



**T.C.**  
**KALKINMA BAKANLIĞI**  
**YAYGINLAŞTIRILMIŞ ULUSAL VE ULUSLARARASI PROJE (YUUP)**

**DPT2006K-120470**  
**TÜRK HIZLANDIRICI MERKEZİNİN**  
**TEKNİK TASARIMI VE TEST**  
**LABORATUARLARI**

**THM SASE Serbest Elektron Lazeri Tesisi**  
**Teknik Tasarım Raporu**

18 Mart 2015

Ankara

## Sunuş

Hızlandırıcı ve dedektör teknolojileri yüzyılımızın jenerik teknolojilerindedir. Hızlandırıcı ve dedektör teknolojilerini ülkemizde geliştirmek, Ar-Ge ve teknoloji geliştirme konularında etkin ve yaygın olarak kullanımını sağlamak üzere tasarım ve kurulum çalışmaları Kalkınma Bakanlığı desteği ile sürdürülen Türk Hızlandırıcı Merkezi çalışmaları 2000 yılında tamamlanan Fizibilite ve 2005 yılında tamamlanan Genel Tasarım çalışmalarının ardından 2006 yılında başlatılan III. aşama çalışmaları Ankara Üniversitesi koordinatörlüğünde Gazi, İstanbul, Boğaziçi, Doğuş, Uludağ, Osmangazi, Dumlupınar, Erciyes, Niğde, Süleyman Demirel Üniversiteleri ve Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nün katılımı ile Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslararası Proje (YUUP) formatında "Türk Hızlandırıcı Merkezinin Teknik Tasarımı ve Test Laboratuvarları" başlığı ile sürdürülmüştür.

Proje kapsamında THM'nin ilk tesisi olarak Elektron hızlandırıcısına dayalı serbest elektron lazeri ve frenleme ışınımı tesisinin (TARLA) kurulumunun yanısıra, 3. nesil Sinkrotron Işınımı Tesisinin (TURKAY), 4. nesil Kendiliğinden Genlik Artırımlı (SASE) Serbest Elektron Lazeri Tesisinin (TURKSEL), Proton Hızlandırıcı Tesisinin (TURKPRO) ve Parçacık Fabrikası Tesisinin (TURKFAB) Teknik Tasarım raporları hazırlanmıştır.

Bu raporda, 4. nesil Kendiliğinden Genlik Artırımlı (SASE) Serbest Elektron Lazeri Tesisinin teknik tasarım çalışmalarının sonuçları sunulmuştur. Bu çerçevede elektron kaynağı, hızlandırıcı kaviteleler, demet dinamiği, alt sistemler, undulator magnetler, lazer demet hatları, foton diyagnostiği, deney istasyonları ve tesisin araştırmna potansiyeli kapsamlı şekilde ele alınmıştır. Ayrıca, tesisin hayata geçirilebilmesi için gerekli süre, ödenek ve personel ihtiyacı konusunda öngörülerde bulunulmuştur.

Saygılarımızla sunarız.



Doç. Dr. Hatice Duran Yıldız  
Ankara Üniversitesi  
THM SASE SEL Koordinatörü



Prof. Dr. Ömer Yavaş  
Ankara Üniversitesi  
THM Projesi Yürütücüsü

## Koordinatörler

Doç. Dr. Hatice DURAN YILDIZ

Prof.Dr. İlhan TAPAN (Koordinatör V.)

## Yazarlar

Doç. Dr. Hatice DURAN YILDIZ (Ankara Üniversitesi)

Prof.Dr. İlhan TAPAN (Uludağ Üniversitesi)

Yard.Doç.Dr. Raşit ÇAKIR (Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi)

## THM SASE Serbest Elektron Lazeri Tesisi

### Proje Üyeleri

- Doç.Dr. Hatice DURAN YILDIZ (**Koordinatör**) (Ankara Üniversitesi)
- Prof.Dr. İlhan TAPAN (**Koordinatör V.**) (Uludağ Üniversitesi)
- Doç.Dr. Zafer ÜSTÜNDAĞ (Dumlupınar Üniversitesi)
- Doç.Dr. Alper Tolga ÇOLAK (Dumlupınar Üniversitesi)
- Yard. Doç.Dr. Raşit ÇAKIR (Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi)
- Yard. Doç. Dr. Osman Çağlar AKIN (Fatih Üniversitesi)
- Uzman İlker YILDIZ (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)
- Dr. Özkan ŞAHİN (Uludağ Üniversitesi)
- Uzman Gökhan COŞKUN (Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi)
- Doktora Öğrencisi Mustafa Biçer (Ankara Üniversitesi)
- Doktora Öğrencisi Ayşe BAT (Gaziosmanpaşa Üniversitesi)
- Yüksek Lisans Öğrencisi Dilaver PORSUK (Dumlupınar Üniversitesi)

## İçindekiler

Önsöz .....	10
Özet.....	11
<b>1 TÜRK HIZLANDIRICI MERKEZİ SASE SEL TESİSİ PROJE RAPORU .....</b>	<b>12</b>
1.1 GİRİŞ.....	12
1.2 Hızlandırıcılara Dayalı Işınım Kaynakları .....	18
1.3 Serbest Elektron Lazerleri .....	19
1.4 Kendiliğinden Genlik Artırmalı Serbest Elektron Lazeri'nin (SASE-SEL) Tarihsel Gelişimi.....	20
Kaynaklar: .....	21
<b>2 TÜRK HIZLANDIRICI MERKEZİ, SASE SEL TESİSİNİN GENEL PLANLAMASI .....</b>	<b>22</b>
2.1 Giriş .....	22
2.2 Enjektör Sistemi .....	23
2.3 Lineer Hızlandırıcılar .....	24
2.4 Salındırıcılar .....	26
2.5 Foton Demet Hatları .....	27
2.6 Deney İstasyonları.....	27
Kaynaklar: .....	28

<b>3 THM SASE-SEL İÇİN ELEKTRON HIZLANDIRICISI .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1 Giriş .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2 THM SASE-SEL Genel Tanıtım.....</b>	<b>29</b>
3.2.1 Elektron Tabancasında Katot Seçenekleri .....	29
3.2.2 SASE-SEL’de Tabanca Yapısı ve Parametre Seçenekleri.....	30
3.2.2.1 RF Tabanca Sisteminde Alanların Modellenmesi .....	31
3.2.2.2 Tabanca Kavite Yapısının Modellenmesi.....	33
3.2.2.2.1 Parametre Optimizasyonu.....	36
3.2.2.2.1.1 1½ - Hücrelik Yapı için Optimizasyon .....	36
3.2.2.2.1.2 3½ - Hücrelik Yapı İçin Optimizasyon.....	39
3.2.2.2.2 3½ - Hücrelik Kavite Sisteminde Elektrik ve Magnetik Alanlar .....	44
3.2.2.2.3 3½ - Hücrelik Kavite Sisteminde Pik Elektrik ve Magnetik Alanların Belirlenmesi .....	45
3.2.2.2.4 3½ - Hücrelik Kavite Sisteminde Frekansın Belirlenmesi .....	46
3.2.2.2.4.1 3½ - Hücrelik Kavite Sisteminde Frekans Hatalarının Belirlenmesi.....	47
3.2.2.2.4.2 3½ - Hücrelik Kavite Sisteminde Bağlaşım Sabitinin Belirlenmesi.....	48
3.2.2.2.5 Kavite ve Alan Performansını Sınırlayan Etkenler .....	50
3.2.2.2.5.1 Multipacting.....	51
3.2.2.2.5.2 Yüksek Mertebeden Modlar (HOM) .....	52
3.2.2.2.5.3 Lorentz Force Detuning (LFD).....	53
3.2.2.2.5.4 Mekanik Sistem Hataları.....	55
3.2.2.2.5.4.1 Kavite Yüzeyi Hataları.....	55
3.2.2.2.5.4.2 Mikrofonik Gürültü (Microphonics).....	56
3.2.2.3 Tabanca SC Kavitesinin Modelleme Sonuçları.....	56
3.2.3 Katottan Çıkan Elektron Demet Davranışının Modellenmesi .....	58
3.2.3.1 Astra İle Yapılan Modelleme Çalışmaları .....	59
3.2.3.1.1 Tabancada Elektron Demetinin Modellenmesi .....	59
3.2.3.1.1.1 Demet Yayınım Etkileri.....	62
3.2.3.1.1.1.1 Uzay Yüğü Etkileri.....	63

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

3.2.3.1.1.1.2	Wake-Field Etkileri .....	65
3.2.3.1.2	Tabanca Sistemi İçerisinde Demetin Faz Uzayındaki Davranışı .....	65
3.2.3.1.3	Tabancada Solenoidin Modellenmesi.....	70
3.2.3.1.4	PS –VIEWER Programı İle Elde Edilen Sonuçlar .....	72
<b>3.3</b>	<b>Katodun Özellikleri.....</b>	<b>74</b>
<b>3.4</b>	<b>Fotokatot Lazer .....</b>	<b>78</b>
<b>3.5</b>	<b>İşletim Esnekliği ve Gelecek Opsiyonları.....</b>	<b>78</b>
<b>3.6</b>	<b>Enjektör.....</b>	<b>78</b>
3.5.1	Genel Görünüm .....	79
<b>3.7</b>	<b>Paketçik Sıkıştırıcı Sistemi ve Simülasyonları.....</b>	<b>79</b>
<b>3.8</b>	<b>Ana Hızlandırıcı Bölümü (Lineer Hızlandırıcı -Linak).....</b>	<b>82</b>
3.8.1	Ana Hızlandırıcı Kaviteleri.....	85
3.8.2	Kavite İçi Yardımcı Sistemler .....	93
3.8.3	Sistemde Çalışma Mekanizmasını Etkileyen Kararsızlıklar .....	93
<b>3.9</b>	<b>Hızlandırıcı Ek-Teknik Sistemleri .....</b>	<b>94</b>
3.9.1	Vakum Sistemi.....	94
3.9.2	Düşük Seviye Radyo Frekans Sistemleri ve Toleranslar .....	95
3.9.3	RF Düzeneginin Kontrol Sistemi.....	97
3.9.4	Magnetler .....	98
<b>3.10</b>	<b>Demet Diyagnostiği .....</b>	<b>98</b>
<b>3.11</b>	<b>Simülasyonlar .....</b>	<b>99</b>
<b>Kaynaklar:</b>	<b>.....</b>	<b>102</b>
<b>4</b>	<b>SASE-SEL İÇİN SALINDIRICI YAPISI .....</b>	<b>104</b>

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

<b>4.1 Giriş</b> .....	<b>104</b>
4.1.1 SASE-SEL İşletiminin Prensipleri .....	104
4.1.2 THM SASE-SEL İçin Tasarım Kriterleri .....	104
<b>4.2 Salıdırıcı Sistemleri</b> .....	<b>104</b>
4.2.1 Salıdırıcı Parametreleri Seçimi .....	105
4.2.2 Temel Tolerans Gereksinimleri .....	107
4.2.3 Salıdırıcı Kısımları .....	107
<b>4.3 THM SASE SEL Parametreleri ve SEL Optimizasyonu</b> .....	<b>112</b>
4.3.1 SASE-SEL Parametrelerinin Analitik Tanımı .....	118
4.3.2 SASE-SEL'in Işınım özellikleri .....	121
<b>4.4 Demetin Dışarı Alınması (Beam Dump)</b> .....	<b>122</b>
4.4.1 Zırhlama .....	126
<b>4.5 Gelecekte Yapılabilecek Olası Genişletmeler ve İlave Donanımlar</b> .....	<b>128</b>
<b>4.6 İnsan Gücü ve Maliyet Gereksinimlerinin Özeti</b> .....	<b>128</b>
<b>Kaynaklar:</b> .....	<b>134</b>
<b>5 THM SASE SEL TESİSİNİN DEMET HATLARI VE ARAŞTIRMA POTANSİYELİ</b> .....	<b>135</b>
<b>5.1 Giriş</b> .....	<b>135</b>
<b>5.2 Foton Demet Diyagnostikleri</b> .....	<b>135</b>
5.2.1 Demet Özelliklerinin Belirlenmesi .....	135
5.2.1.1 Anlık Diyagnostik Araçlar.....	141
5.2.1.2 Zaman bölgesi özellikleri .....	143
5.2.1.2.1 Çapraz korelasyon teknikleri .....	143
5.2.1.2.2 Otokorelasyon Teknikleri .....	145



## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

<b>5.3</b>	<b>THM SASE SEL Tesisi Uygulama Potansiyeli.....</b>	<b>146</b>
<b>5.4</b>	<b>THM SASE-SEL Deney İstasyonları Planlaması.....</b>	<b>150</b>
5.4.1	Deney Odalarının Planlanması .....	150
5.4.2	THM SASE-SEL’de Öngörülen Kimya ve Plazma Fiziği Araştırmaları .....	151
	<b>Kaynaklar: .....</b>	<b>152</b>
<b>6</b>	<b>THM SASE SEL TESİSİ İÇİN ALT YAPI SİSTEMLERİ VE YARDIMCI SİSTEMLER.....</b>	<b>153</b>
<b>6.1</b>	<b>Giriş .....</b>	<b>153</b>
<b>6.2</b>	<b>Genel Teknik Altyapı Sistemi.....</b>	<b>153</b>
6.2.1	Magnet Su Soğutması .....	153
6.2.2	Isıtma, Havalandırma ve Klimalandırma .....	154
<b>6.3</b>	<b>THM SASE-SEL Projesi Kapsamında Binanın Projelendirilmesi .....</b>	<b>154</b>
<b>6.4</b>	<b>Radyasyon Güvenliği .....</b>	<b>157</b>
<b>6.5</b>	<b>Genel Güvenlik .....</b>	<b>157</b>
<b>7</b>	<b>SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>159</b>
<b>7.1</b>	<b>Dünyadaki diğer SASE-SEL Laboratuvarları ile olan ilişkiler .....</b>	<b>159</b>
<b>7.2</b>	<b>Uluslar arası Bilimsel Danışma Komitesi’nin THM SASE SEL Tesisi Üzerine Önerilerinin Değerlendirilmesi .....</b>	<b>160</b>
<b>7.3</b>	<b>THM SASE SEL Tesisinin Ülkemiz için Önemi .....</b>	<b>161</b>
<b>7.4</b>	<b>Sonuç ve Öneriler .....</b>	<b>163</b>
	<b>Teşekkür.....</b>	<b>165</b>



## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

<b>EKLER.....</b>	<b>166</b>
Ek-1 .....	166
Ek-2 .....	168
Ek-3 .....	170
Ek-4 .....	177
Ek-5 .....	178
Ek-6 .....	179

## Önsöz

Hızlandırıcı sistemleri günümüz teknolojisinin en önemli uygulamalarını içermektedir. Uygulamalarla teknolojik araştırma ve gelişmeler ileri taşınmakla kalmayıp yeni keşiflere de önderlik etmektedir. Hızlandırıcı sistemlerinin çalışma prensiplerinin iyi anlaşılması ile hem yeni oluşturulacak laboratuvarlarda çeşitli ışınım kaynaklarının üretilmesine kaynaklık edilebileceği gibi ülkemiz teknolojisine değerli katkılar sunulmasında pay sahibi olunacaktır. Günümüzde dünyanın önde gelen laboratuvarları, süperiletken ve normal iletken hızlandırıcı kavitelelerin yardımıyla 14 GeV elektron enerjilerine ulaşabilmeyi başarmış durumdadır. Buradan, koherent, yüksek pik akımına sahip, yüksek güçlü nano dalgaboylu lazer ışını elde edilebilmektedir. Nano dalgaboylu, X-ışınları bölgesinde elde edilen bu lazer ışını ile şeffaf olan su içerisindeki protein yapılarının araştırılması, farklı yapıların manyetik özelliklerinin araştırılması, materyallerin yüzey analizleri, nano dalgaboylu transistör içeren çiplerin üretimi, şeffaf alüminyum üretimi gibi çalışmalar yapılabilmektedir. Ülkemizde, Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) Projesi kapsamında yapılacak kendiliğinden genlik artırımı serbest elektron lazer (SASE SEL) üretim sisteminin çalıştırılabilmesiyle 1 – 6 GeV enerjilerdeki elektron demetleri ile 0.1 – 100 nm dalga boyu aralığında lazer üretiminin başarılması öngörülmektedir. Proje kapsamında elektron üretilecek olan tabanca sistemi, süperiletken hızlandırıcı kaviteleler içeren ana hızlandırıcı bölümü ve lazerin elde edildiği kısım olan undulatör sistemi ve foton diyagnostiği çalışılmıştır, bu raporda yapılan modelleme çalışmaları sonucunda elde edilen sistem parametreleri ve detaylı çalışmalar sunulmaktadır.

## Özet

Yüksek enerjili, yoğun elektron demetlerinin çok kutuplu salındırıcı magnetlerden tek yönlü geçirilmesi yolu ile elde edilebilen Kendiliğinden Genlik Artırımlı Serbest Elektron Lazeri (SASE-SEL) yüksek pik gücüne sahip (GW), küçük SEL dalgaboylu (nm), ayarlanabilir dalgaboylu, küçük atma uzunluklu (fs), koherent ve monokromatik lazer ışınından oluşmaktadır. Ortalama akı ( $\sim 10^{21}$  foton/s), pik akısı ( $\sim 10^{26}$  foton/s), parlaklık ( $\sim 10^{22}$  foton/s/mrad<sup>2</sup>/0.1%bg) ve pik parlaklığı ise ( $\sim 10^{30} - 10^{31}$  foton/s/mrad<sup>2</sup>/0.1%bg) değerleri düzeyindedir. Dünyanın ileri teknolojisine sahip ülkeler, yüksek akı ve pik parlaklığına sahip, 4. ve 5. nesil ışınları üretilen çeşitli materyal bilimi, genetik, sağlık, endüstri, bilimsel ve savunma gibi daha birçok alanlarda kullanarak daha ileri teknolojileri üretme ve bilgiyi ileri nesillere aktarma fırsatı yakalamaktadırlar. Bu konularda ülkemizin geri kalmaması için 4. Nesil ışınım kaynağı projesi olan Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) SASE SEL Projesi kapsamında yapılan modelleme ve inceleme, araştırma çalışmaları proje raporunda açıklanmaktadır. Çalışmalar elektronların söküldüğü elektron tabancasından başlayarak, elektron demetlerinin süperiletken kavitelelerden geçerken hızlandırılması, demetin sıkıştırılması, hızlı ve sıkıştırılmış demetin manyetik salındırıcı yapılardan geçerken lazerin oluşması, enerjisi azalan elektron demetlerinin dışarı alınması, üretilen lazerin özelliklerinin belirlenmesi, aşamalarının modellenmesinden oluşmaktadır. Modelleme çalışmaları ile elde edilen optimize parametreler raporda sunulmaktadır. Bu çalışmalar sırasında radyo frekansı (RF) güç kaynakları, elde edilen lazer ışının özelliklerinin incelenmesi (diyagnostik) ve elde edilen lazerin ülkemizdeki kullanım alanları da detaylı şekilde verilmiştir.

# 1 TÜRK HIZLANDIRICI MERKEZİ SASE SEL TESİSİ PROJE RAPORU

## 1.1 GİRİŞ

Kendiliğinden genlik artırımı serbest elektron lazeri, elektron demetinin salındırıcı yapıya girdiğinde genliğinin giderek artması ve rölativistik hızlara ulaşan elektron demetinin foton yayınlaması ilkesine dayanır. Bu fotonların faz farkı olmadan üst üste binerek kaliteli, şiddetli bir lazer ışını üretilmesidir.

Kendiliğinden genlik artırımı serbest elektron lazerleri (SASE-SEL) elektromanyetik spektrumunda ultraviyole, yumuşak X-ışınları, sert X-ışınları bölgesini kapsar. Yapılan çalışmalarda ultraviyole ve X-ışınları bölgesini kapsayan bir lazer elde edilmesi ve kullanıcılara sunulması planlanmaktadır.

Serbest elektron lazerleri, sanayi ve bilimsel kullanımları açısından kullanım kolaylığı, yüksek gücü, yüksek şiddeti ve geniş kullanım alanlarına sahip olmasından dolayı, küçük işletme ve bilimsel araştırmalardan makro ölçekli yapılardaki araştırmalara kadar kullanılabilir en uygun lazer türüdür.

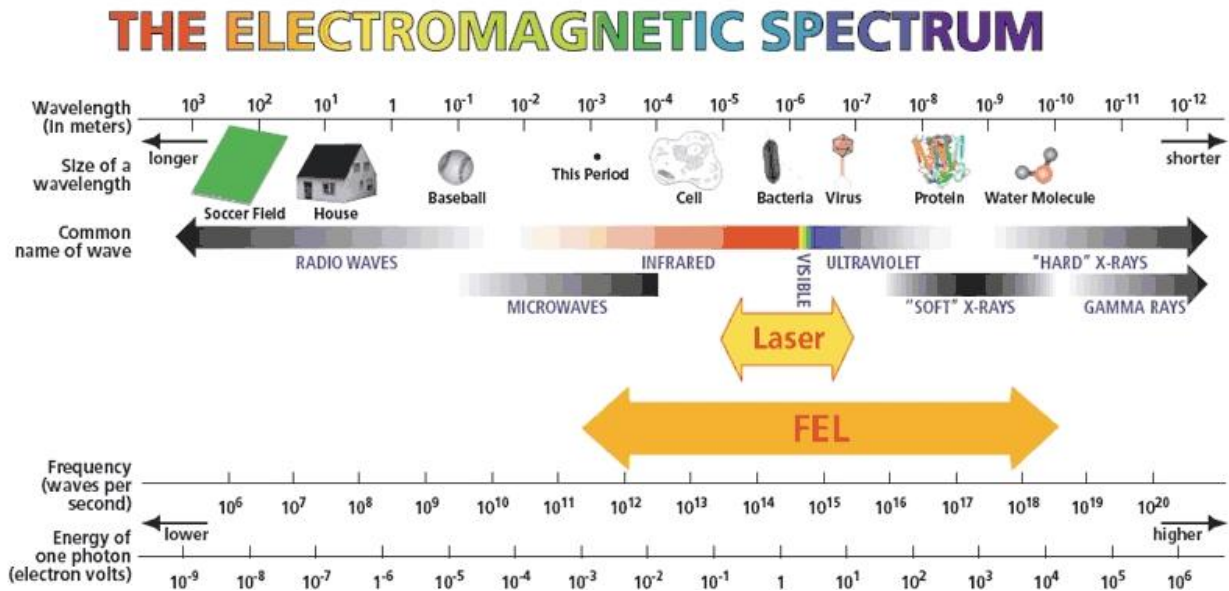
SASE SEL'in başlıca özellikleri;

- Ayarlanabilir dalga boyu (yumuşak X-ışınları – UV Bölgesi)
- Yüksek pik gücü (~ GW)
- Tekrarlanabilir kısa atımlar (piko veya fempto saniye mertebesinde)
- Aydınlik (Flux) ( $\sim 10^{22}$  foton/s), THM SASE-SEL'de bu değer  $10^{23}$  değerine yakın olması beklenmektedir.
- Pik foton aydınlığı ( $\geq 10^{26}$  foton/s), THM SASE-SEL'de bu değer  $10^{26}$  değeri civarında olması beklenmektedir.
- Ortalama Parlaklık ( $\geq 10^{22}$  foton/(s.mm<sup>2</sup>.mrad<sup>2</sup>.%0.1bg)) (linak'ta tekrarlama oranı 120 Hz kabul edilerek), THM SASE-SEL'de bu değer  $10^{23}$  değerine yakın olması beklenmektedir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

- Pik parlaklığı ( $\geq 10^{33}$  photon/(s.mm<sup>2</sup>.mrad<sup>2</sup>.%0.1bg) (linak'ta tekrarlama oranı 120 Hz kabul edilerek), THM SASE-SEL'de bu değerin  $10^{30}$  değerinden büyük olması beklenmektedir.
- Koherentlik
- Monokromatik yapı

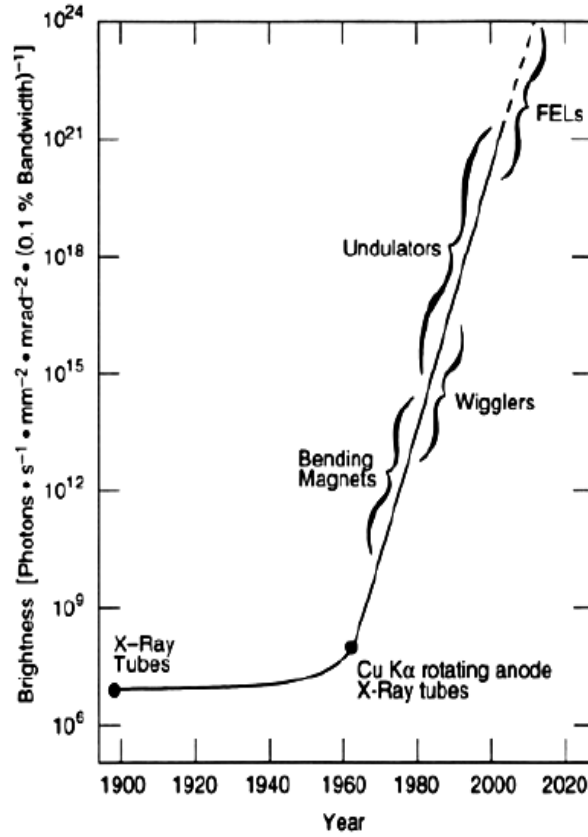
SASE SEL'in ayarlanabilir dalga boyuna (yumuşak X-Işınları – Ultraviyole (UV) Bölgesi) sahip olması uygulamalarda büyük kolaylık sağlamaktadır. Aşağıdaki şekilde (Şekil 1.1) elektromanyetik spektrumda serbest elektron lazeri bölgesi (mikrodalga, UV ve X-ışınları bölgesi) gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Elektromanyetik spektrum

Özellikle yüksek akı ve parlaklık serbest elektron lazerlerini diğer lazerlerden üstün kılan önemli özelliklerdir. Aşağıdaki şekilde yıllara göre parlaklığın artışı ve bu artış sırasındaki ortaya çıkan yeni teknolojilere göre serbest elektron lazerinin elde edilişi görülmektedir.

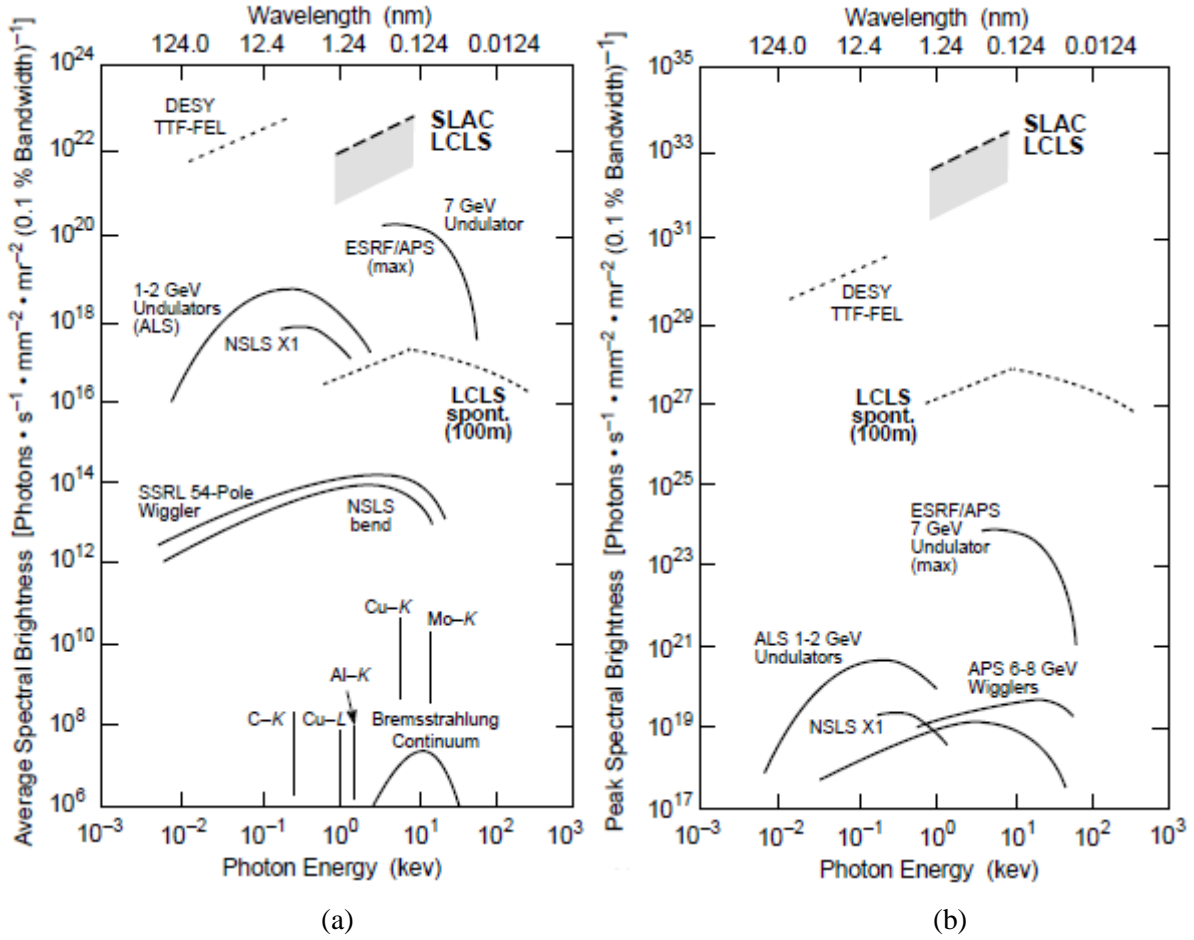
## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



Şekil 1.2. Yıllara göre parlaklığın artışı [1]

Yıllar içerisindeki teknolojik gelişmelere ve parlaklığın artışına göre daha yüksek demet enerjilerine çıkılabilmiş, demetler daha kompakt hale getirilebilmiş, salındırıcı, sıkıştırıcı ve odaklayıcı magnetlerin materyal ve ayarlanma özelliklerinin de gelişmesiyle elde edilen serbest elektron lazerlerinin gücü artmış ve daha küçük dalga boylarına inilebilme imkânı elde edilmiştir.

THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

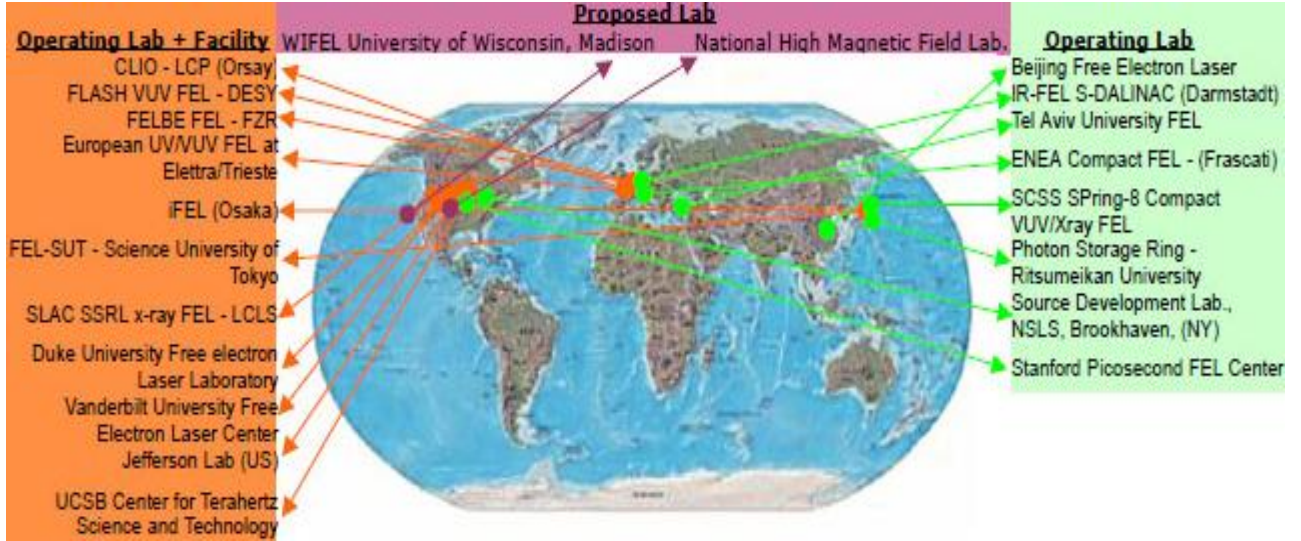


Şekil 1.3. Foton enerjisinin a)Ortalama spektral parlaklığa ve dalgaboyuna göre değişimi ve b)Pik spektral parlaklığa ve dalgaboyuna göre değişimi [1]

Yukarıdaki şekillerde Dünya'daki büyük bazı serbest elektron lazeri üreten laboratuvarların foton enerjisine göre ortalama parlaklık (spektral brightness (brilliance)) ve pik parlaklığa göre dalgaboyu ve foton enerjisinin değişimi görülmektedir.

Günümüzde, Dünya'daki serbest elektron lazeri üzerine halehazırda çalışan laboratuvar ve yapılandırılmış büyük sistemler - tesisler (turuncu renkli), projesi önerilen laboratuvarlar (pembe renkli) ve çalışan laboratuvarlar (yeşil renkli) aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



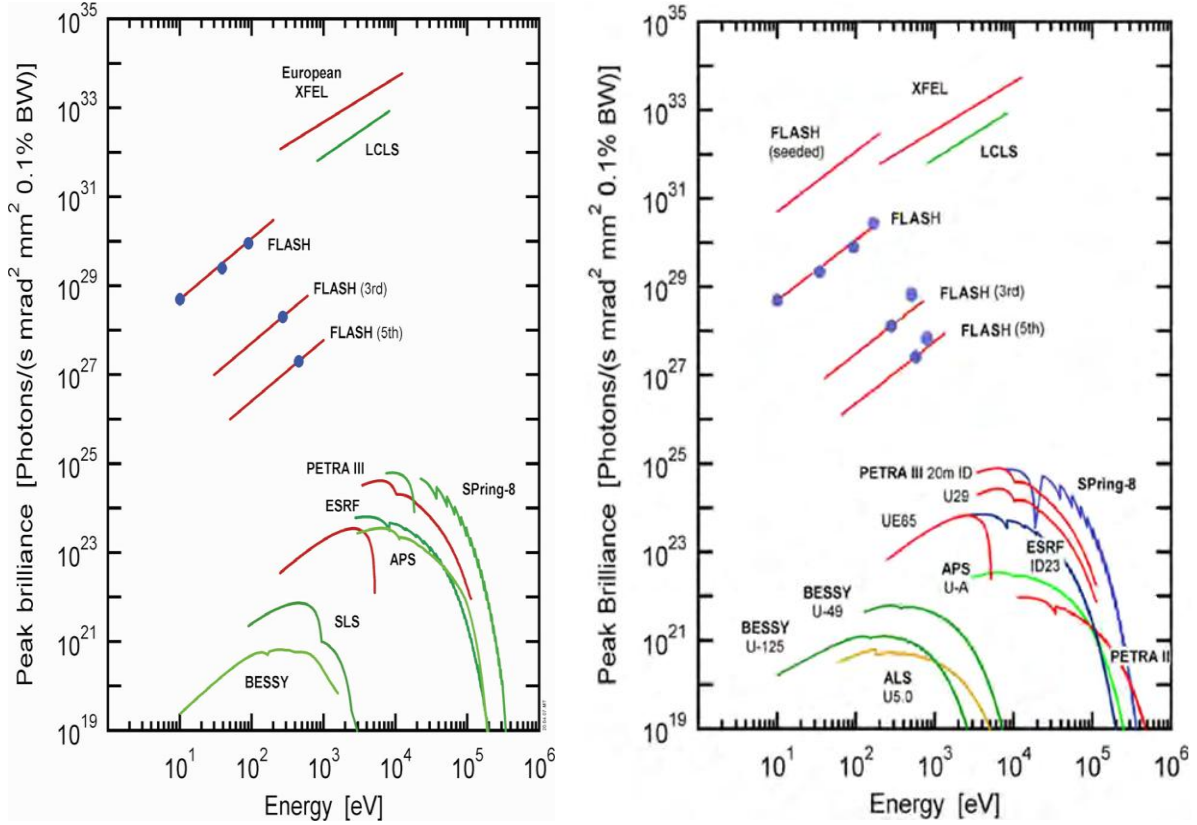


Şekil 1.4. Dünya genelinde çalışan ve projelendirilen serbest elektron lazeri laboratuvar ve tesisleri [2]

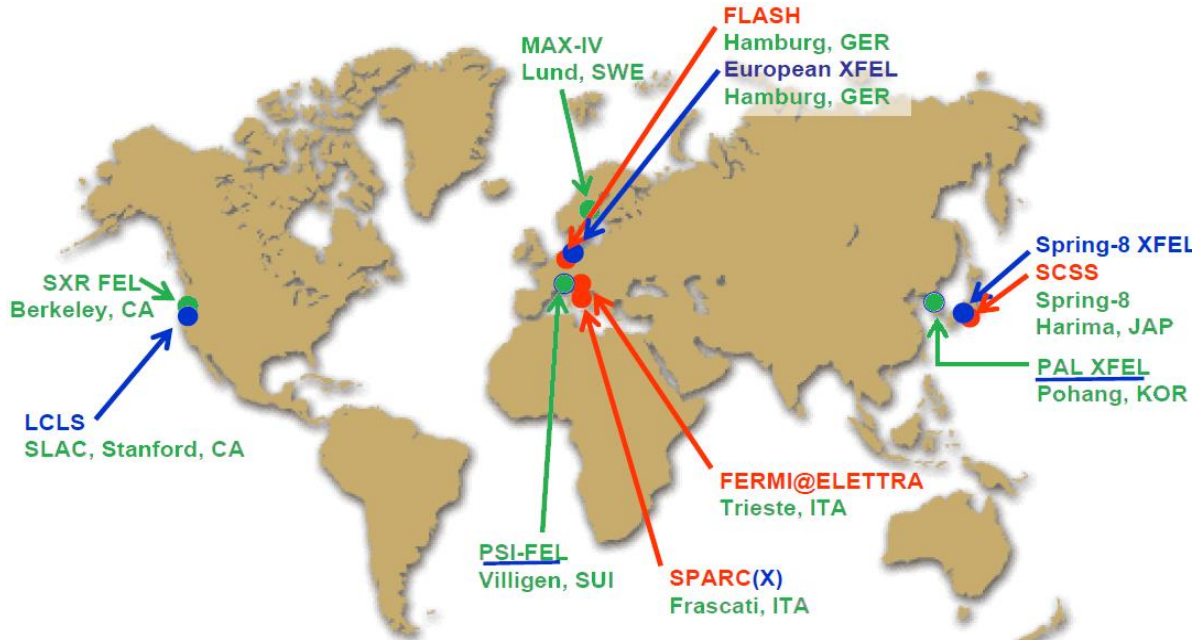
Kendiliğinden genlik artırımı serbest elektron lazerlerinden FLASH, Seeded (beslenmiş) FLASH (DESY, Almanya) ve European XFEL'deki pik parlaklıklarının enerjiye göre değişimi aşağıdaki şekilde (Şekil 1.5) incelenebilir. European XFEL'in pik parlaklığı  $10^{34}$  photon/(s.mm<sup>2</sup>.mrad<sup>2</sup>.%0.1bg) değerine ulaşması beklenmektedir. Dünya genelinde X-ışını laboratuvarları aşağıdaki şekilde (Şekil 1.6) görülmektedir.

Şekil 1.6'da gösterildiği üzere Amerika'daki LCLS (SLAC The Linac Coherent Light Source) Laboratuvarında gözlemlenen verilere dayanarak 0.15 nanometre'de (nm), SCSS'de (SPring-8 Compact SASE Source, Japonya) 49 nm'de ve FLASH (DESY, Almanya) Laboratuvarında ise 4.5 nm dalgaboyunda doyumuna ulaşılmıştır.

THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



Şekil 1.5. FLASH, Seeded FLASH ve European XFEL'deki pik parlaklıklarının enerjiye göre değişimi (Her band genişliği için her bir faz uzay hacminde bulunan fotonlar) [1]



Şekil 1.6. Dünya genelinde X-ışınları laboratuvarları [3]

Serbest elektron lazerlerinde enerjinin artışıyla parlaklıkta artmış ve nanometre dalga boylu lazer ışını elde edilebilmiştir. Bu ışınlar sürekli dalga (continuous wave - cw) ve atmalı yapı halinde iki farklı durumda çalışma imkanı vermektedir.

## 1.2 Hızlandırıcılara Dayalı Işınım Kaynakları

Sinkrotron ışınımı (SI) ilk olarak 1945 yılında gözlemlendikten sonra 1950’de dairesel elektron sinkrotronları kullanılmaya başlanmıştır. 1950’den 1970’lerin başına kadar dairesel elektron kaynakları yüksek enerji fiziği araştırmaları için geliştirilmiş SI kaynakları olarak kullanılmıştır. Bunlar “sıfırıncı nesil” SI kaynaklarıdır. Sıfırıncı nesil SI ışınımı şiddetli olmasına rağmen dolanımında yaptığı dalgalanmalarla spektral aralığında ve şiddetinde farklılıklar göstermekte ve her bir turda ışınımın kaynak noktasında değişiklikler ortaya çıkmaktadır. Sonraki yıllarda depolama halkalarında SI’nın spektrumu ve kaynak noktası sabit hale getirilmiş böylece uzun süreli demet ömrü elde edilmiştir. Bunlar “birinci nesil” ışınım kaynaklarıdır.

Birinci nesil ışınım kaynaklarında eğici magnetlerden elde edilen ışınım mevcut ışınımlardan ayarlanabilirliği  $10^{4-5}$  kat daha fazla ve sürekli bir ışınım idi. 1975 - 1978 yıllarında SI kaynakları geliştirilerek “ikinci nesil” ışınım kaynakları elde edilmiştir.

İkinci nesilde demet hattı olan halka da çok fazla eğici magnet içermektedir. Sonrasında demet hattına birkaç zigzaglayıcı ve salındırıcı magnetin yerleştirilmesiyle birkaç yüz nm-rad boyutunda yayınımla tasarlanmış ve SEL parlaklığı  $10^{16} \text{ photon}/(\text{s.mm}^2.\text{mrad}^2.\%0.1\text{bg})$  mertebesine kadar ulaşmıştır. 1980’li yıllarda zigzaglayıcı/salındırıcı magnetlerle yönelme sağlanarak 5-20 nm-rad elektron demet yayınımla,  $10^{20} \text{ photon}/(\text{s.mm}^2.\text{mrad}^2.\%0.1\text{bg})$  parlaklık değerinde “üçüncü nesil” ışınım kaynakları elde edilmiştir.

Üçüncü nesil ışınım kaynakları, düşük yayınımlı elektron demetleri elde etmek için tasarımı yapılmış salındırıcı (undulator) ve zigzaglayıcı (wiggler) magnetlerden oluşturulmuştur.

Dördüncü nesil ise serbest elektron lazerlerinin üretildiği, undulator magnetlerini de içeren sistemlerden oluşur. Yüksek foton demet parlaklığına sahip, kısa dalga boylarında ulaşılabilen

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

limitler ile hem lineer hızlandırıcılarda kısa dalga boylu serbest elektron lazerleri hem de düşük yayınlı sinkrotron halkasında ışılan demetler elde edilerek “4. nesil ışınım kaynakları” elde edilmiştir. Sert X-ışını (~2 Angström) elde etmek için yüksek enerjili, çevresi daha büyük depolama halkası veya lineer hızlandırıcı (linak) gerekmektedir. Süperiletken veya normaliletken kavitelerden oluşan lineer ana hızlandırıcılara dayalı kısa dalga boylu (nm mertebesinde) serbest elektron lazerlerin kısa atma süresi, pik parlaklığı, yüksek akı, yüksek güç (GW), ve koherentlik gibi özellikleriyle çok üstündür [4].

### 1.3 Serbest Elektron Lazerleri

Klasik lazerlerde lazer elde edilen hazne içerisinde (katı, sıvı veya gaz) dalga hareketi vardır ve haznedeki aynı frekansa sahip, genliği yükseltilmiş uyarılmış ışımaya indüklenir. Bu durumda uyarılmış ışımaya optik pompalama ile elde edilir. Serbest elektron lazerlerinde ise enerji alışverişi sınır elektronlarının kuantum geçişleri ile değil, manyetik alan içerisinde serbestçe salınan elektron demetindeki elektronlar ile ortam arasında gerçekleşen manyetik etkileşmeler aracılığıyla olur. Atomik enerji seviyeleri ile herhangi bir bağlılık bulunmadığından serbest elektron lazerleri geniş dalga boyu aralığını kapsayabilmektedir.

Serbest elektron lazerleri Compton ve Raman SEL olarak iki çeşittir. Raman SEL’de elektronlar arası etkileşmeler baskın olurken, Compton SEL’de rölativistik parçacıklar kullanıldığından etkileşmeler ihmal edilebilir.

Lazerin elde edildiği undulatör bölümünün çeşitliliğine göre de serbest elektron lazerleri tek geçişli (SASE) ve çok geçişli (aynalı-salındırıcı) serbest elektron lazerleri şeklinde ikiye ayrılır. Çok geçişli serbest elektron lazerlerinde salındırıcı bölgenin uçlarına bir tanesi tam yansıtıcı, diğeri yansıtıcı-geçiricili olmak üzere 2 taraftan büyük boyutlu aynalar ile desteklenen ve ortada da undulatörler arasından geçen elektron demetinden elde edilen ve aynalara gönderilen lazer ışınları mevcuttur. Bu ışın aynalar arasında gidip-gelerek güçlenir, koherent, tekrenkli lazer ışını daha sonra geçiricili aynadan dışarı alınır. Sistemden dışarı alınan lazer ışınının özelliklerinin incelenmesi için diyagnostik odasına gönderilecektir. Burada diyagnostik özellikleri incelendikten sonra deney odalarına çelik borular içerisinde yönlendirilir. Deney odalarında

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

bazen düşük dalga boylu, düşük şiddetli veya diğer özelliklere sahip lazer ışını istenebilir. Bu özellikteki ışınlar diyagnostik odasında hazırlanır ve kullanıcıların hizmetine verilir.

Tek geçişli lazer ışını sisteminde ayna bulunmamaktadır. Ana hızlandırıcıdan gelen elektron demetleri kolimatörden geçirilerek kopmakt hale getirilir bu sayede elektronların içerisine girecekleri undulatör magnetlerinin duvarlarına çarpması engellenmiş olur. Undulatör girmeden elektron demetler dışarıdan lazer ışınları ile güçlendirilebilir, veya direk undulatöre gönderilen demet burada undulatör magnetlerin içerisinden geçerken ışımaya yapar. Bu ışınlar tekrenkli, koherent, yüksek güçlü serbest elektron lazerleridir.

### 1.4 Kendiliğinden Genlik Artırmalı Serbest Elektron Lazeri'nin (SASE-SEL) Tarihsel Gelişimi

Parçacık Hızlandırıcısı olarak SEL kullanma olasılığı ilk olarak R. B. Palmer tarafından önerilmiştir. 1976'da Stanford'dan L. R. Elias uyarılmış ışımaya ile ilk deneyleri yapmıştır. Daha sonra D. A. G. Deacon ve arkadaşları tarafından SEL prensibiyle salınımlı deney yapılmıştır [5]. SASE-SEL üzerine ilk öneri 1980 yılında yapılmıştır fakat uygulamaya ilk olarak UCLA'da, 1996'da konulabilmiştir. Yıllar içerisinde SASE serbest elektron lazerlerinin tarihsel gelişimi şu şekilde verilebilir:

- 1996 İlk deneysel gözlem (UCLA,  $\lambda=16 \mu\text{m}$ )
- 1999(Aralık) APS, SASE lazer oluşumu:  $\lambda=523 \text{ nm}$
- 2000(Şubat) DESY, SASE Lazer oluşumu:  $\lambda=80 \text{ nm}$
- 2000(Eylül) APS, doyum:  $\lambda=523 \text{ nm}$
- 2001(Şubat) VISA/BNL, doyum  $\lambda=800 \text{ nm}$
- 2001(Nisan) APS, doyum:  $\lambda=385 \text{ nm}$  ve  $\lambda=265 \text{ nm}$
- 2001(Eylül) DESY, doyum:  $\lambda=100 \text{ nm}$
- 2005 DESY, Flash I, lazer oluşumu,  $\lambda=32 \text{ nm}$
- 2006 DESY, Flash I, lazer oluşumu,  $\lambda=13 \text{ nm}$
- 2007 DESY, Flash I, lazer oluşumu,  $\lambda=6.5 \text{ nm}$

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

- 2009 (Ekim) LCLS, Saturation at undulator length, L=60 m, power  $10^{10}$  W
- 2010 DESY, Flash I, lazer oluşumu,  $\lambda=4.12$  nm
- 2012 DESY, Flash II
- 2015 XFEL

### **Kaynaklar:**

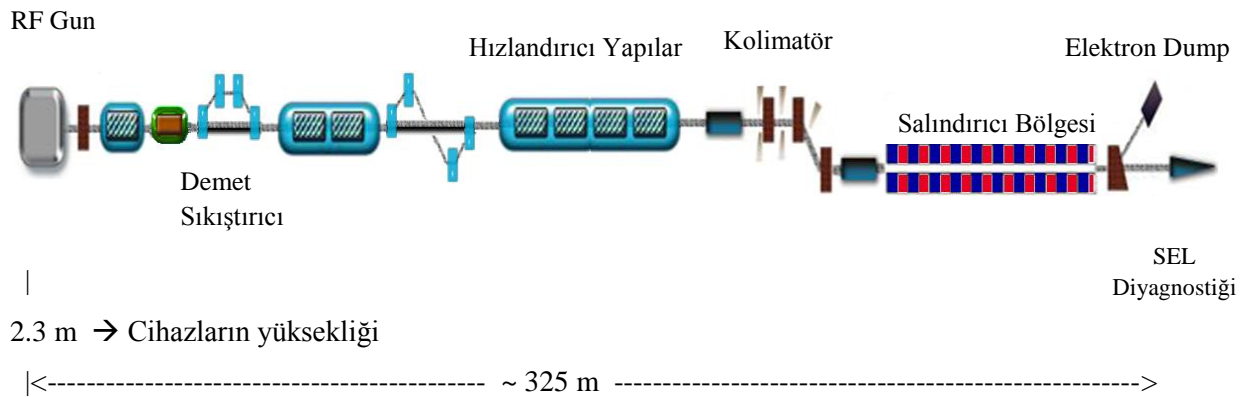
1. <http://www.shintakelab.com/en/enEducationalSoft.htm>
2. ENEA, *FEL Worldwide sceneraio*.
3. Thomas Tschentscher, *European XFEL*, London, 19 Jan 2011.
4. Winick, H., *Fourth Generation Light Sources*, IEEE, 37-41, USA, 1998
5. Wille, K. Mcfaal, J., *The Physics of Particle Accelerators*, Oxford University Press ISBN 0 19 850549 3, USA, 315, 2000.

## 2 TÜRK HIZLANDIRICI MERKEZİ, SASE SEL TESİSİNİN GENEL PLANLAMASI

### 2.1 Giriş

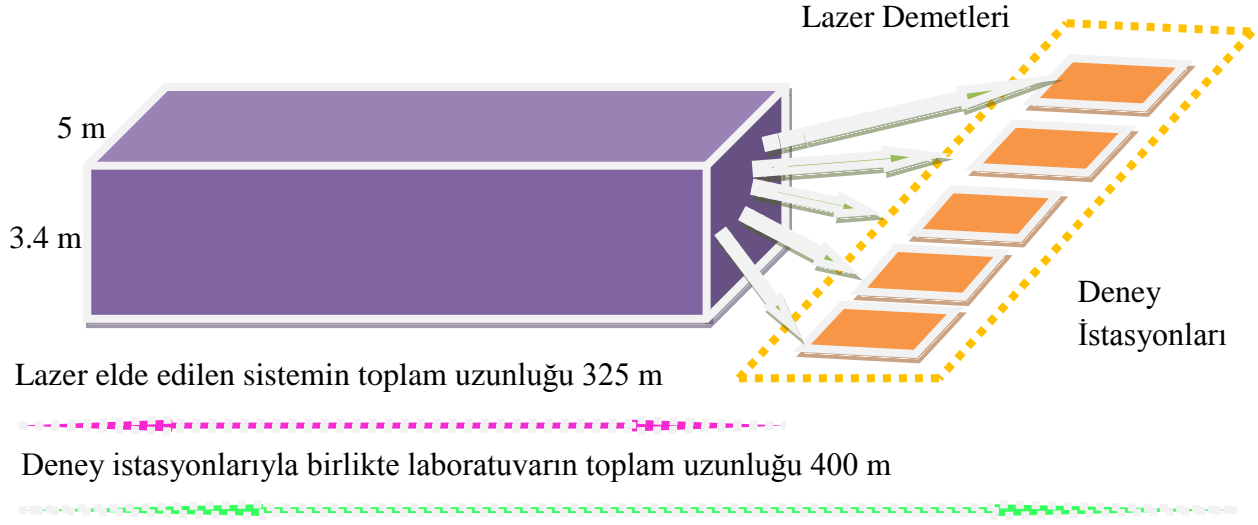
Türk Hızlandırıcı Merkezi, SASE-SEL Laboratuvarının genel planlaması aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi RF Gun olarak isimlendirilen fotokatot tabanca, ilk hızlandırıcı kavite sistemleri, demet sıkıştırıcı yapılar, elektron demet diyagnostik yapıları, ana hızlandırıcı sistemler, soğutucu sistemler, odaklayıcılar, salındırıcı sistemler ve yer altına yerleştirilen içerisine enerjisi düşük elektronların gönderildiği yapı olan “elektron dump” kısımlarıyla, foton demet diyagnostik odası ve kullanıcı alanlarının içerileceği deney alanlarından oluşacaktır. Bu deney alanlarının bir kısmı yüksek gerilim, Helyum soğutma, su soğutma gibi özel sistemlerin yer aldığı ve korunduğu özel kısımları da içerecektir.

Laboratuvar boyunca her noktada radyasyon ölçümünü sağlayacak dedektörler bulunacaktır. Böyle bir laboratuvar için toplam 400 metre uzunlukta, 3.4 metre yükseklikte, 5 metre genişlikte, radyasyon izolasyonundan dolayı yerin 2 metre altına bir tünel kazılması gerekmektedir. Aşağıdaki 2.1 ve 2.2 şekillerinde laboratuvarın uzunluğu, demet sıkıştırıcısına kadar 30 metre, undulatörün başlangıcına kadar 250 metre, SEL deneylerinin başlangıcına kadar 325 metredir. SEL Deneyleri kısmında, çeşitli araştırma bölümlerinden oluşan dikdörtgen şeklinde 5 tane Laboratuvar odası bulunması planlanmaktadır. Bunlarla birlikte toplam laboratuvar uzunluğu 400 metre olacaktır.



Şekil 2.1. Türk Hızlandırıcı Merkezi, SASE SEL Laboratuvarının baştan-sona genel görünümü

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



Şekil 2.2. THM SASE SEL Tesisinin öngörülen Boyutları

Türk Hızlandırıcı Merkezi, kendiliğinden genlik arttırarak yayımlı serbest Elektron Lazeri (THM SASE SEL) Sisteminde, kaynak olarak  $Cs_2Te$  alaşımından yapılmış fotokatot tabanca kullanılmaktadır. Fotokatotdan sürücü lazer tarafından elektronlar söküldükten sonra, elektron demetlerinin hızlandırılacağı  $3\frac{1}{2}$  veya  $1\frac{1}{2}$  hücrelik süperiletken (SC) radyo frekans (RF) hızlandırıcı kavite ve kavitenin bitiminde demet yolu çevresinde elektron demetlerini odaklayacak olan selenoid magnet bulunmaktadır.

SC kavite kullanıldığında tabanca sisteminin arka tarafına yerleştirilecek ve demet hattı boyunca solenoid'in etkisini demet yolunda nötrleyecek olan "bunch coil" 'in yerleştirilmesine gerek yoktur. Elektron demetleri normal iletken (bakır) kavite kullanılarak hızlandırıldığı zaman "bunch coil" kullanılır.

## 2.2 Enjektör Sistemi

Türk Hızlandırıcı Merkezi SASE-SEL sisteminde fotokatot tabancadan elektronlar söküldükten sonra, katot plug'ını (katodun uç kısmının kaviteye en yaklaştığı bölüm, fotokatodun uç kısmından sökülen elektronların hızlandırıcı bir alanı ilk hissettikleri bölüm),  $1\frac{1}{2}$  hücrelik süperiletken RF kavite ve demet yoluna yerleştirilmiş selenoidi geçerek ilerlerler. Proje



## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

çalışmaları boyunca  $3\frac{1}{2}$  hücrelik tabanca kavitesi de çalışılmıştır ve THM SASE SEL Tesisi kapsamında, hem  $1\frac{1}{2}$ -hücrelik hem de  $3\frac{1}{2}$ -hücrelik süperiletken kaviteler modellemelere dahil edilerek çalışılmış ve sonuçlar bu raporda sunulmuştur.

Fotokatot tabanca, tabanca sonrasına yerleştirilen ilk hızlandırıcı kavitler ve demet sıkırtıcı sistemlerin tamamı enjektör olarak isimlendirilir. Tabanca içerisinde elektron söktürücü lazer (proje çalışmaları boyunca bilinen Nd:YLF lazeri kullanılmıştır), fotokatot, SC veya NC kavite sistemi (kavite sisteminin içerisinde kavite tutucu, helyum soğutma, azot soğutma, vakum sistemi ve RF güç girişi de bulunmaktadır.), selenoid magnet, selenoid taşıyıcı, vakum pompaları, kicker (Kalitesi düşük elektron demetlerini demet yolundan ayırmak ve dışarı almak için), demet pozisyon monitörü (BPM), odaklayıcı koil (FC), dipol, yükü ölçmek için Toroid koil, demet düzelticisi (korrektör), kuadropol magnetler bulunmaktadır.

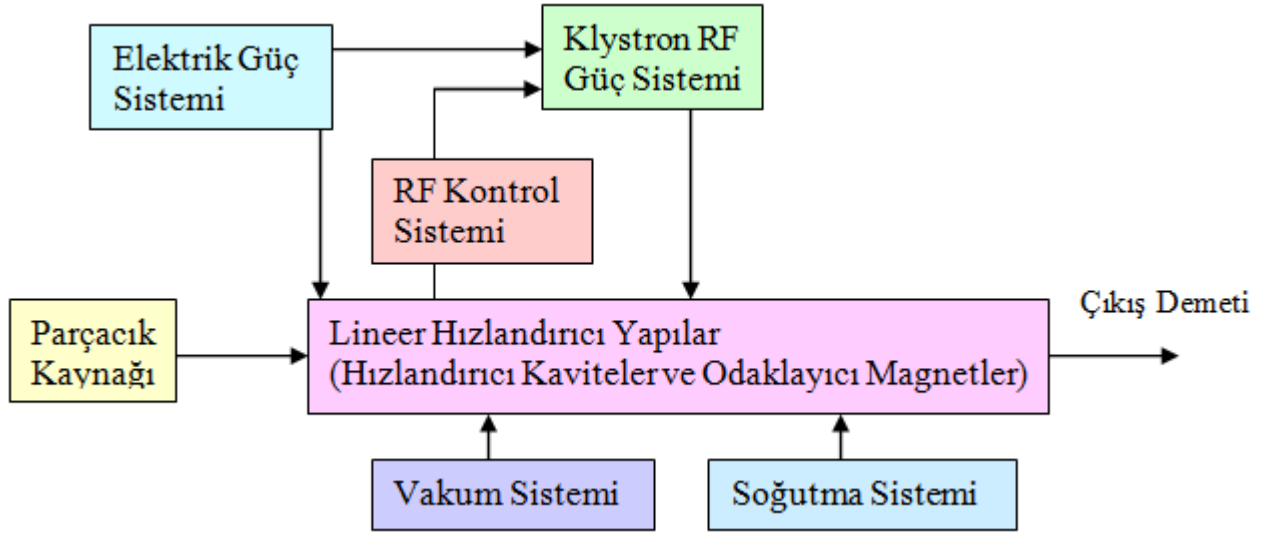
Tabancadan sonra, bütün demet yolu boyunca, odaklayıcı magnet yapıları, demet özelliklerini ölçücü diyagnostik cihazlar, vakum sistemi, su soğutma sistemi, korrektörler, kavite güç sağlayıcılar (RF sistemi) yer almaktadır.

### 2.3 Lineer Hızlandırıcılar

Türk Hızlandırıcı Merkezi SASE Serbest Elektron Lazeri çalışmaları kapsamında RF fotokatot tabanca  $1\frac{1}{2}$  veya  $3\frac{1}{2}$ 'lik (beam tube - demet tüpsüz 15 cm uzunluğunda) olmak üzere gun kavite ve enjektör içerisinde önce 5 (demet tüpsüz 50 cm uzunluğunda) devamında 3 (30 cm) hücrelik iki kaviteden oluşacaktır.

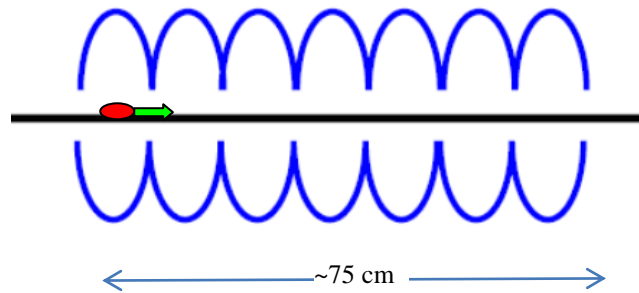
Şekil 2.3'te THM SASE SEL Tesisinde öngörülen sistemler görülmektedir. Ayrıca proje çalışmaları boyunca 5 +3 hücrelik enjektör kavite yanıda, 6 + 3, 4+3 ve 3+3 hücrelik kavite denemeleri de yapılmış ve hangi enjektör sisteminde elektron demetlerinin daha fazla hızlandığı görülmüştür. 6+3 hücrelik enjektör kavite seçiminde elektron demetleri daha fazla hızlanmaktadır.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



Şekil 2.3. THM SASE SEL Tesisinde öngörülen sistemler

Ana hızlandırıcı kısım ise önce 2 tane 9 hücrelik (demet tüpsüz,  $2 \times 1.028$  m) devamında set halinde 9'luk 4 tane (demet tüpsüz  $4 \times 1.028$  m uzunlukta) hücreden oluşması önerilmektedir. Proje boyunca yapılan çalışmalar içerisinde ana hızlandırıcı kısım için süperiletken  $12 \times 9$ 'luk demet hızlandırıcı kavite çalışmaları da yapılmıştır. Bu çalışmada elektron demetleri  $\sim 1.7$  GeV değerine ulaştırılmıştır. Bu raporda ulaşılan bu enerji değeri için "dump sistemi" çalışmıştır. İleriki bölümlerde bu çalışmalar açıklanmaktadır. Aşağıda, 2.4'üncü Şekil'de 7-hücrelik bir kavitenin toplam uzunluğu görülmektedir.

