

Elektromanyetik Filtrelerin Tasarımı ve Çalışma Karakteristiklerinin Hesaplanması

Design of Electromagnetic Filters and Calculation of Operating Characteristics

Teymuraz Abbasov¹, Cemal Keleş¹

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
İnönü Üniversitesi

teymuraz.abbasov@inonu.edu.tr, cemal.keles@inonu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, endüstrideki kullanım koşulları ve standartlar dikkate alınarak elektromanyetik filtrelerin (EMF) bilgisayar destekli tasarım modeli geliştirilmiştir. Reel filtrelerin deneysel verileri göz önünde tutularak elektromanyetik filtrelerin geometrik, mekanik, elektrik ve manyetik parametrelerinin optimum değerlerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla bazı parametreler arasındaki ilişkiler düzeltilmiş, EMF'nin teorisi geliştirilmiştir. Optimum tasarım kriteri olarak reel filtre yapımında kullanılan toplam bakır kütlesinin filtre debisine oranının (L/D) oranına göre değişimi değerlendirilmiş, kaçak manyetik akı kaybı sınırlandırılmıştır. Tasarım şartlarına uygun olarak filtrenin diğer parametreleri de (rezistif direnç, şebeke gerilimi, solenoidin sargılarındaki akım şiddeti) minimal değerlerine göre hesaplanabilir. Parametreleri belirledikten sonra tasarlanan filtrenin çalışma karakteristikleri hesaplanmıştır.

Abstract

In this study, computer aided design model of electromagnetic filters (EMFs) is developed to taking into account the conditions of utilization and standards in the reel industry. Determination of optimum values for geometric, mechanical, electrical and magnetic parameters of EMFs is estimated. To this end, experimental data of real filters are considered, the relations between some parameters are adjusted and the theory of EMFs is advanced. As optimum design criteria, rate of the total mass of copper using the filter production and flow rate is considered according to variation of (L/D). And loss of magnetic flux leakage (MFL) is restricted. In accordance with design requirements, minimal value criterion can be also implemented to other parameters (resistance, mains voltage, current intensity of solenoid windings) of filter.

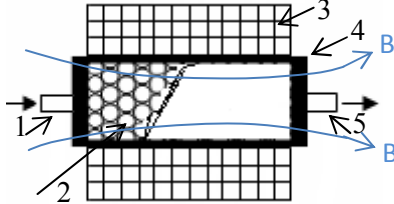
Giriş

EMF, son 50 yılda hızla geliştirilerek çeşitli sanayi alanlarında başarıyla kullanılmaktadır [1-6]. Endüstriyel ve çeşitli atık sıvıların içerdikleri mikron boyutlu manyetik özellikli parçacıklardan temizlenmesini amaçlayan bu yöntem son yıllarda nanoteknolojinin gelişmesiyle daha küçük boyutlu

