Eksenel Akılı Açık Oluklu Bir Girdap Akım Freninde Doğrusal Olmayan Manyetik Modelleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Comparison of Non-linear Magnetic Modelling Techniques for an Open Slotted Axial Flux Eddy Current Brake

Mehmet Güleç, Metin Aydın

Mekatronik Mühendisliği Bölümü
Kocaeli Üniversitesi
mehmet.gulec@kocaeli.edu.tr, metin.aydin@kocaeli.edu.tr

Özet

Bu çalışmada eksenel akılı (EA) açık oluklu (AO) bir girdap akım freni (GAF) için doğrusal olmayan manyetik modelleme yöntemlerinin karşılaştırılması sunulmuştur. Tasarlanan tek rotor tek stator yapısına sahip eksenel akılı açık oluklu girdap akım freninin dinamik modeli açıklanmış ve frenleme momentine etki eden manyetik ve elektrik özellikler belirtilmiştir. Tasarlanan girdap akım freninin bir simetri akı yolu boyunca manyetik modellemesi yapılmıştır. Çalışma kapsamında; Jakobi, Gauss-Siedel ve Newton-Raphson doğrusal olmayan modelleme yöntemleri incelenmiştir. Bu yöntemler açıklanarak, doğrusal olmayan manyetik modelleme iş akış planı açıklanmıştır. Çalışma kapsamında anlatılan bu yöntemler ile elde edilen sonuçlar 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Newton-Raphson yönteminin baskın doğrusal olmayan durumlarda Jakobi ve Gauss-Siedel yöntemlerine göre kabul edilebilir çözüm ürettiğini göstermiştir.

Abstract

This paper presents comparison of non-linear magnetic modelling techniques for an axial flux open slotted eddy current brake. Dynamic modelling of a designed axial flux open slotted eddy current brake having single rotor single stator is described. The magnetic and electrical properties of dynamic modelling which are effected the braking torque are explained. Magnetic modelling of a designed eddy current brake is investigated over one symmetrical flux path. Jakobi, Gauss-Siedel and Newton-Raphson non-linear modelling techniques are also examined. These techniques are explained and non-linear magnetic modelling flow chart is provided. Results obtained from non-linear modelling techniques are compared with 3-D finite element analysis and test results. Results show that Newton-Raphson method gives more reasonable result then Jakobi and Gauss-Siedel methods at high non-linear conditions.

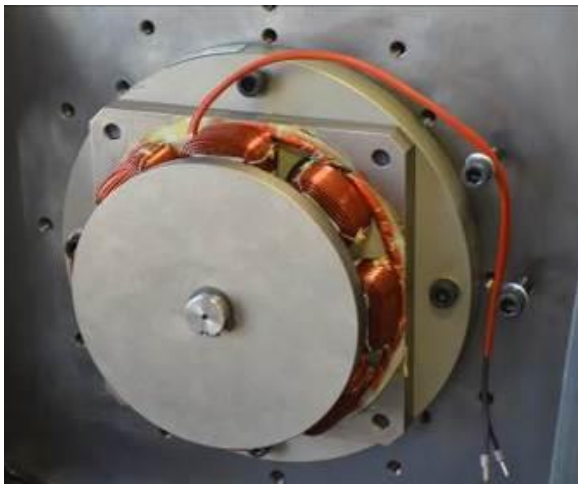
1. Giriş

Sürtünmesiz çalışma prensipleri sayesinde, girdap akım frenleri endüstride farklı alanlarda güvenle kullanılmaktadır. Elektrik motor test düzeneklerinden ağır ticari araçlara, hızlı trenlerden asansörlere ve araç taşıt test sistemlerine kadar birçok farklı alanda bu tip frenlerin kullanımı mevcuttur [1-2].

Girdap akım frenleri bir nevi elektrik makinasıdır. Stator gibi durağan, rotor gibi dönen bir yapıya ve uyartım sargılarına ve/veya sürekli mıknatıslara sahiptir. Girdap akım frenlerinin elektrik motorlarından en büyük farkı ise fren diskindeki katı çelik malzemeden meydana gelmesidir. Elektrik motorları bilindiği gibi kayıpları azaltmak için laminasyonlardan oluşmakta ve bu şekilde demir kayıpları azaltılmaktadır. Girdap akım frenlerinde ise esas amaç fren diskinde (rotor) mümkün olduğunca girdap akım üretmektir. Bu şekilde en yüksek frenleme momenti elde edilebilmektedir [3].