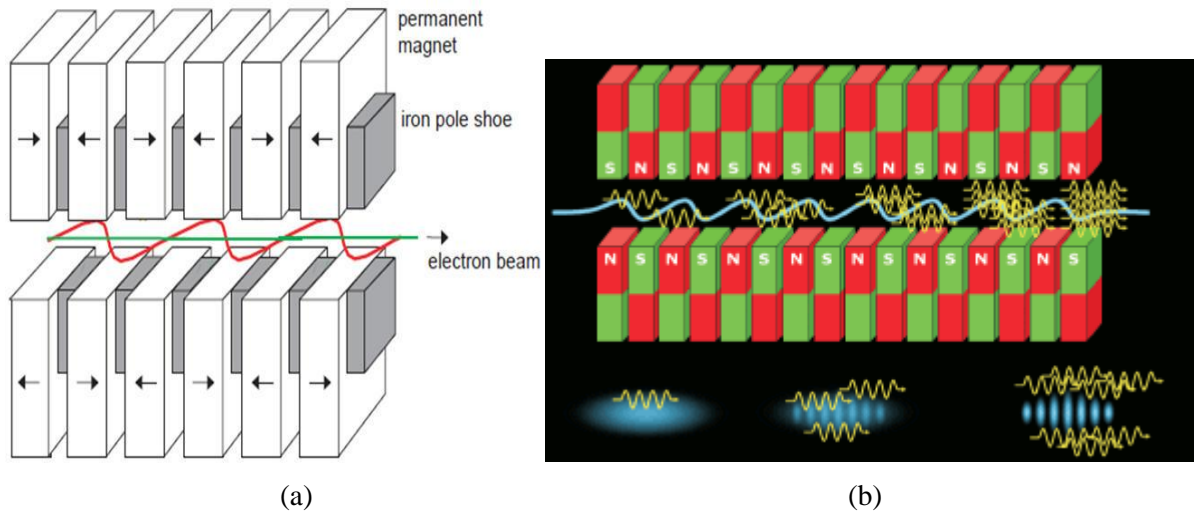


Şekil 2.4. 7-hücrelik bir kavitenin toplam uzunluğu ve demet eksenini

## 2.4 Salındırıcılar

Salındırıcı kısmı için iki farklı salındırıcı (undulatör) sistemi göz önüne alınabilir. Vakum içerisinde (in-Vacuum) undulatörler ve diğerleri. Her iki durum içinde THM SASE-SEL kapsamında çalışmalar sürdürülmektedir.

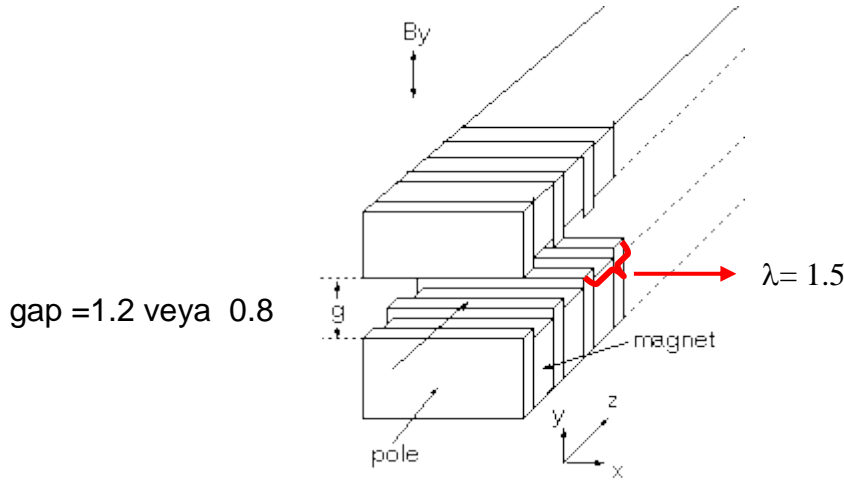
Aşağıdaki şekillerde (Şekil 2.5, (a), (b)) undulatör sisteminde lazerin elde edilişi görülmektedir. In vacuum olmayanlar için Samaryum Cobalt düzlemsel salındırıcı materyali olarak düşünülmektedir. Samaryum Cobalt kırılma sayısı fazla fakat permanent manyetikliği yüksek olan bir materyaldir. In-vacuum undulatörde, standart düzlemsel hibrit tipi, SC Neodim-iron-boron (NdFeB) materyalinin kullanılması, kutuplar için ise Vanadium Permendür kullanılması planlanmıştır.



Şekil 2.5. Undulatör sistemi içerisinde elektron demetinden lazerin elde edilişi a) Undulatör magnetlerinin yapısı, b) Elektron demetinden koherentlik ve güçlü lazerin elde edilişi [1]

Undulatör gap aralığı olarak alınan 0.8 ve 1.2 cm step-motor ile değiştirilebilecektir. Her bir undulatör seti yaklaşık olarak 5 metre'dir. THM SASE-SEL Sisteminde 6 adet undulatör seti kullanılması düşünüldüğünden  $5 \times 6 = 30$  m toplam undulatör bölümünün uzunluğu olacaktır. Aşağıda z düzleminde hareket eden bir elektron demeti için undulatör sisteminin üç boyutta yapısı ve parametreleri görülmektedir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



Şekil 2.6. Undulatör sisteminin dalgaboyu, magnetik alanın y-bileşeni, undulatör aralığı, kutup ve magnetlerin görünüşü

### 2.5 Foton Demet Hatları

THM SASE SEL Tesisinde lazer ışını elde edildikten sonra özelliklerini tam olarak belirlemek amacıyla foton demet diagnostiği deney istasyonu kurulacaktır. Foton diagnostik odasında kullanılacak araçlar, fotonun şiddetini, açısal, uzaysal ve zamansal dağılımını ölçme imkanı sağlayacaktır. Foton demet diagnostiği deney istasyonunda, undulatör bölümünden istasyona alınan ışınların özelliklerini taramak için çok yüksek vakum (ultra high vacuum, UHV) altında ölçüm yapabilen çeşitli detektörler kullanılacaktır. Foton diyagnostiğinde kullanılan araçların hepsi temiz oda koşullarında hazırlanacaktır. Foton diyagnostiği ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 5'te verilmektedir.

### 2.6 Deney İstasyonları

THM SASE-SEL Projesi Kapsamında 5 adet uygulama deney istasyonu ve 2 adet çalışma atölyesi öngörülmektedir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Deney istasyonları için ayrılan uzunluk yaklaşık olarak 75 metredir. Foton demet diyagnostiği bölümünden gelen yoğun, şiddetli veya farklı özellikler taşıyan lazer ışınları uygulama deney istasyonları bölümlerinde kullanıcıların hizmetine sunulacaktır.

Türk Hızlandırıcı Merkezi SASE SEL Projesi Tesisi kapsamında öngörülen deney istasyonlarındaki çalışma ve uygulama konuları 5. Bölümde detaylı açıklanmaktadır.

### **Kaynaklar:**

- 1 <http://www.mpi-hd.mpg.de/pfeifer/page.php?id=124>

### 3 THM SASE-SEL İÇİN ELEKTRON HIZLANDIRICISI

#### 3.1 Giriş

THM SASE SEL Tesisinde 1 GeV ve üzeri elektron demet enerjileri elde edebilmek için elektron tabancasında Cs<sub>2</sub>Te materyalinden yapılan fotokatot kullanılması öngörülmektedir. Cs<sub>2</sub>Te fotokatotdan sürücü lazer olarak isimlendirilen Nd:YLF lazerinin “bölücü” yardımıyla dörde bölünmesinden elde edilecek 263 nm lazeri sayesinde fotokatot yüzeyinden elektron demetleri sökülmesi amaçlanmaktadır. SC 1½ hücrelik ve SC 3½ hücrelik sökülen elektron demetlerini hızlandırıcı kavitelerin içerildiği fotokatot tabanca örnekleri proje kapsamında çalışılmaktadır.

#### 3.2 THM SASE-SEL Genel Tanıtım

THM SASE-SEL sisteminde 1-6 GeV elektron demet enerjisine sahip, 0.1-100 nm dalgaboyu aralığında monokromatik, GW seviyesinde eşfazlı çıkış gücünde lazer elde edilmesi planlanmıştır. THM SASE-SEL projesi kapsamında tüm sistemin modelleme çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmalar ışığında tüm sistemin mekanik tasarımı öngörülebilecektir. Elde edilecek lazer ışını 20-50 nm aralığında material ve yüzey analizi çalışmalarında, 10-13 nm aralığında transistör yapılarak çip üretiminde, 2-3 nm aralığında manyetik yapıların özelliklerinin araştırılmasında, 2 nm civarında suyun içerisinde protein yapılarının detaylı analizlerinde kullanılabilir.

##### 3.2.1 Elektron Tabancasında Katot Seçenekleri

Elektron tabancasındaki en önemli yapı katottur. Katot elektron kaynağı olarak kullanılır. Katotdan elektron söktürme yöntemlerine göre elektron tabancası ikiye ayrılır. Termiyonik ve fotokatot.

Termiyonik Elektron Tabanca: Termiyonik elektron tabancada katotdan elektron elde edilmesi için katodun ısıtılması gerekir. Katot ısı yoluyla uyarılarak elektron elde edilir. Bu katot tiplerinde iş gücü düşük olan katotlar tercih edilir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

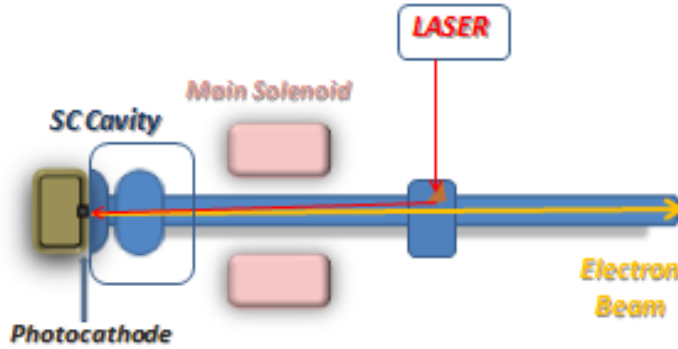
Fotokatot Elektron Tabanca: Fotokatot elektron tabancadan elektron üretmek için bir ışık kaynağıyla katot uyarılarak elektron elde edilmesi sağlanır.

THM SASE-SEL’de yukarı bölümlerde de belirtildiği üzere fotokatot elektron tabancası seçilmiş ve bu konuda içerik çalışmaları yürütülmüştür.

### 3.2.2 SASE-SEL’de Tabanca Yapısı ve Parametre Seçenekleri

Türk Hızlandırıcı Merkezi SASE SEL Tesisinde kullanılması planlanan SC (veya NC) kavite ve Selenoid yapıları aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.

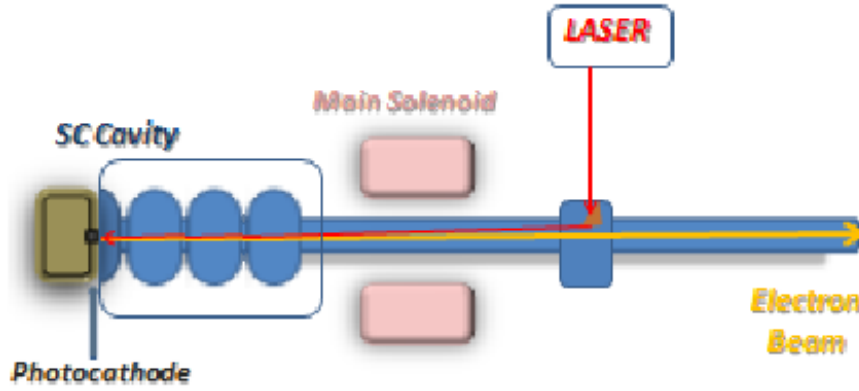
Gun kavite olarak SC ( $1\frac{1}{2}$  veya  $3\frac{1}{2}$ ) veya NC ( $1\frac{1}{2}$  veya  $3\frac{1}{2}$ ) şeklinde dört farklı seçenek de göz önüne alınarak çalışmalar yapılmıştır. Aşağıdaki 3.1 ve 3.2. Şekillerde  $1\frac{1}{2}$  ve  $3\frac{1}{2}$  hücrelik kavitelere sahip tabanca sistemleri görülmektedir.



Şekil 3.1.  $1\frac{1}{2}$ -hücrelik kavite, sürücü lazer ve solenoid ile tabanca sistemi

Her iki şekilde de (Şekil 3.1 ve 3.2) “bunch coil” ’in eklenmemesinden anlaşılacağı üzere SC çalışmaları için olan  $1\frac{1}{2}$  ve  $3\frac{1}{2}$ ’lik gun kavite şekilleri görülmektedir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



Şekil 3.2.  $3\frac{1}{2}$ -hücrelik kavite, sürücü lazer ve solenoid ile tabanca sistemi

Elektron tabancasında, elektron demetlerinin söküldüğü katot yapısı, katot tutucu, elektron demetlerinin elektrik alana maruz bırakılarak hızlandırıldığı rf kavite, elektronları demet halinde bir arada tutmak için manyetik alan oluşturan solenoidler, uygulanan manyetik alanın bükücü etkisini demet yolu boyunca nötrlemek için “bucking coil” (yalnızca Normal iletkende kullanılır) yapıları vardır. Soğutucu yapılar süperiletken kaviteelerde kullanılabilir.

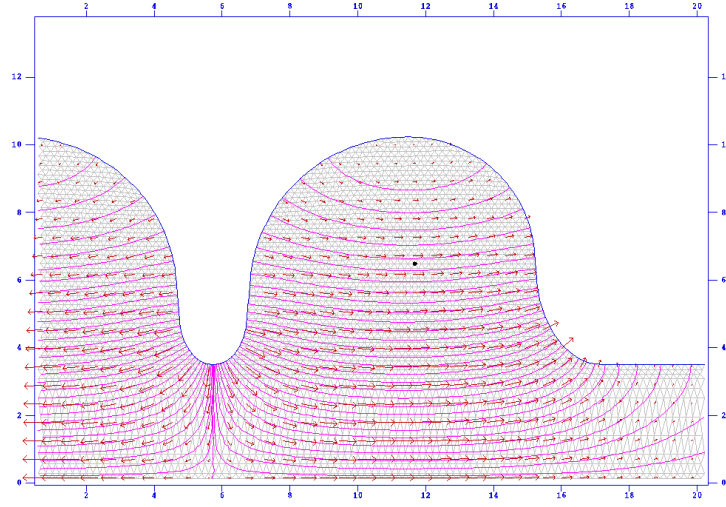
### 3.2.2.1 RF Tabanca Sisteminde Alanların Modellenmesi

İleri bölümlerde hızlandırıcı kaviteelerde elektrik ve manyetik alanların elektron demetlerini nasıl hızlandırdığı ve odakladığı detaylı olarak anlatılacaktır. Burada Poisson/Superfish ile yapılan modelleme çalışmalarının sonuçları Süperiletken  $1\frac{1}{2}$  ve  $3\frac{1}{2}$  hücreler için katot plug'ını içermeyen verilmiştir [1].

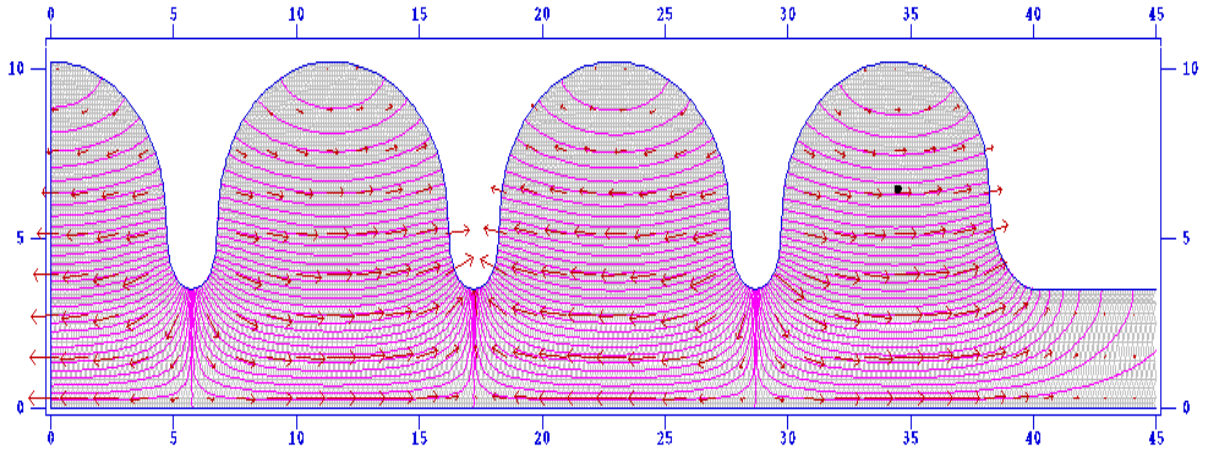
Kavite içerisindeki elektrik alanın her bir kavite hücresinde hızlandırmayı sağlayabilmek için alanların zıt yönlerde olması gerekmektedir. Aşağıdaki 3.3 ve 3.4. şekillerde bu durum açık şekilde görülmektedir.



### THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



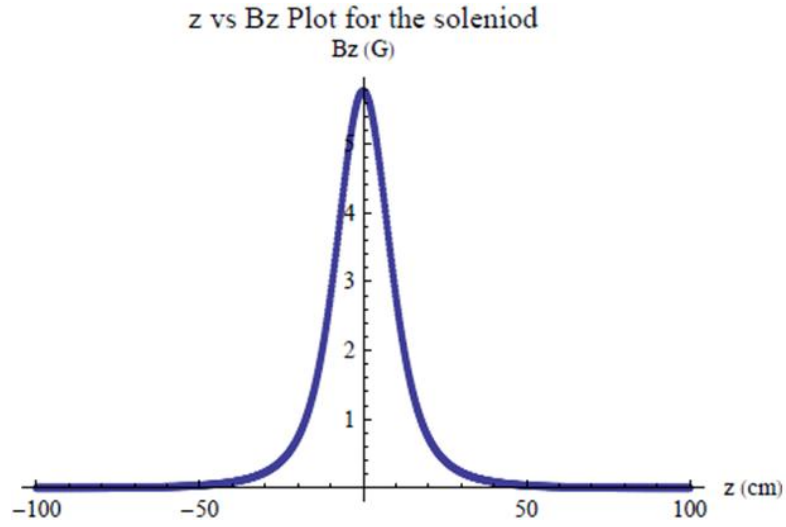
Şekil 3.3.  $1\frac{1}{2}$  - hücrelik kavite sisteminin  $\pi$  -modunda elektrik alan çizgileri



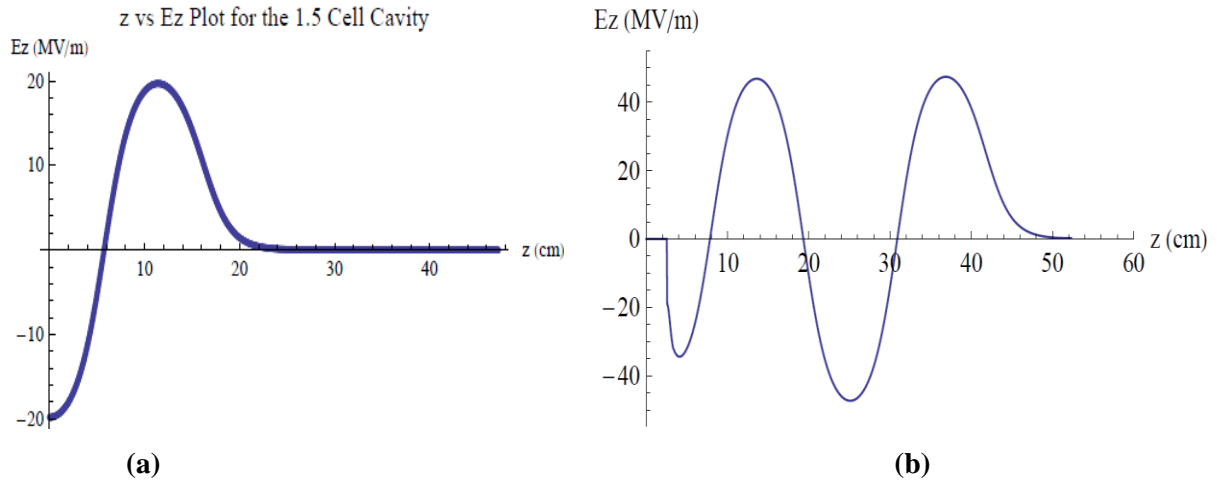
Şekil 3.4.  $3\frac{1}{2}$  - hücrelik kavite sisteminin  $\pi$  -modunda elektrik alan çizgileri

Aşağıdaki şekillerden görüleceği üzere, tabancada selenoid içerisindeki demet yolu boyunca manyetik alan davranışı (Şekil 3.5),  $1\frac{1}{2}$ -hücrelik ve  $3\frac{1}{2}$  - hücrelik kavite içlerindeki elektrik alan davranışı (Şekil 3.6, (a) ve (b)) demet yolu boyunca verilmektedir.  $1\frac{1}{2}$  - hücrelik kavitede alan gradienti 40 MV/m değerindedir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



Şekil 3.5. Tabançada selenoid içerisindeki demet yolu boyunca manyetik alan davranışı



Şekil 3.6. Demet yolu boyunca a) 1½ , b) 3½ - hücrelik kaviteilerin içinde elektrik alan davranışı

### 3.2.2.2 Tabanca Kavite Yapısının Modellenmesi

RF kavite ler kapalı bir metal yapı içerisinde özel bir çeşit rezonatör gibi davranıp parçacıkları hızlandırmak için kullanılır. Parçacıkları hızlandırmak için parçacıklar kaviteden geçerken onlara itme verecek şekilde frekansı ayarlanmış sürekli dalgalar kullanılır. Kavite hücresinde demet

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

değiştirdiği zaman dalganın işareti de değişecektir. Kavitenin büyüklüğü sürekli dalganın frekansı ile ilişkili olduğundan çok önemlidir.

NC kaviteleri çalıştırmak ve çalışma sürekliliğini sağlamak kolaydır fakat yüksek direçten dolayı onların kavite duvarlarında güç kaybı SC'ye göre çok daha fazla olur. SC kaviteler çok avantajlı olmasına rağmen birkaç Kelvin derecede onları çalıştırmak zordur.

SC kavite malzemesi olarak ana bakır malzeme üzerine ince Niobium film materyali kaplanması ile kullanılmaktadır. Bu Niobium kaplama kaplama enerji kontrollü depozisyon, püskürtme, buhar difüzyonu ve ko-oveporasyon yöntemleriyle yapılabilir.

Bir Kavite sisteminde:

- Parçacık sayaçları,
- Tozsuz nitrojen 5.0,
- Ultrasonik temizleme ünitesi (fiziksel temizleme ünitelerinin büyüklüğünde),
- Temiz helyum sızıntı kontrolcüsü,
- Deiyonize su, tozsuz Isopropanol,
- Mechaniksel hardware kullanım araçları (e.g. vida, cıvata, bağlantı elemanları vb.),
- Sıkıştırılmış hava (6.5 Bar basınçta),
- Ana 230V ac ve Ana 415V 3 faz ac,
- Personel güvenlik sistemi,
- RF bağlantıları ve
- Lokal ekzoz havalandırma sistemi gibi ek bağlantılar, sistemler ve cihazlar bulunmalıdır.

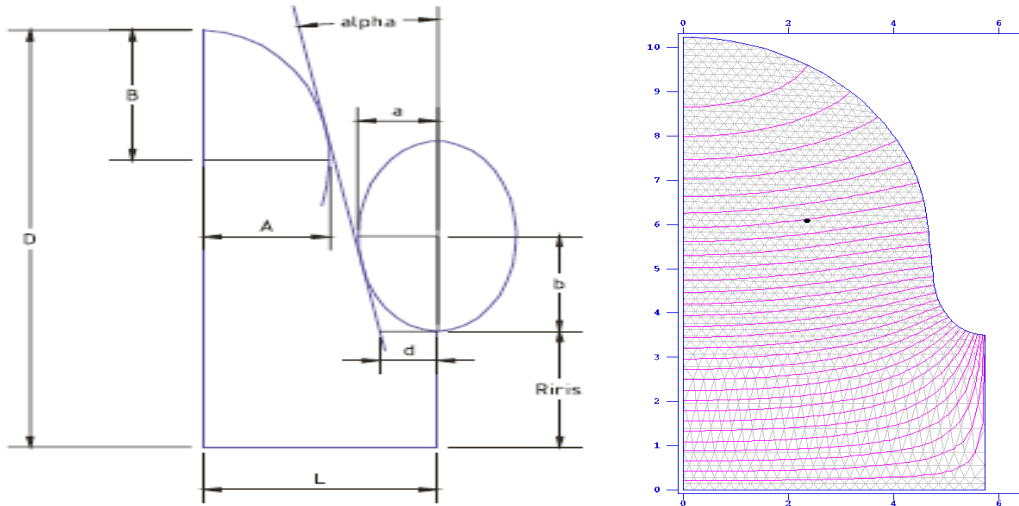
Normaliletken yapıda ise Niobium materyali ile kaplama yapılmamaktadır. He soğutma ile ilgili sistemler ve azot kullanılmamaktadır.

Kavite yüzeyinde düşük elektrik ve manyetik alana imkan sağlandığından, yüksek  $\beta = v/c$  kaviteleri olarak eliptik şekilli kaviteler kullanılır. Bu kaviteler silindiriksel simetriye sahiptir. Geometriyi tanımlamak için Şekil 3.7'da görüldüğü gibi 7 parametre kullanılır.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

- 1)  $L$ , kavite hücresinin uzunluğu
- 2)  $R_{equa}$ , Equator yarıçapı
- 3)  $R_{iris}$ , Iris yarıçapı
- 4)  $A$ , equator elipsinin dik yarıçapı
- 5)  $B$ , equator elipsinin yatay yarıçapı
- 6)  $a$ , iris elipsinin dik yarıçapı
- 7)  $b$ , iris elipsinin yatay yarıçapı

İki elips birbiriyle aşağıda şekilde görüldüğü üzere  $\alpha$  açısını verecek tanjant çizgisiyle bağlaşım yapılmıştır ki böylece yukarıdaki 7 parametre sabitlenmiştir.



Şekil 3.7.  $\frac{1}{2}$ -hücrelik kavite geometrisinin parametreleri

Lineer hızlandırıcılar için RF kavite ler Superfish kodu ile çalışılmıştır. Kod, eksensel simetrisinin varlığında silindiriksel koordinatlarda RF elektromanyetik alanları modeller. Selenoidin manyetik alanı yine silindiriksel koordinatlarda eksensel simetriye sahip olan Pandıra ile çalışılmıştır.

Bir kavitedeki RF kayıpları RF kavitenin Q faktörü ile karakterize edilir. Yüksek Q'ya sahip RF gücü çok verimlidir. RF kavitedeki kalite faktörü Q,

$$Q = \frac{\omega U}{P}$$

şeklinde tanımlanır. Burada  $\omega = 2\pi f$ , açısal frekanstır,  $U$  kavitede depolanan enerjidir ve  $P$ 'de RF devrinin her radyanında kavite duvarlarında dağılan güçtür.

$P$ 'yi minimize etmek için,  $GR/Q$  terimini maximize ederiz. Bu terim:

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{V^2 R_s}{G(R/Q)}$$

denklemden elde edilir. Burada  $G$  geometrik faktör olarak bilinir ve kavite materyalinden bağımsız fakat kavite geometrisine bağlıdır [2]. Denklemden,  $R_s$  materyalin yüzey direnci,  $R$  ise shunt impedance,  $V$ 'de hızlandırıcı voltajdır.

$\alpha$ ,  $B$ ,  $A/B$  ve  $a/b$  değerlerini kendi aralarında ayarlayarak,  $GR/Q$ 'yu maximum yapmak suretiyle, optimum hücre geometrisi elde edilir.

### 3.2.2.2.1 Parametre Optimizasyonu

#### 3.2.2.2.1.1 1½ - Hücrelik Yapı için Optimizasyon

Yapılan modelleme çalışmalarında ilk olarak 1½ hücrelik niobium (Nb) (L bant) kavite ile elektron demetlerinin fotokatotdan sökülmeğe başladığı andan itibaren alan ile hızlandırılarak GeV mertebesinde demet elde edebilmesi üzerinde çalışılmıştır. Öncelikle fotokatot 1½ hücreli SC Nb kavite için geometrik parametreleri hesaplanmıştır.

Kavite dizaynı yapılırken iç hücrelerde, kavite duvarlarında alan yayılımını düşürecek, kavite içerisinde depo edilen enerjiyi yükseltecek şekilde ve operasyon gereksinimleri çerçevesinde modellemeler gerçekleştirilmektedir. İç hücre tasarımlarında çoğunlukla kritik elektrik ve manyetik alan değerlerini ( $E_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$ ,  $H_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$ ) belirleyen oranlar doğrultusunda geometrik parametreler belirlenmektedir. Hızlandırıcı kavite içerisinde kritik alan değerlerinin ayarları

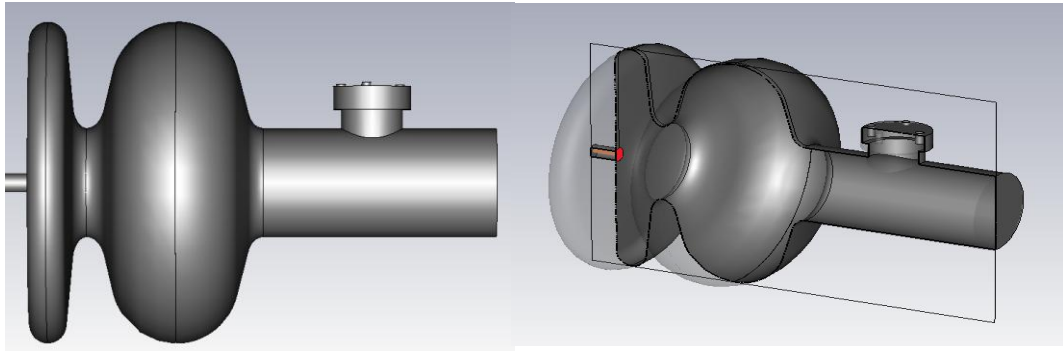
## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

duvar açısı, iris elipsi gibi diğer parametrelerin ayarlanarak standart değerler arasına çekilmeye çalışılmıştır.

Kavite dizaynında son hücre, demet tüpü ile bağlantıyı gerçekleştirmektedir ve ayrıca çalışma frekansının devamlılığını sağlamak için iç hücrelerden biraz farklı dizayn parametreleri gerektirir.

Hem iç hücre modeliyle hem de demet tüpüne uyum sağlayacak şekilde dizayn edilen son hücreler diğer hücrelere göre ekvator elips çapları düşük tutularak, iç hücrelere göre daha küçük bir hacme sahip olmaktadır. Bu durum, son yarım hücrede iç kısımda bulunan yarım hücrenin demet tüpü ile bağlaşımlı olan son yarım hücre ile bağlaşımlı zorlaştırır. Bu nedenle kavite modellemesi yapılan birçok çalışmalarda bu uyum sorunu en aza indirilecek şekilde geometri parametreleri seçilmektedir. Son hücrenin diğer hücrelere göre daha küçük hacime sahip olması, artık demet tüpü ile bağlantılı olan son kavite duvarında maksimum elektrik alan etkileşimini azaltmak, hem de bu noktada çalışma frekansı ile demet tüpü içerisindeki frekans değerlerini ayarlayacak şekilde yüksek tutulmaktadır.

Şekil 3.8'de gösterildiği gibi 1½-hücrelik tabanca kavite sistemi için elektronların 1300 MHz çalışma frekansında hızlandırma işlemi, Superfish/Poisson (2 boyutta - 2D) ve CST MWS (3 boyutta - 3D) programları kullanılarak modellenmiştir. Kavite içerisinde elektromanyetik alan davranışları incelenmesi yapılmıştır.

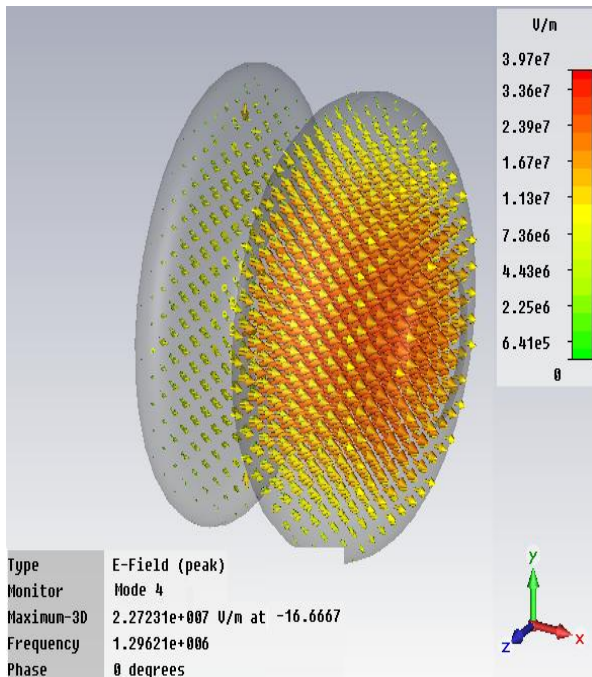


Şekil 3.8. CST MWS programı ile 1½-hücrelik tabanca kavite dizaynı

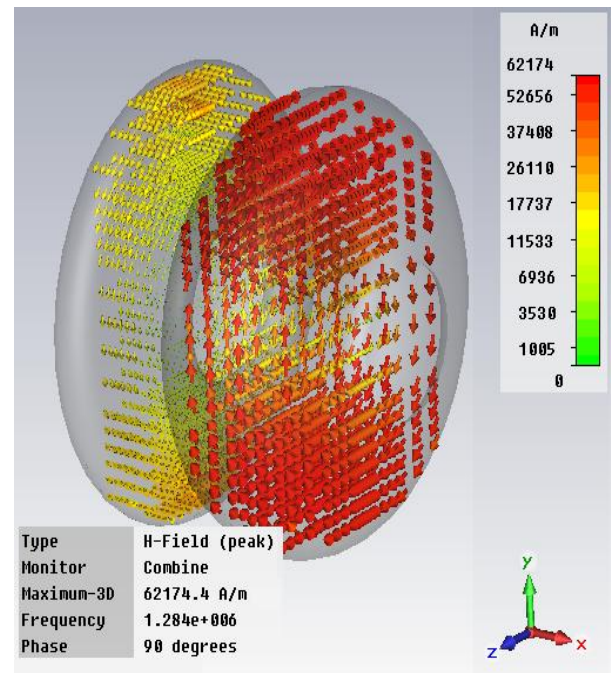
## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Nd:YLF lazer ( $\lambda \sim 263 \text{ nm}$ ) dalga boylu lazerle katot ( $\text{Cs}_2\text{Te}$ ) üzerinden sökülen elektronlar her bir demet içerisinde 255.000 parçacık olacak paketler halinde hızlandırılması sağlanmıştır. Kavite içerisinde elektron demetlerine ani bir ivme kazandıran elektrik alan elektronları ışık hızına yakın bir hızlara çıkarırken, manyetik alan katot üzerinden sökülen elektronları dağılmadan eksen etrafında toparlanmasını sağlayacak şekilde kavite içerisinde elektrik alanın etrafında ve elektrik alana dik bir şekilde dolanım yapmaktadır.

TM mod kaviteelerde temel prensip olarak manyetik alanın değişimine bağlı olarak elektrik alan oluşturulmaktadır. Kavite içerisinde ekvator eksenleri uçlarında manyetik alanın sürekli yön değiştirmesi hem elektron demetlerinin yönlendirilmesini hem de içeride sürekli bir elektrik alan indüklenmesini sağlamaktadır. Bu kapsamda kavite içerisinde elektrik ve manyetik alan dağılımları sırayla Şekil 3.3 ve 3.5'te Superfish/Poisson (2D) programı ile, yine aşağıdaki şekillerde elektrik ve manyetik alanın pik değerleri CST MWS (3D) gösterilmiştir.

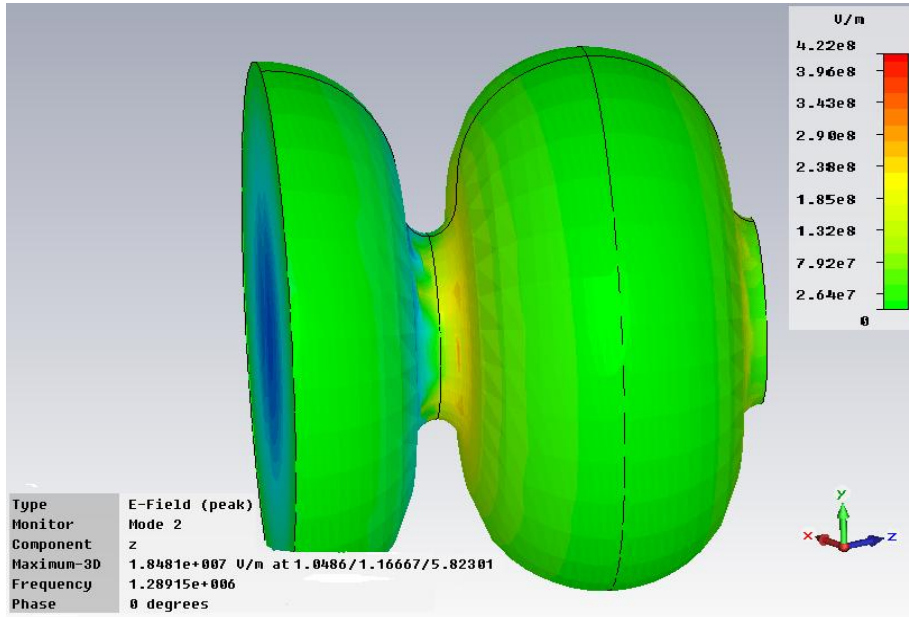


(a)



(b)

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



(c)

Şekil 3.9.  $1\frac{1}{2}$ -hücre için a) Kavite içerisinde elektrik alanın pik değeri, b)Kavite içerisinde manyetik alan dağılımı, c) Demet yolu boyunca yarımlık kavitenin içi ve dışarıdan kavitenin elektrik alanının pik değeri. İris bölgesi civarında elektrik alanın maximum değere ulaştığı görülmektedir.

### 3.2.2.2.1.2 $3\frac{1}{2}$ - Hücrelik Yapı İçin Optimizasyon

Yapılan modelleme çalışmalarından ve analitik hesaplamalardan elde edilen sonuçlara göre ( $3\frac{1}{2}$  hücre için) elektron demetinin parametreleri Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1.  $3\frac{1}{2}$ -hücre için elektron demetinin parametreleri

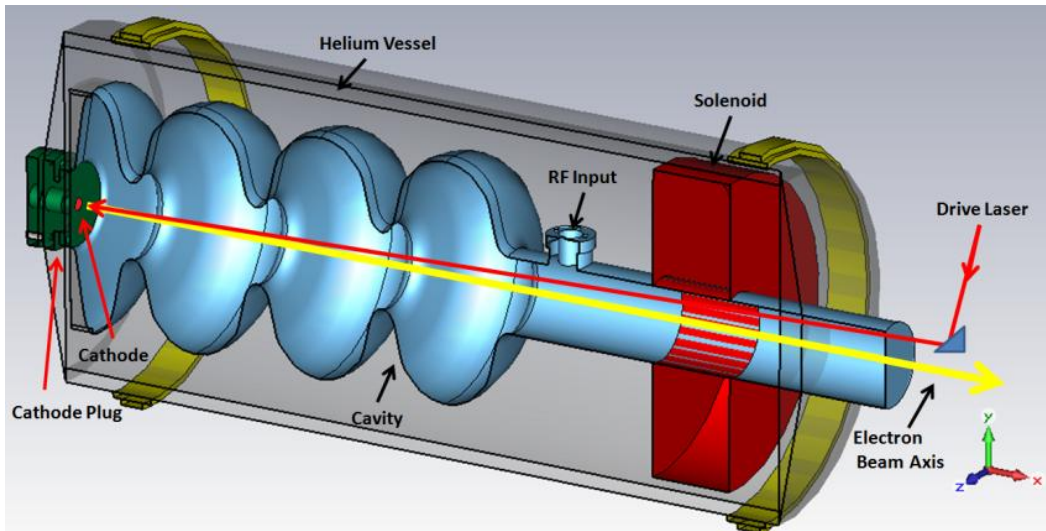
Parametre (Sembol)	Birim	Değer
Elektron Demet Enerjisi ( $E_{\text{demet}}$ )	MeV	9.2
Paketçik Yüğü (Q)	nC	0.1
Normalize Emittance ( $\epsilon_N$ )	$\pi\text{mm mrad}$	2.5
FWHM Paketçik Uzunluğu ( $t_\mu$ )	Ps	3
Pik Akım ( $I_{\text{pik}}$ )	A	27.44
RMS Enerji Yayılımı ( $\Delta E/E$ )	-	96



## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Solenoid Alanı	T	0.154
Hızlandırıcı Gradyen	MV/m	19.21
Lazer Dalgaboyu	Nm	262
Frekans	GHz	1.3
Operasyon modu		Cw
Ortalama Lazer Gücü	W	$\geq 1$
Kuantum Verimlilik, Q.E.		$\geq 1\%$
Demet Akımı	Ma	3
Tabanca UHV	Mbar	$10^{-10}$ - $10^{-11}$

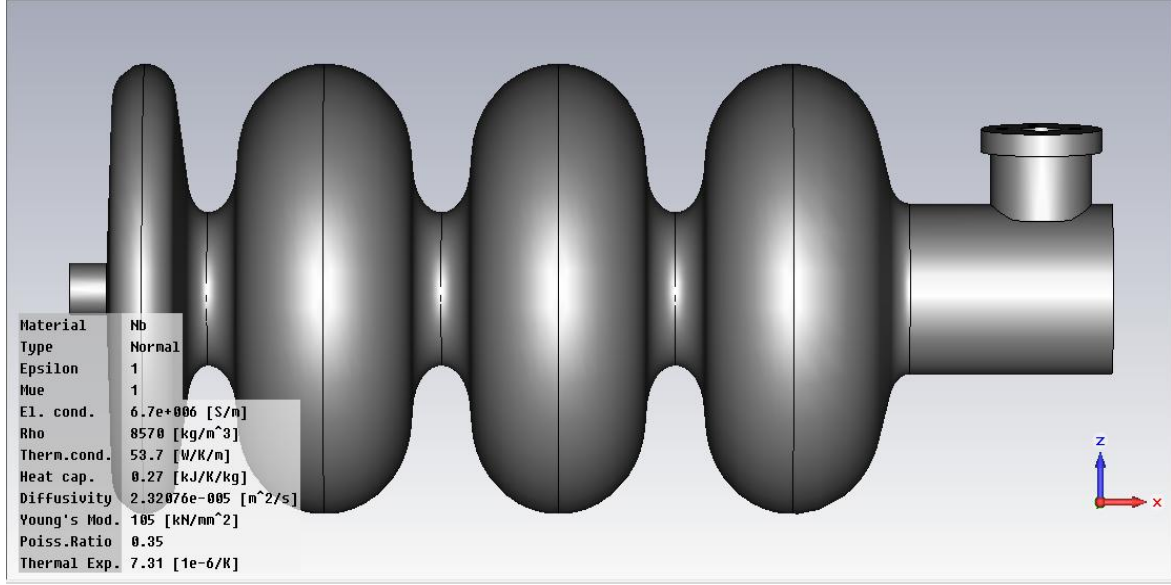
Yüksek  $\beta$  gereksiniminden dolayı RF tabanca kavite hücreleri eliptik şeklindedir. Aşağıdaki şekilde (Şekil 3.10) tabanca plug'ın,  $3\frac{1}{2}$ -hücrelik kavite ve solenoidin 3 boyutta Superfish/Poisson, Astra ve CST Microwave Studio ile modellendiği tabanca sistemi görülmektedir [3, 4].



Şekil 3.10. 3 Boyutta  $3\frac{1}{2}$ -hücrelik tabanca sistemi

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Demet tüpü (beam tube) ve giriş bağlaşımlarının (input coupler) dahil edilerek CST Microwave Studio ile elde edilen RF tabanca kavitenin tasarlanmış hali ise aşağıdaki şekilde (Şekil 3.11) verilmektedir.



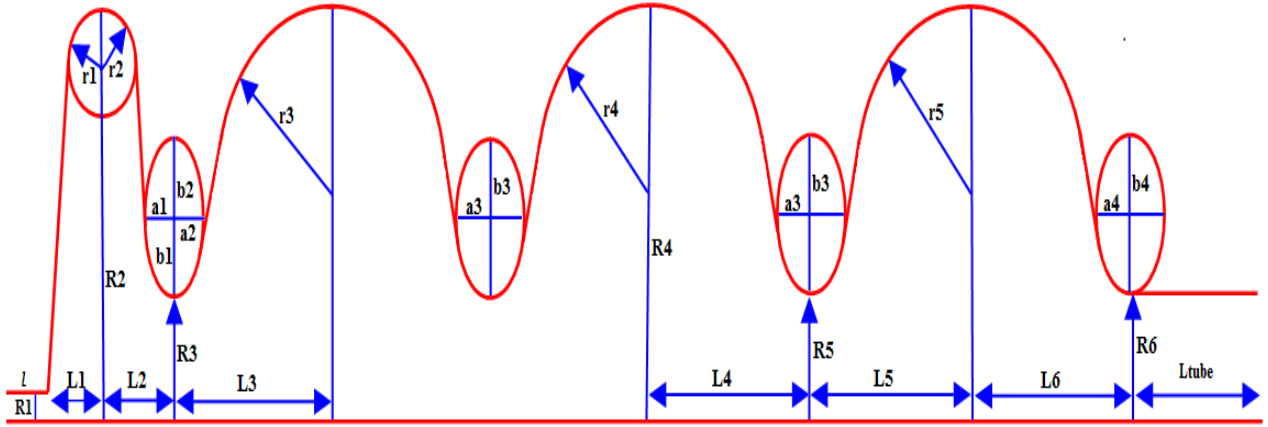
Şekil 3.11. Demet tüpü ve giriş bağlaşımlarıyla 3½-hücrelik kavite sistemi

RF fotokatod tabancada 3½ - hücreli Süperiletken kavite modelleme çalışmalarında katod plug'ı da modellemelere dahil edilmiştir.

Katoto Plug'ı, fotokatod ile kavite arasındaki bağlantıyı kontağı sağlayan ve elektron demetinin elektrik alan ile ilk karşılaştığı yerdir. RF gücü ile kavitenin içerisine verilen alanın değeri plug'dan başlayarak içeride iris bölgesine doğru artar.

3½- hücrelik kavite tasarımı için öncelikle birbirleri arasında belirli oranların ayarlanması gereken eliptik parametreleri,  $\pi$  - hızlandırıcı modunu ve kavite içerisinde düzgün elektrik alanı verecek şekilde ayarlanmıştır. Elde ettiğimiz oranlar aşağıdaki şekil (Şekil 3.12) üzerinde ölçekli olarak görünmektedir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



Şekil 3.12. 3½ hücrelik kavite geometrisi

Buradaki kavite geometrisine bağlı olarak iris yarıçapı ( $R_3$ ,  $R_5$  ve  $R_6$  değerleri) hücreden - hücreye bağlaşım sabitini ( $k_{cc}$ ), pik elektrik alanın hızlandırıcı alana oranını ( $E_{pk}/E_c$ ), pik magnetik alanın hızlandırıcı elektrik alanına oranını ( $H_{pk}/E_c$ ), şant impedansını ve kalite faktörünü direkt olarak etkiler. Çalışmalarımızda, son hücredeki giriş bağlaşımından (input coupler) dolayı son kavite hücresi duvarındaki minimum yüzey alanı gereksinimini karşılamak ve demet giriş-çıkış (beam port) ile “input coupler” arasındaki oranı optimize etmek için  $R_3$  ve  $R_5$  35 mm,  $R_6$  ise 39 mm seçilmiştir. Buradaki 3 parametre “TESLA Test Facility” ’deki kaviteleinkilerle aynı seçilmiştir [5].

Yapılan optimizasyon çalışmalarından sonra, analitiksel hesaplar ve superfish/poisson kodu kullanılarak, hücreden-hücreye bağlaşım sabiti,  $k_c = 1.94$ ,  $E_{pk}/E_c \cong 2.7$ ,  $H_{pk}/E_c \cong 54 \text{ Oe}/(MV/m)$ , şant impedansı,  $R_{sh}/Q \cong 363 \Omega$  ve kalite faktörü ise,  $Q_0 = 0.91 \cdot 10^{10}$  değerlerinde elde edilmiştir.

Bütün elde edilen diğer parametreler Tablo 3.4’te verilmiştir. 3½-hücrelik tabanca kavitesinin geometrik parametreleri aşağıdaki tabloda (Tablo 3.2) detaylı gösterilmiştir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Tablo 3.2. Tabanca 3½-hücrelik kavite geometrisinin parametreleri ve karşılık gelen değerleri

Placement	Parametre	Değer (mm)
Katot plug	$l$	28
	R1	6
Tabanca yarım hücre	L1	22
	L2	28
	R2	102.7
	a1	10
	b1	20
	r1	16
	r2	13.75
Orta hücreler	L3	57.7
	L4	57.7
	R3	35
	R4	102.7
	R5	35
	a2	14
	b2	20.34
	a3	13.7
	b3	20.34
	r3	43
r4	43	
Son hücre	$L_{tube}$	100
	L5	57.7
	L6	56.6
	R5	35
	R6	39

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

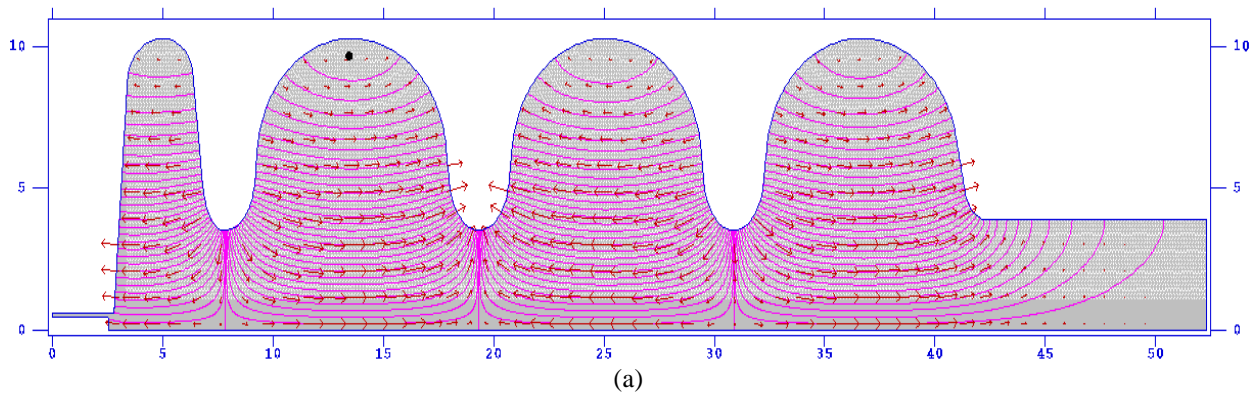
	a4	10
	b4	14.22
	r5	44.22

Burada orta ve son-hücre parametreleri eksen üzerinde elektron demetlerini, tabanca çıkışında, daha çok hızlandırmak ve ileri itmek için daha yüksek elektrik alanına sahip olacak şekilde seçilmiştir. Yukarıdaki tablodaki optimize edilmiş geometrik değerler kullanılarak 1299.0917 MHz frekans değeri elde edilmiştir.

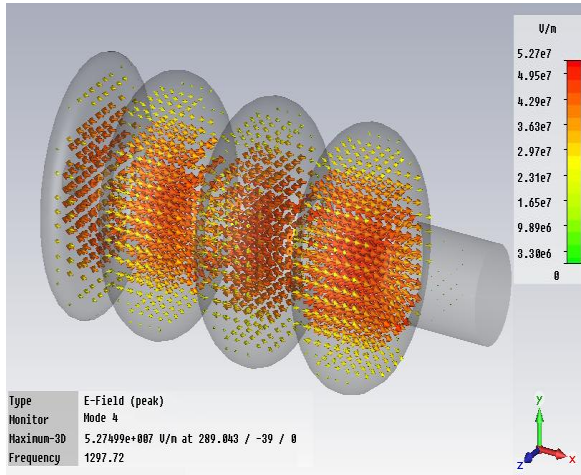
### 3.2.2.2 3½ - Hücrelik Kavite Sisteminde Elektrik ve Magnetik Alanlar

3½ - hücrelik tabanca kavitesinde Superfish/Poisson ve CST ile elde edilen demet yolu boyunca elektrik alan çizgileri ve pik elektrik alan dağılımı aşağıdaki şekillerde (Şekil 3.13, (a), (b) ve (c)) görülmektedir.

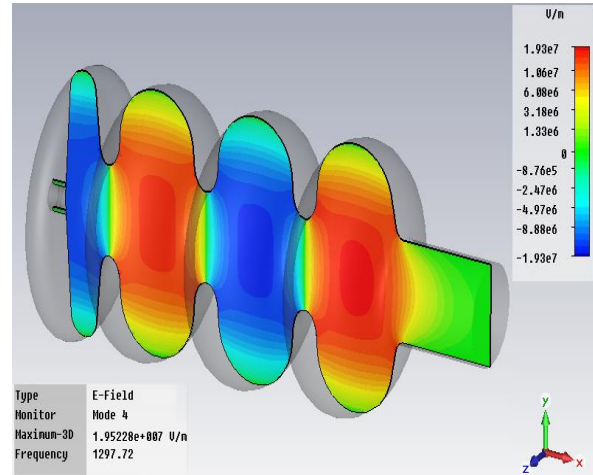
Şekil 3.13, (a), (b) ve (c)'deki şekillerden görüldüğü üzere, hücrenin merkezinde, eksen üzerinde hızlandırıcı gradyant yüksektir ve kavitenin tepe kısmının duvarına doğru azalır. Hücreler arasında, iris noktasında (2 hücrenin birleştiği yerde, eksen üzerindeki noktada) gradyant sıfırdır fakat iris yüzeyi çevresinde hızla en yüksek değerine ulaşır.



## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



(b)



(c)

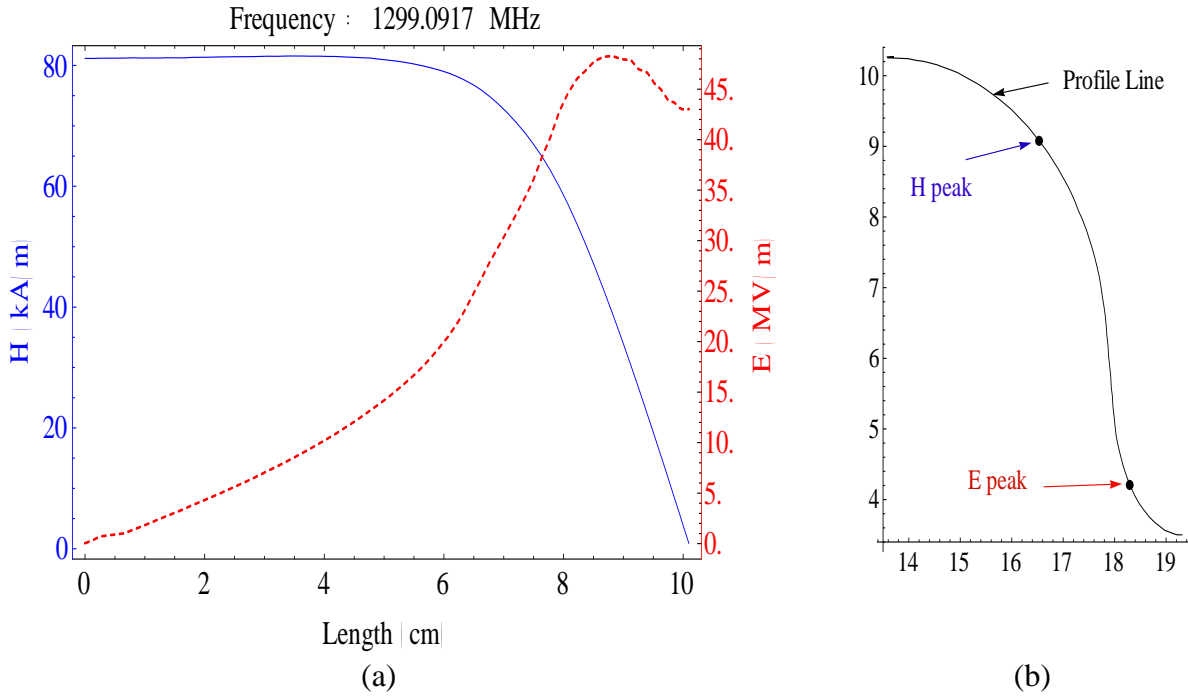
Şekil 3.13.  $3\frac{1}{2}$ -hücrelik tabanca kavitesi için elektrik alan çizgileri ve yönleri a) Superfish/Poisson ile, b) ve c) CST Microwave ile, sırasıyla pik elektrik alanı ve elektrik alan dağılımı. Renkler alan yoğunluğunu ve yönünü göstermektedir (CST MWS'de x-ekseni demet yönü olarak alınmıştır)

### 3.2.2.2.3 $3\frac{1}{2}$ - Hücrelik Kavite Sisteminde Pik Elektrik ve Magnetik Alanların Belirlenmesi

Kavite hücresinin yüzeyinde elektrik ve magnetic alanın pik değerleri Superfish/Poisson kullanılarak elde edilir. Aşağıdaki şekillerde (Şekil 3.14, (a) ve (b)) çok hücreli bir kavitenin bir iç hücreindeki hücre profil çizgisi boyunca elektrik ve magnetic alanların değişimi görülmektedir. İris yüzeyi üzerinde pik elektrik alana sahip olunurken kubbe yüzeyi üzerinde pik magnetic alan değeri elde edilmektedir.

Kavite yüzeyi üzerinde pik elektrik alan ve magnetic alan değerlerini bilmek önemlidir çünkü bu alan değerleri limit değerlerini aştığında kavite materyaline zarar verirler. Aşağıdaki tabloda (Tablo 4) CST MWS ve Superfish/Poisson'dan elde edilen bazı kavite, RF alanı ve electron demet parametreleri verilmektedir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



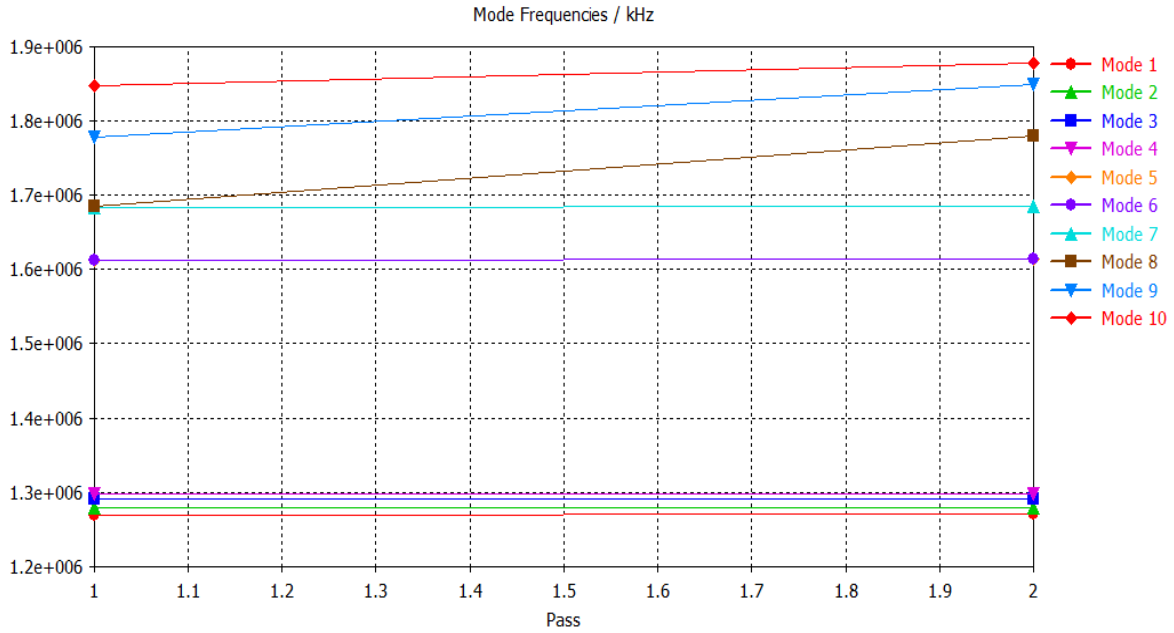
Şekil 3.14. İçerideki yarım hücre yüzeyinde profil çizgisi boyunca elektrik, magnetik alan değerleri ve elektrik ve magnetik alanik pik değerlerinin kavite üzerindeki yerleri

### 3.2.2.2.4 3½ - Hücrelik Kavite Sisteminde Frekansın Belirlenmesi

CST MWS program ile 529200 mesh-hücreyi gözönüne alınarak 1290-1300 MHz frekans değeri aralığında 3½- süperiletken tabanca hücresi için 10 tane farklı mod hesabı yapılmıştır. 10 mod içerisinde  $\pi$  - modu olan 4. Modda, 19.5 MV/m hızlandırıcı gradyant değerinde 1300 MHz'e en yakın olan 1297.72 MHz elde edilmiştir.

CST MWS programıyla elde edilen, her bir moda karşı gelen frekans değerlerine karşı geçiş sayısı aşağıdaki şekilde (Şekil 3.15) gösterilmektedir. CST MWS özdeğer çözücü kullanılarak, 10 farklı moda karşı gelen frekans değerleri göreceli hatalarıyla hesaplanmıştır ve Tablo 3.3'te verilmektedir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



Şekil 3.15. Her bir mod hesabı için çalışılan 10 özdeğerin frekans dağılımı

### 3.2.2.2.4.1 3½ - Hücrelik Kavite Sisteminde Frekans Hatalarının Belirlenmesi

Çalışılan 10 farklı mod için 1300 MHz değeri civarında frekans değerleri elde edilmiştir. Bunlardan sadece 4. Mod hızlandırıcı modudur. 10 farklı mod için göreceli hatalar, CST MWS özdeğer çözücü program ile elde edilmiştir. Elde edilen değerler aşağıdaki tabloda (Tablo 3.3) gösterilmektedir. Tablodan görüleceği üzere hızlandırıcı mod olan 4. modun frekansındaki hata en düşük değerdedir. Bu durum hızlandırmanın, frekans ile orantılı bir şekilde ne kadar iyi yapıldığının göstergesidir.

