

ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR İÇİN MANYETİK TAHRİBATSIZ TEST SİSTEMİ

Yavuz EGE^{1*}, Mustafa GÖKTEPE², Osman KALENDER³

¹Balikesir Üniversitesi, Necati Eğitim Fakültesi, Fizik Eğitimi Bölümü, BALIKESİR

²Balikesir Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, BALIKESİR

³KK. Astsubay Meslek Yüksek Okulu, Elektrik Bilimleri Grubu, BALIKESİR

ÖZET

Levha şeklindeki ferromagnetik malzemelerde yüzey ve yüzeyaltı çatlaklarını belirlemek için yeni bir manyetik tahribatsız test sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen manyetik tahribatsız test sistemi, 3D Tarayıcı sistem ve onun elektronik kontrol ünitesinden oluşmaktadır. 3D tarayıcı sistemdeki sensör, deney sırasında elektronik ünite sayesinde x-y-z koordinatlarında hareket edebilmektedir. Bu makalede, geliştirilen manyetik tahribatsız test sisteminin yapımı, kontrolü ve deneysel sonuçlar ayrıntılı olarak tartışılacaktır.

Anahtar Kelimeler: Manyetik tahribatsız test sistemi, Ferromagnetik malzeme, 3D Tarayıcı sistem

ABSTRACT

A new magnetic non-destructive test system has been investigated to determine surface and under surface cracks in the lamination type of ferromagnetic materials. The investigated magnetic non-destructive test system consists of the 3D scanner mechanic and its electronic control unit. The sensor holder of the scanner system was capable to move on to the x, y, z coordinates during the experimental operation by means of electronics unit. In this paper the construction of the investigated magnetic non-destructive system, its operation principles and experimental results will be discussed.

Key Words: Non-destructive testing system, Hall effect sensor, Scanner system

*yege@balikesir.edu.tr

1. GİRİŞ

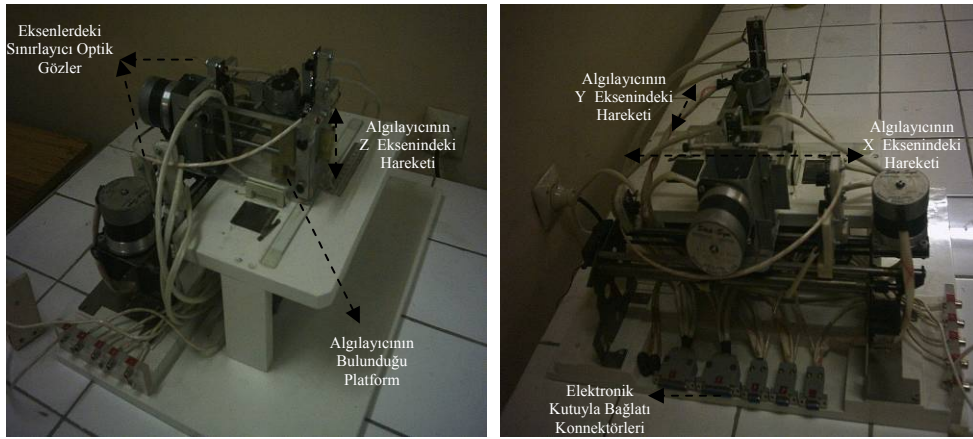
Günümüzde endüstriyel uygulamalarda, üretim aşamasında işlenen malzemeler tahribatsız muayene teknikleri ile kontrolleri yapılmaktadır. Bu teknikler arasında ultrasonik (1-4), manyetik parçacık (1,4), sıvı penetrant (4,5), akustik emisyon (6), girdap akımları (4,7), radyografi (4) ve manyetik akı kaçaqları testi yer almaktadır (7-16). Bu tekniklerin kendine özgü bazı sınırlılıkları ve uygulama şekilleri vardır. Bu tekniklerden ultrasonik ve manyetik akı kaçaqları test tekniğinde algılayıcı iki ya da üç boyutta hareket edebilen bir tarayıcı platform üzerine monte edilmelidir (13-18). Bu nedenle bu çalışmada manuel kontrollü yeni bir manyetik tahribatsız test sistemi geliştirilmiştir.

