

# 1MeV SIKLOTRON TASARIM VE YAPIMI OZU CYCLOTRON

Alper Hayreter (Özyeğin Üniversitesi) Bora Işıldak (Özyeğin Üniversitesi)

Ebru Şimşek (Boğaziçi Üniversitesi)

## Desteklerimiz

 **Metal Yapı**

~100K

  
BİREYSEL GENÇ GİRİŞİM

~150K

 **KOSGEB**  
Arge-Inovasyon  
Programı

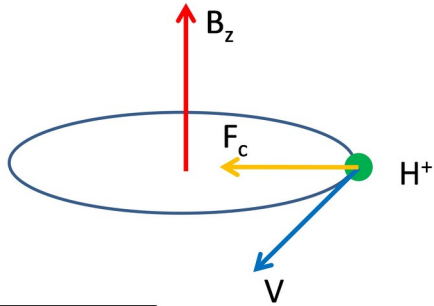
~100K

# Siklotron Nedir, Nasıl Çalışır?

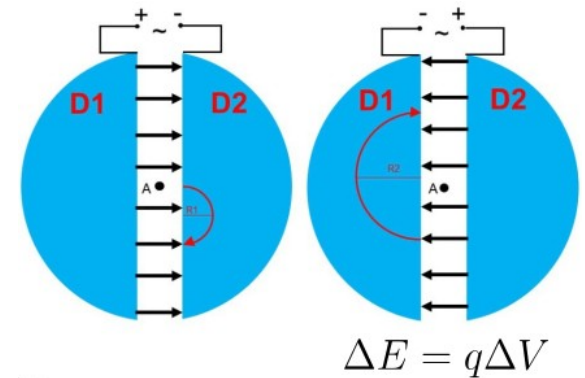
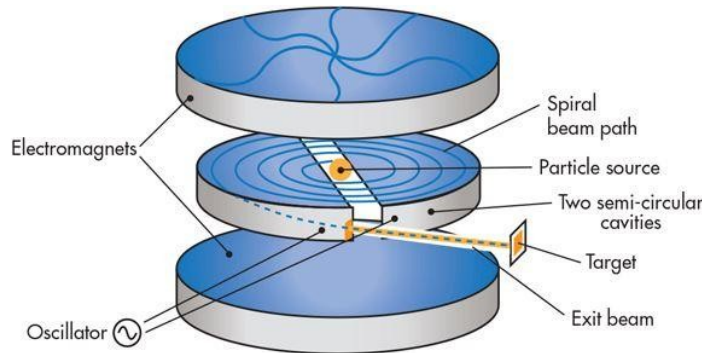
- Siklotronlar, elektrik ve manyetik alan kullanılarak iyonlara enerji kazandıran dairesel hızlandırıcılardır.
- İlk siklotron 1930'da Ernest Lawrence ve öğrencisi M.S.Livingston tarafından yapılmıştır.
- D elektrotlara(dee) alternatif gerilim uygulandığı için D'ler arasından her geçişte enerji kazanımı olur.
- D'lerin içindeyken iyonlara sadece manyetik alan etki eder.(Faraday kafesi)
- OZU Cyclotron klasik bir siklotron(~1 MeV) bu yüzden enerji ve frekans hesabında klasik denklemler kullanılabilir.

$$K_{\text{rel}} = (\gamma - 1)mc^2 \quad 1 \text{ MeV} = (\gamma - 1)m_p c^2$$
$$\gamma = 1.001 \approx 1$$

$$f_0 = \frac{qB}{2\pi m} = f_0 = \frac{(1.602 \times 10^{-19})(0.68)}{2\pi 1.672 \times 10^{-27}} = 10 \text{ MHz}$$

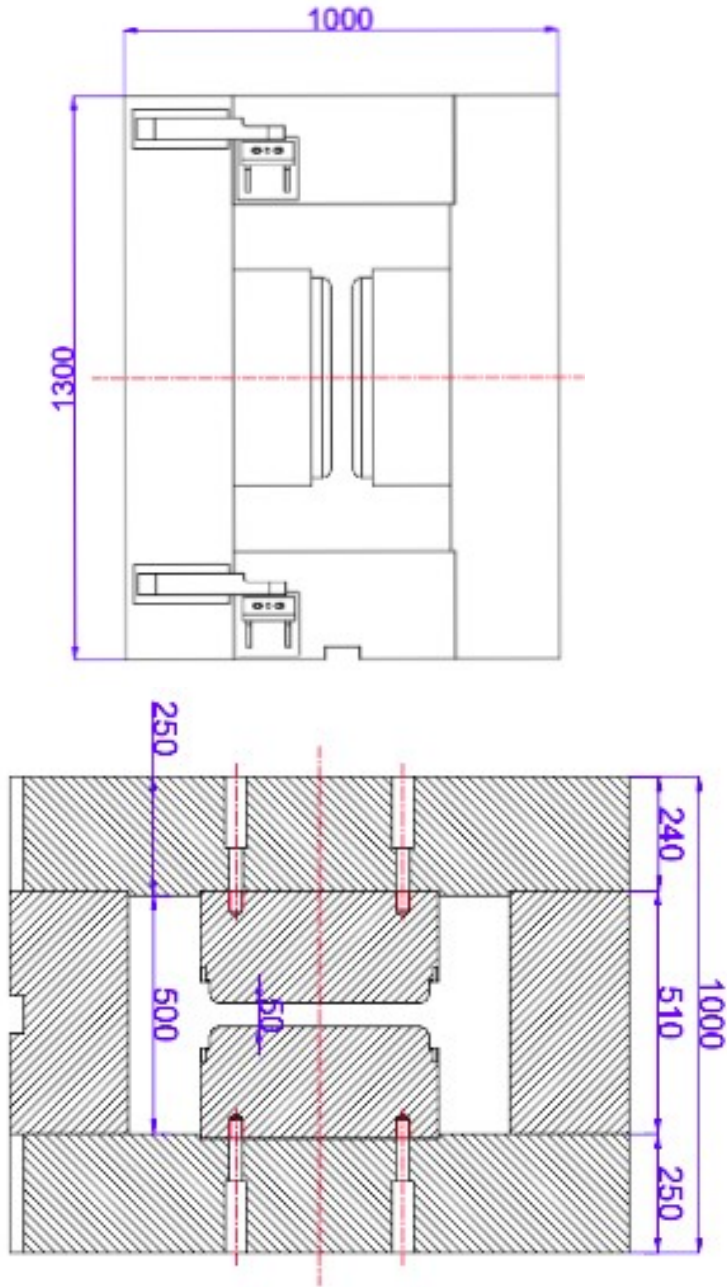


$$\frac{mv^2}{r} = qvB \Rightarrow \omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}$$