teknolojilerde (microfluidic systems, magnetoforesis, magnetic drag targeting, immunomagnetic cell separation), tıp ve biyolojik alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [7,8]. EMF esasen nonmanyetik gövdeden, dış manyetik alan sisteminden, filtre matrisi adını alan ferromanyetik dolgu malzemelerinden (küre, tel, talaş) ile giriş ve çıkış borularından oluşur. EMF'nin prensip şeması Şekil 1'de gösterilmiştir. EMF ve benzeri teknolojilerin pratik uygulamalarının avantajı, bu sistemlerin yüksek verimli ve düşük maliyetli olmasıdır. Öte yandan EMF yapımında nonmanyetik malzeme kullanımının yanı sıra yüksek kaliteli manyetik malzemeler, pahalı dolgu malzemesi ve bakır kullanılması ile elektrik enerjisi harcanmaktadır. Bu malzemelerin etkin kullanılmaması durumunda EMF ve temizleme sisteminin maliyeti artabilir. Başka bir deyişle EMF'nin optimum tasarıma sahip olması günümüzde en önemli pratik problemlerden biridir. Literatürde EMF'lerin çok sayıda yapısal şemasının gösterilmesine ve pratik uygulama sonuçlarının sunulmasına [4-6] rağmen bu sistemlerin kapsamlı tasarım yöntemi gösterilmemiştir. Bütün çalışma koşulları göz önüne alındığında EMF'nin optimum tasarımının literatürde yer almadığı söylenebilir. Bu problemin halen çözülmemesi veya yeterince incelenmemesi EMF'nin çeşitli sanayi alanlarında pratik uygulamasını ciddi biçimde engellemektedir. Bu sorun yeni mikro elektromanyetik sistemlerin tasarımında daha kesin olarak ortaya çıkmaktadır [9]. Öte yandan bu tür sistemlerin hesaplanması ve tasarım parametrelerinin değerlendirilmesi birçok zorluklara sahiptir. Bütün elektromanyetik sistemlerde olduğu gibi EMF'de geometrik veya çalışma parametreleri arasındaki ilişkileri belirleyen eşitliklerin sayısı, bu parametrelerin sayısından çok azdır. Dolayısıyla bu tür elektromanyetik sistemlerin optimum tasarımının direkt olarak yapılması neredeyse imkansızdır. Ancak pratikte EMF uygulamalarının deneysel incelemeleri dikkate alınarak elde edilen bilgilerin değerlendirilmesi sonucu EMF'nin bazı parametreleri arasındaki ilişkileri modellemek mümkündür. Bu durumda bilgisayar destekli tasarım modeli oluşturularak EMF'lerin pratik açıdan yüksek verimli yapıları elde edilebilir.

Bu çalışmada solenoid türü elektromanyetik filtrelerin tasarımı için gereken temel parametrelerin belirlenmesi ve bu parametreler arasındaki ilişkilerin değerlendirilmesi amacıyla

bilgisayar programı hazırlanmıştır. Reel elektromanyetik filtrelerin çalışma parametrelerinin değişimleri dikkate alınarak bu parametreler arasındaki analitik bağlantılar oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre elektromanyetik filtrelerin farklı ortamlardaki ve farklı koşullardaki çalışma karakteristikleri hesaplanmıştır. Elektromanyetik filtrelerin tasarımında ve yapılışında mevcut standart bilgiler kullanılmıştır. Reel filtrelerin sanayi uygulamalarından elde edilen veriler ve kullanım koşulları göz önünde tutularak tasarım programında filtre parametrelerinin en uygun değerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.



Şekil 1: EMF'nin Prensip Şeması (1-giriş borusu, 2-filtre matrisi, 3-dış manyetik sistem, 4-manyetik olmayan gövde, 5-çıkış borusu)

EMF Tasarımının Esas Kriterleri

EMF'ler çeşitli yapı özelliklerine sahiptir. Sanayide kullanılan EMF esasen üç yapı gurubu olarak sınıflandırılabilir: çekirdek türü, solenoid türü ve sabit mıknatıslı. Bütün yapı türlerinin en önemli özelliği, bu filtrelerinin dolgu elemanlarının veya matrisinin, filtreleme sisteminin manyetik devresinin bir elemanı olmasıdır [5,6]. Bu yapılardan en yaygın olarak kullanılan solenoid türü EMF'lerdir. Solenoidin uzunluğunu (L) sabit tutularak iç çapını (D) arttırmakla filtrenin debisi de artırılabilir. Bu durumda filtrenin birim debi başına düşen bakır kütlesi açısından avantajlı bir yapıya sahip olduğu düşünülmektedir. Fakat D çapının artmasıyla manyetik alan kayıpları veya kaçak akılar artar, çalışma bölgesindeki manyetik alan şiddeti azalır. Bu nedenle reel EMF'nin tasarımında L/D oranı belli bir değer aralığına sahip olmalıdır. Solenoidin merkezindeki veya uçlarındaki manyetik alan şiddeti değişiminin %30'dan fazla olmayacağı göz önünde tutularak $L/D \geq 3$ civarında olması önerilmektedir [5]. Temizlenen sıvının debisinin artmasıyla EMF boyutlarının da artırılması gerekmektedir. Bu durumda L/D oranı yukarıdaki değer aralığında olmasına rağmen EMF'nin yapısı teknik açıdan imkânsız olabilir. Bu nedenle büyük debilere sahip olan EMF'nin tasarımında kollektör türü sistemlerin kullanılması daha avantajlıdır. Kollektör türü EMF'de büyük debili tek filtre yerine bu debiyi sağlayabilecek birkaç küçük ebatlı filtrelerin paralel bağlanmış sistemi kullanılır. Genelde filtrenin çapı,