Faraday yasalarına göre girdap akımı manyetik alanın değişimi ile ortaya çıkmaktadır. Bu, iki durumda kendini gösterir; durağan bir sistemin AC bir kaynak ile beslenmesi veya haraketli bir sistemin DC bir kaynak ile beslenmesi ile oluşmaktadır. Lenz yasasına göre, girdap akımları ters yönde manyetik alanlar üreterek frenleme kuvveti veya momenti oluşmaktır. Bu da girdap akım frenlerinin temel çalışma prensibini açıklamaktadır.

Girdap akım frenleri temel olarak doğrusal ve döner olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Hızlı trenlerde ve eğlence parklarındaki trenlerde bu tür yapıları görmek mümkündür. Ticari araçlar ve taşıt test sistemlerinde ise döner yapıdaki girdap akım frenleri mevcuttur. Döner yapıdaki girdap akım frenleri ise kendi arasında radyal ve eksenel akılı olmak üzere 2 gruba ayrılmaktadır. Özellikle ticari araçlar ve araç taşıt test sistemleri göz önüne alındığında EA-GAF endüstri ve literatürde büyük bir alanı kapsamaktadır. EA-GAF ticari araçlar ve test sistemlerine uygun ve güncellenebilir yapısı, yüksek frenleme momenti yoğunlukları gibi avantajları sayesinde büyük oranda kullanılmaktadır.



Şekil 1: Tek rotor tek stator yapısına sahip EA-AO-GAF

Bu çalışmada bir EA-AO-GAF dinamik modellenmesi, doğrusal olmayan manyetik modelleme yöntemlerinin incelenmesi ve elde edilen sonuçların 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması yapılmıştır. Tasarlanan girdap akım freni Şekil 1'de verilmiştir. Tasarlanan fren tek stator tek rotor yapısından meydana gelmekte ve 8 açık oluktan oluşmaktadır. Bu kapsamda ilk başta tasarlanan girdap akım frenini dinamik modeli verilmiş ve neden doğrusal olmayan manyetik modele ihtiyaç olduğu açıklanmıştır. Devamında doğrusal olmayan modelleme yöntemleri açıklanmış ve tasarlanan fren sisteminde uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar hem 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi hem de deneysel sonuçları ile karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

2. Eksenel Akılı Açık Oluklu Girdap Akım Freninin Dinamik Modellenmesi

Girdap akım freninin dinamik modeli, frenleme momentini oluşturan bileşenlerin belirlenmesi için büyük önem arz etmektedir. Bu bölümde tasarlanan frenin dinamik modellenmesi çıkarılacak ve frenleme momentine etki eden bileşenler detaylandırılacaktır. Genelleştirilmiş moment denklemi (1)'de gösterilmiştir.

$$T = \frac{P}{\omega} \tag{1}$$

Burada T frenleme momentini, P gücü, ω ise hızı temsil etmektedir. (1)'de ifade edilen güç fren diskinde elde edilen gücü belirtmek ile birlikte bu durumda güç formülü (2)'deki gibi açıklanabilmektedir[4].

$$P = \rho J^2 \pi R^2 d \tag{2}$$

burada Amper yasasından yararlanılmıştır. ρ elektriksel özdirenci, J akım yoğunluğunu, R fren diski yarıçapını, d ise fren diski kalınlığını temsil etmektedir. (2)'den de anlaşılacağı üzere akım yoğunluğu frenleme momenti için büyük önem teşkil etmektedir. Akım yoğunluğu Lorentz kuvveti ile (3)'deki gibi açıklanmaktadır.

$$J = \sigma\left(R\omega \times B\right)e^{-d/\delta} \tag{3}$$

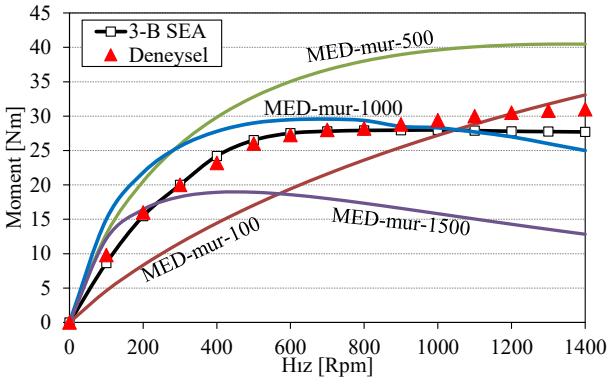
burada σ elektriksel geçirgenliği, B ise manyetik akı yoğunluğunu ifade etmektedir. Buradaki manyetik akı yoğunluğu manyetik modelleme ile hesaplanmaktadır. Akım yoğunluğunun en kritik bileşeni ise deri etkisidir. (3)'de deri etkisi δ ile gösterilmiştir. Deri etkisi (4) ile açıklanmaktadır [5].