Levha şeklindeki malzemelerin manyetik akı kaçaqları testi için dizayn edilen manyetik tahribatsız test sisteminin mekaniği ve elektronik kontrol ünitesi bu çalışma kapsamında detaylı olarak irdelenmiş ve bazı deneysel sonuçlar verilmiştir.

2. MANYETİK TAHRİBATSIZ TEST SİSTEMİ

2.1 3D Tarayıcı Sistemin Mekaniği

Bu çalışmada mıknatıslanmış malzemelerdeki süreksizliklerin fiziksel özelliklerini tespit edebilmek için geliştirilen 3D Tarayıcı sistemin mekaniğinde, manyetik özellik göstermeyen alüminyum levha, civa çeliği, plexe glass ve kestamit türü malzemeler kullanılmıştır. Sistemde, manyetik algılayıcının hareketini sağlayan platformun üç boyuttaki hareketi, herbir eksenini kontrol eden üç adım motor tarafından sağlanmaktadır. Bununla birlikte 3D tarayıcı sistemde, yüzeyi taranacak malzemenin mıknatıslanmasını sağlayan U şeklindeki mıknatıslayıcı çekirdek de yer almaktadır. Şekil 1’de manyetik akı kaçaqları testi için geliştirilen adım motor kontrollü 3D tarayıcı sistem gösterilmektedir.



Şekil 1. Oluşturulan 3D Tarayıcı sistemin görünümü

Tarayıcı sistemde, çatlaklı örnek önce U şeklindeki mıknatıslayıcı çekirdek üzerine yerleştirilerek mıknatıslanmakta ve daha sonra algılayıcının üzerinde bulunduğu platform, üç farklı eksenini kontrol eden motorların senkronize çalışmasıyla mıknatıslanan örnek yüzeyinde istenilen sınırlar içinde hareket ettirilmektedir. Platform üzerinde yer alan algılayıcıdan gelen sinyaller, algılayıcının konumuna göre kaydedilmekte ve tarama esnasında sadece x

doğrultusundaki veri alınmaktadır. Böylece örnek yüzeyindeki çatlaklı bölgeler tespit edilmekte ve algılayıcının okuduğu sinyalin büyüklüğe göre de çatlağın fiziksel özellikleri ile kaçan manyetik akının 3 boyutlu simülasyonu tespit edilmektedir(17,18).

2.2 3D Tarayıcı Sisteminin Elektronik Ünitesi

Manyetik akı kaçakları testi için dizayn edilen 3D Tarayıcı sistemde üzerinde algılayıcının bulunduğu platformun üç boyuttaki hareketi adım motorlarıyla sağlanmaktadır. Bu yüzden üç farklı eksene yerleştirilen bu adım motorlarının çıkış uçlarına uygun verilerin gönderilerek platform üzerindeki algılayıcının örneğin üzerinde istenilen konumlara ulaştırılması gerekmektedir. Bu amaçla bu sistemde, üzerinde algılayıcının bulunduğu platforma 4 farklı hareket yaptıran manuel kontrollü yeni bir elektronik ünite geliştirilmiştir.

Geliştirilen bu elektronik ünitenin ön panelinde 6 ana kontrol bölümü yer almaktadır. Bunlar sırasıyla, platformu başa çekme bölümü, platformu kesikli hareket ettirme bölümü, platformu sürekli hareket ettirme bölümü, platformu istenilen ekseninde bağımsız hareket ettirme bölümü, kesikli ve sürekli hareket için adım belirleme bölümü ve son olarak başlangıçtan itibaren x, y, z - eksenlerinde gidilen adım miktarını görüntüleme bölümüdür (Şekil 2).

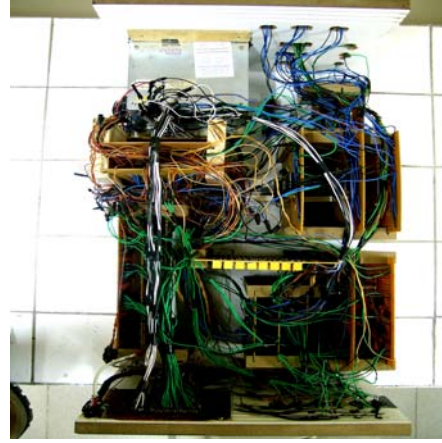
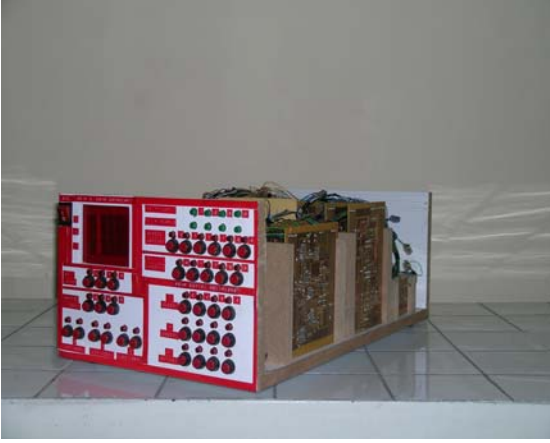