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V_f n}} \quad (1)$$

olur. Burada Q filtre debisi, V_f temizlenen sıvının filtreleme hızı, n ise paralel bağlanmış filtre sayısıdır. Örneğin $n=1$ ve $Q=1000\text{m}^3/\text{h}$ bir debi için $V_f=200\text{m}/\text{h}$ hızla temizleme işleminde gereken EMF'nin çapı (1) denkleminde $D=2.52\text{m}$ olarak bulunur. Bu durumda filtrenin uzunluğu ise $L \geq 3D=7.56\text{m}$ olmalıdır. Bu tür bir filtrenin yapılışı, montajı ve servisi teknik açıdan imkânsızdır. Bu durumda $n=10$ paralel filtreden oluşan kollektör filtrenin çapı $D=0.8\text{m}$ olarak bulunur.

Pratikte solenoid türü EMF'de düşük debili sanayi atık sularının (kimya teknolojisinde, elektrik santrallerindeki ve petrol sanayisindeki sular vb.) temizlenmesi daha avantajlıdır [5,6]. Ancak bazı sanayi alanlarında, örneğin ısı santrallerinde temizlenen atık sular ve ağır sanayi alanlarında kullanılan besleme sularının debileri yüzlerce ve hatta binlerce metreküp debiye ulaşabilir. Bu durumda tek bölge solenoid EMF'lerin uygulanması yeterli değildir ve imkânsızdır. Bu tür sanayi alanlarında toroid türü, çok bölge veya çekirdek türü EMF'nin kullanılması öngörülmektedir. Genel olarak filtreler farklı yapılara sahip olmalarına rağmen bu filtrelerin manyetik devreleri birçok benzerlik göstermektedir. Bu nedenle solenoid türü EMF'nin tasarımındaki temel formüller, diğer modeller için de baz oluşturabilir. Bu nedenle EMF'nin tasarımı için esasen solenoid türü yapıların tasarım yöntemi temel olarak ele alınabilir. Düşük debili EMF'de filtre uzunluğu esasen $L \leq 1\text{m}$ olarak öngörülmektedir [5]. Bu durumda filtre çapı $D \geq 0.35L=0.35\text{m}$ civarlarında olur. Sanayide kullanılan EMF'nin filtreleme hızının üretim türüne bağlı olarak çok geniş bir aralıkta değiştiği saptanmıştır [5,6]. Ancak granül dolgu yatakları sahip olan manyetik filtrelerde filtreleme hızının optimum değerinin $V_f=300\text{m}/\text{h}$ olduğu düşünüldüğünde temizlenen sıvının optimum debisi $Q=15\text{m}^3/\text{h}$ civarında olur. Bu değerler, referans değer olarak alınabilir.

Çeşitli sanayi alanlarında kullanılan EMF'in çalışma koşulları ve bu koşullara uygun esas parametreler arasındaki ampirik ilişkiler dikkate alındığında, elektroteknikğin temel kavram ve yasalarına ait formüller kullanılarak filtrenin tasarım parametreleri kolaylıkla hesaplanabilir.

