

MANYETİK FİLTREDE TUTULAN PARÇACIKLARIN MANYETİK ALINGANLIĞININ ÖNEMİ

Saadetdin HERDEM¹ Teymuraz ABBASOV² Muhammet KÖKSAL³

¹Selçuk Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Konya
e-mail: sherdem@selcuk.edu.tr

²İnönü Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Malatya
e-mail: tabbasov@inonu.edu.tr

³Fatih Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul
e-mail: mkoksal@fatih.edu.tr

Anahtar sözcükler: Manyetik filtre, Filtre performansı, Manyetik alınganlık.

ÖZET

Teknolojik sıvılarda yer alan ve manyetik filtreler yardımıyla temizlenen parçacıkların manyetik alınganlığının (magnetic susceptibility) ortalama değeri filtrasyon işleminin başlangıcında bilinmemektedir. Ayrıca bu parçacıkların manyetik alınganlıkları manyetik alan şiddeti ile değişmektedir. Bu nedenle doğru sonuçlar elde edilebilmesi için filtrasyon denklemine, gözeneklerdeki alan şiddetinin ortalama değerinin ve tutulan parçacıkların bu alandaki ortalama alınganlığının dahil edilmesi gerekmektedir. Bunun için de manyetik alınganlığın gözeneklerdeki alan şiddetinin ortalama değerine bağlı ifadesinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu bildiride, filtrasyon işlemi için filtre matrisinin gözeneklerinde oluşan alanın manyetik özellikleri dikkate alınarak yaklaşık sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar literatürde yer alan deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların manyetik filtrasyon sisteminin teknolojik parametrelerinin belirlenmesinde kolaylıklar sağlayabileceği görülmüştür.

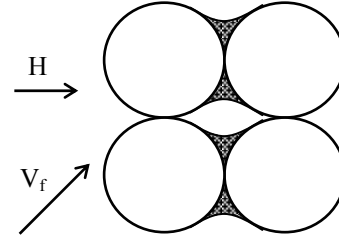
1. GİRİŞ

Teknolojik sıvı ve gazların manyetik parçacıklardan temizlenmesi için kullanılan etkin metotlardan biri de manyetik filtrasyondur [1-6]. Manyetik filtrelerde filtreleme elemanı olarak dış manyetik alanla mıknatıslanan ferromanyetik cisimler (küre, çubuk, talaşlar vs.) kullanılmaktadır. Mıknatıslanmış bu cisimler etrafında oluşan yüksek gradyentli alan bölgeleri (aktif bölgeler) manyetik parçacıkların kolaylıkla tutulmasına sağlarlar. Eğer mıknatıslanmış cisimler birbirleriyle teğet durumunda iseler aktif bölgeler teğet noktaları (veya çizgileri) etrafında oluşurlar. Manyetik filtre elemanlarının mıknatıslanmış kürelerden oluşturulması durumu için sıvının taşıdığı parçacıkların gözeneklerde (aktif bölgelerde) tutularak toplanması olayının prensip şeması Şekil 1'de verilmiştir.

Bu tip manyetik filtrelerin performansı aşağıdaki bağıntıyla belirlenir [2-5]:

$$\frac{\Psi}{\lambda} = 1 - \exp\left[-\alpha\chi H^f \delta^2 L / (\eta V_f d^2)\right] \quad (1)$$

Burada Ψ filtre performansı, λ sıvının taşıdığı karışımın içerdiği manyetik özellikli parçacıkların oranısını gösteren katsayı, α sabit katsayı, χ ortalama manyetik susceptibility, $\chi = \chi_p - \chi_f$, χ_p (χ_f) parçacıkların (sıvının) manyetik alınganlığı, H homojen dış alan şiddeti, δ parçacıkların boyutu (çapı), L filtrenin uzunluğu, V_f sıvının filtreleme hızı, d filtre elemanlarının (kürelerin) çapı, $f=0.5-1.5$ değerinde bir sabit katsayıdır. Bu çalışmada $\chi \approx \chi_p$ alınmıştır.



Şekil 1. Mıknatıslanmış ferromanyetik kürelerden oluşan gözeneklerde parçacıkların tutulması ve biriktirilmesinin prensip şeması.

