

Hızlandırıcılarda Kullanılan Magnetler ve Tasarımları

Dr. Ender AKDOĞAN

Türk Patent ve Marka Kurumu
ender.akdogan@turkpatent.gov.tr

İçerik

1. Hızlandırıcı sistemlere **genel bakış**,
2. Hızlandırıcılarda **magnet tasarımının önemi**,
3. **Manyetizmanın temellerini anlamak**,
4. Başarılı magnet tasarımı için **temel faktörler**,
5. **Performans gereksinimlerinin tanımlanması**,
6. **Magnet tipini ve konfigürasyonunu belirleme**,
7. Gelişmiş yazılım kullanarak **magnet tasarlama**,
8. Simülasyon yoluyla magnet performansını **optimize etme**,
9. Magnetin **üretimi ve testi**,
10. Hızlandırıcı sistemler için sonuç ve **çıkarımlar**.

1. Hızlandırıcı sistemlere genel bakış

Parçacık hızlandırıcılardan son teknolojiye kadar, manyetik tasarım sanatını öğrenmek oldukça önemlidir.

Bu sunumda, hızlandırıcı sistemler için temel adımlar olan; güçlü manyetik alanların oluşturulması, tasarımların optimize edilmesi ve sorunsuz işleyişin sağlanmasıyla ilgili problemler hakkında ana hatlarıyla bilgiler paylaşılacaktır.

2. Hızlandırıcılarda magnet tasarımının önemi

Magnet tasarımı, hızlandırıcıların işleyişinde önemli bir rol oynar. Doğrudan sistem performansını, verimliliğini, parçacıkların yörüngesini ve enerjisini etkiler.

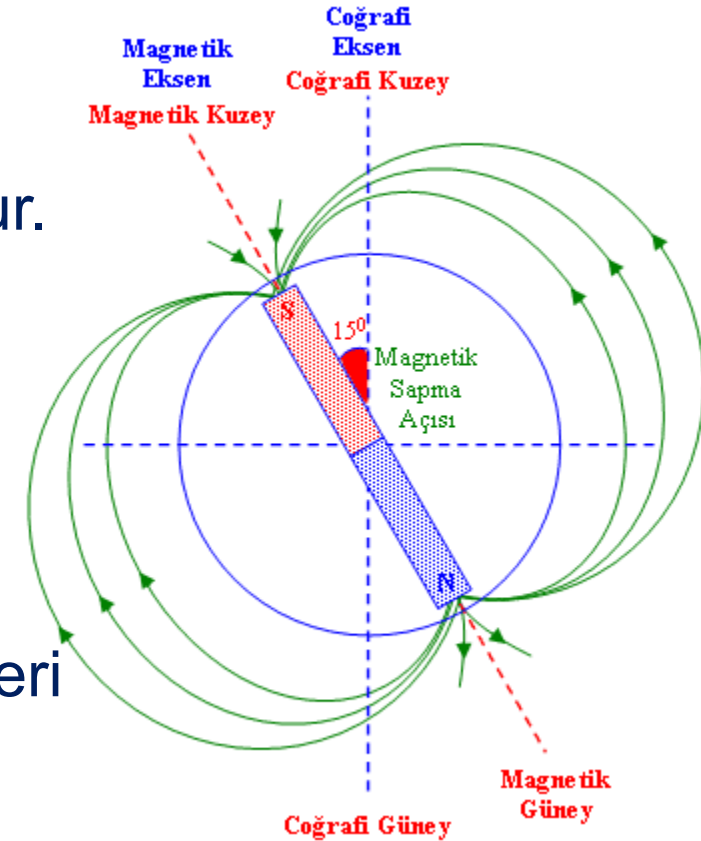
Mühendisler magnet tasarımının önemini anlayarak, hızlandırıcı sistemleri optimize edebilir ve daha yüksek hızlar, daha büyük hassasiyet ve gelişmiş parçacık kontrolü elde ederek bilimsel araştırmaları ve teknolojik ilerlemeleri sağlayabilirler.

Giriş

- Modern teknolojik cihazların önemli bir kısmı manyetik malzemeler ile çalışmaktadır (Elektrik güç jeneratörleri, transformatörler, elektrik motorları, radyo, televizyon, bilgisayar, ses ve görüntü sistemleri, kayıt cihazları vb.)
- Demir, bazı çelikler, Kobalt, Nikel, Gadolinyum vb. malzemeler manyetik özellik göstermektedirler.
- Doğadaki tüm malzemeler manyetik alandan az veya çok etkilenirler.

Manyetik Alan

- Hareket eden elektrik yüklü parçacıklar manyetik kuvvete yol açarlar.
- Manyetik kuvvetler manyetik alanı oluşturur.
- Manyetik alan çizgileri **hem yönü hem de büyüklüğü** göstermektedir.
- Manyetik malzemelerde **manyetik dipoller** bulunur ve manyetik alan kuvveti bu dipolleri alanla birlikte yönlendirmek için bir kuvvet uygular.



Manyetik Alan

B = Manyetik akı yoğunluğu (T)

H = Manyetik alan (A/m)

M = Manyetizasyon (birim hacim başına manyetik dipol moment, A/m)

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M})$$

$$\begin{aligned} \vec{M} &= \frac{\text{manyetik moment}}{\text{hacim}} \\ &= \frac{\text{akım} \times \text{alan/hız}}{\text{uzunluk}^3} \\ &= \frac{\text{akım/hız}}{\text{uzunluk}} \end{aligned}$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = \mu_0 \mathbf{H} (1 + \chi)$$

↑
bağıl
geçirgenlik

↑
alınanlık

Alan ile orantılı değişen
malzemeler için

$$\chi = \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \mathbf{H}_{H \rightarrow 0}}$$

Alan ile orantılı
değişmeyen
malzemeler için

Manyetik Kuvvet Altında Hareket

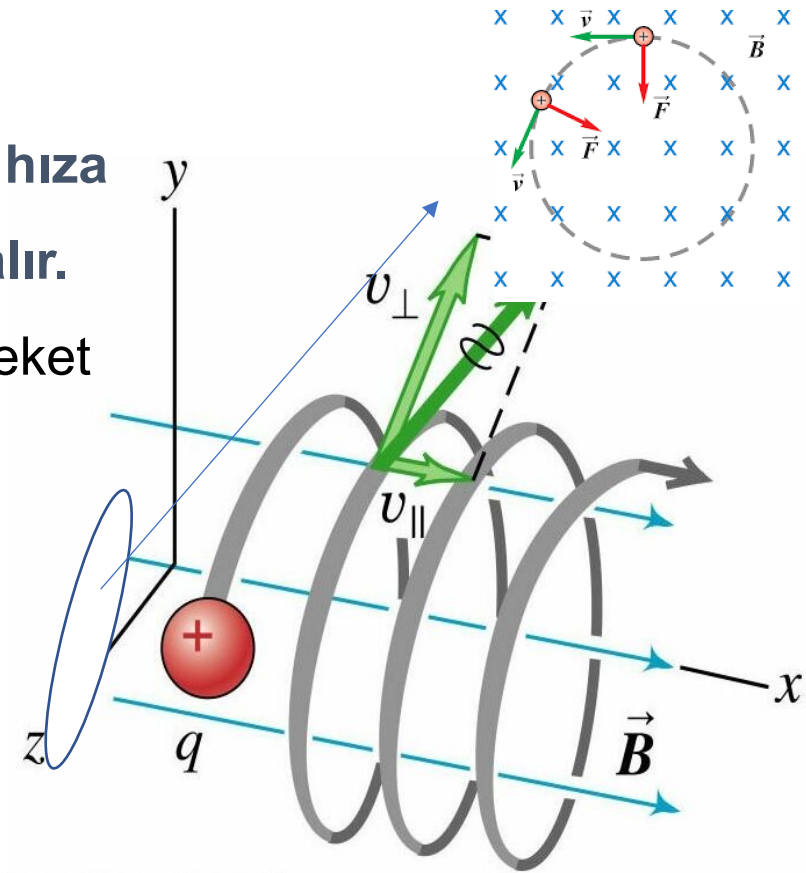
- Bir parçacık **manyetik alan etkisinde** hareket ettiğinde, **hıza dik** olacak şekilde bir **kuvvet** meydana gelir. (B manyetik alanında hareket eden yük, merkezci kuvvete maruz kalmaktadır.)
- **Kuvvet hıza dik olduğunda, yüklü parçacık hıza dik bir ivmelenmeye (hızlanmaya) maruz kalır.** Hızın büyüklüğü değişmez ancak dairesel hareket gereği yönü değişir.
- Manyetik kuvvet parçacık üzerinde iş yapmaz.

$$F_C = \frac{mv^2}{R} \quad F_b = qvB$$

$$F_C = F_B \quad \frac{mv^2}{R} = qvB$$

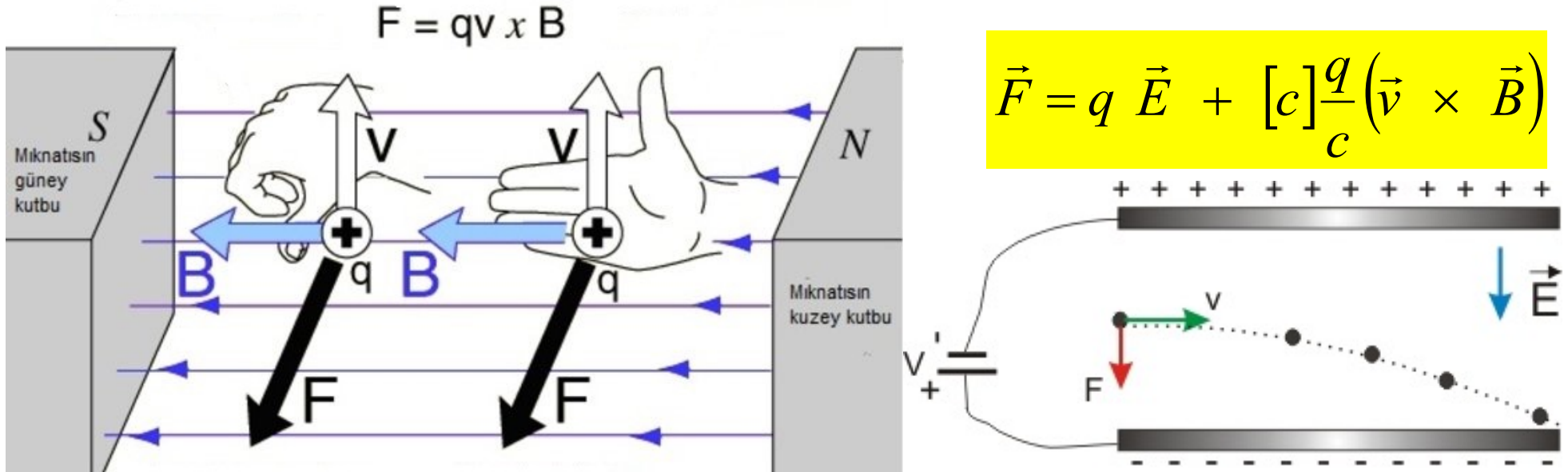
Açısal hız: $\omega = \frac{v}{R} = \frac{qB}{m}$

Yolun yarıçapı: $R = \frac{mv}{qB}$



Parçacık Hızlandırıcı

- Yüklü parçacıkları **elektrik alanlar kullanarak** ve **manyetik alan ile yönlendirerek** çok yüksek hızlara (relativistik hızlar) çıkaran herhangi bir cihaz aslında bir parçacık hızlandırıcıdır.
- Günümüzde birçok kullanım alanı bulunan parçacık hızlandırıcılar günlük yaşamımızda da önemli bir yere sahiptirler.



3. Manyetizmanın temellerini anlamak

Hızlandırıcı sistemler için etkili magnetler tasarlamak için manyetizmanın temellerini tam olarak anlamak önemlidir.