EMF'nin Tasarım Parametrelerinin ve Çalışma Karakteristiklerinin Belirlenmesi

EMF'nin tasarımı, üç temel basamakla yapılabilir:

- Esas parametrelerin belirlenmesi,
- Çalışma karakteristiklerinin hesaplanması,
- Filtre matrisinin mıknatıslanma özelliklerinin belirlenmesi.

Farklı yapılara sahip olan EMF'lerin geometrik, elektromanyetik ve hidrodinamik parametreleri arasındaki ilişkiler detaylı olarak literatürde sunulmuştur [5]. Bu filtre matrisinin mıknatıslanma özellikleri ve çalışma karakteristikleri de farklı yöntemlerle modellenmiştir [5,6,10]. Bu yöntemlerde EMF'nin giriş parametrelerine göre (filtre debisi, filtreleme hızı, çalışma koşulları, kullanılan malzemelerin ve temizlenen akışkanların fiziksel özellikleri) filtrenin geometrik, elektromanyetik parametreleri hesaplanır ve tasarlanan filtrenin çalışma karakteristikleri değerlendirilir. Tasarlanan EMF'nin optimum yapısını belirleyen kriter, bu filtrelerde kullanılan toplam bakırın birim filtre debisine oranının (M/Q), L/D parametresine göre değişimi varsayılmıştır. Basit matematiksel işlemler yaparak solenoid türü EMF'de bu ilişkinin

$$\frac{M}{Q} = \frac{\pi K_0 \delta_i \rho_m L D + \delta_i}{V_f D - \delta_T} \quad (2)$$

şeklinde olduğunu gösterilmiştir [5]. Burada K_0 solenoidin sargı dolgu faktörü, ρ_m sargı telinin yoğunluğu, δ_T gövdenin

et kalınlığı, δ_i solenoidin sargı kalınlığıdır. $\delta_i \leq D$ ve $\delta_T \leq D$ olduğu dikkate alınırsa (2) ile ifade olunan ilişki aşağıdaki basit bir biçime dönüşür:

$$\frac{M}{Q} = \frac{\pi K_0 \delta_i \rho_m L}{V_f D} \quad (3)$$

(2) ve (3)'ten görüldüğü gibi sabit uzunlukta solenoidin çapının artırılmasıyla (L/D azalarak) özgül bakır kullanımı (M/Q) azalır. Dolayısıyla EMF'nin etkinliği artacaktır. Öte yandan bu kıyaslamalar yapıldığında solenoid türü EMF'de optimum değerlerin $L/D \geq 3$ civarlarında olacağı da dikkate alınmalıdır [5].