Tablo 3.3. 1290-1300 MHz frekans değerleri aralığında hesaplanan göreceli hata değerleri

Modlar	Moda göre elde edilen frekans değeri (GHz)	Belirlenen hata değeri
1. mod	1.269	$5.4 \times 10^{-3}$
2. mod	1.278	$8.0 \times 10^{-3}$



### THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

3. mod	1.291	$2.8 \times 10^{-3}$
4. mod	1.297	$0.24 \times 10^{-3}$
5. mod	1.616	$1.3 \times 10^{-3}$
6. mod	1.625	$4.4 \times 10^{-3}$
7. mod	1.685	$1.09 \times 10^{-3}$
8. mod	1.778	$3.5 \times 10^{-3}$
9. mod	1.838	$0.215 \times 10^{-3}$
10. mod	1.869	$0.75 \times 10^{-3}$

#### 3.2.2.2.4.2 3½ - Hücrelik Kavite Sisteminde Bağlaşım Sabitinin Belirlenmesi

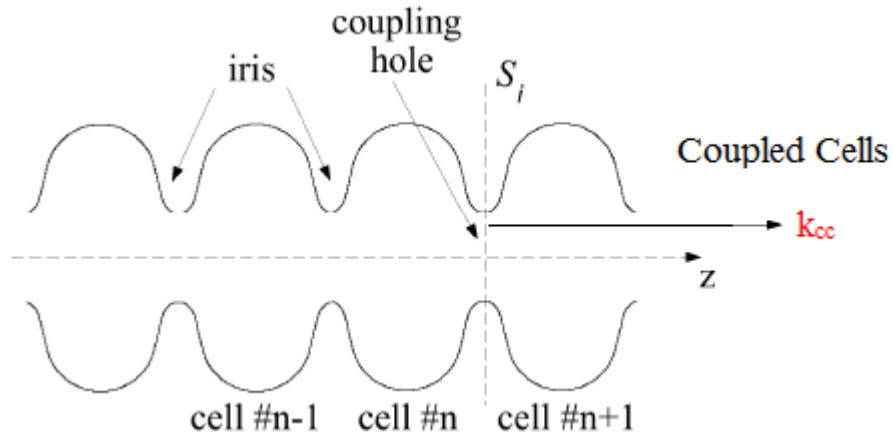
Kavite sistemi için diğer önemli bir kavite parametresi de bağlaşım sabiti  $k_{cc}$ 'dir. Komşu hücrelerdeki kavite alanları aynı veya zıt yönlerde olabilir. Bu modlar 0 ve  $\pi$  modu olarak adlandırılır ki bunlar komşu hücrelerde alanlar arasındaki faz kaymasına karşılık gelir. İki hücre arasındaki bağlaşım kuvvetliyse, bu durum iki modun frekansları arasındaki büyük farka karşılık gelir. Hücreden-hücreye bağlaşım faktörü 1297.72 MHz'lik frekanstaki  $\pi$  - modu (Şekil 3.13.a) ile 1273.89 MHz'lik 0-modu (Superfish/Poisson'dan elde edilen değer, Şekil 3.18) arasındaki ilişkiyi verir. Hücreden hücreye bağlaşım, bağlaşım sabiti ile nitelendirilir:

$$k_{cc} = 2 \frac{f_{\pi} - f_0}{f_{\pi} + f_0} \cdot 100\%$$

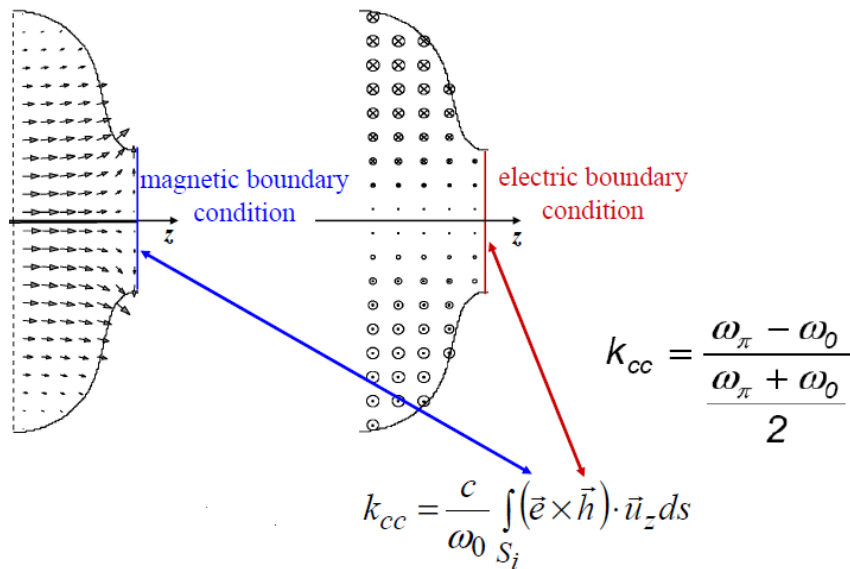
İki mod arasındaki frekans farkı ne kadar büyükse, iki hücre arasındaki bağlaşım o kadar kuvvetli olur ve böylece kavite içerisindeki demeti hızlandırmak için iyi bir ortam oluşur. Yapılan modelleme çalışmalarında CST Microwave Studio Programı kullanılarak bağlaşım katsayısı %1.95 olarak hesaplanmıştır. Aşağıdaki şekillerde (Şekil 3.16 ve Şekil 3.17) kavite

### THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

hücreleri arasında bağlaşım sabitinin belirlendiği yer ve analitik olarak nasıl belirlendiği gösterilmiştir [6].



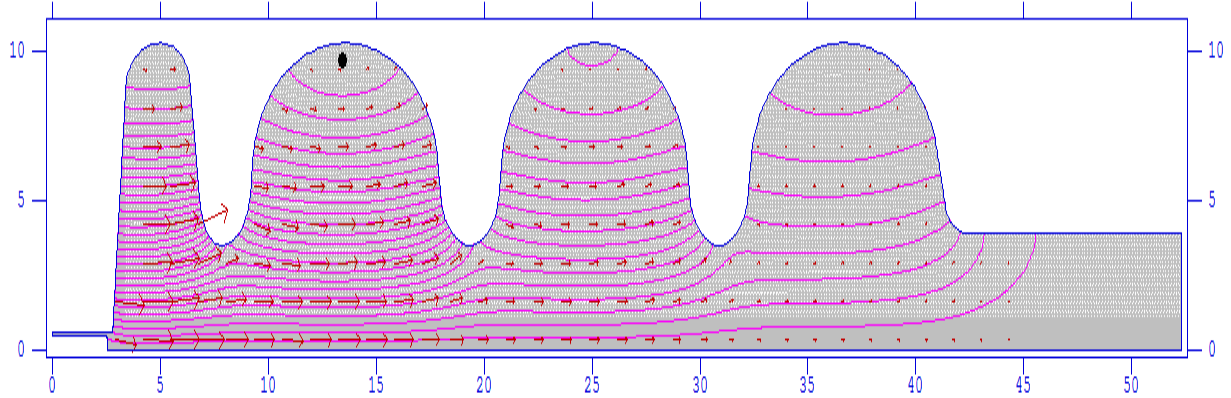
Şekil 3.16. Kavite hücreleri arasında, iris bölgesi ( $S_i$ ) civarında, bağlaşım sabitinin ( $k_{cc}$ ) belirlendiği yer



Şekil 3.17. Bağlaşım sabitinin değeri

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Hücreden-hücreye bağlaşım sabitini hesaplamada kullanılan 0-modunun elektrik alan çizgileri Superfish/Poisson programından elde edilmiştir ve aşağıdaki şekilde (Şekil 3.18) görülmektedir. 0-mod elektron demetini durdurucu mod olarak görev yapar ve çalışma frekansından oldukça farklı bir değerde (burada ~1273 MHz elde edilmiştir) elde edilmesi beklenir.



Şekil 3.18. 0 - modu için Superfish/Poisson programından elde edilen elektrik alan çizgileri

Çünkü hızlandırıcı mod çalışma frekansına en yakın olan moddur. Sıfır modda, bir hücrede elektrik alan çizgileri demet yolu boyunca iken diğer hücrede de yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi aynı yöndedir.

### 3.2.2.2.5 Kavite ve Alan Performansını Sınırlayan Etkenler

Multipacting, Hidrojen Q-problemi, Lorentz Force Detuning, alan yayını, termal kararsızlıklar, yüzeydeki magnetik kirlilikler ve termal çökme gibi sistemin normal çalışmasını etkileyen etkenler kavite ve alanın önemli problemlerindedir. Magnetik alan yüzünden meydana gelen problemlerde, kavite ısınabilir, kavite materyali delinebilir ve elektrik alandan kaynaklı problemlerde kavite içerisinde x-ışınları yayını görülebilir, elektriksel tüm kontak bağlantı bozunumları yaşanabilir.

Bu tip problemler kavitenin normal çalışmasını etkiler ve sistem performansını düşürür. Bu konularla ilgili detaylı çalışmalar başka kaynaktan elde edilebilir [7].

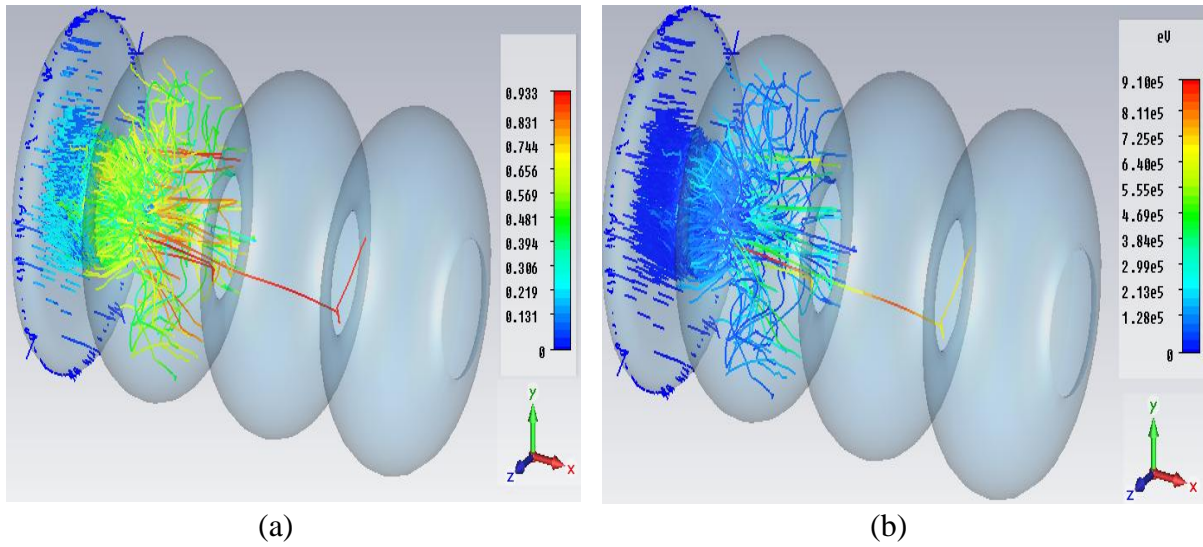
## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

### 3.2.2.2.5.1 Multipacting

Burada, sadece kalite faktörü ve alanı etkileyen Multipacting olayı göz önüne alınmıştır. Elektronların multipacting süreci içerisinde modellenmesi için, CST Particle Studio (CST PS) programı kullanılmıştır. Buradan kavite içerisindeki elektronların enerjisi, momentumu ve beta elde edilmiştir. Kavite kusurları ve alan bozulmalarından dolayı farklı eksenlerden demet eksenine üzerine doğru elektron dağılımının hareketi kavite yüzeyi üzerinde yükün toplanmasına neden olur.

Aşağıdaki şekillerde (Şekil 3.19, (a) ve (b)) eksenden dağılan parçacıkların beta değeri gösterilmiştir ki bu durumda kavite içerisinde elektronlar multipacking'e sahip olurlar. İkinci şekilde de bu parçacıkların enerji değerleri elde edilmiştir.

Şekillerden görüldüğü üzere, Multipacting, SASE SEL tasarımında önemli bir problem yaratmamaktadır çünkü yayınlanan elektronlar kavitenin ekvator bölgesinin çevresinde toplanır ki bu bölgede fazla hızlanma meydana gelmez.



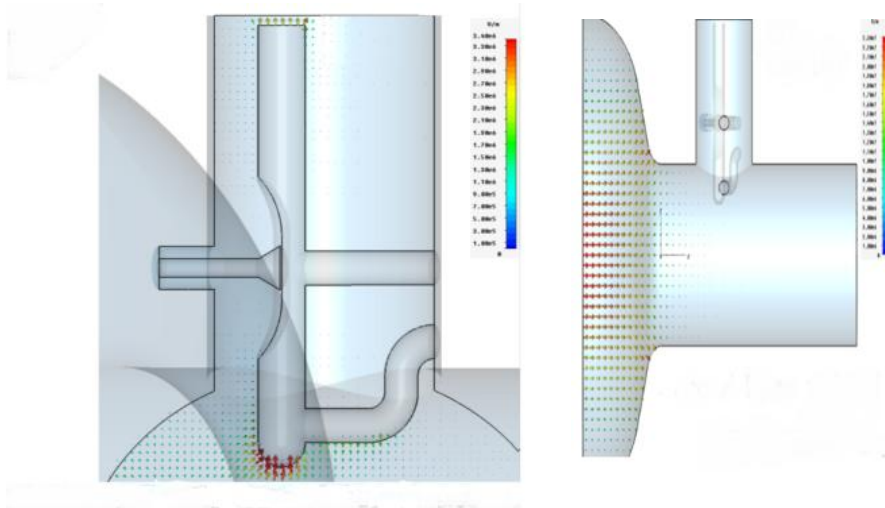
Şekil 3.19. Multipacting sürecinde a) beta ve b) elektronların enerjisi

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

### 3.2.2.2.5.2 Yüksek Mertebeden Modlar (HOM)

Yüksek mertebeden modların kavite içerisinde oluşması hızlandırıcı sistemlerde istenmeyen bir durumdur. RF alanı kavite içerisine uygulandıktan sonra kavite içerisinde birçok farklı mod ortaya çıkabilir. Bunlar durdurucu, hızlandırıcı, dipol modlar olabileceği gibi ne olduğu anlaşılamayan modlar da olabilir. Hızlandırıcı mod dışındaki diğer bütün modların kavite dışarısına alınması gereklidir.

Ayrıca kavite duvarlarında meydana gelen güç kayıplarının etkisiyle kavitenin ısınması içeride istenilmeyen bu yüksek mertebeden modlara (HOM) sebebiyet vermektedir ve bu durum kavite sisteminin çalışma operasyonuna olumsuz etkileyen bir unsurdur.



Şekil 3.20. Kavitelere HOM Modlarının davranışı

Hızlandırıcı içerisinde demetler ile HOM modlarının etkileşimi demet kalitesini azaltan etki yapar. Bu durumun önüne geçmek için kavite alan incelemelerinde ayrıca HOM mod frekans değerleri de işlemlere katılmak zorundadır. Kavite fabrikasyonlarında (Yüzey pürüzleri gibi) kavite üretim hatalarından kaynaklanan kayıpları teorik olarak hesaplara dâhil edilemezse bile kavite geometrisine bağlı HOM mod oluşumlarını CST MWS programı içerisinde analiz edebilmesi mümkün olmaktadır.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

CST MWS Programı ile kavite içerisinde HOM modların, HOM frekanslarında HOM bağlaşım sistemleri içerisinde (HOM coupler ya da HOM damping) simülasyon çalışmaları ve analiz çalışmaları yapılabilmektedir [8]. Bu kapsamda CST MWS ile yapılan HOM frekans analiz çalışmaları için 10, 20, 50 veya daha fazla sayıda mod alınarak incelenme yapılabilir. CST MWS modelleme çalışmaları kapsamında 10 tane mod alınarak HOM Modları incelenmiştir ve kavite içerisinde ve HOM Coupler çevresindeki modları gösteren yukarıdaki şekiller elde edilmiştir.

### 3.2.2.2.5.3 Lorentz Force Detuning (LFD)

Lorentz Force Detuning (LFD), hızlandırıcı kavitelere iç elektromanyetik alanların (kavite içindeki RF gücünün) kaviteye uyguladığı basınca bağlı olarak oluşan kuvvet etkisiyle, bu kuvvetin kavite yüzeyine etki etmesiyle, kaviteleşin deforme olması durumudur. Kavite yüzeyi üzerinde üretilen basınç:

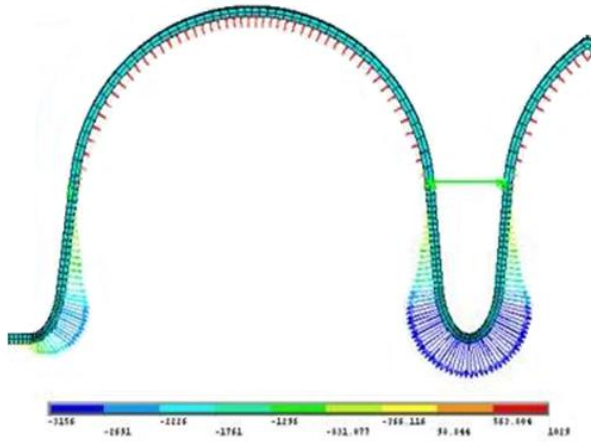
$$P = \frac{1}{4}(\epsilon_0 E^2 - \mu_0 H^2)$$

şeklindeşir. Bu basınçın bir sonucu olarak kavite geometrisi bozulur ve onun rezonans frekansında kaymalar olur.

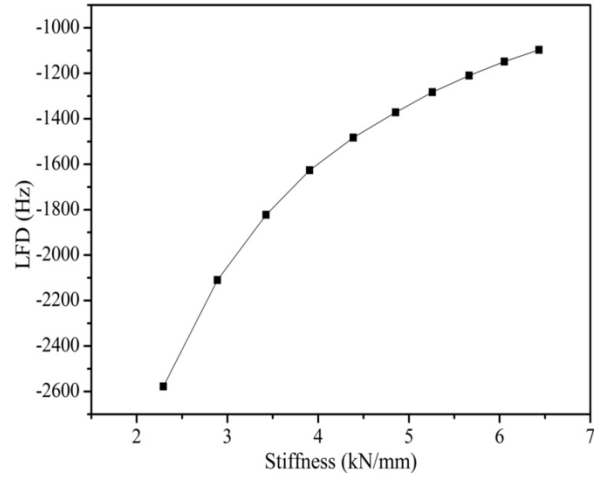
SC kaviteleşinde Q yüksektir ve band genişliğı küçüktür, böylece çok küçük detuning bile kavitenin giriş gücünde büyük yansımaya sebebiyet verir. Detuning'i düşürmek için kavitenin duvar kalınlığı seçimi önemlidir, ek olarak takviye halkasında da mekaniksel sınırlamalar getirilebilir. Takviye halkası (Stiffener Ring) son kavite hücresi ile helyum tankı arasında yerleşirilmişir. Detuning'in düşürülmesi büyük oranda helyum tankının sağlamlığına bağlıdır.

Atmalı yüksek gardiyent değerlerindeki alan operasyonlarında kavite duvarlarında iç basınç ve dış basınç farkına bağlı özellikle çok hücreli yapılarda kavite hücre bağlaşım noktalarında veya bu alanlara yakın yüzeylerde bükülerek kavitenin şeklinin bozulmasına sebebiyet vermektedir. Henüz tam olarak çözüme kavuşturulamayan bu sorun için yeni dizayn kavite bağlaşım noktalarına destek halkaları yerleşirilmektedir.

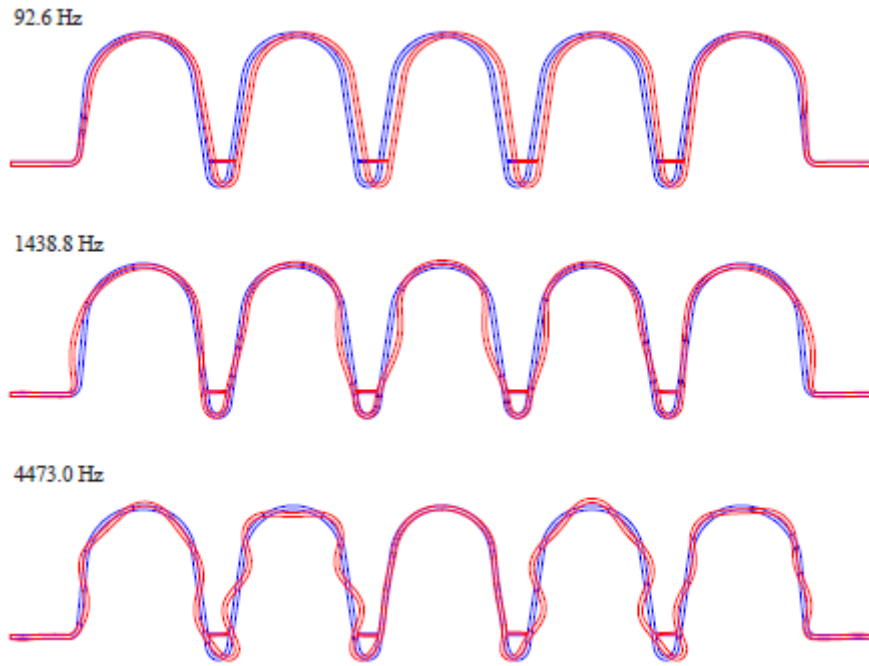
## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.21. Lorentz Kuvveti etkisi a) Tek hücrede, c) 5 hücreli kavitede and b) Helyum tankının sağlamlığının LFD'ye etkisi

Lorent Force Detuning etkisini azaltama için kavite yapımında alanların basınç etkisi hesaplanarak dizayn edilmesi ve üretilmesi gerekir. Soğutma işlemleri nedeniyle ince bir kalınlık yapısına sahip kaviteler nedeniyle hızlandırıcı teknolojisinde en fazla üzerinde durulan konulardan biri kavitelerde Lorentz kuvveti ayarlarıdır. Kavite imalatından sonra hızlandırıcı sistemlere yerleştirilmeden önce kaviteler Lorentz etkisine dayanabilecek şekilde testlerden geçirilmektedir.

### 3.2.2.2.5.4 Mekanik Sistem Hataları

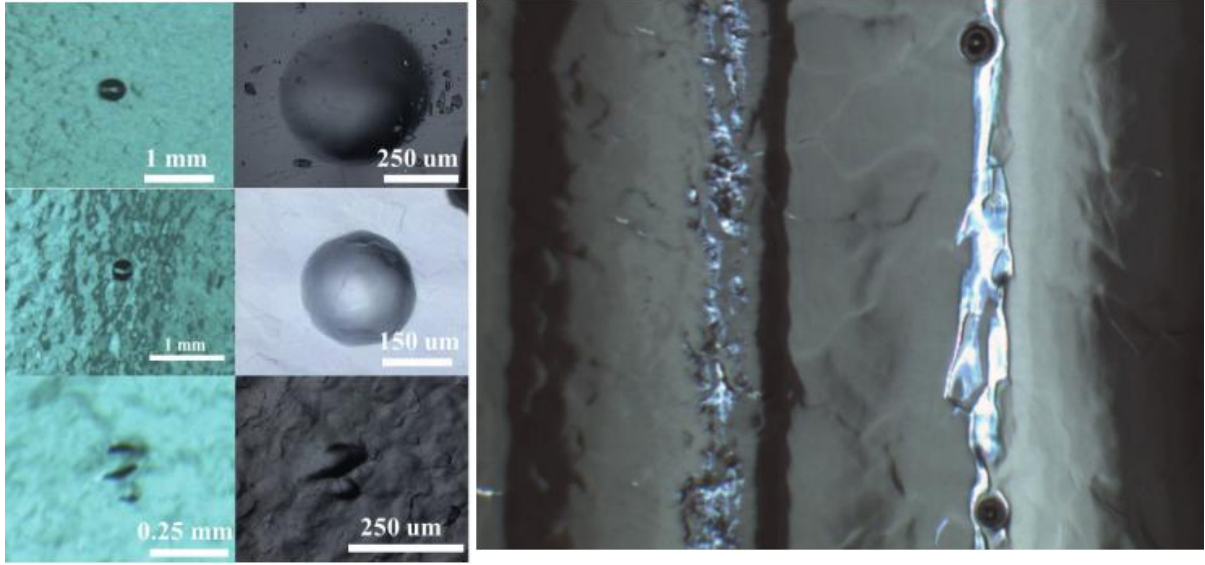
#### 3.2.2.2.5.4.1 Kavite Yüzeyi Hataları

Hızlandırıcı kavitelerde kavite çalışmasını engelleyen önemli parametrelerden biride kavite fabrikasyonunda, kavitede imalatı sırasında kavite yüzeyinde ve geometrisinde meydana gelen hatalardır. Kavite materyali pürüzleri kavite içerisindeki alanların kavite yüzeyi ile temasını arttırarak içerde yüksek mertebe modların oluşumuna ve alan kayıplarına neden olmaktadır. Bu yüzey kusurlarına kavite metalinin birleşim noktalarındaki kaynaklar, kavite imalatı sırasında meydana gelen hatalar neden olmaktadır. Bu sorunun çözümü için kavite yüzeylerine elektro cilalama (electro polishing) ve kimyasal cilalama (chemical polishing, CP) işlemleri uygulanmaktadır.

1990 yılında hızlandırıcı kaviteleri temizlemek adına centrifugal barrel polishing (CBP) tekniği geliştirilmiştir. Bu teknikle hızlandırıcı SRF kaviteler bir tank içerisinde hızlı bir şekilde orta eksenini etrafında döndürülerek yüksek saflıkta bir su ile sırasıyla sabun, alumina mesh ve silica kullanılarak temizlenmektedir.

Elektro cilalama ve kimyasal cilalamalarda kullanılan hidroflorük asit kavite materyaline zarar vermesinden dolayı yeni nesil hızlandırıcı yapıların yüzey temizliğinde centrifugal barrel polishing (CBP) yöntemi tercih edilmektedir [9].





Şekil 3.22. Kavite yüzeyi kusurları

#### 3.2.2.2.5.4.2 Mikrofonik Gürültü (Microphonics)

Parçacık hızlandırıcı sistemlerinde cryogenic içerisinde hızlandırıcı sistemin elemanı olan vakum pompaları ve selenoid pompaları gibi mekanizmalar mekanik titreşimlere neden olmaktadır. Hızlandırıcı sistemin çalışma frekansı bu titreşimlerden kaynaklanan ve diğer kavite yapılarından kaynaklı frekans değerleriyle ilişkilidir. Kavite içerisinde olması istenilen düzgün bir frekans aralığını etkileyen bu mekanik ve elektronik titreşimler kavite içerisinde frekans değerlerinde değişimlere neden olmaktadır. Genellikle hızlandırıcı yapılar içerisinde dalga genişliği 5-10 Hz (rms değerinde) ve frekans değerlerinde 0.1 Hz ile birkaç yüz Hz civarında arttıran bir değişime neden olmaktadır.

#### 3.2.2.3 Tabanca SC Kavitesinin Modelleme Sonuçları

Superfish/Poisson ve CST MWS programlarının kullanılması sonucunda katot plug, tabanca kavite sistemi, solenoid ve tüm tabanca sistemi boyunca elektrik ve magnetik alanların davranışı ve parçacık demetlerinin demet yolu boyunca davranışı modellenmiştir. Elde edilen değerler aşağıdaki tabloda (Tablo 3.4) özetlenmiştir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

*Tablo 3.4. 3½ hücrelik SC tabanca için optimize edilmiş RF alan parametreleri*

Parametre	Superfish/Poisson	CST MWS
Mod	TM <sub>010</sub> , π-modu	TM <sub>010</sub> , π-modu
Beta, $\beta$ ( $\beta = v/c$ )	1.0	0.9956
Çalışma (RF) frekansı (MHz)	1299.0917	1297.72
Pik elektrik alan, E <sub>pk</sub> (MV/m)	53.5	52.7
Hızlandırıcı Gradyent, E <sub>c</sub> (MV/m)	19.21	19.50
Kalite faktörü, Q <sub>0</sub>	9.09436 × 10 <sup>9</sup>	9.0301 × 10 <sup>9</sup>
Hücre sayısı	3½	3½
Spesifik şant impedans, R <sub>sh</sub> /Q <sub>0</sub> (Ω)	363.71	365.41
Geometrik faktör, G (Ω)	243.48	241.57
Yüzey direnci, G/Q <sub>0</sub> (nΩ)	26.77	26.75
Ortalama alan şiddeti, E <sub>0</sub> (MV/m)	26.6	26.6
E <sub>pk</sub> /E <sub>c</sub>	2.78	2.68
H <sub>pk</sub> /E <sub>c</sub> (Oe/(MV/m))	54.3229	56.1186
k <sub>c</sub> %	1.9435	1.9533
Çalışma sıcaklığı (K)	2.0	2.0
Transit-zaman faktörü	0.722	0.733
Kinetik enerji (MeV)	9.17 (ASTRA Sonucu)	9.12
Güç kaybı (W)	26.48	27.39
Depo edilen enerji (Joules)	29.5067858	30.3281
Dış duvar üzerinde ortalama magnetic	1007.809	967.27

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

alan (Oe)		
Duvar üzerinde maksimum manyetik alan (H) (Oe)	1043.565	1088.09
Duvar üzerinde maximum elektrik alan (E) (MV/m)	53.54	52.4
Aktif kavite uzunluğu (cm)	50.058	51.550

### 3.2.3 Katottan Çıkan Elektron Demet Davranışının Modellenmesi

Astra (A Space Charge Tracting Algorithm ) programı elektronun faz uzayındaki davranışını inceler. THM SASE-SEL için Astra programıyla elektron tabancası ve ilk hızlandırıcı yapılar içerisindeki elektronların davranışları modellenmiştir.

Astra programı için rasgele parçacıkların üretildiği generator programı ile demetin faz uzayındaki davranışının ve demetyoluna konulan sistemlerin içerisindeki elektron demetlerinin davranışının yazıldığı program kullanılmaktadır. Astra programında kullanılan alt programlar:

**GENERATOR:** Başlangıç durumunda ilk parçacık dağılımını elde etmek için kullanılır.

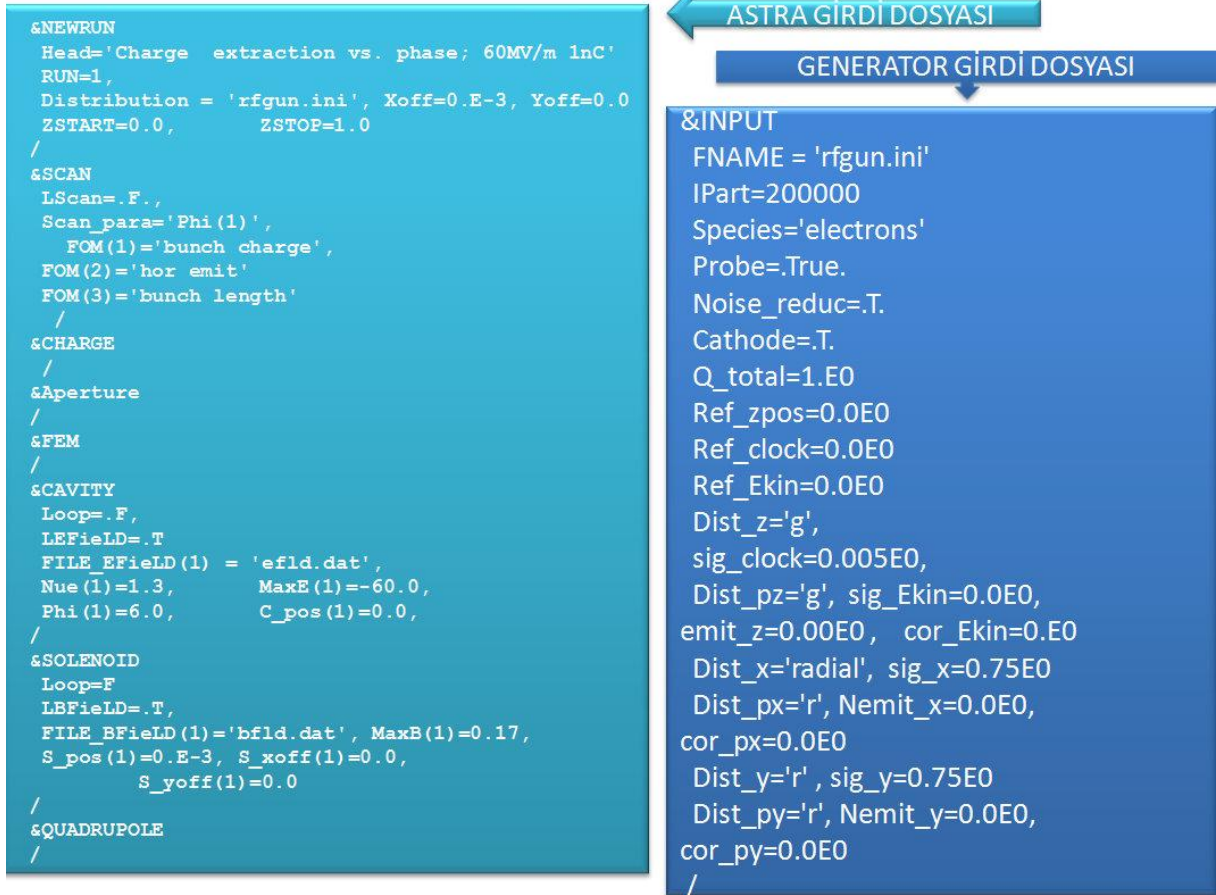
**FIELDPLOT:** Demet hattı elemanlarını, uzay yük dağılımlarını, dilim yayınımlarını görüntülemek için kullanılır.

**POSTPRO:** Parçacık dağılımlarının faz uzayı grafiklerini görüntülemek için kullanılır ve faz uzayı dağılımlarının ayrıntılı analizine olanak sağlar.

**LINEPLOT:** Demet boyutlarını, yayınımlarını, uzunluk, enerji, boyuna demet hattı konumunu bir parametreye bağlı olarak görüntülenmesi için kullanılır.

Aşağıdaki şekilde (Şekil 3.23) Astra ve Generator programlarının örnek girdi dosyaları gösterilmiştir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



Şekil 3.23. Astra ve Generator programlarının örnek girdi dosyaları

### 3.2.3.1 Astra İle Yapılan Modelleme Çalışmaları

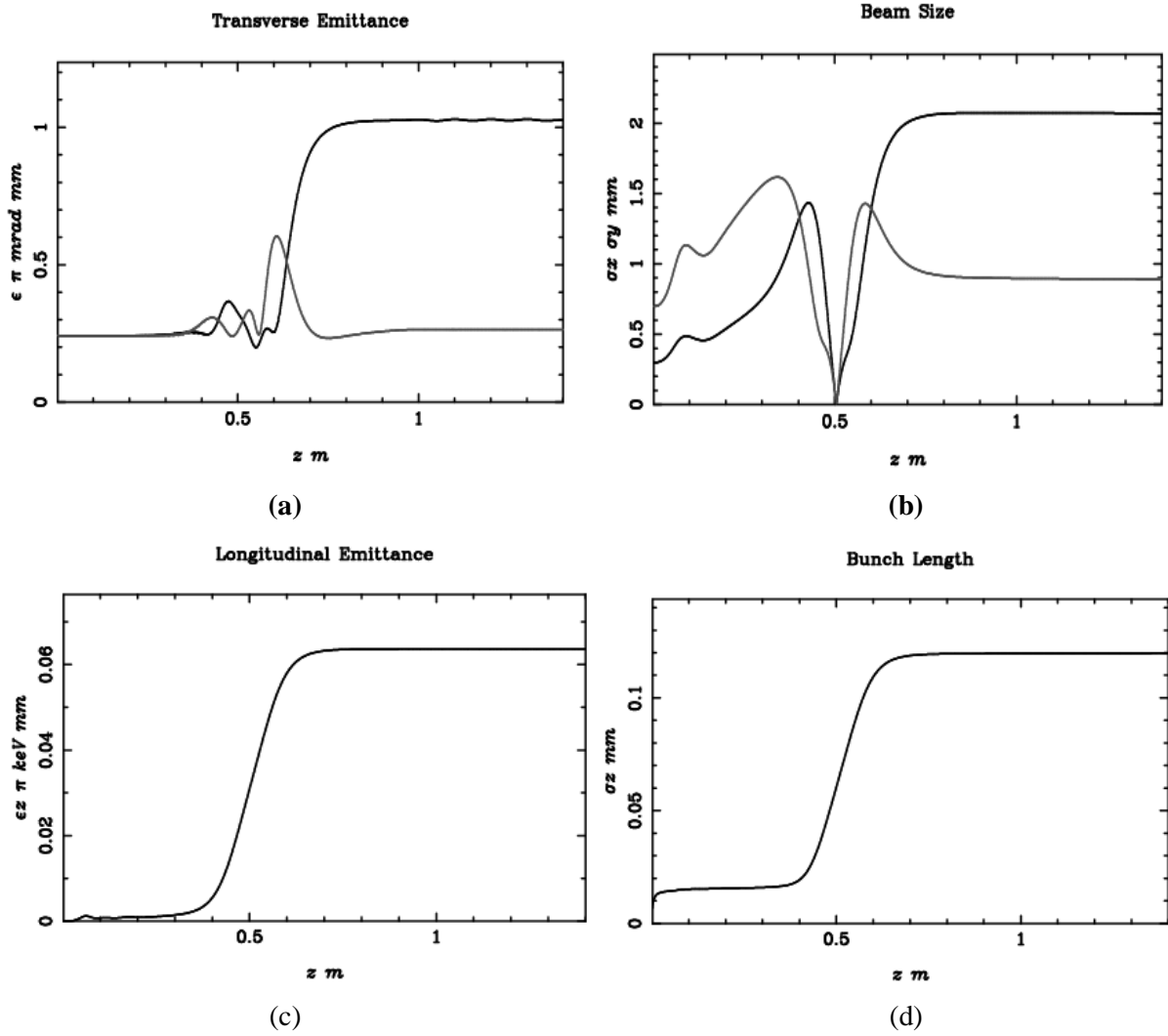
Astra programı ile yapılan modelleme çalışmaları sırasında elektron demeti demet yolu boyunca modellenmiştir. Demetin bütün özelliklerinin yanı sıra yayını, ilerleyişi, hızı, ortalama enerjisi, uzunluğu ve büyüklüğü de elde edilmiştir.

#### 3.2.3.1.1 Tabancada Elektron Demetinin Modellenmesi

Astra programı ile elektron demetinin izlenmesi sonucunda demetin hem demet yolu doğrultusunda hem de enine doğrultuda aşağıdaki şekillerde görüldüğü üzere sırasıyla enine

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

yayınımı (x-y doğrultularındaki yayılım), demet büyüklüğünü, demet yolu boyunca olan demetin yayılımını ve demet uzunluğunu elde edilir.



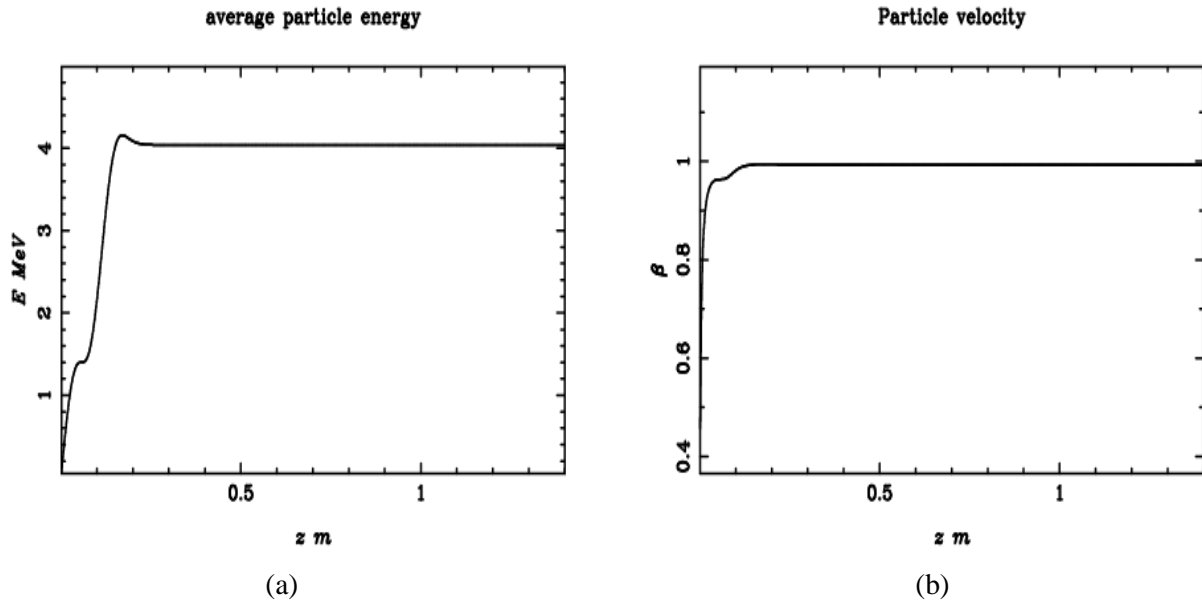
Şekil 3.24. Elektron demetinin demet yolu boyunca a) Enine yayılımı, b) Demet büyüklüğü, c) Boyuna yayılımı, d) Demet uzunluğu

Yukarıdaki şekillerden (Şekil 3.24, (a), (b), (c) ve (d)) görüleceği üzere demet katotdan çıktığında 0.5 m'e kadar bir dağılım göstermiş sonrasında sabit ve kararlı bir şekilde devam etmiştir. THM SASE-SEL için elde edilen bu değerlerde enine boyutlardaki yayılım 1 mrad mm değerindedir ki bu da uzay yükü modellemeye dahil edilmeden yapılan ve çeşitli uluslararası laboratuvarlarda elde edilen değere yaklaşık bir değerdir. Demetin büyüklüğü 0.12 mm değerinde

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

beklenildiği üzere sabit şekilde ilerlemektedir. Demetin ilerleme doğrultusunda ya da transverse boyutlarda çok fazla büyümemesi demetin kalitesi açısından önemlidir. Burada elde edilen değerler SwissFEL CDR değerleriyle uyumludur [10].

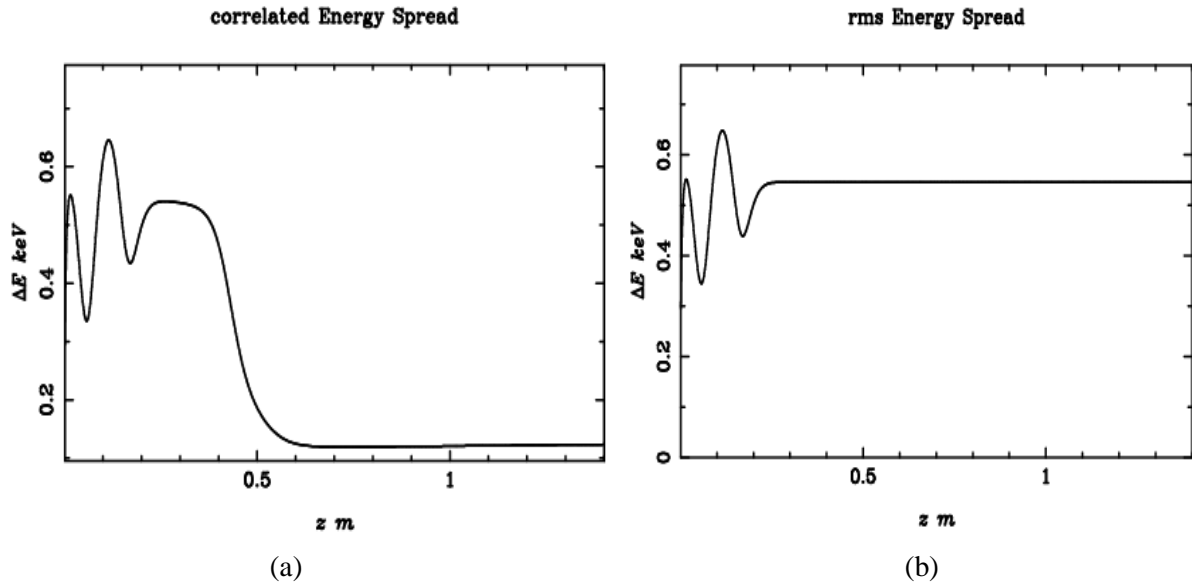
Ayrıca Astra sonuçları olarak demet yolu boyunca ortalama parçacık enerjisi ve parçacık hızı da takip edilebilmektedir. Elektron demeti tabanca içindeki ilk hızlandırıcıdan çıktığında 3-5 MeV arası ortalama enerji beklenilir. Şekillerden (Şekil 3.25, (a) ve (b)) görüldüğü üzere sonuçlar uyumludur. Ayrıca  $\beta=0.9955$  olan parçacık hızı elde edilmiştir. Grafiklerde elektron tabancadan ilk çıktığında dalgalanma göstermiş daha sonra manyetik ve elektrik alan etkisiyle beklenen şekilde yol izlemiştir.



Şekil 3.25. a) Ortalama parçacık demetinin enerjisi, b) Parçacık demetinin hızı

Astra sonuçları olarak enine faz uzayı, enine parçacık yoğunluğu dağılımı, momentum dağılımının parçacık yoğunluğuna göre değişimi, boylamsal faz uzayı, parçacık yoğunluğuna göre boylamsal dağılım değişimleri de THM SASE SEL çalışmaları kapsamında elde edilebilir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



Şekil 3.26. a) İlişkilendirilmiş enerji dağılımı, b) RMS (root-mean-square) enerji dağılımı

Parçacık demetlerinin enerji dağılımına göre boylamsal değişimleri de elde edilebilir. Bu değişimler yukarıdaki şekilde (Şekil 3.26, (a) ve (b)) gösterilmektedir. Bu değerler de SwissFel İçerik Dizayn Raporu (Conceptional Design Report, CDR) ile uyumludur.

RMS (root-mean-square) enerji dağılımı, yani enerjinin ortalama değerinden gösterilen farklılık ve ilişkilendirilmiş enerji dağılım şekilleri de tabancadan ilk çıktıklarında dalgalanma göstermiş daha sonra sabit ve beklenildiği üzere küçük değerlerde ilerlemişlerdir. Bu şekiller elde edilirken faz - 45° olarak alınmıştır.

### 3.2.3.1.1.1 Demet Yayınım Etkileri

Türk Hızlandırıcı Merkezi SASE-SEL’de demet yolu boyunca düşük enerjilerde uzay yükü etkileri, yüksek enerjilerde ise “wakefield” etkileri demeti etkilemektedir. Modellemelerde bu etkiler de çalışılmaktadır. Her iki etkinin de modellemelere dahil edilmesi demetin enine ve boyuna yayınımını, ilerlemesini, demetin akımını, demet büyüklüğünü, demetin ulaştığı enerjiyi ve odaklanmasını etkilemektedir.

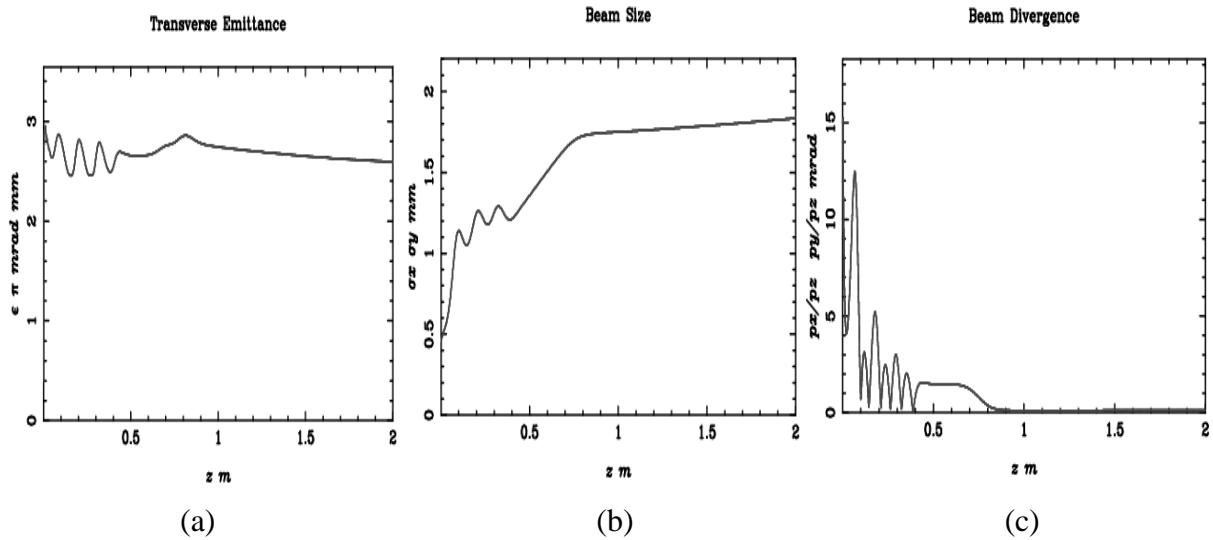
## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

### 3.2.3.1.1.1.1 Uzay Yükü Etkileri

Uzay yükü (space charge), bir elektrik alanın hesaplanacağı bölgedeki mevcut yük yoğunluğu olarak tanımlanmaktadır. Laplace denklemlerinde ihmal ediliyor olsa da dış yüzey elektrodu üzerindeki potansiyel farkı tanımlamak için kullanılır.

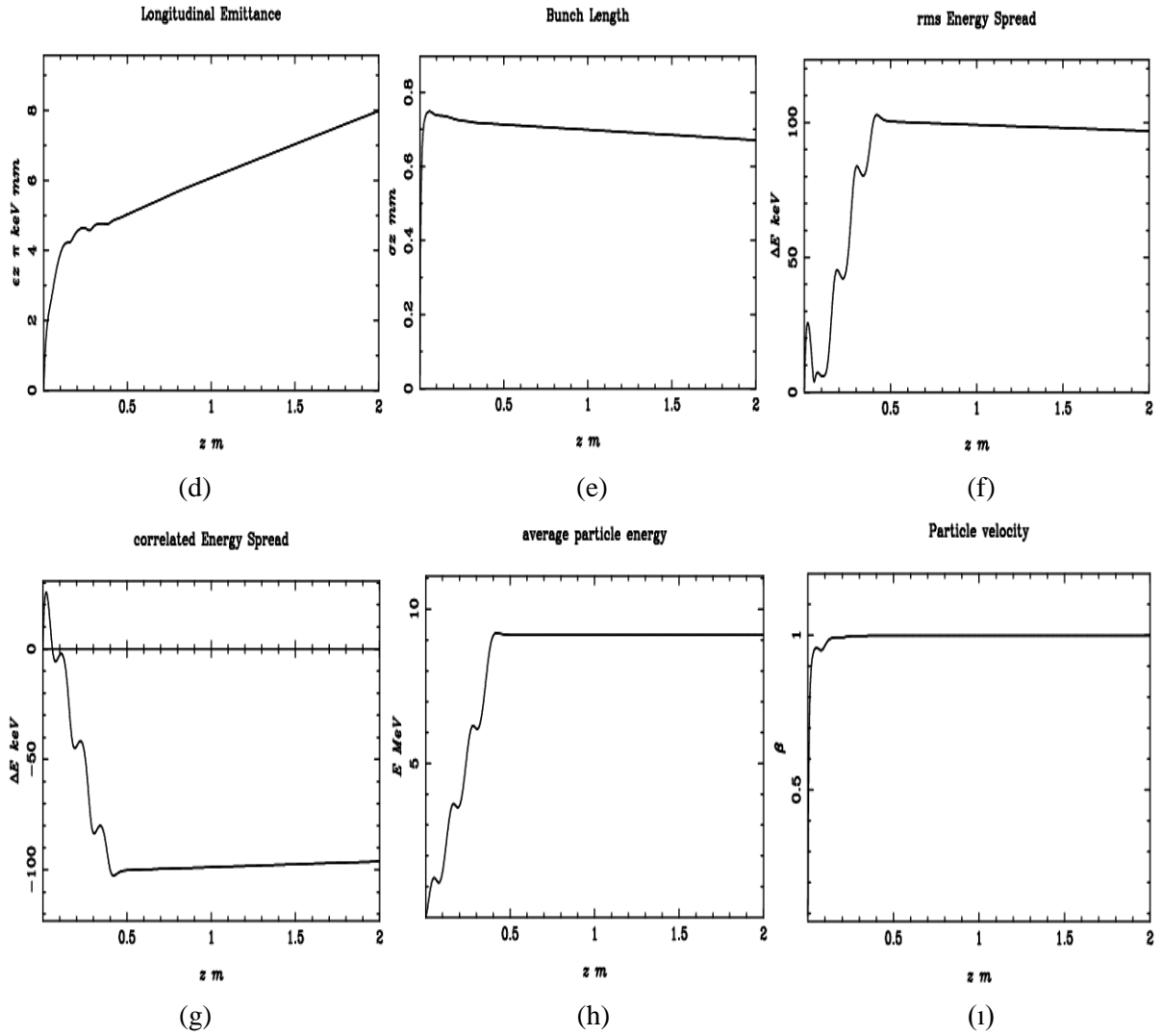
Hızlandırıcı uygulamalarında uzay yükünün hesaplanması ve demet dinamiği hesaplamaları yapılan program/kodlarda hesaba katılmalıdır. Düşük yayılım emittance ve yüksek akım demetli elektron hızlandırıcılarında uzay yükleri demeti bölerek 2. demetlerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum yayılımın büyümesine sebebiyet vermektedir. Yayılımın artışı doğrudan doğruya SASE SEL'de performansı etkileyen bir unsurdur. Hızlandırmada oluşan bu olumsuzluklar hızlandırma işlemini güçleştirmektedir. Hızlandırma için öngörülen yayılım ve enine demet akışının artması ile demetin kalitesi ve hızlandırmanın verimi azalmaktadır.

Türk Hızlandırıcı Merkezi SASE-SEL çalışmalarında tabanca bölümü üzerine yapılan modelleme çalışmalarında uzay yükü etkileri de modellemeye dahil edilerek program çalıştırılmış ve elektron demetinin demet doğrultusu boyunca yayılımı, enerjisi, demet büyüklüğü, demet uzunluğu, enerji dağılımı, elektron demetlerinin hızları, enine demet yayılımı ve diğer özellikler elde (Şekil 3.27) edilmiştir.





## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



Şekil 3.27. Boylamsal uzunluğa göre a) Enine yayınım, b) demet büyüklüğü, c) demet diverjansı, d) boyuna yayınım, e) demet uzunluğu, f) rms enerji dağılımı, g) ilişkilendirilmiş enerji dağılımı, h) ortalama parçacık enerjisi ve i) elektrik alan hızlandırıcı gradyeni tam tepe değerindeki değeri 53.5 MV/m olan tabanca ve pik magnetik alanı 0.154 T olan solenoid göz önüne alındığı modelleme çalışması için parçacık hızının değişimi

Tabancanın sonunda elektron demet enerjisi, tabancanın hızlandırıcı alanı 19.21 MV/m, ile yaklaşık 9.17 MeV değerine ulaşır.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

### 3.2.3.1.1.1.2 Wake-Field Etkileri

Cavite içerisinde parçacıklar üzerine etki eden tüm alandan parçacığın kendisinin sahip olduğu alanı çıkaracak olursak wake alanını buluruz.

Hızlandırıcı kaviteelerde her bir ultra rölativistik demet tarafından uyarılan wake alanları demet yayılımının fark edilir bir şekilde dilüsyonuna sebebiyet verir. Her bir kavite temel veya yüksek merteye mod bağlaşımları (coupler) tarafından desteklenir. Bu RF coupler'ların geometriksel konfigürasyonu antisimetrik bir alan ile sonuçlanır ki bu sonuç demete uygulanan RF kick'in ve transverse wake alanının artmasına sebebiyet verir. Bu durumların demet dinamiğine etkilerini araştırmak için kavite bağlaşımlarının çevresinde detaylı elektromagnetik alan modellemeleri yapılır.

Wake alanının enerji dağılımı boylamsal enerji yoğunluğu ile tanımlanır ki bu, demetin merkezinden belirli bir uzaklıktaki enerji yoğunluğunun enine integrali alınarak elde edilir. Wake field hesaplamaları için MAFIA kodu kullanılmaktadır [11].

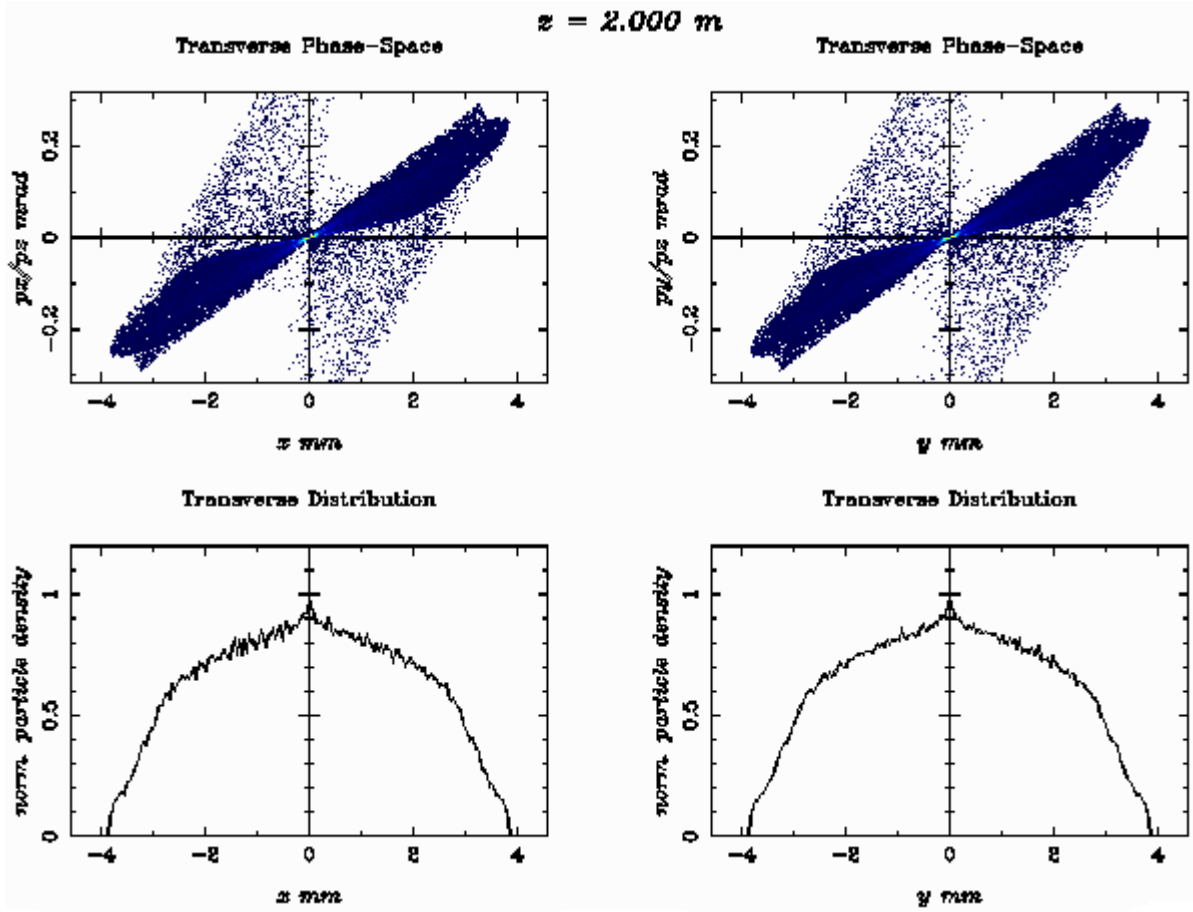
Yüksek Merteye Modlar (Higher Order Modes-HOM) wake alanını artırır. 50 tane mod alınarak CST Microwave Studio ile yüksek merteye modlar için çalışma frekansı belirlenerek modelleme çalışmaları yapılmış ve wake alanındaki değişimler gözlenmiştir. Bu konudaki çalışmalarımız devam etmektedir.

### 3.2.3.1.2 Tabanca Sistemi İçerisinde Demetin Faz Uzayındaki Davranışı

ASTRA'daki Postpro programı, tabanca sistemi boyunca farklı boylamsal bölgelerde demetin faz uzayı dağılımını grafiksel olarak gösterimini yapar.

Aşağıdaki şekillerde (Şekil 3.28), enine faz uzayındaki son demet profili ve enine dağılım, normalize parçacık yoğunluğuna göre gösterilmiştir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

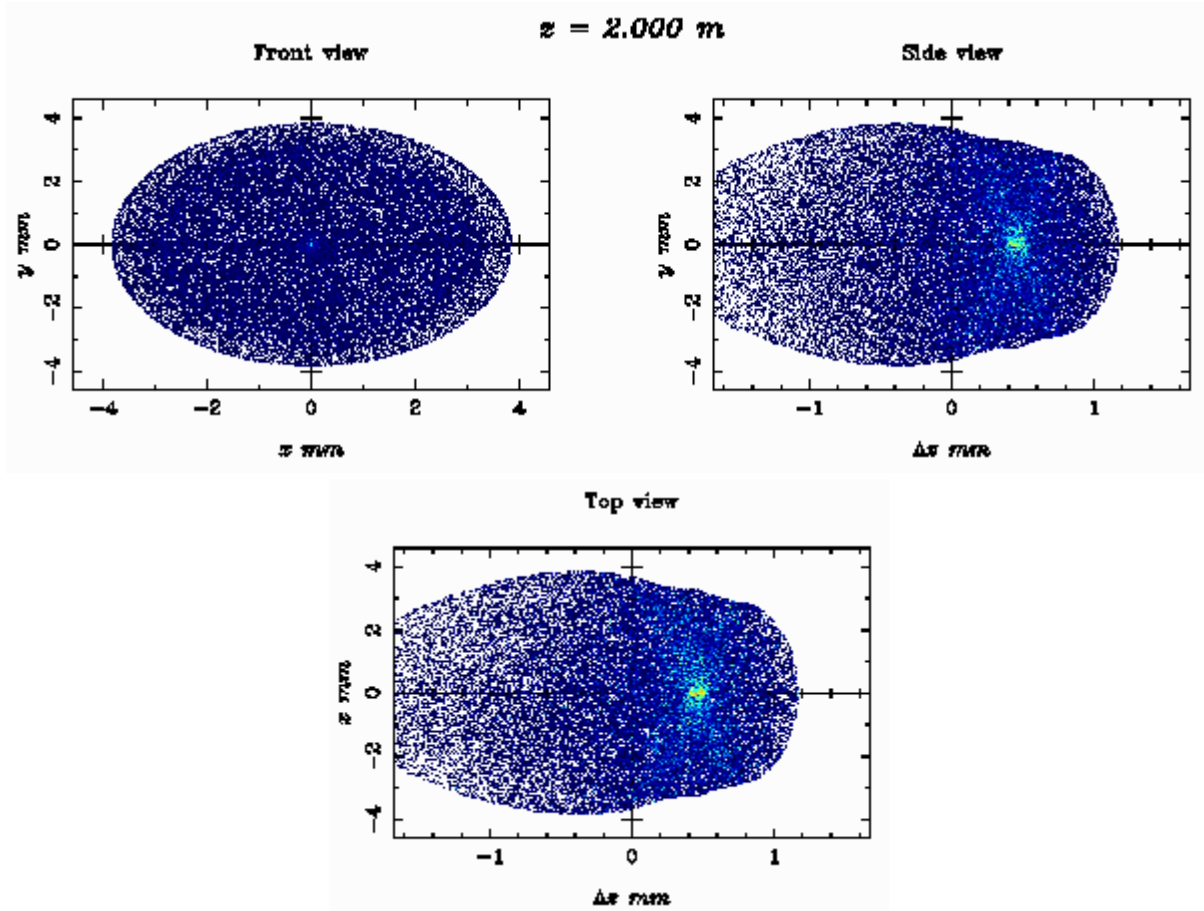


Şekil 3.28. Tabanca kavitesinin başlangıcında demet özellikleri; dikey ve yatay faz uzayı ve enine dağılımlar, enine eksene göre,  $Q=0.1 \text{ nC}$  demek yükü için

Boylamsal faz uzayı demet yönü boyuncaki faz uzayını, momentum dağılımını ve boylamsal dağılımı gösterir. Demetin momentum dağılımı, parçacık yoğunluğu arttıkça, beklenildiği gibi Gaussian şekle sahip gibi görünür.