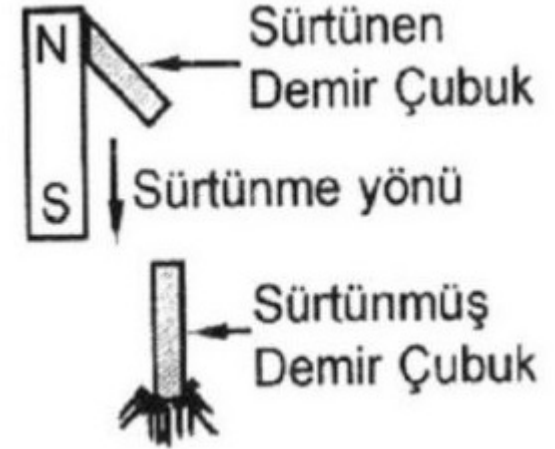
Bunu yapabilmek için mühendisler, manyetik alanlar, mıknatıslanma ve manyetik malzemeler gibi ilkeleri kavrayarak, magnet tasarımında bilinçli kararlar alabilir, optimum performans sağlayabilir, parçacık kontrolü ve enerji verimliliğinde istenen sonuçları elde edebilir.

Manyetik Malzemeler ve Mıknatıslanma

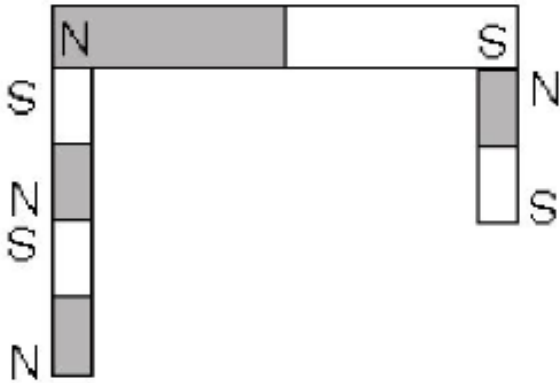
- **Daimi Mıknatıs:** Mıknatıslık özelliğini uzun süre taşıyan maddelere denir.
- Alüminyum, nikel, kobalt karışımından elde edilen mıknatıslara **alniko** adı verilir ve kalıcıdır (Çelik bu özelliği zor kazanır ve zor kaybeder).
- **Geçici Mıknatıs:** Kısa süreli mıknatıslık özelliği gösteren maddelere denir (Ör: Demir). Mıknatısın çevresinde oluşan manyetik alan boşluk dahil her ortamdan geçer.

Manyetik Malzemeler ve Mıknatıslanma

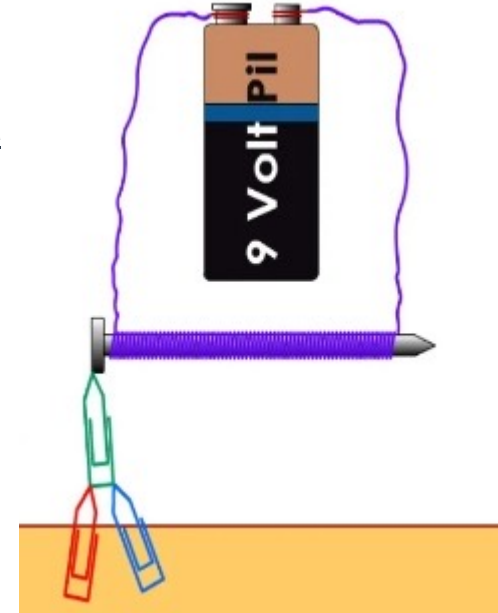
- Bir demir çubuğa sağdaki şekilde gösterildiği gibi mıknatısın her defasında aynı kutbu aynı yönlü **sürtülürse** mıknatısın ilk sürülen uç kısmı mıknatısla aynı kutuplu olacak şekilde demir çubuk geçici olarak mıknatıslanır.



- Mıknatısa dokundurulan demir parçalarını demir tutar. Çünkü demir parçası mıknatısın **dokunduğu** kutupla zıt kutuplanır ve onu çeker. Demir parçaları uç uca eklenirse, her bir uç bir öncekine göre zıt kutuplanır.



- Bir demir çivi üzerine izole tel sarılıp, telden akım geçirilirse, çivi **mıknatıs özelliği kazanır** (Elektro mıknatıs).



4. Başarılı magnet tasarımı için temel faktörler

Hızlandırıcı sistemler için magnetler tasarlarken, başarılı sonuçlar için dikkate alınması gereken dört temel faktör vardır.

Bu faktörler;

- **Uygun magnet malzemesi seçimi,**
- **Hassas magnet konfigürasyonu ve şekli,**
- **Doğru manyetik alan hesaplamaları**
- **Titiz magnet montajı ve testidir.**

Mühendisler, bu faktörleri ele alarak, hızlandırıcı sistemlerin özel gereksinimlerini karşılayan magnetlerin tasarımını ve işlevselliğini sağlayabilirler.

Tasarımda başarı için;

- 1. Uygun magnet malzemesi seçimi:** Doğru malzeme seçimi, magnetin manyetik özelliklerini ve performansını belirlediği için çok önemlidir. Farklı malzemeler değişen manyetik güçlere, sıcaklık kararlılığına ve manyetikliği gidermeye karşı dirence sahiptir.
- 2. Hassas magnet konfigürasyonu ve şekli:** Magnetin şekli ve konfigürasyonu, manyetik alan dağılımını ve gücünü belirlemede önemli bir rol oynar. Mühendislerin, istenen manyetik alan özelliklerini elde etmek için magnetin geometrisini dikkatli bir şekilde tasarlamaları gerekir.
- 3. Doğru manyetik alan hesaplamaları:** Hızlandırıcı sistem içindeki manyetik alan şiddetinin ve dağılımının doğru bir şekilde hesaplanması esastır. Bu, magnetin şekli, akımı ve çevresindeki malzemeler gibi faktörlerin dikkate alınmasını içerir. Kesin hesaplamalar, magnetin performansının sistem gereksinimleriyle uyumlu olmasını sağlamaya yardımcı olur.
- 4. Titiz magnet montajı ve testi:** Magnetin amaçlandığı gibi çalışmasını sağlamak için uygun montaj teknikleri ve kapsamlı testler çok önemlidir. Bu, magnetin manyetik alan kuvvetinin, kararlılığının ve hizalamasının doğrulanmasını içerir. Test, olası sorunların belirlenmesine yardımcı olur ve ayarlamalar veya iyileştirmeler yapılmasına izin verir.

Elektromagnet kullanılacaksa—Parametreler?

Magnetin üretim özellikleri

Magnetin fonksiyonel özellikleri

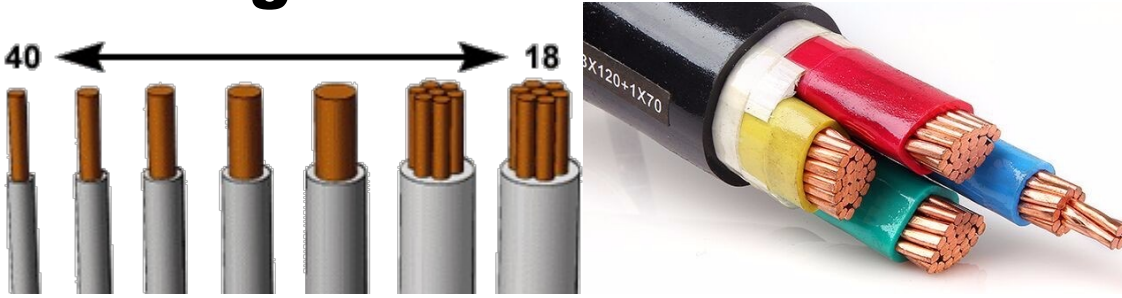
- Demetin enerjisi ve hangi parçacıklar için tasarlandığı?
- Magnetin tipi: C-tipi dipol , H-tipi dipol, kuadrupol vb.?
- Demet boyutları?
- Magnetin merkezinde gerekli manyetik alan değeri?
- Manyetik alan kalitesi?
- Demeti bükme için gereken açı?

- Magnetin fiziksel boyutları
- Demet hattının boyutları
- Magnetin yeri, toplam ağırlığı ve uzunluğu
- Magnetin ürettiği manyetik alanın pik değeri veya manyetik alan değişimi
- Magnetin nasıl soğutulacağı?
- Soğutma sistemi parametreleri?
- Güç kaynağının parametreleri: pik akımı ve gerilim, AC? atmalı?
- Işıma (radyasyon) düzeyi?
- Kaç adet magnet kullanılacağı?

Magnet Parametreleri

- Magnet bobinlerinin tasarımında yapılan seçimlerden biri, **akım yoğunluğunu belirleyen bobin kesitidir.**
- **Magnetin gerekli fiziki parametreleri göz önünde bulundurulduğunda, akım yoğunluğunun seçimi magnetin gücünü belirlemektedir.**
- Güç dağıtımı (kablolar), işletme maliyetlerini ve soğutma sistemlerinin kurulum/işletme maliyetlerini etkileyeceği için güç değerini belirlemek önemlidir!

Bobin geometrisi



Genellikle dizayn su soğutmalı dikdörtgen **Cu (veya Al) iletken** içermektedir. **Yalıtım ise cam kumaş ve epoxy** ile sağlanmaktadır.

Sarım sayısına (NI) karar verilirken, **Cu'nun toplam alanı ve sarım sayısı** dikkatli ele alınmalıdır (iki serbestlik dereceli oldukları için).

Bobinde oluşan ısı akım yoğunluğunun RMS değerinin bir fonksiyonudur:

Optimum j_{rms} değerini ekonomik kriter belirler.
$$j_{rms} = NI_{rms}/A_{bakır}$$

Düşük j_{rms} değerinin avantajı: Az güç kaybı, daha az ısı kaybı (faturaya yansıyan miktarda azalma)

Yüksek j_{rms} değerinin avantajı: Daha küçük bobinler, daha küçük magnetler

Sarım sayısının etkileri

Tur sayısı büyük (düşük akım)	Tur sayısı küçük (yüksek akım)
Küçük terminaller	Büyük, hantal terminaller
İnce bağlantılar, düşük maliyet ve esneklik	Kalın ve pahalı bağlantılar
Bobin içinde daha fazla yalıtım; daha geniş hacim ve bunun sonucunda artan montaj maliyeti	Bobinde yüksek bakır oranı; ulaşılabilir alanlarda daha etkin kullanım
Yüksek voltaj güç kaynağı güvenlik problemleri	Yüksek akım güç kaynağı ve daha fazla kayıp

5. Performans gereksinimlerinin tanımlanması

Hızlandırıcı sistemler için magnet tasarımı sanatında uzmanlaşmaya başlamak için ilk adım, performans gereksinimlerini tanımlamaktır.