Şekil 2. 3D tarayıcı sistem için geliştirilen elektronik ünitenin önden görünümü.

Geliştirilen bu elektronik sistem, 8 farklı elektronik karttan oluşmaktadır. Bunlar;

- a- 5, 12 V DC güç kaynağı kartı
- b- Osilatör kartı
- c- Üç adet adım motor kontrol kartı
- d- Motorların sürekli ve kesikli hareketini kontrol eden flip-flop kartları (2 Adet)
- e- Tarayıcı kafayı başa çekme kartı
- f- Platformun x-ekseni boyunca hareketini sağlayan motorun kesikli ilerlemesini kontrol eden kart
- g- Sistemi durdurma kartı
- h- xyz yönünde motorların kaç adım gittiğini gösteren ileri-geri yönde sayabilen sayaç kartlarıdır.

Bu 8 elektronik kart, elektronik ünite içine uygun şekilde yerleştirilmiştir. Elektronik kartlar istenilen hareketleri sağlayacak şekilde ilişkilendirilmiş ve elektronik ünitenin ön panelinden kontrol edilebilir hale getirilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Üç boyutlu tarayıcı sistemin manuel kontrolünü sağlayan elektronik ünitenin yandan ve üstten görünümü.

Bu elektronik ünite sayesinde, 3D tarayıcı sistemdeki algılayıcının üzerinde bulunduğu platform 4 farklı hareketi yapabilmektedir. Bunlar,

1. Başa Çekme Hareketi
2. Sürekli Hareket
3. Kesikli Hareket
4. Sistemin eksenlerdeki bağımsız hareketidir.

Platformu Başa Çekme Hareketi: Tarayıcı sistemdeki platformu başa çekme hareketi sırasında her bir eksenini kontrol eden adım motorlar, tarayıcıyı başlangıç noktasına getirecek yönde dönmeye başlarlar. Her ekseninin başlangıç noktasında optik gözler yer almaktadır (Şekil 1). Tarayıcı sistemi kontrol eden adım motorların durmasını bu optik gözler sağlamaktadır. Bu harekette adım motorlar birbirinden bağımsız çalışırlar. Tarayıcı sistem x-ekseninde başlangıç noktasına geldiğinde x-eksenini kontrol eden adım motor optik göz sayesinde durdurulur. Fakat bu sırada y ve z-ekseninde başlangıç noktasına gelinmemiş olabilir. Bu durumda y ve z-eksenini kontrol eden motorlar, eksenlerde başlangıç noktasına gelene kadar çalışmasına devam ederler.

Bu hareket elektronik ünitenin ön paneldeki Platformu Başa Çekme bölümüyle kontrol edilmektedir. Üzerinde algılayıcının yer aldığı platform başa çekildikten sonra, diğer bir deyişle adım motorların çalışması durunca sistem yeni bir deney için hazır konuma gelecektir. Sisteme başka bir hareket yaptırmadan önce, sistemi başa çekme bölümüyle ilişkisini keserek ilgili optik gözleri devreden çıkartmalıdır.

Platformun Sürekli Hareket: Platformun sürekli hareketinde x-eksenini kontrol eden motor eksene yerleştirilmiş sınırlayıcı optik gözler arasında sürekli çalışmaktadır. Sistem sınırlayıcı optik gözün ışığını kestiğinde x-eksenini kontrol eden motor durmakta, y-eksenini kontrol eden motor çalışmaktadır. Bu motor istenilen adım kadar hareket ettikten sonra durmakta ve