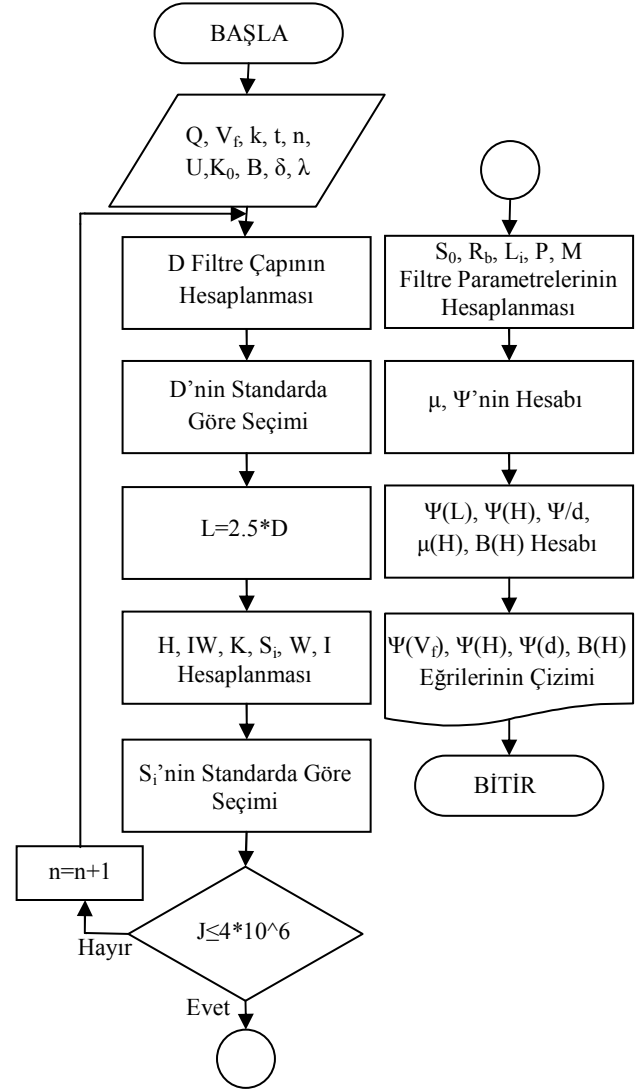
Görüldüğü gibi EMF'nin tasarım parametrelerinin değişim aralığı çok dardır. Bu nedenle tasarım parametrelerinin optimum değerlerinin seçimi kolay olmalıdır. Fakat bu parametrelerin çoğu piyasada standartlara uygun olarak belirli büyüklüklere sahiptirler. Bu parametrelere solenoidin iç çapı (veya EMF'nin dış çapı), sargı telinin dik kesit alanı, dolgu malzemesinin (manyetik küreler, metal talaşları, ferromanyetik çubuklar veya iplikler) boyutları, manyetik malzemenin mıknatıslanma özellikleri örnek gösterilebilir. Literatürde [5,6] sunulan tasarım yöntemlerinde bu husus dikkate alınmamaktadır. Öte yandan tasarım işlemlerinde teorik hesaplanmış parametre değerleri ile bu parametrenin mevcut standartlara göre seçilmiş değerleri arasında ihmal olunmayacak boyutta fark oluşabilir. Bu durumda tasarlanmış EMF'nin geometrik, fiziksel parametreleri, çalışma karakteristikleri ve verimi reel EMF'nin parametrelerinden farklı olacaktır. Bu nedenle solenoid türü EMF'nin tasarımı için aşağıdaki hesap adımlarını kullanmakta yarar vardır.

Tasarım parametrelerinin analitik ifadeleri elektroteknik problemlerde kullanılan ifadeler olup, literatürde yeterince açıklanmıştır [5,6, 10]. Tasarım için nominal parametreler olarak EMF'de temizlenen sıvının debisi Q , filtreleme hızı V_f , şebeke gerilimi U_n , akışkanın ve EMF'nin yapısında kullanılan elektriksel yalıtkan ve manyetik malzemelerin fiziksel parametreleri verilebilir. Solenoid sargılarda akım yoğunluğunu $J < 4A/mm^2$, filtre çapını D ve sargı telinin dik kesitini S_i (normal ve boya yalıtkanlı yapıda) belirleyebiliriz. Uygun standartlar kullanılarak (TS 275-1 EN 1329-1) D ve S_i 'nin standarda uygun değerleri seçilir. Bu değerler baz alınarak filtre sargılarındaki akım I , sarım sayısı W , sargı telinin toplam uzunluğu L_i , sargı direnci R_i , filtrenin gücü P ve sargının toplam bakır telinin kütlesi M hesaplanır. Bu hesaplamalar için geliştirilen programın akış diyagramı Şekil 2'de verilmiştir.

Büyük sanayi alanlarından farklı olarak, orta ve küçük ölçekli sanayi alanlarında kullanılan EMF'nin debisi daha düşük olur, $Q < 5m^3/h$. Bu durumda solenoid sargılardaki akımın değeri ciddi boyutlarda sınırlandırılabilir, $I \leq 5A$. Bu değerler nominal giriş geriliminin $U_n = 220V$ değil de daha düşük değerlerinde elde edilebilir. Bu durumda EMF şebekeye bağlanmış transformatörden sonra düzenlenmiş ve alçaltılmış gerilimle beslenebilir.