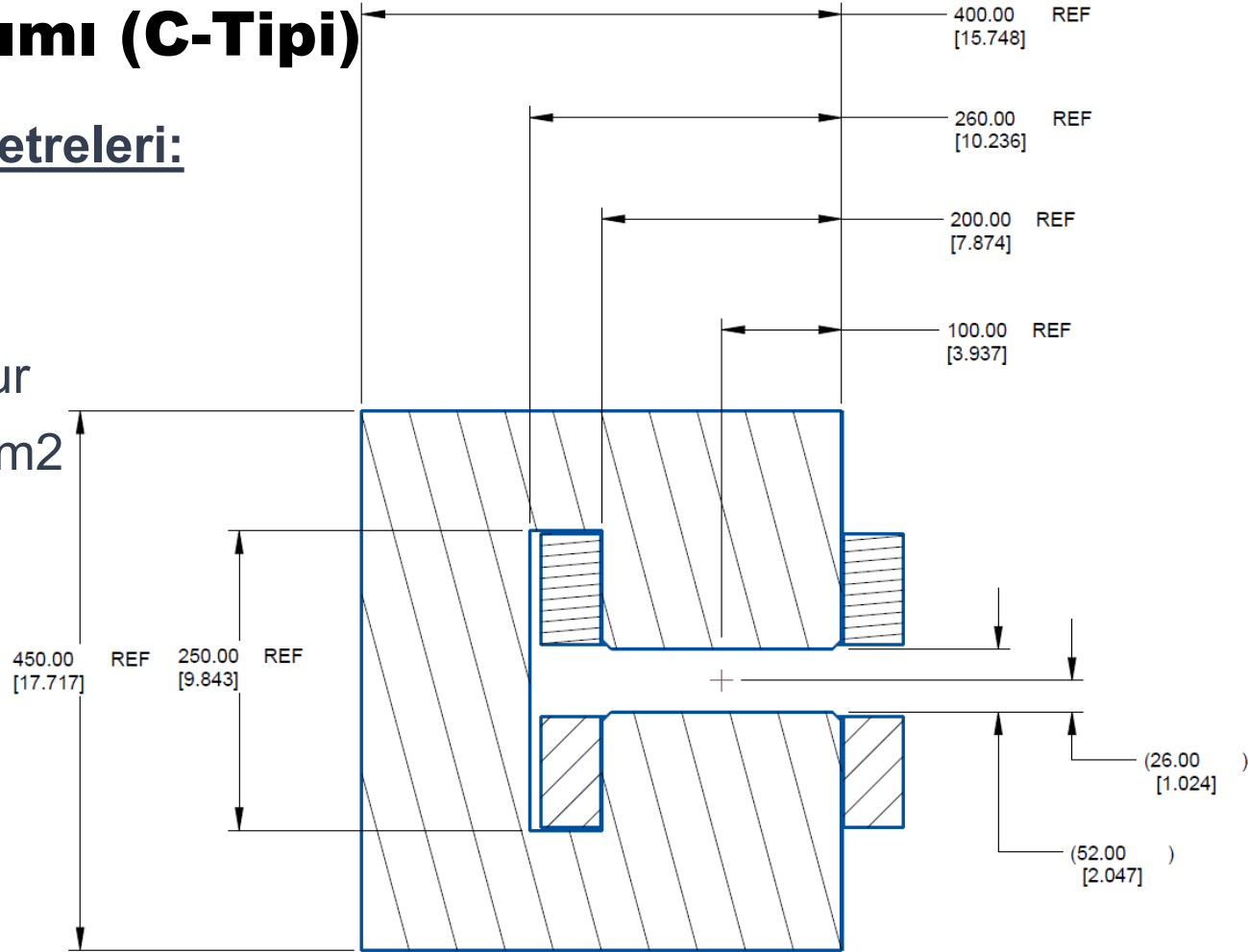
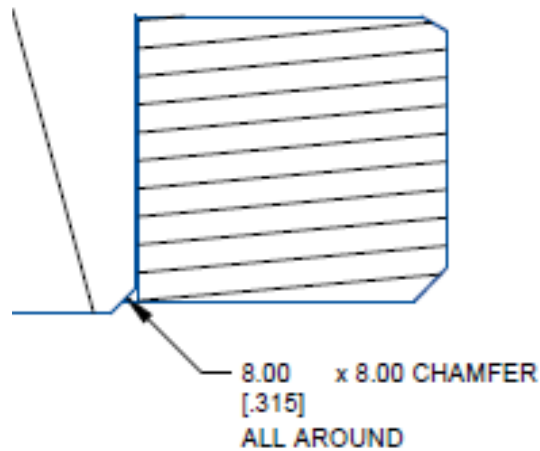
Bunu, istenen manyetik alan kuvvetinin, kararlılığının ve homojenliğinin yanı sıra herhangi bir boyut veya ağırlık sınırlamasının anlaşılmasıyla yapılabilir.

Mühendisler, bu gereksinimleri açıkça tanımlayarak, hızlandırıcı sistemin ihtiyaçlarını karşılayan başarılı bir magnet tasarımının temelini atabilir.

Dipol magnet tasarımı (C-Tipi)

Dipol magnetin ana parametreleri:

- Bmax = 0.67 T
- Bobin sarımı = 50 tur
- I_{max} = 29000 A.tur
- Açıklık = 52 × 92 mm²
- Magnet uz. = 1.21 m
- Manyetik uz. = 1.27 m



Magnet tasarımı Creo Parametric 3D yazılımı üzerinden yapılmıştır.

Enerji Kayıpları

- Faraday yasasına göre zamanla değişken bir alan içinde bulunan iletkenlerde bir gerilim indüklenir. Aynı şekilde ferromanyetik malzemelerin moleküllerinde de bir gerilim indüklenir.
- İndüklenen gerilimler sonucunda oluşan akım moleküller arasında çevrimini tamamlamaya çalışır ve malzeme, bir **çok kısa devre oluşmuş sargı gibi davranır**.
- **Eddy (Foucult) kayıpları** olarak da adlandırılan girdap akım kayıpları, alternatif akım ya da zamanla değişen alanların söz konusu olduğu durumlarda malzeme ya da çekirdekte ortaya çıkan **ısı (Joule) kayıplarıdır**.
- Girdap akımları, manyetik alanın **frekansı** yanında **malzeme cinsi, yapısı** ve **boyutlarına** bağlıdır.

6. Magnet tipini ve konfigürasyonunu belirleme

Performans gereksinimleri tanımlandıktan sonra, hızlandırıcı sistemler için magnet tasarımı uzmanlaşmanın bir sonraki adımı, uygun magnet tipini ve konfigürasyonunu belirlemektir.

Bu, elektromagnetler ve kalıcı magnetler arasında seçim yapmanın yanı sıra manyetik malzeme, şekil ve sistem içindeki yerleşim gibi faktörleri de içerir.

Magnet tipini ve konfigürasyonunu dikkatli bir şekilde seçerek, mühendisler hızlandırıcı sistemin performansını ve verimliliğini optimize edebilir.

Hızlandırıcılarda Kullanılan Magnetler

- ✓ Demete eğim verme veya yönlendirme -> Dipol magnet
- ✓ Demeti odaklama (yüksek enerjili) -> Kuadrupol magnet
- ✓ Demet düzeltme -> Sekstupol ve daha çok kutuplu magnetler
- ✓ Demet odaklama (düşük enerjili) -> Solenoid magnet
- ✓ Yüklü parçacıkların sinkrotron ışınımı, FEL vb. oluşturabilmesi -> Wiggler (Zigzaglayıcı) ve Undulator (Salındırıcı) magnetler

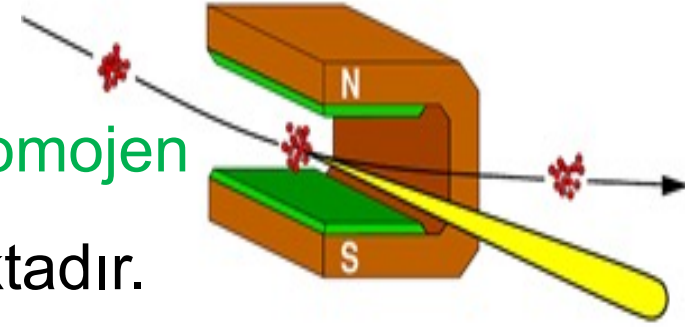
Tasarım yapılırken kilit nokta, manyetik alanın hedeflendiği bölgede her noktada aynı olması

ve

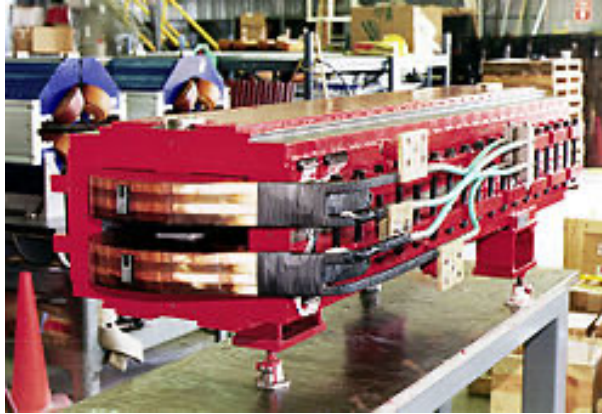
Doğru alanın doğru bölgede oluşturulmasıdır.

Dipol Magnetler

- Dipol magnet, belirli bir mesafe boyunca **homojen bir manyetik alan** yaratmak için kullanılmaktadır.
- Aynı düzlemde birkaç dipol kesitinin eklenmesiyle, radyal eğim artırılabilir.



ARGONNE

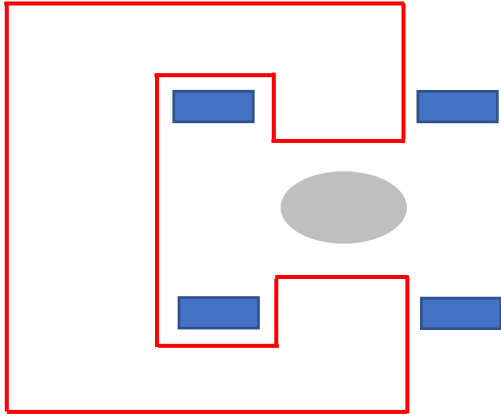


ANKA



Dipol magnet geometrisi

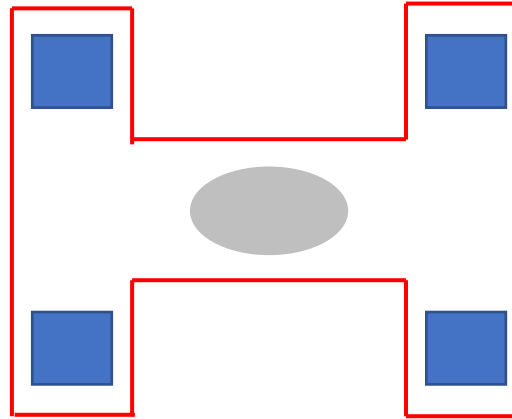
Dipol magnetler C, H veya O (pencere çerçevesi) şeklinde olabilir.



C Tipi

Avantaj: Kolay erişim;
Klasik dizayn

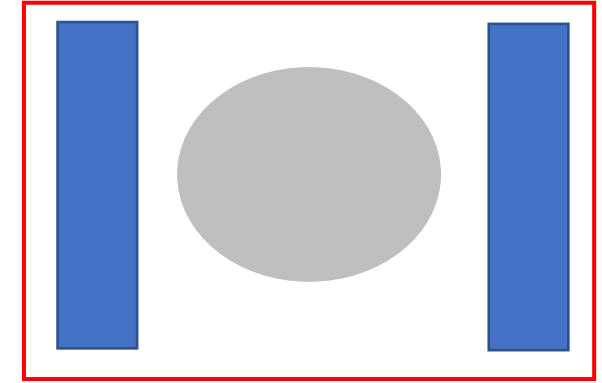
Dezavantaj: Asimetrik yapı, Bedstead bobinler, ağır boyunduruk.



H Tipi

Avantaj: Simetrik, Basit yassı bobin

Dezavantaj: O Tipine göre kötü alan kalitesi, erişim zor, pole shim gerekmektedir



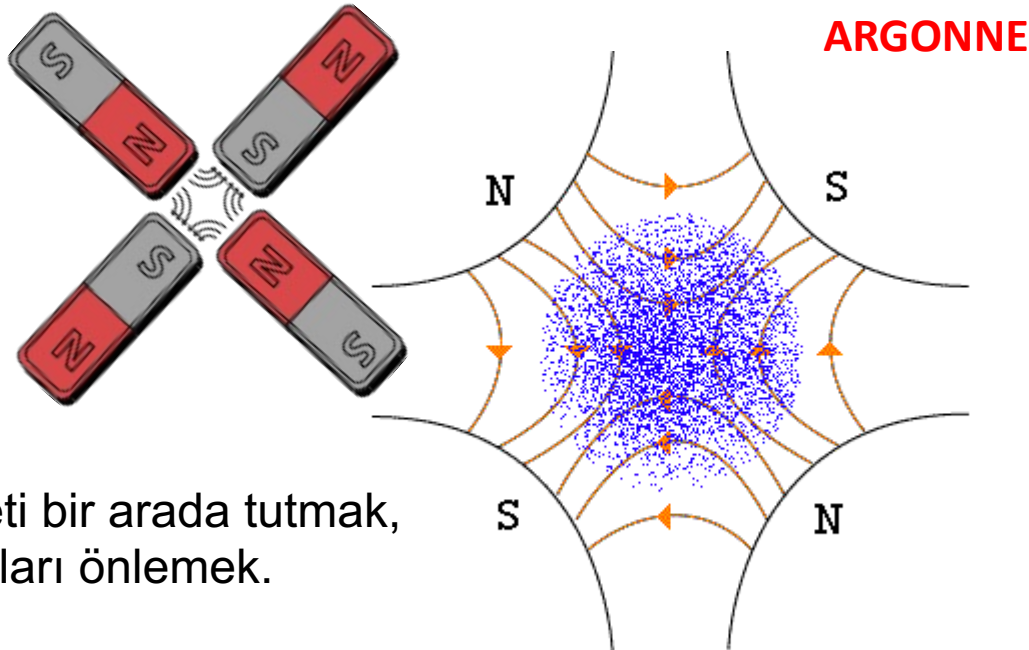
O Tipi

Avantaj: Simetrik, Basit yassı bobin

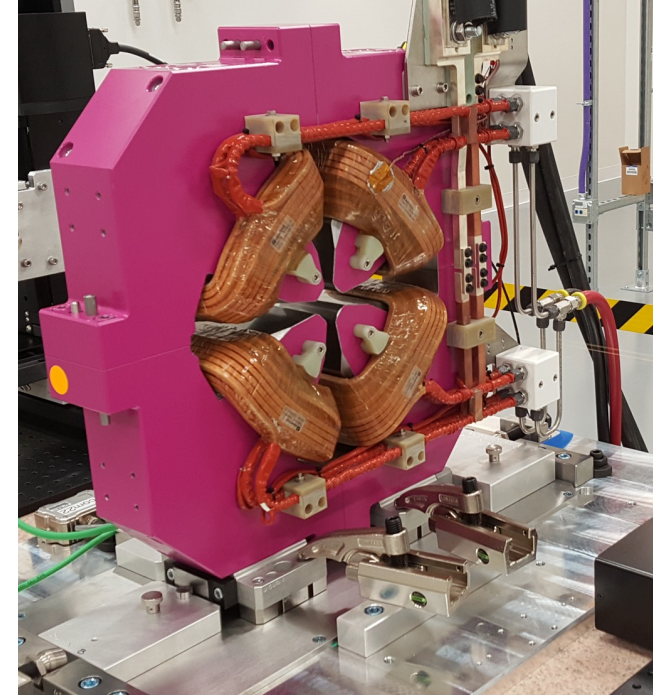
Dezavantaj: Bedstead bobinler, yüksek akı kaybına sebep olan silindirik bobinler.