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0\mu_r}} \tag{4}$$

burada μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğini, μ_r ise fren diskinin manyetik geçirgenliğini ifade etmektedir. Bu 4 denklem takımı ile girdap akım frenlerinin frenleme karakteristiği ortaya konulmaktadır. Burada en kritik bileşenler deri etkisi ve akım yoğunluğu olmakta ve manyetik modellemeden gelen manyetik akı yoğunluğu (B) ve manyetik geçirgenlik (μ_r) frenleme momentine doğrudan etki etmektedir. Bu nedenle manyetik modellemenin çok dikkatli bir şekilde yapılması gerekmektedir.

Standart bir manyetik modelleme tekniğinde manyetik geçirgenlik sabit kabul edilerek manyetik modelleme yapılmaktadır. Bu tür bir modelleme genel elektrik makinalarında iyi bir şekilde işlemekte fakat girdap akım frenlerinde ise farklı çözümler üretmektedir.

Tasarlanan girdap akım freninde stator ve fren diski için farklı manyetik geçirgenlikler için elde edilen frenleme momenti-hız grafikleri Şekil 2'de verilmiştir. Kırmızı üçgen işaretler deneysel sonuçları, kare boşluklu siyah çizgi ise 3-boyutlu sonlu elemanalar analizi (SEA) sonuçlarını göstermektedir. Diğer çizgiler ise manyetik eşdeğer devre (MED) sonuçlarını farklı manyetik geçirgenlikler için göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere özellikle girdap akım freni için manyetik geçirgenlik dominant bir şekilde frenleme momenti karakteristiğini etkilemektedir. Bu nedenle doğrusal olmayan manyetik modelleme ile manyetik geçirgenliğin her adımda hassas olarak hesaplanması gerekmektedir.



Şekil 2: EAAO GAF da farklı manyetik geçirgenliklerin frenleme momenti üzerine etkisi

3. Eksenel Akılı Açık Oluklu Girdap Akım Freninin Doğrusal Olmayan Manyetik Modellenmesi

3.1. Fren Manyetik Modeli

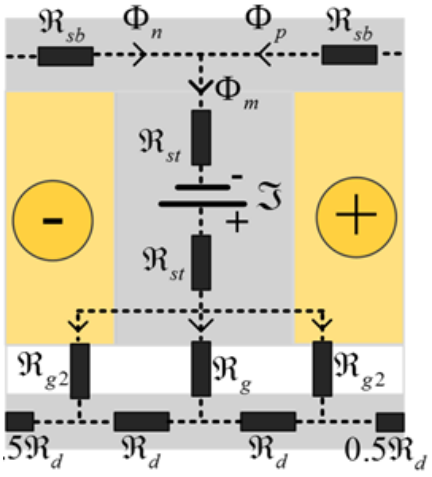
Elektrik makinalarında ister ön tasarım aşamasında ister kontrol çalışmalarında daima manyetik modelleme yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Genellikle, elektrik makinalarının ideal durumda ve sabit bir manyetik geçirgenlik altında çalıştığı kabul edilerek manyetik modellemeler gerçekleştirilmektedir. Oysa gerçekte manyetik akı-akım ilişkisi lineer değildir. Girdap akım frenleri ise yüksek akım yoğunlukları ve farklı çalışma karakteristikleri nedeniyle manyetik geçirgenlikleri her zaman değişken olmaktadır. Dolayısıyla bu tür sistemlerde doğrusal manyetik modelleme hatalı sonuç verebilmektedir. Doğrusal olmayan manyetik modelleme öncesinde tasarlanan girdap akım freninin bir simetrik akı yolu Şekil 3'de gösterilmiştir. Relüktanslar R ile manyeto-motor-kuvveti F ile akılar ise ϕ ile gösterilmiştir. Şekil 3'deki manyetik devre analizi yapıldığında hava aralığındaki akı yoğunluğu hesaplanmaktadır. Hava aralığı, stator ve fren diski relüktansları sırası ile (5), (6) ve (7)'de verilmiştir.

