışını kırınımı ile yaptıkları ölçüm sonuçları MBN ölçüm sonuçları ile aynı eğilimi gösterse de nicel gerilim değerleri birbirlerinden farklıdır [14].

Bruns ve Nitscke-Pagel kaynaklı birleştirmelerde kalıntı gerilim ölçmek amacı ile mikro-manyetik analiz yöntemlerinin doğrusal regresyon analizini içeren yeni çok-parametrelili bir yaklaşım tekniği geliştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar regresyon analizi sonrasında tahmin ettikleri sonuçların miktatsızlama yönüne bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Önerdikleri ölçüm stratejisinin kaynaklı birleştirmelerde kalıntı gerilim tayini için basit ve kullanışlı bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir [15].

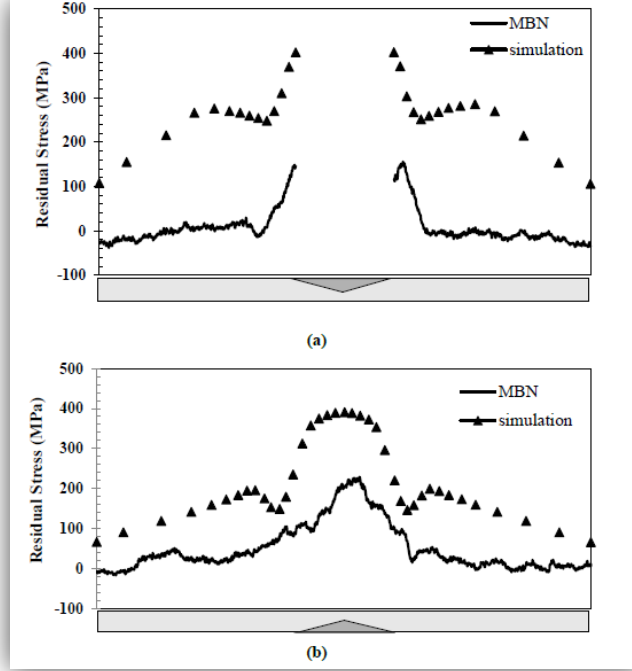
Ochodek ve Klimpel sonlu eleman simülasyonu, delik delme, X-ışını kırınımı metotları ve geliştirdikleri MBN karekök ölçüm tekniği yöntemlerini uygulayarak kaynak tamir bölgelerindeki kalıntı gerilimleri tahmin etmişlerdir. Kalıntı gerilmelerin nicel değerlerine karar verebilmek için, ana metal ve IEB’den aldıkları numuneler ile yaptıkları kalibrasyon metodu sonucu iki farklı kalibrasyon eğrisi oluşturmuşlar ve bu iki eğri arasında iyi bir korelasyon bulmuşlardır [16]. Ochodek, spiral kaynaklı API X60 ve X65 çelik borularda kaynak sonrasında ve basınç testleri sonrasında kalıntı gerilim değişimlerini incelemiştir. Spiral kaynaklı borularda imalatın herhangi bir aşamasında veya ağır fabrika koşullarında kalıntı gerilim durumundaki değişimlerin izlenmesinde, MBN yönteminin diğer yöntemlerden daha verimli olduğunu belirtmiştir [17].

Yelbay vd. kaynaklı API 5L X70 çelik plakalarda oluşan yüzey kalıntı gerilimlerini, ana metal ve IEB esaslı kalibrasyon teknikleri uygulayarak MBN yöntemi ile ölçmüşlerdir. Elde edilen MBN sonuçlarını delik delme yönteminden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırarak MBN tekniğinin otomatik kalıntı gerilim ölçümlerinde rahatlıkla kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Öte yandan, IEB ve ana metaldeki içyapı farklılıklarının MBN sinyallerini ciddi oranda değiştirmesinden dolayı ön kalibrasyonun çok kritik olduğunu ifade etmişlerdir [18].

Serna-Giraldo ve Padovese tek ve çift pasolu kaynaklanan ASTM A36 plakalardaki MBN etkisini araştırmışlardır. En düşük MBN sinyalini ergime sınırlarında, en yüksek MBN sinyalini ise IEB'nin sonunda kaydetmişlerdir. İyapıdaki değişimlerin malzemenin bütün manyetik parametrelerini etkilediğini ve kalıntı gerilim tayininde kullanmak için en uygun parametrenin MBN_{rms} değeri olduğu sonucuna ulaşmışlardır [19]. Sapountzi, kaynaklı St37 çeliklerinin IEB bölgelerinden aldığı MBN ölçümleri ile mikro sertlik ölçümleri arasında düzenli bir ilişki bulmuş; ayrıca IEB ve ergime bölgesindeki manyetik tepkilerin ana metalden çok daha fazla olduğunu tespit etmiştir [20]. Nitschke-Pagel vd., MBN yönteminin standartlaşmış diğer bir teknikle birlikte uygulanması ve elde edilen sonuçların regresyon katsayısı ile birlikte değerlendirilmesi durumunda çeliklerde kalıntı gerilim ölçümleri için güvenilir ve kullanışlı bir yöntem olacağını belirtmişlerdir [21].