Kuadrupol Magnetler

- Kuadrupol magnet, doğrusal bir alan değişimi yaratmak için kullanılır.
- Alan "**manyetik merkezde**" **sıfırdır** ve böylece eksende demet bükülmez.
- Hızlandırılan parçacık demetindeki parçacıklar aynı yüklü olduğu için birbirine itme kuvveti uygular. Bu itme kuvveti sebebiyle demet dikine eksende yayılmaya başlar.



- ✓ Demeti bir arada tutmak,
- ✓ Kayıpları önlemek.

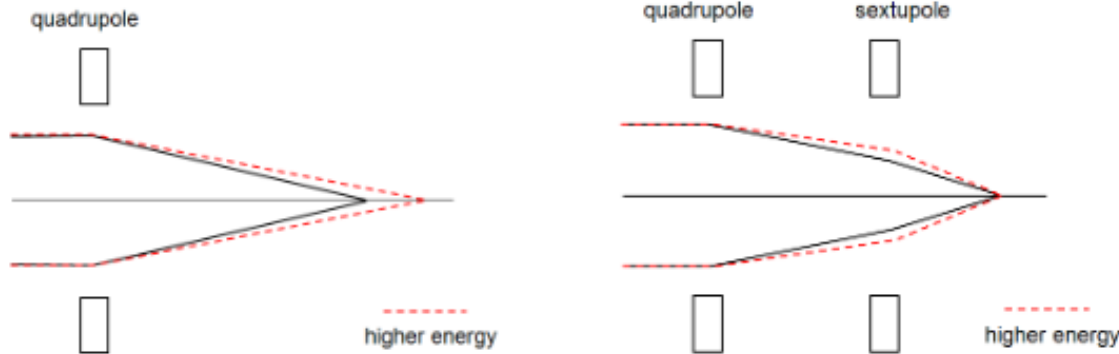


Sekstupol Magnetler

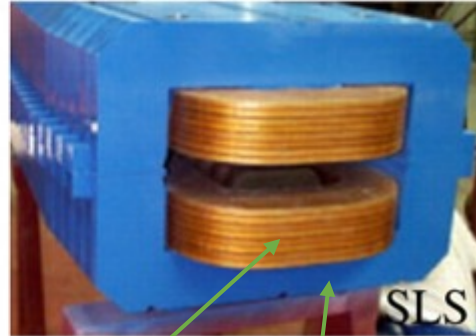
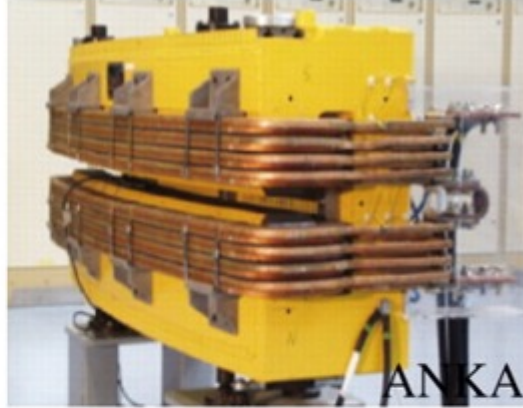
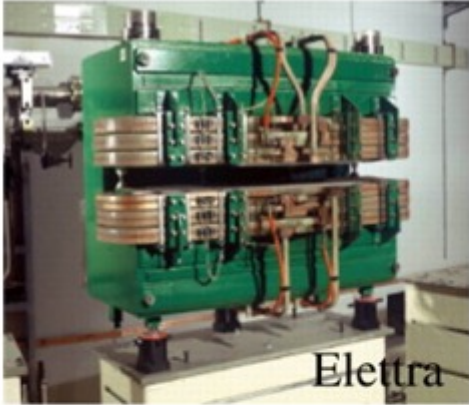
- Sextupole magnetlerde alan, yer değiştirmenin karesi ile değişir.
- Bir eksen etrafında düzenlenmiş alternatif kuzey ve güney kutuplarının düzeninde belirlenen altı manyetik kutup içerir.
- Kromatik anormalliklerin kontrolü için kullanılırlar.



ARGONNE



Elektromagnet için parametreler? ✓ Geleneksel elektromagnetler birçok hızlandırıcı merkezinde kullanılmaktadır.



Bobin

Demir boyunduruk

- ✓ Çok yüksek radyasyon alanlarında çalışabildikleri ve hızlı değişimli atmalı alanlara dayanıklı oldukları için süperiletken magnetlere göre tercih edilmektedirler.
- ✓ Bazı hızlandırıcılarda seri olarak birbirlerine bağlı **yüzlerce hatta binlerce dipol ve kuadrupol magnet** bulunmaktadır.
- ✓ Kullanılan magnet **tipini** ve **sayısını** işletme **maliyeti** belirler.

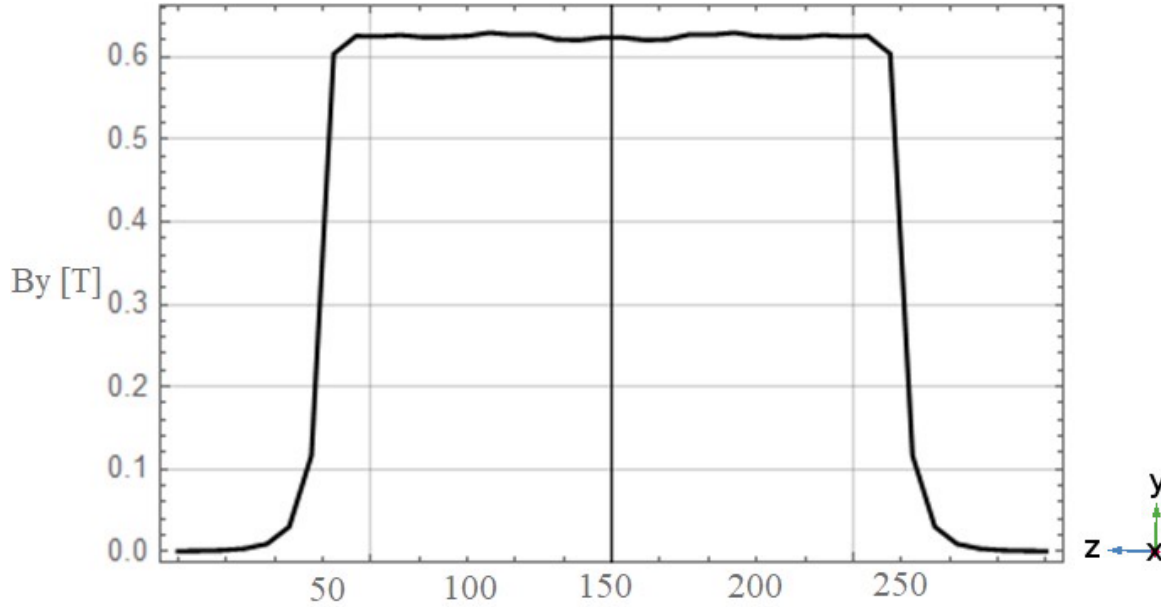
7. Gelişmiş yazılım kullanarak magnet tasarlama

Magnetin gelişmiş yazılım kullanılarak tasarlanması, mühendislerin magnet boyutlarının ve özelliklerinin ayrıntılı bir planını oluşturmasına olanak tanır.

Gelişmiş yazılım programları, manyetik alanların modellenmesi ve simüle edilmesi, magnetin geometrisinin optimize edilmesi ve performansının değerlendirilmesi için araçlar sağlar.

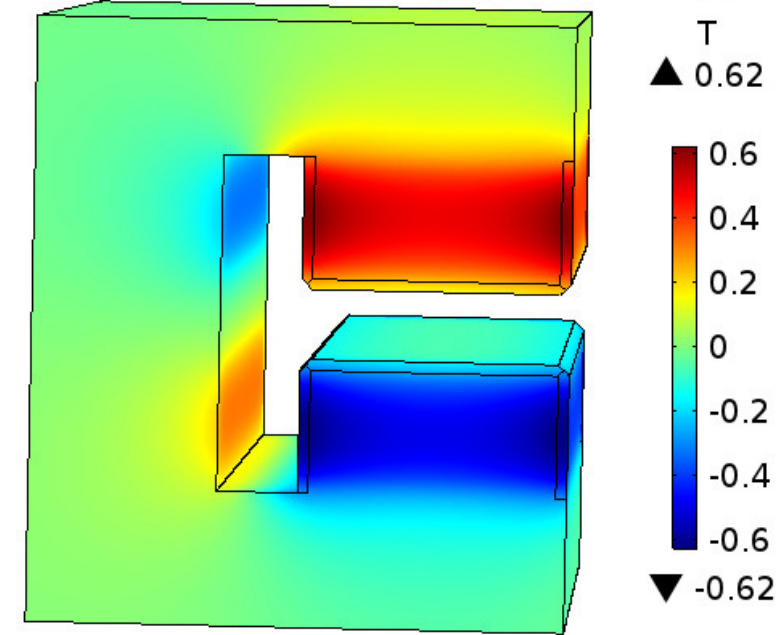
Bu adım, mühendislerin tasarımda ince ayar yapmasına ve magnetin hızlandırıcı sistem için istenen performans gereksinimlerini karşılamasını sağlamasına olanak tanır.