EMF'nin temel tasarım parametreleri (L, D, V_f, B veya H) seçildikten sonra solenoid türü filtrenin çalışma karakteristikleri, filtre performansının zamana, dış manyetik alanın değişimine, filtreleme hızına ve diğer değişimlere göre

belirlenir, filtre dolgulu yatağının mıknatıslanma özellikleri hesaplanır, değişim grafikleri çizilir. Bu değerler tasarlanmış filtrenin sanayi uygulamalarında referans değerler olarak kullanılabilir [5, 6, 10].



Şekil 2: EMF tasarımı için geliştirilen programın algoritması

Filtre dolgu malzemesi olan ferromanyetik kürelerin çapı (d) ile filtre çapı (D) arasındaki ilişki, dolgu malzemesinin hacimsel orantısı veya dolgu faktörü (γ) ile belirlenebilir [5]:

$$\gamma = \frac{2\pi}{9} \left[1 - 1.5 \frac{d}{D} \right] \left[\frac{4}{3} - 0.25 \left(1 - 1.5 \left(\frac{d}{D} \right)^{-2} \right) \right]^{-0.5} \quad (5)$$

Pratik incelemelerde kürelerden oluşturulmuş yataklarda dolgu faktörünün değişimi esasen $\gamma = 0,55-0,65$ civarlarında olur. Bu sonuç dolgulu yataktaki kürelerin esasen rhombik bir yapıyla yerleştiklerine işaret eder ve bu tür yataklarda $\gamma = 0,6$ olur. Bu değer (5)'te dikkate alındığında $d/D = 0,01$ olduğu görülmektedir.

Tasarruf açısından reel EMF'de dolgu malzemesi olarak çok pahalı olan ferromanyetik kürelerin yerine ferromanyetik malzemelerin talaşları kullanılabilir. Bu durumda γ daha düşük

değerlere sahip olur, fakat filtrenin karakteristikleri $d=5\text{mm}$ kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın karakteristiklerine eşdeğer olarak hesaplanabilir [5,6].

Sonuçlar ve Tartışma

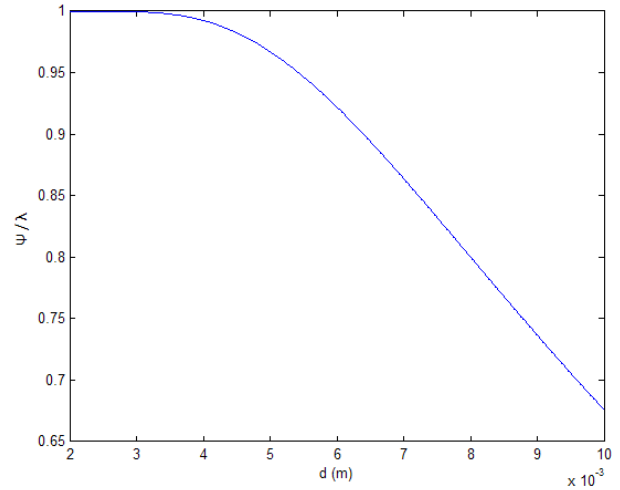
MATLAB'da yapılan EMF tasarım programında giriş parametreleri olarak $Q=15\text{ m}^3/\text{h}$ ve temizlenen karışımın manyetik alınganlığı $k=0.19$ olarak girilmiştir. Hesaplamalardan elde edilen EMF parametreleri Çizelge 1'de verilmiştir. Hesaplamalar için gereken formüller [6]'da detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 1: Tasarım sonucu elde edilen parametreler