Demet yönü boyuncaki dağılım parçacık yoğunluğuna bağlı olarak değişir. Elektron demetlerinin tabanca çıkışında önden, yandan ve üstten görünümü aşağıdaki şekilde gibidir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

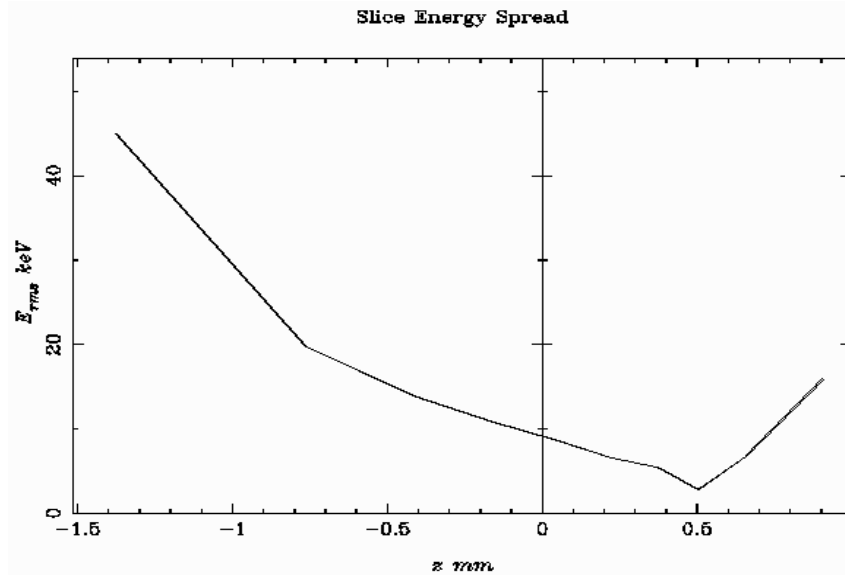


Şekil 3.29. Demet profili; karşı görünüş (üst sol), ve demet doğrultusu boyunca yan görünüş (üst sağ) ve tepe görünüş (alt)

Simulasyon sonuçları, kinetik enerjisi  $9.17 \text{ MeV}$ , demet uzunluğu  $0.67 \text{ mm}$  ve enine doğrultuda simetrik olan enine yayılımını  $2.595 \text{ mm mrad}$  (yatay) ve  $2.593 \text{ mm mrad}$  (dikey) olan bir electron demeti göstermektedir. Faz uzayındaki elektron demetlerinin boylamsal ve enine davranışları Astra/Postpro programı kullanılarak aşağıdaki şekillerdeki gibi elde edilmiştir (Şekil 3.30-3.33):

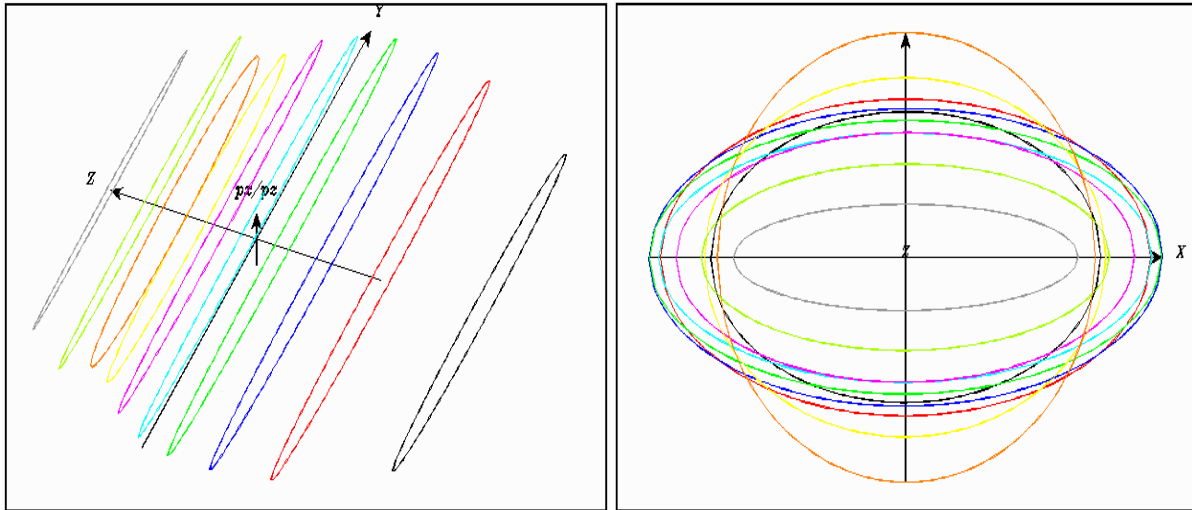
Dilim (Slice) (ilişkili olmayan) enerji sapması ilişkili enerji sapmasından polinom fit edilen kısmı çıkararak elde edilebilir. Dilim enerji yayılımı demetin boylamsal dilimlerinin enerji sapmasını gösterir. Bir dilim özel bir altı boyutlu faz uzayı dağılımı ile nitelendirilebilir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



Şekil 3.30.  $3\frac{1}{2}$ -hücreli tabanca kavite sistemi için dilim enerjisi yayılımı

Dilim elipsleri yansıtılan alanı artırarak birbirlerine göre eğim gösterirler ve böylece yansıtılan yayılım büyümesine neden olur. Demetlerin yayılımı üzerinden yük ağırlıklı toplam dilimli yayılım olarak adlandırılır.



(a)

(b)

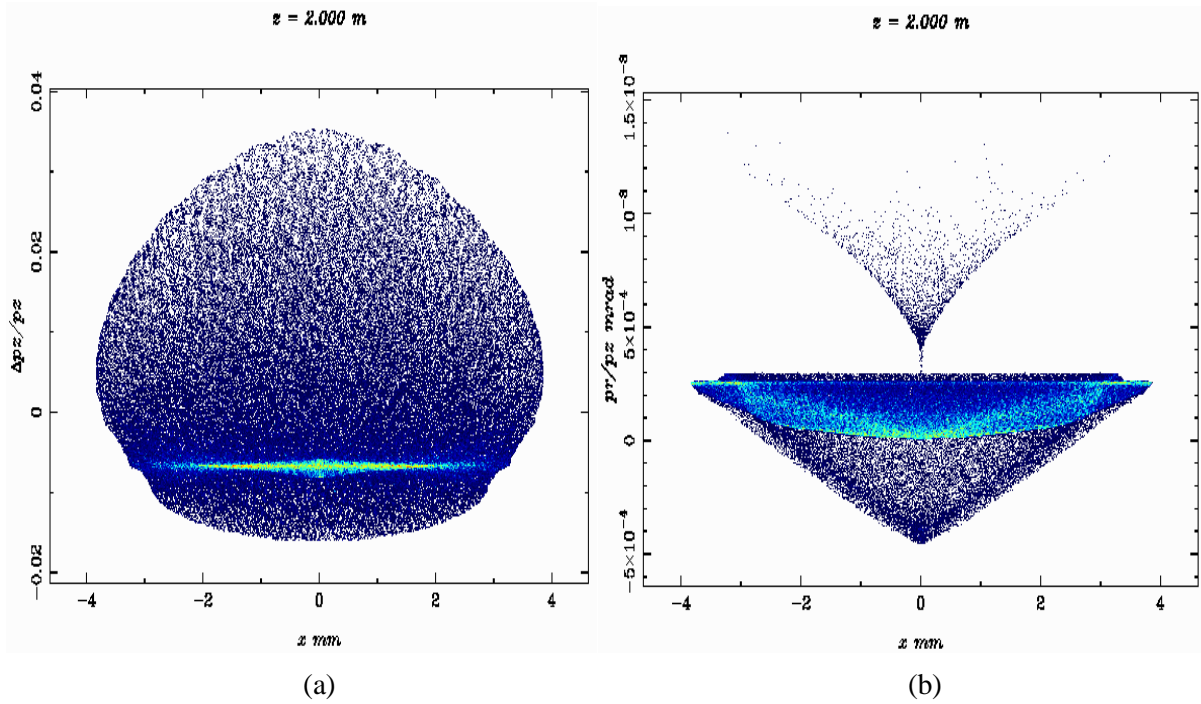
Şekil 3.31. Üç boyutta iç dilim yayılımı elipsleri a)  $p_x/p_z$  için  $\Phi = -41$  derece ve  $\theta = 67$  derece, b)  $\Phi, \theta = 0$  derece, merkezde, açısız

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Uzun bir demet, demet boyunca nonlineerliliğe neden olur (RF'den dolayı demet enerjisi, solenoidde odaklanma, tabancada odaklanma, ana lineer hızlandırıcı ve uzay yükü kuvveti). Uzun bir demet yayınıının demet boyunca dengelenmesini zorlaştırır. Baş ve kuyruk bölgesindeki farklı dilim yayınımları yukarıdaki (Şekil 3.31, (a)) rms dilim yayınıımı elipslerinin üç boyutlu çiziminde kolaylıkla görülebilir: Baş ve orta kısımların boyları farklıdır.

Deneyde, dilim (slice) yayınıımı baş ve kuyruk değerleri kullanılarak ölçülebilir (z ekseninde siyah renkli elips ve isimsiz eksende siyah renkli elips olarak gösterilmiş, Şekil 3.31 (a)'da). Dilim yayınıımı ölçüm teknikleri fotoinjektör demetlerinin iyice anlaşılmasını sağlar ve sistemin performansını geliştirmeye yardım eder. Dilim yayınıım ölçümü kullanarak, lazer profil değişikliklerinin sonuçları gözlemlenebilir ve demet daha iyi yayınııma ayarlanabilir.

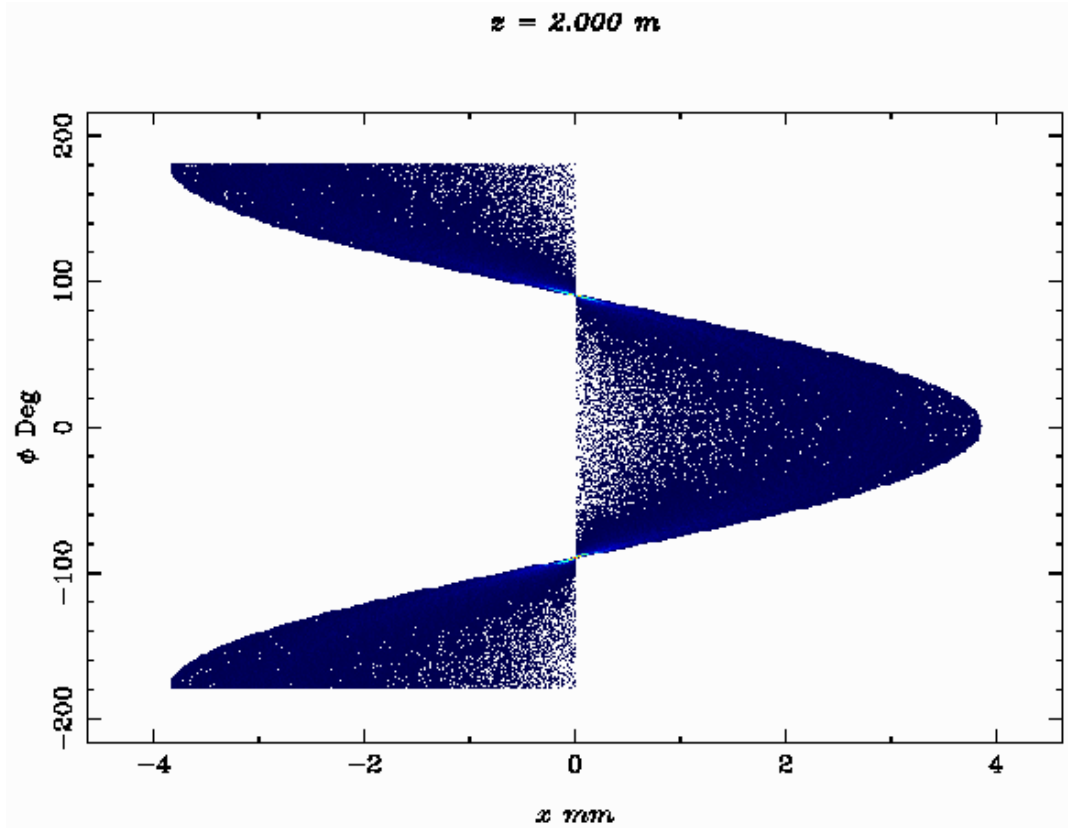
Aşağıdaki iki şekil, enine eksene göre parçacık dağılımını gösterir (Şekil 3.32 (a) ve (b)'de sırasıyla x'e göre  $\Delta p_z/p_z$  ve x'e göre r') ve phi açısına göre x Şekil 3.33'de gösterilmiştir.



Şekil 3.32. Phi açısına göre x'in değişimi a) x'e göre  $\Delta p_z/p_z$ , b) x'e göre r'

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Elektron demetleri eliptik şekilde olduğu için, aşağıda görüldüğü gibi, bir bölümde ileri doğru +x eksenini boyunca hareket eder, sonra -x eliptik alana ilerler.



Şekil 3.33. Beklenildiği gibi, parçacık dağılımı  $x$ 'in  $\phi$ 'ye göre değişimi

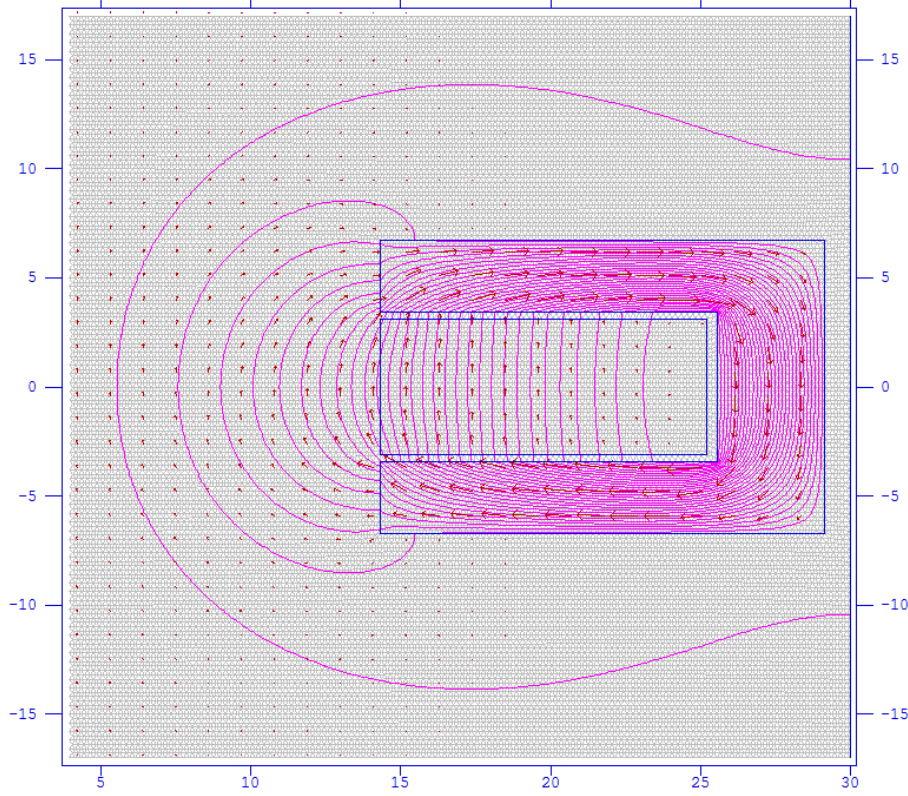
### 3.2.3.1.3 Tabancada Solenoidin Modellenmesi

Demetin katottan ilerleyişinin değişimini gözlemlemek için 255000 parçacık modellenmiştir. Parçacıklar katot plugda üretildikten sonra (0'dan 28 mm'ye kadar), kavite hücreleri (28 mm'den ~50 cm'ye kadar) ve solenoid (68.25 cm'den 81.75 cm'ye kadar) ASTRA'da modellenmesi yapılmıştır.

Minimum toplam yayınım ve demet büyüklüğü elde etmek için, tabanca kavitesinden 18.25 cm uzakta 0.154 T maksimum alanı olan bir odaklayıcı solenoid yerleştirilmiştir. Şekil 3.34'te görüldüğü gibi, solenoidin büyüklüğü 14.85 cm  $\times$  13.5 cm'dir ve solenoid demet ekseninden

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

14.3 cm uzağa yerleştirilmiştir. Solenoidin malzemesi ise; demir çerçeveli bakır iç yapıya sahiptir.



Şekil 3.34. Solenoid'de magnetic alan çizgileri

Optimum solenoid alanı optimize demet büyüklüğü, yük yoğunluğu ve yayınım elde etmek için önemlidir. Tabanca kavite sisteminde elektron demetlerinin RF alanına girişi sırasındaki alanın fazı da demetin enine yayınımı, kompaktlığı için çok önemli bir parametredir. Astra programı ile yapılan solenoidin siddeti, yeri, sağlanan alanın değeri parametreleri üzerine yapılan taramalar sonucunda minimum enine yayınım ve maksimum enerji – 41 *degree* ile pik elektrik alanı 53.5 *MV/m* kullanılarak elde edilmiştir.

Solenoid alanının gücü ve solenoidin konumu üzerinden kompakt bir demet büyüklüğü elde etmek için faz uzayında detaylı taramalar yapılmıştır.



## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

### 3.2.3.1.4 PS –VIEWER Programı İle Elde Edilen Sonuçlar

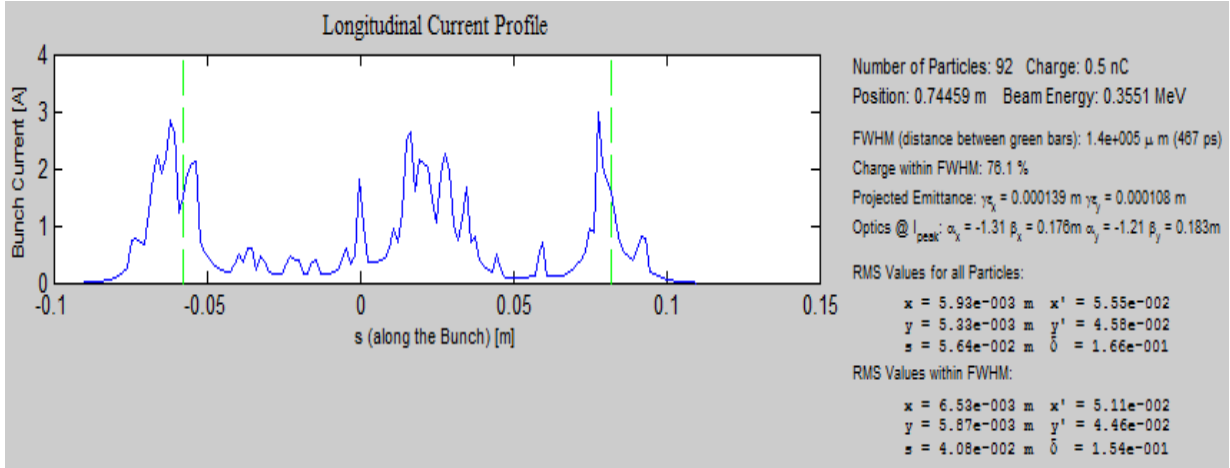
Ps-viewer programı Astra ve diğer bazı hızlandırıcı modelleme programlarını, MATLAB üzerinden arayüz kullanılmak suretiyle çalıştırılarak; bu programların çıktı dosyalarının grafiksel olarak yorumlanmasına olanak verir [12].

Yapılan çalışmalarda Astra programının çıktı dosyası kullanılarak demet yolu boyunca demet akım profili Şekil 3.35 (a)'da elde edilmiştir. Yapılan modelleme çalışmasında, demette 92 parçacık bulunmaktadır, demetin enerjisi 0.3552 MeV'dir ve demetteki elektronlar 0.5 nC'lük bir yüke sahiptir. Demet bu özelliklerinde iken akım profili Gaussiyene benzerdir.

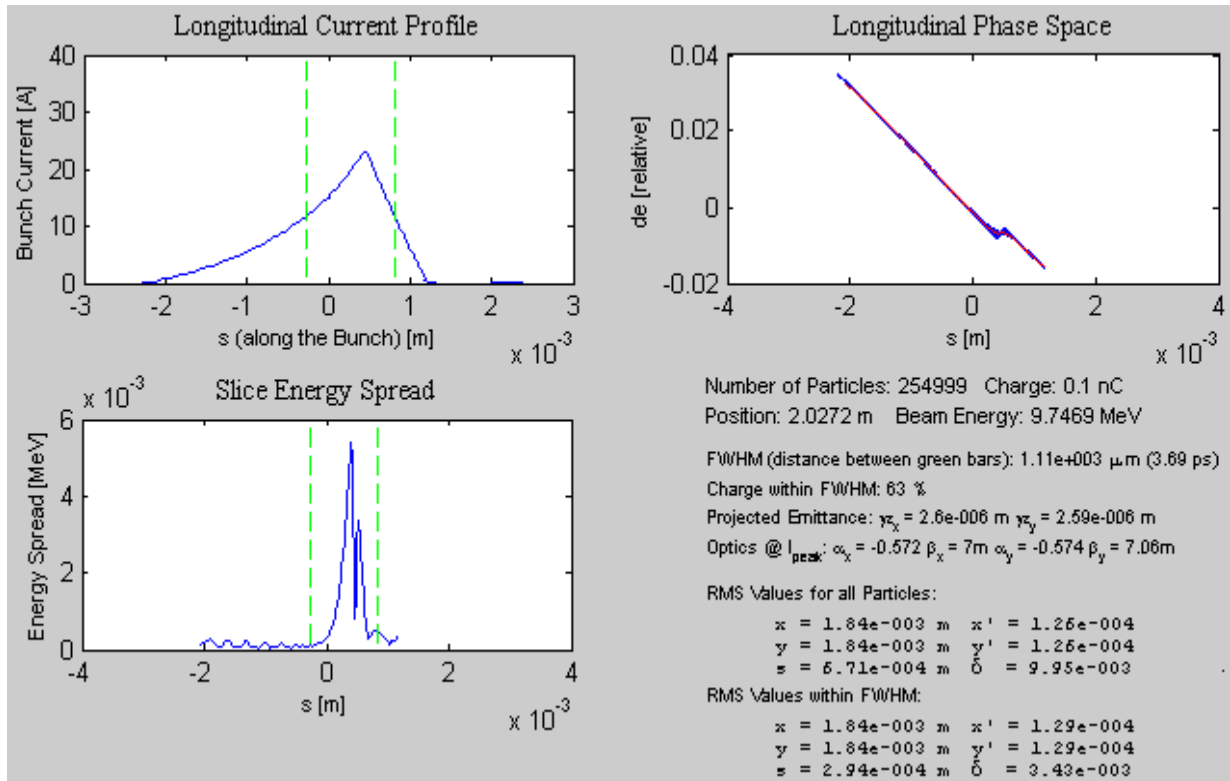
Demet ilerledikçe enerjisi artarak tam Gaussiyen yapı göstermesi beklenmektedir. Şekil 35 (b)'da ise 254999 sayıda parçacık modellenmiş ve 0.1 nC yük durumunda demet enerjisi 9.7 MeV'e kadar çıkabilmiştir. Burada boylamsal uzunluk boyunca akım profili, görel boylamsal faz uzayı ve dilimlenmiş enerji yayını tabanca çıkışında da beklenildiği şekilde elde edilmiştir.

Tabanca sistemi boyunca parçacığın demet yolu üzerinde izlenmesini veren Astra Modelleme programı çalışmaları sonucunda 0.1 nC, 0.5 nC ve 1 nC'lük yükler alınarak çalışmalar yapılmıştır. Fakat tabanca dışında kalan noktalarda kavite, injektör, ana hızlandırıcı çalışmaları için 0.1 nC yük alınarak çalışmalar sürdürülmüştür.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



(a)



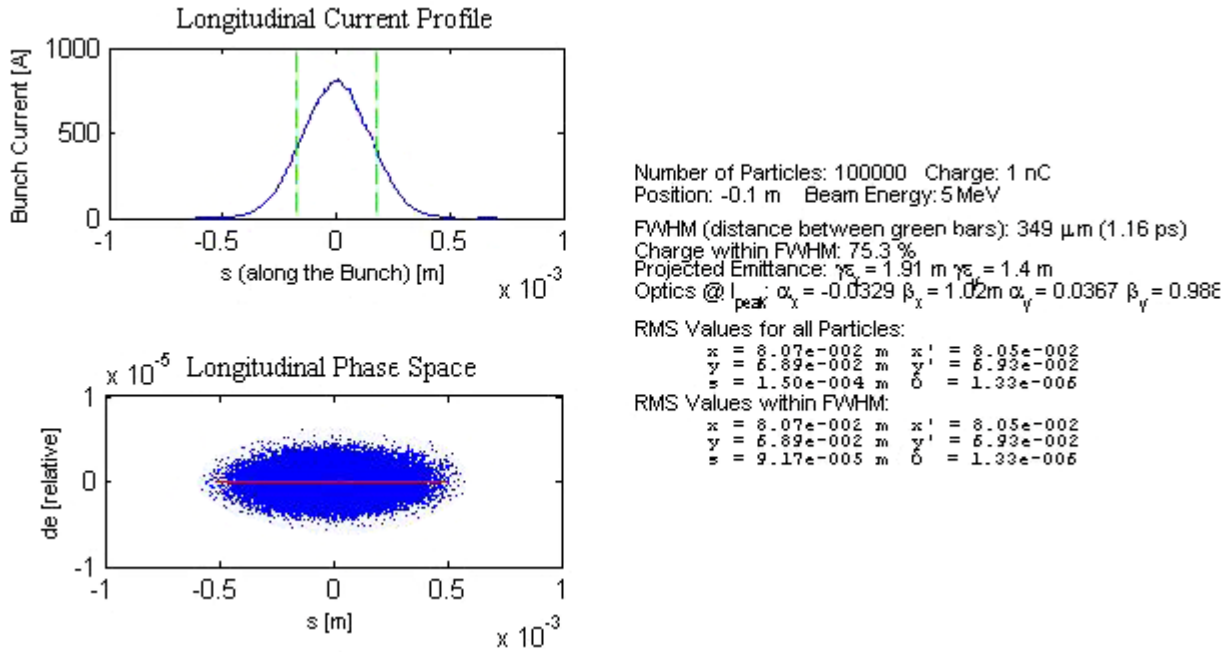
(b)

Şekil 3.35. Demey yolu boyunca a) 0.5 nC yük için 92 parçacık ile yapılan modellemeye demet akımının değişimi, b) 254999 parçacık, 0.1 nC yük durumunda demet enerjisi 9.7 MeV'e ulaşmaktadır, Akım profili, boylamsal faz uzayı ve enerji yayılımı

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

1 nC'luk, 100000 parçacığa sahip elektron demeti 5 MeV enerjiye ulaştığında demet Gaussian bir görünüme de sahip olmuştur. Faz uzayı grafiğinde elips şeklinde demet elde edildiği Şekil 3.36'da görülmektedir.

Demet yükü 1 nC alınarak 5 MeV demet enerjisine ulaşabilmektedir. Bütün paraçacıklar için  $x$ ,  $x'$ ,  $y$ ,  $y'$ ,  $z$ ,  $z'$  gerçek uay ve faz uzayı davranışları elde edilmiştir. FWHM (Full width half maximum) değeri 349 micron elde edilmiştir.



Şekil 3.36. 5 MeV demet enerjili ve 1 nC yüke sahip 100000 parçacık için boylamsal akım profili ve boylamsal faz uzayında demetin dağılımı

### 3.3 Katodun Özellikleri

İdeal bir elektron tabancası için katotta aranan özellikler:

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

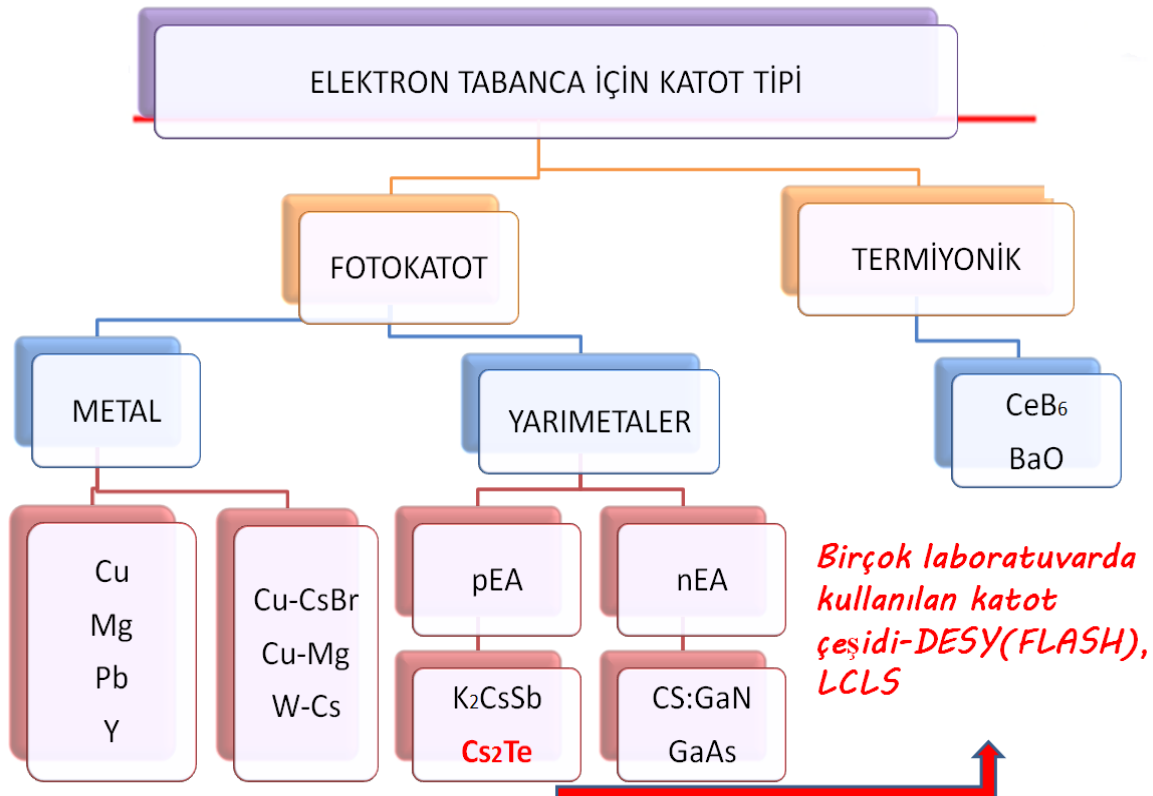
- **Yüksek kuantum verimliliği (QE):** Katot düşük kuantum verimli olursa üretilen elektronlar faz uzayında dağılma eğilimi gösterir. Katot yapılarının yüksek kuantum verimliliğine sahip olması önemlidir. QE, yayınlanan elektronların sayısının gelen fotonların sayısına oranı olarak tanımlanır:  $QE = N_{elektron}/N_{foton}$ .
- **Düşük yayınım (emittance):** Katot yapılar düşük yayınımına sahip olursa üretilen demet büyük olur ve geniş bir alanı kaplar. Demetin kaliteli olması için elektron demetinin kompakt ve küçük bir yapıya sahip olması istenir.
- **Uzun Ömür:** Katot üzerine ister lazer gönderilerek isterse ısıtılarak elektron elde edilsin, bir süre sonra tahrip olur. Katodun uzun ömürlü olması hem maliyet açısından hem de deneyin sürekliliği açısından önemlidir. Katodun üzerinin cilalanması da kullanım ömrünü uzatır
- **Dayanıklılık:** Dayanıklı olan katotlar, daha az zarar meydana gelmesi açısından tercih edilir.
- **İşletim kolaylığı:** Elektron tabancası üzerinde deneye başlandığında katot üzerinde oluşan zarardan dolayı katot kullanılamaz duruma geldiğinde değiştirilmesi gerekir. Değiştirilme ne kadar kısa sürede yapılırsa o kadar iyi olur.
- **Düşük karanlık akım:** Katot malzeme üzerinde bir müddet sonra bir tahribat oluşur. Bu tahribatlı bölgeden sökülen elektronlar kaliteli değildir. Tahribattan sonra ortamda oluşan elektronlar karanlık akıma sebebiyet verir. Diğer bir deyişle, sistem çalışmadığı zamanlarda ortamda sıfır akım bulunması gerekirken, ölçü aletleri sıfırdan farklı değerde tahribattan kaynaklı akım ölçebilirler. Bu durum karanlık akımı oluşturur. Bu nedenle katot malzemenin bulunduğu ortamda ne kadar düşük karanlık akım elde edilirse o kadar kararlı ve kaliteli elektron demetleri üretilir.
- **Hızlı tepki zamanı:** Katot sürücü lazer tarafından uyarıldığında ne kadar kısa sürede elektronların sökülmesi demektir.
- **Spektral Tepki:** Tabancadaki sürücü lazerin dalgaboyu, katodun performansını etkiler. Metallerin ya da kaplanmış metallerin QE'si iş fonksiyonunun düşüklüğüne ve foton enerjisine bağlı olarak kuadratik şekilde değişir. Katot malzemenin iş fonksiyonu ne kadar düşükse elektronu katotdan sökmek de o kadar çabuklaşır.
- **Vakum Kirlenme Hassasiyeti**'de katodun davranışını etkiler.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Termiyonik ve fotokatot tabanca için yukarıdaki özelliklere dayanarak kullanılması uygun bulunan bazı örnek katot tipleri aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 3.37) [13], [14]. Bu bilgiler ışığında THM SASE-SEL’de  $Cs_2Te$  malzemeden yapılmış katot kullanılması öngörülmüştür.  $Cs_2Te$  fotokatodun avantaj ve dezavantajları şu şekilde sıralanabilir:

**Avantajları:** Kuantum verimliliği, uzun yaşam ve çalışma süresi, yüksek elektrik alanda kararlı (stable) oluşu (100 MV/m’e kadar), yüksek akım yoğunluğunda üretilebilir olması ve kısa cevaplama süresi (ps mertebesinde)

**Dezavantajları:** Çalışmak için UV istemesi, çok yüksek vakum değerinde (ultra high vacuum) çalışması, kirliliğe karşı hassas olması ve fizik performansının bilinmemesi şeklinde sıralanabilir.

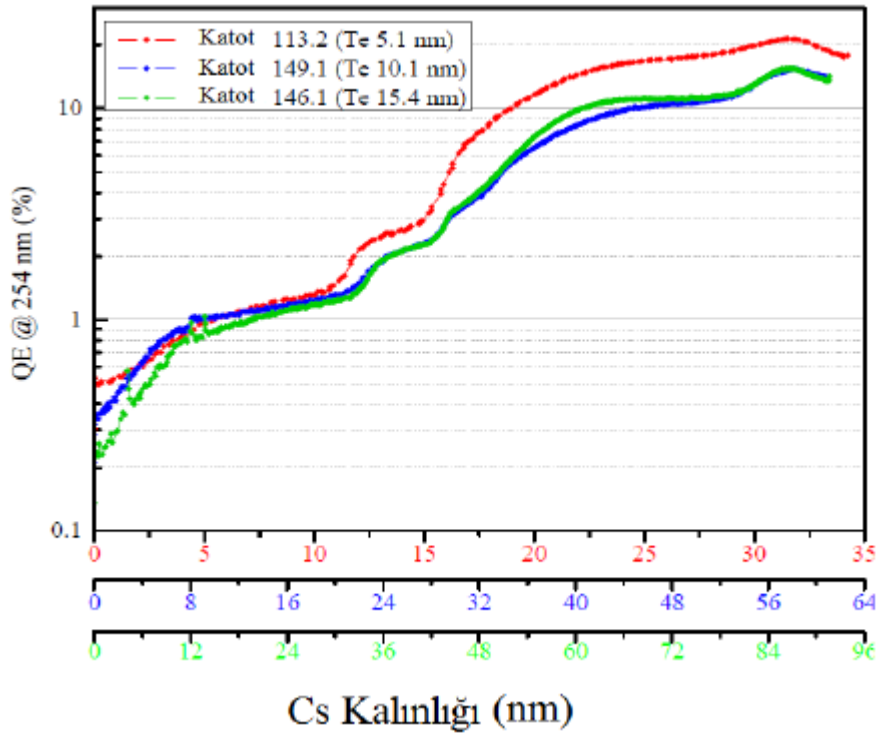


Şekil 3.37. Elektron tabancası için farklı materyallerden oluşan katot tipleri

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

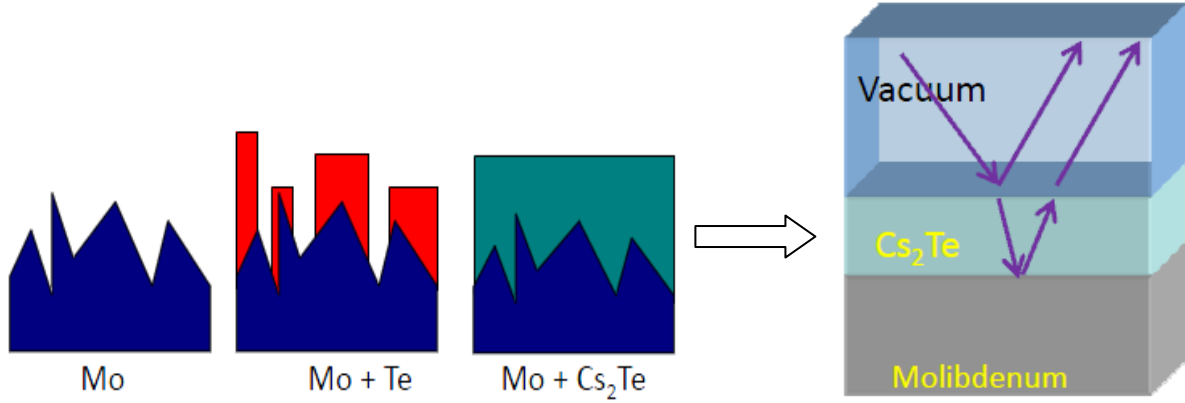
Fotokatot, lazer ışını zararlarını azaltmak için katmanlı bir yapıya sahiptir. Öncelikle ana malzeme olarak Molibdenum (Mo) kullanılması gerekmektedir. Daha sonra aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi (Şekil 3.39) çok yüksek vakum sistemi (UHT) altında Mo üzerine Te büyütmesi yapılabilir, daha sonra Mo+Cs<sub>2</sub>Te şeklinde büyütme elde edilebilir ve ya da UHV sisteminde (10<sup>-10</sup> mbar başına) bir katman Cs, bir katman saf 99.9999 Te elementi ve en son katmanda Cs<sub>2</sub>Te kullanılabilir.

Kullanılan Te/Cs oranına göre kuantum verimliliği değişir. Cs kalınlığının artması aşağıda gösterildiği gibi kuantum verimliliğini ve katodun ömrünü azaltır [15].



Şekil 3.38. Cs kalınlığına göre kuantum verimliliğinin değişimi

Fotokatot büyütmesi için püskürtme sistemi kullanılabilir. Türk Hızlandırıcı Merkezi SASE-SEL projesi kapsamında bu şekilde Cs<sub>2</sub>Te fotokatot büyütmesi Türkiye’de, Orta Doğu Teknik Üniversitesi laboratuvarlarında yapılabilecektir. Malzemeler de Türkiye’de temin edilebilecek durumdadır.



Şekil 3.39. Fotokatot materyalinin farklı materyallerden oluşan çoklu katmanları

### 3.4 Fotokatot Lazer

THM SASE-SEL’de elektron sökücü lazer olarak Nd:YLF (Neodymium Doped Yttrium Lithium Fluoride) lazer kullanılması öngörüldüğü daha önce belirtilmişti. Nd:YLF lazerleri 1053 nm’ye kadar lazer ışını üretilebilmektedir. Fakat bu dalga boyları genellikle sanayi uygulamalarında yaygındır.

Elektron tabancasında demet bölücü (splitter) veya CLBO kristali ile dalga boyunun dörde bölünmesi sonucunda 263 nm civarında kullanımı mevcut olacaktır. Nd:YLF lazerleri düşük atma oranlarında yüksek atma enerjisi ile kullanılır.

### 3.5 İşletim Esnekliği ve Gelecek Opsiyonları

THM SASE-SEL’de tabanca üzerine yapılan çalışmalar 4 farklı seçenek şeklinde yürütülmektedir; NC ve SC’nin herbiri için, 1½ ve 3½ kavite. Isı karalılığından dolayı sürücü lazer olarak Nd:YLF seçilmiştir. Bu şekilde farklı çalışmaların yapılması gelecekte hem işletim esnekliği hem de farklı opsiyonları değerlendirme imkanı sunacaktır.

### 3.6 Enjektör

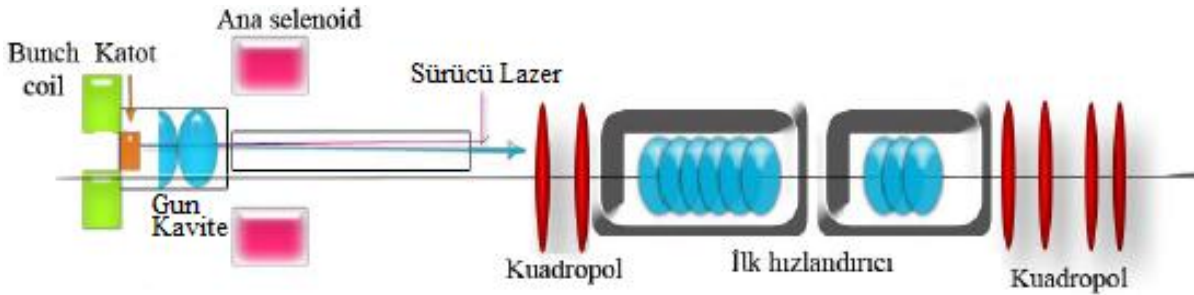
THM SASE-SEL enjektör kısmında tabancadan sonra yer alan 5 hücrelik ve 3 hücrelik 2 tane kavite sistemi, elektron demet diyagnostik sistemlerinin yanısıra demet sıkıştırıcı ve demet

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

odaklayıcı sistemler bulunmaktadır. Bu sistemler ayrı ayrı THM SASE-SEL projesi kapsamında çalışılmaktadır.

### 3.5.1 Genel Görünüm

THM SASE-SEL Tesisi için aşağıdaki şekilde gösterildiği üzere fotokatot tabancada SC ve NC  $1\frac{1}{2}$  ve  $3\frac{1}{2}$ -hücrelik ve her iki seçenek için de ilk hızlandırıcı olarak SC 3+3, 4+3, 5+3 ve 6+3 hücrelik kavite üzerine modelleme çalışmaları yapılmıştır. Enjektör bölümünde şekilde gösterilmeyen demetin yükünün, akımının, pozisyonunun ve kalitesinin ölçüldüğü monitörler de bulunmaktadır. Ayrıca “Focusing Coil” gibi demetin odaklamasının yapıldığı modelleme çalışmaları da yapılmıştır.



Şekil 3.40. THM SASE SEL Tesisi, enjektör sisteminin yapısı (Tabanca, tabanca sonrası ilk hızlandırıcılar (burada ilk hızlandırıcı kavite olarak 6+3 hücre gösterilmiştir.) ve odaklayıcılardan oluşan)

### 3.7 Paketçik Sıkıştırıcı Sistemi ve Simülasyonları

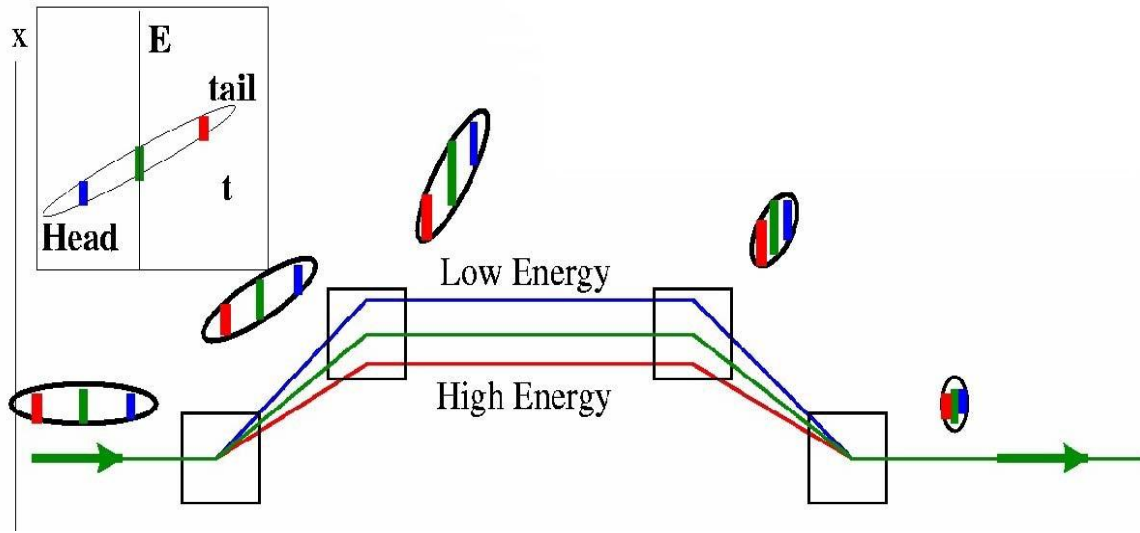
THM SASE-SEL’de demet sıkıştırıcı yapıların amacı, elektron tabancasından çıkan elektron demetini paketlemek, frekans değerini arttırarak dalga boyunu küçültmek ve demeti hızlandırmaktır. Elektron demeti elektron tabancadan çıktığında demet yayını büyük ve elips şeklindedir.



## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Sıkıştırıcı yapılardaki manyetik odaklama sistemleri olarak, dipollerin ve kuadropollerin farklı açılarda yerleştirilmesiyle, elektron demetlerinin bu yapılardan çıktığında daha kompakt ve küçük olması sağlanır.

Aşağıda şekilde gösterildiği üzere dört tane dipol magnetten oluşan demet sıkıştırıcıdan sonra kompakt hale gelen elips şeklindeki elektron demetleri ana lineer hızlandırıcı bölümünde hızlandırılmaya devam edecektir.



Şekil 3.41. Demet sıkıştırıcılarda uygulanan manyetik alan etkisiyle demetin küçülmesi

Csr-Track programı demet sıkıştırıcı yapıları modellemek için kullanılır [16]. Sıkıştırıcı yapıda 4 dipol magnet bulunmaktadır. Csr-Track programı için bu dört magnetin örgü yapısının tanımlanması gerekir.

Tanımlama işleminde mutlak ve görelî alan sınırlandırılması getirilmelidir. Mutlak alan sınırlandırılması polar koordinatlarda rho ve psi ile yapılır. Görelî alan sınırlandırılmasında ise bir alan sınırı için referans yörüngesinin yer ve yönü tanımlanmalıdır. Bir sonraki yer ve yönün bir öncekiyle kesişimi tektir ve delta\_s ve r yarıçapının eğriliğiyle (eğer dipol bağlı ise) tanımlanır. Programda kullanılan “marker” terimi ise bir isim ve alan sınırı getirmek üzere kullanılır.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Örneğin referans alınan bir parçacığın belli bir anda belirlenmiş bir alan sınırını geçişini ifade eder.

Tanımlama işleminden sonra .dat dosyaları MATLAB programından çağrılır. Ps-viewer grafik ara yüzünde Csr-Track programı çalıştırılarak sonuçların görülmesi sağlanır. Sonuçlar (parçacık demetinin sıkıştırıcıdan geçişi) dilimler halinde video gösterimi şeklinde izlenebildiği gibi grafiksel şekilde de elde edilebilir. THM SASE SEL Tesisi için oluşturulan sıkıştırıcı yapıda kullanılan örgüde dört magnetin (dipollerin) açıları, radyal yerleşimleri gibi özellikleri aşağıda gösterildiği gibi programda tanıtılır.

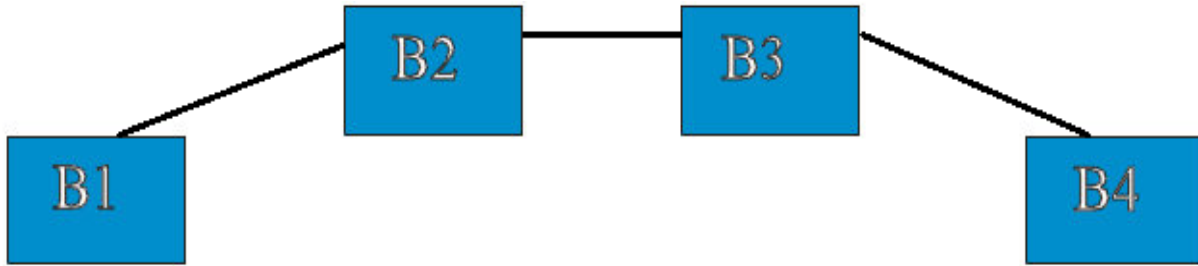
```
!-----  
! 4 magnet bunch compressor  
!-----  
lattice{  
  dipole ! 1st dipole  
    {position{rho=0.0,psi=0.0,marker=d1a}  
     properties{r=-8.4}  
     position{rho=0.5,psi=0.0,marker=d1b}  
    }  
  dipole ! 2nd dipole  
    {position{rho=1.0,psi=0.0,marker=d2a}  
     properties{r=8.4}  
     position{rho=1.5,psi=0.0,marker=d2b}  
    }  
  dipole ! 3rd dipole  
    {position{rho=2.5,psi=0.0,marker=d3a}  
     properties{r=8.4}  
     position{rho=3.0,psi=0.0,marker=d3b}  
    }  
  dipole ! 4th dipole  
    {position{rho=3.5,psi=0.0,marker=d4a}  
     properties{r=-8.4}  
     position{rho=4.0,psi=0.0,marker=d4b}  
    }  
}
```

Şekil 3.42. Demet sıkıştırıcı'nın (Bunch Compressor) modelleme program

Magnetlerin birbirlerine göre uzaklıkları, modellenen sistem içerisindeki konumlandırılmaları, magnetlerin şiddetleri yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi betimlenerek; elektron demetlerinin magnetik yapı içerisinde sıkışması modellenmiş olur.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Dörtlü dipol magnet chicane aşağıdaki tabloda verilen parametreler ile tanımlanır, ayrıca parçacıkların dağılımı da izlenecek şekilde programa dahil edilir. Program çalıştırıldıktan sonra yukarıda belirtildiği gibi bütün faz uzayı projeksiyonu Ps-viewer'in sağladığı "CSRTrack phase Space Viewer" ile görüntülenir.



chicane	
bend magnet length (projected)	0.5 m
drift length,(proj.) B1->B2 and B3->B4	0.5 m
drift length, B2->B3	0.5 m
bend radius	8.4 m
momentum compaction	6 mm

Şekil 3.43. Demet sıkıştırıcı yapının modellenmesi

### 3.8 Ana Hızlandırıcı Bölümü (Linear Hızlandırıcı - Linak)

Sıkıştırıcı yapılarda hızlandırılan elektron demetleri demet yolu boyunca lineer hızlandırıcı yapılarda hızlandırılır. Lineer hızlandırıcılarda elektron demetleri RF kavitelere uygulanan elektrik alan sayesinde hızlandırılırlar.

Genel bir lineer hızlandırıcı da tabanca boyunca elektron demetleri yaklaşık 10 MeV, enjektör sonrasında 150 MeV, ana hızlandırıcı sonrasında ise bu hızlandırıcı kavitelemlerin sayılarına göre

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

çok farklılık göstermekle birlikte 1 GeV'nin üzerinde demet enerjisi elde edilebilmektedir. Ana hızlandırıcı kavileri genelde 9 hücrelik kavilerden oluşmakta olup 2 set halinden 16000 kavite hücreye kadar değişiklik göstermektedir. Tesiste kazılan tünelin uzunluğunun çok masraflı olması kavite hücrelerinin sayılarını sınırlandırmada en büyük etkidir.

Bu yapılarda hızlandırmanın sürekliliğini sağlamak için klystron denilen ve RF kavitelere güç sağlayan yapılar kullanılır. Normal iletken ve süper iletken yapılarda bu klystron yapılarının sayısı farklılık göstermektedir.

### SÜPERİLETKEN HIZLANDIRICILAR

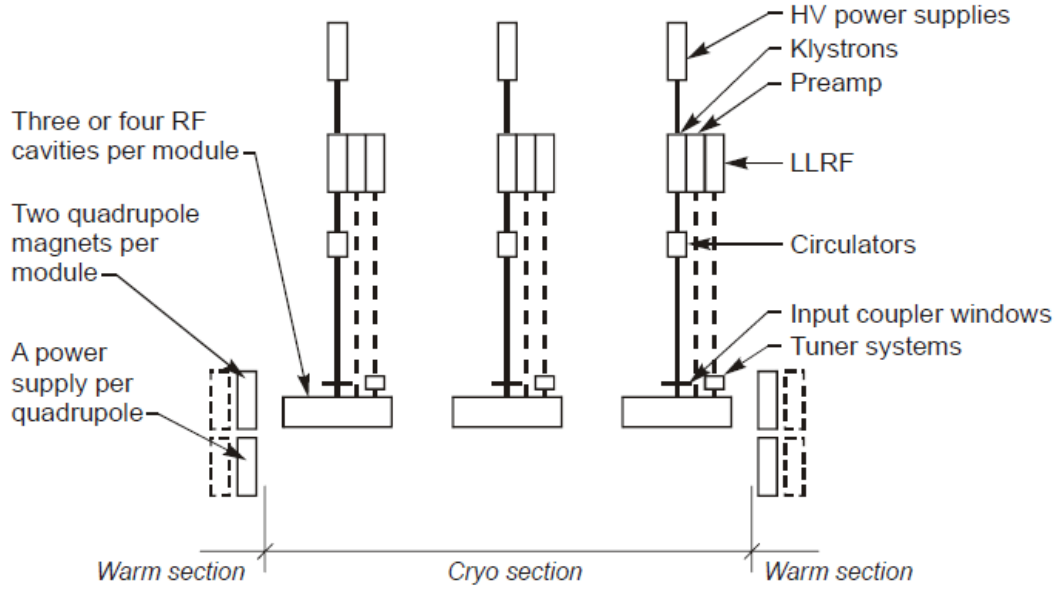
- Çok az öz dirence sahiptir.
- RF güç kayıpları çok düşüktür.
- CW mod operasyonu altında yüksek gradyentlere çıkabilmektedir.
- Hızlandırıcı kavilerde dizayn şeklini oluşturmak SC'de daha kolay ve daha serbesttir.
- Sürekli mikro paketçik oluşturabilmektedir.
- SC hızlandırıcılarda, atmanın tekrarlama oranı 13 MHz iken, NC'de 1 GHz'dir. Bundan dolayı SC hızlandırıcılarda lazer gücü NC'e göre 100 kat daha fazladır.
- SC Kavite dizayn edilirken az demet - kavite etkileşmesi olacak şekilde seçilir ki böylece bu durum demet kalitesi düşürülmeden yüksek akımlarda hızlanmayı getirecektir.

### NORMALİLETKEN HIZLANDIRICILAR

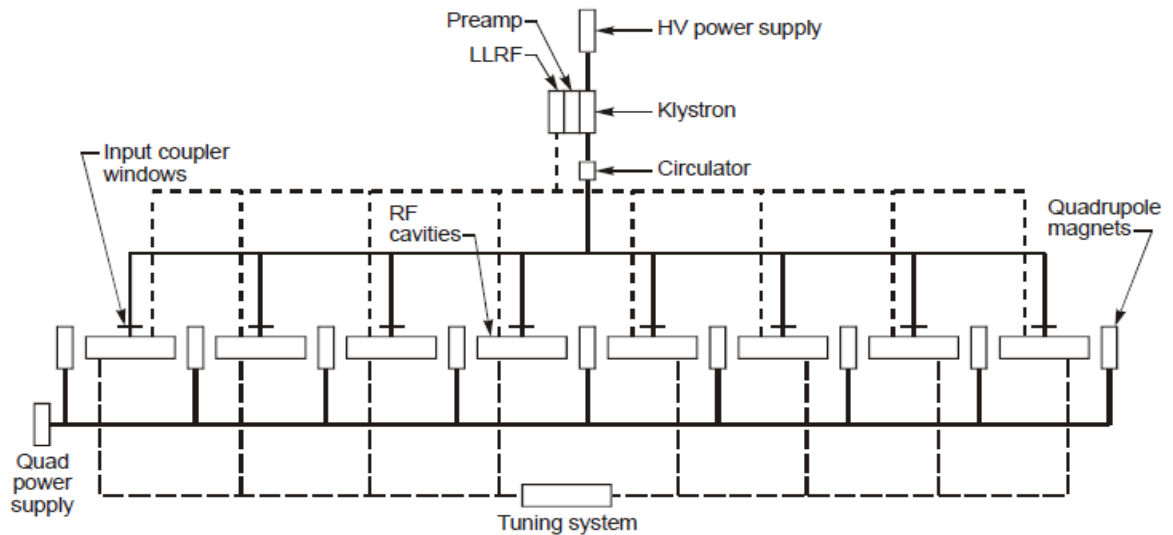
- Yüzey direnci çok yüksek değerlere sahiptir
- RF güç kayıpları yüksektir.
- RF alanı pompalanır ve atmalı mikro paketçik yapıda demeti hızlandırır.
- Atmalı yapıda çalıştığı için yüksek pik akımı oluşturur.
- NC kaviter minimum RF kaybına göre dizayn edilmelidir.
- Az sayıda paketçik hızlandığından dolayı ortalama akım düşüktür.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Aşağıdaki şekillerde sırasıyla SC ve NC yapılar için RF kaynaklarının yapısı görülmektedir.



Şekil 3.44. Süperiletken kavite için RF kaynaklarının yapısı



Şekil 3.45. Normaliletken kavite için RF kaynaklarının yapısı

SC linear hızlandırıcı yapılarda 3 RF kaviteye bir klystron RF gücü sağlamaktadır. Alttaki NC linear hızlandırıcı yapılarda ise 8 kaviteye 1 klystron tarafından RF güç sağlanmaktadır.

### 3.8.1 Ana Hızlandırıcı Kaviteleri

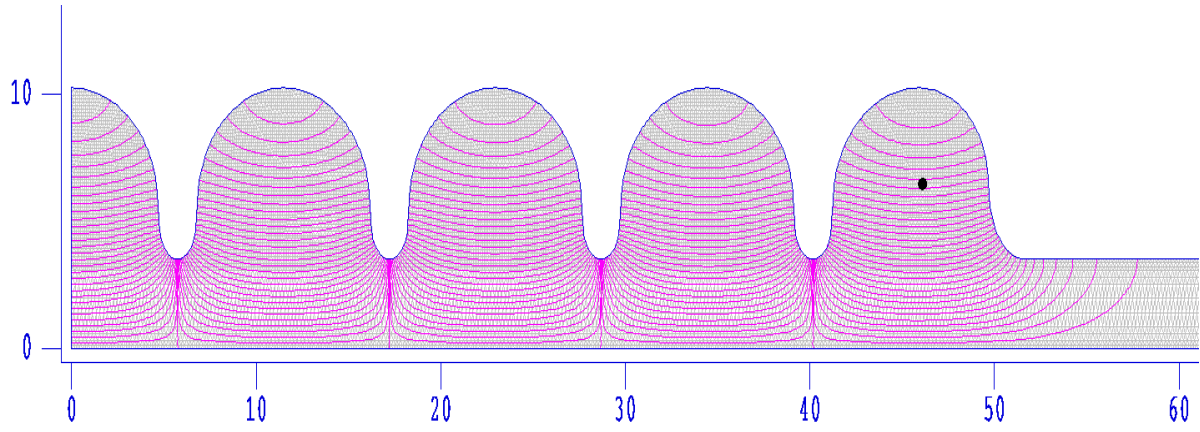
THM SASE-SEL’de ana hızlandırıcıda parçacıkları hızlandırmak için 6 tane 9 hücrelik kavite kullanılacak şekilde modelleme çalışmaları yapılmıştır. Ortadaki hücrelerde equator yarıçapı üzerinden frekans ayarlaması yapılmıştır.