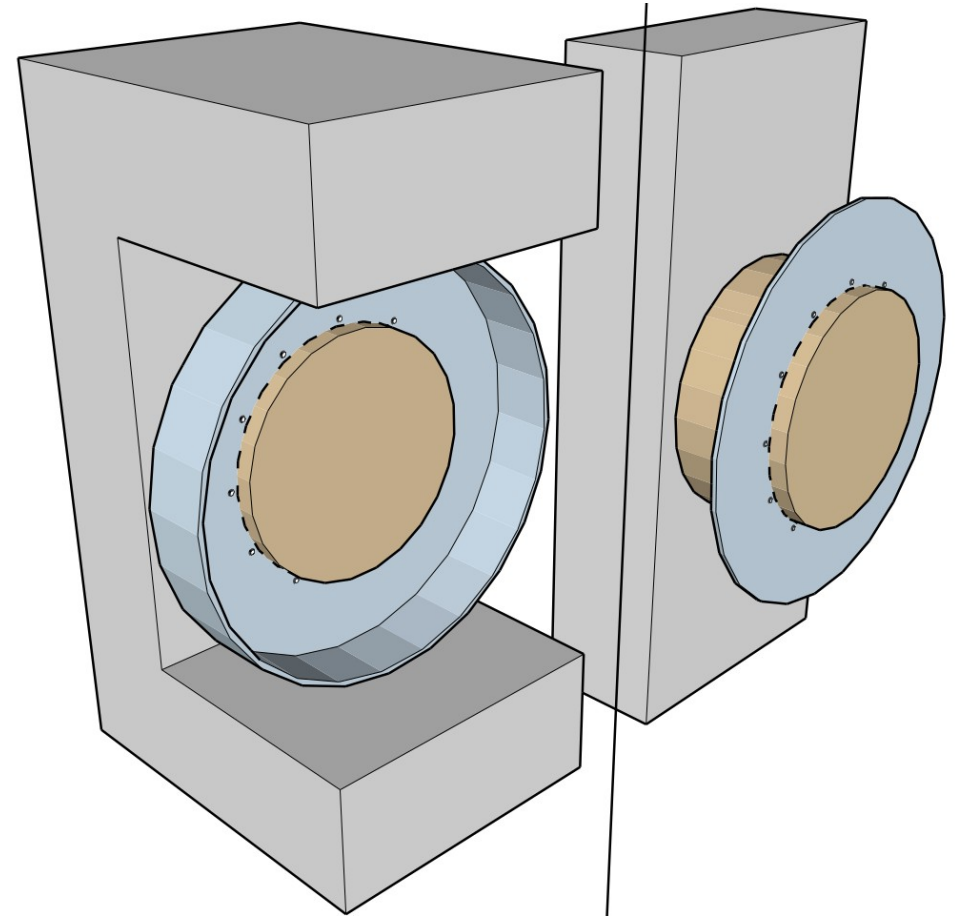


# OZU CYCLOTRON TASARIM VE YAPIM AŐAMALARI

# Demir Gvde Tasarımı(AutoCAD-3D)



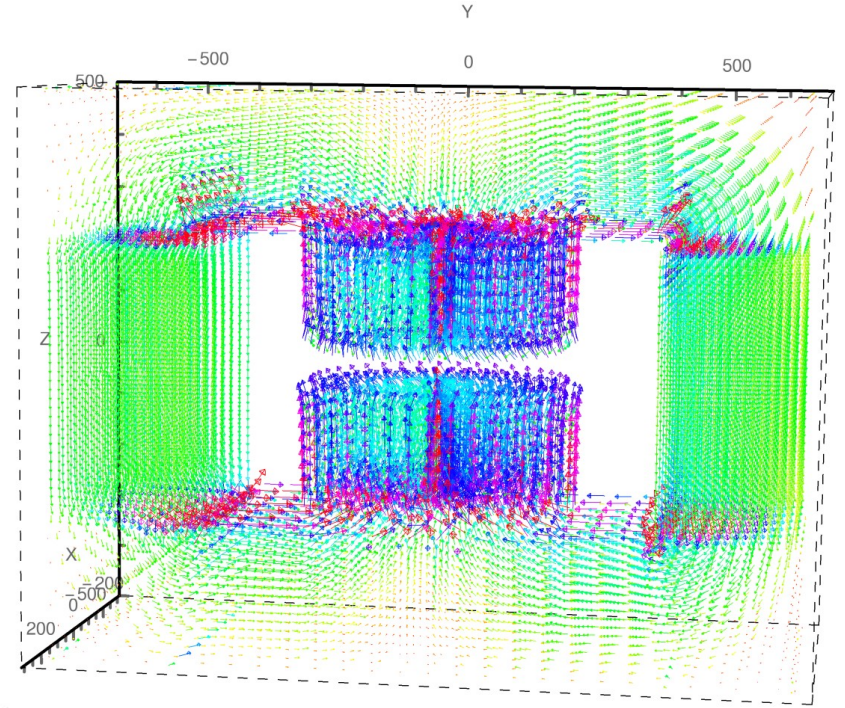
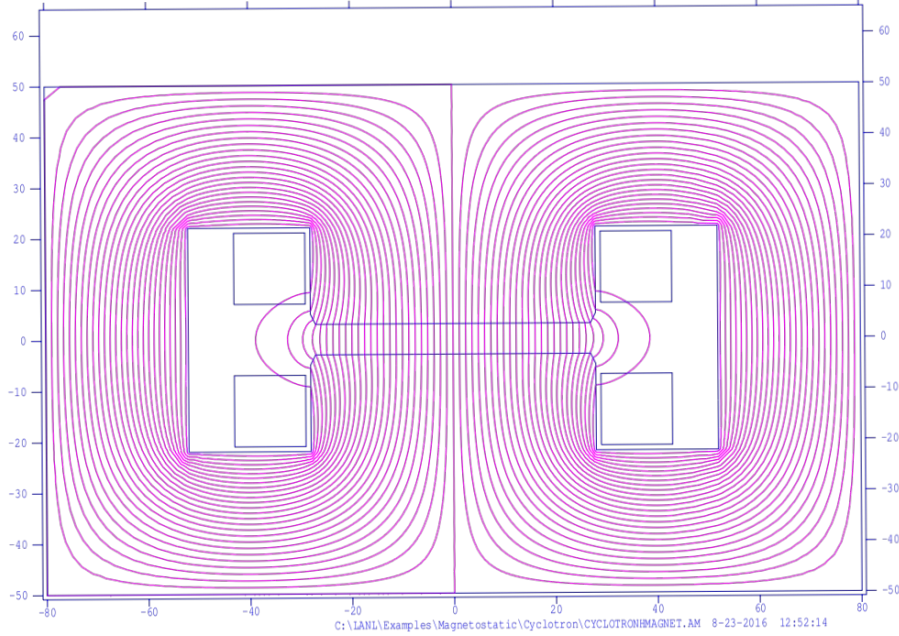
- Manyetik alanın rahatça ilerleyebileceđi, manyetik geirgenliđi ok yüksek ii dolu ferromagnet.



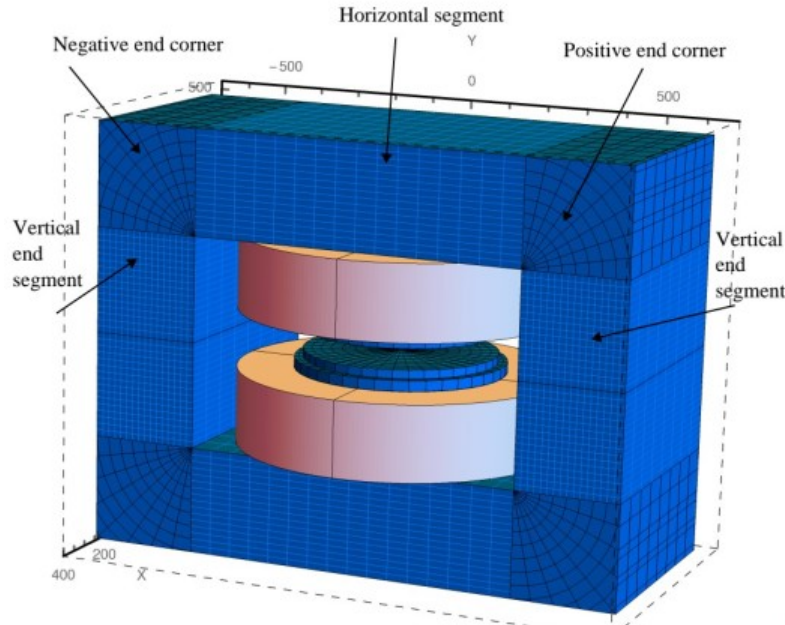


# Demir Gövde Tasarımı- Manyetik Alan

Full H-Shaped Magnet including all four quadrants



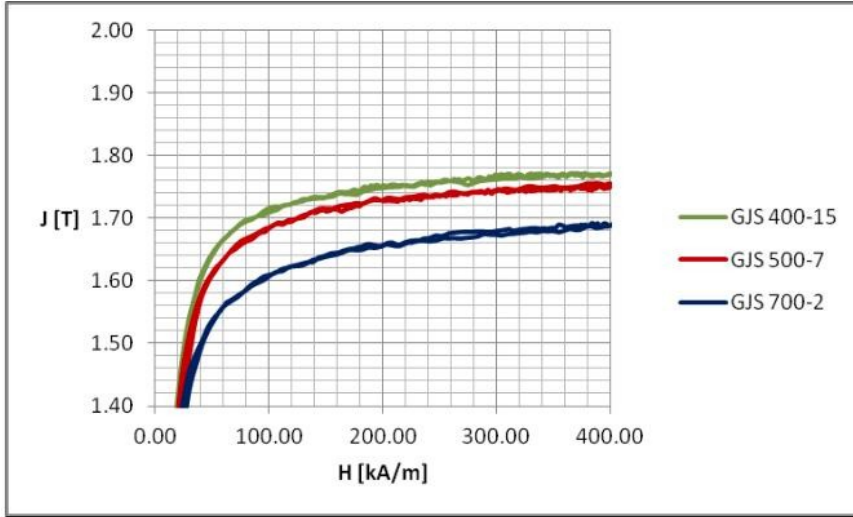
- Poisson SuperFish 2 boyutla sınırlı.
- Geometrinin silindirik simetrik olduğunu varsayar.



- Radia-3D magnetostatik analizi
- Sınır integrali yöntemini kullanır
- Mathematica eklentisi olarak çalışır.

# Demir Gövde - Malzeme Seçimi

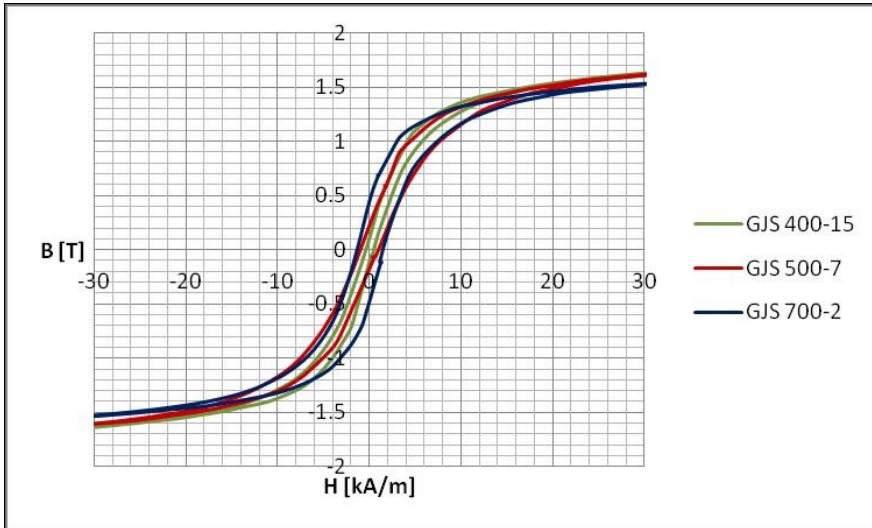
- Yüksek manyetik geçirgenlik ve satürasyon



- İyonların frekansını sabit tutmak manyetik alanın homojen olmasına bağlı.

$$\omega = \frac{qB}{\gamma m}$$

- Düşük histerezis kaybı



# Döküm Aşaması

- Demir gövdede manyetik özelliklerin homojen olması için ideal yol dökümü tek seferde yapmaktır.
- Döküm öncesi malzeme tek seferde hazırlandı. Ancak uygun kalıp boyutu olmadığı için döküm iki turda tamamlandı.