Blaow and Shaw kaynaklı imalat ve sonrasında bilyalı dövme işlemi uygulanan çelik plakalarda MBN yöntemi ile kalıntı gerilim dağılımlarını ölçmüşlerdir. IEB'de kaynak dikişi boyunca manyetik anizotropi tespit etmişlerdir. MBN sinyallerinin şiddetinin kaynak dikişi boyunca oluşan çekme yönündeki kalıntı gerilmeler neticesinde arttığını ve bilyalı dövme sonrasında oluşan basma yönündeki kalıntı gerilmelerin ise MBN sinyallerini azalttığını gözlemişlerdir [22]. Augustyniak vd., döner manyetik alan probu kullanarak alın kaynaklı S235JR ve S460ML plakalarda kalıntı gerilmeleri ölçmüşlerdir. Manyetik anizotropi olsa bile kalıntı gerilmelerin çift-eksenli bileşenlerinin ölçülebileceğini belirtmişlerdir [23].

Garipova vd. nümerik ve deneysel yöntemler kullanarak çok pasolu kaynaklanan API SL X70 plakalarda kalıntı gerilim dağılımlarını iyapıdaki değişimleri de dikkate alarak tayin etmişlerdir. Plakanın orta hattı boyunca ve yarı kalınlığına kadar V-şekilli oluklar hazırlanmış, sonrasında tamamen birleştirme işlemi sağlanana kadar bir dizi kaynatma işlemi uygulanmıştır. Ölçümler ve hesaplamalar sonunda sonlu elemanlar analiz yönteminin sonuçları ve MBN ölçüm sonuçlarının birbiri ile uyumlu olduğunu fakat kalıntı gerilmelerin sayısal değerleri arasında belirgin bir farklılık olduğunu belirtmişlerdir. Plakanın arka yüzeyinde iyapı değişimi olmayan bölgelerde yapılan ölçümlerde de benzer sonuca ulaşılmıştır. Sonuçların güvenilirliği için simülasyonda kullanılan faz dönüşümlerine ait girdilerin ve MBN kalibrasyonu sırasında iyapının etkilerinin dikkate alınmasının kritik önemde olduğunu belirtmişlerdir [24]. Çift paso kaynaklı plakaların ön ve arka yüzeylerinden sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar ve MBN ölçümlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması Şekil 5'te gösterilmiştir.

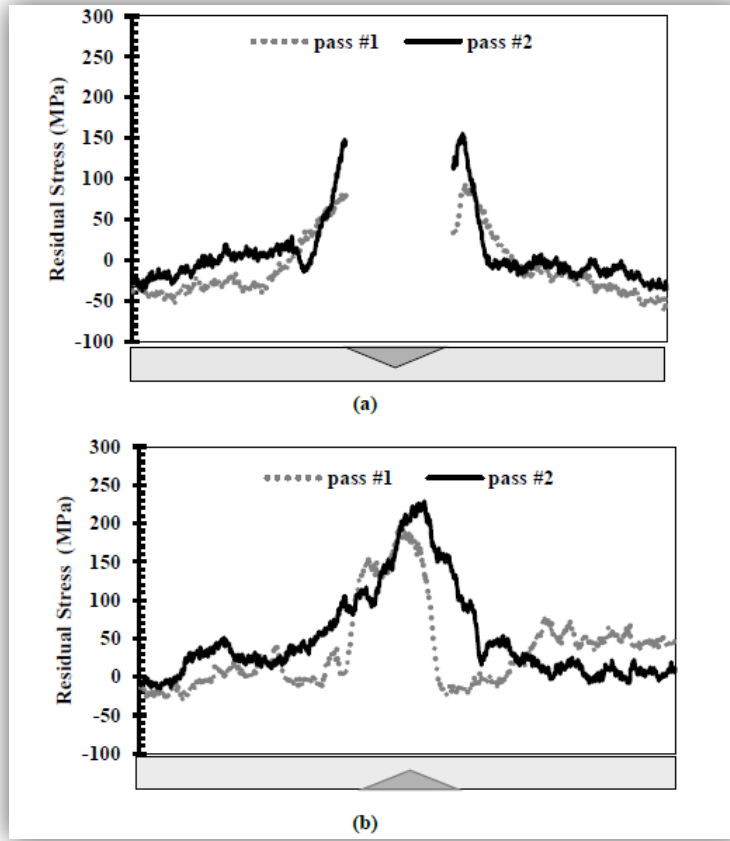


Şekil 5. Çift Paso Kaynaklı Plakalarda Sonlu Eleman Simülasyonu ve MBN Yöntemi Kullanılarak Elde Edilen Kalıntı Gerilim Dağılımı: a) ön yüzey, b) arka yüzey