Tablo 3.5. Ana hızlandırıcı için SC kavite hücrelerinin geometrik parametreleri

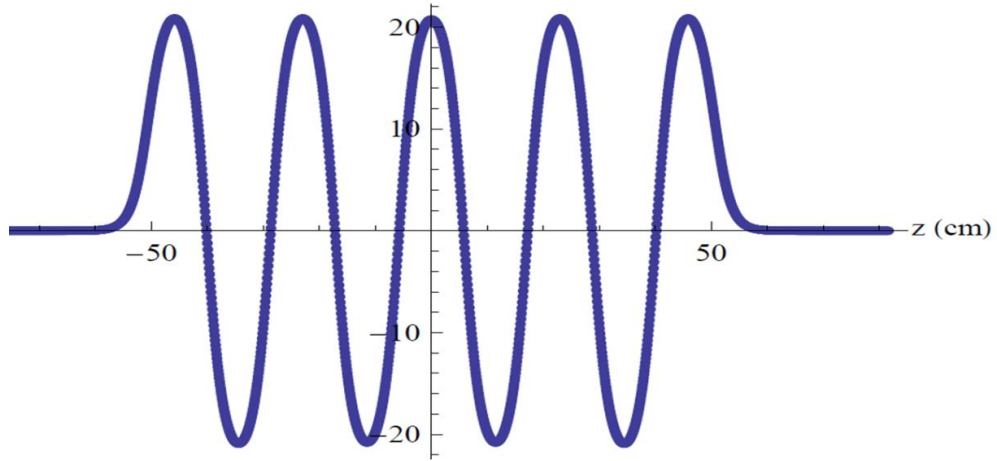
Parametreler	(cm)	İç	Son
Yarım hücrenin uzunluğu	$L/2$	5.71347	5.71347
Ekvator yarıçapı	Requa	10.2298	10.2298
İris yarıçapı	Riris	3.5	3.5
İris elipsinin yatay eksen	A	4.6622	3.73239
İris elipsinin dikey eksen	B	4.57078	3.6592
İris elipsinin eksenleri oranı	A/B	1.02	1.02
Ekvator elipsinin yatay eksen	A	0.986747	1.95352
Ekvator elipsinin dikey eksen	B	1.40964	2.79075
Ekvator elipsinin eksenleri oranı	a/b	0.7	0.7
Duvar açısı	$\alpha$	5	5

Baştaki ve sondaki kaviteler demet tüpü ile birleştirilerek  $A/B$  sabit tutularak  $B$  üzerinden frekans ayarlaması yapılmıştır. Bu durum  $A$ ’nın ve  $\alpha$ ’nın değişmesine yol açmıştır. Ortadaki ve sondaki hücreler için optimize edilmiş son değerler ve kavite içerisinde demet yolu boyunca elektrik alan grafiği Superfish kodu ile 2 boyutta aşağıda (Şekil 3.46) verilmiştir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



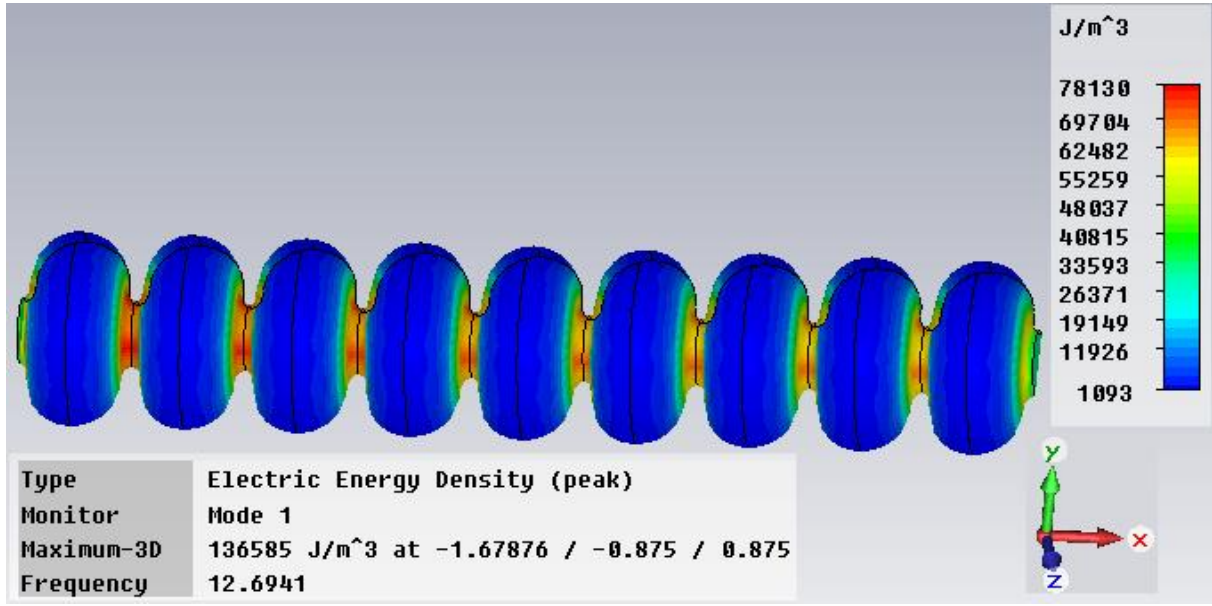
Şekil 3.46. Ana hızlandırıcı için  $2 \times 4.5 = 9$  hücrelik SC kavitenin elektrik alanları



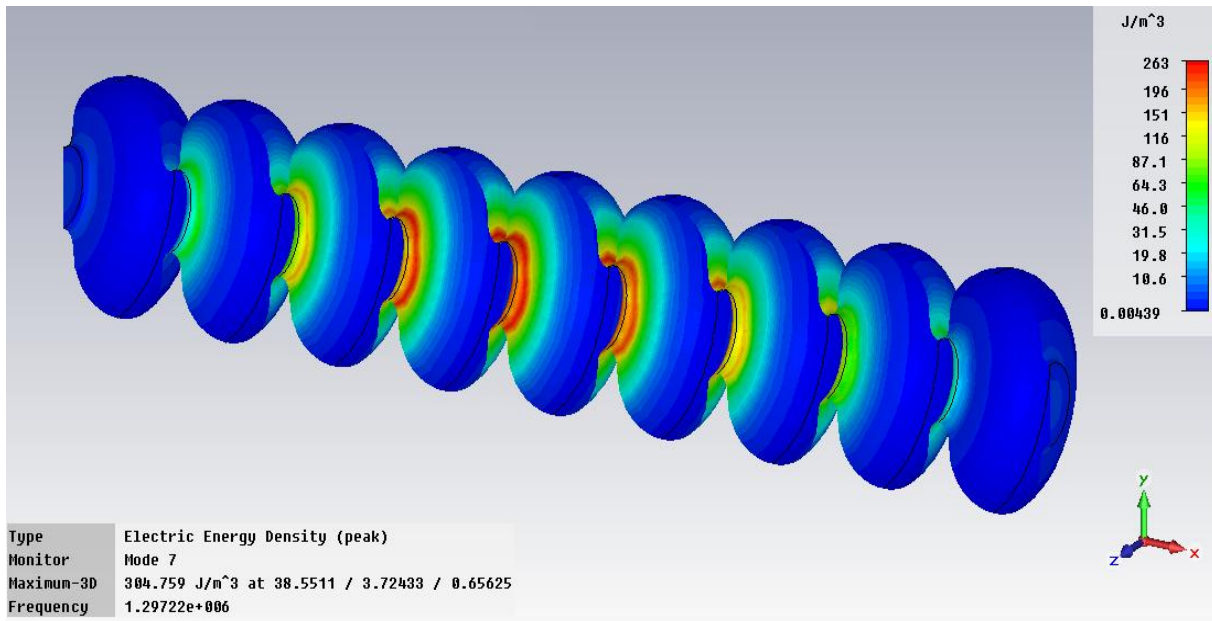
Şekil 3.47. Ana hızlandırıcı sistemde 9 - hücrelik kavitelelerin içerisindeki elektrik alan davranışı

Demet yolu boyunca hızlandırıcı kavite içerisinde boylamsal elektrik alanının değişimi ( $E_z$ ) Şekil 3.47'de gösterilmiştir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



(a)



(b)

Şekil 3.48. Ana hızlandırıcı sistemde 9-hücrelik kavitelerin elektrik enerji yoğunluğu a) karşıdan görünüş, b) Boylamsal yarıdan kesik halde görünüş

Kavite sistemi içerisinde kavitede elektromanyetik alan içerisinde demetlerin hızlanmasını sağlamada etki olan parametreler: kalite faktörünü, özdeğerleri, elektromanyetik alanları, alan kayıplarını, dirençleri, bağlaşım sabitlerini, elektrik alan ve manyetik alan yoğunluklarını elde



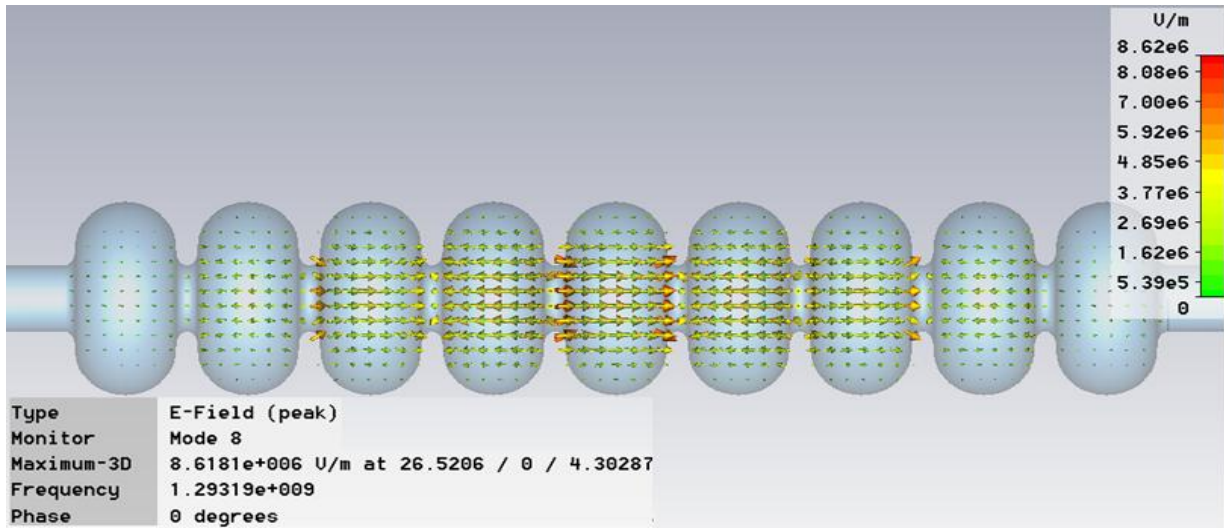
## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

etmek, kavite yüzeyi üzerinde alan limitlerini bulmak, elektron demetlerini anlık olarak izlemek ve görsel olarak elde etmek için 3D CST Microwave Studio ve CST Particle Studio Programları kullanılır [6].

9 hücrelik kavitede elektrik alan değişimi CST Microwave Studio kullanılarak aşağıdaki şekillerde (Şekil 3.47 (a) ve (b) ve 3.48 (a) ve (b)) gösterilmektedir. Kavite içerisinde üç boyutta farklı görünüşlerde elektrik alan yoğunluğu görülmektedir. Ana hızlandırıcıda hızlandırıcı gradienti olarak 15 MV/m alınmıştır. Demet yolu boyunca magnetik alan değişimi ise Şekil 3.49, (c)'de görülmektedir.

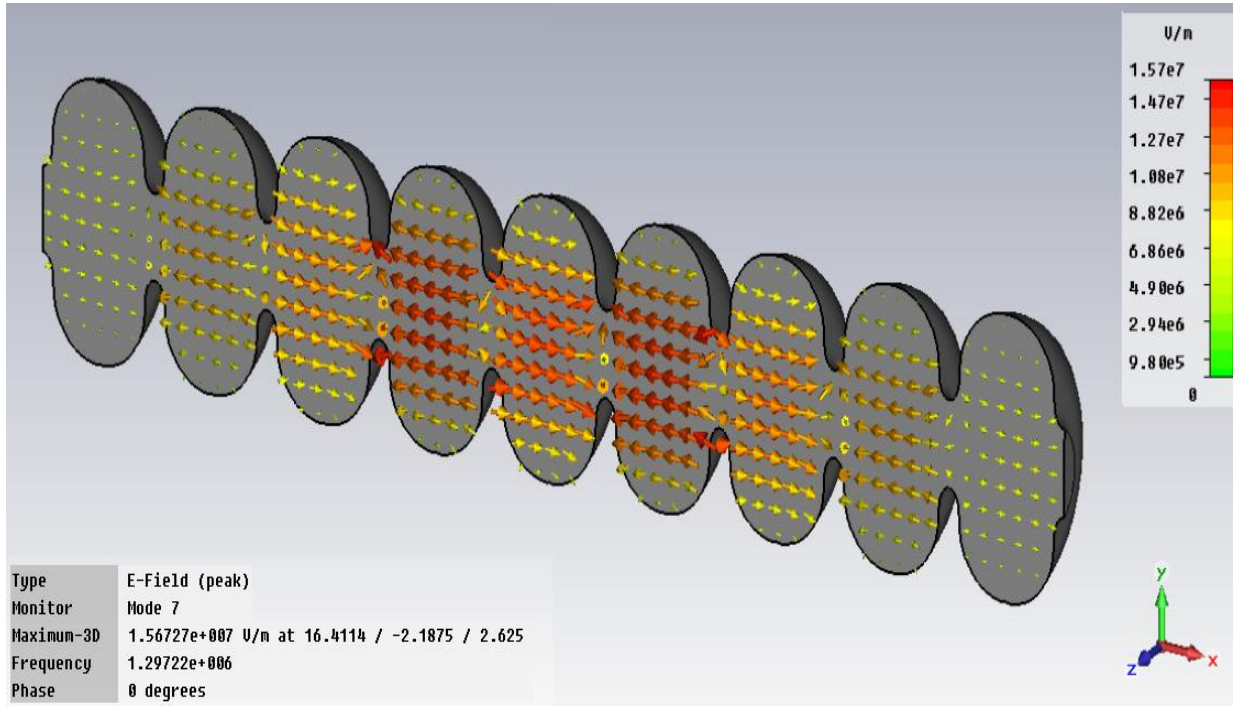
Şekil 3.47'den görüldüğü üzere elektrik alan değeri boylamsal doğrultuda maximum gradiente sahip olmaktadır. Yüzeydeki elektrik alan değeri ise iris çevresinde maximum değere ulaşmaktadır. İris bölgesindeki kavite materyalinin renginin kırmızıya dönmesi elektrik alandaki yüksek artışı göstermektedir.

Kaviteler üretilirken materyalin zarar görmemesi, kavite hücrelerinin delinmemesi için ulaşılan pik elektrik ve magnetik alan değerlerinin modellenmelerde detaylı belirlenmesi gerekir.

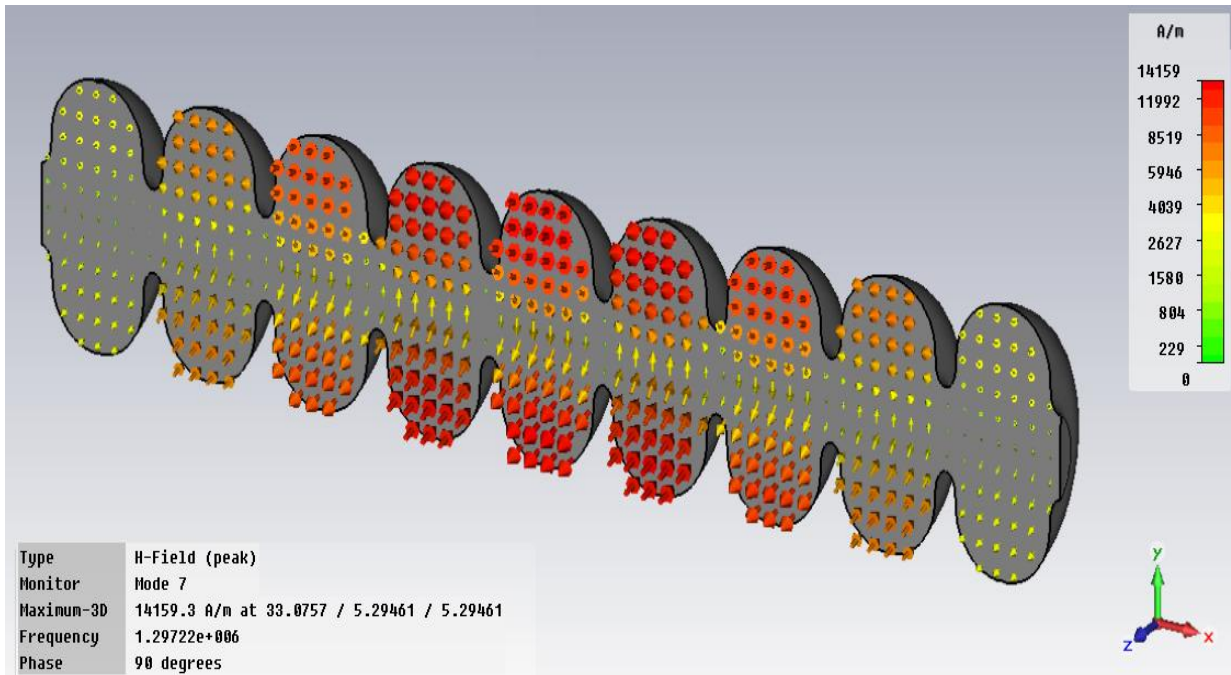


(a)

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



(b)



(c)

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Şekil 3.49. Ana hızlandırıcı sistemde 9-hücrelik kavitelerin içerisindeki hızlandırıcı modda pik elektrik alan çizgileri yoğunluğu a) karşıdan görünüş, b) yarım kesik halde görünüş, c) yarım kesik halde magnetic pik alan çizgileri

Şekil 3.49'dan görüldüğü üzere, elektrik alan çizgileri (a) ' da hızlandırıcı moda, bir kavitede (+) yönde iken diğer kavite hücrelerinde hızlanmayı sağlama için (-) yöndedir. Magnetik alan çizgileri (b)'de ise x eksenini etrafında çember çizecek şekilde dolanan görünümündedir.

SC'nin yanında, 9 hücrelik kavite için NC'de çalışılmış ve optimize edilmiştir. 9 hücrelik NC kavite parametreleri aşağıdaki şekildedir.

Tablo 3.6. NC kavite hücrelerinin geometrik parametreleri

Parametreler	(cm)	İç	Son
Yarım hücrenin uzunluğu	L/2	2.60067	2.60067
Ekvator yarıçapı	Requa	4.56801	4.56801
İris yarıçapı	Riris	1	1
İris elipsinin yatay eksenini	A	1.98951	1.75543
İris elipsinin dikey	B	1.9505	1.72101
İris elipsindeki eksenlerin oranı	A/B	1.02	1.02
Ekvator elipsin yatay eksenini	a	0.376076	0.616567
Ekvator elipsin dikey eksenini	b	0.427359	0.700644
Ekvator elipsindeki eksenlerin oranı	a/b	0.88	0.88
Duvar açısı	$\alpha$	10	10

Optimize edilen THM SASE SE Tesisi kavite sistemlerinin (hızlandırıcı modda) çalışma prensipleri üzerine elde edilen parametreler aşağıdaki tabloda sunulmuştur.

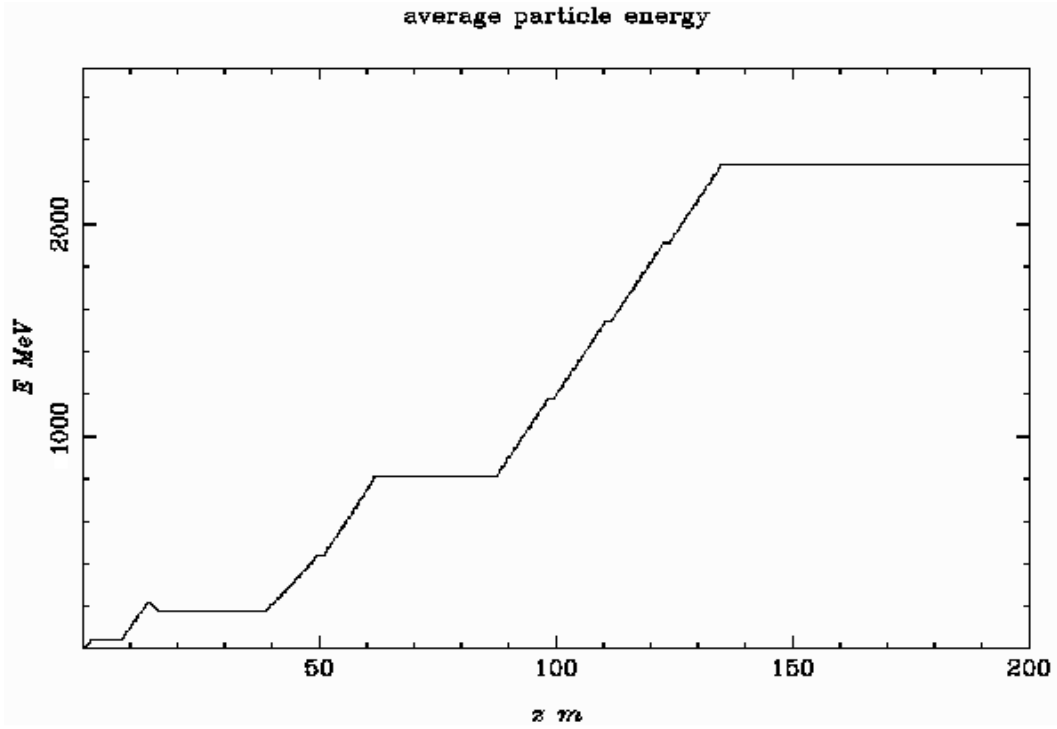
## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Tablo 3.7. Hızlandırıcı Modda kavite sistemlerinin çalışma prensipleri

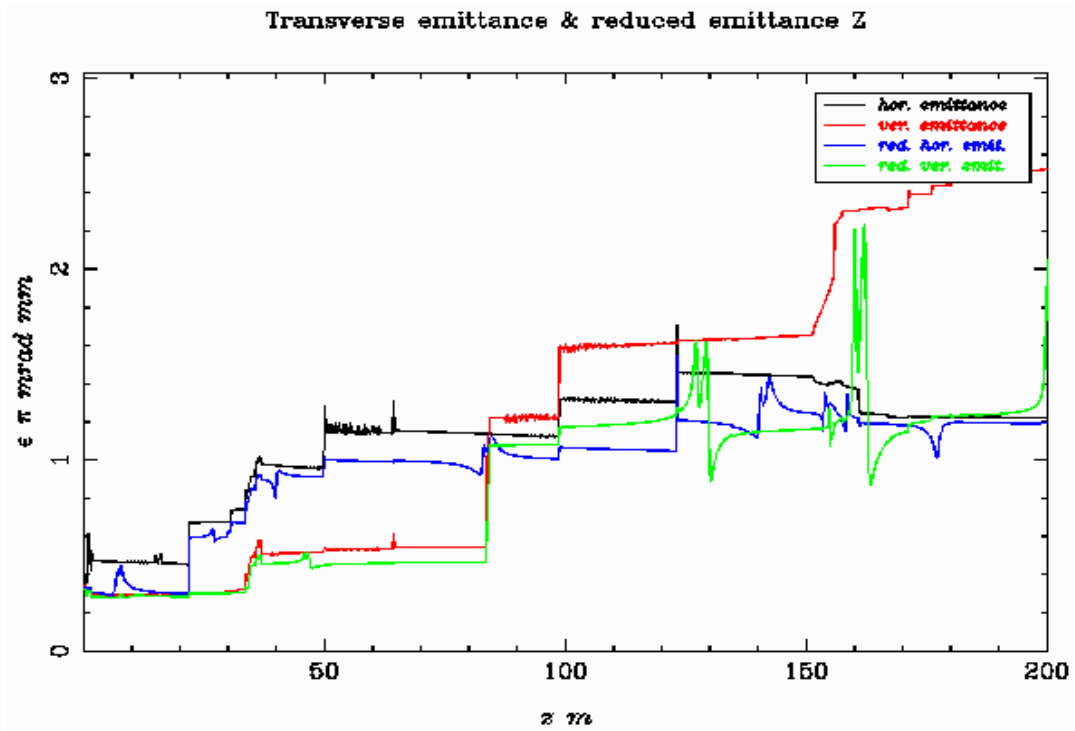
Hızlandırıcı mod	$T_{010}$ $\pi$ mod	HOM coupler sayısı	2
Frekans (MHz)	1290-1300	Kavite kayıpları (kl Longitudinal) (k <sub>Transfer</sub> ) (V/pC/m)	8.2 10
Hücre sayısı N	1.5 veya 3.5 tabanca, 3+3, 4+3, 5+3 veya 6+3 enjektör 9 (9×9) veya 12 (12×9) (ana hızlandırıcı)	R/Q ( $\Omega$ )	685
Aktif kavite uzunluğu (m)	1.028	T (K)	2
Cell to cell coupling k	1.9 %	Demet elektron yükü (nC)	$\approx 9$
Lorentz force detuning 15MV/m (Hz)	$\approx 630$	Kavite akım (kA)	2
$Q_0$	$6.22 \times 10^9$	E <sub>peak</sub> /E <sub>eacc</sub>	2.....2,6
$Q_{ext}$	$> 10^6$	H <sub>peak</sub> /E <sub>eacc</sub> Oe/(MV/m)	40....50

Aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere, ana hızlandırıcıdan geçirildikten sonra elde edilen elektron demetinin enerjisi 200 metre de 1 GeV'den daha büyük değerde elde edilmiştir. Enerjisi 3 GeV değerine ve daha yukarısına çıkarmak için demet yolu boyunca daha fazla süperiletken kavite koyarak demeti daha fazla hızlandırmak gerekmektedir. Ayrıca demetin yayını en kompakt şekilde hızlanması için demet yolu boyunca kuadrupol, demet sıkıştırıcı, kolimatör, odaklayıcı gibi sistemler de yerleştirilmiştir. Enerjisi daha yukarı elde etmek için çalışmalar halen devam etmektedir. 2.2 GeV enerjisine ulaşılmış durumdadır. Aşağıdaki iki şekilde (Şekil 3.50, Şekil 3.51) elektron demet enerjisi ve demetin yayını görülmektedir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



Şekil 3.50. Ana hızlandırıcı sonrası elektron demet enerjisinin demet yoluna göre değişimi



Şekil 3.51. Ana hızlandırıcı sistem sonrasında elde edilen elektron demetinin yayını

### 3.8.2 Kavite İçi Yardımcı Sistemler

Ana hızlandırıcı kısımda, elektron demetlerini hızlandırma sisteminde, gerek hızlandırmaya gerek kavite içerisindeki problemleri yok etmeye yarayan birçok yardımcı sistem vardır. Bunların bazıları, input coupler (kavite içerisine RF gücünü taşır), HOM Coupler (yüksek mertebeli modları kavitenin içerisinden dışarı atar), dayanak sistemi (stiffening sistem) kavitenin gürültü ve sarsılmalara karşı kararlı olmasını sağlar. “HOM Coupler” olarak isimlendirilen sistemler yüksek mertebeli modların kavite dışına alınmasını sağlar. Sürekli (cw) dalga hızlandırıcılarda hızlandırıcı frekansın demet frekansının katları olması beklenirken hızlandırıcı yapı içerisinde beklenmeyen durumlarda yüksek mertebeli modlar oluşmaktadır. Oluşan bu yüksek mertebeli modlar ise demetleri enine ve taşıma doğrultusunda etkilemektedir bunun sonucunda demetin yayılımı artmakta ve demet kalitesi düşmektedir.

THM SASE-SEL projesi içerisinde rölativistik elektron demetleri kaviteyi geçtikçe kavite içerisindeki elektromanyetik alanları heyecanlandırarak alanları çok kutuplu olarak genişletmektedirler. Dolayısıyla çok kutuplu yüksek mertebeli bir çok mod ortaya çıkmaktadır ve bunlar süper iletken kavite içerisinde HOM mod olarak anılmaktadır. THM SASE-SEL çalışmaları kapsamında 50 tane monopol mod alınarak CST ile çalışılmış ve frekansa uygun olanı seçilerek diğerleri HOM Coupler ile kavite sisteminden dışarı alınmıştır.

### 3.8.3 Sistemde Çalışma Mekanizmasını Etkileyen Kararsızlıklar

Uzay yükleri hızlandırıcı sistemi boyunca sürekli kararsızlıklar oluşturmaktadır. Ayrıca gürültü de soğutma sistemlerinde kararsızlıklar meydana getirmektedir. Kavitelere aşırı ısınma, Lorentz Force Detuning ve yüksek düzey modlar (Higher Order Modes-HOM) çeşitli yapı ve çalışma kararsızlıkları ortaya çıkarmaktadır. Vakumdaki kirlilik, kavite içerisindeki kirlilikler ve elektrik ve magnetik alanların belirlenen limit değerlerini aşması da kavite içerisinde ve hızlandırıcı sistemlerinde kararsızlıklara yol açar.

### 3.9 Hızlandırıcı Ek-Teknik Sistemleri

THM SASE-SEL’de demetin istenmeyen etkileşmelerini önlemek için vakum sistemi, demetin çeşitli noktalarda istenilen boyutta odaklanmasını sağlamak için magnet yapıları, kontrol ve RF sistemleri kullanılmaktadır.

#### 3.9.1 Vakum Sistemi

Hızlandırıcı sistemlerde demet kalitesini etkileyen önemli sistemlerden biriside vakum sistemidir. Hızlandırıcı yapılarda demet yolu oldukça yüksek bir vakum altında tutulmaktadır. Bu şekilde demet halinde ilerleyen elektronları etkileyecek hızlandırıcı yapı içerisinde bir parçacığın veya etkinin olma olasılığı minimum seviyeye indirilmektedir. Hızlandırıcılarda vakum işlemi tabanca içerisinde injektör ve demet yolu, demet tüpü ve hızlandırıcı kaviteler içerisine uygulanmaktadır. Vakumlama işlemi daha önceden temizleme işlemine tabi tutulmuş sistem bölümlerine (kavite, demet tüpü gibi) adım adım vakum pompası ile içerideki havanın alınarak dışarıya aktarılması ile gerçekleşmektedir. Vakum sisteminde dikkat edilmesi gereken noktalar;

- Vakumun uygulanacağı vakum haznesinin materyalinin basınç farkına dayanıklı materyallerden alınması gerekmektedir. Vakum haznesinin sıcaklık artışında soğutma işlemin gerçekleştirilebileceği ve iç ve dış basınç farkında bütünlüğünü koruyacak materyeller kullanarak uygun şekillerde fabrikasyonu yapılmalıdır.
- Diğer önemli unsur ise vakumlama işlemini yapan vakum kompresörünün seçimidir. Yapı içerisine uygulanacak vakum değerine göre uygun vakum pompası seçilmelidir.
- Sistem içerisine uygulanan basınç değerini ölçmek için basınç monitörü ile içerideki basınç sürekli gözetim altında tutulmalıdır.

Türk Hızlandırıcı Merkezi SASE-SEL Projesi kapsamında demet kalitesini arttırmak ve iyi bir iletim hattı oluşturmak üzere süperiletken hızlandırıcı yapılar içerisine yaklaşık 4 K sıcaklıklarında ultra bir vakumlama işlemi gerçekleştirilmesi öngörülmektedir. Vakum haznesi olarak ısı iletimi açısından bakır kullanılması planlanmakta ve en dış varilde ise alüminyum kullanılması düşünülmektedir.

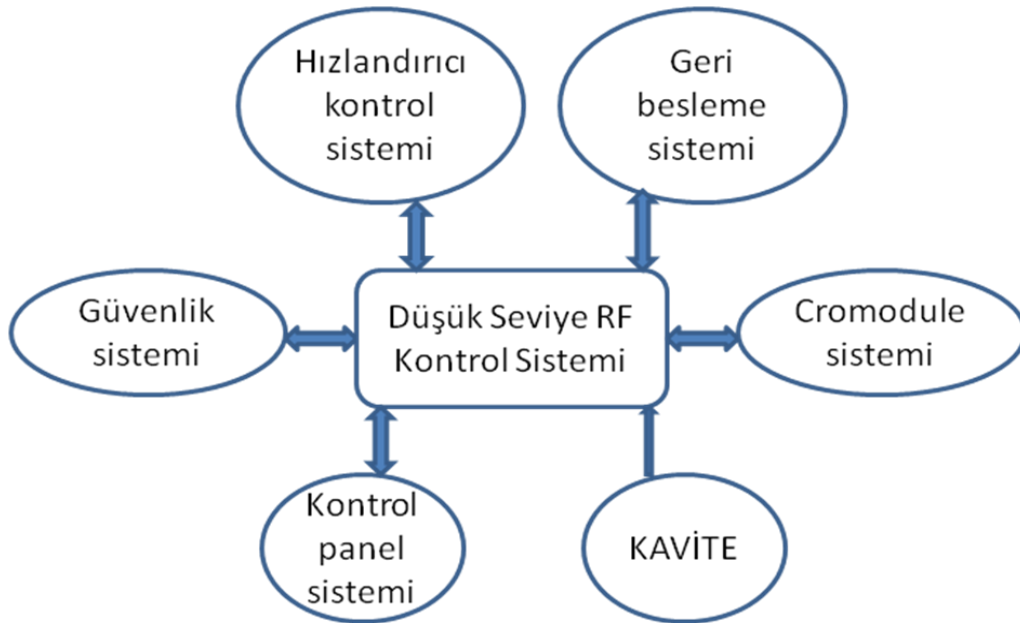
## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Hızlandırıcı yapılarda bütün vakum hazneleri argon-oksijen alaşımı ile temizlemeye tutularak titanyum sublimation pompaları ile yaklaşık olarak  $10^{-10}$  torr'dan büyük değerlerde bir vakum değerine ulaşılması beklenmektedir.

THM SASE-SEL sisteminde Turbo moleküler vakum ( $10^{-4}$  -  $10^{-6}$  Torr), ultra high vakum- UHV ( $\sim 10^{-11}$ -  $10^{-14}$  Torr) sistemleri kullanılmaktadır. Özellikle tabanca, kaviterler ve undulatör kısmında vakum sistemindeki outgasing oranı (vakum kusması) and “virtual leaks” vakum problemleri önem taşımaktadır.

### 3.9.2 Düşük Seviye Radyo Frekans Sistemleri ve Toleranslar

Düşük düzey RF (LLRF) kontrol sistemi, SC hızlandırıcı kavitelere güç sağlayan klystronlar (ana hızlandırıcı 10 MW, ilk hızlandırıcı 10 MW ve tabanca 5 MW), iki cyromodule içerisinde ikili set halinde 4 tane 9 hücrelik kaviteyi kapsayan hızlandırıcı kontrol sistemi, hızlandırma işlemi sırasında ekipmanların ve personel güvenliğini sağlayan güvenlik sistemi, RF geri besleme sistemi ve tüm sistemin kontrolünün sürdürüldüğü kontrol panel sistemleri ve bununla birlikte birçok ölçüm yapılan ve veri analizi yapan birçok küçük sistemlerden oluşmaktadır.

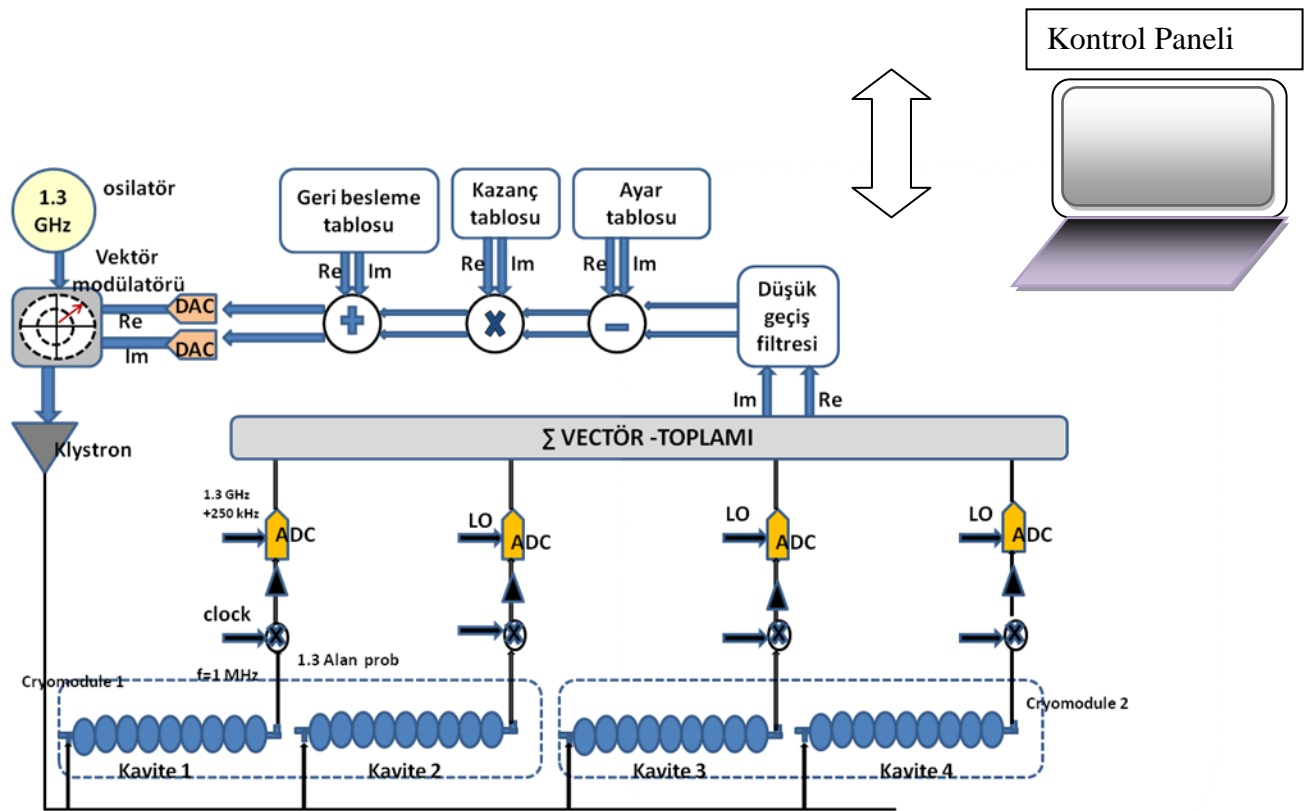


Şekil 3.52. Düşük seviye RF kontrol sistemi ve eklentileri



## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Hızlandırıcı sistemlerde RF sistemlerinin tasarımı ve çalışma prensibi hızlandırıcı sistemlerde elde edilecek hızlandırma ürünü olan lazer enerjisini etkileyen önemli bir unsurdur. Bir RF istasyonu, bir salındırıcı tarafından üretilen dalgaları klystron tarafından atmalı RF dalgalarına dönüştürmektedir. Bu kapsamda bir RF istasyonunda RF gücünün üretilmesi ve bu gücün hızlandırıcı kavitelere dağıtılması işlemi iyi bir fizik, mekanik ve elektronik bilgi birikimi gerektirir. RF gücünün üretilmesinden hızlandırıcı kavitelere dağıtılma aşamasına kadar ayrıntılı bir çalışma gerektirmektedir.



Şekil 3.53. Ana hızlandırıcı sisteminde hızlandırıcı sisteminin RF gücü dağıtımı

Yukarıda Türk Hızlandırıcı Merkezi SASE-SEL’de öngörülen istasyonun bir RF istasyonunda RF gücünün üretiminden kavitelere dağıtım aşamasına ölçüm ve gerekli ayarlamaların yapıldığı sistemler ve kavite sonrasında dışarı alınan dalgaların geri besleme ile tekrar module edilmesinin temel bir gösterimi verilmiştir. Osilatörden elde edilen dalgalar vektör modülöründe module

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

edildikten sonra klystronda RF dalgasına dönüştürülerek dalga kılavuzları yardımı ile hızlandırıcı kaviteelerin son hücrelerin olduğu demet tüpü üzerindeki güç girişleri (power coupler) tarafından kaviteye aktarılmaktadır. Kavitedeki alan değerleri, alan problemleri ile ölçülür. Kavite sonunda kaviteden çıkan alanların değerleri çok küçük zaman farkı (microsaniye) ile ADC'de alan değerleri hesaplanarak verileri kontrol parametrelerine gönderir. LO noktalarında ise alan üzerinde nominal değişikliklerde uyarı/alarm vererek gerekli düzeltmelerin yapılması noktasında uyarır.

Vektör toplamları kısmında kaviteleden gelen alanlar toplanarak geri beslemesi oluşturulması için sisteme verilir ve alan bu yol üzerinde gerekli düzeltmelere, ayarlara ve ölçümlere tabi tutularak tekrar kullanılmak üzere vektör modülatörüne gönderilir. Sistem içerisinde DAC düzenekleri ile de vektör modülatörünün yönetilmesini ve piezo tuners'ların ayarlanmasını sağlar.

### 3.9.3 RF Düzeneklerinin Kontrol Sistemi

Düşük seviyelerdeki RF sistemlerinin çalışması doğrultusunda ve kontrol mekanizmalarından sistem içerisinde çalışan birimlere gönderilen ve sistemi oluşturan yapılardan alınan sinyaller doğrultusunda sistemin uygun çalışması düzenlenmektedir. Sistemin düzenli çalışmasında ve sistemde oluşan yapılarda herhangi bir arıza/hata durumu bu sinyaller doğrultusunda kontrol mekanizması tarafından belirlenerek gerekli ayarlamalar yapılabilmektedir. Bu anlamda verilerin kontrol sistemi üzerinde gerekli program ve teknikler ile sentezlenmesi gerekmektedir.

RF sisteminin çalışmasında ve denetlenmesinde sistemi oluşturan parametrelerden alınan sinyaller doğrultusunda sistemin çalışma kontrol mekanizmaları ile; alan değerlerinin kontrolleri, rezonans frekans değerlerinin kontrolleri, açık döngü kazançları ve kontrolleri, döngü noktalarının kontrolleri, geri besleme yapılarının kontrolleri, atma yapısı ve sinkrotron ışınımı değerlerinin kontrolleri, zaman değerlerinin ölçümü gibi bir çok parametrelerin kontrol mekanizmaları kullanılarak hızlandırıcı yapının temel parametreleri elde edilmektedir. Bu parametreler doğrultusunda demetin elde edilme aşamasından itibaren yapılan ölçümler ve RF sisteminden alınan veriler doğrultusunda hızlandırma işlemlerinin istenilen doğrultuda başarıya ulaştırılması sağlanmaktadır.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

RF sistemindeki temel kontrol sistemleri ile hızlandırıcılarda; kavite içerisinde alan gradyentlerinin ölçülmesi (Gun için 20 MV, ana hızlandırıcıda 15 MV), hızlandırıcı yapıda kavitelere ve RF üretim aşamasında RF kaynağı ve RF frekansının taşınmasında mekanizmalarda ortalamanın üzerinde sistemi etkileyecek gürültülerin belirlenmesi, kavite içerisinde faz değerlerinin ölçümü, frekansa bağlı kavite ayar ve değişimleri,  $Q_{ext}$  parametresinin belirlenmesi, kavitelere gönderilen ve yansıyan güç değerlerinin ölçülmesi gibi daha bir çok parametreler ölçülerek değerlendirilmektedir. Eğer istenilmeyen ve istikrarsızlık durumlarında ilk aşamalarda ileri seviyelere ulaşılmadan temel ayarlar bu kontrol mekanizmasından alınan veriler doğrultusunda düzeltilebilmektedir.

### 3.9.4 Magnetler

THM SASE-SEL'de kuadrupol magnetler (Permanent, elektro-magnet şeklinde 2 çeşit kullanılması öngörülmektedir), transport kuadrupol, focus kuadrupol, skew kuadrupol, sextupol magnetler, bending dipol magnetler, salındırıcı sisteminde ise yaklaşık 15 focusing ve 15 civarı defocusing kuadrupol kullanılması planlanmaktadır.

### 3.10 Demet Diyagnostiği

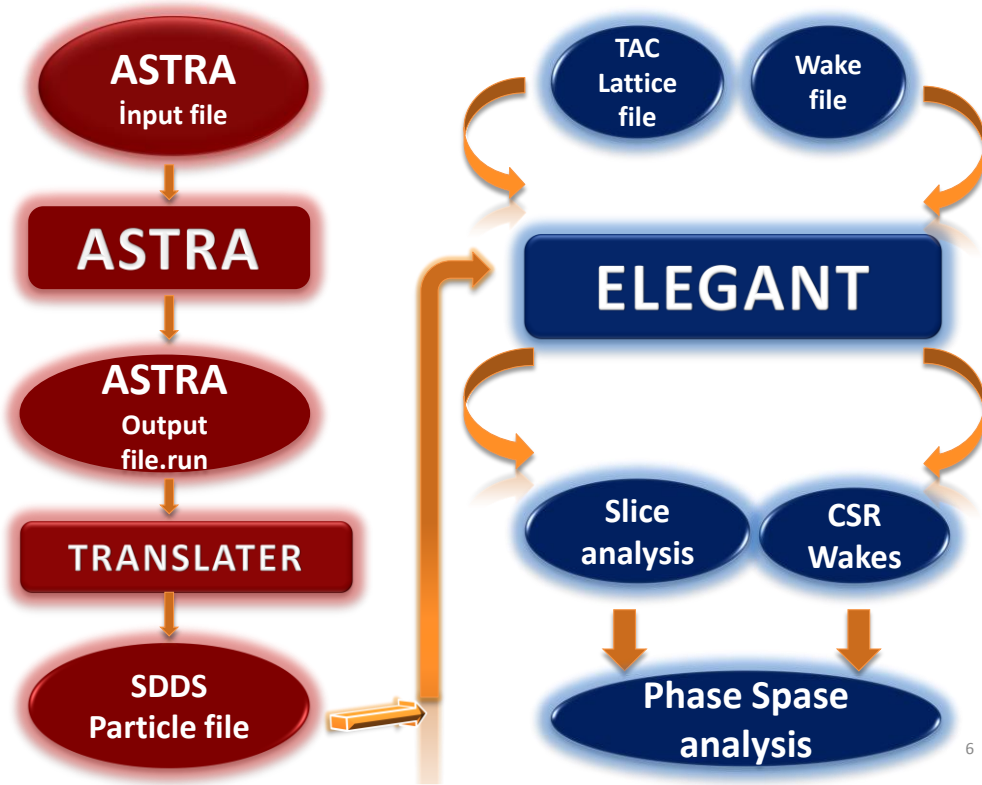
Elektron demet diyagnostiği ölçümleri lazer elde edilene kadar her sistemde en öncelikli tamamlanması gerekli durumdur. Demet yolu boyunca demetin her noktada kalitesini, özelliklerini, bazen istenilen şiddette demet elde edilmesi noktasındaki bilgileri içerir. Demetin özelliklerini demet yolu boyunca incelemek için demet yolu üzerinde buldukları yere göre isimlendirilen 3 çeşit demet pozisyon monitörü konulmuştur, bunlar: kavite pozisyon monitörü, stripline pozisyon monitörü ve kuadrupol pozisyon monitürüdür. Bunlar demet yolunda isminde belirtilen noktaların içerisine konulur. Ayrıca daha öncede belirtildiği üzere yükün ölçüldüğü Toroid Coil, demetin odaklandığı Focusing Coil gibi monitörler vardır. Hızlandırıcıların fazı değiştirildiğinde demetin sıkıştırılması değişeceğinden, demetin uzunluğu (bunch length) CTR (Coherent Transition Radiation) tarafından ölçülür. Enine demet büyüklüğü ve yayını gibi önemli demet özellikleri OTR (Optical Transition Radiation) kullanılarak ölçülür. Hızlanan demetin undulatörde problem yaratmaması, odaklanması için bakır blok tüplerden oluşan kolimatör kullanılır. Demet büyüklüğünün (beam size) genel ölçümü için wire scanner'da

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

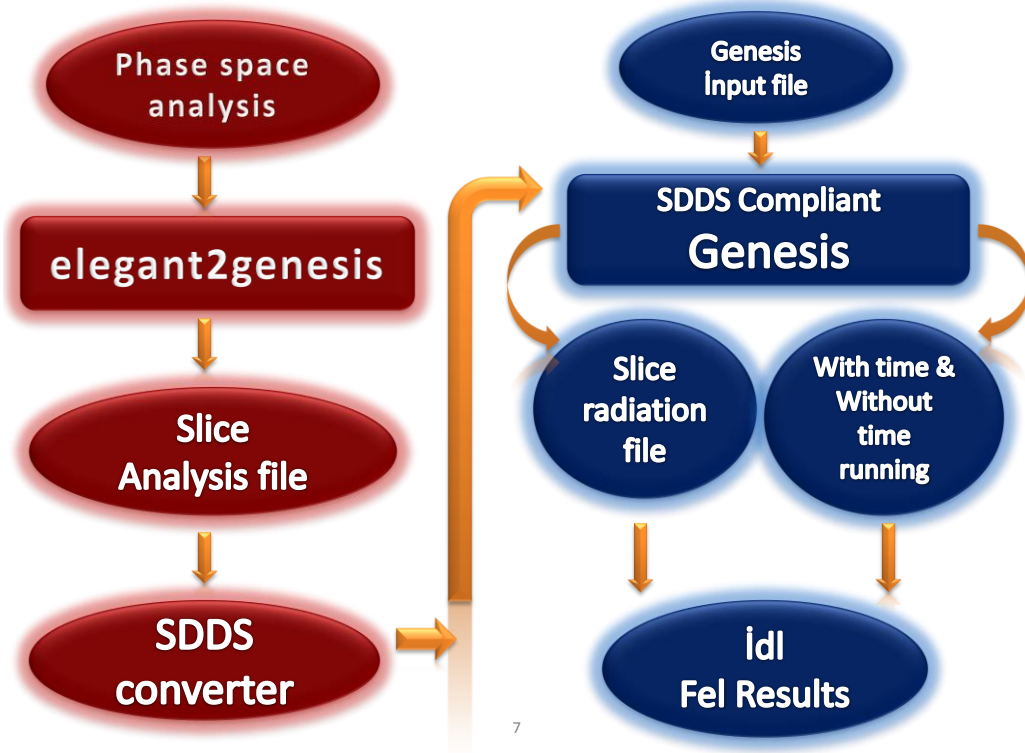
kullanılır. Undulatörden sonra enerjisi azalan ve ışıma yapan elektronların dışarı alınması için (beam dump)  $3 \times 2 \text{ cm}^2$  büyüklüğünde silindiriksel sistem kullanılabilir. Bu raporda, Fluka kodu ile modellenen silindiriksel sistemin özellikleri verilmektedir. Demet yolu boyunca demetin özelliklerini izlemek için 40 civarı monitörün konulması öngörülmektedir.

### 3.11 Simülasyonlar

Türk Hızlandırıcı Merkezi SASE SEL Tesisi çalışmaları kapsamında kullanılan programlar aşağıda gösterildiği şekildedir.



## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



Şekil 3.54. THM SASE SEL Sistemi boyunca kullanılan tüm modelleme programları

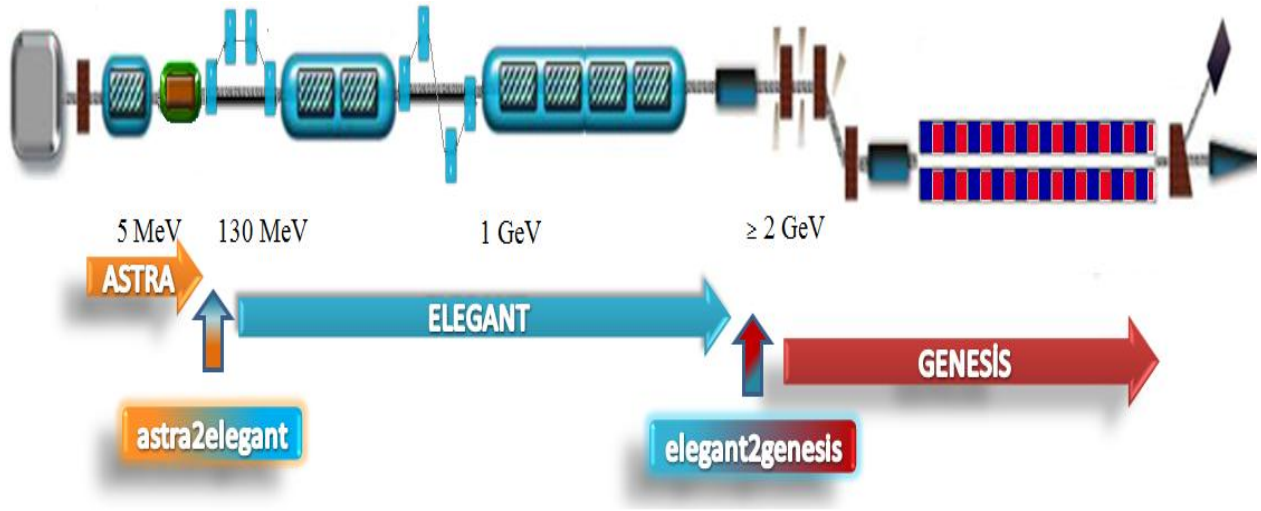
Buradaki programlardan başka THM SASE SEL Sistemini baştan-sona modellemek için aşağıdaki bilgisayar programları da kullanılmaktadır:

1. Astra2elegant
2. Astra2genesis
3. Ps Viewer
4. Matlab
5. Mathematica
6. Poisson/Superfish
7. CST Microwave Studio
8. CST Particle Studio
9. Radia
10. Glad

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

11. Simplex
12. FLUKA ve
13. Analitik hesaplamalar

THM SASE SEL Tesisi boyunca demet yolu bölgesine göre bilgisayar programlarından bazılarının kullanıldığı yerler ve ulaşılabilen demet enerjisi değerleri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3.55. THM SASE SEL Sistemi boyunca kullanılan tüm modelleme programları

THM SASE SEL Tesisi için hızlandırıcı fiziği ve demet dinamiği üzerine yapılan çalışmalar büyük ölçüde tamamlanmıştır. 200 metrelik demet yolu boyunca 2.2 GeV civarı elektron demet enerjisine ulaşılmıştır. Bu değer demet yolu boyunca bir miktar daha hızlandırıcı kavite, odaklayıcılar ve yardımcı sistemler konularak minimum 3 GeV'lik enerji değerine ulaşılması yönünde çalışmalar devam edecektir.

Süperiletken kavitelerin tasarım ve dizaynı üzerine yapılan modelleme çalışmaları tamamlanmıştır. Kavite kusurları üzerine modelleme çalışmaları devam ettirilmektedir. Normaliletken kavite üzerine modelleme çalışmaları tamamlanmak üzeredir.

Astra ile yapılan demet dinamiği, elektron demetinin demet yolu boyunca izlenmesi, demetin akımının, yükünün ölçülmesi konularındaki modelleme çalışmaları tamamlanmıştır. Astra da 255000 parçacık alınarak modelleme çalışmaları yapılmış ve yeterli istatistiksel veriler elde edilmiştir.

### **Kaynaklar:**

1. <http://poisson-superfish.software.informer.com/>
2. J.K. Sekutowicz, Superconducting elliptical cavities, (DESY). Jan 2012. 25 pp., Published in **CERN Yellow Report CERN-2011-007, 369-393.**
3. Astra — K. Flöttmann, Astra homepage, <http://www.desy.de/~mpyflo>
4. CST Microwave Studio, CST GmbH, Buedinger Str. 2a, D-64289, Darmstadt, Germany, <http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Overview.aspx>
5. B.Aune et al., The Superconducting TESLA Cavities, arXiv:physics/0003011v1, 4 March 2000.
6. [http://www.lepp.cornell.edu/~hoff/LECTURES/08S\\_688/08S\\_688\\_080324.pdf](http://www.lepp.cornell.edu/~hoff/LECTURES/08S_688/08S_688_080324.pdf)
7. H. Padamsee, J. Knobloch, and T. Hays. RF Superconductivity for Accelerators. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2008.
8. S. Yakovlev, et al., “Higher Order Modes in the Project-X Linac”, International Workshop on HigherOrder-Mode Diagnostics and Suppression in Superconducting Cavities, HOMSC12, UK.
9. Bazyl Dmitry, *SRF cavity surface inspection methods*, FLA, DESY, Hamburg September 11, 2014.
10. <http://www.psi.ch/swissfel/>
11. The MAFIA collaboration “User Guide”, CST GmbH, Darmstadt, Germany.
12. <http://www.desy.de/fel-beam/s2e/codes.html>
13. <http://www.desy.de/>

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

14. [https://portal.slac.stanford.edu/sites/lcls\\_public/Pages/Default.aspx](https://portal.slac.stanford.edu/sites/lcls_public/Pages/Default.aspx)
15. [http://photocathodes2011.eurofel.eu/sites/site\\_photocathodes2011/content/e103312/e110280/photocathodes\\_talk\\_sertore.pdf](http://photocathodes2011.eurofel.eu/sites/site_photocathodes2011/content/e103312/e110280/photocathodes_talk_sertore.pdf)
16. [http://www.desy.de/fel-beam/csrtrack/files/CSRtrack\\_User\\_Guide\\_1.100\\_01.pdf](http://www.desy.de/fel-beam/csrtrack/files/CSRtrack_User_Guide_1.100_01.pdf)
17. [http://www.aps.anl.gov/Accelerator\\_Systems\\_Division/Accelerator\\_Operations\\_Physics/manuals/elegant\\_latest/elegant.pdf](http://www.aps.anl.gov/Accelerator_Systems_Division/Accelerator_Operations_Physics/manuals/elegant_latest/elegant.pdf)
18. <http://www.fluka.org/fluka.php>



## 4 SASE-SEL İÇİN SALINDIRICI YAPISI

### 4.1 Giriş

THM SASE-SEL’de 30 metre uzunluğunda doyuma ulaşması ve yapılması modelleme çalışmalarıyla öngörülen salındırıcı sistemi bir dizi NdFeB magnet materyalinden yapılmıştır. Salındırıcı kısım lazerin elde edildiği bölüm olduğundan önemlidir. Demet yolu boyunca birçok fokusing ve defokusing kuadrupol yerleştirilmelidir. Ayrıca salındırıcı bölümüne enerjisini kaybeden elektronların dışarı alınmasını sağlayan dış kısmı alüminyum, içi karbondan oluşan silindir şeklinde “Faraday Cup” ‘ın yerin altına yerleştirilmesi planlanmıştır.

#### 4.1.1 SASE-SEL İşletiminin Prensipleri

THM SASE-SEL işletiminde maliyet öngörüsü bir önceki bölümde yapılmıştı. Bu kısımda sistem boyunca elektrik giderlerinin karşılanacağı büyük bir trafo merkezinin yapılması, şehir cereyanının voltaj dalgalanmalarından uzak tutulması için gerekli sistemlerin yapılması gerekliliği ifade edilebilir. Cereyan kesintilerine karşı büyük UPS sistemi alınmalıdır. Ayrıca laboratuvar boyunca her noktaya radyasyon güvenlik sistemi parçaları konulmalıdır.

#### 4.1.2 THM SASE-SEL İçin Tasarım Kriterleri

THM SASE-SEL Projesi kapsamında öncelikle 1-3 GeV elektron demet enerjisine ve hatta 8 GeV’e kadar ulaşılarak, 1-100 nm dalgaboylu lazer ışını ve GW mertebesinde yüksek güçlü lazer elde edilmesi öngörülmektedir.

### 4.2 Salındırıcı Sistemleri

THM SASE-SEL Projesi kapsamında yapılan modelleme çalışmaları demir hibrid undulatörün seçilmesinin istenilen dalgaboyunu kapsaması yönünden uygun olduğunu göstermiştir. Altta tablodaki denklem ile verilen pik manyetik alanı göz önüne alarak, bütün undulatör materyalleri için özellikler verilmiştir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

$$B_{peak} = a \text{Exp} \left( b \frac{g}{\lambda_u} + c \left( \frac{g}{\lambda_u} \right)^2 \right)$$

Tablo 4.1. Manyetik alanı, dalgaboyu ve aralık uzunluğuna göre değişim gösteren ve üretimi yapılabilen 8 farklı salındırıcı sistemi

Durum	Tanım	a	b	c	Aralık
A	PPM*, Düzlemsel, Dikey Magnetik Alan	2.076	-3.24	0	$0.1 < g / \lambda_u < 1$
B	PPM*, Düzlemsel, Yatay Magnetik Alan	2.4	-5.69	1.46	$0.1 < g / \lambda_u < 1$
C	PPM*, Helikıl Magnetik Alan	1.614	-4.67	0.62	$0.1 < g / \lambda_u < 1$
D	Vannadyum Permendür ile Hibrid	3.694	-5.068	1.52	$0.1 < g / \lambda_u < 1$
E	Demir ile Hibrid	3.381	-4.73	1.198	$0.1 < g / \lambda_u < 1$
F	Süperiletken, Düzlemsel, Aralık = 1.2 cm	12.42	-4.79	0.385	$1.2 \text{ cm} < \lambda_u < 4.8 \text{ cm}$
G	Süperiletken, Düzlemsel, Aralık = 0.8 cm	11.73	-5.52	0.856	$0.8 \text{ cm} < \lambda_u < 3.2 \text{ cm}$
H	Elektromagnet, Düzlemsel, Aralık = 1.2 cm	1.807	-14.3	20.316	$4 \text{ cm} < \lambda_u < 20 \text{ cm}$

\*PPM = Saf permanant magnet (Pure Permanent Magnet (Magnet Block Material: NdFeB) [1])

#### 4.2.1 Salındırıcı Parametreleri Seçimi

Lazer üretiminde salındırıcının magnet materyali ve manyetik aralık en önemli tasarım parametrelerindedir. Daha küçük alınan aralık, daha az akım ve verilen manyetik alana ulaşmak için manyetik materyalin gerektirdiği daha az hacim demektir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

THM SASE-SEL’de 8, 12 ve 20 mm olmak üzere 3 farklı gap aralığı üzerinde çalışılmalar yapılmıştır. Son yıllarda parlak X-ışınlarını elde etmek için in-vacuum undulatörler büyük artan sıklıkta kullanılmaya başlanmıştır. In-vacuum undulatörler demet yolu boyunca bileşenlerin hizalanması için de kullanılır. In-Vacuum undulatörlerin bir dezavantajı faz durumundan kaynaklanır. Bu durum iki zorluk yaratır. Birincisi ultra high vacuum basınçta magnet sıralanışı sadece dikey doğrultuda değil elektron yolu boyunca da hareket eder. Diğer dezavantaj ise hareketli magnet sıralanışının uçları ile vacuum açıklığının RF geçişlerinin birleştirilmesindedir. Böylece in-vacuum durumunda multipolarizasyon undulatörü geliştirmek zordur.

Aşağıdaki tablolarda 8 mm ve 12 mm manyetik salındırıcının aralıkları için diğer parametrelerin uyum aralığı gösterilmektedir.