Dökme demir – GJS400-15



Metal Yapı'nın hibe desteğiyle - GİSAŞ Döküm

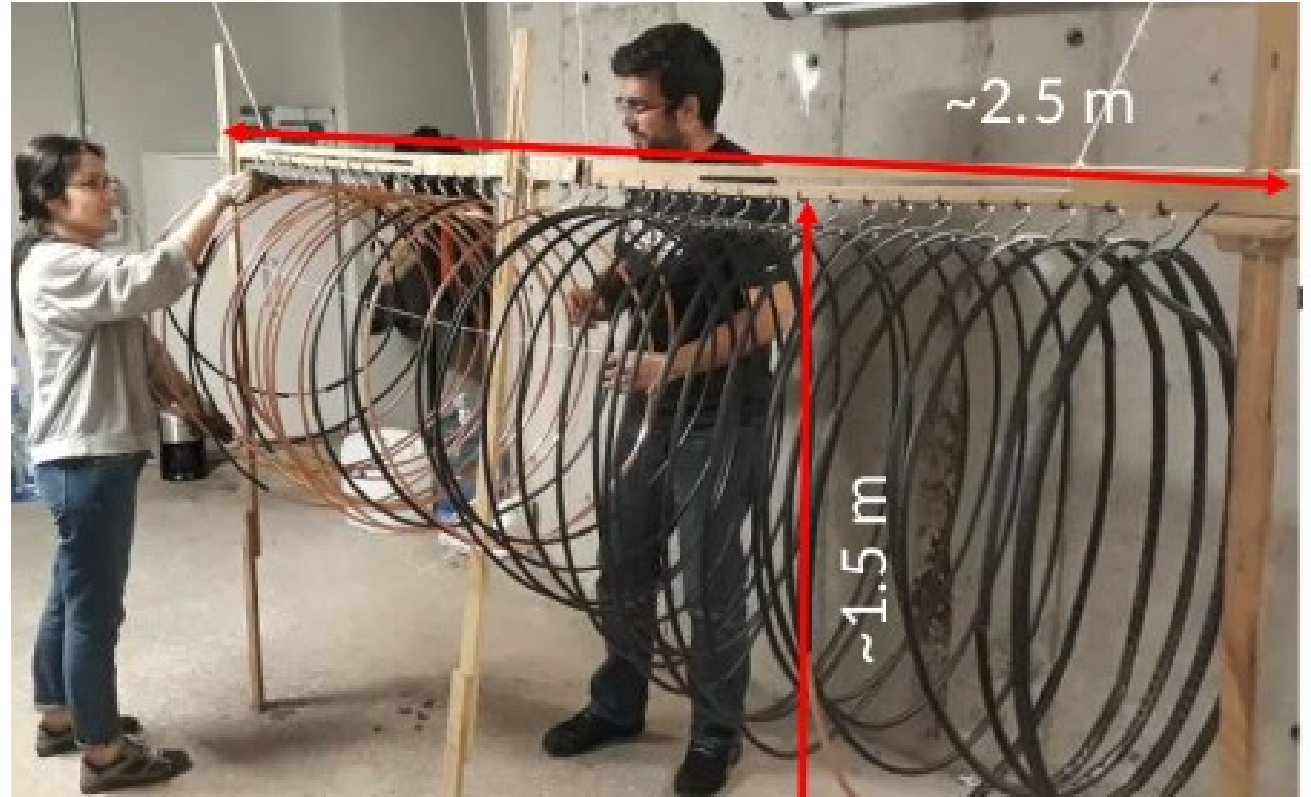
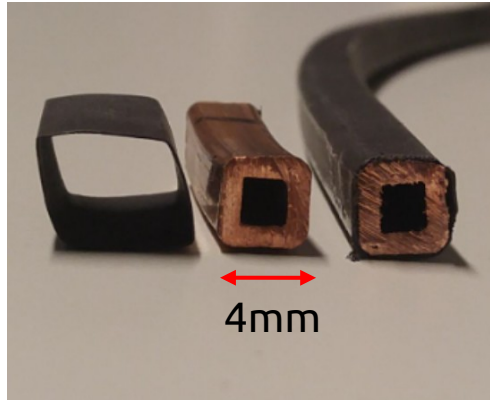




# Bobinlerin Yalıtımı



- Bakır borular asıldı ve zımparalandı.
- Makaronlar bir metre boyunda kesilip kare şekline getirildi.(12/6 mm Woer RSFR-H, 125 °C 'ye kadar dayanıklı.)
- İlk geçirilen makaronun içine birkaç damla makine yağı damlatıldı.
- Sıcak hava tabancası ile makaronlar ısıtıldı.



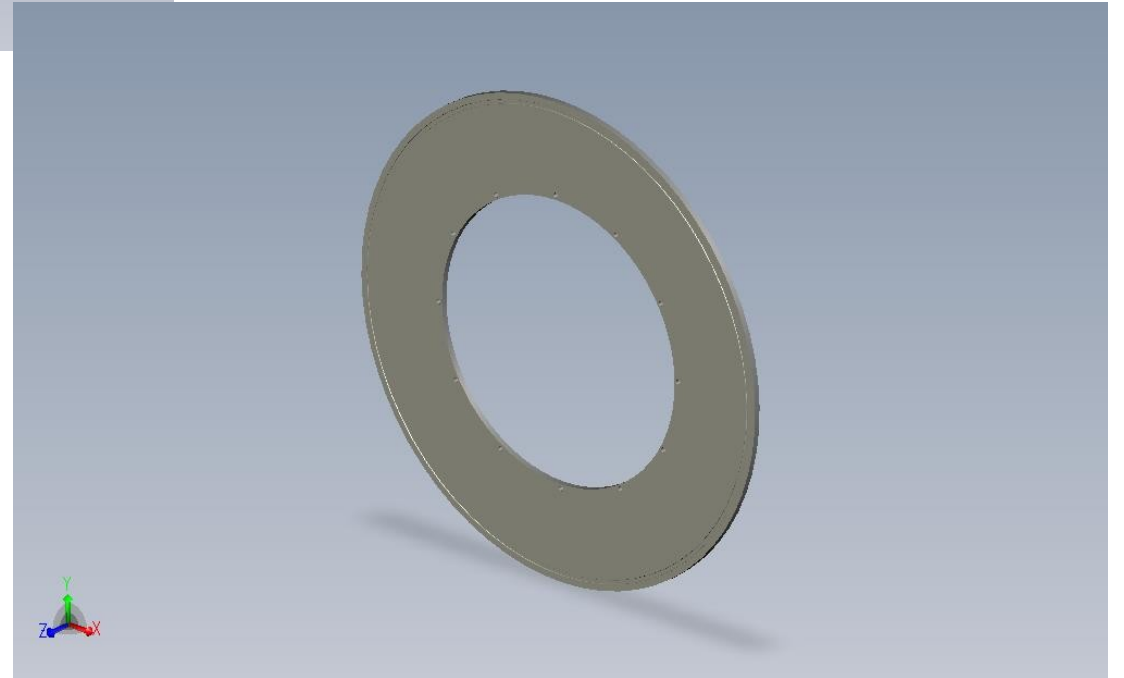
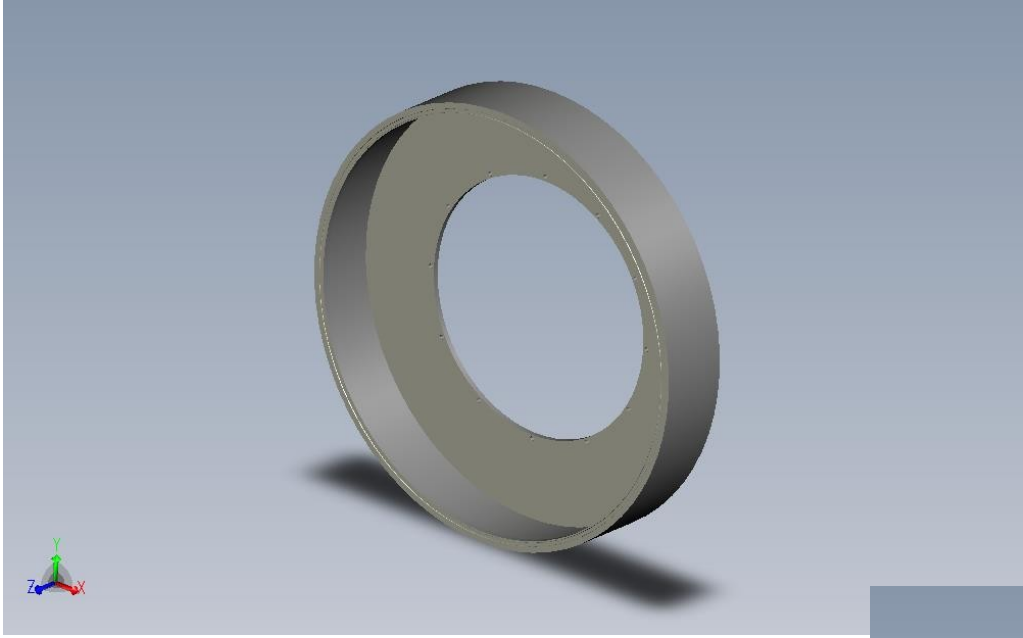