Pratik açıdan Dk. 1'in kullanılması çok avantajlıdır. Çünkü bu denklem filtre performansının filtreleme sisteminin bütün parametrelerine (manyetik, hidrodinamik, geometrik) bağımlılığını ifade eder. Dk. 1'in kullanımında oluşabilecek dezavantaj, bu denklemin belirlenmesi çok kolay olmayan parametreleri, parçacığın boyutunu (δ) ve manyetik alınganlığını (χ) içermesidir. Bu dezavantajın $\chi\delta^2$ değerlerinin örnek-deneysel yöntemi uygulanarak ortadan kaldırılması mümkündür [2]. Fakat bu durumda da elde edilen sonuçlar pek anlamlı olmaz. Çünkü teknolojik sıvıların içerdikleri parçacıkların boyutları geniş bir spektrumda değişir, manyetik alınganlıkları (χ) ise manyetik alanın lokal değerlerine (h) bağımlıdır [2-5].

Manyetik filtrelerde alanın lokal değeri çok büyük gradyente sahiptir, yani değişkendir. Öte yandan χ , manyetik filtrenin performansına etkiyen en önemli parametrelerden birisidir. Çünkü sanayide kullanılan sıvıların içerdikleri manyetik parçacıkların alınganlığı birbirinden 2÷4 defaya kadar farklı olabilir [2]. Manyetik filtrelerde dış manyetik alan şiddetinin 200 kA/m civarlarında ve daha fazla olduğu dikkate alındığında, parçacıkların manyetik alınganlığının filtre performansını ne kadar önemli ölçüde etkileyebileceği (1)'den açıkça görülmektedir.

Bu çalışmada, manyetik filtrelerde tutulan parçacıkların manyetik alınganlığının filtre matrisinin mıknatıslanma eğrisine ve filtre performansına etkisi incelenmiştir. Mıknatıslanmış ferromanyetik granüllerden oluşturulmuş gözeneklerde tutulan parçacıkların ortalama manyetik alınganlığı belirlenmiştir. Bu amaçla gözeneklerde oluşan yüksek gradyentli manyetik alan şiddetinin ortalama değerinden yararlanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre manyetik filtrasyon denkleminin ifadesi kesinleştirilerek pratik açıdan daha kullanışlı bir hale getirilmiştir.

2. PARÇACIKLARIN MANYETİK ALINGANLIĞININ BELİRLENMESİ

Manyetik filtrasyon işleminde temizlenen sıvı ve gazların içerdikleri karışımların manyetik alınganlığının ortalama değerinin belirlenmesi çok basit değildir. Çünkü gözeneklerde parçacığın yerleştiği bölgelerdeki lokal manyetik alan şiddeti (h), Dk. 1'deki ifadede yer alan dış homojen alan şiddetinden (H) çok farklıdır ($h \gg H$). Gerçekte h 'ın değerleri direkt olarak dış homojen alan şiddetine bağımlıdır ve bu bağıntı nonlineerdir. Dolayısıyla parçacıkların manyetik alınganlığının belirlenebilmesi için öncelikle bu parçacıkların gözeneklerde yerleştiği bölgelerdeki manyetik alan şiddetinin ortalama değeri $\langle h \rangle$ 'ın belirlenmesi gerekir.

Gözenekli ortamlarda manyetik alan şiddetinin ifadesinin belirlenmesi matematiksel açıdan bazı zorluklar oluşturmaktadır. Genelde manyetik filtrasyon ve separasyon işlemleri için yaygın olarak kullanılan bir veya iki kürenin [7,8] oluşturduğu alan şiddetinden farklıdır. Gözenekli ortamın mıknatıslanmış kanallardan oluşan sürekli bir manyetik devre olduğu varsayılarak yapılan incelemeler sonucunda, bu ortamlardaki kürelerin teğet noktalarına göre alan şiddeti için

$$h = \mu H \exp\left(-\frac{\mu}{\ln \mu^{2.25}} r_a^2\right) \quad (2)$$

ifadesi elde edilmiştir. Burada $r_a = r/a$, r kürelerin teğet noktalarından parçacığa kadar olan uzaklık (polar koordinat), μ filtre elemanlarının manyetik geçirgenliği, a kürelerin yarıçapıdır. Aktif bölgedeki manyetik alan şiddetinin ortalama değeri

$$\langle h \rangle = \frac{1}{\pi a^2} \int_0^a 2\pi r h dr \quad (3a)$$

formülünden, (2) kullanılarak

$$\langle h \rangle = H \ln \mu^{2.25} \left[1 - \exp\left(-\frac{\mu}{\ln \mu^{2.25}}\right) \right] \quad (3b)$$

şeklinde bulunur. Üstsel ifade için

$$\exp\left(-\frac{\mu}{\ln \mu^{2.25}}\right) \cong 1 - \frac{\mu}{\ln \mu^{2.25}} \quad (3c)$$

yaklaşımı kullanarak, (3b) denklemi

$$\langle h \rangle \cong \mu > H \quad (3d)$$

şeklinde, aktif bölgedeki manyetik alan şiddetinin ortalama değerini veren basit bir ifadeye indirgenir.