*Tablo 4.2. THM SASE SEL salındırıcı parametreleri*

Parametre, [Sembol]	Birim	Değeri
Undulatör aralığı, [g]	cm	1.2 (0.8)
Undulatör periyodu, [ $\lambda_u$ ]	cm	1,5
Pik manyetik alanı, [ $B_{peak}$ ]	T	0.4817 (0,787)
K parametresi	-	(1,1)
Undulatör periyod sayısı, [ $N_u$ ]	-	(1580)
Undulatör uzunluğu, [ $L_u$ ]	m	30 (23,7)
SC Planar	-	F
FODO Periyodu	M	6,6
Kuadrupol uzunluğu	M	0,1256
Beta	M	8

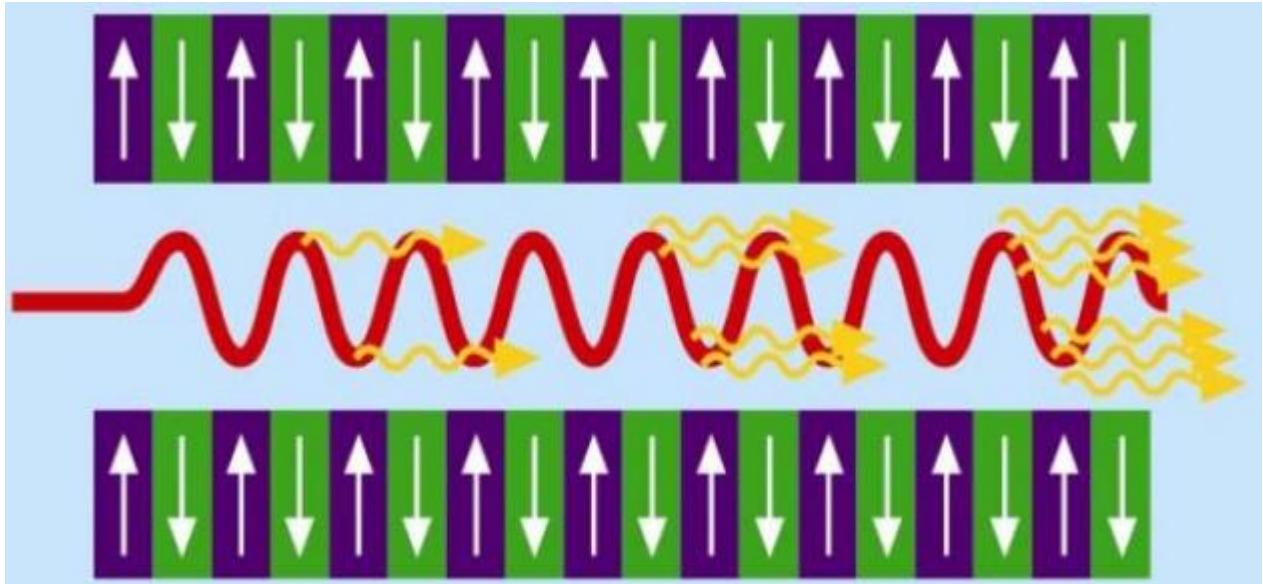
#### 4.2.2 Temel Tolerans Gereksinimleri

THM SASE-SEL için salındırıcı tolerans gereksinimleri, undulatör kısmı için,  $0.1 < g / \lambda u < 1$  şeklinde verilebilir. Aralık ve undulatör dalgaboyu üzerine gelen sınırlama aralık şeklinde olup, SEL dalgaboyunu etkilemektedir.

#### 4.2.3 Salındırıcı Kısımları

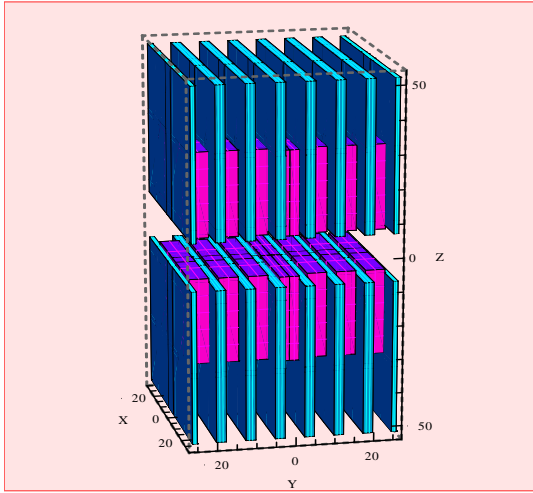
THM SASE-SEL salındırıcısı için orta bölgede NdFeB ve kutuplarda Vanadium Permendür alaşımları kullanılması öngörülmektedir. Dikdörtgensel şekilde undulator blokları seçilmiştir. Salındırıcı sistemi için 12 mm aralık ve undulatör periyodu 15 mm'dir. Merkezi manyetik alan  $B_z(0,0,0) = 0.4817 T$ 'dir.

Şekil 4.1, (a)'da salındırıcı yapının manyetik materyallerinin 12 mm aralık göz önüne alınarak Radia Programı ile modellenmesi sonucu oluşan undulatör magnetlerinin dizilişinin 3 boyutta görünümü verilmektedir [2]. Şekil 4.1, (c)'de ise undulatör magnetlerinin manyetik alanının y eksenini doğrultusundaki salınım davranışı görülmektedir.

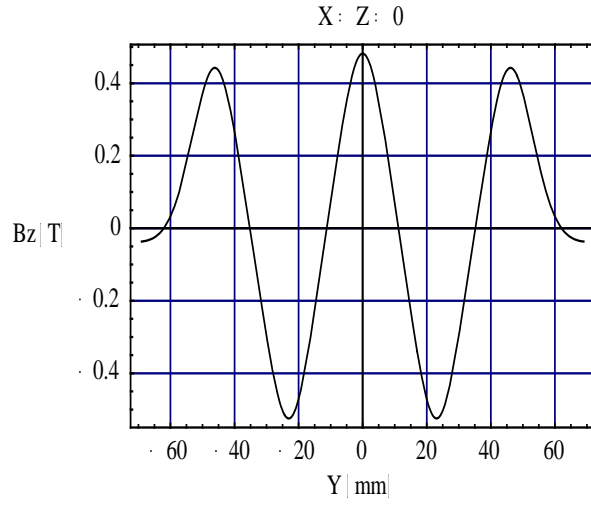


(a)

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



(b)



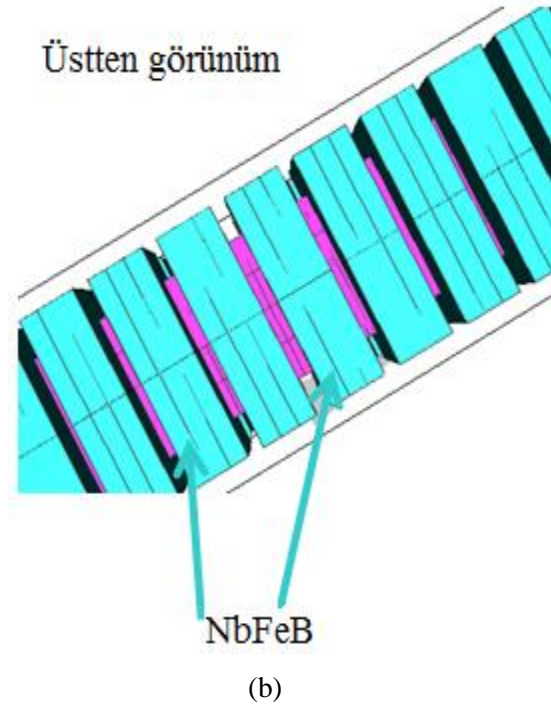
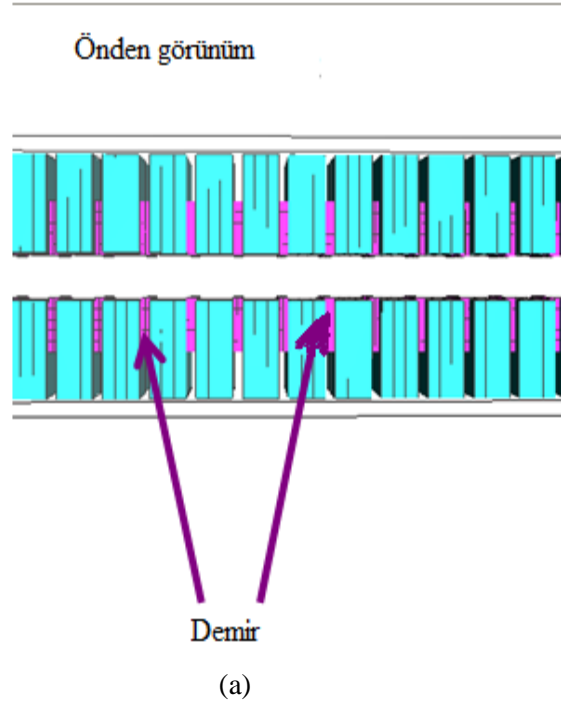
(c)

Şekil 4.1. THM SASE SEL salındırıcı sisteminde a) Salındırıcı sisteminde elektronlaşın ışıması ve koherent ışın elde edilmesi, b)Salındırıcının 3 boyutta Radia modellemesi ile görünümü, c) magnetik alanın y eksenini boyunca davranışı

Radia Programı ile magnet tasarımının geometrik yapısının önden ve üstten 2 boyutta görünümü aşağıdaki şekildedir. Undulatör magnetlerin materyali olarak; pembe renkli aradaki küçük kısımlar demirden, büyük bloklar ise NbFeB kalıcı (Permanent) materyallerinden yapılmıştır.

Magnet materyalleri kolayca kırılabilirdiği için dikkatli taşınmalıdır, göz koruması taşıma sırasında önemlidir. Ayrıca taşıma sırasında birbirlerine yapışma tehlikesine karşı önlem alınmalıdır. Magnetlerin yakınına metal içeren takı vb eşyalarla yaklaşılmamalıdır. NbFeB, demagnetiklenmeye karşı son derece dayanıklıdır.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



Şekil 4.2. Yapılan modelleme çalışmaları ile THM SASE-SEL salındırıcı sisteminin a) Önden görünümü, b) Üstten görünümü

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Türk Hızlandırıcı Merkezi'nde her bir set 5 m uzunluğunda olmak üzere 6 set (5x6=30 m) halinde tüm salındırıcı sistemi projelendirilmiştir. Salındırıcının pik magnetik alanı için Tablo 4.1'de verilen a, b ve c sabitlerinden yararlanarak "E" ve "F" undulatör tipleri seçilmiş ve bunlar üzerine Radia programı kullanılarak modellemeler yapılmıştır.

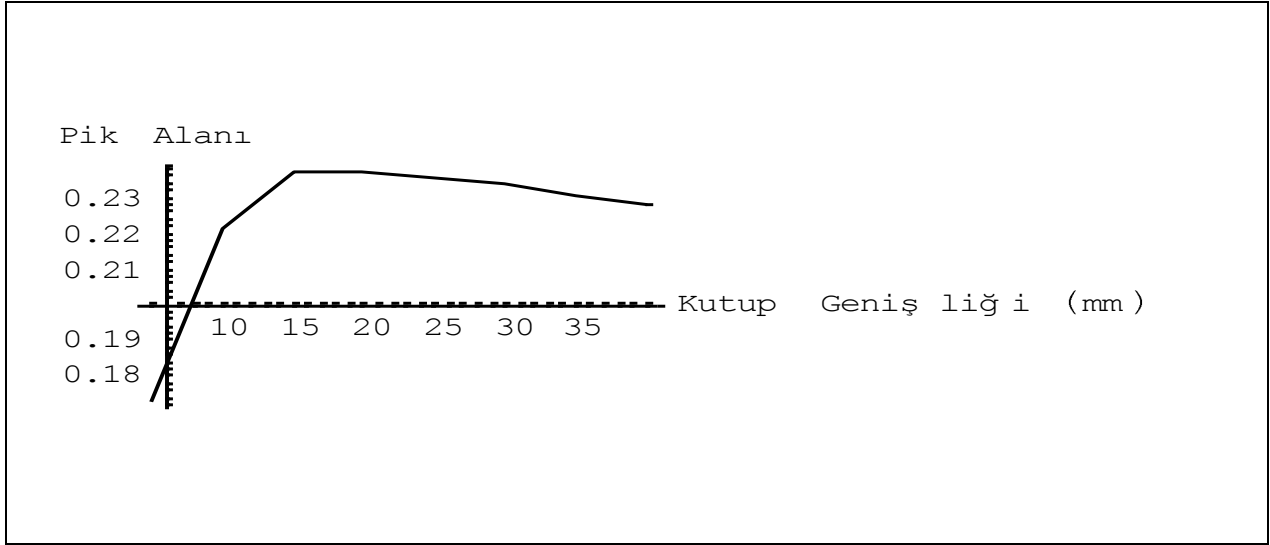
Merkezi magnetik alanın 2 farklı değeri için ( $B_z(0,0,0) = 0.4817 T$ ,  $B_z(0,0,0) = 0,240426 T$ ) ve undulatörün 2 farklı aralık uzunluğu için (12 mm ve 20 mm) modelleme yapılmıştır.

- Salındırıcı türü için Demir-Hibrit (Hybird with Iron) kullanılacak ve magnet malzemesi ise NbFeB kalıcı (permanent) magnet olarak seçilmiştir.
- Aralık uzunluğu örnek olarak 20 mm alınarak RADIA programında 3 cm periyotlu, periyot sayısı 60 olan salındırıcı tasarlanmıştır.
- Tasarımı yapılan salındırıcı 1.8 m uzunluğundadır.

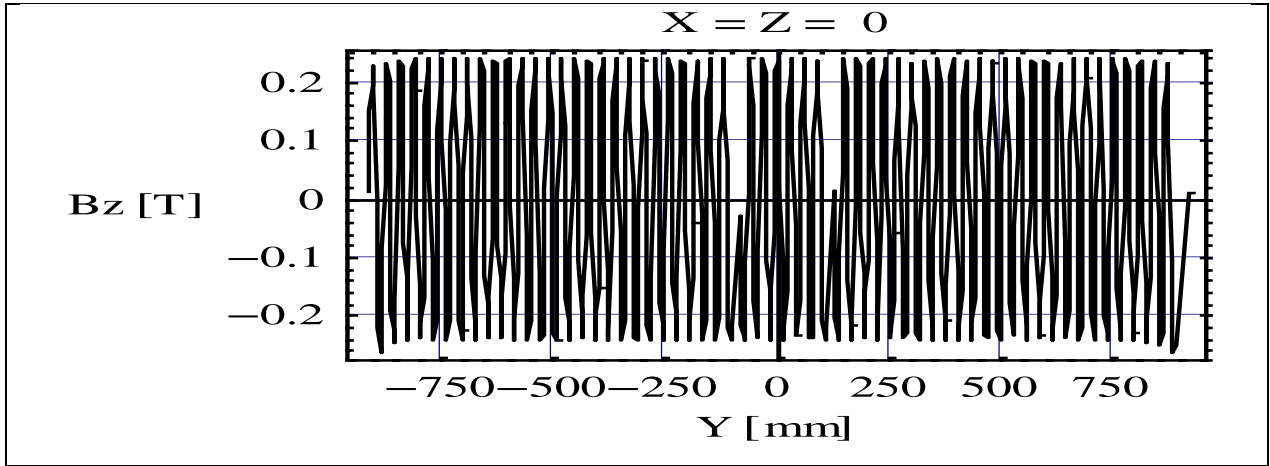
*Tablo 4.3. Radia programının modellemesinde kullanılan parametreler*

Salındırıcı Parametreleri	Değeri
Salındırıcı periyodu [mm]	30
Periyot Sayısı	60
Salındırıcı Parametresi	0.3-0.9
Maksimum Salındırıcı Parametresi	0.8
Salındırıcı aralığı (mm)	20

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



a)



(b)

Mıknatıslanmanın (Magnetization) Ortalama Kararlılığı: 0,000283585 T  
Maksimum Tam Mıknatıslanma: 2,10744 T  
Maksimum H Vektörü: 1,07691 T  
Merkezdeki Manyetik Alan  $B_z(0,0,0)$ : 0,240426 T

Şekil 4.3. Radia Programı çalışmaları sonucunda a) Pik magnetik alanının (T) kutup genişliğine (mm) göre değişimi, b) Magnetik alanın y doğrultusunda davranışı görülmektedir



## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Merkezdeki manyetik alan  $B_z(0,0,0) = 0.240426 T$  için RADIA Programı ile tasarlanan undulatörün pik manyetik alanının (T) kutup genişliğine (mm) göre değişimi ve undulatör magnetlerinin magnetik alanı yukarıdaki şekil ve grafikte gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

Bu modelleme çalışmalarından sonra 12 mm aralık ve undulatör periyodu 15 mm olan,  $B_z(0,0,0) = 0.4817 T$  merkezi manyetik alan seçeneğinin proje kapsamında öngörülmesine karar verilmiştir. Dünyadaki salındırıcı sistemi üzerine yapılan çalışmalarda aralığı 8 mm ve hatta 5 mm değerlerinde vakum içerisine çalışan undulatör sisteminin kullanıldığı ileri teknolojilerin ürünü sistemlerde mevcuttur. Bu değer aralıklarında modelleme çalışmaları da tarafımızdan devam etmektedir.

### 4.3 THM SASE SEL Parametreleri ve SEL Optimizasyonu

THM SASE SEL Tesisi için salındırıcı çalışmalarında undulatörün vakum içerisine konulmadığı durumda elde edilen lazer ışınının dalga boyu ve diğer özellikleri elde edilmiştir. Yapılan analitik hesaplamalar sonucunda elde edilen çıkış lazeri ile ilgili parametre değerleri aşağıdaki tabloda verilmektedir. 1 GeV'den daha yüksek enerjili elektron demetleri kullanılarak 6 nm'den daha küçük dalgaboylarında lazer elde edilmesi beklenmektedir.

Tablo 4.4. THM SASE-SEL Sisteminde elde edilen lazerin özellikleri

Çıkış Lazeri Parametreleri	Birim	Değer
rms demet uzunluğu	$\mu\text{m}$	59,841
Beta maksimum	M	12,457
Beta minimum	M	5,277
Demet büyüklüğü	$\mu\text{m}$	69,911
Demet gücü	TW	1,953
Beta – Fonksiyonu	M	8,108
Pik alan	T	0,4817
Kuadrupol odak uzunluğu	M	4,002

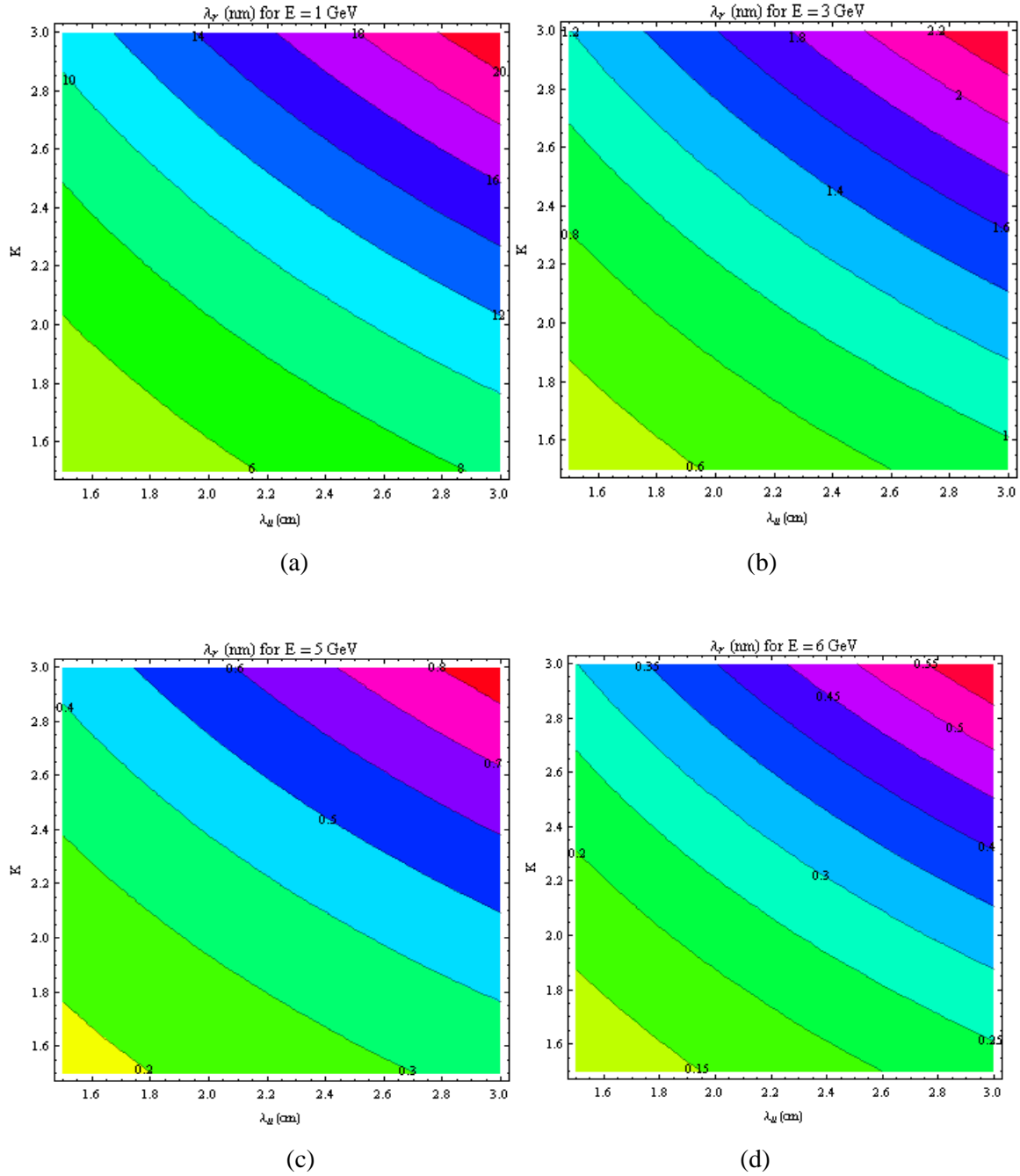
## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Doyum uzunluğu	M	21,48
Doyum gücü	GW	1,41
Çıkış gücü	GW	1,41
Rho (1D)	-	0,001
Rho (3D)	-	0,000486
Kazanç uzunluğu (1D)	-	1,064
Güç kazancı uzunluğu	m,Xie	1,417
Açısal diverjans	FWHM, murad	6,165
Bant genişliği	FWHM, %	0,203
Atma süresi	(FWHM)(fs)	235,024
Atma enerjisi	mJ	0,285
Uç sayısı	-	68,885
Kırınım parametresi	-	55,12611086
Dalgaboyu başına elektron	-	95833,3
Şot gürültü gücü	W	11,723
Etkin girdi gücü	W	11,723
Etkin enerji yayılması	-	0,063
Ortalama güç	mW	0,268
Çıkıştaki nokta büyüklüğü	FWHM, $\mu\text{m}$	164,628
Pik akı	-	1,32E+25
Ortalama akı	-	3,107E+12
Pik parlaklık	-	9,998E+30
Ortalama parlaklık	-	2,34E+18
Demet başına foton	-	3,308E+12

Bir elektron rezonans dalgaboyu ( $\lambda_r$ )'de elektromanyetik ışınım yayar. Işınım yaptığı dalgaboyu undulatorün dalgaboyuna bağlıdır,  $\lambda_r = \lambda_u(1 + a_u^2)/2\gamma^2$ , burada  $a_u = K/\sqrt{2}$  düzlemsel undulator için.  $K = 0.934 \lambda_u [cm]B[T]$ . THM SASE SEL Tesisinde sistemin baştan sona (start-

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

to-end) simülasyonu 1 GeV'lik elektron enerjisi göz önüne alınarak yapılmıştır. 2 GeV ve üzeri demet enerjileri için çalışmalar yürütülmektedir. Yüksek enerjilerde (1, 3, 5 ve 6 GeV) elde edilen lazerin dalgaboyuna göre undulator dalgaboyu ve  $K$ 'ya göre değişimleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



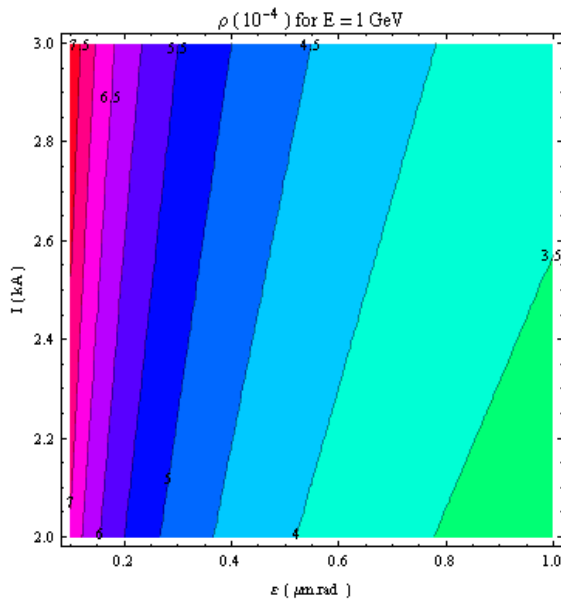
Şekil 4.4.  $\lambda_u$  ve  $K$ 'ya karşı rezonans dalgaboyu grafiği a)  $E=1$ , b)  $E=3$ , c)  $E=5$  ve d)  $6$  GeV için

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

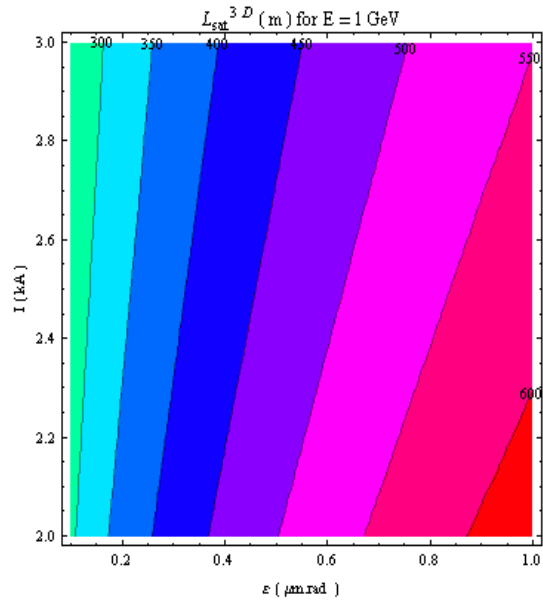
SASE-SEL prosesinin çalışması büyük oranda boyutsuz SEL Pierce Parametresi tarafından

belirlenir:  $\rho = \left[ \frac{1}{2\gamma^3} \left( \frac{\hat{I}}{I_A} \right) \left( \frac{\lambda_u A_u}{2\sqrt{\beta\epsilon}} \right)^2 \right]^{1/3}$ , burada  $\hat{I}$  elektron demeti pik akımıdır,  $I_A = 17 \text{ kA}$

Alfven akımı,  $\epsilon = \epsilon_n/\gamma$  geometrik yayınımdır. 3 boyutta doyum uzunluğu ( $L_{sat}^{3D} \approx (1 + \eta)L_G^{1D}$ ) şeklindedir ki bu değer undulatörün doyuma ulaşması için gerekli olan uzunluktur. Pierce parametresi ve 3 boyutta doyum uzunluğu şekilleri aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 4.5.  $\rho$  - yayılım ve  $\hat{I}$



Şekil 4.6. Doyum uzunluğu- yayılım ve  $\hat{I}$

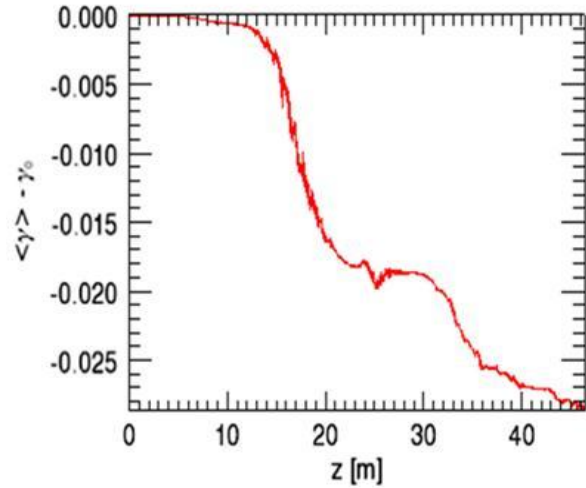
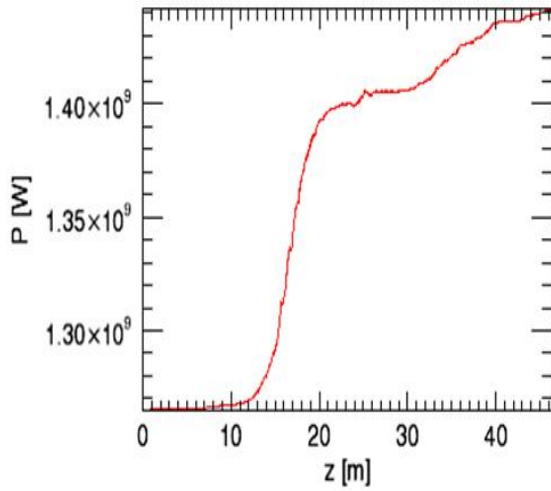
Undulatörden tek geçişte lazer elde etmek için modelleme programı olarak Genesis 1.3 kod'u kullanılmıştır [3]. Genesis 1.3 Kodu kullanarak yapılan modelleme için  $1 \text{ GeV}$  elektron demet enerjisi göz önüne alınmıştır. Rayleigh aralığı  $1.29196 \cdot 10^2$ , pik akımı  $2 \cdot 10^3 \text{ A}$  değerlerinde seçilmiştir. 8192 dilim alınmıştır.

Türk Hızlandırıcı Merkezi SASE SEL Tesisi kapsamında yapılan modelleme çalışmalarında Genesis 1.3 Kod'u kullanarak doyum gücü  $1.3977 \cdot 10^9 \text{ W}$  ve doyum uzunluğu  $21.48 \text{ m}$

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

değerinde elde edilmiştir. Bu durum başta belirtilen  $GW$  mertebesinde çıkış gücü beklentimizle uyuşmaktadır.

Aşağıdaki ilk iki şekil (Şekil 4.7 ve 4.8) Genesis'in çıktılarından güç ve enerjinin undulatör içerisindeki değişimini göstermektedir. Genesis 1.3 Kod'u kullanılarak, pondoramative fazı (tek bir özel dilim için), ışımanın artma ve büyüme oranı, "growth of bunching" (akım profili), ışınma büyüklüğü (foton demet büyüklüğü) özellikleri Şekil 4.9'da (a), (b), (c) ve (d)'de gösterilmektedir.



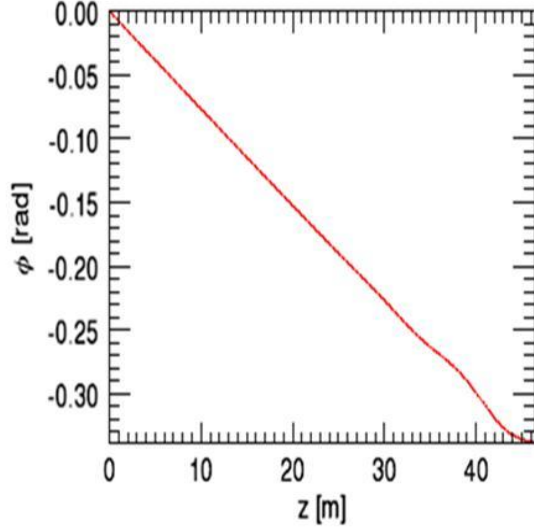
Şekil 4.7. Demet gücü-boylamsal demet yolu Şekil 4.8. Demet enerjisi-boylamsal demet yolu

Dikey ve yatay doğrultuda yayılım şekilleri de  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  olarak Şekil 4.10'de (a ve b) görülmektedir. Şekillerden de görüleceği üzere elde edilen lazerin gücü  $GW$  mertebesine yaklaşırken elektron demetinin enerjisi de orantılı şekilde azalmaktadır çünkü elektron demetleri enerjisini ortaya çıkan ışınım (lazere) aktarmaktadır. Şekil 4.9, (c)'de lazer oluşumunun gelişimi, artması ve ilerlemesi de görsel olarak lazerin oluştuğunun kanıtını sunmaktadır.

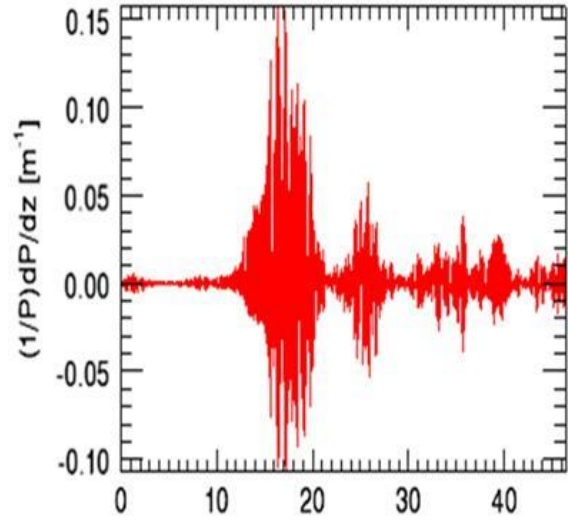
Pondoramative fazı, homojen olmayan salınımlardan gelen katkıyı vermektedir. Demetin, içerisinde çevresel birçok etkenden dolayı ortaya çıkan inhomogen sürücüyle deneyimlenen

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

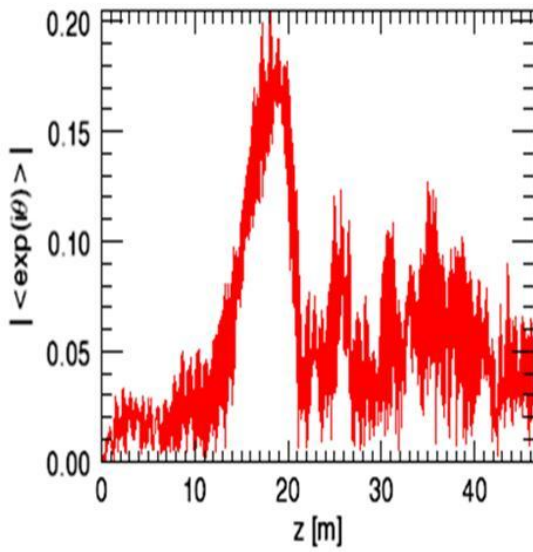
salınımlarını ifade eder.



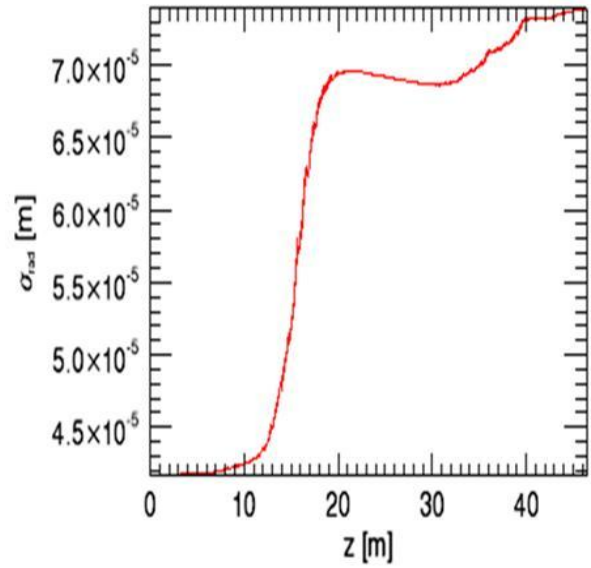
(a)



(b)



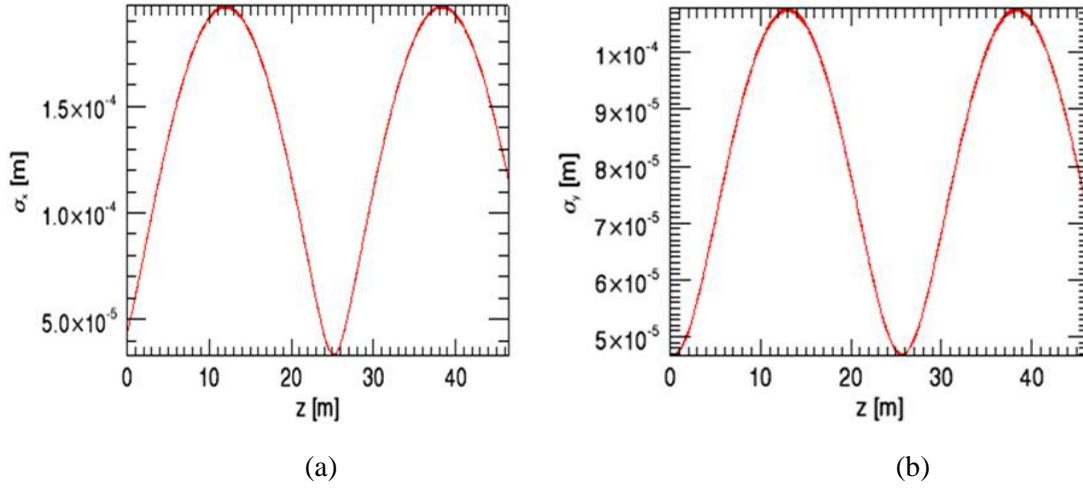
(c)



(d)

Şekil 4.9. Elde edilen lazerin pondoramative fazı (tek bir özel dilim için), ışımının artma ve büyüme oranı, akım profili, ışıma büyüklüğü (foton demet büyüklüğü)

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



Şekil 4.10. Demetin sırasıyla a) x ve b) y yönündeki yayılımı

### 4.3.1 SASE-SEL Parametrelerinin Analitik Tanımı

THM SASE SEL Tesisi için çıkış lazeri parametreleri (Pierce parametresi, 1 ve 3 boyutta kazanç uzunluğu, doyum gücü, lazer gücü, Rayleigh uzunluğu, doyum uzunluğu, vb.) analitik olarak aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanır.

SEL kalite faktörü:

$$q = (\gamma F_1)^{\frac{1}{3}}$$

burada  $\gamma$  Lorentz faktörü,  $F_1$  ise:

$$F_1(K) = \frac{K^2}{(1 + K^2/2)^2} \left[ J_0 \left( \frac{K^2/4}{(1 + K^2/2)} \right) - J_1 \left( \frac{K^2/4}{(1 + K^2/2)} \right) \right]^2$$

şeklinde Bessel Fonksiyonlarının sıfıncı ve birinci değeriyle ve undulatör K şiddet parametresi ile ifade edilen bir fonksiyondur.

Undulatör şiddet faktörü:

$$K = 0.934 \lambda_u a \text{Exp} \left[ b \frac{g}{\lambda_u} + c \left( \frac{g}{\lambda_u} \right)^2 \right]$$

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Lazer dalgaboyu:

$$\lambda_{FEL} = \frac{\lambda_u}{2 \gamma^2} \left\{ 1 + \frac{\left[ 0.934 \lambda_u a \text{Exp} \left[ b \frac{g}{\lambda_u} + c \left( \frac{g}{\lambda_u} \right)^2 \right] \right]^2}{2} \right\}$$

Undulatör şiddet parametresini, Lorentz faktörünü ve undulatör dalgaboyunu kullanarak THM SASE SEL Tesisi dalgaboyunu elde edebiliriz. SEL dalgaboyunda  $a$ ,  $b$  ve  $c$  sabit değerlerdir ve yukarıdaki serbest elektron lazeri dalgaboyu denkleminde  $a = 3.381$ ,  $b = 4.73$  ve  $c = 1.198$  alınabilir [1].

Yüksek kazanç SEL’de önemli boyutsuz Pierce parametresi şu şekilde tanımlanır:

$$\rho = \left[ \frac{\gamma (\lambda_{FEL})^2 r_e n_e}{8 \pi} \frac{K^2}{(1 + K^2/2)^2} \left[ J_0 \left( \frac{K^2/4}{(1 + K^2/2)} \right) - J_1 \left( \frac{K^2/4}{(1 + K^2/2)} \right) \right]^2 \right]^{\frac{1}{3}}$$

Burada  $\gamma$  Lorentz faktör,  $\lambda_{FEL}$  lazer dalgaboyu,  $r_e$  klasik elektron yarıçapı ( $\approx 2.82 \text{ fm}$ ),  $n_e$  elektron yoğunluğu,  $K$  undulatör şiddet parametresi,  $J_0$  sıfırıncı derece Bessel fonksiyonu, ve  $J_1$  birinci derece Bessel fonksiyonudur.

Pierce parametresi,  $\rho$ , SASE-SEL’in çıkış verimini belirler.

1 boyutta doyum gücü ve kazanç uzunluğu,

$$P_{sat} \approx \rho P_{beam} = 1.6 \rho \left( \frac{L_{G,1D}}{L_{G,3D}} \right)^2 P_{beam}$$

ve

$$L_{G,1D} = \frac{\lambda_u}{4\pi\sqrt{3}\rho}$$



## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Burada demetin gücü  $P_{beam}[TW \text{ or } GW] = E_0[GeV]I_p[kA]$  şeklinde verilir.

Doyum uzunluğu, doyum gücü ve 1 boyutta kazanç uzunluğu ile verilir ki bu Pierce parametresi ile ilişkilidir:

$$L_{sat} = L_{G,1D} \ln\left(\frac{P_{sat}}{\alpha P_n}\right)$$

Evrensel skala fonksiyonu (Universal scaling function), 3 boyutta kazanç uzunluğunu elde etmek için kullanılır:

$$L_{G,3D} = (1 + \eta)L_{G,1D}$$

3 boyutta kazanç uzunluğu,

$$\eta = a_1 \eta_d^{a_2} + a_3 \eta_\epsilon^{a_4} + a_5 \eta_\gamma^{a_6} + a_7 \eta_\epsilon^{a_9} + a_{10} \eta_d^{a_{11}} \eta_\gamma^{a_{12}} + a_{13} \eta_d^{a_{14}} \eta_\epsilon^{a_{15}} + a_{16} \eta_d^{a_{17}} \eta_\epsilon^{a_{18}} \eta_\gamma^{a_{19}}$$

Burada

$\eta_d = L_{G,1D}/L_R$  kırınım yüzünden kazanç azalması ( 3 boyutta uzaysal etki)

$\eta_\epsilon = 4\pi\epsilon L_{G,1D}/\beta\lambda_{FEL}$  yayınım yüzünden elektronların boylamsal hız dağılımına bağlı kazanç azalması

$\eta_\gamma = 4\pi\sigma_d L_{G,1D}/\lambda_u E_0$  yayınım yüzünden elektronların boylamsal enerji dağılımına bağlı kazanç azalması

Evrensel skala fonksiyonu:  $F(\eta_d, \eta_\epsilon, \eta_\gamma) = 1/(1 + \eta)$

M. Xie Modeli'ne göre [4], [5], bazı terimler:

$P_n = \rho^2 c E_0 / \lambda_{FEL}$  Etkili giriş gürültü gücü

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

$$P = \alpha P_n \text{Exp}(z/L_{G,1D}) \quad \text{lazer gücü, burada } \alpha = 1/9$$

$$L_R = 4\pi\sigma_z^2/\lambda_{FEL} \quad \text{Rayleigh uzunluğu olarak verilir.}$$

Astra, Elegant ve Genesis Kodları M. Xie Modeli üzerine dayanır.

### 4.3.2 SASE-SEL'in Işımm özellikleri

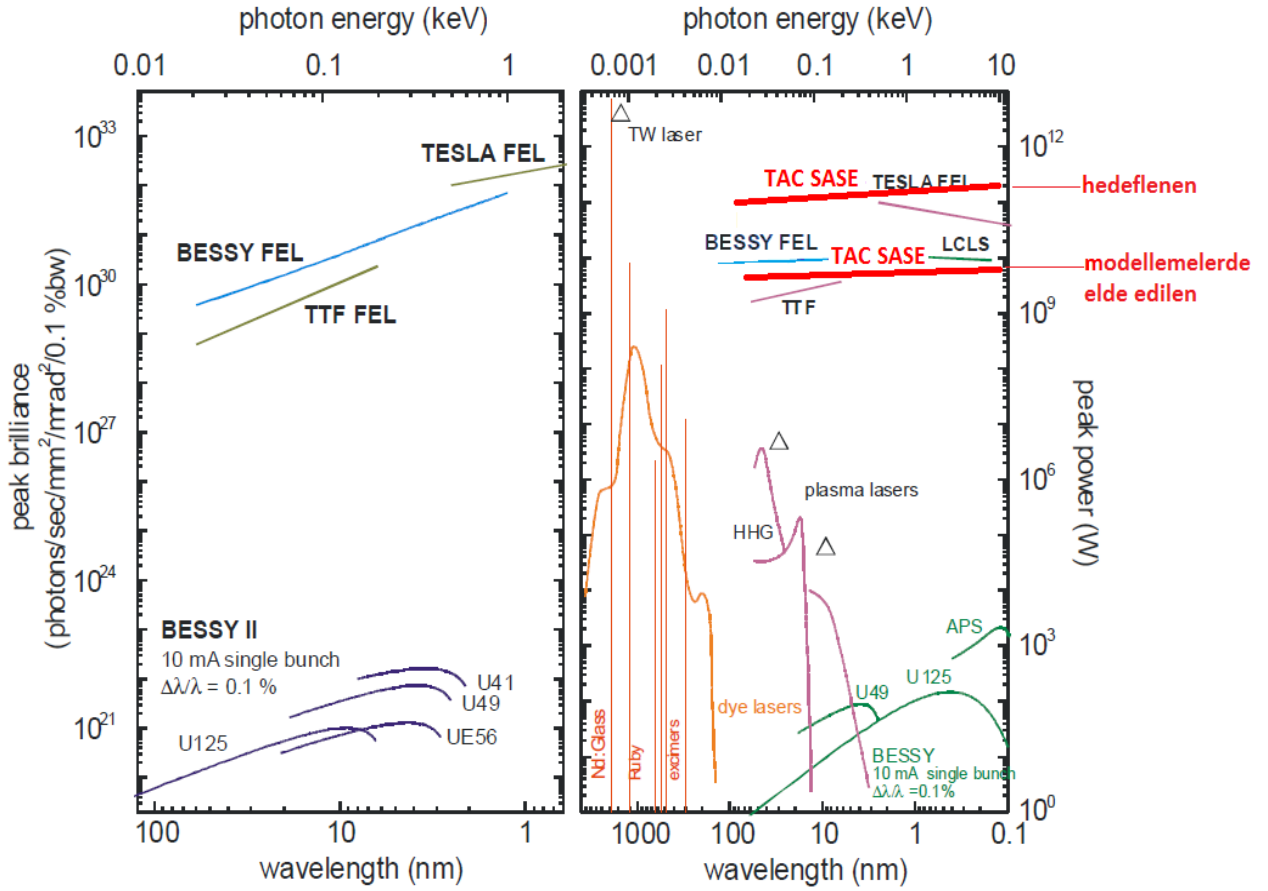
THM SASE SEL Projesi kapsamında salındırıcı kısmı için yapılan modelleme çalışmaları ve analitik hesaplamalar sonrasında elde edilen çıkış lazerinin özellikleri aşağıdaki tabloda görülmektedir.

THM SASE SEL Tesisinde elde edilmesi beklenen lazer ışınının doyum gücünün GW mertebesinde ve pik parlaklığında minimum  $10^{30}$  (foton/s/mrad<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>/0.1%bw) değerinde olması öngörülmektedir. Bu değerler Dünya Laboratuvarlarında Şekil 4.11'de gösterilmektedir. Ülkemizin SASE SEL Tesisi için öngörülen değerlerine göre şekil incelenebilir.

Tablo 4.5. SASE-SEL'in özellikleri

Parametre	Değeri
Doyum gücü (GW)	$\sim 1.4 \times 10^9$
Doyum uzunluğu (m)	21.48
Dalgaboyu bölgesi (nm)	0.1 – 100
Pik parlaklık (foton/s/mrad <sup>2</sup> /mm <sup>2</sup> /0.1%bw)	$\geq 10^{30}$

THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



Şekil 4.11. Dünya Laboratuvarlarında pik parlaklığına göre lazer dalgaboyu, pik gücü ve foton enerjisinin değişimi

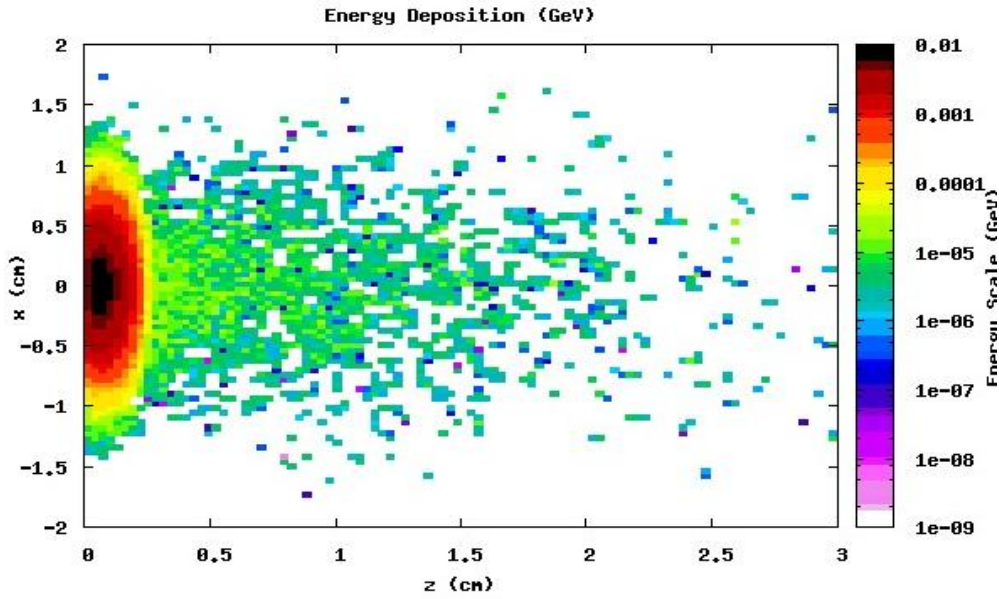
#### 4.4 Demetin Dışarı Alınması (Beam Dump)

Elektron demetinin, tabanca ve ana hızlandırıcı çıkışından sonra olmak üzere 2 kısımdan dışarı alınması ve özelliklerinin ölçülmesi modellenmiştir. Modellemeler FLUKA ile yapılmıştır. Tabanca çıkışında elektron demetinin yükü, enerjisi ve bıraktığı enerjinin eşdeğer dozunu ölçmek için çıkışta demetler hedefe çarptırılmaktadır.

Bu rapor kapsamında yapılan modellemelerde, hedefte elektron demetlerini durdurmak için özel bir sistem olan Faraday Cup kullanılmaktadır. Faraday Cup sisteminde malzemenin sığası belli ve Faraday Cup'ta osiloskoba bağlı gerilim pikleri ölçülmektedir. Sığa ve gerilimden demetin

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

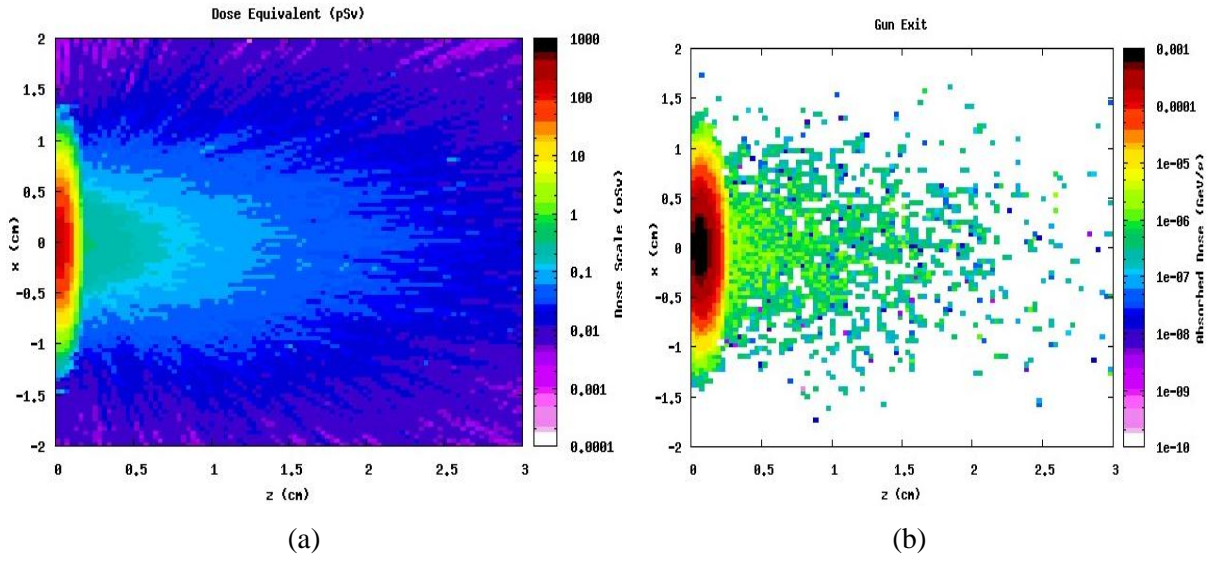
yükü ve akımı bulunabilmektedir. Amaç demetin durdurulmasıdır. Aşağıda tabanca çıkışında demeti durdurmak için x eksenine boyunca çapı, yatay ekseninde uzunluğu verecek şekilde silindirik bir yapı öngörüyoruz. Silindirin hacmi  $\pi \times 2^2 \times 3$  olacak şekilde  $12 \text{ cm}^3$  değerindedir.



Şekil 4.12. Tabanca çıkışında Faraday Cup içerisinde elektron demetinin enerji dağılımı

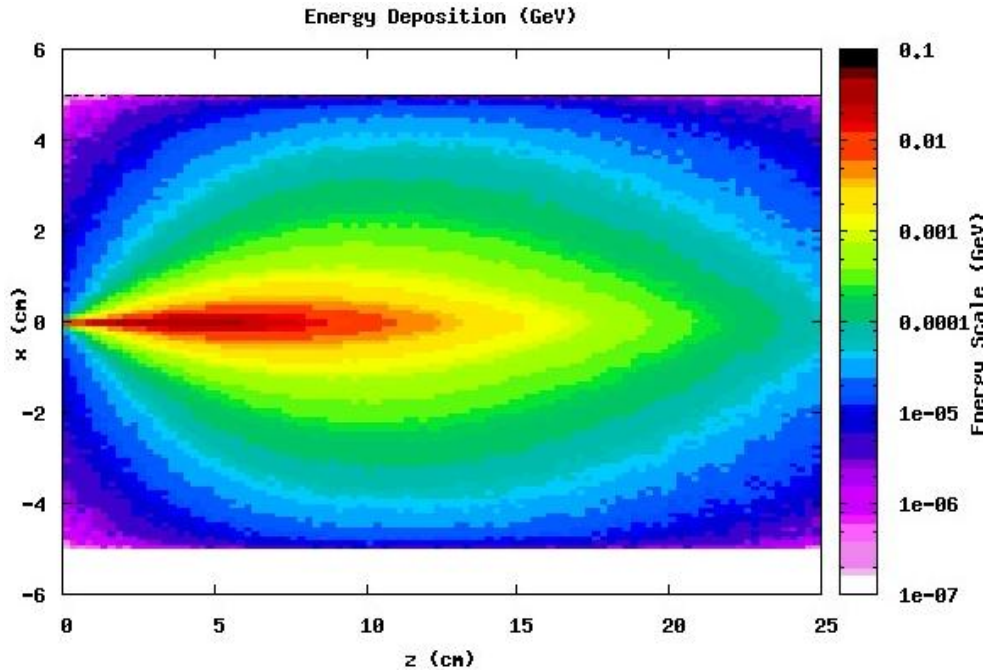
Burada elektron demetinin yüksek enerjiye sahip parçacıkları ilk 0.4 cm'ye kadar bakırdan yapılmış silindirik yapı içerisinde enerjilerini kaybetmektedirler. Demetteki parçacıkların enerji kaybedişleri çok belirgin şekilde görülmektedir. Bu kaybedilen enerjiden sonra açığa çıkan eşdeğer dozu ve emilen dozu (her bir kütlede tutulan enerji değeri) ise aşağıdaki şekillerde sırasıyla görülmektedir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



Şekil 4.13. Enerji kaybindan sonra açığa çıkan elektron demetinin a) emilen ve b) eşdeğer dozu

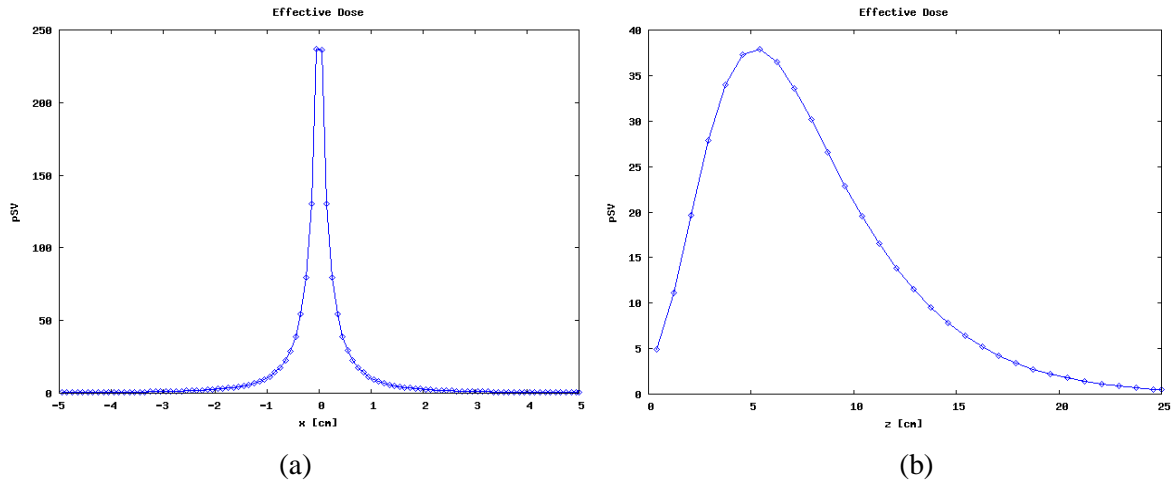
Ana hızlandırıcı kısımdan sonra ulaşılan 1.689 GeV'lik enerji değerinde yük, akım, enerji ve radyasyon düzeyini ölçmek için kullanılan demet durdurucu silindir (Beam dump cylinder) modellerinde demeti ancak durdurabilecek şekilde daha büyük seçilmiştir.



Şekil 4.14. Ana hızlandırıcı sonrası demet durdurucu yapıdaki demetin enerji dağılımı

Silindirin yarıçapı 5 cm (enine eksen tüm silindir çapını vermektedir) ve boyu ise 25 cm seçildiğinde yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi demet ancak durdurulabilmektedir.

Ana hızlandırıcı sonrasında demetin hedefe çarptırılmasındaki etkin dozun silindirin çapına ve uzunluğuna göre iki boyutta değişimi aşağıdaki şekillerde verilmektedir.



Şekil 4.15. Etkin dozun, silindirin a) çapına ve b) uzunluğuna göre değişimi

Durdurucu materyal olarak modellemelerde bakır kullanılmıştır. Zırhlama için ise kurşun kullanılmıştır. Kurşun ikincil parçacıkların ortaya çıkışını durdurmada etkindir. Kurşunun karakteristik özellikleri, yüksek yoğunluklu, yumuşak, biçimlenebilir ve dövülebilir olması, diğer metallerle kıyasla zayıf elektriksel iletkenliğe sahip olması, yüksek paslanma direnci olması ve organik kimyasallarla reaksiyona girebilmesidir.

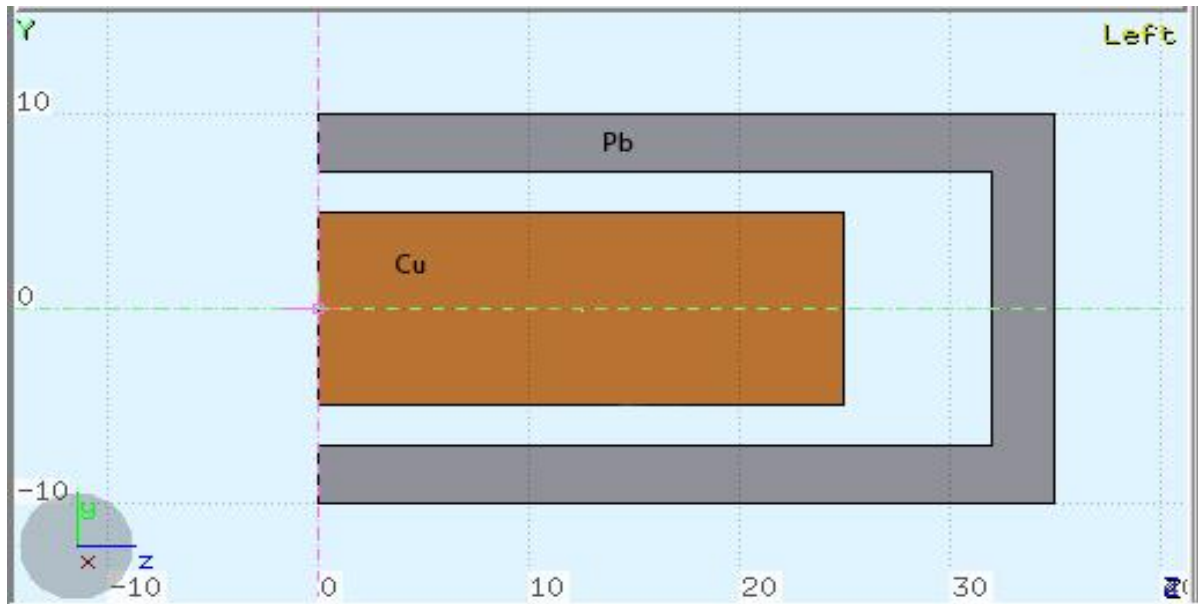
THM SASE-SEL Proje çalışmaları kapsamında yapılan çalışmalarda durdurucu malzeme olarak bakır seçilmiştir.

#### 4.4.1 Zırhlama

THM SASE SEL Tesisinde enerjisi azalan elektron demetlerinin sistemden dışarı alınması ve özel bir yapı içerisine hapsedilmesine zırhlama denilmektedir.

Uluslararası laboratuarlarda yapılan çeşitli çalışmalarda zırhlama için kurşun, karbon, berilyum, aliminyum kullanıldığı görülmüştür. Karbon ısıya dayanıklı fakat zırhlama ve enerji emmesi daha düşüktür, ve maliyeti ucuzdur. Eğer demet çok yoğun değilse ve yüksek enerjili değilse karbon kullanılabilir. Berilyum, pahalı fakat ısıya dayanıklıdır, erime noktası yüksektir. Nötron kazancı fazladır yani çok sayıda nötron açığa çıkmaktadır. Kurşun, fazla ısıya dayanıksızdır, erime noktası düşüktür, fakat ucuzdur.