Dipol magnet tasarımı (C-Tipi)



Enine ekseninde manyetik alan dağılımı
(Çelik tipi: C10100)

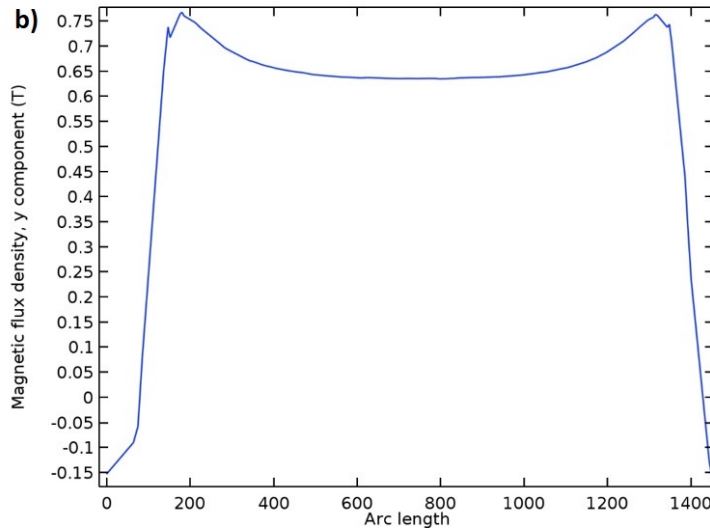
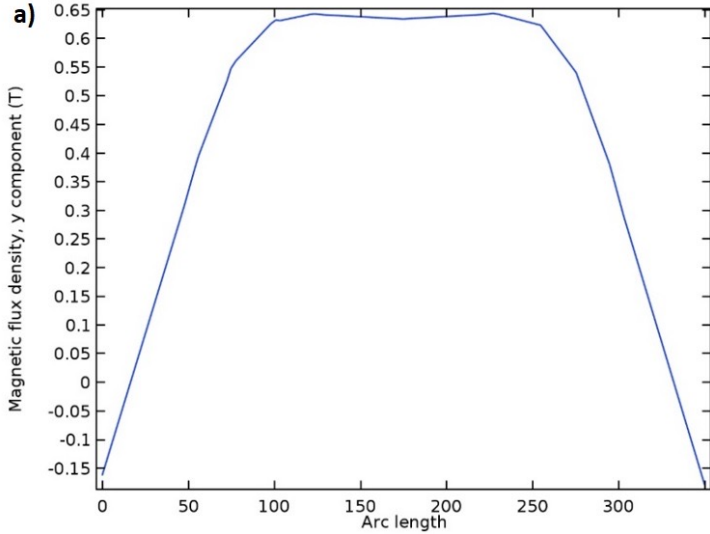
Surface: Magnetic flux density, y component (T)



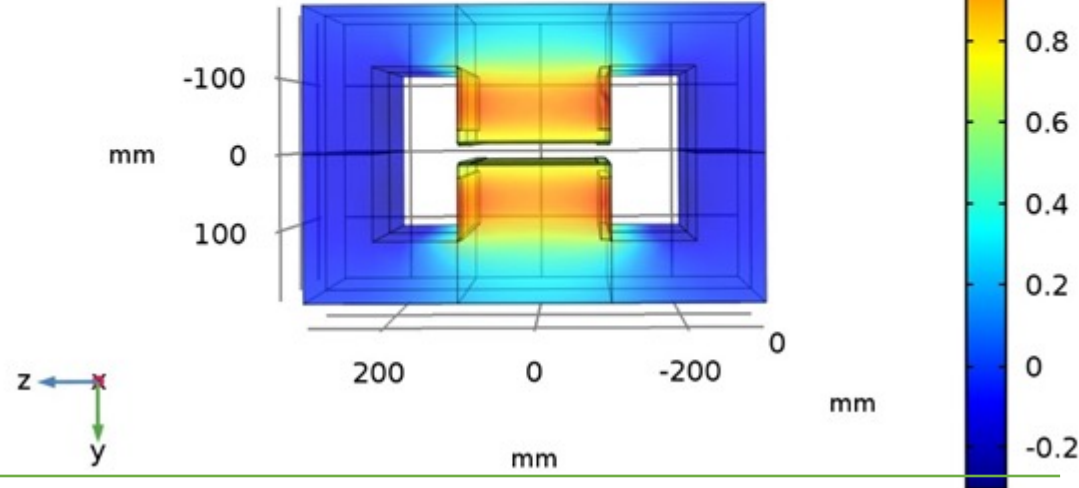
Magnet boyunduruğu üzerindeki
manyetik alan dağılımı
(Comsol Multiphysics 3D yazılımı
üzerinden yapılmıştır.)

* E. AKDOĞAN, S.J. IZZO, Ö. YAVAŞ. "Magnet Engineering Studies on Booster Ring of TAC-TURKAY Synchrotron Radiation Facility", Moscow University Physics Bulletin, No. 5, pp. 402–411, 2021 (10.3103/S0027134921050027).

Dipol Magnet Tasarımı (H-Tipi)



Manyetik alan dağılımı

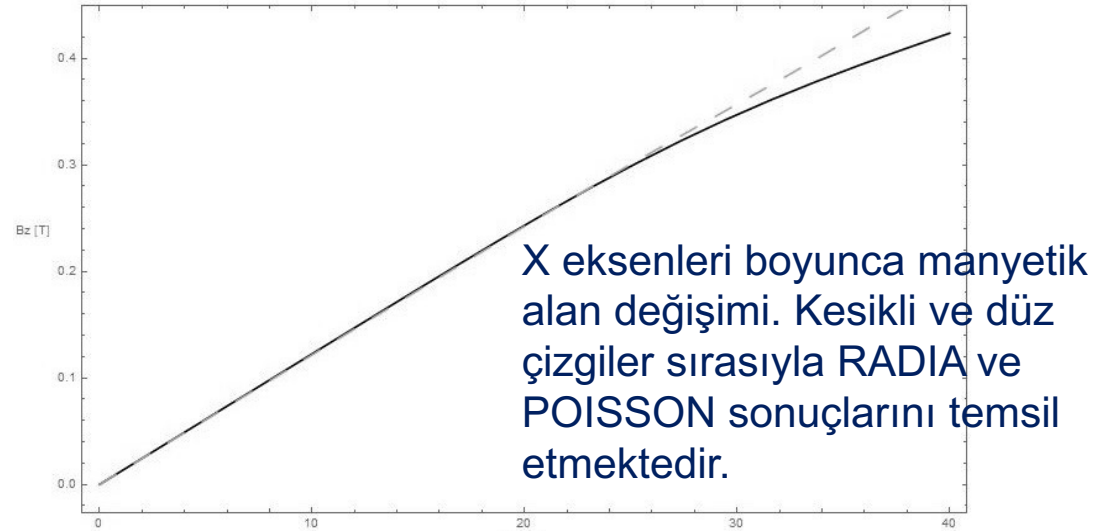
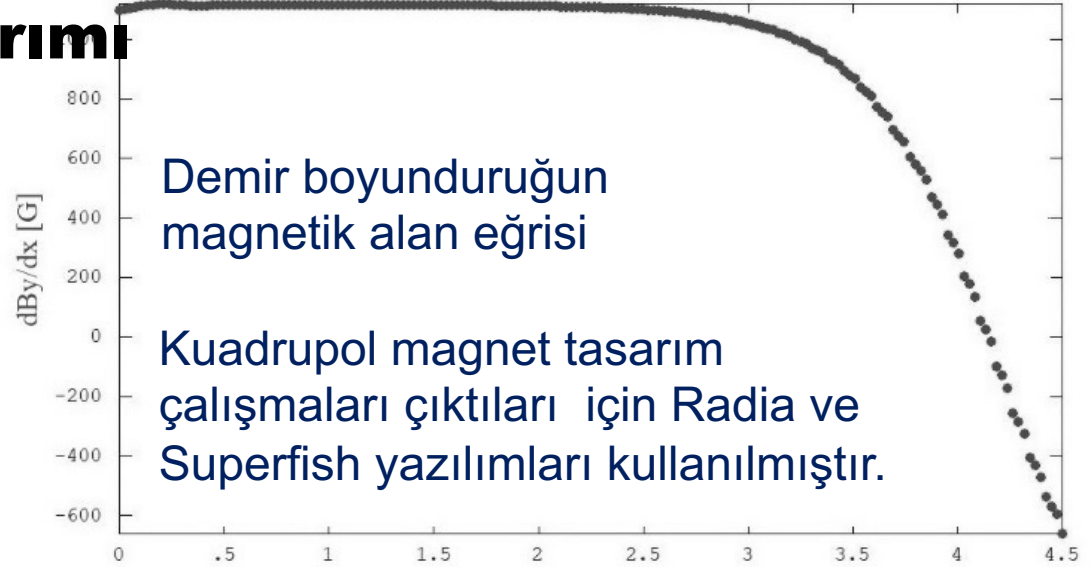
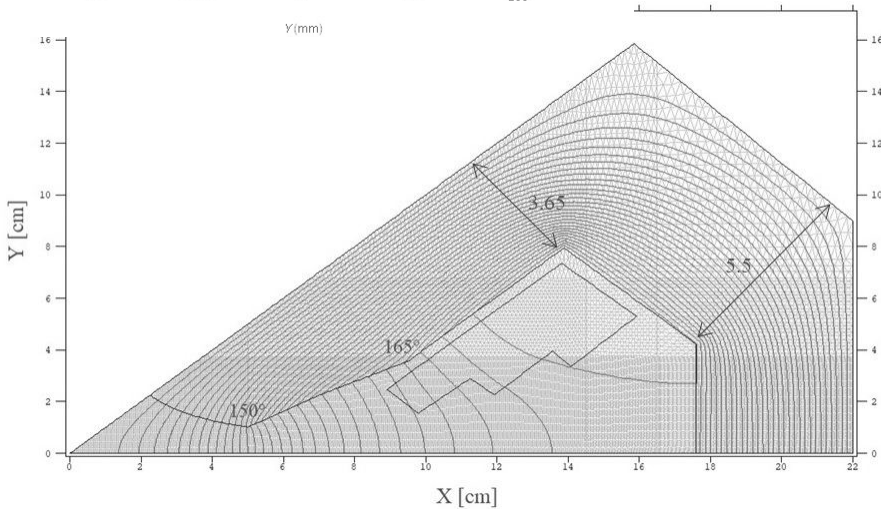
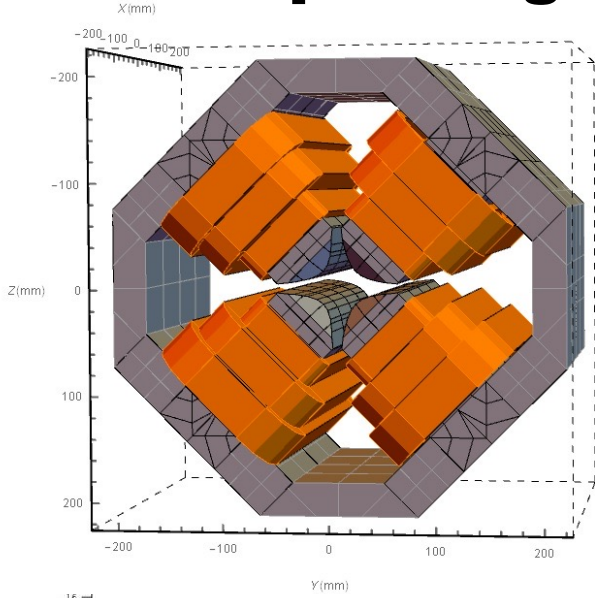


Parameters

H-Tipi Dipol Magnet

Manyetik Uzunluk (mm)	1266,06
Magnet Uzunluğu (mm)	1210
Manyetik Alan (T)	0,71
Bükme yarıçapı (deg.)	5,625
Kutup açıklığı (mm)	52
İyi alan bölgesi (mm)	±15
Boyutlar (w/l/h) (mm)	620/1210/450
Akım (A.tur)	13500

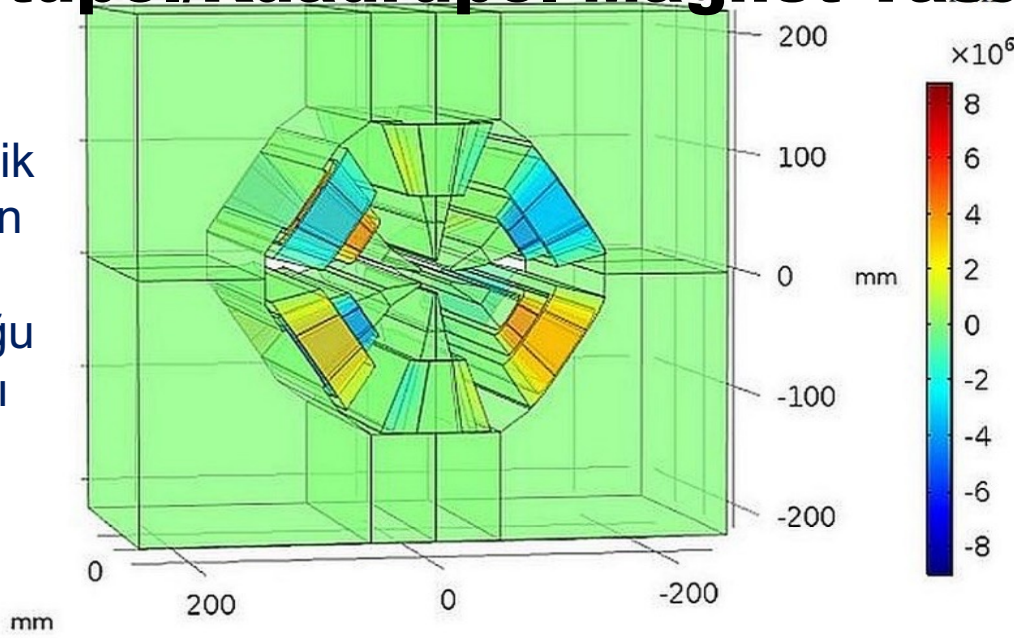
Kuadrupol Magnet Tasarımı



* E. AKDOĞAN and Ö. YAVAŞ. "Design of quadrupole magnets for booster ring of TURKAY", Proceedings of the 34th International TPS congress, pp. 333, 2018.