x-ekseninde hareketi sağlayan motor geri dönü yönünde çalışmaya başlamaktadır. Belirlenen sınırlar içinde örnek malzeme yüzeyinin x-y ekseninde tarama işleminin bittiğini, y-eksenine yerleştirilmiş sınırlayıcı optik gözler belirlemektedir. Sistemdeki hem x hem de y-eksenindeki sınırlayıcı optik gözlerin ışığı kesildiğinde, z-eksenini kontrol eden adım motor çalışmaya başlamaktadır. z-eksenini kontrol eden adım motor daha önceden belirlenen adım sayısı kadar hareket ettikten sonra durmakta, y-eksenini kontrol eden adım motor belirlenen adım kadar geri yönde hareket etmektedir. Daha sonra x-eksenini kontrol eden motor çalışmaya başlamaktadır. Sistem y-eksenindeki diğer sınırlayıcı optik gözün ışığını kesene kadar, y-eksenini kontrol eden adım motor geri yönde hareket etmektedir. Bu hareketler dizisi, x-eksenine yerleştirilmiş ve sistemin durmasını sağlayan optik göz ışığının, sistem tarafından kesilmesine kadar devam etmektedir.

Bu hareket sırasında platform üzerinde bulunan algılayıcı, x konumundaki her bir değişimde veri almakta ve bu değerler bilgisayar kontrollü olarak kaydedilmektedir.

Platformun Kesikli Hareket: Sistemin kesikli hareketinde x-eksenini kontrol eden motor eksene yerleştirilmiş sınırlayıcı optik gözler arasında istenilen adım miktarı kadar gidip orada bir süre bekledikten sonra tekrar istenilen adım kadar gitmesi süretiyle kesikli olarak çalışmaktadır. Sistem, sınırlayıcı optik gözün ışığını kestiğinde x-eksenini kontrol eden motor durmakta, y-eksenini kontrol eden motor çalışmaktadır. Bu motor istenilen adım kadar hareket ettikten sonra durmakta ve x-ekseninde hareketi sağlayan motor geri dönü yönünde çalışmaya başlamaktadır. Bu hareketler dizisi tıpkı sürekli harekette olduğu gibi devam etmektedir. Bu hareket elektronik ünitenin ön paneldeki kesikli hareket ettirme bölümüyle kontrol edilmekte olup, hareket sırasında platform üzerinde bulunan algılayıcı, x konumundaki her bir değişimde veri almaktadır.

Platformun Eksenlerdeki Bağımsız Hareketi: 3D Tarayıcı sistemdeki tarayıcı platformun eksenlerdeki bağımsız hareketinde, adım motorların birbirinden bağımsız çalıştırılması sağlanmıştır. Harekette, istenilen motor istenilen yönde çalıştırılabilmektedir. Çalıştırılan motorun gitmiş olduğu adım miktarıda adım sayaçları tarafından görüntülenmektedir. Bu hareket elektronik ünitenin ön panelindeki elle hareket ettirme bölümüyle kontrol edilmektedir. Bu hareket sayesinde örnek malzemenin yüzeyinde istenilen (x, y, z) konuma gidilerek orada veri alınabilmektedir.

2.3 Manyetik Tahribatsız Test Sisteminin Kurulması

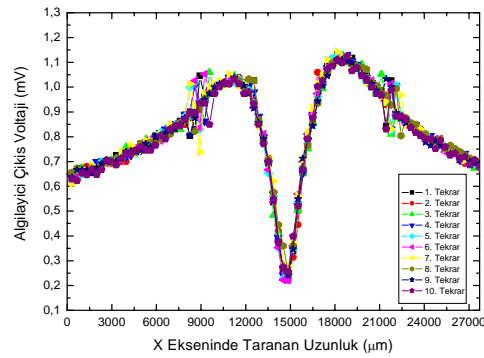
Bu çalışmanın bir sonraki aşamasında yukarıda bahsettiğimiz 3-D Tarayıcı sistemle birlikte manyetize edici sistem ve tarayıcı sistemin elle kontrolünü sağlayan elektronik üniteyi bir arada tutacak bir kabin yapılmıştır. Sonrasında manyetik tahribatsız test sisteminin tüm elemanları kabine yerleştirilmiş ve birbiriyle ilişkilendirilmiştir. Şekil 4'te geliştirilen manyetik tahribatsız test sistemi görülmektedir.