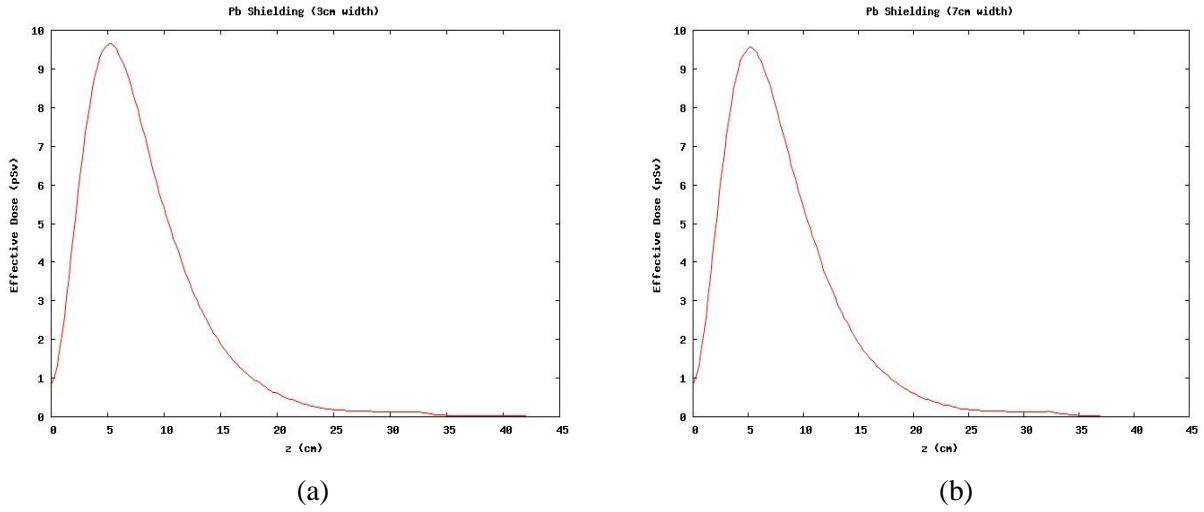
THM SASE SEL Tesisi kapsamında yapılan çalışmalarda zırhlayıcı malzeme olarak kurşun seçilmiştir. Seçilen malzemenin şekli aşağıda görülmektedir.



Şekil 4.16. 1.7 GeV'lik enerjili elektron demetlerini durdurucu yapı ve dış zırhlaması

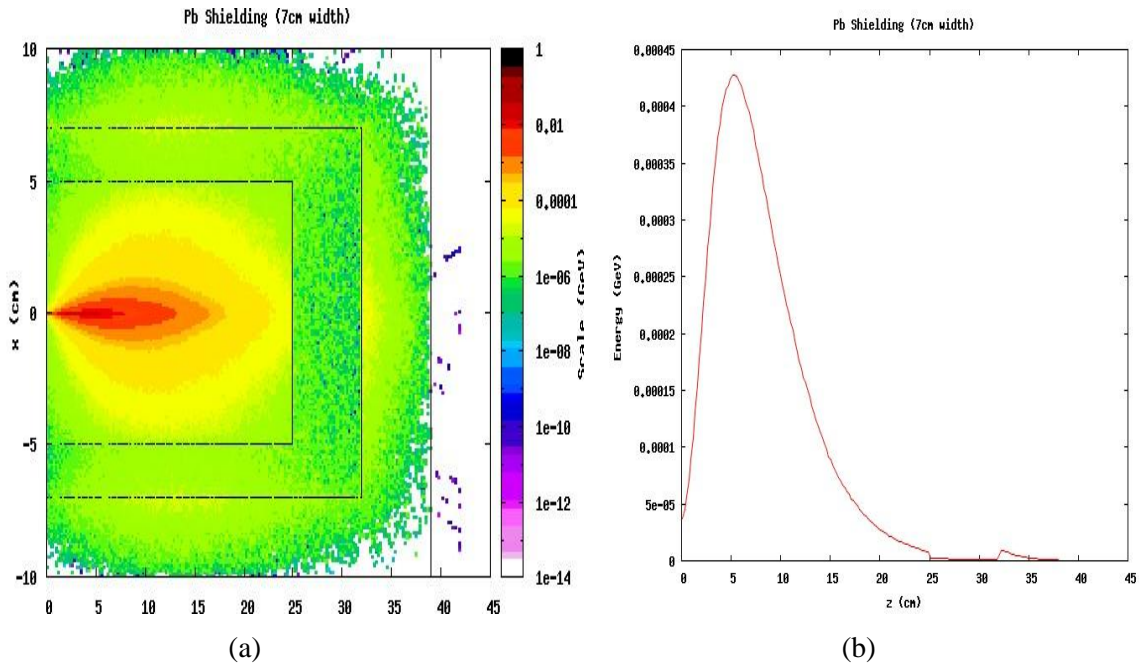
Kurşun ile zırhlama yapıldıktan sonra bu zırhlamanın kalınlıkları 3 cm ve 7 cm seçilerek enerji emilmesi aşağıda gösterilmiştir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



Şekil 4.17. Etkin doz a) 3 cm zırh kalınlığı, b) 7 cm zırh kalınlığı için

Buradan, 3 cm için 9.80 pSv, 7 cm için 9.55 pSv elde edilmiştir. Dolayısıyla 7 cm için etkin doz değeri daha düşük olduğundan tercih edilen zırh kalınlığı olacaktır.



Şekil 4.18. a) 7 cm zırhlama sonrasında elektron demetinin durdurulması, b) Silindirin uzunluğuna göre demet enerjisinin değişimi



## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Radyasyonu durdurmak için 7 cm kalınlık yeterlidir. İçteki yüksek enerjili elektronları içeren kısım bakırdan, dıştaki düşük enerjili elektron demetlerinin durdurulabildiği 7 cm'lik kalınlıkta kurşun zırhlaması vardır ve elektronları durdurmak için yeterli olduğu görülmüştür.

Bakır durdurucu materyalin dışına 7 cm'lik kurşun zırhlama yerleştirildiğinde elektron demetinin durdurulmasının modellenmesi ve sırasıyla enerjinin silindirin uzunluğuna göre değişimi yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Modelleme çalışmalarımızda ana hızlandırıcıdan sonra çok yüksek değerlere ulaşan ışınım düzeyi de (gama ve X ışınlarından kaynaklanan) çalışılmıştır. Çeşitli sayıda zırhlama kalınlıkları çalışılmıştır, dolayısıyla 7 cm uzunluğunun ışınımı durdurmak için yeterli olduğuna karar kıldık. Ayrıca, bütün foton veriminin (gama ve X - ışınları) ana hızlandırıcının bitiminde çok daha fazla seviyede olduğu görülmüştür.

### 4.5 Gelecekte Yapılabilecek Olası Genişletmeler ve İlave Donanımlar

Türk Hızlandırıcı Merkezi SASE SEL Tesisi çalışmaya başladıktan sonra daha çok elektron demet enerjisi, daha fazla çıkış lazer gücü ve daha düşük dalgaboyu beklentisi sürekli olacaktır. Bu sebeple elektron demetlerinin hızlandırıldığı kısım olana kaviterler için ileride kullanılmak üzere boş yer bırakılması gerekir. Undulatör bölümünde de ek yer bırakılması ileriki yıllarda undulatör öncesi ek sürücü lazerlerin (High Harmonic Generation-HHG, High Gain Harmonic Generation-HGHG, Equal Enabled Generation-EEG sistemlerinin kullanılabilmesi için) kullanılarak daha güçlü çıkış lazeri elde edilmesine imkan verecektir.

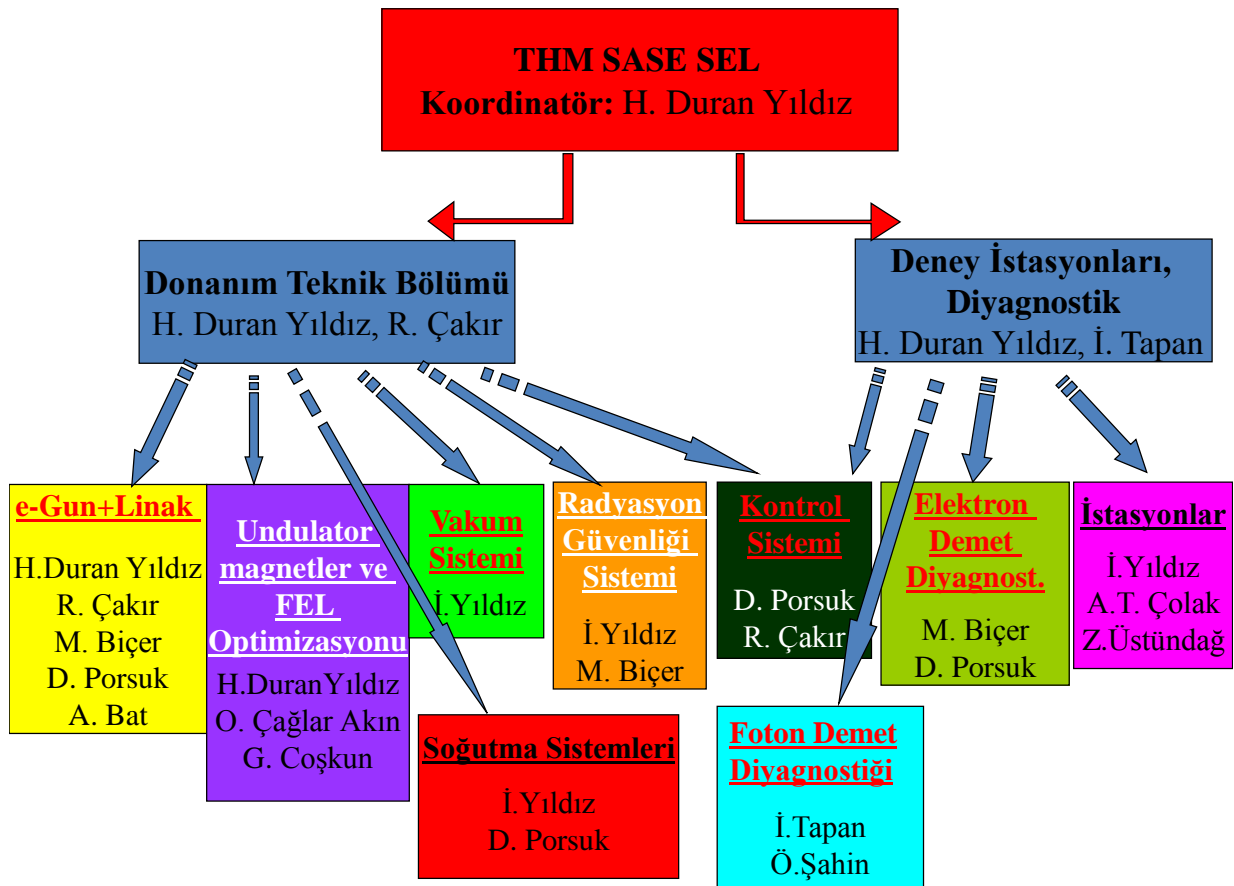
### 4.6 İnsan Gücü ve Maliyet Gereksinimlerinin Özeti

1-3 Milyar Elektron Volt (GeV) elektron hızlandırıcısına dayalı olarak Ultraviyole ve yumuşak X-ışınları bölgesinde (1-100 nm) SASE moda yüksek güçlü, parlaklıklı ve çok kısa (ps) atma uzunluklu Serbest Elektron Lazeri demetleri ile disiplinlerarası Ar-Ge ve Teknoloji geliştirme çalışmaları yapmayı mümkün kılacak olan tesis Dünyadaki X-SEL tesisleri arasında önemli bir yere sahip olacaktır. THM SASE-SEL ülkemiz ve bölgemizdeki ilk X-SEL tesisi olacaktır.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Bu güne kadar (2006-2015) yürütülen Türk Hızlandırıcı Merkezi SASE SEL çalışmalarında 8 farklı üniversiteden (Ankara Üniversitesi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Osmangazi, Dumlupınar, Uludağ, Fatih, Recep Tayyip, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi) 11 araştırmacının katılımı ile Ankara Üniversitesi, Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsünden Doç.Dr. Hatice DURAN YILDIZ'ın koordinatörlüğünde yürütülmüştür. Proje çalışanları ve çalıştıkları alt bölümler aşağıdaki organizasyon şemasında görülmektedir.

Yapılan ve yapılacak çalışmalar Donanım, Teknik-Tasarım ve Deney İstasyonları-Diyagnostik şeklinde iki ana bölüm altında incelenecektir. Donanım bölümü altında sistemin teknik dizaynı, tasarımı, modelleme çalışmalarının tamamı girmektedir. Bu bölüm tamamlandıktan sonra foton demet diyagnostiği ve deney istasyonlarının dizayn çalışmaları ağırlık kazanacaktır.



Şekil 4.19. Proje üyeleri ve alt çalışma alanları

Tesisin projelendirme ve kurulum yo haritası ve önümüzdeki yıllardaki maliyet öngörüsü aşağıdaki tabloda verilmektedir.

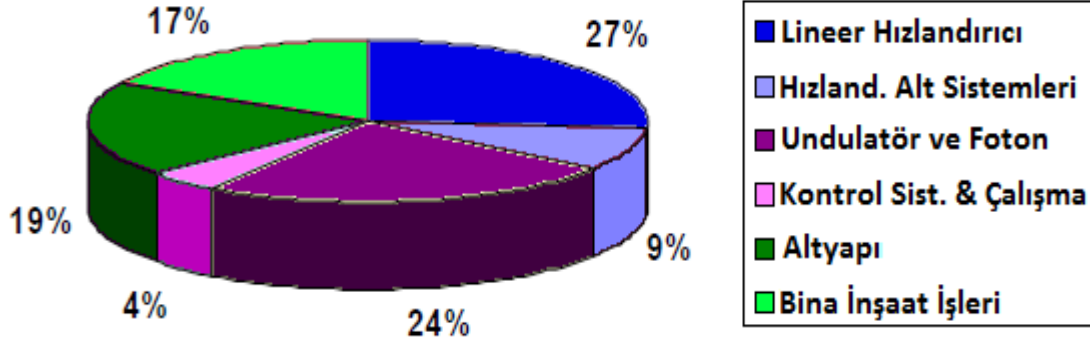
Tablo 4.6. Tesisin Projelendirme ve Kurulum Yol Haritası ve Maliyet Öngörüsü

Hedefler ve Maliyet	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
İçerik Tasarımı Raporu	0.1	0.5											
Teknik Tasarım Raporu			0.5	1	1	2							
Kurulum							20	100	100	200	200	100	
İşletim													30
Maliyet (Milyon TL)	0.1	0.5	0.5	1	1	2	20	100	100	200	200	100	30

**Toplam Maliyet: 755.1 Milyon TL**

THM SASE SEL Tesisi'nin bina projelendirmeden başlayarak bina inşaat işleri, altyapı çalışmaları, kontrol sistemi programlarının oluşturulması ve tüm sistem dahilinde çalıştırılması, undulatörün satın alınması ve testlerinin yapılması, foton diyagnostik cihazlarının alınması ve kurulması, hızlandırıcı alt sistemlerinin alınması, kurulması, çalıştırılması ve sürekli çalışmasının sağlanması, lineer hızlandırıcı kaviteletin alınması, testlerinin yapılması ve ek-destekleyici sistemlerle (stiffener sistem, He soğutma sistemi, RF güç sistemleri gibi) bağlantılarının sağlanması gibi konuların bölümlerine göre gereksinim duyulacak orantılı miktar şu şekilde verilebilir:

THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



Şekil 4.20. THM SASE SEL Tesisinin bölümlerine ve ihtiyaç duyulan ek sistemlere göre harcanması gereken miktarların oranı

Serbest elektron lazeri tesisi için yıllara göre ihtiyaç duyulması öngörülen araştırmacı personel, teknisyen, mühendis, uzman, inşaat mühendisi, modellemeci ve deney odalarının ihtiyacı olan teknik kadro için personel ihtiyaç tablosu aşağıdaki verilmiştir.

Tablo 4.7. THM SASE-SEL Projesi kapsamında yıllara göre ihtiyaç duyulması öngörülen olası personel ihtiyacı

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
İhtiyaç duyulan kadrolu ve/veya sözleşmeli uzman personel sayısı	6	+3	+3	+5	+5	+5	+5	+30	+30	+30	+30	-

İhtiyaç duyulan kadrolu ve/veya sözleşmeli uzman personel sayısı: **152**

**Bina, sistem ve personel için verilen ihtiyaç tablosundan sonra sistem için kabaca yapılan fiyatlandırma analizi de şu şekilde verilebilir:**

## THM SASE SEL Tesisi Miktar Analizi

THM SASE SEL Laboratuvarı için yapılan kaba miktar analizinde, ortaya çıkan miktar hızlandırıcı kavitelerin yapısına, sayısına, electron demetinin lazer ile beslenip beslenmeyeceğine, electron demeti için hangi çeşit besleme seçileceğine, hangi dalgaboylarında lazer elde edileceğine, undulatör tipine, uzunluğuna ve deneysel uygulama odalarının fazlalığına bağlı olarak değişir.

SASE SEL Sisteminde kavite yapısını SC öngörüp minimum değerler göz önüne alınarak miktar analizi yapılmıştır.

### Superiletken Durum:

- Hızlandırıcılar – 115.0 milyon Euro
- Klystron – 15.0 milyon Euro
- Undulatörler – 75.0 milyon Euro
- Altyapı (radyasyon, telefon, internet) – 1.0 milyon Euro
- Magnetler (kuadrupol, dipol, sextupol) – 2.0 milyon Euro
- Foton Diyagnostiği – 2.0 milyon Euro
- Ana hızlandırıcı bölgesinde diyagnostik – 6.0 milyon Euro
- Laser diyagnostiği ve lazer transfer yolu – 1.0 milyon Euro
- Kameralar – 0.5 milyon Euro
- Optiksel Masalar + ... – 0.5 milyon Euro
- Katod transfer sistem – 1.0 milyon Euro
- Vakum Sistemi – 2 milyon Euro
- Kablolandırma (hareketli durumlar için ve diyagnostik için) – 2 milyon Euro

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

- Soğutma sistemi – 6 milyon Euro
- Elektron demetini besleme (Seeding, en teme ve en ucuz besleme seçildiğinde) – 7 milyon Euro
- Demetin dışarı alınması (Beam Dump) – 1.0 milyon Euro (diyagnostik olmadan)
- Elektron demet diyagnostiği – 3.2 milyon Euro
- Klimalandırma – 2 milyon Euro
- Kablo taşıyıcı – 4 milyon Euro
- Krane – 6 milyon Euro
- Su pompaları – 1 milyon Euro
- Su Soğutma gücü – 1 milyon Euro
- Deneyler – 2 milyon Euro
- Deneysel Bölge - 6 milyon Euro
- Magnetler için güç sağlayıcılar (quads, kickers, dipoles) – 2 milyon Euro
- Tünel (Tek başına) – 6 milyon Euro

### **Toplam 270.2 milyon Euro tutmaktadır.**

- Kontrol + elektronik ve
- Elektron tabancası (özel diyagnostiğer ihtiyaç duyar) yukarıdaki toplama dahil edilmemiştir.

**Sürdürülebilirlik:** Yukarıdaki tablolarda ve hesaplamalarda belirtilen bütçe ve personel desteği, araştırmacı sağlanırsa Türk Hızlandırıcı Merkezi Kendiliğinden Genlik Artırmalı Serbest Elektron Lazeri (THM SASE SEL) Tesisi kurulabilecek ve verimli şekilde çalıştırılmaya başlanabilecektir.

**Kaynaklar:**

1. P. Elleaume *et al.* / NIM-A, 455, 2000, 503-523.
2. <http://www.esrf.eu/Accelerators/Groups/InsertionDevices/Software/Radia/Documentation/Introduction>
3. <http://genesis.web.psi.ch/> and [http://pbpl.physics.ucla.edu/Computing/Code\\_Overview/#genesis](http://pbpl.physics.ucla.edu/Computing/Code_Overview/#genesis)
4. SCSS X-FEL Conceptual Design Report (CDR), 2005.
5. M. Xie, Proceedings of PAC 1995, p.183.

## 5 THM SASE SEL TESİSİNİN DEMET HATLARI VE ARAŞTIRMA POTANSİYELİ

### 5.1 Giriş

Üretimi yapılacak kendiliğinden genlik artırımı serbest elektron lazerleri (SASE-SEL)'nin kullanıcılara verilmeden önce özelliklerinin belirlenmesi yani foton diyagnostik çalışmaları gerekmektedir. Işığın özelliklerinin kullanıcı tarafından tam olarak bilinmesi gerekir. Işığın özelliklerinin belli ve arzu edilen bir şekilde olması yapılacak bilimsel çalışmaların güvenilirliği açısından da önem arzeder.

### 5.2 Foton Demet Diyagnostikleri

SASE SEL foton diyagnostiği genel olarak iki tür ihtiyacı karşılamalıdır: bunlardan ilki her bir foton atmasının istenilen herhangi bir özelliğini belirlemek; ikincisi ise birçok atma üzerinden ortalama alarak, belirli bir özelliği taşıyanların kesrini ölçmek olarak verilebilir. SASE SEL'de foton diyagnostiği için herşey uzaktan kumandalı kontrol edilmektedir. Bununla birlikte diyagnostik araçlarının kontrolü bu konuda gerçekten tecrübeli uzmanlar tarafından yapılmalıdır.

Diyagnostik araçlar, ölçüm sırasında atmaların özelliklerini bozan veya demet hattı boyunca atmaları etkilemeyen yapıya sahip olabilirler. SASE SEL için atmalar arasındaki dalgalanmalar büyük olduğundan atmaları bozan diyagnostik araçlar demet hattında görüntüleme amaçlı kullanılamazlar; buna rağmen, makinenin çalışması esnasında deney istasyonuna gelen SASE SEL hakkında çeşitli bilgiler edinebilmek için demeti bozucu özellik taşıyan diyagnostik araçlara da ihtiyaç duyulmaktadır.

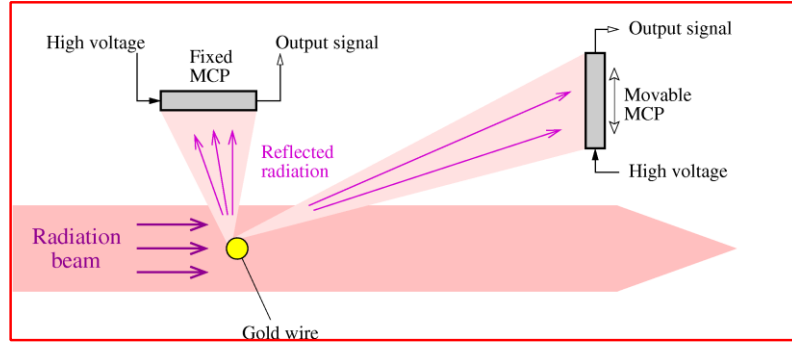
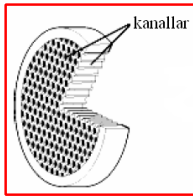
#### 5.2.1 Demet Özelliklerinin Belirlenmesi

**Şiddet:** Kendiliğinden yayılmadan, SASE SEL'in doyumuna ulaştığı bölgeye kadar olan şiddet değerlerini ölçebilmek için, **Gaz Monitör Detektörü (GMD)**, **Mikro Kanallı Düzlemsel Detektör (MCP)**, Pin Diyod ve Kalorimetre gibi detektörler kullanılabilir. Listedeki son iki detektörün



## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

çalışma aralığı diğerlerine kıyasla daha düşüktür ve bu tür detektörler kullanıcıların deneyleri ile doğrudan ilgili değildir; ancak, çapraz kalibrasyonlar için gereklidirler.



Şekil 5.1. MCP Dedektörü ve çalışma prensibi

Diğer yandan, MCP tabanlı detektörler  $10^7$  basamağında şiddet değerlerine kadar ölçüm yapabilirler ve SASE SEL optimizasyonunda sıklıkla kullanılırlar. Detektör 50  $\mu\text{m}$  çapında altın bir tel veya alternatif olarak altın tel örgü ağına sahiptir. Bu birim üzerine gelen SEL demetinin % 65'i iyi kalibre edilmiş bir MCP üzerine düşürülür. MCP için düşük kazanç bölgesinde çalışıldığında, MCP'ye uygulanan gerilim değerinden yararlanarak, kendiliğinden yayılmaya karşı SASE SEL'in kazancını belirlemek mümkündür. MCP tabanlı detektörleri çalışma aralığı bazı değişiklikler yaparak genişletilebilir. Örneğin, VUV bölgesinden X-ışınları bölgesine kadar uzanan bir aralığı tarayabilmek için:

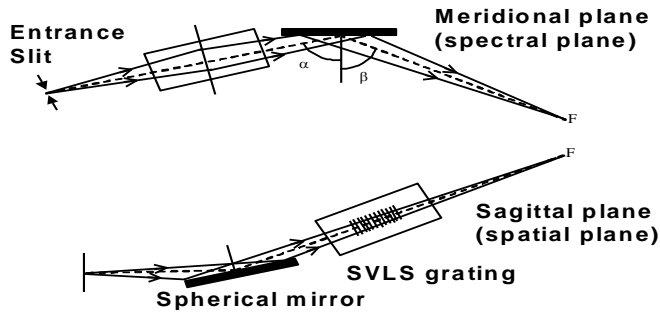
- Yüksek yansıtma gücüne sahip maddeler kullanılmalı;
- Detektörün geometrik yapısı küçük yansıma açıları ile optimize edilmelidir.

Bununla birlikte, tel veya tel örgü ağına ortaya çıkan kırınımlardan dolayı homojen olmayan bir şiddet dağılımı oluşur. Bu nedenle, kullanıcı deneyleri yapılırken, şiddeti demet hattında görüntülemek için MCP tabanlı detektörleri kullanmak uygun değildir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

**Spektral özellikler:** SASE SEL sürecinin ve kullanıcı deneylerinin optimizasyonu ilgili bilgiler edinebilmek için foton demetinin spektral özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Bu özellikler, SEL demetinin bant genişliğini ve yüksek harmoniklerin içeriğini saptamakta kullanılabilir. Ayrıca, spektral dağılım ile atma içindeki modların sayısı tespit edilebilir ve atma uzunluğu tahmin edilebilir.

THM SASE SEL Tesisinin spektral yapısını belirlemek için FLASH (DESY) laboratuvarında geliştirilen ve VLS (Varied-Line-Spacing) ızgarası olarak isimlendirilen spektrometre kullanılabilir.



Şekil 5.2. VLS Spektrometresi ve çalışma prensibi

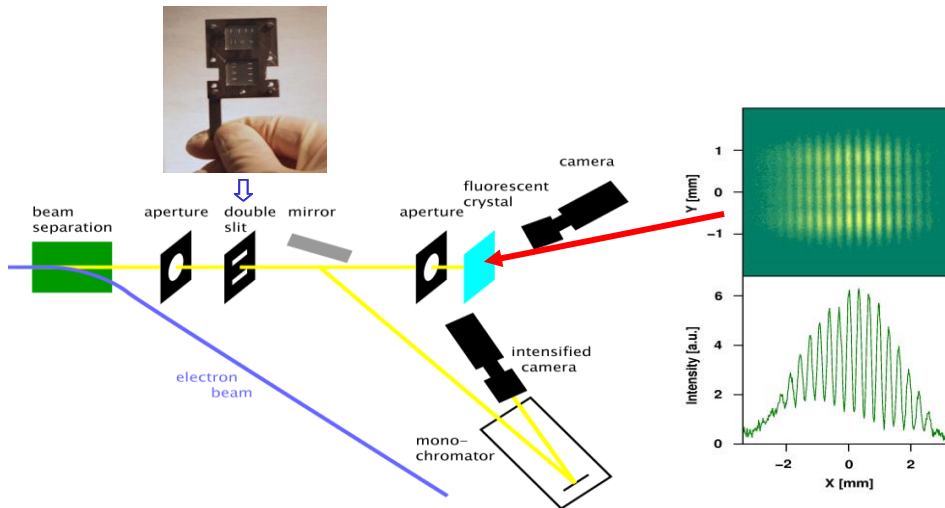
VLS spektrometre ile gelen ışığın sadece %5'i ölçüm yapmak üzere kullandığından, lazerin çok büyük bir kısmı yapılan deneye yansıtılabilmektedir. VLS ile yansıtılan ve odaklanan ışık, 2 derecelik bir açıyla yerleştirilen ızgara üzerine düşürülerek yaklaşık 2m uzaklıkta bulunan bir CCD kameraya gönderilir. CCD kamera bir fosfor ekrana gönderilen atmanın spektrumunu kaydeder. Izgaranın hatları arasındaki boşluğun ayarlanması ile SASE SEL'in UV'den yumuşak X-ışınları bölgesine kadar olan spektral aralığı başarı ile taramak mümkündür.

**Not:** FLASH laboratuvarında kullanılan VLS tabanlı detektörün çalışma bölgesi THM SASE SEL için planladığımız spektral aralığa karşılık gelmektedir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

UV bölgeye düşen soft X-ışınlarını görünüre dönüştürmek için özel kameralar kullanılmaktadır. Lazer ışınım pulsları Ce:YAG ve PbWO<sub>4</sub> kristalleri üzerine düşürülerek çıplak gözle gözlemlenebilmektedir. Lazer ışığının experiment hall'e gelip gelmediğini anlayabilmek için bu kristallerle birçok deney yapılmıştır. Aşağıdaki şekilde bir "Double slit diffraction patterns" sisteminin çalışma prensibi ve bir floransans kristalden elde edilen görüntü görülmektedir.

Şekilde de görüldüğü gibi saptırılan SEL radyasyonunun spektrumunu gözlemek için UV bölgede çalışan CCD ve ICCD kameralara ihtiyaç duyulmaktadır (bu arada CCD kameraların fiyatının 5000-6000 € civarında iken, bir ICCD kameranın fiyatı bunun yaklaşık on katı yani 60000€ civarında olduğunu vurgulamak gerekir).



Şekil 5.3. CCD Kamera ve çalışma prensibi

İki atma (puls) aralığının minimum değeri CCD kameranın okuma zamanı (readout time) olan 8s ile sınırlıdır. Bu sınırlamanın üstesinden gelmek için CCD kamera yerine şiddetlendirilmiş (intensified) CCD kamera kullanılmaktadır. ICCD kameranın okuma süresi 125 ms'dir ve monokromatörün odaklama düzleminde bir floransans ekran kullanılmaktadır (P46; yarılanma ömrü (1/e): 140 ns).

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

2 keV'lik enerjilerin üstüne çıkılmak istenirse spektral dağılımı belirlemek için VLS spektrometre yetersiz kalacağından daha farklı yapılar kullanılması gerekir. Bu konuyla ilgili yakın zamanda iki alternatif spektrometre tasarlanmıştır:

a) DESY XFEL laboratuvarında,  $^{28}\text{Si}$ , elmas gibi kristallerin bir atma treninin varlığında ısınarak şekil değişikliğine uğraması esasına dayalı çalışan spektrometrelerin kullanılması planlanmaktadır;

b) Kristal spektrometreler gelen SASE-SEL ışığına zarar vereceğinden ikinci bir opsiyon olarak, soy gazların foto-iyonlaşma ve foto-elektron spektrumu ile ölçüm yapılması da düşünülmektedir.

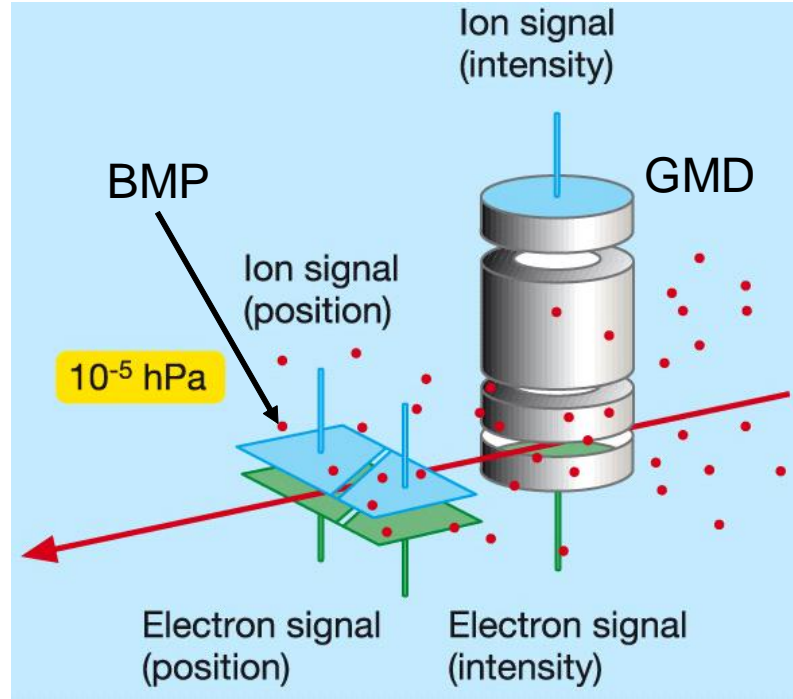
**Odaklama:** Yüksek-alan fiziği deneylerinde, foton demetinin mikron veya daha küçük mertebede bir noktaya odaklanması gerekmektedir. Deneylerde kullanılan SASE-SEL'in konumdaki dalgalanmalar hedeflenen odaklama değerinden sapmaya neden olur; bu da istenilen noktanın büyüklüğünü şeklini büyüklüğünü değiştirir. Odaklanan demetin özelliklerinin belirlenmesi, sadece elde edilen güç yoğunluğunun saptanması için değil, aynı zamanda odaklama sisteminin ayarlanması için de kaçınılmaz bir ihtiyaçtır.

Bıçak-sırtı (veya tarayıcı tel) ve floransan ekran gibi geleneksel yöntemler ile ancak 1-2  $\mu\text{m}$  mertebesinde bir konumsal çözünürlüğe ulaşılabilir. Fakat ölçüm sırasında demetin zarar görmesi nedeniyle, bu tür teknikler kullanılarak 1 $\mu\text{m}$ 'nin altında odaklama değerlerine inilememektedir. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için iki teknik öne sürülmüş ve her ikisi de FLASH laboratuvarının ikinci demet hattında başarı ile uygulanmıştır:

- a) Bir sonraki konuda ayrıntılarıyla anlatılacak olan birinci teknik, dalga cephesi ölçümlerine dayanır;
- b) Diğer teknik ise bir soy gazın foto-iyonlaşması sırasında ürün olarak ortaya çıkan iyonların doyuma ulaştırılması ilkesine göre çalışır (GMD). Herhangi bir atmada yer alan fotonlar daha küçük bir hacme sıkıştırıldığında, ortamda bulunan soy gaz atomlarının (hedef) fotonlarla etkileşme yapma olasılığı azalır; böylece oluşan iyonların sayısı detektör ortamına giren fotonların sayısından bağımsız olur. Başka bir ifadeyle iyonlar için bir doyum bölgesine

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

ulaşılır; bu etki (doyum), demetin hacmi (veya tesir kesiti) küçüldükçe daha çabuk ortaya çıkan bir fiziksel süreçtir. Kısaca, GMD detektörü ile atmanın enerjisi ölçülerek, demetin odaklanma büyüklüğünü  $1\mu\text{m}$  ve daha alt değerler için belirlemek mümkündür.



Şekil 5.4. GMD ve BMP

**Dalga cephesi ölçümü:** Deneylerin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi, koherent SASE SEL'in dalga cephesinin kalitesi ile yakından ilintilidir. Çarpık (veya bozuk) bir dalga cephesi örneğin, faz netliğine ihtiyaç duyulan görüntüleme deneylerinin çözünürlüğünü veya yüksek alan deneylerinde odaklamanın zayıflamasına neden olarak deneye ulaşan SASE SEL'in şiddetini azaltabilir.

Dalga cephesini, VUV bölgesinden X-ışınları bölgesine kadar olan aralıkta, ölçebilmek için Shack-Hartmann sensörleri veya interferometre kullanılabilir:

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

a) Spektrumun görünür bölge kısmında Shack-Hartmann sensörleri kullanılabilir. Aynı odak uzaklığına sahip bir lens dizisi dalga cephesi tarafından aydınlatılır ve dizi bir CCD sensör üzerine odaklanır. Dalga cephesinin her bir lens üzerindeki yerel eğriliği, sanal odak noktasından bir sapmaya yol açar. Cephenin faz yanılması yerel eğrilere yaklaştırılır; böylece lenslerde ölçülen eğrilikler ile gerçek dalga cephesini saptanabilir. Bu tekniği X-ışınları bölgesinde de kullanmak için lenslerin odak uzaklığını kısaltmak pratik bir çözüm değildir. Bu nedenle, üzerinde bir dizi delik bulunan Shack-Hartmann sensörleri kullanmak gerekir.

b) X-ışınlarının dalga cephesini bölmek zor olduğundan bir interferometreden yararlanılabilir. Cihaz, demet bölücü olarak kullanılan faz ızgarası ve detektör için iletim maskesi olarak işlev gören bir soğurma ızgarasından oluşur. Detektör, birkaç  $\mu\text{m}$ 'lik enine çözünürlükle onlarca metre kavis çapına karşılık gelen dalga cephesi gradyanını ölçme kapasitesine sahiptir. Bu özelliğiyle detektör, dalga cephesindeki bozuklukları yaklaşık  $10^{-12}$  mertebesine kadar ölçebilir.

### 5.2.1.1 Anlık Diyagnostik Araçlar

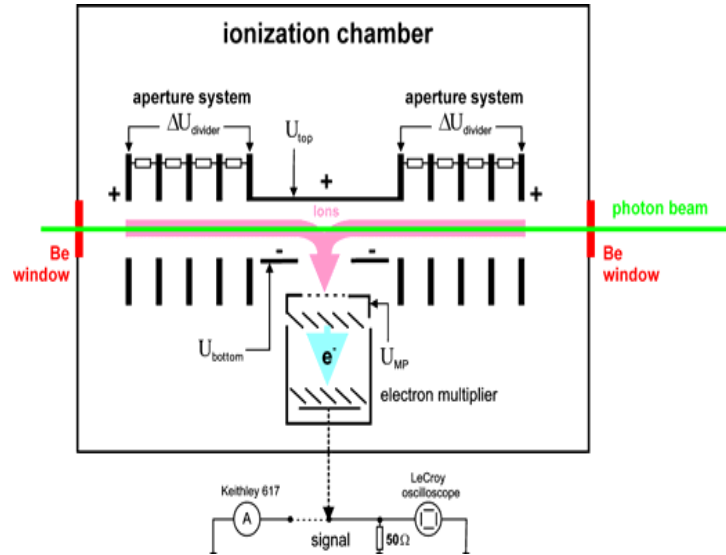
Kullanıcı deneylerinin çoğunda demet parametreleri ile ilgili şiddet, zamanlama gibi anlık (online) bilgilere ihtiyaç duyulur. Bunun için demete zarar vermeyen ve birbirleriyle bağlantılı olarak çalışan diyagnostik araçlar kullanılmalıdır. Ayrıca, SASE-SEL'deki dalgalanmalar nedeniyle diyagnostik için atmalara karşı kararlık özelliği taşıyan detektörleri seçmek kaçınılmazdır. Bu kısımda anlatılan deteksiyon mekanizmalarının çoğu gazın iyonlaşması esasına göre çalışmaktadır. Bu tür detektörler, istenen basıncın kolayca ayarlanmasını sağlayan diferansiyel pompalama birimleri içine yerleştirilmelidir.

**Atım enerjisi (foton akısı):** Deneylerin hemen hepsinde, en temel bilgi olarak, bir atım içindeki fotonların sayısının (foton akısı) saptanması istenir. Bu SEL gibi sınırlı bant genişliğine sahip bir atım kaynağı için atmanın enerjisine karşılık gelen bir ölçümdür.

Foton akısını ölçmek için demete zarar vermeyen ve geleneksel iyonizasyon detektörlerinden yaklaşık beş kat daha düşük basınçta bir soy gaz (genellikle zenon) veya nitrojen gazı ile doldurulan GMD birimleri kullanılır. Düşük basınç, detektörün neredeyse tamamen saydam olmasını sağlar; yani gelen ışığın çok küçük bir kısmı ölçüm için kullanılır. Bu nedenle

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

kullanıcılar deneylerini yaparken GMD'yi sürekli çalışan bir araç olarak kullanabilirler. Bununla birlikte, X-ışınları bölgesine yaklaştıkça GMD biriminde kullanılan gazın foto-soğurma tesir kesiti düştüğünden, detektörde hassas ölçümler yapabilecek kadar çok sayıda iyon üretilemez. Bu sorunu gidermek için DESY ve PTB (**P**hysikalisch-**T**echnische **B**undesanstalt, Berlin) uzmanları XGMD adını verdikleri yeni bir diyagnostik birimi geliştirmişlerdir. GMD'lerden farklı olarak bir XGMD'de iyonlar bir elektrik alan vasıtasıyla toplanır ve  $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 'lik sayıcı alana sahip olan elektron çoğaltıcısı tarafından detekte edilirler. Sistem atma başına  $10^6$  iyon kadar kazanç sağlayabilecek şekilde dizayn edilmiştir.



Şekil 5.5. XGMD Diyagnostik Birimi

Sayıcı gaz olarak X-ışınları bölgesinde diğer soy gazlara kıyasla daha yüksek foto-iyonlaşma tesir kesitine sahip olan zenon gazı seçilmiştir. Bir aralık sistemi yardımıyla, foton demet hattı boyunca uygulanan ilave bir elektrik alan dağılımı kullanılarak, etkin etkileşme hacminin uzunluğunu 20 cm'ye artırmak mümkündür. Böyle bir düzenek ile atma başına 10-100 iyon detekte edilebilir. Detektörün zaman çözünürlüğü ise 100 ns'nin altındadır.

### 5.2.1.2 Zaman bölgesi özellikleri

- a) Atma uzunluğu: Atımın şiddetini saptamak için gereken bir parametredir. Bu atmadaki mutlak enerjinin ölçülmesi anlamına da gelmektedir.
- b) Atmanın profili: atmanın kalitesini ve kararlılığını belirleyen bir parametredir. Kaliteden kasıt pedastalın eni ve boyudur. Kararlılığı ise SASE-SEL'in şeklinde atmadan atmaya oluşan değişiklikler belirler; bu tür değişiklikler atma merkezinin yerini bozarak bir zaman kaymasına neden olur.
- Atım kayması: atmanın varış zamanı ve zamandaki dalgalanma zamansal kayma olarak bilinen büyüklüğe göre ölçülmelidir. İstikrarsızlığın ölçütü olan kayma, zaman kararlılığı ve özellikle pompa-sonda deneyleri için belirlenmesi gereken çok önemli bir parametredir.

Atım enerjilerinin istatistiksel dağılımı ve spektral dağılım ölçülerek, teoriksel bilgilerin ışığında atma uzunluğu hesaplanabilir. Ancak, teoriksel hesaplamaların doğruluğunu kanıtlamak için atım uzunluğunun zaman içindeki değişimiyle ilgili hassas ölçümlerin yapılması gerekir.

IR-SEL için uygulanan yöntemlerin bazılarını geliştirerek SASE-SEL'de de kullanmak mümkündür. Bu nedenle aşağıdaki tartışmalarda IR ve SASE SEL'in atma uzunluğunu saptamak için kullanılan diyagnostik araçları aynı başlıklar altında tanıtılacaktır.

#### 5.2.1.2.1 Çapraz korelasyon teknikleri

##### • IR SEL

Bu tür ölçümler, çok kısa IR lazer (dışarıdan uygulanan) ve IR SEL atmaları arasındaki çapraz korelasyona dayalı yöntemlerle yapılabilir. Ölçüm için kullanılan en yaygın yöntem, SEL'den gelen XUV (10.2 – 124 eV'luk fotonlar) atmaları ile gaz içinde üretilen foto-elektronların enerjisinin IR lazer kullanılarak modüle edilmesidir. Foto-elektronlar, bir yada daha fazla IR fotonunu yayınlayabilir veya soğurabilir; böylece IR foton enerjisi ile ayrılan foto-elektron spektrumunda bir kenar bandı oluşur. Bantların sayısı ve şiddeti IR lazer ve IR SEL'in atmalarının üst üste gelme ölçütü olarak düşünülebilir. Bu amaçla kurulan bir düzende XUV atmasının detektörün sayıcı hacmine odaklanması ve IR atmasındaki gecikme kaydedilmelidir. SEL'den yayınlanan XUV atmalarını, bir dış lazerden gelenlerden ayırt ederek incelemek için FLASH'ta böyle bir düzenek kurulmuştur. Deneyde helyum ve zenon gazları kullanılmaktadır.



## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Bu deneydeki zorluk, IR lazer ve SEL atmalarını birlikte odaklamaktır; ancak, Cunovic tarafından geliştirilen ve demetlerin (SEL ve IR) dikey olarak çakıştırıldığı geometrik düzenele bu sorun da giderilebilir. Düzenekte, lazer yardımıyla gaz içerisinde üretilen foto-elektronlar, çapraz korelasyon hacminin, konum ve zamana bağlı, 2-boyutlu görünümünü elde etmek için kullanılmaktadır. Böylece, bir optik gecikme çizgisini taramaksızın atma uzunluğu ve atmalar arasındaki bağıl zaman hakkında bilgi edinmek mümkündür.

Bir önceki tekniğe alternatif olarak, XUV atması GaAs gibi yarı iletken bir yüzeye çok küçük bir açıyla düşürülür ve yüzeyin yansıtma katsayısındaki değişim incelenir. Yöntemde XUV atmasının yarı iletken yüzeye çarptığı bölge, kısa-atmalı ve normale oldukça yakın konumlandırılmış, görünür bölgede çalışan bir lazerle aydınlatılır. Her iki atmanın yarı iletken yansıyan ışınlar bir CCD kameraya düşürülerek, zaman-konum dönüşümü ve XUV atmasının bağıl ulaşma süresi görüntülenebilir. Böylelikle, görünür bölgede çalışan lazer demetine bağıl olarak atmadan atmaya zamansal kayma saptanabilir. Ayrıca, yansıtılan demet ve XUV atmasının şiddet profilleri ilintili olduğundan, XUV atmasının profili de ölçülebilir; fakat yansıma katsayısındaki değişim profili bozup profilin uzatacağından uygulamada bu tür bir ölçümü (yeterince hassas) yapmak zordur.

### • SASE SEL

Pratikte yukarıda IR SEL için anlatılan ilk yöntem demete zarar vermediğinden oldukça kullanışlıdır; ancak, bu yöntemi daha geniş bir spektrumda (yani SASE SEL'den gelen daha yüksek enerjili foton atmalarının da ölçülebildiği bir çalışma aralığında) kullanabilmek için gelişmiş enerji kararlı foto-elektron görüntüleme teknolojilerinden yararlanılmalıdır. Markus Drescher ve arkadaşları, kripton gazında yumuşak X ışınları (90 eV enerjili) ile üretilen foto-elektronların spektrumundaki genişlemeyi incelemişlerdir. Deneyde foto-etkinin çok hızlı bir şekilde gerçekleştiğinden, 1fs'den daha iyi bir zamansal çözünürlüğe ulaşılabilmektedir. Farklı konumlarda farklı gecikmeler uygulanarak konum uzayında zamansal bilgi edinilebilmektedir. Böylece, detektördeki (elektron görüntüleme spektrometresi) sinyalin genişliğine bakılarak, atmanın uzunluğu saptanabilmektedir.

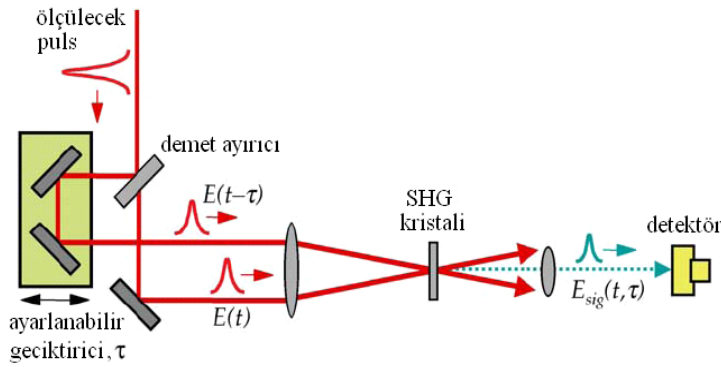
Auger elektronlarının oluşturduğu Auger çizgini bir uçuş zamanı (TOF, **Time-of-flight**) detektörü ile ölçmek ikinci bir yöntem olarak kullanılabilir. X-ışınları, normal doğrultusunda,

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

argon gibi bir gaz hedefe gönderilir. Gaz ortamına 10 mrad'lık bir açıyla diğer bir lazer atması daha gönderilir. Böylece, X-ışınları tarafından oluşturulan Auger çizgisinin kenarında, ikinci lazer atmasından kaynaklanan bir Auger bandı ortaya çıkar. Sonuç olarak, Auger elektronlarının zamansal dağılımından yararlanarak, X-ışını atması atmasının uzunluğu ile ilgili bilgi edinilir.

### 5.2.1.2.2 Otokorelasyon Teknikleri

Otokorelasyon tekniğinde foton atması iki kısma bölünür, ilgilenilen zaman çerçevesinin mertebesinde bir gecikme oluşturulur ve iki atma tekrar bir araya getirilerek dedekte edilir. Gelen demeti bölmek için dalga cephesi yöntemleri kullanılabilir.



Şekil 5.6. Otokorelasyon Tekniği

Otokorelasyon yöntemini THM SASE-SEL'e uygulamak üzere, benzer enerji aralığı için (VUV'den yumuşak X-ışınlarına kadar uzanan geniş bir SASE-SEL bölgesi), FLASH laboratuvarında tasarlanan ve şu an kullanılmakta olan ölçüm sistemini örnek alabiliriz. FLASH'ta gelen SASE-SEL demeti 30-200 eV ( $\lambda = 41-6.2$  nm) foton enerjisi aralığında çalışan bir otokorelatör aracılığıyla iki kısma ayrılır. Ardından demetler çok küçük açı farklarıyla ( $\alpha = 0.18-0.75$  mrad) yani çeşitli gecikmeler uygulanarak doğrudan bir CCD kameraya yönlendirilir ve oluşturdukları girişim desenine bakılır. Böylece, SEL atmalarının uzunluğu saptanabilir.

### 5.3 THM SASE SEL Tesisi Uygulama Potansiyeli

0.1-100 nm dalgaboyu aralığında elde edilmesi öngörülen THM SASE-SEL'in uygulama alanlarının oldukça geniş olması beklenmektedir.

1. Öncelikle, elde edilmesi öngörülen X-ışınları kimyasal analizler için çok önemlidir.
2. Özellikle X-ışınları kompleks bileşiklerin analizinde önem taşır. X-ışınları dalgaboyunun oldukça altında çok zayıf moleküllerarası etkileşme tanımlanabilir ve çalışılabilir.

THM SASE-SEL Projesi ile ülkemizde 100 nm'den daha küçük dalga boylu lazer ışınları elde edilebileceğinden aşağıdaki uygulamaların yapılması mümkün olacaktır:

1. Mor ötesi bölgesinde mümkün olan çevreye zararlı atık kimyasalların (boyar maddeler vs) kimyasal parçalanmasında,
2. Floresans spektroskopisinde nano dalgaboylu lazer ışını kullanılarak atom ve moleküllerin spektroskopik karakterizasyonlarında,
3. Sensör uygulamalarında kullanılan yüzey plazmon rezonans (SPR) tekniğinde altın levhaya alternatif başka taban malzemeler kullanılarak plasmon oluşturma da kullanılabilirliği düşünülmektedir.
4. Çip teknolojisiyle üretilen X-ışını radyasyon dedektörlerinde THM SASE SEL'in kullanılması öngörülmektedir; bu sistemler tekrar okunabilir, düşük enerji tüketimine sahiptir, çok küçük ebatlardadır, maliyetleri ucuzdur, verimi ise piyasadakilerden 7 kat daha fazladır.

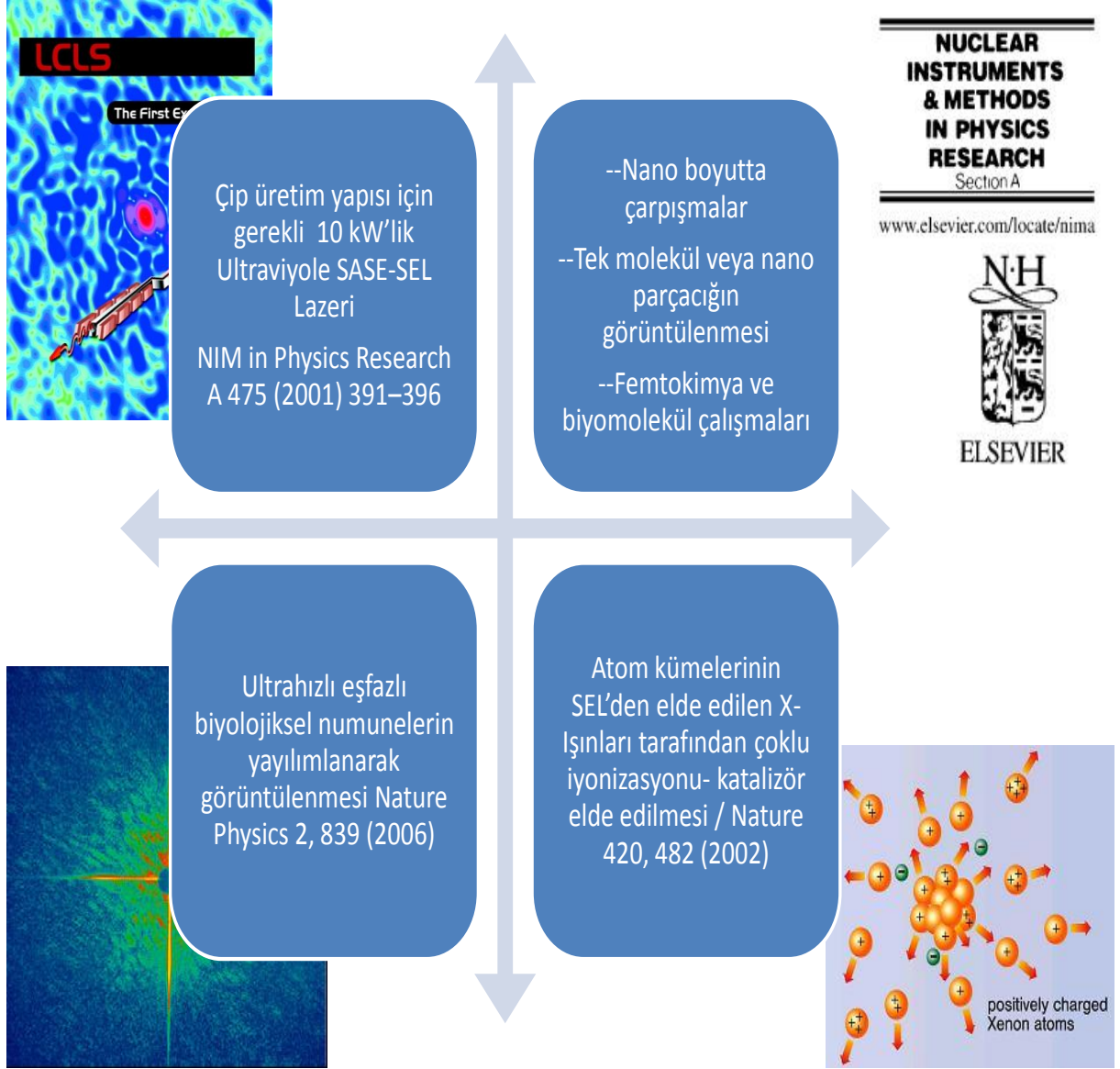
Ayrıca kimya alanında X-ışınları floresans (XRF) spektroskopisi ve X-ışınları kırınımı (XRD) tekniğinde de monokromatik X-ışınlarının kullanılabilirliği düşünülmektedir.

Günümüzde X-ışınlarının SASE ile üretileceği bilindikten sonra, bu üretilen X-ışınlarının nerelerde kullanılacağı ve hangi teknolojik gelişmelere öncülük edeceği büyük önem kazanmıştır. Günümüz bilgileri ışığında SASE ile üretilecek olan X-ışınları Dünya'daki laboratuvarlarda aşağıdaki uygulamalar için kullanılmaktadır:

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

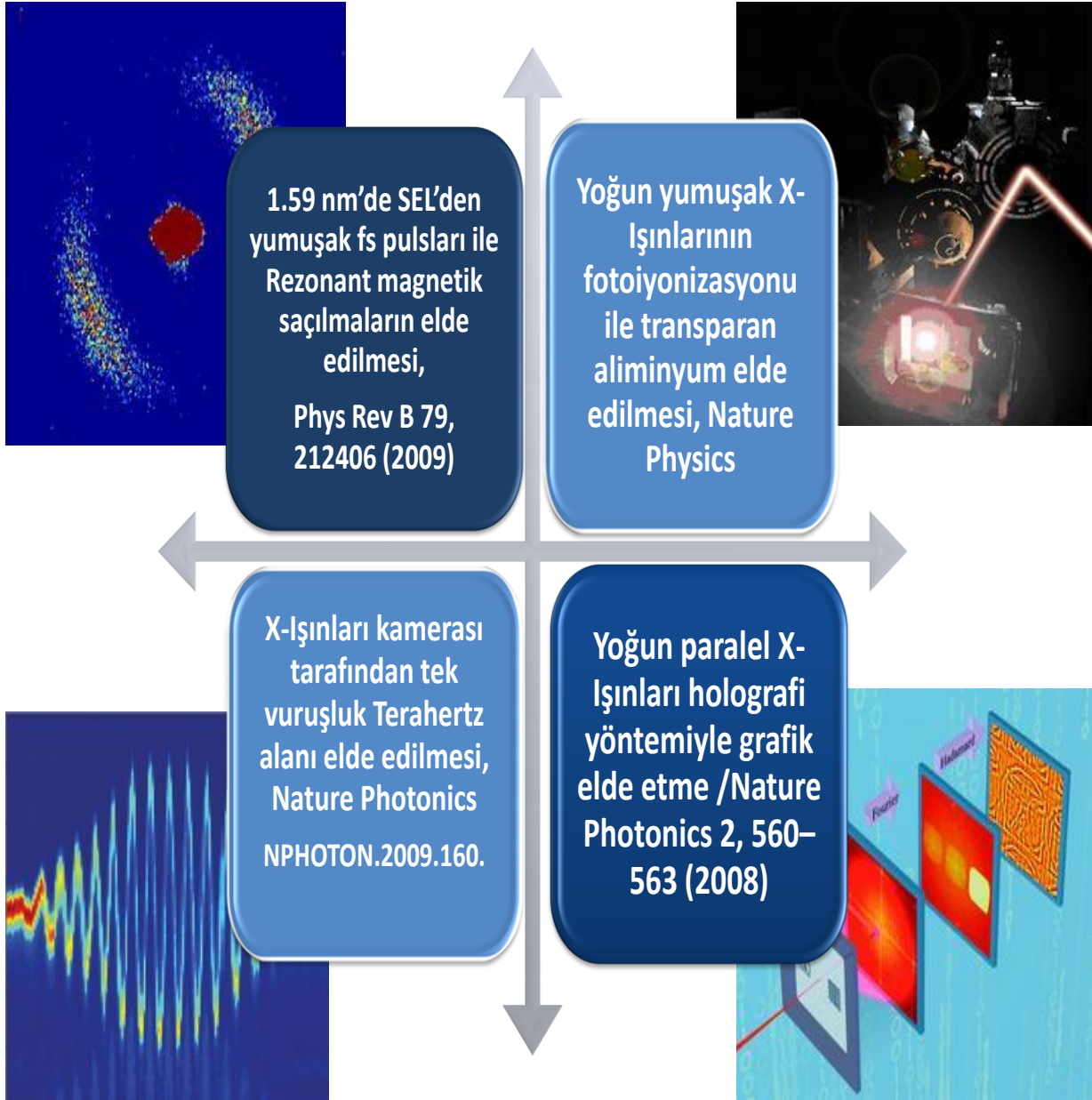
1. Atomik, Moleküler ve Yığın Fiziği olaylarında (SASE ile üretilen X-ışınlarının atom ve iyonlarla temel etkileşimlerini çalışan Atomik fizik, Moleküler fizik ve yığın-küme fiziği uygulamaları)
2. Plazma fiziği (X-ışınları ve plazmanın etkileşimi, aşırı yoğunluklu plazmanın üretimi, Plazma spektroskopisi)
3. Katı hal fiziği (Magnetizma, faz geçişleri, sıvılar ve düzensiz sistemler, zor-sınır şartları altındaki materyallerin incelenmesi ve Eksitasyonlar)
4. Yüzeyle ve yüzeyle arası çalışmalar (Yüzeylelerden zaman çözünürlüklü X-ışını kırınımı, sıvı ve yumuşak arayüzler, düşük boyutlarda topluca uyarımlar)
5. Materyal Bilimi (Sert materyaller, Polimerler ve Nanomateryallerin yüzey analizleri ve etkileşimlerinin incelenmesi)
6. Materyal görüntüleme dinamiği
7. X-SEL'in Kimya uygulamaları (Femtokimya, Analitiksel katı hal kimyası ve Heterojen kataliz)
8. Kimyadan ayrı olarak Femtosecond X-ışınları deneyleri
9. Canlı bilimleri ve Makromoleküllerin birleşimi (Biyomoleküller, makromoleküllerin dinamiği ve hücre sel yapılar)
10. Nonlineer Prosesler ve Kuantum Optiği (Nonlineer optik ve kuantum optiği uygulamaları, Temel yüksek-alanların bilimi, Atom optiği ve yeni X-ışını optiksel elementler, ultrahızlı olaylar, küçük kuantum sistemler)
11. X-ışını optiği ve Deneysel Teknikler (Zaman-çözünürlüklü deneyler, Yüksek çözünürlüklü saçılma, görüntü ve koherentlik deneyleri, koherent saçılma, X-ışınları kırınımı, Raman Spektroskopisi)
12. X-SEL'de Nükleer rezonans saçılma, küçük açı saçılmaları, Yüzeyle, arayüzeyler ve nanomalzemelerin incelenmesi.
13. Farklı skalalarda şoklara karşı materyallerin cevapları

Uluslararası çeşitli laboratuvarlarda her geçen gün X-ışınları üzerine teknik ve yeni çalışmalar üzerine yoğunlaşmaktadır. Dünya Laboratuvarlarında elde edilen SASE SEL uygulamaları ile son yıllarda önemli teknolojik gelişmeler yaşanmıştır. Bunlar aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.



Şekil 5.7. Dünyadaki SASE-SEL teknolojisi ürünleri-1

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



Şekil 5.8. Dünyadaki SASE-SEL teknolojisi ürünleri-2

## 5.4 THM SASE-SEL Deney İstasyonları Planlaması

Türkiye’de hem kullanıcı potansiyelini araştırmak hem de elde edilecek 0.1-100 nm dalgaboylu lazerin uygulama alanlarını, yapılan deneyleri görmek için yapılan araştırmalarda 12 farklı üniversitede teorik veya deneysel çalışmalar yapıldığı görülmüştür. Bu üniversiteler Ankara, Uludağ , Koç, Abant İzzet Baysal, ODTÜ, Gazi, Dumlupınar, Fatih, Recep Tayyip Erdoğan, Bilkent, Hacettepe Üniversiteleri ve İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsüdür. Bu üniversitelerde yapılan çalışmalar ışığında lazerin 0.1 nm, 0.8 nm, 13 nm ve 20-50 nm aralığındaki dalgaboyu değerleri en popüler çalışmaların yapıldığı ve en çok uygulamaların yoğunlaştığı dalgaboyu aralıkları olarak göze çarpmaktadır.