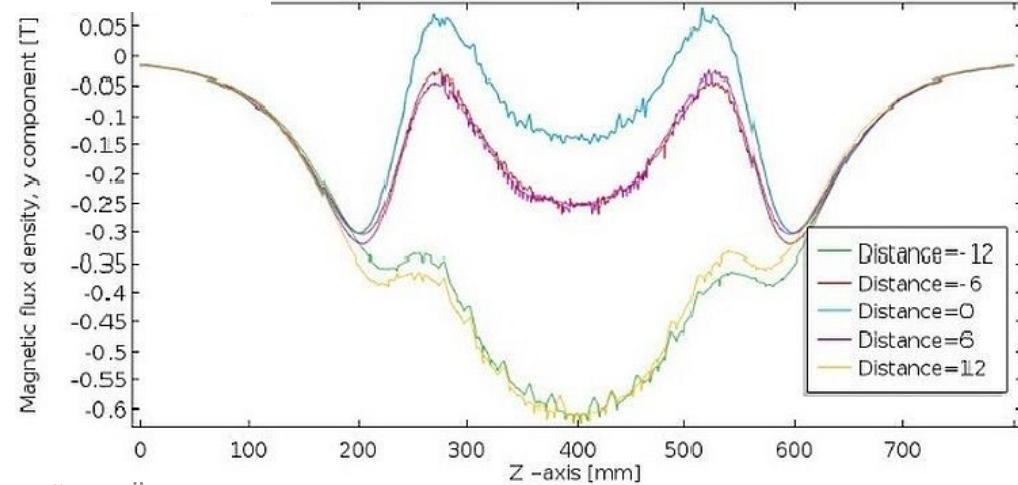
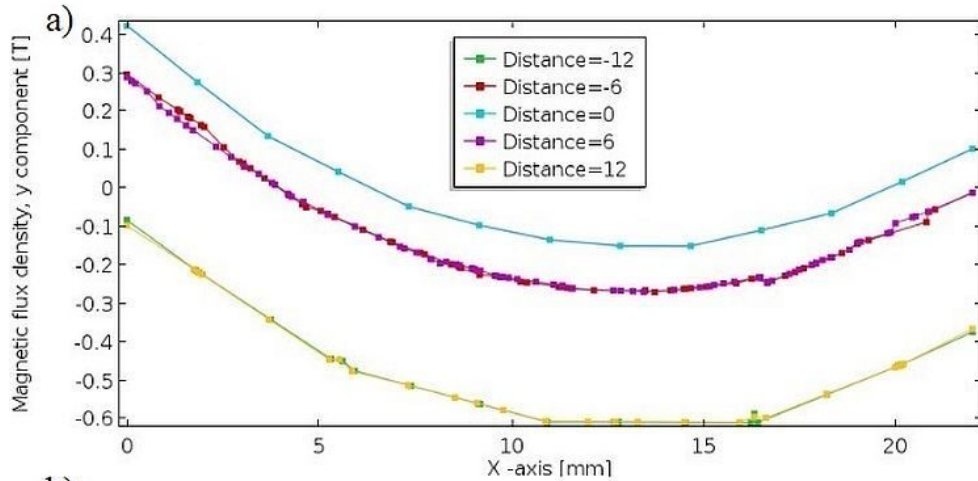
Sekstupol/Kuadrupol Magnet Tasarımı

Bütünleşik
magnetin
akım
yoğunluğu
dağılımı



* E. AKDOĞAN, S.J. IZZO, Ö. YAVAŞ.
“Magnet Engineering Studies on Booster
Ring of TAC-TURKAY Synchrotron
Radiation Facility”, Moscow University
Physics Bulletin, No. 5, pp. 402–411, 2021
(10.3103/S0027134921050027).

Magnet açıklığındaki magnetik
alan dağılımı
a) X eksenini,
b) Z eksenini boyunca.



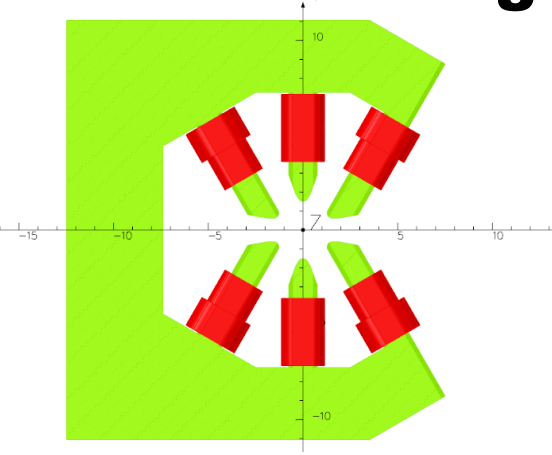
8. Simülasyon yoluyla magnet performansını optimize etme

Magnet performansını optimize etmek için mühendisler simülasyon tekniklerini kullanır.

Bu, manyetik alanların modellenmesini ve simüle edilmesini, magnetin geometrisinin değerlendirilmesini ve tasarımının ince ayarını içerir.

Simülasyon yoluyla mühendisler, magnetin hızlandırıcı sistem için istenen performans gereksinimlerini karşılamasını sağlayabilir, bu da gelişmiş verimlilik ve işlevsellik sağlar.

Düzeltilici Magnet



Parametre	BİRİM	Değer
Kuadrupol alanı	Gauss	553
Sekstupol alanı	Gauss.cm	967
Akım	A	7
Uzunluk	cm	4.5
Bobin sarımı (Her bir kutup için)	tur	12/25
Direnç	Ω	0.18/0.21
İndüktans	mH	1.8/2
Akım yoğunluğu	A.mm ⁻²	3.54
Kutuplar arası açıklık	mm	36
Ağırlık	Kg	7.4

Yatay Düzeltici Mod

Toplam eğik dipol (Integrated skew dipole) = 561 Gauss-cm. Pik Bx = 127 Gauss.

Toplam eğik on kutuplu (Integrated skew decapole) = - 31.1 Gauss-cm

Pik eğik on kutuplu alan değeri= - 19.4 Gauss

Kuadrupol Düzeltici Mod

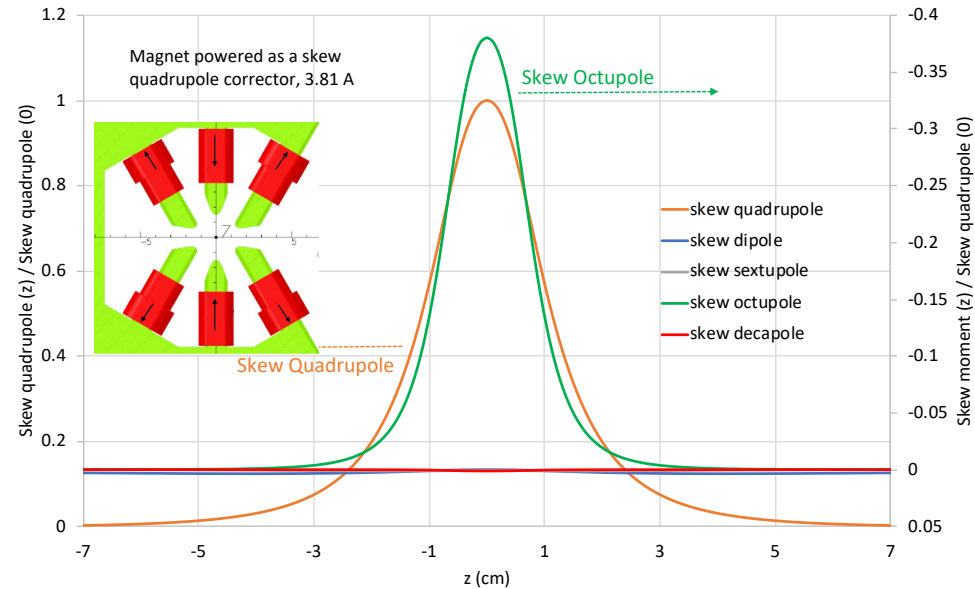
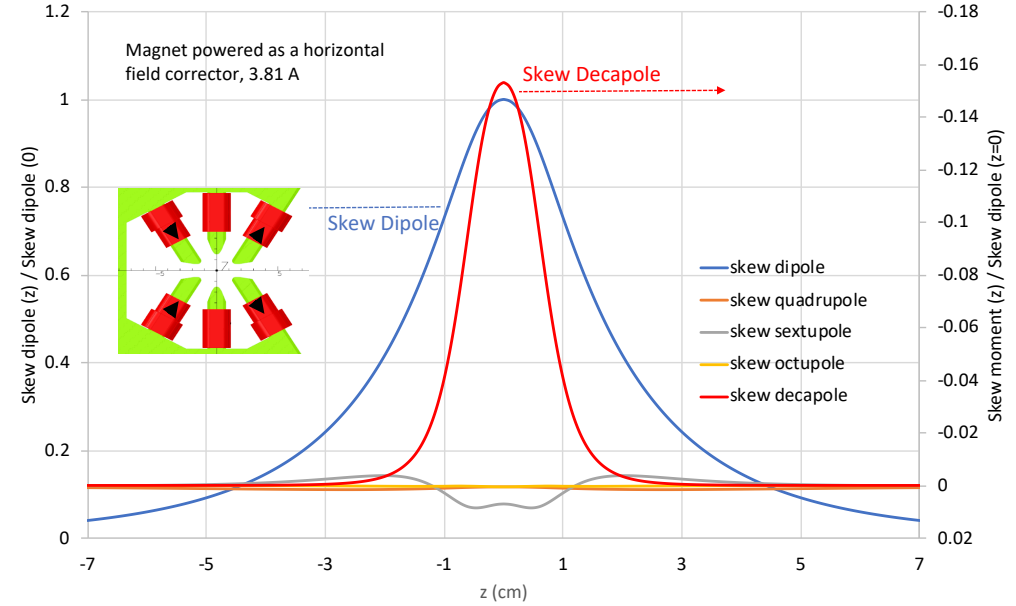
Dış bobinler dışa doğru, düşeydeki bobinler içe doğru enerjilendirilmiştir.

Toplam eğik kuadrupol = 307.3 Gauss-cm.

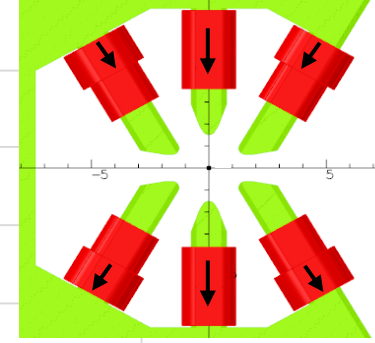
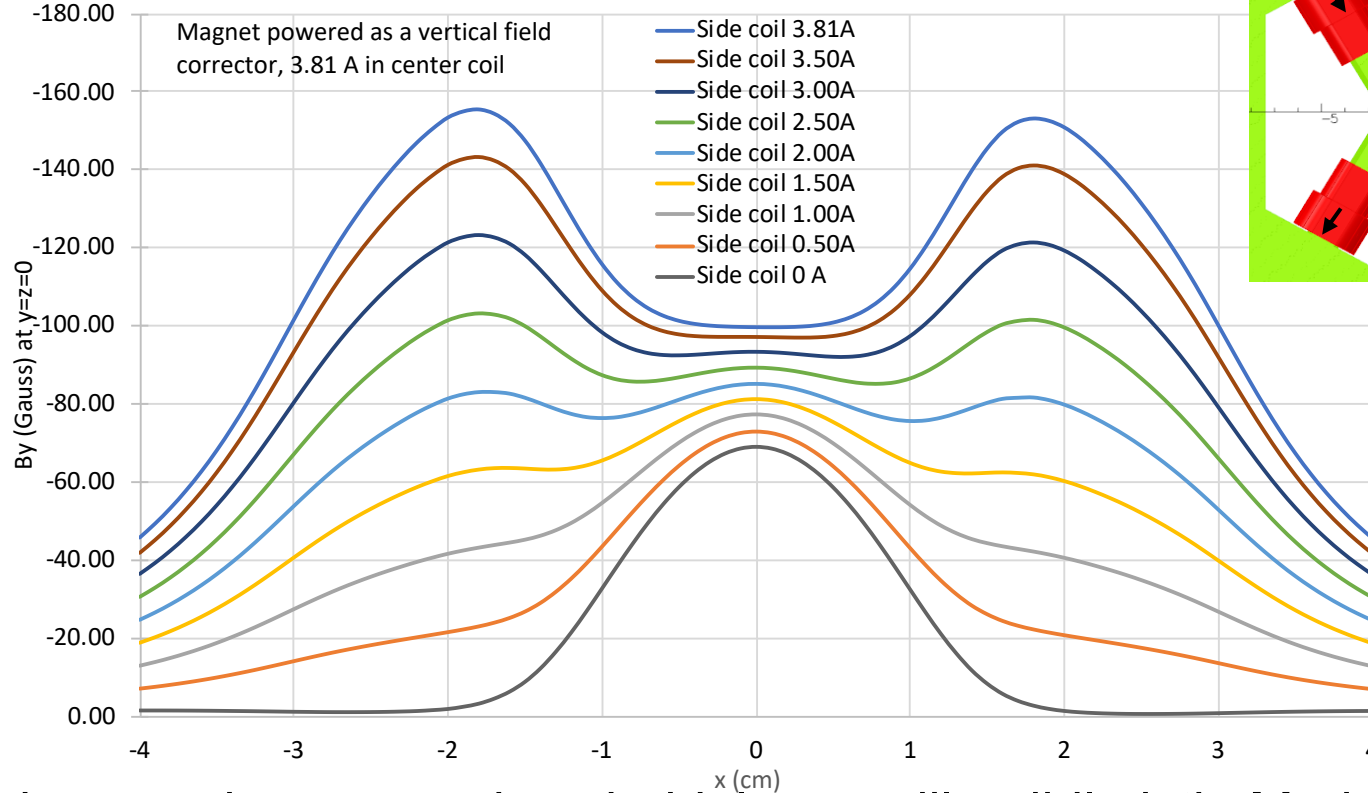
Pik eğik kuadrupol = 109.1 Gauss.