Şekil 4. Manyetik tahribatsız test sistemi

3. MAGNETİK TAHRİBATSIZ TEST SİSTEMİNİN KALİBRASYONU

Çalışmamızda sistemin kalibrasyonu üç aşamalı olarak gerçekleşmiştir. İlk olarak 3-D Tarayıcı sistemin her bir eksenini kontrol eden adım motorlarında, sistem hareket halindeyken herhangi bir adım kaybının olup olmadığı belirlenmiştir. Bu konuda yapılan çalışmalar üç ekseninde de herhangi bir adım kaybının olmadığını göstermiştir. Kalibrasyonun ikinci aşamasında sistemdeki algılayıcının, mıknatıslanmış örnek değiştirilmemek koşuluyla aynı konumda aynı veriyi alıp almadığı kontrol edilmiştir. Bu amaçla yapılan deneyde mıknatıslanmış örneğin yüzeyi sadece bir boyutta 3D tarayıcı sistemle 10 defa taranmış ve her bir tarama esnasında algılayıcının çıkış voltajının değişimleri kaydedilmiştir. Daha sonra aynı konumda tekrara bağlı olarak algılayıcının çıkış voltajında bir değişimin olup olmadığı belirlenmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Algılayıcının çıkış voltajının tekrara bağlı olarak değişimi

Şekil 5’de de görüldüğü gibi test edilen örnek aynı olması durumunda tekrara bağlı olarak algılayıcının çıkış voltajı da aynı olmaktadır. Bu da sistemle alınan verilerin doğru ve güvenilir olduğunu göstermektedir. Tekrarlanan ölçümlerde ortalama standart sapma değeri 0.023 mV’tur. Sistemin kalibrasyonunun üçüncü aşamasında ise, sistemin herhangi bir konumunda algılayıcının çıkış voltajının voltmetrede okunan değeriyle bilgisayara aktarılan değerinin aynı olup olmadığı belirlenmiştir. Kontrol için bilgisayara aktarılan ve text dosyasına yazılan veri, bilgisayarın monitörüne de yazdırılmıştır. Bu şekilde örnekler test edilirken algılayıcının çıkış voltajı hem voltmetreden hem de bilgisayar monitöründen izlenmiş ve aynı olduğu bulunmuştur.

4. MAGNETİK TAHRİBATSIZ TEST SİSTEMİNİN HASSASİYETİ

Sistemin konum hassasiyeti: Geliştirilen sistemde, algılayıcının üzerinde bulunduğu hareketli platform x ekseninde 165 μm , y ekseninde 62.5 μm ve z ekseninde ise 300 μm duyarlılıkla hareket edebilmektedir. Sistemde sadece x eksenindeki konum değişikliklerinde algılayıcının çıkış voltajı okunduğundan, örnek yüzeyinin taranması esnasında alınan verilerle elde edilen bulgular (örnekteki çatlakın merkezi ve konumu) $\pm 165 \mu\text{m}$ aralığında değişim gösterebilir. Bunun yanısıra örnekteki çatlakın x-y düzlemindeki şekli y eksenindeki duyarlılıkla, başka bir deyişle $\pm 62.5 \mu\text{m}$ hata aralığında belirlenmiştir.