Lindgren vd. kaynaklı duplex paslanmaz çeliklerde kimyasal kompozisyonun ve iç yapının MBN sinyallerine olan etkilerini araştırmışlardır. MBN_{rms} değerinin sertliğe bağlı olduğunu ve bu değer in faz morfolojisine bağlı olarak hadde yönünde ve hadde yönüne dik yönde farklılıklar gösterdiğini bulmuşlardır [25]. Correa vd., MAG kaynaklı ASTM A36 plakalarda kalıntı gerilmeleri MBN yöntemi ile ölçmüşler ve sonuçları X-ışını kırınımı ve delik delme yöntemi ile doğrulamışlardır. MBN yönteminin IEB ve ana metal arasındaki iç yapı farklılıklarının tespit edilmesi için uygun bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir [26].

Gür vd. API 5L X70 plakalarda kalıntı gerilmelerin kaynak pasolarına bağlı olarak değişimlerini incelemişlerdir. Bu amaçla çelik plakaların ortasına V-şekilli oluklar açılmış, MAG kaynak işlemi ile farklı paso sayıları uygulanarak bir dizi kaynaklı parça elde edilmiştir. Her bir kaynak pasosundan sonra ön ve arka yüzeylerden kaynak hattı boyunca kaynak dikisine paralel bir şekilde MBN ve X-ışını kırınımı yöntemi ile kalıntı gerilim ölçümleri alınmıştır. MBN sinyalleri kalibrasyon eğrileri kullanılarak nicel kalıntı gerilim değerlerine dönüştürülmüş ve sonrasında X-ışını kırınımı yöntemi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çekme yönünde en yüksek kalıntı gerilim değerinin kaynak metali ve IEB sınırında olduğu, IEB'den ana metale doğru gidildikçe gerilim değerinin azaldığı ve sonrasında basma nitelikli gerilmelere dönüştüğü gözlemlenmiştir. Çekme nitelikli kalıntı gerilmelerin miktarı paso sayısı arttıkça artmıştır. Plakanın arka yüzeyinde ise kaynak pasolarının bir önceki pasonun yarattığı çekme nitelikli kalıntı geriliminde düşüşe

sebepten olduğu gözlemlenmiştir. Arka yüzeyde, ön yüzeyin aksine, herhangi bir içyapı değişikliği gerçekleşmediği için takip eden kaynak pasosunun yarattığı ısı girdisi gerilim giderme etkisi yaratarak MBN sinyal şiddetinde azalmaya sebep olmuştur. Plakanın ön yüzünde hem içyapıdaki değişimler hem de kalıntı gerilimler MBN sinyallerini etkilemektedir. Dolayısıyla, ana metal esaslı kalibrasyon ile yapılan MBN ölçümleri, gerçek kalıntı gerilim değerlerinden farklı değerler vermiştir. MBN yöntemi ile elde edilen iki pasolu çelik plakalardaki yüzey kalıntı gerilimlerin dağılımı ve bu gerilimlerin ön ve arka yüzeydeki kaynak paso sayısı ile değişimi Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Yüzey Kalıntı Gerilim Değerlerinin Kaynak Paso Sayısına Bağlı Olarak Değişimi (MBN ölçümleri): a) ön yüzey, b) arka yüzey

Gür vd. kaynaklı imalat uygulanmış parçalarda yüzey kalıntı gerilim durumlarının hızlı ve tahribatsız bir şekilde tayin edilmesinde, MBN tekniğinin iyi ve umut verici bir yöntem olduğunu ve bu yöntemin aynı zamanda kaynak işlemi tasarımı için kullanılacak yazılımlara gereken kritik verilerin sağlanmasında çok önemli bir rol oynayacağını belirtmişlerdir. Güvenilir nicel sonuçlar elde edebilmek için IEB ve ana metaldeki içyapı farklılıklarının ön kalibrasyon aşamasında mutlaka göz önünde bulundurulması gerektiğini ifade etmişlerdir [27].