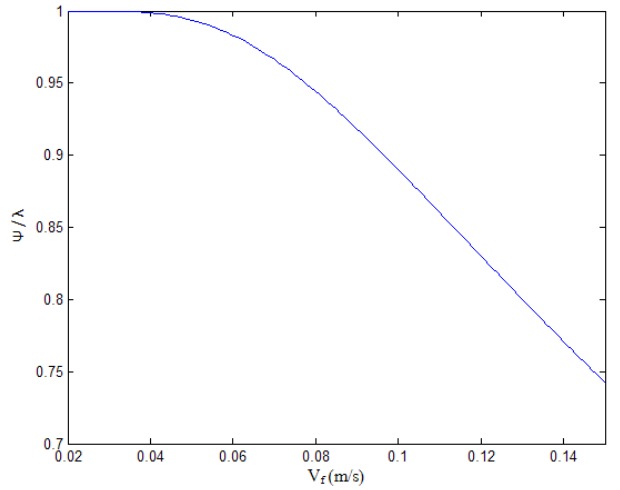
Parametre	Simge	Değeri
Elektromanyetik filtrenin debisi	Q	$15\text{ m}^3/\text{h}$
Ortamin sıcaklık değeri	t	100°C
Etkin manyetik alınganlık katsayısı	k	0.19
Filtre uzunluğu	L	0.76 m
Ampersarım	IW	66.2568 kA
Sargılardan geçen akım şiddeti	I	17.6 A
Filtre çapının hesaplanan değeri	D	0.276 m
Filtre çapının piyasadaki eşdeğeri	D_{st}	0.304 m
İletken çapının hesaplanan değeri	d_i	3.34 mm
İletken çapının piyasadaki eşdeğeri	d_{ist}	3.11 mm
İletken dik kesitinin hesaplanan değeri	S_i	8.803 mm^2
İletken dik kesitinin piyasadaki eşdeğeri	S_{ist}	7.596 mm^2
Bakır iletkenin toplam uzunluğu	L_i	4932 m
Harcanan bakır iletkenin kütlesi	M	386 kg
Sarım sayısı	W	3778
Bobinin rezistif direnci	R_b	$12.5\ \Omega$
Filtrenin gücü	P	2884 Watt

Çizelge 1'de gösterilen veriler teknikaçından yapılması kolay olan ve sanayi alanlarında pratik olarak kullanılan EMF'nin parametreleri ile uyum sağlamaktadır [5,6]. Bu parametrelere sahip olan EMF'nin çalışma karakteristikleri ise Şekil 3-6'te gösterilmiştir.

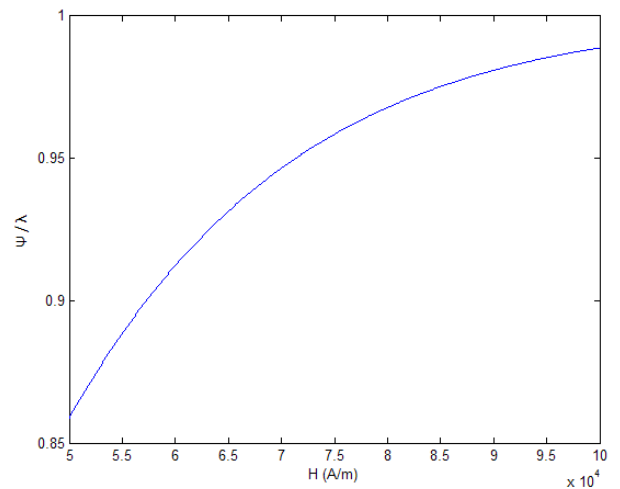
Şekil 3-5'ten de görüldüğü gibi filtrenin temizleme katsayısı (Ψ/λ); filtre matrisinin dolgu elemanlarının (ferromanyetik küreler) boyutunun (d) ve filtreleme hızının (V_f) artırılmasıyla azalır, dış manyetik alan şiddetinin (H) artmasıyla artar. Ayrıca Şekil 6'da ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgulu yatağın mıknatıslanma eğrisi $B(H)$ görülmektedir. Burada $H=200\text{kA/m}$ civarlarında bile doyma durumuna ulaşmamıştır. Başka bir ifadeyle, filtreleme katsayısının H 'ın artırılmasıyla yükseltilmesine imkân sağlanmıştır. Bu sonuçlar ve elde edilen parametre değerleri reel EMF'nin parametreleri ile çok iyi uyum sağlamaktadır. Dolayısıyla geliştirilmiş tasarım programı, çeşitli endüstri alanlarında kullanılacak EMF'nin iyi bir performansla çalışabilen yapılarını ve çalışma karakteristiklerini kolaylıkla belirlemeye imkân verir. Böylece EMF'nin ve benzer elektromanyetik sistemlerin etkin yapılarının tasarımının yapılması ve EMF teorisinin geliştirilmesi bakımından literatürde bulunan boşlukların giderilmesine önemli katkıda bulunulmuştur.