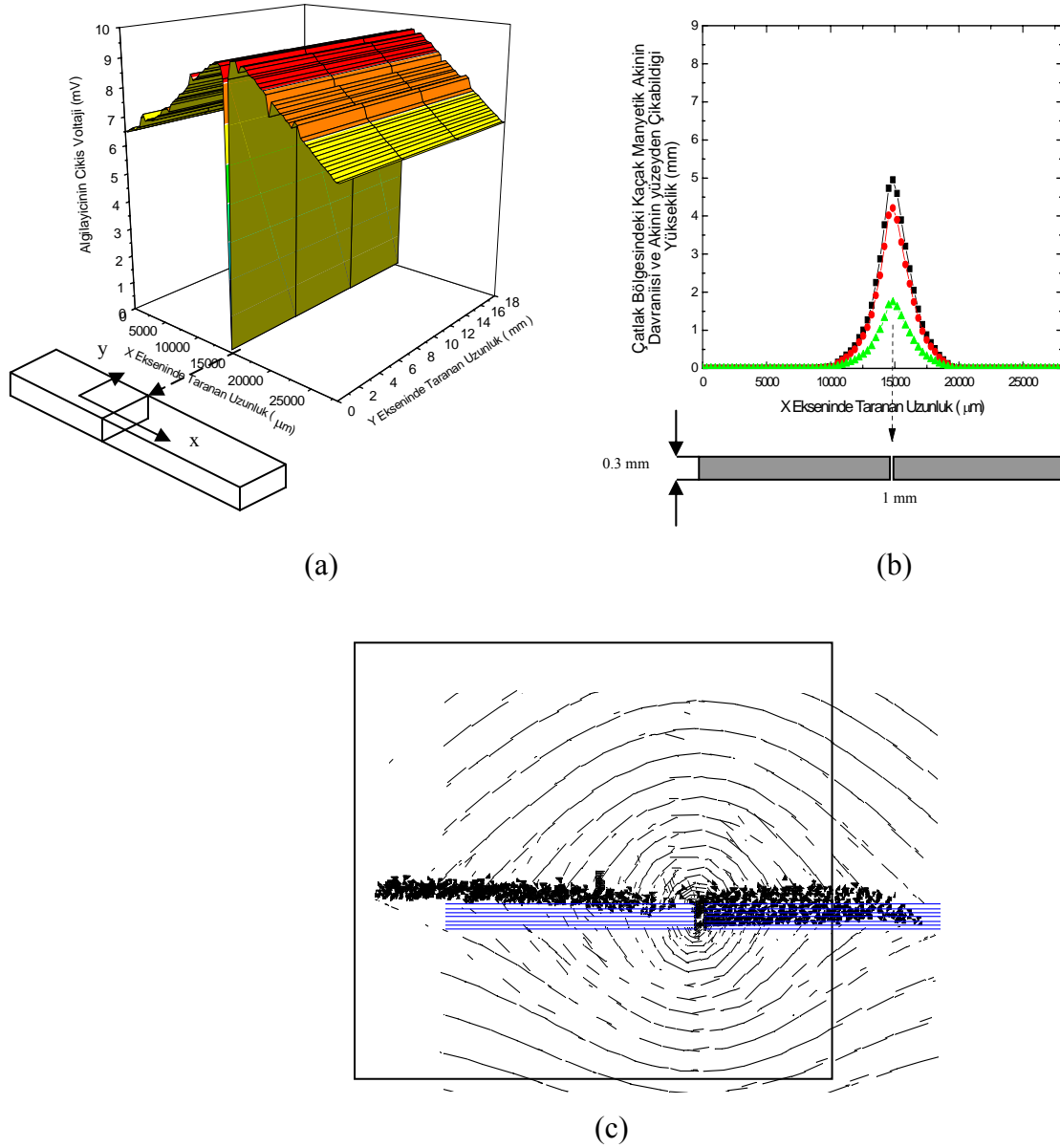
Sistemin algılama hassasiyeti: Sistemde, algılayıcının çıkış voltajı 400 kat yükseltilmektedir. Bunun yanısıra yükseltilmiş olan voltaj değeri 19.5 mV’tun altında ise bu değer bilgisayara aktarılamamaktadır. Diğer bir deyişle algılayıcının çıkış voltajı $19.5/400= 48.75 \mu\text{V}$ değerinin altında ise bu değer bilgisayara 0 V olarak aktarılmaktadır. Dolayısıyla sistemin ölçüm duyarlılığı 48.75 μV ’tur.

5. UYGULAMA SONUÇLARI

Geliştirilen sistemle farklı fiziksel özelliklerde çatlaklara sahip ferromanyetik örneklerin yüzeyleri üç boyutta taranmıştır. Örneklerdeki çatlakın fiziksel özelliklerinin (çatlakın şekli, genişliği, malzemenin kalınlığı, derinliği, çatlakın alt ve üst yüzeye olan uzaklığı, modeldeki çatlak sayısı, çatlakın geometrisi) algılayıcının çıkış voltajını nasıl değiştirdiği elde edilen grafiklerle belirlenmiştir. Elde edilen verilerle her bir örneğin çatlak bölgesindeki kaçak manyetik akının üç boyutlu davranışı da modellenmiştir. Ayrıca, bu çalışmada deneysel olarak bulunan çatlak bölgesindeki kaçak manyetik akının davranışına dair bulguların, Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ile elde edilen bulgularla uyumluluğu test edilmiştir. Şekil 6’da bir örneğin sistemle taranması sonucu elde edilen bulguları gösterilmektedir.