$$\Re_g = \frac{1}{\mu_0}\frac{l_g}{A_g} \tag{5}$$

$$\Re_s = \frac{1}{\mu_0\mu_{rs}}\frac{l_s}{A_s} \tag{6}$$

$$\Re_d = \frac{1}{\mu_0\mu_{rd}}\frac{l_d}{A_d} \tag{7}$$

Denklemlerde l akı yolu uzunluğunu, A kesit alanını, μ_r ise stator veya rotordaki manyetik geçirgenliği temsil etmektedir. Eşdeğer relüktanslar ve akılar hesaplandıktan sonra hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu (8) ile hesaplanmaktadır.



Şekil 3: Tasarlanan frenin bir simetrik akı yolu

$$B = \frac{\phi}{A} \tag{8}$$

3.2. Doğrusal Olmayan Manyetik Modelleme

Bir önceki bölümde tasarım kıstasları neticesinde tasarlanan girdap akım freni için manyetik modellemenin nasıl hesaplandığı anlatılmıştır. Bu manyetik modelde temel bileşenler relüktanslardır. Stator ve fren diskindeki relüktanslar doğrusal olmayan bir karakteristik göstermekte ve doğrusal olmayan modellemede bu relüktanslar kullanılmaktadır. Relüktanslardaki doğrusal olmayan davranış, manyetik malzemedeki doğrusal olmayan B-H eğrisinden meydana gelmektedir. Şekil 4'de fren diski ve stator malzemesi olarak kullanılan düşük karbon çeliğin yaklaşık B-H eğrisi verilmiştir.

Doğrusal olmayan modellemede önemli nokta B-H eğrisinin hem stator hem de fren diski için ayrı ayrı hesaba katılması ve her bir uyartım akımı için hesaplanmasıdır. B-H eğrisinin hesaba katılması için bu çalışmada temel doğrusal olmayan modelleme yöntemleri kullanılmıştır. Kullanılan yöntemler ise Jakobi, Gauss-Siedel ve Newton-Raphson'dur.

3.2.1. Jakobi Yöntemi

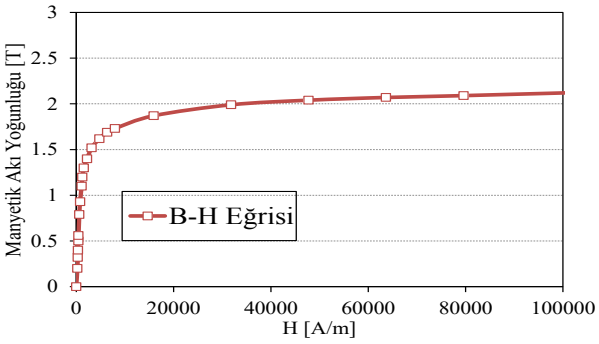
Jakobi yöntemi literatürde en çok kullanılan ve en basit yöntemlerden biridir. Bu yöntemde amaç birden fazla bilinmeyen denklem takımını doğrusal bölgeler içinde çözümlerini bulmaktır. Aşağıdaki denklem takımını ele aldığımızda

$$Ax = B \tag{9}$$

burada A denklem matrisini, x bilinmeyen sütün matrisini ve B ise çözüm sütün matrisini göstermektedir. A matrisinin 3x3'lük bir yapıda olduğunu düşünürsek ilk bilinmeyen için denklem (10) ile gösterilmiştir.

$$x_1^{i+1} = \frac{b_1 - a_{12}x_2^i - a_{13}x_3^i}{a_{11}} \tag{10}$$

Burada i iterasyon sırasını göstermektedir. Jakobi yönteminde ilk başlangıç koşulu verilmek kaydı ile iterasyona başlanır ve bu şekilde her bir iterasyon sonunda B-H grafiğinden elde edilen yeni değer kullanılmış olur. Bu döngü her bir denklem takımı için tek tek yapılır ve istenilen hata değerine ulaşana kadar devam eder.