# Elektromıknatısların Sarımı

- Bobinler henüz askıdayken ortası işaretlendi.
- Sarma işlemine bobinin ortasından başlandı.(Double pancake yöntemi)
- Pankekin yarısı saat yönünde sarıldıktan sonra üst yüzeyine epoksi uygulandı.
- Sehpanın üst kısmındaki diğer yarısı saat yönünün tersine sarıldı.
- Bu sarım yöntemi sayesinde su girişi ve çıkışı için bobinin iki ucu aynı yöne geldi.

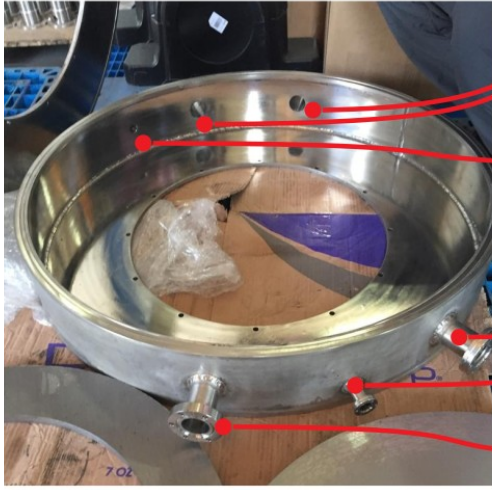


# Vakum Odası Tasarımı(AutoCAD-3D)



# Vakum Odası ve D Elektrotlar

Kılıç Makine



Yardımcı port

Gözlem portu

Fosfor ekran girişi

RF portu

H<sub>2</sub> gazı girişi

Vakum portu



- Vakum odası ve kapağı 316L kalite paslanmaz çelikten yapıldı.

- İyonlar ancak yüksek vakumlu bir ortamda hızlandırılabilir.
- Ortalama serbest yolun artması için basınç mümkün olduğu kadar düşük olmalıdır.

$$\lambda = \frac{RT}{\sqrt{2}\pi d^2 N_A P}$$

- Bizim durumumuzda, hidrojen gazı pompalanmadan önce vakum basıncı 10<sup>-5</sup> Torr civarında olması gerekiyor.
- Sızdırmazlık için Oring kullanıldı.





# D Elektrotlar(Dee) ve Vakum Sistemi



- Bakır, içleri boş.
- Yarıçapları 20 ve 21 cm.

- Turbo-moleküler vakum pompası
- Nihai basınç  $10^{-7}$  mbar  $\sim 7.5 \times 10^{-8}$  Torr

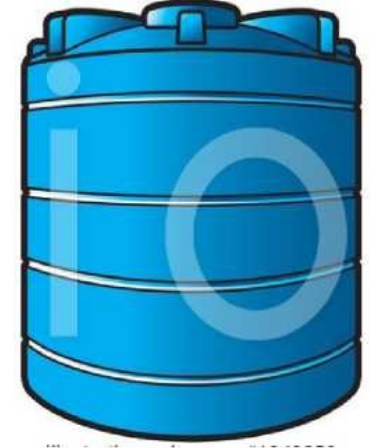




# Elektromıknatıslar için Soğutma Sistemi



water pump (up to 10 bar)



water tank 30 L (distilled water)



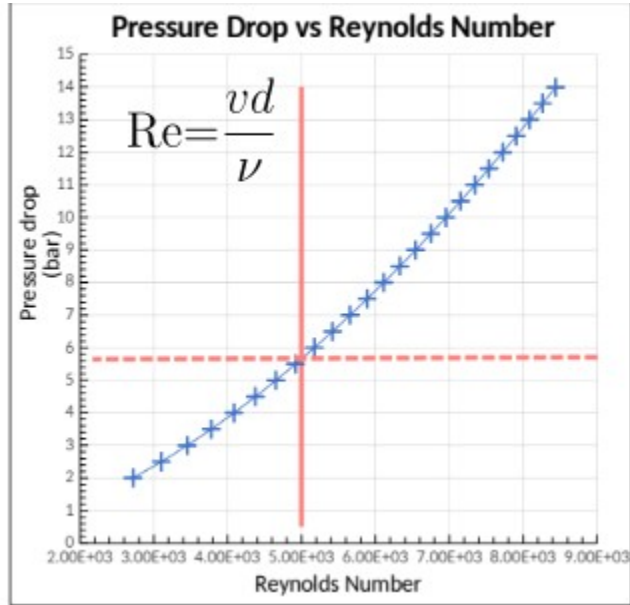
Air cooled condenser

Kontherm KS-3518-010

- Isınan magnetleri soğutabilmek için magnet içinden distile su geçirilecek.
- Magnetlerin içinde ısınan su, ticari bir ısı eşanjörü tarafından soğutulup geri gönderilecek.

# Soğutma ve Akış Parametreleri

- Bakır borulardan suya en hızlı ısı geçişi için akış tipi türbülanslı olmalıdır.
- Akış tipini belirlemede büyük ölçüde etkili olan faktör Reynolds sayısıdır.
- Akış tipinin türbülanslı olmasını garanti etmek için Reynolds sayısı 5000 seçildi.



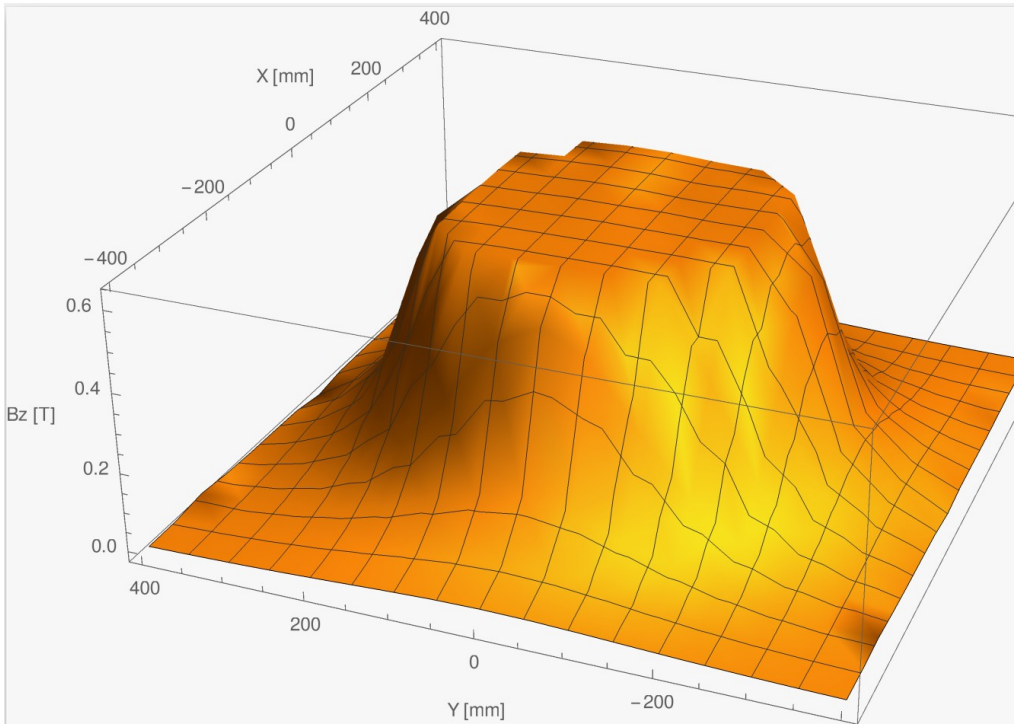
## Akış parametreleri

v(m/s)	Re(10 <sup>3</sup> )	q(mL/sec)	q(L/h)	ΔT (C)	ΔP (bar)	qtotal(l/sec)
0.34	1.19	5.37	19.34	2.39	0.50	0.10
0.51	1.80	8.15	29.33	1.58	1.00	0.15
0.65	2.29	10.37	37.33	1.24	1.50	0.19
0.77	2.72	12.29	44.25	1.04	2.00	0.22
0.88	3.10	14.02	50.47	0.92	2.50	0.25
0.98	3.45	15.60	56.17	0.82	3.00	0.28
1.07	3.78	17.08	61.48	0.75	3.50	0.31
1.15	4.09	18.47	66.48	0.70	4.00	0.33
1.24	4.38	19.78	71.21	0.65	4.50	0.36
1.31	4.65	21.03	75.72	0.61	5.00	0.38
1.39	4.92	22.23	80.03	0.58	5.50	0.40
1.46	5.17	23.38	84.18	0.55	6.00	0.42
1.53	5.42	24.50	88.19	0.52	6.50	0.44
1.60	5.66	25.57	92.06	0.50	7.00	0.46
1.66	5.89	26.61	95.81	0.48	7.50	0.48
1.73	6.11	27.63	99.46	0.46	8.00	0.50
1.79	6.33	28.61	103.01	0.45	8.50	0.52
1.85	6.54	29.57	106.47	0.43	9.00	0.53
1.91	6.75	30.51	109.84	0.42	9.50	0.55
1.96	6.95	31.43	113.14	0.41	10.00	0.57

- Akış hızı 22mL/s olduğunda Reynolds sayısı yaklaşık 5000 oluyor.
- Siklotron 50A DC akımda çalıştığında suyun sıcaklığının saniyede 0,58°C artmasını bekliyoruz.