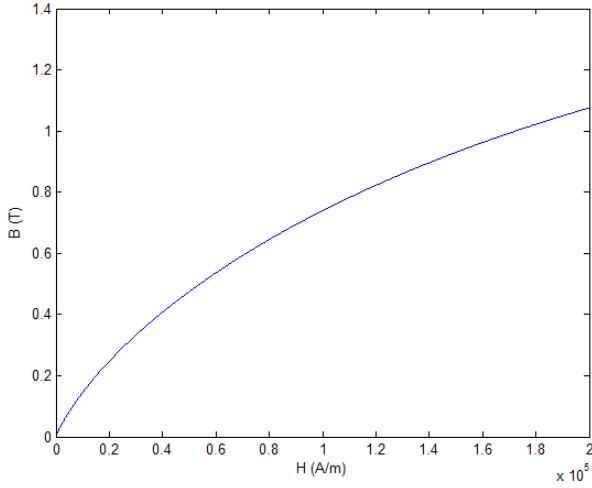
Şekil 3: EMF'nin temizleme katsayısının filtre matris elemanının boyutuna göre değişimi



Şekil 4: EMF'nin temizleme katsayısının filtreleme hızına göre değişimi



Şekil 5: EMF'nin temizleme katsayısının dış manyetik alan şiddetine göre değişimi



Şekil 6: Ferromanyetik kürelerden oluşturulmuş dolgu yatakların mıknatıslanma eğrisi

Kaynaklar

- [1] İzmodenov, Y. A., *Magnetic method cleaning of gases and waters*, Tavria, Simferopoul, 1972 (in Russian).
- [2] Watson, J.H.P., "Magnetic filtration", *J. Applied Physics*, 44 (9), pp.4203-4213, 1973.
- [3] Gerber, R. ve Birss, R.R., *High Gradient Magnetic Separation*, John Wiley, 1983.
- [4] Svoboda, J., *Magnetic Methods for the Treatment of Minerals*, Kluwer Academic Publishers, 2010.
- [5] Sandulyak, A.V., *Magnetic filtration of liquids and gases*, Chemic Ed., Moscow, 1988 (in Russian).
- [6] Abbasov, T., *Elektromanyetik Filtreleme İşlemleri: Teori, uygulama ve konstrüksiyon*, Seçkin yayınları, Ankara, 2002.
- [7] Furlani, E.P., "Analysis of particle transport in a magnetophoretic microsystem", *J. Applied Physics*, 99, 024912, 2006.
- [8] Han, Ki-Ho ve Frazier, A.B., "Continuous magnetophoretic separation of bloodcells in microdevice format", *J. Applied Physics*, 96(10), pp.5797-5802, 2004.
- [9] Furlani, E.P., "Magnetophoretic separation of bloodcells at the microscale", *J. Phys. D: Appl. Phys*, 40, pp.1313-1319, 2007.
- [10] Abbasov, T., Köksal, M. ve Herdem, S., "Theory of high gradient magnetic filter performance", *IEEE Trans. Magn.*, 35(4), pp.2128-2132, 1999.