Şekil 4: Düşük karbon çeliğinin yaklaşık B-H eğrisi

3.2.2. *Gauss-Siedel Yöntemi*

Gauss-Siedel yöntemi literatürde kullanılan temel yöntemlerden bir tanesidir. Bu yöntem Jakobi yönteminin gelişmiş halidir. Temel prensipleri aynı olmak ile birlikte Gauss-Siedel yönteminde her bir iterasyon içerisinde yeni elde edilmiş değerler kullanılır. Bu şekilde bu yöntemde amaç iterasyon sayısının ve iş yükünün azaltılmasıdır. (9)'daki gibi bir matris ele alındığında ilk bilinmeyen için denklem (10)'daki gibi olacaktır. İkinci ve üçüncü denklemler ise farklılık gösterecektir. İkinci bilinmeyen için denklem (11)'de verilmiştir.

$$x_2^{i+1} = \frac{b_2 - a_{21}x_1^{i+1} - a_{23}x_3^{i}}{a_{22}} \tag{11}$$

Burada dikkat edilirse x_1 (10) denkleminden elde edilen sonuç aynı iterasyon çözümünde kullanılmıştır. Bu durum üçüncü bilinmeyen içinde geçerlidir. Bu sayede iterasyon sayısı ve hesaplama iş yükü azaltılmaktadır.

3.2.3. *Newton-Raphson Yöntemi*

Jakobi ve Gauss-Siedel yöntemleri en temel doğrusal olmayan modelleme yöntemleridir. Temel çözüm anlayışları doğrusallaştırma olmak ile birlikte doğrusal olmayan karakteristiğin çok olduğu sistemlerde çözüm üretememektedir. Bu tür koşullarda kullanılan gelişmiş yöntemlerin başında Newton-Raphson yöntemi gelmektedir. Bu yöntemin temelini herhangi bir fonksiyonu sonlu türevler cinsinden ifade edilmesine dayanmaktadır. Bu anlamda

$$f(x) = 0 \tag{12}$$

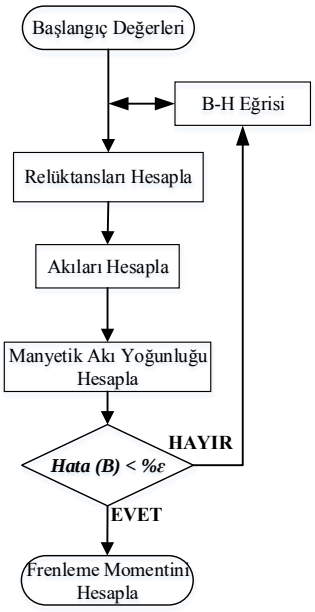
şeklinde tanımlana bilen bir denklemin kökleri uygun bir başlangıç koşulu verilmesi ile birlikte

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)} \tag{13}$$

denklemi ile bulunabilmektedir. Newton-Raphson yöntemi Jakobi ve Gauss-Siedel yöntemlerine göre türev alma içerdiği için hesaplama yükü daha fazladır fakat doğrusallıktan çok uzak bölgelerde sonuç vermektedir.

3.2.4. *Doğrusal Olmayan Modelleme İş Akış Planı*

Doğrusal olmayan modellemede iş akış planı Şekil 5'de gösterilmiştir. İlk başta sabit değerler ve başlangıç koşulları verilerek, B-H eğrisi yardımıyla relüktanslar hesaplanmakta ve akabinde akı denklem takımları hesaplanmaktadır. Akı denklem takımları hesaplandıktan sonra ise manyetik akı yoğunlukları ve hata yüzdesi hesaplanarak istenilen hata oranı elde edilesiye kadar iterasyon devam etmektedir. Jakobi ve Gauss-Siedel yöntemlerinde hem akı denklemlerini hem de manyetik akı yoğunluğunu hesaplarken iterasyon kullanılmaktadır. Newton-Raphson yönteminde türev alma yönteminden çözüme ulaşılmaya çalışıldığı için sadece manyetik akı yoğunluğunu hesaplanırken iterasyon yapılmaktadır. Bu da Newton-Raphson yöntemi için az iterasyon gerektiği anlamı taşımaktadır.