# SİMÜLASYON VE ÖLÇÜMLER

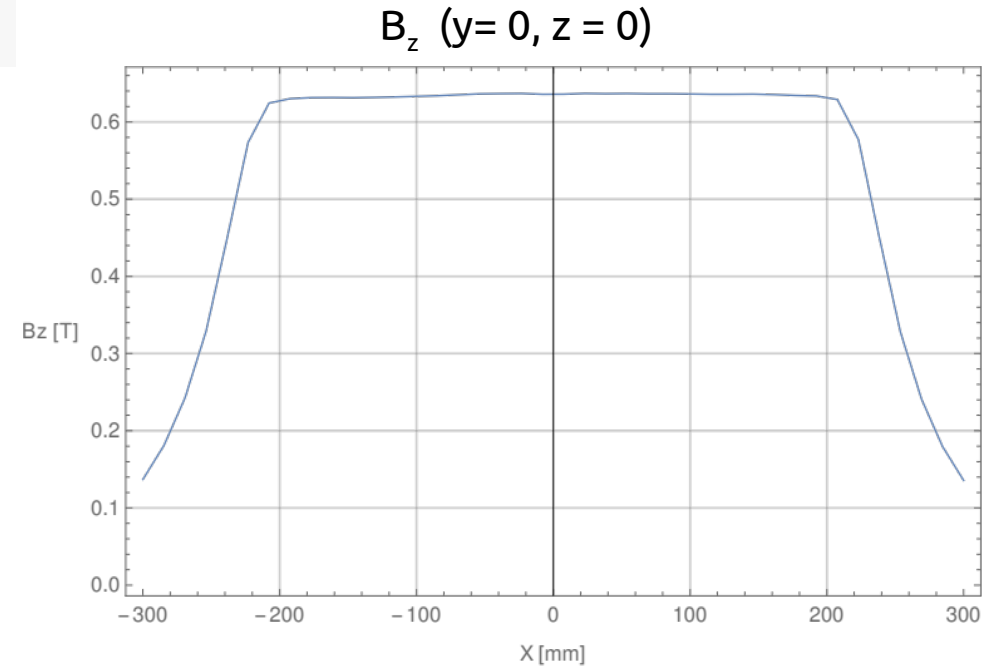
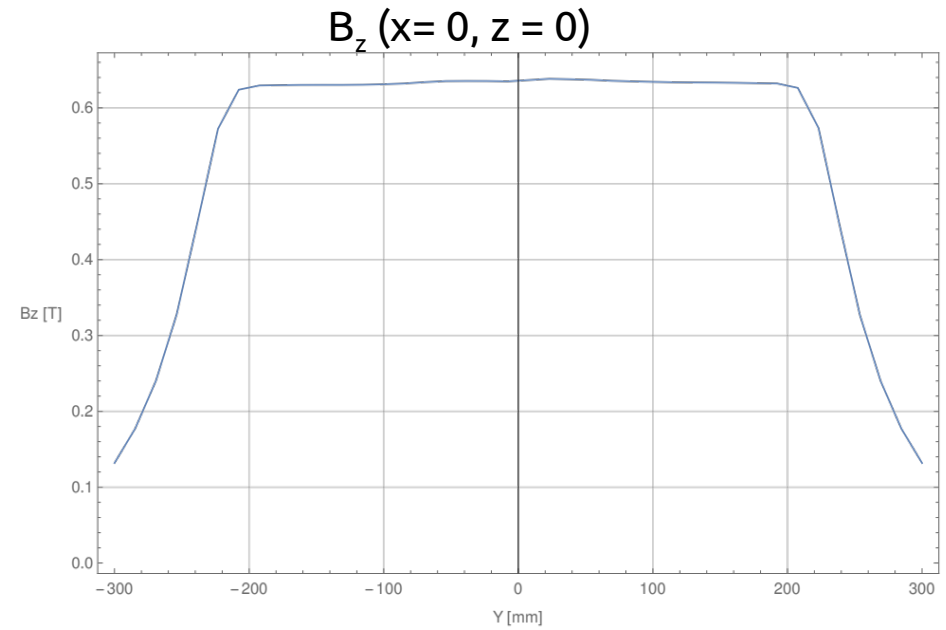
# RADIA-Manyetik Alan Simülasyonu



$B_z$  x-y düzleminde ( $z=0$ )

- Manyetik alanın aksiyel bileşeni neredeyse homojen ve beklenen değere yakın.

$$B = \frac{\mu_0 NI}{g}$$
$$= \frac{(1.26 \times 10^{-6} \text{ H/m})(540)(50 \text{ A})}{0.05 \text{ m}} = 0.68 \text{ T}$$





# Manyetik Alan ve Manyetik Alan İndeks Simülasyonları

- Ayrık noktalar için Radia ile elde edilen manyetik alan değerleri manyetik kutuplar arasındaki bölgede csv formatında yazıldı.

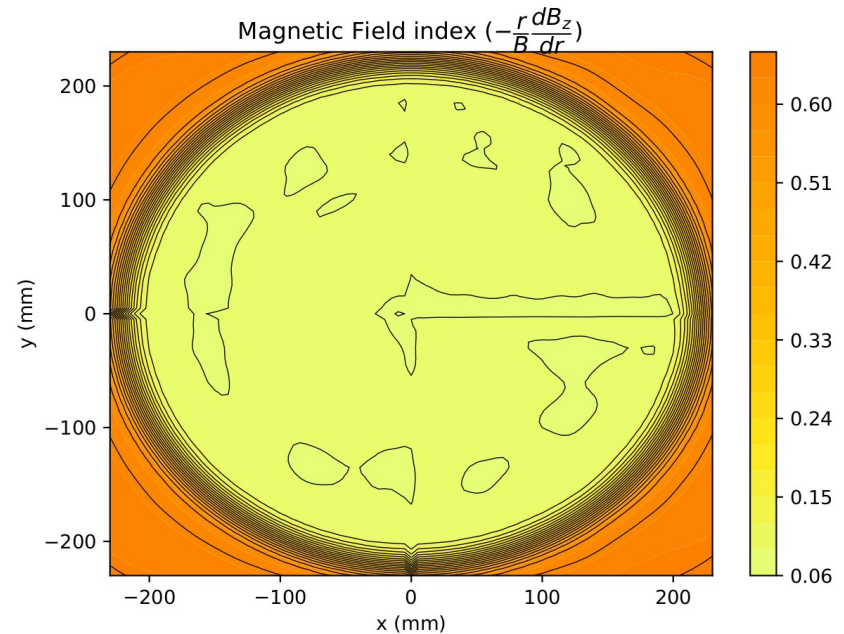
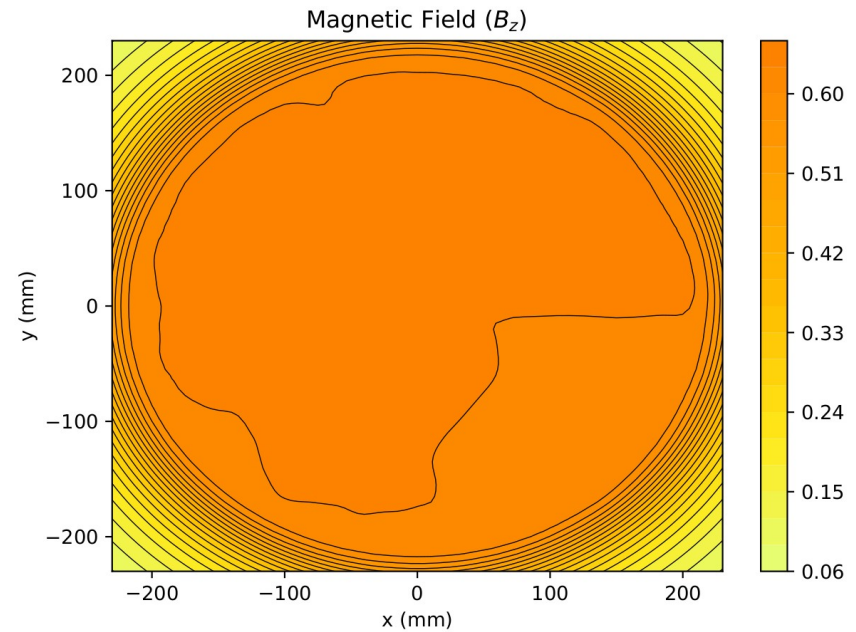
```
x y z Bx By Bz
-230 -230 -20 -2.10E-02 -2.13E-02 8.64E-02
-230 -230 -15 -1.59E-02 -1.62E-02 8.84E-02
-230 -230 -10 -1.07E-02 -1.09E-02 9.00E-02
-230 -230 -5 -5.39E-03 -5.47E-03 9.09E-02
-230 -230 0 2.38E-12 2.14E-12 9.12E-02
```

- İnterpolasyon yöntemiyle manyetik alan bileşenleri ve manyetik alan indeksi simülasyonu yapıldı.
- Denge şartı  $0 < n < 1$  sağlanıyor.