4. SONUÇ

Kaynaklı birleştirme işlemi uygulanmış parçaların bütünlük değerlendirmesinde, kalıntı gerilimlerin niteliğinin, büyüklüğünün ve dağılımının bilinmesi kritik önemdedir. Kalıntı gerilimlerin iki ve üç boyutlu dağılımları hakkında yeterli veri olmaması nedeniyle, parçaların tahmini kullanım ömrü hesaplanırken oldukça genel değerler kullanılmaktadır. Dolayısıyla, gerçeğe yakın kalıntı gerilim dağılımlarını elde etmek için yeni kalıntı gerilim ölçüm metotlarına ihtiyaç vardır. Yaklaşık yüz yıllık süre zarfında kalıntı gerilmeleri ölçmek için çeşitli tahribatlı ve tahribatsız teknikler ve imalat işlemlerini modelleyerek kalıntı gerilim dağılımını tahmin eden ticari yazılımlar geliştirilmiştir. İmalat sektörü, hızlı, kolay uygulanabilen, tahribatsız, otomasyona yatkın ve ucuz bir yöntem arayışı içindedir. Son yıllarda ferromanyetik malzemelerdeki kalıntı gerilimlerinin ölçülmesinde, mikro-manyetik tekniklerin kullanılması gündeme gelmiştir. Uygulanma kolaylığı, taşınabilirliği, saniye mertebesinde ölçüm süresi ve zorlu çevre koşullarında dahi uygulanabilir olması bu yöntemin avantajları arasındadır. Bu alanda yapılan araştırmalar, kaynaklı imalat uygulanmış parçalarda yüzey kalıntı gerilimlerinin hızlı ve tahribatsız bir şekilde tayin edilmesinde, MBN tekniğinin umut verici bir yöntem olduğunu ve bu yöntemin aynı zamanda kaynak işlemi tasarımı için kullanılacak yazılımlara gereken kritik verilerin sağlanmasında önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir. Güvenilir nicel sonuçlar elde edebilmek için IEB ve ana metaldeki içyapı farklılıklarının kalibrasyon aşamasında dikkate alınması gerekmektedir.

6. KAYNAKÇA

- [1] Leggatt, R.H., “Residual Stresses in Welded Structures,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 85, 2008, pp. 144-151.
- [2] Banahan, B.D., “Application of Secondary and Residual Stresses to the Assessment of the Structural Integrity of Nuclear Power-Generating Plant,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 85, 2008, pp. 191-197.
- [3] Moorthy, V., S. Vaidyanathan, B. Raj, T. Jayakumar, and B.P. Kashyap, “Insight into the Microstructural Characterization of Ferritic Steels using Micromagnetic Parameters,” *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 31A, April 2000, pp. 1053–1065
- [4] Saquet, O., J. Chicois, and A. Vincent, “Barkhausen Noise from Plain Carbon Steels: Analysis of the Influence of Microstructure,” *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 269, No. 1–2, 1999, pp. 73–82
- [5] Jagadish, C., Clapham, L., Atherton, D.L., Influence of Uniaxial Elastic Stress on Power Spectrum and Pulse Height Distribution of Surface Barkhausen Noise in Pipeline Steel, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 26, No:3, p.1160 – 1163, (1990).
- [6] Lindgren, M., Lepistö, T., “Residual Stress Evaluation in Welded Steel Tubes using Barkhausen Noise,” *Proceedings of the 2nd Int. Conf. on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing*, Newcastle 25-26 October 1999, pp. 91-100.