Şekil 5: Doğrusal olmayan modelleme iş akış planı

4. Doğrusal Olmayan Modelleme Yöntemleri ile Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

Bu bölümde doğrusal olmayan modelleme yöntemlerinden elde edilen sonuçlar 3 boyutlu SEA sonuçları ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Tasarlanan frenin farklı uyartım akımları altında analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar sırası ile Çizelge 1-4'de verilmiştir. Tasarlanan girdap akım freninin maksimum çalışma akımı 8 amperdir. Doğrusal olmayan modelleme 4 tane çalışma bölgesinde yapılmıştır ve istenilen hata yüzdesi %0.001 alınmıştır. Bu 4 bölge sırası ile 1-3-5-8 amper uyartımlardır. Çizelgelerde B_t ve B_g sırası ile stator dişinde ve hava aralığındaki akı yoğunluğunu temsil etmektedir.

Çizelge 1'de 1 Amper uyartım akımında elde edilen sonuçlar verilmiştir. Elde edilen bütün sonuçlar 3-B SEA sonuçları ile uyum içerisindedir. Jakobi yöntemi ile toplam 3006 iterasyon, Gauss-Siedel yöntemi ile 1536 iterasyon, Newton-Raphson yöntemi ile de sadece 33 iterasyon ile sonuca ulaşılmıştır. Newton-Raphson yöntemi için işlem zamanı iterasyon sayısı çok az olmasına rağmen 0.101 saniyedir.

Çizelge 1: 1A uyartım akımında elde edilen sonuçlar

	Jakobi	Gauss-Siedel	Newton-Raphson	3-B SEA
B_t [T]	0,24	0,24	0,24	0,26
B_g [T]	0,22	0,22	0,22	0,22
İterasyon	501x6	256x6	33	---
Zaman [sn]	0.085	0.079	0.101	2000

Çizelge 2'de 3 Amper uyartım akımında elde edilen sonuçlar verilmiştir. Bu uyartım akımı artık B-H eğrisi yükselme noktasına gelmektedir. Hava aralığı akı yoğunlukları çok yakın çıkmak ile birlikte stator diş akı yoğunluğu 3-B SEA sonuçları ile birlikte %7'lik bir fark ortaya çıkmaktadır.

İterasyon sayılarından Çizelge 1'de olduğu gibi Newton-Raphson yöntemi diğer yöntemlere göre çok daha az bir iterasyon sayısı almıştır.

Çizelge 2: 3A uyartım akımında elde edilen sonuçlar

	Jakobi	Gauss-Siedel	Newton-Raphson	3-B SEA
B_t [T]	0,78	0,78	0,78	0,84
B_g [T]	0,71	0,71	0,7	0,69
İterasyon	499x6	349x6	52	---
Zaman [sn]	0.079	0.080	0.110	2000

Çizelge 3'de 5A uyartım akımında elde edilen sonuçlar verilmiştir. Stator dişinde sonlu elemanlar analizi ile 1,36T, diğer yöntemler ile ise 1,24T elde edilmiştir. Bu durumda stator dişinde %8,8'lik bir hata mevcuttur. Hava aralığındaki akı yoğunluğunda ise SEA ile doğrusal olmayan modelleme yöntemleri arasında %1,1'lik bir hata oranı vardır. Çizelge 1 ve 2'de olduğu gibi Newton-Raphson yönteminde çok daha az iterasyon yapılarak çözüme ulaşılmıştır.

Çizelge 3: 5A uyartım akımında elde edilen sonuçlar

	Jakobi	Gauss-Siedel	Newton-Raphson	3-B SEA
B_t [T]	1,24	1,24	1,24	1,36
B_g [T]	1,13	1,13	1,12	1,1
İterasyon	892x10	514x10	23	---
Zaman [sn]	0.08	0.080	0.99	2000