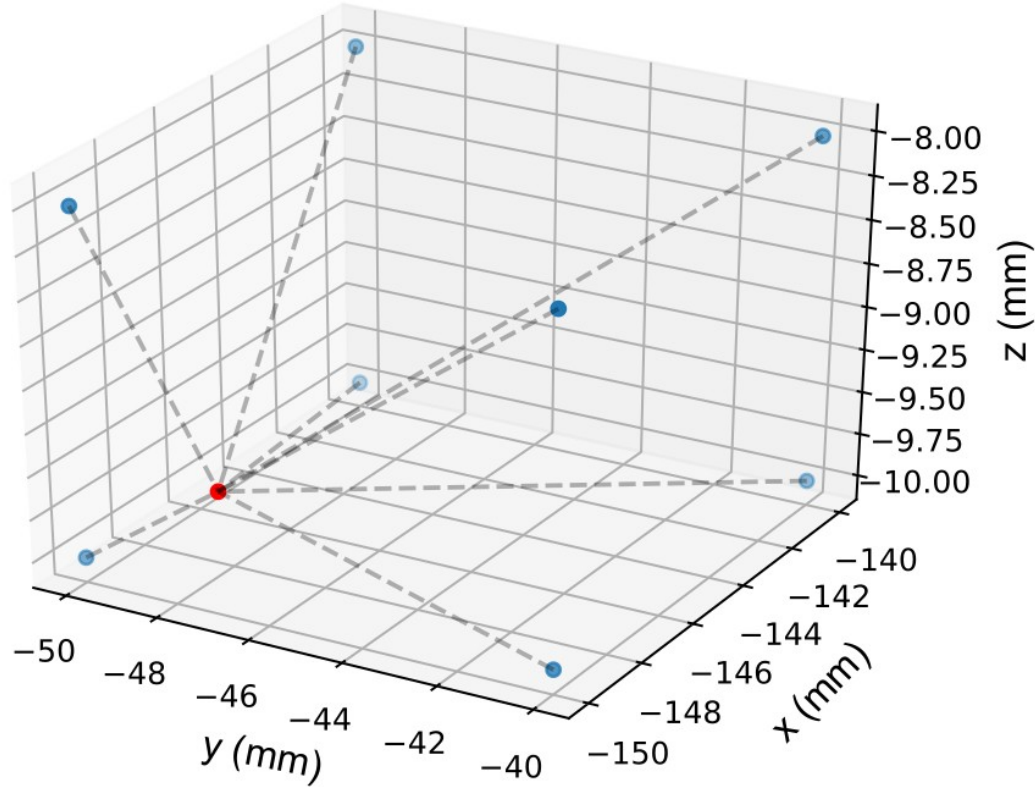
$$x = x_{max} \sin(\sqrt{1-n} \omega_0 t) \quad z = z_{max} \sin(\sqrt{n} \omega_0 t)$$

$$\omega_r = \omega_0 \sqrt{1-n} \quad \omega_z = \omega_0 \sqrt{n}$$

$$n = -\frac{r_0}{B_z(r_0)} \frac{\partial B_z}{\partial x}$$

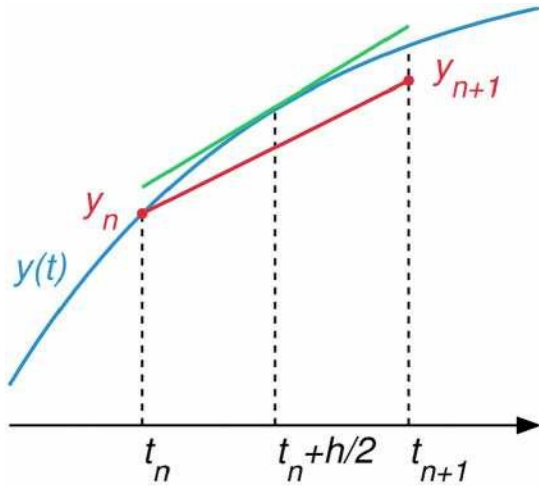


# Kutuplar Arasında Manyetik Alan Hesabı



- Gerçekçi bir yörünge simülasyonu için kutuplar arasındaki her noktada manyetik alanı hesaplamak gerekli.
- Manyetik alan değerlerini hesaplamak için ters mesafe ağırlıklandırma (inverse distance weighting method) yöntemi kullanıldı.

# Geliştirilmiş Euler Yöntemiyle İyon Yörünge Simülasyonu



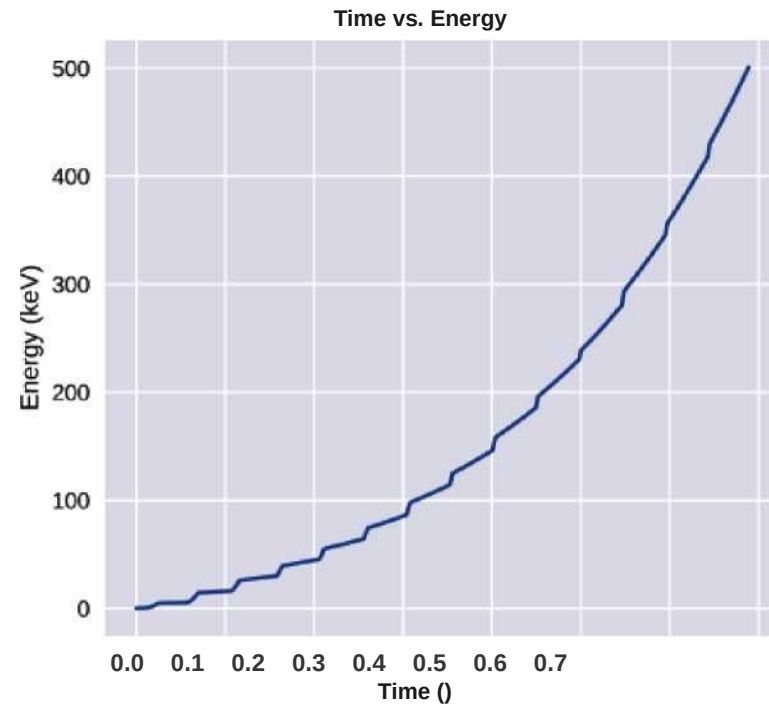
$$\frac{dr}{dt} = f(t, r) = v \quad r(t_n) = r_n$$

$$r_{n+1} = r_n + k_2 \Delta t$$

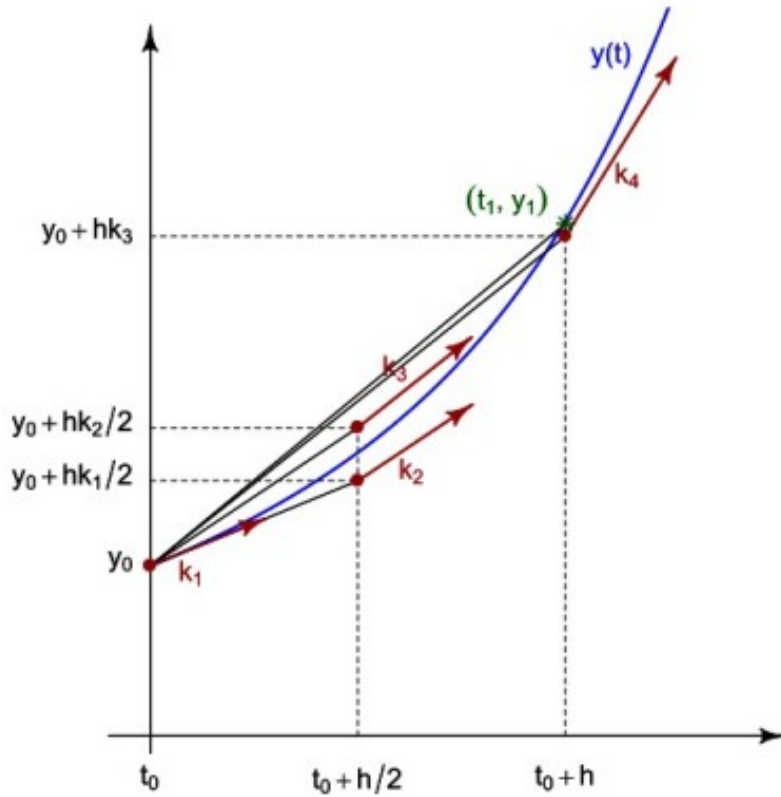
$$k_1 = \Delta t f(t_n, r_n) \quad k_2 = \Delta t f(t_n + \Delta t/2, r_n + k_1 \Delta t/2)$$

$$r_{n+1} = r_n + \Delta t f(t_n + \Delta t/2, r_n + k_1 \Delta t/2) + O((\Delta t)^3)$$

- İyonların pozisyon ve hızlarını hesaplamak için ilk olarak geliştirilmiş Euler yöntemi denendi.
- İyonlar hep aynı potansiyel farka maruz kalsa da enerji artışı eşit olmadı.