Şekil 6a’ya bakıldığında örneğin çatlak merkezinde algılayıcının çıkış voltajının değerinin sıfıra düştüğü görülmektedir. Bu durum kaçak manyetik akının y bileşeninin çatlakın merkezinde olmadığını göstermektedir ki bu durum hem deneysel yolla hem de Sonlu Elemanlar Yöntemiyle doğrulanmıştır (Şekil 6b,c). Ayrıca Şekil 6a’da algılayıcının çıkış voltajının maksimum olduğu iki konum arasındaki uzaklık çatlakın genişliğini doğrudan vermektedir. Fakat bunun için algılayıcının Hall etkili algılayıcı gibi nokta okuma yapan bir algılayıcı olması gerekmektedir. Bununla birlikte algılayıcının çıkış voltajının sıfıra düştüğü noktaların x-y düzlemindeki konumu çatlakın şeklini vermektedir. Bu örnek için Şekil 6a’ya bakarak çatlakın şeklinin çizgisel ve y eksenine paralel olduğu söylenebilir. Bu durum

gerçekle de uyuşmaktadır. Sonuç olarak algılayıcının çıkış voltajının konuma göre değişim grafiğiyle çatlak merkezi, çatlak genişliği ve şekli doğrudan bulunabilmektedir(17,18).



Şekil 6. 1mm çatlak genişliğine sahip 0.3 mm kalınlığındaki örneğin çatlak bölgesindeki (a) algılayıcının çıkış voltajının konuma göre değişimi, (b) deneysel yolla belirlenen kaçak manyetik akı davranışı, (c) Sonlu Elemanlar Yöntemine göre belirlenen kaçak manyetik akı davranışı.

Çalışmamızda, doğal örneklerin çatlak derinliğini ve sağlam malzeme kalınlığını bulabilmek için, önceden çatlak derinliği ve sağlam malzeme kalınlığı bilinen yapay örneklerin taranması sonucunda elde edilen sensör verileriyle, doğal çatlaklı örneğin taranması sonucunda elde edilen sensör verileri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda tahmini olarak çatlak derinliği ve sağlam malzeme kalınlığı belirlenmiştir. Çalışmamızda, sırasıyla,

1. Kullandığımız ölçüm sistemi ve yöntemle, manyetik geçirgenlikleri farklı (Si-Fe ferromanyetik şeritler, 2826 MB Amorf şeritler, AC20 Amorf teller gibi) ve boyutları 30 cm × 3 cm × 3 cm geçmeyen tüm doğal çatlak örneklerinin süreksizlik testinin yapılabileceği,
2. Si-Fe şeritlerde herhangi bir nedenle oluşabilecek doğal çatlağın, çatlak derinliği 1.33 mm'yi geçmemesi koşuluyla tüm fiziksel özelliklerinin (çatlağın şekli, genişliği, derinliği, çatlağın alt ve üst yüzeye uzaklığı, çatlak sayısı, çatlağın dışında kalan sağlam kesimin kalınlığı) kullandığımız ölçüm sistemi ve yöntemle belirlenebileceği, ayrıca test edilen malzemenin manyetik geçirgenliğine bağlı olarak çatlak derinliğini bulmadaki hassasiyetin değiştiği;
3. Si-Fe şeritlerde herhangi bir nedenle oluşan ve çatlak derinliği 1.33 mm'yi geçen doğal çatlağın derinliği ile 3 boyutlu geometrisinin, aynı ölçüm sistemi ve yöntemle ancak örneğin tüm yanal yüzlerinin taratılması sonucu bulunabileceği,
4. Kullandığımız sistem ve yöntemle, herhangi bir modeldeki çatlağın fiziksel özelliklerini doğrudan bulabilmek için, bobin gibi bölgesel okuma yapan algılayıcı yerine, Hall etkili algılayıcı gibi noktasal okuma yapan algılayıcıların tercih edilmesi gerektiği,
5. Kullandığımız sistem ve yöntemle, manyetik geçirgenlikleri farklı tüm doğal örneklerin, çatlak bölgesindeki kaçak manyetik akının 3 boyutlu davranışının bulunabileceği,
6. Kullandığımız sistem ve yöntemle, test edilen malzemede bulunan 0.5 mm'nin altındaki pürüzlerin, malzemedeki çatlağın fiziksel özelliklerini belirlemedeki hassasiyeti değiştirmediği, daha büyük pürüzlerin hassasiyeti düşürdüğü,
7. Deneysel sonuçlara dayalı yöntemimizin, çatlak bölgesindeki kaçak manyetik akıya dair bulgularının, Maxwell denklemlerine dayanan Sonlu Elemanlar Yönteminin (FEM) bulgularıyla uyduğu,
8. Deneysel sonuçlara dayanan yöntemimizin, modeldeki çatlağın ya da çatlakların fiziksel özelliklerini belirlemede diğer tahribatsız test yöntemlerine bir alternatif olabileceği, sonuçlarına ulaşılmıştır (17).