Mıknatıslanmış dolgulu yatağın ortalama mıknatıslanma eğrisi ise

$$B = \mu_0 \langle \mu \rangle > H \quad (4)$$

ifadesiyle belirlenir.

Manyetik filtrelerde H 'ın geniş bir aralığı (5÷300 kA/m) için μ ve H arasındaki yaklaşık bağıntı

$$\mu = 5.6 \times 10^5 / \bar{H}^{0.9} \quad (5)$$

şeklinde dir. Burada $\bar{H} = H/(1 \text{ A/m})$ boyutsuz manyetik alan şiddetidir. Bu bağıntılar göz önüne alınarak gözeneklerdeki ortalama alan şiddeti için

$$\langle h \rangle = 418 \bar{H}^{0.64} \quad (6)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadeden yararlanarak manyetik filtrasyon için önemli olan $H = (30 \div 200) \text{ kA/m}$ aralığında gözeneklerdeki ortalama manyetik alan şiddetinin değerleri hesaplanacak olursa, bu değerlerin $\langle h \rangle = 300 \div 1000 \text{ kA/m}$ civarlarında olduğu görülür. Parçacığın ortalama manyetik alınganlığı ise aşağıdaki gibi belirlenebilir [2]:

$$\chi = \chi' \langle h \rangle^{-0.8} \quad (7)$$

Burada χ' sabit bir alınganlık katsayısı olup, örneğin magnetite (Fe_3O_4) parçacıkları için $\chi' = 1.6 \times 10^4$ 'dür. O halde parçacığın manyetik alınganlığı

$$\chi = \frac{5\chi'}{\langle h \rangle_2 - \langle h \rangle_1} \left[\langle h \rangle_2^{0.2} - \langle h \rangle_1^{0.2} \right] \quad (8)$$

ifadesiyle hesaplanır.

Yukarıdaki değerler göz önüne alınarak yapılan hesaplama sonucu $\chi \approx 0.4$ olarak belirlenir. Bu değer Dk. 7'ye göre $\langle h \rangle \approx 550 \text{ kA/m}$ değerine karşılık gelir. Dolayısıyla Dk. 1'de manyetik alınganlığın yaklaşık sabit değeri olarak alan şiddetinin 500÷600 kA/m değerlerini karşılık gelen değerlerin alınması mümkündür. Günümüzde kullanılan manyetik filtrelerin gözeneklerinde oluşan manyetik alan şiddetinin değerleri de bu aralıklardadır [2-5].

Dk.1'in pratik açıdan kullanışlılığını artırmak amacı ile manyetik alınganlığının (χ) değişken olduğu da göz önüne alınabilir. $\langle h \rangle$ ve H arasındaki yaklaşık analitik bağıntı elde edilerek bu gerçekleştirilebilir. H 'ın 30÷200 kA/m aralığındaki değerleri için bağıntı Dk. 6'den yararlanılarak elde edilebilir. Bu denklem dikkate alınarak Dk. 7' deki bağıntıdan da parçacığın ortalama manyetik alınganlığı elde edilebilir:

$$\chi = \frac{\chi'}{125H^{0.512}} \quad (9)$$

Bu dönüşümün sonucu olarak Dk. 1'de parçacığın manyetik alınganlığının değişimi dikkate alınır alan şiddetinin üssü $f=(0.5 \div 1.5)+0.512 \approx 1 \div 2$ olur. Eğer f 'nin pratik açıdan iyi sonuçlar veren ortalama değerinin $f=0.75$ [2-5] olduğu göz önüne alınır, bu durumda yukarıdaki değer ortalama olarak 1.26 civarında olduğu varsayılabilir. Dolayısıyla bu durumda manyetik temizleme katsayısının alan şiddetine bağımlılığı daha doğru olur ve bu bağıntı $\psi=\varphi(H)$ bağıntısının gerçek değişiminin elde edilmesine imkan verir. Başka bir deyişle χ' 'nin değişimi dikkate alınır, Dk. 1'de alan şiddeti için $H^{1.26}$ yer almalıdır. Sonuçta bütün bu özellikler dikkate alındığında manyetik filtrasyon denklemi

$$\frac{\psi}{\lambda} = 1 - \exp\left[-\alpha_1 \chi' H^{1.26} \delta^2 L / (\eta V_f d^2)\right] \quad (10)$$

şekline dönüşür. Buradaki α_1 katsayısı Dk. 1'deki α katsayısından farklıdır.