# RK4 Yöntemiyle İyon Yörünge Simülasyonu



- İyonların konumlarını tahmin etmek ve yörünge simülasyonunu elde etmek için başka bir entegrasyon yöntemi olan 4. derece Runge Kutta (RK4) uygulandı.
- Geliştirilmiş Euler Yönteminden 2 merteye daha fazla hassasiyete sahip.
- RK4 hata tahmininde 5. merteye kadar terimleri içerirken, geliştirilmiş Euler yönteminde 3. merteye kadar ilerler.

$$\frac{dr}{dt} = f(t, r) = v \quad r(t_n) = r_n$$

$$k_1 = \Delta t f(t_n, r_n) \quad k_2 = \Delta t f(t_n + \Delta t/2, r_n + k_1/2)$$

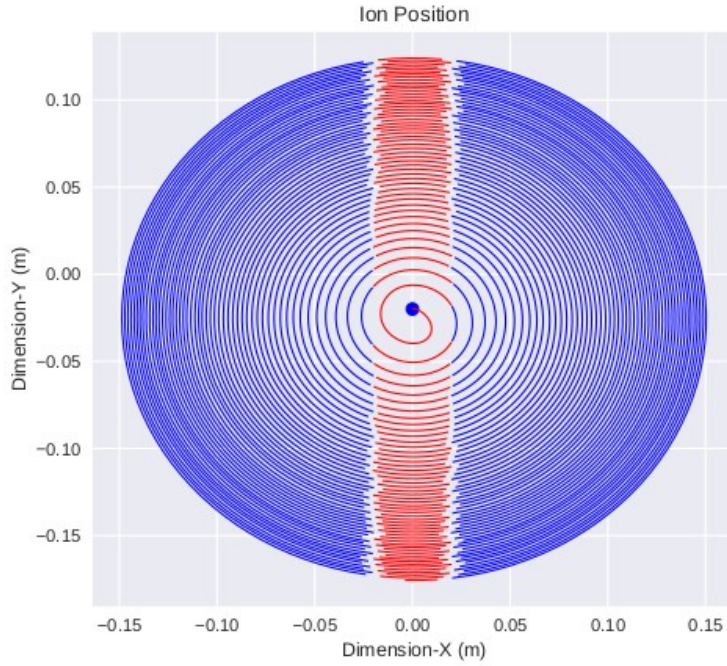
$$k_3 = \Delta t f(t_n + \Delta t/2, r_n + k_2/2) \quad k_4 = \Delta t f(t_n + \Delta t, r_n + k_3)$$

$$k = 1/6(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

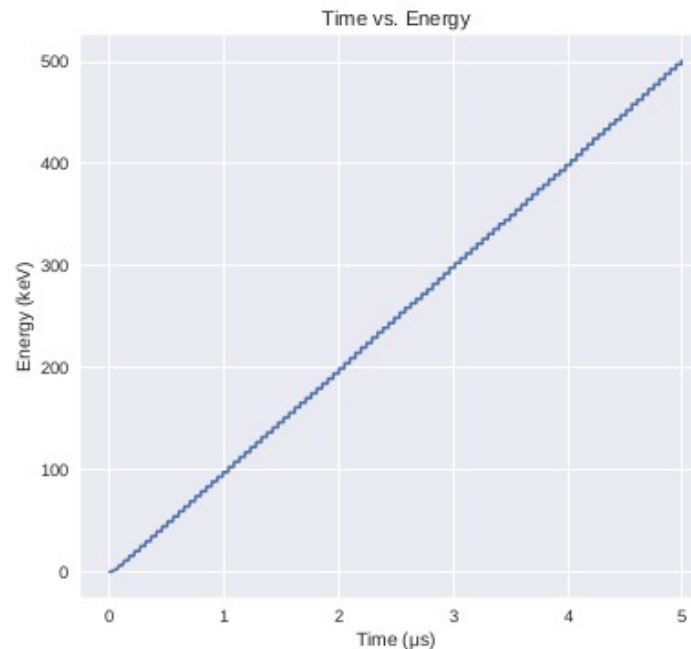
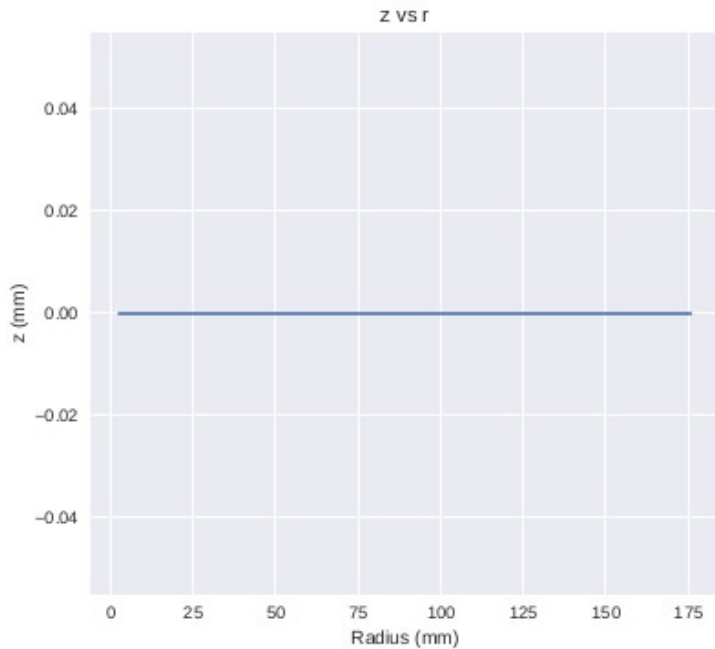
$$r_{n+1} = r_n + 1/6(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) + O((\Delta t)^5)$$



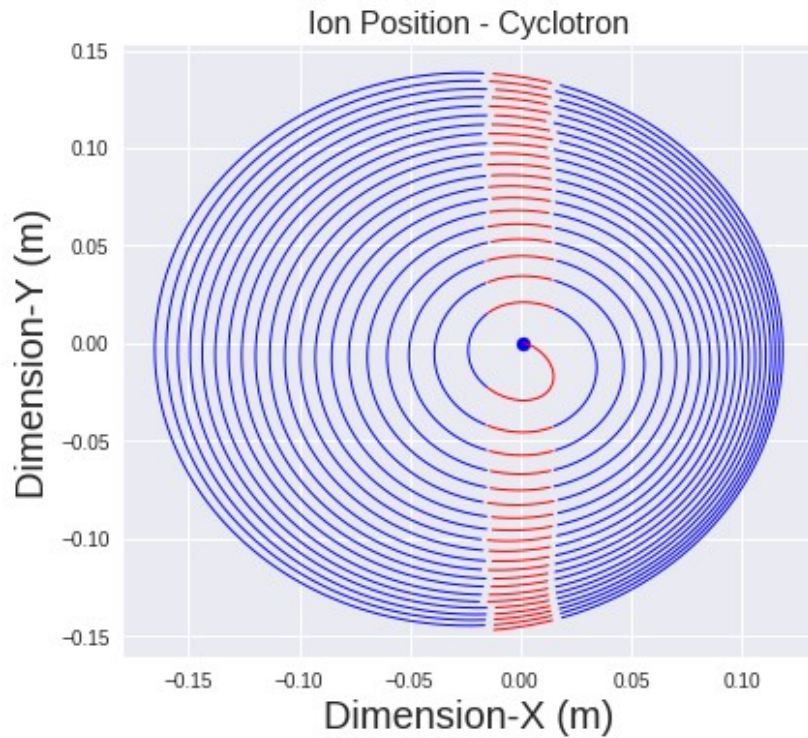
# Sabit Manyetik Alanla Yörünge Simülasyonu(RK4 ile)