Toplam eğik on kutuplu = - 77.3 Gauss-cm.

Pik eğik on kutuplu = - 41.5 Gauss-cm.



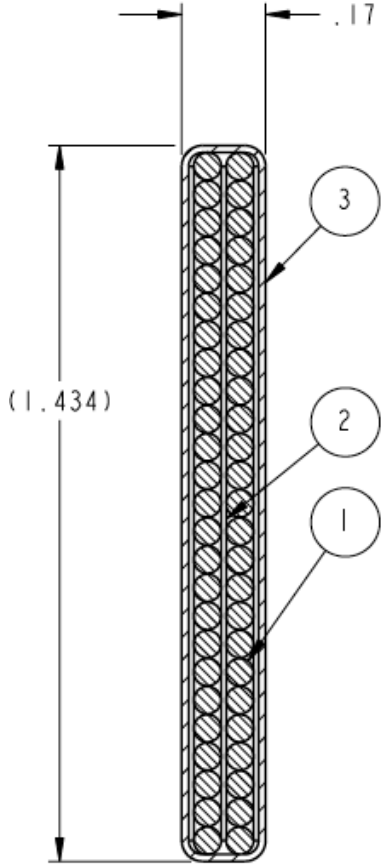
Düşey Düzeltici Mod



- Sadece merkez ve yan kısa bobinler enerjilendirilmiştir. Merkez bobinler 3.81 A ve diğerleri yukarıdaki grafikte gösterildiği gibidir.
- Yan bobinlerde küçük akım değerleri pik değerini x ekseninde ± 2 cm etkiler. Bu aynı zamanda x ekseninde daha kısa düz bir bağımlılık gösterir.

* Liz Moog, Magnet Devision Group Meeting Presentation; Corrector, in isolation, ANL, (April 2019).

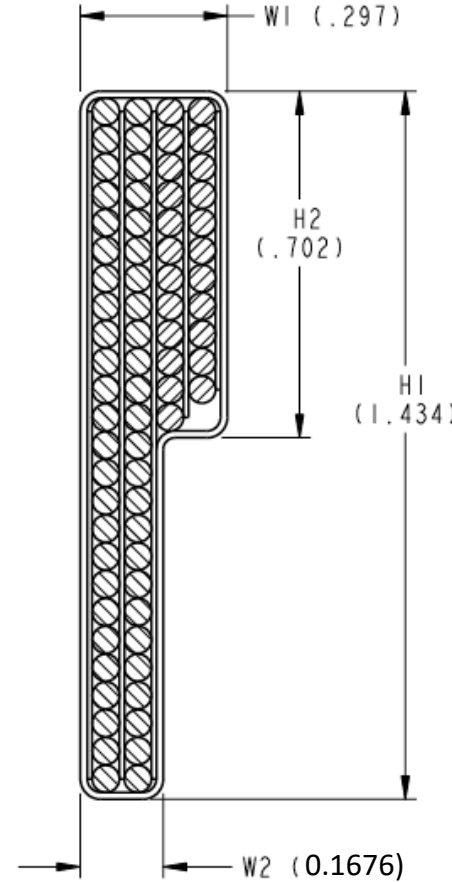
Bobin Boyutları (Inch)



3- Fiberglass bant, yarım tur katman: 0.014" kalınlığında

2- Scotchply, bobin içi ve dışı bobin katmanları arası: Her biri 0.010" incelikte

1- 16 AWG iletken: Bakır çapı 0.0508". İzolasyon dahil 0.0548".



İki ayrı enerji verilen bölüm bulunmaktadır.

İç bobin, merkez direk üzerindeki bobin ile aynıdır; direğin etrafına aynı şekilde oturur ve aynı sayıda dönüşe ve aynı boyutlara sahiptir.

Dış bobinin toplam 23 dönüşü vardır - ilk katmanda 12 ve ikinci katmanda 11. İç bobinin üzerine sarılır (Scotchply tabakası ile birlikte).

Tüm bobin paketi etrafında da cam elyaf bulunmaktadır.
Her katta 25 tur ve toplamda 50 tur iletkenden oluşmuştur.

Akım Limitleri

Üretilen düzeltici magnet hava soğutmalıdır bu nedenle bir akım limiti gerekmektedir. Bakır iletken çapı (izolasyon olmadığı durum) 0.0508”.

$$I_{max}(A) = 1.5 A/mm^2 * \pi \left(\frac{.0508 in}{2} * 25.4 \frac{mm}{in} \right)^2 = 1.96 A$$

Hava soğutmalı bir iletkende maksimum akım için genel akım yoğunluğu 1,5 A/mm²'dir*.

Üretilen düzeltici magnet üzerinde yapılan testlerde maksimum 3.81 A akım değerinde enerjilendirilmesi uygun bulunmuştur.

3.81 A akım değerinde enerjilendirildiğinde, bakır bobinde 2.91 A/mm². akım yoğunluğuna dönüşmektedir.

Bobinlerdeki akım yoğunluğu:

Merkez & iç yan bobinler için:

$$\text{Max akım yoğunluğu} = 3.81 A \times 50 / (0.1156 \times 1.402 \times 25.4^2) = 1.8219 A/mm^2$$

Kısa dış yan bobinler:

$$\text{Max akım yoğunluğu} = 3.81 A \times 23 / (0.1156 \times 0.6701 \times 25.4^2) = 1.7534 A/mm^2$$

* Mark Jaski, personal communication; also Jack Tanabe, *Iron Dominated Electromagnets: Design, Fabrication, Assembly, and Measurements*, SLAC-R-754 (June 2005), pp. 128, 296 & 306.

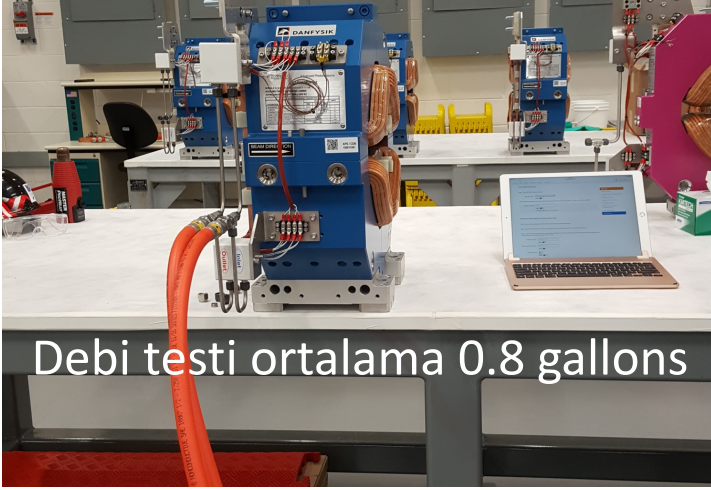
9. Magnetin üretimi ve testi

Magnet tasarımı simülasyon yoluyla tamamlandıktan sonra, mühendisler üretim sürecine devam eder.

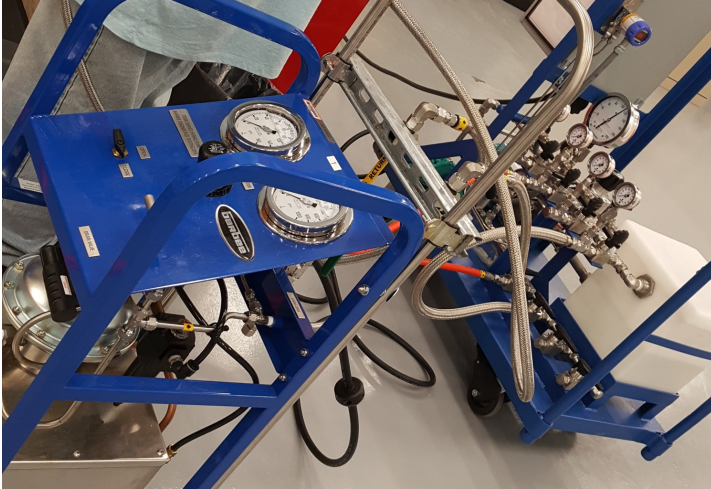
Bu, özel malzemeler ve teknikler kullanarak magnetin fiziksel yapısını oluşturmayı içerir.

İmalattan sonra, magnetin amaçlandığı gibi çalıştığından ve gerekli tüm kalite ve performans standartlarını karşıladığından emin olmak için titiz testler yapılır.

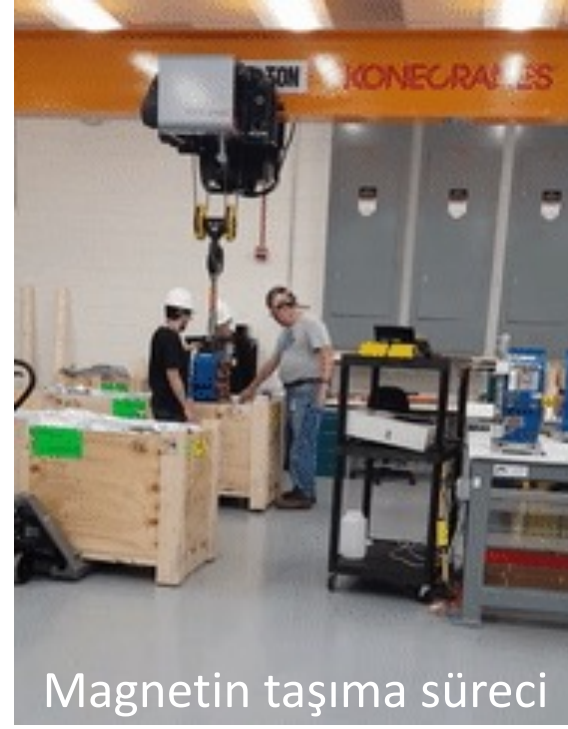
Bu adım, hızlandırıcı sistemler için optimum magnet performansı elde etmede çok önemlidir.