- [7] Lindgren, M., Lepistö T., “Estimation of Biaxial Residual Stress in Welded Steel Tubes by Barkhausen Noise Measurements,” *Advanced Engineering Materials*, Vol. 4, Issue 8, 2002, pp. 561-565.
- [8] Moorthy, V., Vaidyanathan, S., Laha, K., Jayakumar, K., Rao, K.B.S., Baldev, R., “Evaluation of Microstructures in 2,25Cr-1Mo and 9Cr-1Mo Steel Weldments Using Magnetic Barkhausen Noise,” *Materials Science and Engineering A*, Vol. 231, 1997, pp. 98-104.
- [9] Moorthy, V., Vaidyanathan, S., Jayakumar, T., Baldev R., “Evaluation of Post-Weld Heat Treatment in 2.25Cr-1Mo Steel Tube to Tube Sheet Welded Joints using Magnetic Barkhausen Noise Measurement,” *Materials Science and Technology*, Vol. 13, No. 7, 1999, pp. 614-617.
- [10] Park, D.G., Kim, C.G., Hong, J.H., “Microstructural Dependence of Barkhausen Noise and Magnetic Relaxation in the Weld HAZ of an RPV Steel,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 215-216, 2000, pp. 765-768.
- [11] Lachmann, C., Nitschke-Pagel, T., Wohlfahrt, H., “Characterization of Residual Stress Relaxation in Fatigue Loaded Welded Joints by X-Ray Diffraction and Barkhausen Noise Method,” *Materials Science Forum*, Vol. 347-349, 2000, pp. 374-379.
- [12] Ju, J.B., Lee, J.S., Jang, J.I., Kim, W.S., Kwon, D., “Determination of Welding Residual Stress Distribution in API X65 Pipeline using a Modified Magnetic Barkhausen Noise Method,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 80, No. 9, 2003, pp. 641-646.
- [13] Stewart, D.M., Stevens, K.J., Kaiser, A.B., “Magnetic Barkhausen Noise Analysis of Stress in Steel,” *Current Applied Physics*, Vol. 4, 2004, pp. 308-311.
- [14] Kesavan, K., Ravisankar, K., Parivallal, S., Sreeshylam, P., “Nondestructive Evaluation of Residual Stresses in Welded Plates using the Barkhausen Noise Technique,” *Experimental Techniques*, Vol. 29, No. 5, 2005, pp. 17-21.
- [15] Bruns, M., Nitschke-Pagel, T., “Determination of Welding Residual Stresses with Help of the Micromagnetic Measurement Method,” *Materials Science Forum*, Vol. 524-525, 2006, pp. 647-652.
- [16] Ochodek, V., Klimpel, A., “Application of Barkhausen Noise to Calibration Advance FEM Simulation Welding and Heat Treatment,” *Proceeding of the 5th Int. Conf. on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing*, 2005, Petten, pp. 91-99
- [17] Ochodek, V., “Residual Stress Evaluation in Spirally Welded Pipes for Gas Pipelines,” *Proceeding of the 6th Int. Conf. on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing*, Valenciennes 9-10 July 2007.
- [18] Yelbay, H.I., Çam, I., Gür, C.H., “Non-destructive Determination of Residual Stress State in Steel Weldments by Magnetic Barkhausen Noise Technique,” *NDT&E International*, Vol. 43, No. 1, 2010, pp. 29-33.

- [19] Serna-Giraldo, C.P., Padovese, L.R., “Evaluation of carbon steel welded plates with Magnetic Barkhausen Noise,” *Soldag. Insp.*, Vol. 15, No. 4, 2010, pp. 273-280.
- [20] Sapountzi, K., “Residual Stress Prediction in Welds via the Barkhausen Noise Technique,” *Key Engineering Materials*, Vol. 495, 2011, pp. 209-212.
- [21] Nitschke-Pagel, T., Dilger, K., Eslami-Chalandar, H., “Determination of Residual Stresses in Welded Structural Steels with Help of Micromagnetic Measurements,” *Materials Science Forum*, Vol. 681, 2011, pp. 194-201.
- [22] Blaow, M.M. , Shaw, B.A., “Magnetic Barkhausen noise for reliable detection of the heat affected zone in welded ship steel plate,” *AIP Conference Proceedings*, 1581, 2014, pp.1320-1327.
- [23] Augustyniak, B., Piotrowski, L., Chmielewski, M., Kielczynski, W., Prokop, K., “Progress in Post Weld Residual Stress Evaluation using Barkhausen Effect Meter with a Novel Rotating Magnetic Field Probe,” *Proceedings of the 11th European Conference on NDT*, Oct 6-10 2014, Prague.
- [24] Garipova, N., Batgün, C., Gür, C.H., “Numerical and Experimental Determination of the Residual Stress State in Multi-pass Welded API 5LX70 Plates,” *Materials Testing*, Vol. 56, 2014, pp. 831-836.
- [25] Lindgren, M., Santa-aho, S., Vippola, M., “Barkhausen Noise Response of Three Different Welded Duplex Stainless Steels,” *Insight*, Vol. 58, 2016, pp. 480-486.
- [26] Correa, S.R., Campos, M.F., Marcelo, C.J., Castro, J.A., Fonseca, M.C., Chuvas, T.C., Campos, M.A., Padovese, L.R., “Evaluation of Residual Stresses in Welded ASTM A36 Structural Steel by Metal Active Gas Welding Process,” *Materials Science Forum*, Vol. 869, 2016, pp. 567-571.
- [27] Gür, C.H., Erian, G., Batgün, C., Çam, I., “Investigating the Effects of Subsequent Weld Passes on Surface Residual Stresses in Steel Weldments by Magnetic Barkhausen Noise Technique,” *Materials Evaluation*, Vol. 74, 2016, pp. 418-423.