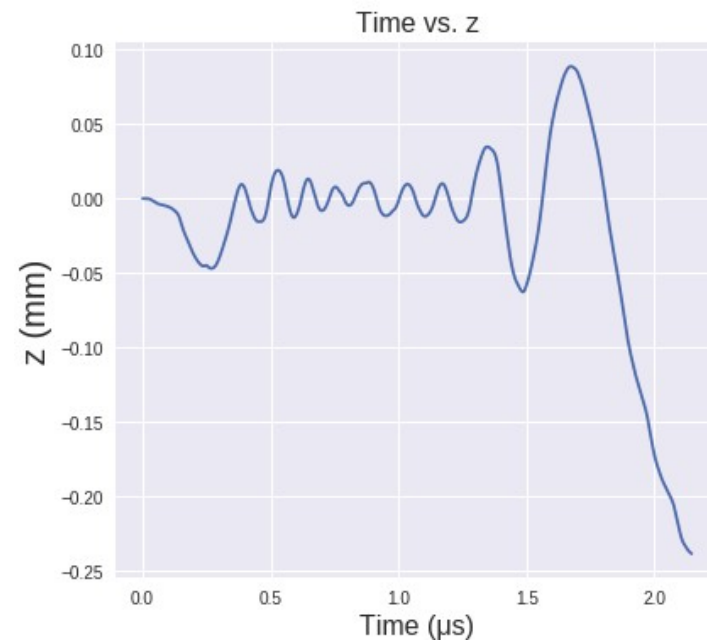
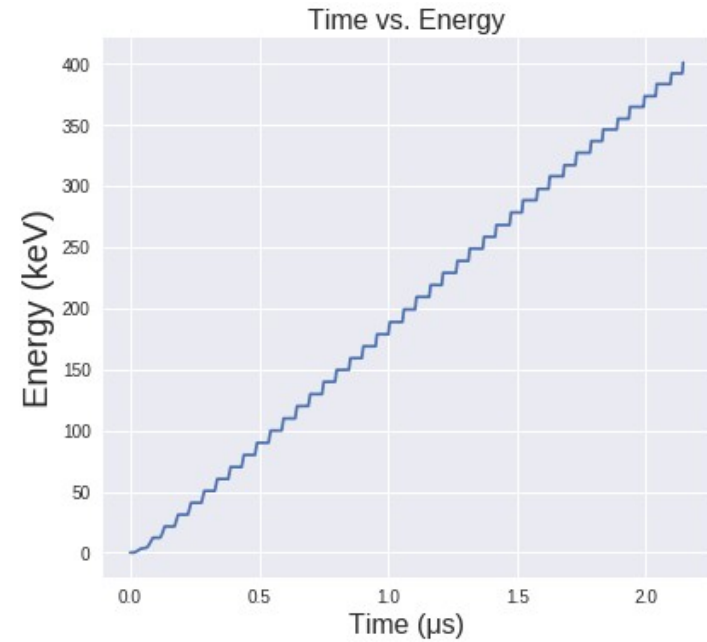
- İyon yörüngesi spiral.
- Enerji artışları eşit.
- Betatron salınımı yok.
- RK4 iyi sonuç verdi.



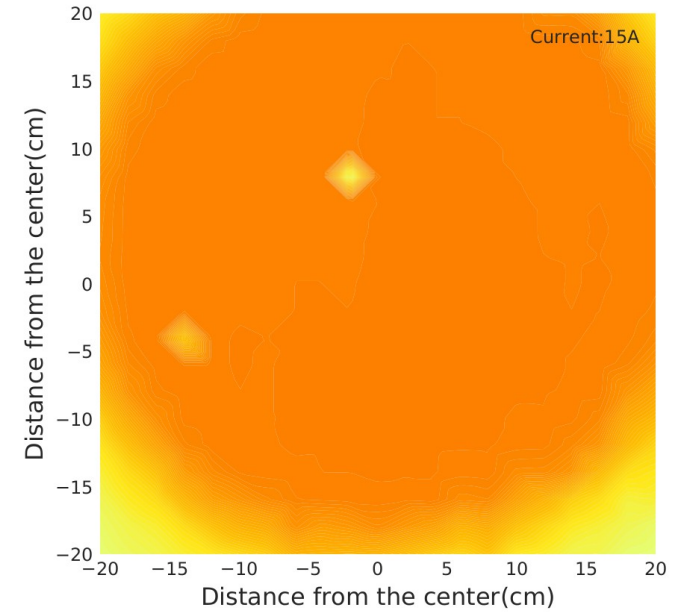
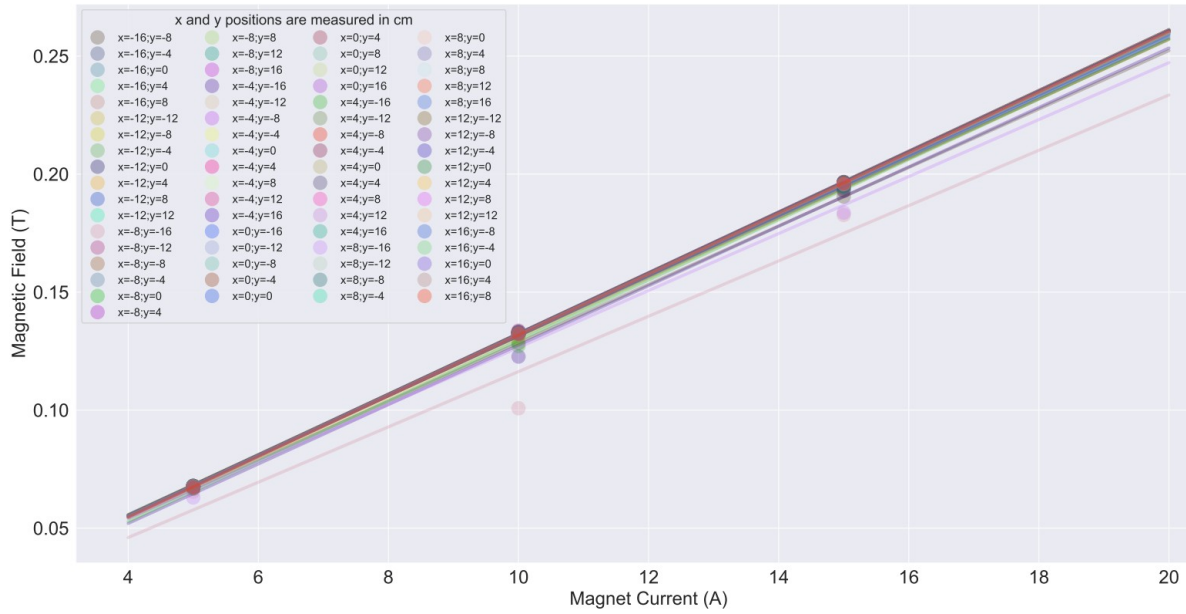
# İyon Yörüngesi-RADIA'dan Elde Edilen Manyetik Alanla



- İyon yörüngesi beklendiği gibi spiral.
- Enerji artışları eşit.
- Betatron salınımları gözlemlendi
- Merkez sağa kaymış durumda.  
(Radia'da yapılan geometrik tasarımdan kaynaklı olduğunu düşünüyoruz.)

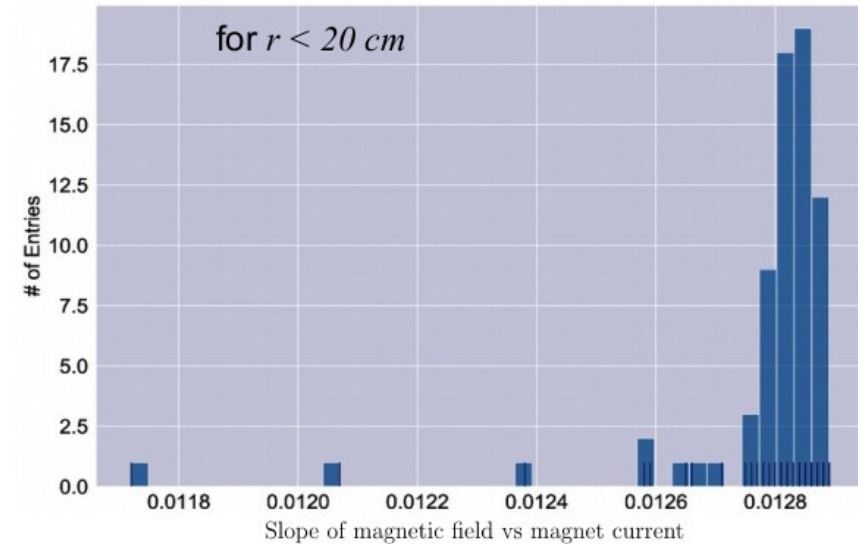


# Manyetik Alan Ölçümü ve Sonuçlar



- Manyetik alan değerleri 5A, 10A ve 15A için sırasıyla 4cm, 2cm ve 2cm aralıklarla ölçüldü.
- Kutuplar arasındaki manyetik alan beklenen değerlerde ve homojene yakın.
- Ölçülen manyetik alan değerlerinin uygulanan akımla orantısına bakıldığında 0.013 etrafında toplandığı görüldü. (Naive Ampere's Law)

$$\frac{B}{I} = \frac{\mu_0 N}{g} = \frac{(1.26 \times 10^{-6})(540)}{0.05} = 13.6 \times 10^{-3} \text{T/A}$$



# Yakın Gelecek Planları

- Otomatize edilmiş manyetik alan ölçüm sistemi
- Vakum testleri
- Özel yapım bir RF güç yükseltecinin imalat ve bağlantısı
- Soğutma sisteminin kurulum ve testleri
- İyon kaynağı tasarım ve imalatı



# Dinlediđiniz İçin Teřekkürler!