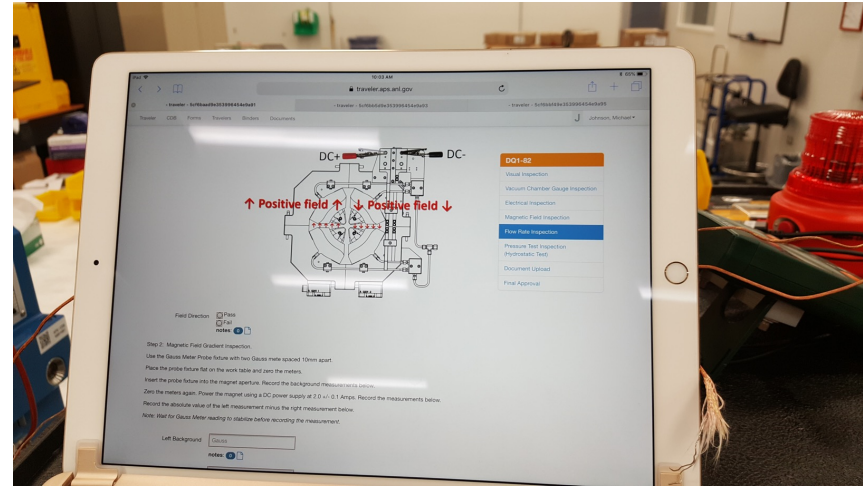
Debi testi ortalama 0.8 gallons



Basınç testi: Limit 2.5 psi



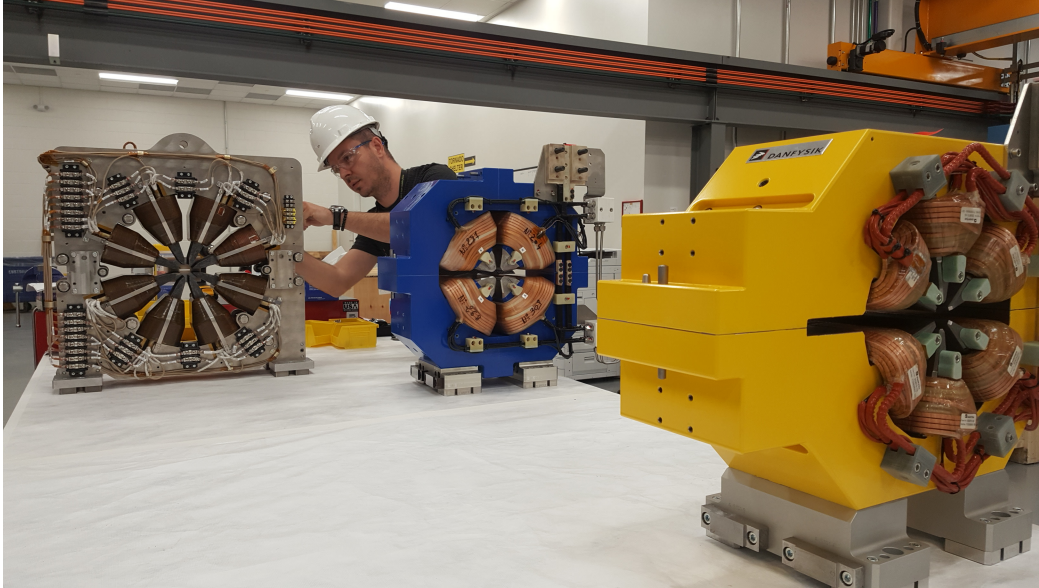
Magnetin taşıma süreci



Magnet kutuplarının, yani akım yönünün belirlenmesi.



Magnet üzerinde tayin edilen her bir parametrenin, dayanıklılık testinin ardından, kabul edilebilir aralıkta olup olmadığına bakılıyor.



Üreticiden gelen
kuadrupol
magnet.

10. Hızlandırıcı sistemler için sonuç ve çıkarımlar

Sonuç olarak, magnet tasarımı hızlandırıcı sistemlerin performansında kritik bir rol oynamaktadır.

Mühendisler, simülasyon, üretim ve zorlu testlerin temel adımlarını izleyerek optimum magnet performansını sağlayabilirler.

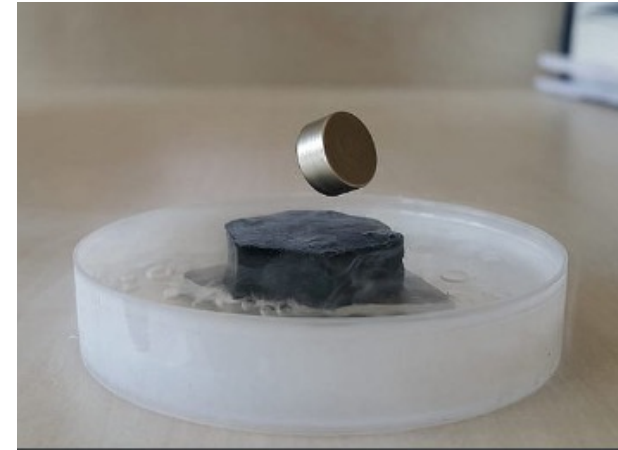
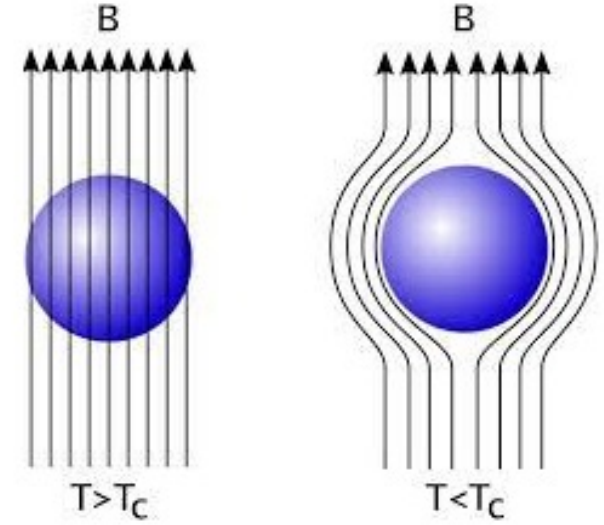
Bunun, parçacık fiziğinden tıbbi görüntülemeye ve ötesine kadar çeşitli endüstrilerdeki hızlandırıcı sistemlerin genel verimliliği ve etkinliği üzerinde önemli etkileri vardır.

Süperiletkenlik

Süperiletkenlik maddenin kuantum halidir ve bu ancak kritik sıcaklıklar altında gerçekleşebilir. Süperiletkenlikler iki özellik üzerinde tanımlanırlar.

Birincisi, **elektrik akımının geçişine direnç göstermezler**. Direnç sıfıra düştüğünde, herhangi bir enerji kaybı olmaksızın akım malzemenin içinde dolaşabilir.

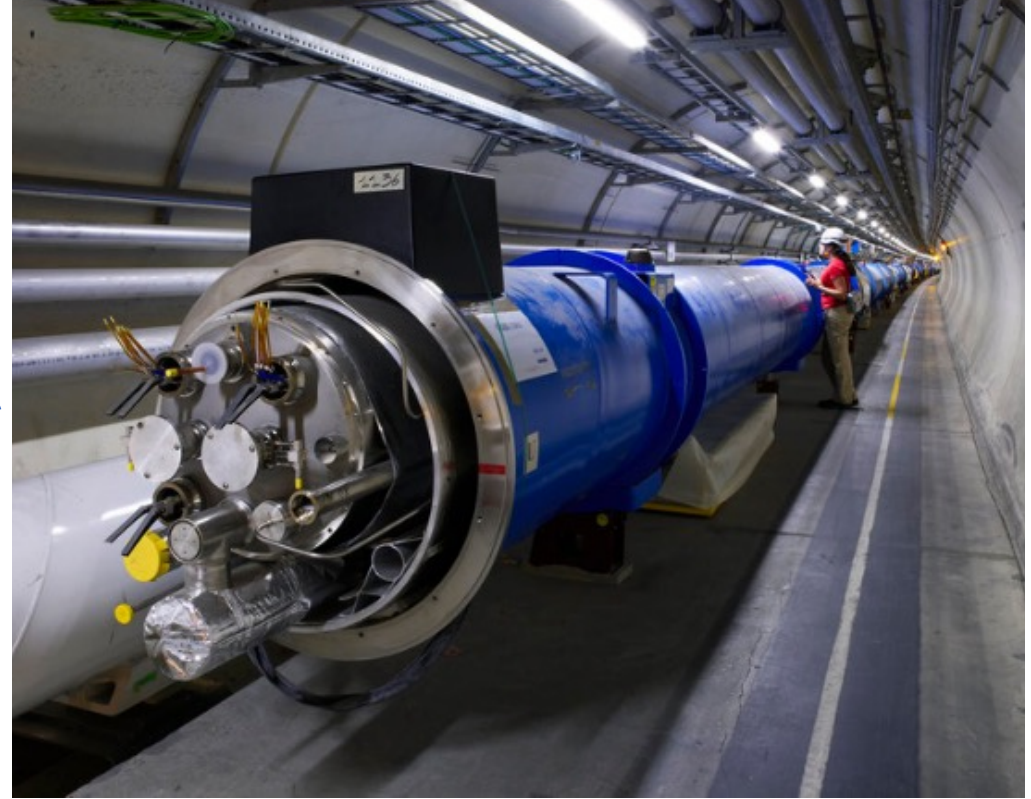
İkincisi, yeterince zayıf olmaları koşuluyla, **dış manyetik alanlar** süperiletkene nüfuz etmeyecek, ancak **yüzeyinde kalacaktır** (Meissner etkisi).



Yüksek enerjili hadron çarpıştırıcıları için süperiletken dipol magnet

Günümüzde süperiletken magnetler kullanılarak TeV (1000 GeV) mertebesinde enerjilere ulaşabilmektedir.

Örneğin CERN-LHC proton-proton çarpıştırmışında; çevre 27 km, süperiletken dipol magnet alanı 8 T ve ulaşılan demet enerjisi 7 TeV'dir.



Süperiletken özellik gösterebilmesi için 2K (-271 °C) sıcaklığında sıvı He kullanılmaktadır.

Referanslar

Akdoğan, E., Izzo S. J. and Yavaş, Ö. 2021. Magnet Engineering Studies on Booster Ring of TAC-TURKAY Synchrotron Radiation Facility. Moscow University Physics Bulletin, Vol. 76, No. 5, pp. 402–411 (DOI: 10.3103/ S0027134921050027).

Izzo, J. S. 2020. Magnet Measurement Lab Mechanical Design. APS Magnet Group Internal presentation.

Jaski, M., 2005. Personal communication; also Jack Tanabe, *Iron Dominated Electromagnets: Design, Fabrication, Assembly, and Measurements*, SLAC-R-754, pp. 128, 296 & 306.

Jain, A. K. 1997. Basic Theory of Magnets. CERN Accelerator School: Measurement and Alignment of Accelerator and Detector Magnets.

Jain, A. 2019. (Personal communication), Argonne National Laboratory.

Lopes, M. 2016. Magnet Excitation and Coil Design. FNAL (<https://uspas.fnal.gov/>).

Moog, L., 2019. Magnet Devision Group Meeting Presentantion; Corrector, in isolation, ANL.

Shiltsev, V. 2011. Accelerator Science and Technology Breakthroughs, Achievements and Lessons from the Tevatron, Modern Physics Letters A 27(01) (DOI: 10.1142/S0217732312300017)

Tanabe, J. T. 2005. Iron dominated electromagnets: Design, fabrication, assembly and measurements. In *Iron Dominated Electromagnets: Design, Fabrication, Assembly and Measurements*. (DOI: 10.1142/5823).

Wiedemann, H. 2007. Particle accelerator physics: Third edition. In *Particle Accelerator Physics: Third Edition*. (DOI: 10.1007/978-3-540-49045-6).

Wille, K. 1996. *The Physics of Particle Accelerators An Introduction*. Oxford University Press.

Yavas, Ö. 2019. The Structure of Magnetic Lattice and Dipole Magnets of TURKAY Booster Ring. VII. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi (UPHUK-VII).

ÖZET

Parçacık hızlandırma işlemindeki önemli bileşenlerden biri de elektromagnetlerdir. Bu magnetler, elektrik akımı geçirilen bobinler aracılığıyla manyetik alan oluştururlar. Hızlandırıcılardaki elektromagnetler, yüksek enerjili parçacıkları hızlandırmak, yönlendirmek ve odaklamak için kullanılır. Elektromagnet tasarımları, genellikle parçacıkların hedeflenen yörüngelerde tutulması ve optimum hızda ilerlemesi için dikkatli bir şekilde optimize edilir. Ayrıca, bazı hızlandırıcılarda süperiletken elektromagnetler kullanılabilir, bu sayede elektrik akımı sürekli bir şekilde sürdürülebilir ve enerji kayıpları minimuma indirilir. Elektromagnetler, modern parçacık hızlandırıcılarının temel yapı taşlarından biri olarak, parçacık fiziği, nükleer araştırmalar, tıp ve diğer alanlarda önemli bilimsel ve teknolojik ilerlemeleri mümkün kılarlar.