KAYNAKLAR

- [1] Üstüner, A., "İmalat Tekniğinden Kaynaklanan Hatalar", Ankara, (1981)
- [2] Ekinci, Ş., "Tahribatsız Test : Ultrasonik - Seviye I, Ç.N.A.E.M. Endüstriyel Uygulama Notları", İstanbul, (1990)
- [3] Silk M. G., "Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing", **Adem Hilger Ltd.**, Bristol, (1984)
- [4] Cartz, L., "Nondestructive Testing : Radiography, Ultrasonic, Liquid Penetrant, Magnetic Particle, Eddy Current", **ASM Intl**, (1988), ISBN: 0871705176
- [5] Prokhorenko, P., Migoun, N., "Introduction in Theory of Penetrant Testing", **Minsk: Science & Technology**, Russian, (1988)
- [6] Beattie, A.G., "Acoustic Emission, Principles and instrumentation", **Journal of Acoustic Emission**, (1983)
- [7] Hagemaiier, D.J., "Fundamentals of Eddy Current Testing", **ASNT**, 92, (1990), ISBN 0-931403-90-1

- [8] Bubenik, T.A., Nesdroth, J.B., Eiber, R.J., Saffell, B.F., “Magnetic flux leakage (MFL) technology for natural gas pipeline inspection.”, **NDT & E International**, Volume 31, Issue 5, 379, (1998).
- [9] Crouch, A.E., Beissner, R.E., Burkhardt, G.L, Creek, E.A., Grant, T.S., “Magnetic flux leakage inspection of gas pipelines.”, **NDT & E International**, Volume 30, Issue 1, 31, (1997).
- [10] Katragadda, G., Lord, W., Sun, Y.S., Udpa, S., Udpa, L., “Alternative magnetic flux leakage modalities for pipeline inspection”, **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol. 32, No. 3, 1581–1584, (1996),
- [11] Altschuler, E., Pignotti, A., “Nonlinear model of flaw detection in steel pipes by magnetic flux leakage”, **NDT & E International**, Volume 28, Issue 1, 35-40, (1995).
- [12] Porter, P.C., “Use of magnetic flux leakage (MFL) for the inspection of pipelines and storage tanks”, **NDT & E International**, Volume 30, Issue 1, 33, (1997).
- [13] Park, G.S., Park, E.S., “İmprovement of the sensor system in magnetic flux leakage-type nondestructive testing”, **IEEE Transactions on magnetics**, Vol.38, No. 2, (2002)
- [14] Gotoh, Y., and Takahashi, N., “Study on problems in dedecting plural cracks by alternating flux leakage testing using 3-D nonlinear eddy current analysis”, **IEEE Transactions on magnetics**, Vol. 39, No. 3, (2003)
- [15] Chady, T., Ekokizono, M., Todaka, T., Tsuchida, Y. And Sikora, R., “A family of matrix type sensor for dedection of slight flaws in conducting plates”, **IEEE Transactions on magnetics**, Vol. 35, No. 5, (1999)
- [16] Oka, M. and Enokizono, M., “A detection of backside crack using rotational magnetic flux sensor with search coils”, **IEEE Transactions on magnetics**, Vol. 32, No. 5, (1996)
- [17] Ege, Y. “Ferromanyetik Malzemelerin Yüzey Manyetik Akı Profilinin Dedeksiyonu ve Uygulamaları”, **Doktora Tezi**, Balıkesir (2005).
- (18) Ege, Y., Göktepe, M. “Ferromanyetik Malzemelerdeki Çatlakların Belirlenmesi ve Çatlak Bölgesindeki Kaçak Manyetik Akının Üç Boyutta Simülasyonu” **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 2006-1, (2006)