3. UYGULAMA

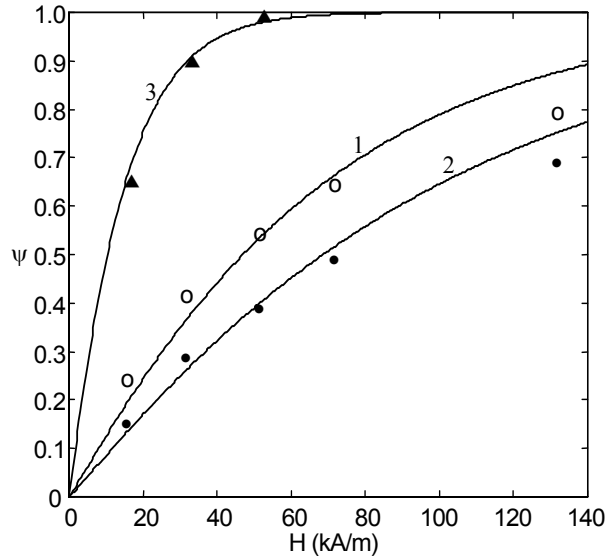
Endüstriyel sıvıların içerdikleri parçacıkların manyetik alınganlıklarının değişiminin manyetik filtre performansına etkisini incelemeye imkan veren Dk. 10'dan bazı önemli sonuçlar elde edilir. Bunlardan en önemlisi, gözeneklerde biriken parçacıkların alınganlığının yatağın manyetik geçirgenliğine etkisinin dikkate alınabilmesidir. Hesaplamalar gösteriyor ki bu durumda yatağın mıknatıslanma özelliğinin artışı $\%(4-5)$ 'den fazla değildir. Dolayısıyla manyetik filtrenin çalışma durumunda, filtre gözeneklerinde biriken parçacıkların manyetik alınganlığının filtre matrisinin mıknatıslanma özelliğine etkisi ihmal edilebilecek kadar düşüktür. Bu nedenle manyetik filtrelerin çalışma rejimlerinin temel parametreleri belirlenirken gözeneklerde biriken parçacıkların manyetik alınganlığının filtre matrisinin mıknatıslanma eğrisine etkisini ihmal etmek mümkündür. Bu sonuç manyetik filtrasyon-separasyonun teorisi ve pratiği açısından çok büyük önem taşımaktadır. Ayrıca Dk. 10, tutulan parçacıkların manyetik alınganlığını göz önüne alarak manyetik filtrenin performansının belirlenmesine imkan verdiği için parçacıkların alınganlığının önceden belirlenmesi gerekmez. Dolayısıyla sadece homojen dış alan şiddetinin ölçülmesi yeterli olur.

Metal talaşlarından oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanma karakteri kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatakların mıknatıslanması ile prensip olarak aynıdır. Fakat granüllerin şekli değiştiğinde mıknatıslanma kanallarının sayısı da değişir. Bu değişimin manyetik alan şiddetine ve yatağın mıknatıslanma eğrisine etkisi ise yatağın parositesine bağımlı bir sabit katsayı ile kolaylıkla göz önüne alınabilir [2]. Böylece yukarıda elde edilen

bağıntılar bu tür yatağa sahip filtreler için de kullanılabilir.

Elde edilen sonuçların geçerliliğini göstermek için farklı fiziksel özelliklere sahip olan sıvıların manyetik filtrelerde temizlenmesiyle ilgili deneysel sonuçların [2] manyetik alınganlığın göz önüne alındığı teorik sonuçlarla karşılaştırılması aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Sanayinin tipine ve teknolojik proseslerin özelliklerine bağımlı olarak temizlenecek sıvıların içerdikleri parçacıkların manyetik alınganlıkları geniş bir spektruma sahiptir. Buna rağmen, χ' 'nin uygun seçimi farklı sıvıların temizlenmesi durumu için manyetik filtre performansı eğrilerinin kolayca elde edilmesini sağlamaktadır.

Verilen grafikler incelendiğinde görüleceği gibi manyetik filtrelerde temizlenen sıvıların fiziksel özellikleri geniş bir spektruma sahip olmasına rağmen Dk. 10'dan elde edilen sonuçlar deney sonuçları ile oldukça uyumludurlar.