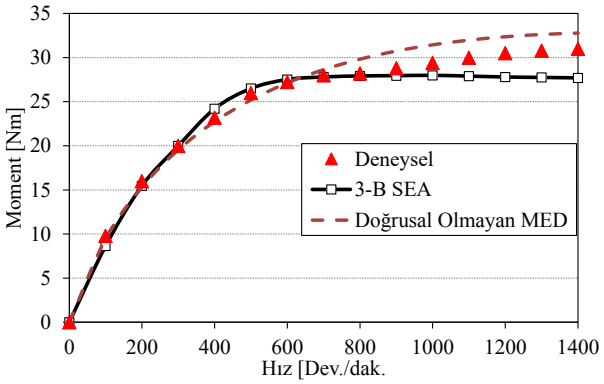
Çizgelge 4'de maksimum uyartım akımında (8A)'de elde edilen sonuçlar verilmiştir. 8A uyartım akımı B-H eğrisinde en büyük doğrusallıktan uzak bölgeyi vermektedir. Bu sebeple Jakobi ve Gauss-Siedel yöntemlerinde çözüme ulaşılamamıştır. Çünkü bu iki yöntemdeki iterasyon tekniğine göre iki iterasyon arasındaki çözümler yakınsamaz ise çözüme ulaşılamaz. 8A uyartım akımında doğrusal olmayan bölge çok dominant olduğu için çözüm üretememiştir. Newton-Raphson yöntemi ile çözüme ulaşılmıştır. Stator dişindeki manyetik akı yoğunluğunda Newton-Raphson yöntemi ile SEA arasında %5,6'lık bir fark olmakta, hava aralığında hesaplanan sonuçlar arasında ise %4,8'lik bir fark olmaktadır. Bu farklar kabul edilebilir seviye olup, manyetik modelin daha da geliştirilmesi ile giderilebilir.

Newton-Raphson yöntemi, SEA ve deneysel olarak elde edilen frenleme momentinin hıza göre değişimi Şekil 5'de verilmiştir. Şekil 5'deki frenleme momenti maksimum uyartım akımı altında 100-1400rpm hızları arasında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'e bakıldığında genel olarak Newton-Raphson yöntemi ile SEA sonuçları uyum içerisindedir. Yüksek hızlarda bu uyum bozulmaktadır. Yüksek hızlarda deri etkisinin dominant olması bu uyumsuzluğun sebebidir. Deneysel sonuçlarda SEA ve Newton-Raphson yöntemi sonuçları ile gayet uyumludur. Yüksek hızlarda B-H eğrisinin tam olarak modellenememesi ve deri etkisinin dominant olması açısından fark olmaktadır. Bütün sonuçlara bakıldığında Newton-Raphson yönteminin gayet başarılı bir şekilde sonuçlar ürettiği gösterilmiştir.

Çizelge 4: 8A uyartım akımında elde edilen sonuçlar

	Jakobi	Gauss-Siedel	Newton-Raphson	3-B SEA
B_t [T]	X	X	1,67	1,77
B_g [T]	X	X	1,51	1,44
İterasyon	X	X	19	
Zaman [sn]	0.086	0.086	0.97	2000

X: Çözüme ulaşamamıştır.



Şekil 5: Frenleme momenti sonuçlarının karşılaştırılması

5. Sonuçlar

Bu çalışmada tasarlanmış bir girdap akım freni için doğrusal olmayan manyetik modelleme yöntemlerinin karşılaştırılması özetlenmiştir. Freninin dinamik manyetik modeli açıklanmış ve frenleme momentine etki eden parametreler verilmiştir. Jakobi, Gauss-Siedel ve Newton-Raphson doğrusal olmayan modelleme yöntemleri ve fren modelinde nasıl uygulanacağı detaylıca sunulmuştur. Doğrusal olmayan modelleme yöntemleri ile elde edilen sonuçlar SEA ve prototipi daha önce üretilen EA-GAF için deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Newton-Raphson yönteminin doğrusallıktan uzak bölgelerde çözüm ürettiği ve hata oranın kabul edilebilir seviye olduğu sonucu çıkarılmıştır.

6. Kaynaklar

[1] Anwar, S. ve Zheng, B., 'An antilock-braking algorithm for an eddy-current-based brake-by wire system', *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 56, 1100-1107, 2007.

[2] Yazdanpanah, R. ve Mirsalim, M., 'Axial-flux wound-excitation eddy-current brakes: analytical study and parametric modeling', *IEEE Trans. Magn.*, 50, 2014.

[3] Gay, S.E. ve Ehsani, M., 'Parametric analysis of eddy-current brake performance by 3-D finite-element analysis', *IEEE Trans. Magn.*, 42, 319-329, 2006.

[4] Karakoc, K., Suleman, A. ve Park, E., 'Optimized braking torque generation capacity of an eddy current brake with the application of time-varying magnetic fields', *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 63, 1530-1538, 2014.

[5] Shin, H., Choi, J., Cho, H., et al., 'Analytical torque calculations and experimental testing of permanent magnet axial eddy current brake', *IEEE Trans. Magn.*, 49, 4152-4155, 2013.