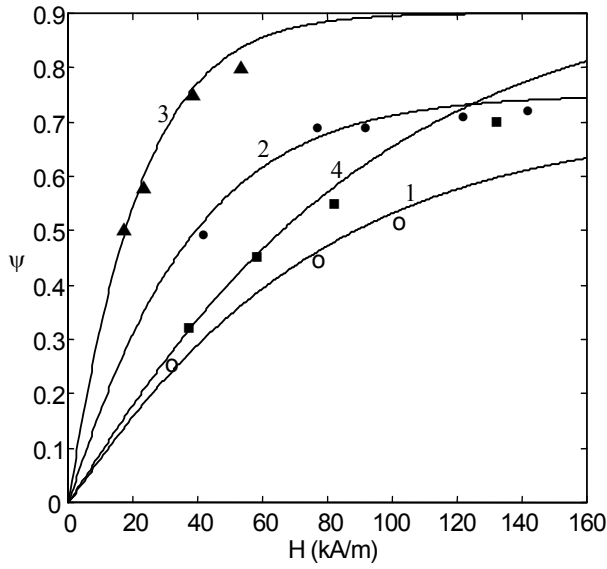


Şekil 2 Manyetik filtre performansının manyetik alan şiddetine bağımlılığı $d=5.7$ mm, $V_f=0.056$ m/s: 1 (o)- $\delta=0.1-10$ μm ; 2 (•)- $\delta<8$ μm ; 3 (▲)- $\delta>8$ μm .

4. SONUÇ

Manyetik filtrasyon işleminde tutulan parçacıkların manyetik alınganlığının değişmesi nedeni ile filtrasyon denklemindeki manyetik alan şiddetinin etkisinin belirlenmesindeki zorluklar gözeneklerde alan şiddetinin ortalama değerinin hesaplanması ve tutulan parçacıkların bu alandaki ortalama alınganlığının belirlenmesiyle ortadan kaldırılabilir. Filtre gözeneklerinde biriken parçacıkların manyetik alınganlıklarının dolgulu yatağın esas mıknatıslanma eğrisine etkisi ihmal edilecek kadar zayıf olmasına rağmen tutulan parçacıkların manyetik alınganlığının bu parçacıkların yakalanma özelliğine ve dolayısıyla filtre performansına önemli etkisi vardır. Elde edilen teorik

sonuçlar manyetik filtrelerin tasarımında ve kontrolünde kolaylıklar oluşturacaktır.



Şekil 3 Endüstriyel sıvıların temizlenmesinde manyetik filtre performansının alan şiddetine bağımlılığı: 1 (○)- sıvı amonyak, $d=6$ mm, $L=0.4$ m, $V_f=0.08-0.14$ m/s, $\lambda=0.7-0.9$; 2 (●)- hidroelektrik santral suyu, $d=5$ mm, $L=1$ m, $V_f=0.056$ m/s, $\lambda=0.7-0.9$; 3 (▲)- ağır endüstri suyu, $d=6$ mm, $L=0.1$ m, $V_f=0.07$ m/s, $\lambda=0.9-1.0$; 4 (■)- nükleer santral suyu, $d=5.7$ mm, $L=0.084$ m, $V_f=0.056$ m/s, $\lambda=0.95-1.0$.

4. KAYNAKLAR

- [1] J. H. P. Watson, Magnetic filtration, *J. Appl. Phys.* vol. 44, pp. 4209-4213, 1973.
- [2] A. V. Sandulyak, *Magnetic filtration of the liquids and gases*. Ximiya, Moscow, 1988.
- [3] T. Abbasov, S. Herdem, and M. Köksal, Performance of high gradient magnetic filters with granular matrix, *Separation Science and Technology*, vol. 34, no. 2, pp. 263-276, 1999.
- [4] S. Herdem, T. Abbasov, M. Köksal, Filtration model of high gradient magnetic filters with granular matrix, *Powder Technology*, vol. 106, no. 3, pp. 176-182, 1999.
- [5] T. Abbasov, M. Köksal, S. Herdem, Theory of high-gradient magnetic filter performance, *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 35, no. 4, pp. 2128-2132, 1999.
- [6] T. Zorutskaya and M. Shapiro, Capture of nonoparticles by magnetic filters, *J. Aerosol Sci.*, vol. 31, no. 8, pp. 907-921, 2000.
- [7] F. J. Friedlaender, R. Gerber, W. Kurz, R. R. Birrs, Particle motion near and capture on single spheres in HGMS, *IEEE Trans. Magn.*, vol. MAG-17, pp. 2801-2804 1981.
- [8] F. J. Friedlaender, M. Takayasu, A study of the mechanism of particle build-up on single ferromagnetic wires and spheres, *IEEE Trans. Magn.*, vol. MAG-18, pp. 817-819, 1982.