Türk Hızlandırıcı Merkezi Kendiliğinden Genlik Artırmalı Serbest Elektron Lazer Tesisi kapsamında 4 tane uygulamalı, kullanılabilir deney istasyonu, 1 tane de yedek kullanılabilir laboratuvar öngörülmektedir. Bunlardan birincisi, dışarı alınan demetin özelliklerinin ölçüleceği ve diğer istenilen odalara uygun özellikli ışının hazırlanacağı diyagnostik odasıdır. Diğer 3 oda da, lazer ışınının dalgaboyu aralığının belirlendiği çalışmalar vardır. Bir tane de yedek yeni yapılandırma veya yeni fikirlerin uygulama bulacağı oda olmak üzere toplam 5 tane deney odası öngörülmektedir.

### 5.4.1 Deney Odalarının Planlanması

İlgilenilen lazerin dalga boyu aralığına (0.1-100 nm) göre, son yıllarda bu dalgaboyu aralığında yapılan popüler çalışmaların detayı ve düşünülen olası deney istasyonları odalarında yapılacak çalışmalar aşağıdaki şekilde verilebilir.

1. Moleküler fizik çalışmaları, material bilim araştırmaları (20-50 nm dalgaboyu aralığında), yüzey analizi araştırmaları, atomik ve plazma fiziği araştırmaları, yoğun-şiddeti fazla serbest elektron lazeri ışınının atomlarla lineer olmayan etkileşimleri, kuantum optiği.
2. Katı-Hal Fiziği çalışmaları, 22-13 nm dalgaboyu aralığında iyon spektroskopisi, özellikle litografi (cip teknolojisi, 13 nm dalgaboyu civarında), yarıiletken teknolojisi, ultra-hızlı kimyasal çalışmalar.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

3. Biyolojik örneklerin suyun içerisinde, su-penceresi (water-window) olarak isimlendirilen bir uygulama çalışması ile 4.3-2.3 nm dalgaboyu aralığında suyun geçirgen (transparan) özelliğinden yararlanılarak incelenmesi. Biyolojik örnekler suyun taransparan özelliğinden kaynaklanan moleküller arası etkileşme olmadan kolay incelenebilir durumda bulunurlar.

### 5.4.2 THM SASE-SEL’de Öngörülen Kimya ve Plazma Fiziği Araştırmaları

THM SASE-SEL Projesi kapsamında 100 nm’den daha düşük dalgaboylu lazer ışınları ile yukarıda 5.3 Bölümünde belirtildiği gibi aşağıdaki uygulamalar yapılabilecektir:

1. Floresans spektroskopisi aracılığı ile molekül ve atomların spektroskopik karakterizasyonu,
2. Toksik ve zararlı materyallerin fotokatalitiksel degradasyonu,
3. Yüzey plazmon rezonansı (SPR), elipsometri ve benzeri bazı teknikler kullanarak sensor uygulamaları yapılacaktır.

Bunlara ek olarak, monokromatik X-ışınları demeti, X-ışınları difraktometri, X-ışınları floresans spektrometri ve mikro X-ışınları floresans mikroproblarında da kullanılabilir.

Koherent X-ışınları demeti kimyasal analizlerin doğrudan araştırılmasında çok önem taşımaktadır. Özellikle X-ışınları, kompleks bileşiklerin analizini çalışmada ve çözümlemede çok yararlıdır.

Türk Hızlandırıcı Merkezi, Kendiliğinden Genlik Artırımlı Serbest Elektron Lazeri Tesisinde elde edilmesi öngörülen düşük dalgaboylu X – ışınları, bağları çok zayıf ve çalışılması zor olan moleküllerarası etkileşmeleri anlama, tanımlama, çözümlemede ve yeni malzemeler yapılması noktasında da kullanılacaktır.

Ayrıca organik metal çerçevenin sentezi ve tasarımı kullanıcı ve araştırmacıların ilgisini çeken konulardır. Bu konular ile moleküllerarası etkileşmelerin çalışılmasına kristal mühendisliği alanı da dahil edilerek THM SASE-SEL Projesi kapsamında elde edilmesi planlanan X-ışınları ile çalışılacaktır.



## **Kaynaklar:**

[1] 4GLS Conceptual Design Report 2006.

[2] NLS Project: Conceptual Design Report 2010.

## 6 THM SASE SEL TESİSİ İÇİN ALT YAPI SİSTEMLERİ VE YARDIMCI SİSTEMLER

### 6.1 Giriş

Türk Hızlandırıcı Merkezi SASE-SEL Projesi kapsamında altyapı sistemi ve yardımcı sistemler olarak tabanca, ana hızlandırıcı ve salındırıcı sistemi dışındaki diğer bütün her sistemler yardımcı sistem olarak isimlendirilir.

### 6.2 Genel Teknik Altyapı Sistemi

Türk Hızlandırıcı Merkezi, SASE-SEL sisteminde teknik altyapı sistemi olarak tünelin kazılması, kazı esnasında çıkan zorluklar, tünelin içinin ve çevresinin yapısal sağlamlaştırılması, sistemin montesi yapıldıktan sonra elektrik ve taşıma bağlantılarının sistem boyunca kusursuz yapılması, su soğutmanın sağlanması, sistemin arasına bakım amaçlı kapatılması, He soğutma, azot soğutma, klystron gibi sık sık gereksinim duyulacak sistemlerin yedeklerini bulundurmak, bazı ihtiyaç duyulan önemli sistemlerin prototipini yapmak, hızlandırıcı modül test laboratuvarını oluşturmak ve bu laboratuvarda kavitelerin çalıştırılması, mekaniksel dayanıklılık, dinamiksel dayanıklılık, elektrik ve magnetik alan dayanıklılığı, materyal dayanıklılığı ve radyasyon güvenliği için mümkün olan testlerin yapılabilmesine olanak sağlayacak ortamların oluşturulmasını sağlamak altyapı çalışmalarına örnek olarak verilebilir.

#### 6.2.1 Magnet Su Soğutması

Türk Hızlandırıcı Merkezi SASE-SEL Laboratuvarında gerekli montajlar yapıldıktan sonra “chiller” ile soğutma sağlanması planlanmaktadır. “Chiller” kullanımı için toplam soğutma ihtiyacının belirlenmesi gerekir. Toplam litre/saat oranının belirlenmesi gerekli su ihtiyacını ortaya koyacaktır. Bu durumda “tap” (musluk) suyunun kullanılıp kullanılmayacağı suyun sertlik derece ölçümleri yapılarak belirlenebilecektir.

## 6.2.2 Isıtma, Havalandırma ve Klimalandırma

Türk Hızlandırıcı Merkezi SASE-SEL Projesi kapsamında oluşturulması planlanan SASE-SEL laboratuvarı oda sıcaklığında tutulmalı, gerekli noktalarda havalandırma klimalandırma için boşluklar bırakılmalıdır. Laboratuvarda her bölüm ayrı şekilde klimalandırılmalıdır. Havalandırma sistemi her bir bölüm için, yani hem hızlandırıcı bölümü hem de deney istasyonları bölümü için ayrı ayrı, bağımsız yapılmalıdır. Havalandırma sisteminin yerleştirilmesinde radyasyon güvenliği göz önünde bulundurulmalıdır.

## 6.3 THM SASE-SEL Projesi Kapsamında Binanın Projelendirilmesi

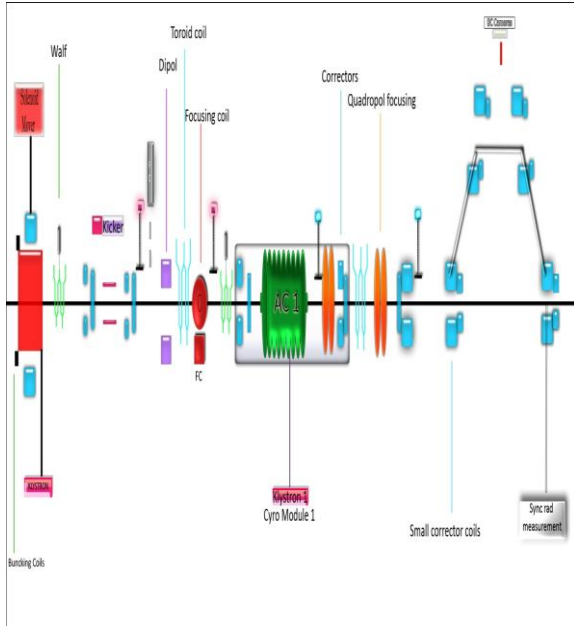
THM SASE-SEL Projesi Kapsamında yapılan çalışmalar önümüzdeki dönemlerde de yoğunlukla devam edecektir. Gelecek yıllarda laboratuvar sistemlerinin mekanik tasarımlarının yapılması planlanmaktadır. THM SASE-SEL Laboratuvar binasının deneyimli inşaat mühendisi ve mimarlar tarafından teknik çizimlerinin yapılması ve bazı prototiplerin yapılmasına gelecek proje döneminde başlanması öngörülmektedir.

Aşağıda 3. Bölümün başında gösterilen 325 metre olması planlanan SASE-SEL sistemi görülmektedir. Bu sistemin baştan sonra bütün demet yolu boyunca cihazların isimlerinin ve yerlerinin belirtildiği, mesafelerin verildiği detaylı grafiksel çizimi Şekil 6.2’de ((a),(b),(b),(d) ve (e)) verilmektedir.



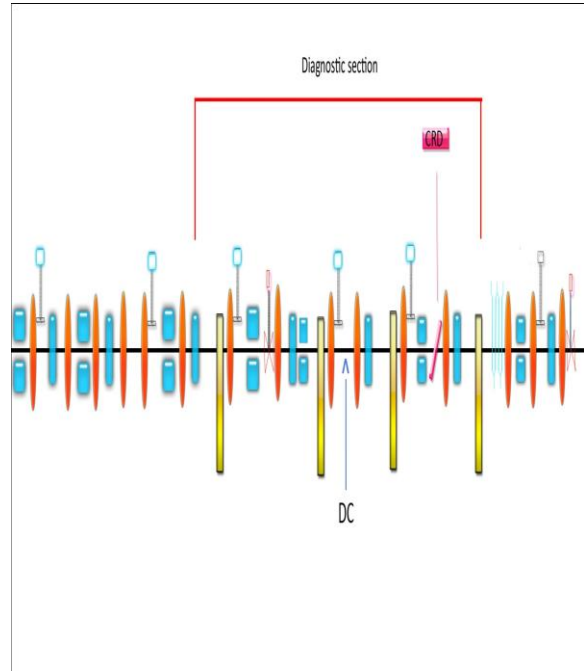
Şekil 6.1. THM SASE-SEL Sistemi

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



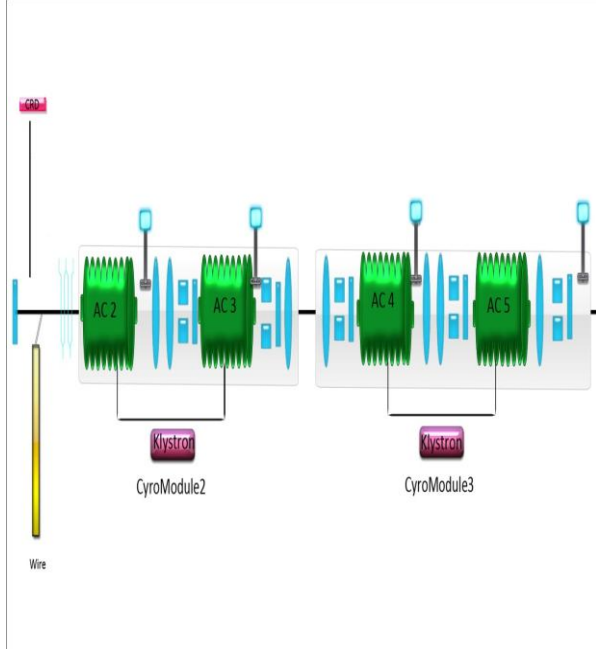
----- 30 metre -----

(a)



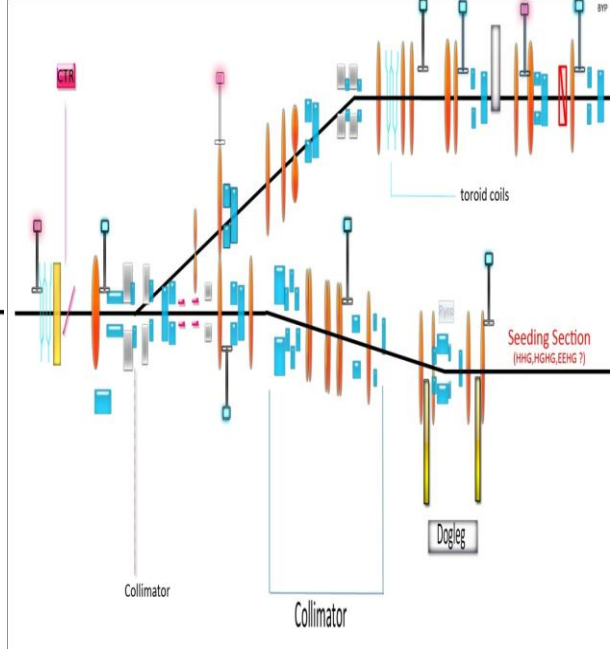
----- 70 metre -----

(b)



----- 140 metre -----

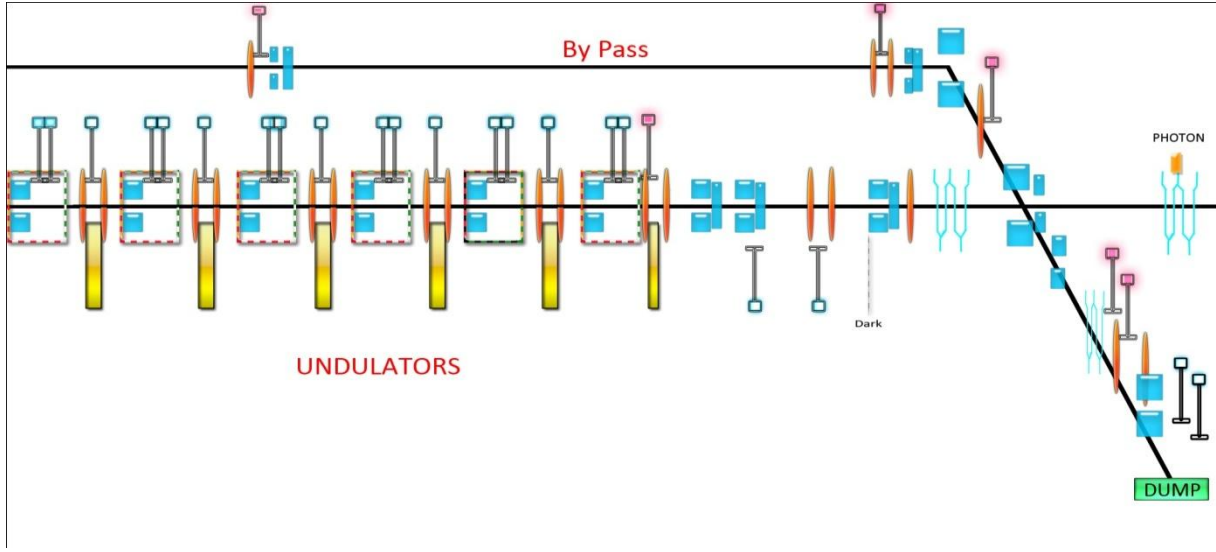
(c)



----- 50 metre -----

(d)

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU



----- 30 metre -----

(e)

Şekil 6.2. THM SASE-SEL Sisteminde demet yolu boyunca cihazların baştan sona detaylı yerleşimi

İnşaat mühendisleri radyasyona dayanıklı, deney, laboratuvar ve diyagnostik odaları için titreşimsiz, yoldan, gürültüden, sestenden uzak veya etkilenmeyecek şekilde, depremden etkilenmemesi için gerekenlerin yapılacağı bir laboratuvar tasarlamalıdır. İleriki olası genişleme ve uzatmalar için yeterince yer bırakılması unutulmamalıdır. Böyle bir laboratuvar için toplam 400 metre uzunlukta, 3.4 metre yükseklikte (2.3 m cihazların yüksekliği), 5 metre genişlikte, radyasyon izolasyonundan dolayı yerin 2 metre altına bir tünel kazılması gerekmektedir.

Laboratuvarın uzunluğu, demet sıkıştırıcısına kadar 30 metre, undulatörün başlangıcına kadar 250 metre, SEL deneylerinin başlangıcına kadar 325 metredir. SEL Deneyleri kısmında, çeşitli araştırma bölümlerinden oluşan dikdörtgen şeklinde 5 tane Laboratuvar odası bulunması planlanmaktadır. Bunlarla birlikte toplam laboratuvar uzunluğu 400 metre olacaktır.

## 6.4 Radyasyon Güvenliği

Laboratuvar boyunca birçok noktaya radyasyon ölçümünün tehlikesinin belirlenmesi için dozimetre yerleştirilmelidir. Çalışan kişiler de dozimetre bulundurmalı ve bunlar ayda bir kontrol edilmelidir. Laboratuvar boyunca sabit nötron dedektörü, Geiger Müller dedektörü ve taşınabilir gama dedektörü laboratuvarın farklı bölgelerine yerleştirilmelidir. Radyasyon güvenliği için kameralı ve sesli uyarı sistemi de laboratuvara yerleştirilmelidir. Radyasyon güvenliğinin tüm laboratuvar boyunca sağlanabilmesi için görevlendirilecek teknik uzmanların “iş güvenliği ve uzmanlığı” sertifika programı eğitimlerinden geçerek, sertifikalandırılmış olması gerekir. Bu uzmanların radyasyondan korunma üzerine ayrıca detaylı kurs ve dersler alması ve uygulamaların yaptırılması sağlanmalıdır. Laboratuvarda çalışacak teknisyenlerin en temelde iş güvenlik malzemelerini (darbe emici baret şapka, vb.) taşımaları gerekmektedir.

## 6.5 Genel Güvenlik

Türk Hızlandırıcı Merkezi, SASE-SEL Projesi kapsamında oluşturulması planlanan laboratuvar boyunca genel güvenlik önlemleri alınmalıdır. Bunlar arasında herhangi bir noktadan bir materyalin düşmesi, merdiven önlemleri, su basması, elektrik kaçakları, elektrik çarpmaları, lazer yanıkları, ısınma, He ve Azot kaçaklarına karşı kapıların dışarı açılan sistemde yapılması gerekir ve patlama durumunda bu gazlar havadan daha hafif olduğundan odanın tavanına doğru çıkacağından, mümkünse aşağı eğilerek, fazla nefes almadan, koşarak çıkışa doğru gitmek gerekir. Laboratuvarda girilmemesi belirtilen bölümler için gerekli önlemler alınmalıdır. Yangın durumunda yangın söndürücülerin uygun yerlere yerleştirilmiş olması gerekir.

Genel güvenlik içerisinde bilgisayar güvenliği, kimyasal atık güvenliği, yukarıda belirtilen elektriksel güvenlik, radyasyon güvenliği, radyoaktif malzemelerin takip edilebilirliğinin güvenliği, temiz oda için kullanım ve giriş kursu alınması, olası depremler, olası sel gibi afetler de genel güvenlik içerisinde değerlendirilebilir.

Bilgisayar güvenliği için sağlam bir altyapı ağının oluşturulması, laboratuvar kontrol odalarının güvenliğinin sağlanması gerekir. Yazılımlar ve kontrol programları da dünyaca kullanılan evrensel programlardan seçilerek, kendi uzmanlarımızda yazılan ek programlarca desteklenerek

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

kullanılması, yazılımlar konusunda oluşacak virüs, sistemin çökertilmesi gibi olası problemleri azaltmada yardımcı olacaktır.

Ülkemiz deprem kuşağında olduğundan, laboratuvarın tümü boyunca olası depreme dayanacak, titreşimlerde çatlak ve yıkık oluşturmayacak şekilde paylar bırakılarak bina yapılmalı ve cihazların güvenliğini de yine deprem salınımları dikkate alınarak tasarlanmalıdır.

Kimyasal atık güvenliği (Kimyasal atıklarla ilgili insan sağlığı ve çevre için var olan riskleri gidermek için), elektriksel güvenlik, radyoaktif malzemelerin güvenliğin sağlanması, temiz oda kullanımı konularında gerekli kurs ve testleri sağlayan CERN, SIR sisteminden işbirliği içerisinde olduğumuz laboratuvar olduğundan dolayı, kollobarasyon kapsamında yardım alınabilir [1]. CERN, birçok sistemin farklı güvenlik yapılandırması için kurslar, testler düzenlemiş durumdadır. Bu kurslar alınabilir.

### **Kaynaklar:**

[1] [https://espace.cern.ch/info-safetytraining-official/safety\\_training\\_for\\_me/Pages/default.aspx](https://espace.cern.ch/info-safetytraining-official/safety_training_for_me/Pages/default.aspx)

## 7 SONUÇ VE ÖNERİLER

### 7.1 Dünyadaki diğer SASE-SEL Laboratuvarları ile olan ilişkiler

Dünyadaki diğer SASE-SEL Laboratuvarları ile olan ilişkiler şu şekilde sıralanabilir:

1. THM SASE SEL Tesisi kapsamında **DESY, FLASH I, FLASH II ve EuroFEL** ekibinin bütün araştırmacılarıyla yakın çalışmalar ve fikir alışverişleri yapılmaktadır. Özellikle FLASH ekibiyle lazer optimizasyonu ve demet dinamiği konularında ortak çalışmalar yapılmaktadır. Ayrıca yine Almanya'nın Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (**HZDR**) Laboratuvarındaki araştırmacılarla yakın ve işbirliği içerisinde çalışmalar sürdürülmektedir.
2. THM SASE SEL Tesisi kapsamında Dünyanın en büyük deneysel yüksek-enerji fiziği laboratuvarı olan **CERN**'deki demet dinamiği ve hızlandırıcı fizikçileriyle (Büyük Hadron Çarpıştırıcısında – LHC'de (Large Hadron Collider) çalışan) ortak çalışmalar yapılmaktadır. Ayrıca CERN, Atlas Deneyi, Clic ve TLEP ve LHeC ekipleriyle hızlandırıcı fiziği, elektron demetinin dump edilmesi gibi konularda fikir alış-verişinde bulunmaktadır.
3. THM SASE SEL Tesisi kapsamında Amerika'dan yine hızlandırıcı fizikçileriyle (**SLAC** National Accelerator Laboratory, Old Dominion University) süperiletken ve normaliletken kavite kullanımının seçimi ve uygulamaları konularında öneriler alınmaktadır.
4. İngiltere'nin, **Cockcroft Enstitüsü** ile de THM SASE SEL Tesisi çalışmaları kapsamında yardımlaşmaktadır.
5. Halehazırda hem Türkiye'deki VUV ve X-ışınları kullanıcıları hem de yurt dışından salındırıcı fizikçileriyle toplantılar yapılmaktadır fakat önümüzdeki yıllarda ortak çalışmalar yapılması da gelecek planlar arasındadır.



## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Ayrıca Argonne National Laboratory (ANL), PSI, SparX-FEL, INFN laboratuvarlarındaki araştırmacılarla ve METU, Koç Üniversitesi, Abant İzzet Baysal Üniversitesi ve Dumlupınar Üniversitesinde görevli UV ve X-Işınları bölgesinde araştırmalar yapan öğretim üyeleri ile THM SASE SEL Tesisi kapsamında kullanıcı odalarında yapılması planlanan deneyler üzerine ortak çalışmalar yürütülmektedir.

### **7.2 Uluslar arası Bilimsel Danışma Komitesi'nin THM SASE SEL Tesisi Üzerine Önerilerinin Değerlendirilmesi**

Uluslar arası Bilimsel Danışma Komitesi (International Scientific Advisory Committee, ISAC) ile her yıl düzenli olarak yapılan toplantılarda THM SASE-SEL üzerine yapılan öneriler daha çok Dünya'daki SASE-SEL merkezleriyle yakın ilişkiler, kolloberasyonlar oluşturulması, THM SASE SEL oluşumu konusunda yeni ve olası tekniklerin (undulatör öncesi sürücü lazer sistemleri, superiletken kaviteler, in-vacuum undulator, vb.) değerlendirilmesi, çalışılması yönündedir. Bu öneriler değerlendirilmiş ve bu raporda görüleceği üzere, kolloberasyonlar oluşturulmuş, yurt dışı çalışma ziyaretleri yapılmış, yeni teknolojiler üzerine çalışmalar yoğunlaştırılmıştır.

Danışma Komitesi, alt bir birime ayrılarak, 2010 yılında, Parçacık Fabrikası, Sinkrotron Işınımı ve SASE-SEL Tesislerinin aynı demet yolunu kullanarak tek bir laboratuvarda oluşturulup oluşturulamayacağı konusunu karara bağlamak üzere toplantılar yapmış olup, toplantı sonucunda gerek Luminosity uyumsuzluğu, gerek demet yolunda demet enerji kaybının fazla olması olasılıklarından dolayı tesislerin ayrı ayrı tasarlanmasına ortaklaşa karar verilmiştir. Bu konudaki önerileri için danışma Komitesine teşekkür ederiz. (Bkz. The Optimization sub-Committee for TAC-ISAC meeting, Nov 29, 2010, Ankara, Turkey)

Isac yıllar içerisinde Türkiye'de THM SASE SEL Tesisi'nin kullanıcı potansiyelinin oluşturulması, olası yapılacak uygulama ve deneylerin ve laboratuvarların belirlenmesi üzerine yoğun önerileri olmuştur. Bu konuda üniversitelerdeki araştırmacılar ile ortak çalışmalar yapılmıştır. THM SASE SEL Tesisi için kullanıcı potansiyeli belirlenme aşaması çalışmaları devam etmektedir.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Ayrıca, yeni teknolojilerle (In-Vacuum undulatörler, undulatör öncesi ek bir lazer ile elektron demetlerini besleme (HGHG, HHG, EEG metodlarıyla self seeding), süperiletken, normaliletken kavite hızlandırıcı kavite gibi) ilgilenilmesi yönündeki öneriler üzerine çalışmalar yapılmıştır. Danışma komitesi tarafından daha yüksek enerjilerde, 3-8 GeV elektron demet enerjisi kullanılarak modellemelerin yapılması yönünde öneriler defaten verilmiştir. Baştan-sona modellemelerin çeşitli teknolojileri içerecek şekilde yeniden yapılması üzerine öneriler yapılmıştır. Bu öneriler kullanılarak hem süperiletken hem normaliletken teknolojisi içeren kavite modellemeleri yapılmıştır.

Danışma Komitesinin V. Raporunda belirttiği, şimdiye kadar devam eden (DPT'ye verilmiş proje metninde yer aldığı haliyle) orijinal THM SASE-SEL ile CERN'ün yeni proje önerisi olan X-ışınları bölgesi (X-band Projesi, CERN ile ortak) projesini yer-değiştirmek üzerine ilişkin önerileri; THM SASE SEL Proje Koordinatörlüğü tarafından gerek Türkiye'de kısıtlı insan gücü gerekse altyapı eksikliğinden dolayı benimsenmemiştir. X-band teknolojisi daha sonraki yıllarda yeni bir proje olarak verilebilir veya çalışmaları göz önüne alınabilir.

Danışma komitesinin yıllar içerisindeki önerilerinin büyük bir kısmı yerine getirilmiştir. Danışma komitesi üyeleri ile kurulan bilimsel bağlar sonucunda bundan sonraki süreçte de öneriler alınmaya ve değerlendirilmeye çalışılacaktır.

### 7.3 THM SASE SEL Tesisinin Ülkemiz için Önemi

1-100 nm dalga boyu aralığında kendiliğinden genlik artırımlı, tek renkli, ayarlanabilir dalga boylu, yüksek güçlü, yüksek parlaklıklı lazer ışınlarının uygulama alanlarından 5. Bölümde bahsedilmiştir. Dünya'nın bilim ve teknoloji de önde gelen ülkeleri büyük oranda bu uygulamaları teknolojilerinde kullanmaları sonrasında ilerleyebilmişlerdir. Sağlıktan-savunma sanayisine, bilimden-teknolojiye, endüstriden uzay çalışmalarına, her alanda en küçük dalga boylarına inmeye ihtiyacımız vardır. Türkiye'de ve yakın bölgesinde herhangi 4. Nesil bir ışınım kaynağı laboratuvarı bulunmamaktadır. Bunun eksikliği, yeni nesillerimize aktaracağımız bilgi ve uygulamaları daraltmaktadır.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Nano dalga boylu lazer laboratuvarlarının kurulumu sadece bilim ve teknolojiye ilerleme kaydettirmeyecektir aynı zamanda Dünya'nın önde gelen laboratuvar başkan ve araştırmacılarla işbirliğini, grup çalışmalarını, bilgisayar, elektronik altyapıların oluşturulmasının detaylarını ve Dünyanın bu alanlarda hangi noktada olduğu bilmemize olanak sağlayacaktır. Bu olanaklar hem çalışma heyecanımızı arttıracak hem de bu hevesi çocuklarımıza aktarma imkanı sağlayacaktır. Hızlandırıcı fiziği günümüzde bütün teknolojilerin temelini oluşturmaktadır. Süperiletken hızlandırıcı kaviteelerin çalışma sistemlerinin anlaşılması, RF gücünün hızlandırma kaynağını oluşturması, salındırıcı magnetlerin seçimi, materyal özelliklerinin araştırılması, denenmesi, demet besleme sistemlerinin, diyagnostik tekniklerinin vakit kaybedilmeden öğrenilmesi ve bu alanlarda çalışılması, gelecek yıllarda diğer ülkelerdeki bilim ve teknoloji yarışından kopmamamızı sağlayacaktır.

Nano (metrenin milyarda biri) boyutlarla çalışmak, en küçüğü keşfetmek çabası insanın doğasında her zaman var olduğundan, nano dalga boylu lazer elde etmek ve onu çeşitli uygulamalarda kullanmak, gelecek yüzyılların en büyük teknolojilerinin en başında yer alacaktır. Nano dalga boylu lazer üretmek, nano boyutta cip teknolojisinde kullanılan transistörleri üretmek, transparan aliminyum elde etmek, gen teknolojisinde kullanmak, protein-karbonhidrat gibi besin yapılarının temelini anlamak, nano boyutta çeşitli materyallerin yüzey yapılarını incelemek, iç yapılarını anlamak, hangi maddelerle birleştiğinde hangi farklı özellikleri göstereceğini keşfetmek ve daha birçok uygulamada kullanılabilecek olan nano dalga boylu lazerin uygulama alanları ileriki yılların en popüler araştırma konuları içerisinde yer almaya şimdiden başlamıştır. Gelecek yüzyılların teknolojisini hiç şüphesiz nano ve daha alt dalga boylu yapılar oluşturacaktır.

Daha küçük dalgaboyu demek, daha hızlı, daha enerjik kaynaklar üretmek demektir. Bu enerjik kaynakların kullanım alanları da sadece nano üretmekle kalmayıp, maddenin orijini, evrenin oluşum yapılarının modelleme örneklerini de içerisinde barındırmaktadır. Ülkemizin gelişmesi için temel bilimlerin ve yeni teknolojilerin takipçisi, anlayıcısı ve hatta üretene olmak zorundayız. Bu yeni teknolojileri bugün olmasa bile yakın tarihte, ülkemiz üretmediği veya takip edemediği noktalarda ithal etmek zorundadır.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Yüksek genç nüfusa sahip ülkemizde, hızlandırıcı fiziği ve lazer fiziği konularındaki ilerlemeler bölgemizdeki itibarımızı arttıracak ve gençlerin bu alanlara yönelmesinin önünü açacaktır. Büyük bir bilimsel ve teknolojik yarışta olan Dünya’da geleceğin kontrol şekillenmesi, bilimsel altyapının sağlamlığıyla doğru orantılı olacaktır. Hızlandırıcı fiziği, RF Gücü, demet dinamiği, elektronik ve kontrol altyapısı gibi konular bu bilimsel altyapının en büyük dilimini oluşturmaktadır. Üzerinde çalıştığımız THM SASE SEL Projesi bu konulardaki açığın kapanması için gerekli olan bütün aşamaları içermektedir.

### 7.4 Sonuç ve Öneriler

Bu rapor, Devlet Planlama Teşkilatının (günümüzde Kalkınma Bakanlığı) YUUP DPT2006K-120470 No’lu Projesinin, 2006-2015 yılları arasındaki THM SASE SEL Tesisi Projesi çalışmalarını içermektedir.

Türk Hızlandırıcı Merkezi, Kendiliğinden Genlik Artırımlı Serbest Elektron Lazeri Tesisi çalışmaları kapsamında oluşturulan bu raporda 1-3 GeV elektron demet enerjisi için demet yolu boyunca modelleme çalışmaları yapılmıştır. Çalışmalarda  $10^9$  W gücünde lazer elde edilmiş ve modellemelerde 2.2 GeV elektron demet enerjisine çıkılmıştır. Bu demet enerjisi ile 4 nm lazer dalgaboyuna ulaşılmıştır. Proje kapsamında 4 - 100 nm dalgaboyu aralığında çalışmalar yapılabilecek şekilde modelleme çalışmaları tamamlanmıştır. İleriki yıllarda 3-6 ve hatta 8 GeV elektron demet enerjisine kadar modelleme çalışmalarının yapılması planlanmaktadır. 2006-2015 yılları arasında tüm SASE SEL lazer sisteminin baştan-sona modellenmesi öğrenilmiş, Dünya’daki diğer bu konuda çalışan laboratuvarlar ile modelleme çalışmalarında boy ölçüşecek seviyeye gelinmiştir. 3-6 GeV demet enerjisi ve bu enerji değerleri için yapılacak olan modelleme çalışmaları, diyagnostik, uygulama potansiyeli araştırmaları önümüzdeki yılların konusu olacaktır.

Proje çalışmaları boyunca hızlandırıcı fiziği, demet dinamiği, süperiletken ve normaliletken kavite dizaynları, tabanca sistemi, elektron demet diyagnostik sistemleri, soğutma sistemleri, demet odaklayıcı ve sıkıştırıcılar, kavite ve elektromagnetik alan kusurları, RF güç kaynakları,

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

elektron demetinin dışarı alınması, salındırıcı magnetlerin modellenmesi ve benzeri konularda değerli bilgiler elde edilmiştir. Birçok yabancı araştırmacılarla işbirliği çalışmaları yapılmıştır. Avrupa ülkelerinden çeşitli laboratuvarlar ile kollabarasyon anlaşmaları yapılmıştır. Birçok öğrenci, yüksek lisans ve doktora çalışmalarını proje konuları ile tamamlamıştır. Hızlandırıcı fiziği ve diğer ilgili konuların en önde gelen bilim insanlarıyla tanışma konuşma ve çalışmalarımız hakkında öneri alma fırsatı yakalanmıştır. Bu çalışmalar ülkemiz için çok değerlidir. Proje süresi boyunca Ankara Üniversitesi bünyesinde Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitü'sünün açılması ile çalışmalar hız kazanmıştır.

### Teşekkür

THM SASE SEL Tesisi çalışmalarımıza projeye destek vererek imkan sağladığı için Kalkınma Bakanlığına, katkıları için proje üyesi üniversite rektörlüklerine özellikle her noktada işlerin takibi, değerli katkı ve yardımları için Ankara Üniversitesi Rektörlüğü'ne, her yıl yurt dışından gelerek bizleri dinleme, anlama, soru sorma, destek olma, yardım etme gayretlerinden dolayı değerli ISAC Üyelerine, yurt dışında gittiğimiz çalışma ziyaretleri sırasında bizden yardım ve desteklerini esirgemeyen dünyanın önde gelen laboratuvar başkan ve araştırmacılarına ve yurt dışı kurumlara, ulusal ve uluslararası kongreler yaparak Türkiye'de bilimin gelişmesine katkıda bulunan dernek, kurum ve kuruluşlara, Türkiye'de katkılarını esirgemeyen değerli bilim insanlarına, Proje Yürütücüsü ve yardımcılarına, projede herhangi bir destek alamadan canla başla çalışan proje üyesi öğrencilerimize ve diğer katkı verenlere, sunanlara teşekkür ederiz.

30 Kasım 2007'de Isparta'da düşen uçakta hayatını kaybeden proje üyeleri'ni (Prof.Dr. Fatma Şenel Boydağ, Prof. Dr. Engin Arık, Doç. Dr. İskender Hikmet, Araştırma görevlisi Mustafa Fidan, Araştırma Görevlisi Özgen Berkol Doğan ve Yüksek Lisans Öğrencisi Engin Abat) saygıyla anıyoruz.



**EKLER****Ek-1****THM SASE SEL Tesisi Proje Üyeleri ve e-posta bilgileri**

Ünvan	Adı-Soyadı	Görevi	Üniversite/Kurum	E-posta
Doç.Dr.	Hatice DURAN YILDIZ	Proje Koordinatörü	Ankara Üniversitesi, Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü, Ankara	<a href="mailto:hdyildiz@ankara.edu.tr">hdyildiz@ankara.edu.tr</a> , <a href="mailto:hyildiz@cern.ch">hyildiz@cern.ch</a>
Prof.Dr.	İlhan TAPAN	Proje Koordinatör Vekili	Uludağ Üniversitesi, Fen- Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Bursa	<a href="mailto:ilhan@uludag.edu.tr">ilhan@uludag.edu.tr</a>
Doç.Dr.	Zafer ÜSTÜNDAĞ	Projede Araştırmacı	Dumlupınar Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Kütahya	<a href="mailto:zustundag@gmail.com">zustundag@gmail.com</a>
Doç.Dr.	Alper Tolga ÇOLAK	Projede Araştırmacı	Dumlupınar Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Kütahya	<a href="mailto:atahan2005@gmail.com">atahan2005@gmail.com</a>
Yard. Doç.Dr.	Raşit ÇAKIR	Projede Araştırmacı	Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü, Rize	<a href="mailto:rasit.cakir@erdogan.edu.tr">rasit.cakir@erdogan.edu.tr</a> <a href="mailto:rcakir75@gmail.com">rcakir75@gmail.com</a>
Yard. Doç. Dr.	Osman Çağlar AKIN	Projede Araştırmacı	Fatih Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu	<a href="mailto:ocakin@fatih.edu.tr">ocakin@fatih.edu.tr</a>
Uzman	İlker YILDIZ	Projede Araştırmacı	Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Merkez Laboratuvarı	<a href="mailto:iyildiz@metu.edu.tr">iyildiz@metu.edu.tr</a>

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Dr.	Özkan ŞAHİN	Projede Araştırmacı	Uludağ Üniversitesi, Fen- Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Bursa	<a href="mailto:osahin@uludag.edu.tr">osahin@uludag.edu.tr</a>
Uzman	Gökhan COŞKUN	Projede Araştırmacı	Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Elektronik Teknolojisi, Kahramanmaraş	<a href="mailto:g.c@hotmail.com.tr">g.c@hotmail.com.tr</a>
Doktora Öğrencisi	Mustafa Biçer	Projede Araştırmacı	Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Ankara	<a href="mailto:Mustafa.Bicer@ankara.edu.tr">Mustafa.Bicer@ankara.edu.tr</a> <a href="mailto:mustafabicer@ankara.edu.tr">mustafabicer@ankara.edu.tr</a>
Doktora Öğrencisi	Ayşe BAT	Projede Araştırmacı	Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fizik Bölümü, Tokat	<a href="mailto:ayse_2998@hotmail.com">ayse_2998@hotmail.com</a>
Yüksek Lisans Öğrencisi	Dilaver PORSUK	Projede Araştırmacı	Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya	<a href="mailto:dilaverporsuk35@gmail.com">dilaverporsuk35@gmail.com</a>



**Ek-2**

**Proje Çalışmaları sırasında yapılan yurt dışı çalışma ziyaretleri giden araştırmacılar, gidilen yer ve süre:**

Adı-Soyadı	Gidilen Yer	Gidildiği Tarihler	Kalındığı Süre
Hatice Yıldız	CERN	16-25.08.2006	9 gün
İlhan Tapan	IFEL & JAERI, Japonya	29.10-7.11.2006	10 gün
Hatice Yıldız	CLIO, Fransa	11-13.07.2007	2 gün
Hatice Yıldız	FELIX, Hollanda	23-26.07.2007	3 gün
İlhan Tapan	ELBE, Almanya	04-09.09.2007	5 gün
Özkan Şahin	DESY, Almanya	1-27.10.2007	27 gün
İlhan Tapan	ICALEPS, USA	14-20.10.2007	6 gün
İlhan Tapan	Fransa	15-18.10.2008	3 gün
Özkan Şahin	Fransa	15-18.10.2008	3 gün
Hatice Yılmaz	Yunanistan	29.03-04.04.2009	6 gün
İlhan Tapan	SCINT09, Güney Kore	08-12.06.2009	4 gün
Özkan Şahin	DESY, Almanya	01-24.08.2009	24 gün
Özkan Şahin	FEL09, İngiltere	24-28.08.2009	4 gün
Özkan Şahin	ALICE, İngiltere	06-25.09.2010	19 gün

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

İlhan Tapan	IHEP, Çin	09-15.05.2010	6 gün
İlhan Tapan	BES III, Çin	17-25.10.2010	8 gün
Nihan Kandemir	SLAC, USA	19.06-17.07.2010	29 gün
Nihan Kandemir	MAXLAB, İsveç	08-20.11.2010	12 gün
Taylan Sipahi	MAXLAB, İsveç	08-20.11.2010	12 gün
Taylan Sipahi	SLAC, USA	19.06-17.07.2010	29 gün
Metin Aydar	DESY, Almanya	18.07-07.08.2010	19 gün
Hatice Yılmaz	DESY, Almanya	18.07-07.08.2010	19 gün
İlker Yıldız	DESY, Almanya	03-07.2011	4 gün
Hatice Duran Yıldız	DESY, Almanya	03-07.2011	4 gün
Nihan Kandemir	FEL, Sicilya, İtalya	05-16.04.2011	11 gün
Taylan Sipahi	FEL, Sicilya, İtalya	05-16.04.2011	11 gün
İlhan Tapan	BES III, Çin	31.05-07.06.2011	7 gün
İlhan Tapan	BES III, Çin	26.11-05.12.2011	10 gün
İlhan Tapan	CERN, İsviçre	09-11.05.2012	3 gün
İlhan Tapan	USA	04-08.06.2012	4 gün
Özkan Şahin	DESY, Almanya	20.01-01.02.2013	11 gün
Rasit Cakir	DESY, Almanya	17.06-17.07.2013	30 gün
Mustafa Bicer	CERN	05-25.08.2013	20 gün
İlhan Tapan	Japonya	25.09-20.10.2013	26 gün

### Ek-3

#### Proje Çalışmaları sırasında proje konuları ile ilgili olarak katılım gösterilen ulusal ve uluslar arası kongre ve çalıştaylar:

1. H. Duran Yıldız, “TAC-Optik Kavite Sistemi”, Türk Hızlandırıcı Merkezi (TAC) Projesi, I. YUUP Çalıştayı, 12-13 Mayıs, 2006, **Ankara**.
2. H. Duran Yıldız, “CERN-TAC İlişkileri”, TAC Projesi II. YUUP Çalıştayı, Abant İzzet Baysal Üniversitesi, 1-3 Aralık 2006, **Bolu**.
3. H. Duran Yıldız, Ö. Yavaş, “Normal İletken RF Teknolojisine Dayalı Serbest Elektron Lazerlerinin Yapıları ve Temel Özellikleri”, Sözlü sunum, III. Ulusal (Uluslararası Katılımlı) Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi (UPHUK-3), **Bodrum**, 17-19 Eylül, 2007.
4. H. Duran Yıldız, “Synchrotron Radiation and Free Electron Laser” başlıklı dersler verilmiştir, Turkish Physical Society, 3<sup>rd</sup> Summer School on Particle Accelerators and Detectors, 20-24 September 2007, **Bodrum**.
5. Ö. Şahin, “Demet Diagnostik İstasyonları”, III. THM YUUP (Türk Hızlandırıcı Merkezi Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslararası Proje) Çalıştayı, 11 – 13 Mayıs **2007**, Ankara Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE (Sözlü Sunum).
6. H. Duran Yıldız, H. Yılmaz, “TAC CAVITY SYSTEM, GAIN AND LOSSES”, 25<sup>th</sup> International Physics Congress (TFD25), 25-29 August 2008, **Bodrum, Turkey**.
7. Ö. Şahin, “THM SASE FEL için Foton Diyagnostiği”, V. THM YUUP (Türk Hızlandırıcı Merkezi Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslararası Proje) Çalıştayı, 5 – 7 Haziran **2008**, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE (Sözlü Sunum).

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

8. Ö. Şahin, “SASE FEL için Foton Demet Diyagnostiği”, VI. THM YUUP (Türk Hızlandırıcı Merkezi Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslararası Proje) Çalıştayı, 2 – 5 Aralık **2008**, Ankara Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE (Sözlü Sunum).
9. H. Duran Yıldız, “THM TTR SASE SEL Undulör Sistemi ve SEL Parametreleri”, Erciyes Üniversitesi (**Kayseri**), VII. YUUP çalıştayı, 18-20 Haziran 2009.
10. H. Duran Yıldız, “Demet Optiği ve Uygulamaları” başlıklı dersler verilmiştir, V. Uluslararası Katılımlı Parçacık Hızlandırıcıları ve Detektörleri Yaz Okulu, 29 Ağustos - 3 Eylül 2009 / **Bodrum**.
11. O. Sahin, I. Tapan, at all., “Technical Design Studies of TAC SASE–FEL Proposal”, **Proceeding of FEL, 2009, p. 325 – 328**.
12. H. Duran Yıldız, VIII. Yuup çalıştayı (7-8 Aralık 2009, Gazi Üniversitesi, **Ankara**) “THM SASE SEL için LINAK ve Salındırıcı Opsiyonları” sözlü sunum.
13. H. Duran Yıldız, A. Şengül, “Elektron-Pozitron, Elektron-Proton ve Elektron-Foton Çarpıştırıcılarının Özellikleri”, Sözlü sunum, 22-26 Haziran 2009, UFOK5, ODTÜ, **Ankara**.
14. H. Duran Yıldız, Ö. Yavaş, “A Self-Amplified Spontaneous Emission Free Electron Laser, Codes and Undulator Modelling”, 26<sup>th</sup> International Physics Congress (TFD26), 24-27 September 2009, **Bodrum/Mugla**.
15. H. Duran Yıldız, ”Status and Road Map of SASE FEL Subproject”, ISAC Komitesi 1. Toplantısı, Ankara Üniversitesi (8-9 Ekim 2009)
16. Ö. Şahin, “SASE SEL Foton Demeti için Model Diyagnostik Sistem”, VII. THM YUUP (Türk Hızlandırıcı Merkezi Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslararası Proje) Çalıştayı, 18 – 20 Haziran **2009**, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, TÜRKİYE (Sözlü Sunum).
17. Ö. Şahin, “SASE SEL Foton Demeti için Model Diyagnostik Sistem”, VIII. THM YUUP (Türk Hızlandırıcı Merkezi Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslararası Proje) Çalıştayı, 7 – 8 Aralık **2009**, Gazi Üniversitesi Gölbaşı Kampüsü, Ankara, TÜRKİYE (Sözlü Sunum).

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

18. **H. Duran Yıldız, “Parçacık Kinematığı”** başlıklı dersler verilmiştir, VI. Uluslararası Katılımlı Parçacık Hızlandırıcıları ve Dedektörleri Yaz Okulu, 2-7 Eylül 2010, **Bodrum**.
19. H. Duran Yıldız, “THM SASE SEL Tesisi Teknik Tasarımı”, sözlü sunum, IX. THM YUUP Çalıştayı, 3-5 Aralık 2010, Ankara Üniversitesi Rektörlüğü, **Ankara**.
20. H. Yılmaz, H. Duran Yıldız, İ. Yıldız, M. Aydar, “Türk Hızlandırıcı Merkezi Serbest Elektron Lazeri Kavite Yapısı”, Turk Fizik Dernegi 27. Uluslararası Fizik Kongresi - TFD27, **14-17 Eylül 2010, İstanbul Üniversitesi, İstanbul**.
21. H. Duran Yıldız, “Türk Hızlandırıcı Merkezi SASE Serbest Elektron Lazeri”, Sözlü sunum, 4. Uluslararası Katılımlı Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi (UPHUK-4) 30 Ağustos-1 Eylül 2010, **Bodrum**.
22. Ö. Şahin, “THM SASE SEL Foton Diyagnostığı”, I. THM ÜİK Toplantısı ve IX. THM YUUP (Türk Hızlandırıcı Merkezi Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslararası Proje) Çalıştayı, 3 – 5 Aralık **2010**, Ankara Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE (Sözlü Sunum).
23. **H.Duran Yıldız**, “Status of Dedicated SASE FEL Project”, ISAC Komitesi 2. Toplantısı, Boğaziçi Üniversitesi (21-22 Haziran 2010)
24. **H.Duran Yıldız**, Ö. Yavas, O. Cakır, A.K. Ciftci, R. Ciftci, A. Aksoy, B. Ketenoğlu, K. Zengin, B. Akkus, P. Arıkan, , L. Sahin, S. Özkorucuklu “The Status of Turkish Accelerator Center Project”, Poster Sunumu, The 1st International Particle Accelerator Conference, “[Proceedings of IPAC’10, Kyoto, Japan - THPD059](#)” May 23-28,2010, **Kyoto/Japan**.
25. H. Duran Yıldız, H. Yılmaz, “Türk Hızlandırıcı Merkezi, Serbest Elektron Lazeri-Kavite Sistemi”, Sözlü Sunum, Adım Fizik Günleri, 20-22 Mayıs 2010, Afyon Kocatepe Üniversitesi, **Afyon**.
26. Ö. Şahin, “Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) SASE SEL Foton Diyagnostik Sistemi”, X. THM YUUP (Türk Hızlandırıcı Merkezi Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslararası Proje)

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

Çalıştay, 9 – 11 Aralık **2011**, A.Ü. Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü Ankara Üniversitesi 50. Yıl Kampüsü, Gölbaşı, Ankara, TÜRKİYE (Sözlü Sunum).

27. H. Duran Yıldız, “TAC-SASE FEL Facility Project” başlıklı sözlü sunum, 2<sup>nd</sup> International Conference on Particle Physics in Memoriam Engin Arik and Her Colleagues, 20-25 June 2011, Doğu Üniversitesi, İstanbul.
28. First International Workshop on Machine and Research Aspect of the Proposed Turkish Light Sources”, 4-6 July 2011, <http://physics.dogus.edu.tr/tac-sr/> veya [TAC-Light Sources User Meeting 2012 \(TAC-LSUM12\), HTE, Gölbaşı \(6-7 Ekim 2012\)](#)
29. H. Duran Yıldız, “SASE-FEL Facility Project of Turkish Accelerator Center Project”, Invited speaker, “First International Workshop on Machine and Research Aspect of the Proposed Turkish Light Sources”, 4-6 July 2011, Doğu University, **İstanbul**.
30. G. Coşkun, H. Duran Yıldız, A. Bat, “Simulation of Fixed E or B and Electromagnetic Field with Poisson Superfish”, Poster presentation, “First International Workshop on Machine and Research Aspect of the Proposed Turkish Light Sources”, 4-6 July 2011, Doğu University, İstanbul.
31. G. Coşkun, H. Duran Yıldız, İ. Yıldız, A. Bat, “A Self-Amplified Spontaneous Emission Free Electron Laser, Structure of Undulator and Laser Optimization”, 04\_OP13, Turkish Physical Society, 28th International Physics Congress, TFD28, 6-9 September 2011, Bodrum.
32. H. Duran Yıldız, A. Bat, 9 - 11 Aralık 2011, Ankara Üniversitesi, HTE, Gölbaşı, Ankara, X. THM YUUP Çalıştay “Serbest Elektron Lazeri Sistemlerinde Elektron Tabancası ve Süperiletken Hızlandırıcı Yapıların Modellenmesi” başlıklı sunum.
33. H. Duran Yıldız, G. Coşkun, 9 - 11 Aralık 2011, Ankara Üniversitesi, HTE, Gölbaşı, **Ankara**, X. THM YUUP Çalıştay “Kendiliğinden Genlik Artırımlı Lazerlerde Undulatör Yapısı ve Lazer Optimizasyonu” başlıklı sunum.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

34. H. Duran Yıldız, “THM SASE SEL Tesisi Tasarım Çalışmaları”, X. THM YUUP Çalıştayı, 9 - 11 Aralık 2011, Ankara Üniversitesi, HTE, Gölbaşı, **Ankara**
35. H. Duran Yıldız, İ. Yıldız, G. Coşkun, “**Simulation of Electron gun and Superconducting Accelerator System, 04\_OP22**”, Turkish Physical Society, 28th International Physics Congress, 6-9 September 2011, **Bodrum**.
36. H. Duran Yıldız, “Status of TAC-SASE-FEL Facility”, TAC-YUUP Uluslar arası Bilimsel Danışma Komitesi’ne (**ISACIV**) **Sözlü Sunum**, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 11-13 Haziran 2011, **İstanbul/Türkiye**.
37. H. Duran Yıldız, “Turkish Accelerator Complex & Status of TAC SASE-FEL”, sözlü sunum, DESY Laboratuvarı, Hamburg/Almanya, 5 Nisan 2011, <http://flash.desy.de/meetings/> veya [http://flash.desy.de/sites2009/site\\_vuvfel/content/e870/e76936/infoboxContent76938/5April2011\\_DESY\\_Seminar.pdf](http://flash.desy.de/sites2009/site_vuvfel/content/e870/e76936/infoboxContent76938/5April2011_DESY_Seminar.pdf).
38. H. Duran Yıldız, İ. Yıldız, Ö. Yavaş, “Turkish Accelerator Complex, Self Amplified Spontaneous Emission Free Electron Laser”, Poster Sunumu, “7th Nanoscience and Nanotechnology Conference”, “7. Türkiye Nanobilim ve Nanoteknoloji Konferansı”, **27 June-01 July 2011, Sabancı University, İstanbul**.
39. H. Duran Yıldız, “Status of Dedicated TAC-SASE-FEL Facility”, TAC-YUUP Uluslar arası Bilimsel Danışma Komitesi’ne (**ISACIII**) **Sözlü Sunum**, Ankara Üniversitesi, Ankara, 9-11 Mayıs 2011, **Ankara/Türkiye**.
40. H. Duran Yıldız, İ. Yıldız, A. Bat, G. Coskun, “**Start-To-End Simulations of SASE Free Electron Lasers in the Sub-Nanometric Range**”, 8th Nanoscience and Nanotechnology Congress, **NANOTR VIII**, 25-29 Haziran 2012, **Hacettepe University, Ankara**.
41. H. Duran Yıldız, “Nanometre Dalgaboylu Serbest Elektron Lazer Sistemlerinin Modellenmesi”, İzmir Yüksek Enerji Fiziği ve Uygulamaları Çalıştayı, IZYEF, 19-23 Haziran 2012, **İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir**.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

42. H. Duran Yıldız, A. Bat, G. Coşkun, “Serbest Elektron Lazerlerinde Elektron Tabancası Ve Süperiletken Yapıların İncelenmesi”, Sözlü sunum, Adım Fizik Günleri, 25 - 27 Nisan 2012, Pamukkale Üniversitesi, **Denizli**.
43. H. Duran Yıldız, “Kendiliğinden Genlik Artırmalı Serbest Elektron Lazerlerinde Tüm Sistemin Modellenmesi”, Sözlü sunum, Adım Fizik Günleri, 25 - 27 Nisan 2012, **Pamukkale Üniversitesi, Denizli**.
44. Ö. Şahin, “SEL Foton Diyagnostiği”, Türk Fizik Derneği, 8. Uluslararası Katılımlı Parçacık Hızlandırıcıları ve Detektörleri Yaz Okulu, 10-15 Eylül **2012**, Bodrum, Muğla, TÜRKİYE (Davetli Konuşmacı, Sözlü Sunum).
45. Ö. Şahin, “THM SASE-SEL Foton Demet Diyagnostiği Üzerine Çalışmalar”, THM YUUP (Türk Hızlandırıcı Merkezi Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslararası Proje) SASE SEL Çalıştayı, 12 Mayıs **2012**, A.Ü. Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü Ankara Üniversitesi 50. Yıl Kampüsü, Gölbaşı, Ankara, TÜRKİYE (Sözlü Sunum).
46. H. Duran Yıldız, R. Çakır, D. Porsuk, “Superconducting Cavity Simulation For Production of Laser With Nano-meter Wavelength”, Oral Presentation, **NanoTR-9**, 24 - 28 Haziran 2013, **Erzurum**.
47. 3rd TAC Light Sources (SR+FEL) User Meeting (TAC-LSUM 2013), 5-7 October 2013, Ankara University, Tandogan, Ankara, <http://thm.ankara.edu.tr/tac-lsum2013/>
48. H. Duran Yıldız, İ. Yıldız, D. Porsuk, “Superconducting Cavity Design for Linear Accelerators to Achieve 1-100 nm Laser”, Oral Presentation, 7th Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics (**ACASC7**), 23 - 25 Ekim 2013, **Kapadokya, Turkey**.
49. H. Duran Yıldız, R. Çakır, D. Porsuk, “Superconducting Gun Cavity Optimization”, Poster Sunumu, 7<sup>th</sup> Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics (**ACASC7**), 23-25 Ekim 2013, **Kapadokya, Turkey**



## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

50. H. Duran Yıldız, D. Porsuk, Superconducting Gun Cavity Design Simulation For Linear Accelerator System, 4th International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2014), 27 April-2 May, 2014, Antalya, Turkey.
51. H. Duran Yıldız, M. Bicer, D. Porsuk, “Faraday Cup ARADAY CUP DESIGN AT LINEAR ACCELERATORS”, Lumidoz, August 2014, International Congress, Ankara University, Ankara, Turkey
52. H. Duran Yıldız et al., Turkish Accelerator Center, IPAC2014, Germany
53. H. Duran Yıldız, E. Demirhan, D. Porsuk, “Free Electron Laser Optimisation with Genesis” 1.3, Poster Presentation, International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN2014), 25 - 29 October 2014, Antalya, Turkey.
54. H. Duran Yıldız, R. Cakir, and D. Porsuk, “Superconducting Cavity Utilization for Linear Accelerator Systems”, International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN 2014), 25 - 29 October 2014, Antalya, Turkey.

## Ek-4

### THM SASE SEL Proje Çalıştayları

THM SASE SEL Tesisi Proje çalışmaları kapsamında 4 ulusal 4 Ulusal Çalıştay düzenlenmiştir:

- TAC SI ve TAC SASE FEL Workshop, Ankara University (2 Mayıs 2009)
- TAC SASE FEL Workshop, Ankara University (1 Mayıs 2010)
- TAC SASE FEL Workshop, Ankara University (5-6 Mayıs 2011)
- TAC SASE FEL Workshop, IAT, Golbasi (12 Mayıs 2012)

Düzenlenen bu çalıştaylar üzerine detaylı bilgi, proje sayfası olan

<http://tac.ankara.edu.tr/sase-fel>

sayfasından edinilebilir.

**Ek-5****Proje Çalışmaları sırasında proje kapsamında yayınlanan ulusal ve uluslararası yayınlar:**

1. H. Duran Yıldız, H. Yılmaz, “Turkish Accelerator Center, Structure Of Cavities”, **Balkan Physics Letters**, **16**, **161023** (2009).
2. H. Duran Yıldız et al., “Turkish Accelerator Center Project”, **Balkan Physics Letters**, **17**, pp. **303-310**, **17039**, 19 May 2009.
3. H. Duran Yıldız, “Turkish Accelerator Complex, FEL Resonator System”, **Journal of “Fizika” of Azerbaijan National Academy of Sciences, Fizika**, **2010**, vol. **XVI**, Issue **1**, 17<sup>th</sup> International Conference on Advanced Laser Technologies-**ALT09**, September 27 – October 2, 2009 **Antalya**.
4. H. Duran Yıldız, “Free Electron Laser, Laser Parameters Optimization with Genesis and Glad Codes.”, **MATHEMATICAL & COMPUTATIONAL APPLICATIONS**, **Volume 16**, # **3**, pp. **659-668**, 22 March 2011.
5. H. Duran Yıldız, R. Cakir, D. Porsuk, “Design and Simulation of 3½ - cell Superconducting Gun Cavity and Beam Dynamics Studies of the SASE-FEL System at the Institute of Accelerator Technologies at Ankara University”, **NIMA**, 2015.

**Ek-6****Proje çalışmaları boyunca proje kapsamında yapılan ve çalışmalarını devam eden doktora ve yüksek lisans tezleri:**

1. Hatice Yılmaz, 2010 yılında yüksek lisans tezini tamamladı, başlık: “Turkish Accelerator Center, , Structure of optic cavity system and calculation of parameters”, Dumlupınar Üniversitesi.
2. Metin Aydar, 2011 yılında yüksek lisans tezini tamamladı, başlık: “Turkish Accelerator Center, Simulation of SASE and IR-SEL System with GENESİS 1.3 Code”, Dumlupınar Üniversitesi.
3. Ozkan Sahin, 2011 yılında doktora tezini tamamladı, başlık: “Gazlı Dedektör Benzetişimi için Yeni Yöntemler”, Uludağ Üniversitesi
4. Mustafa Bicer, 2012 yılında yüksek lisans tezini tamamladı, başlık: “Reserach and simulations of Electron dump system for Superconducting linac”, Gazi Üniversitesi
5. Ayşe Bat, 2012 yılında yüksek lisans tezini tamamladı, başlık: “Simulations of electron gun of self amplified stimulated emission laser systems.”, Dumlupınar Üniversitesi.
6. Gökhan Coşkun, 2013 yılında yüksek lisans tezini tamamladı, başlık: “Undulator Structure simulations of self amplified stimulated emission laser systems”, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi.
7. Dilaver Porsuk, yüksek lisans tez çalışmaları devam etmektedir, başlık: “Simulations of Accelerator systems and Normal and Superconducting cavity design”, Dumlupınar Üniversitesi.
8. Ayşe Dilara Tetik, yüksek lisans tez çalışmaları devam etmektedir, başlık: “Türk Hızlandırıcı Merkezi, SASE Serbest Elektron Lazer Tesisinde Undulatrör Sistemi”, Dumlupınar Üniversitesi.

## THM SASE SEL TESİSİ TASARIM RAPORU

9. Esra Demirhan, yüksek lisans tez çalışmaları devam etmektedir, başlık: “Türk Hızlandırıcı Merkezi, SASE Serbest Elektron Lazer Tesisinde Lazer Optimizasyon Çalışmaları”, Gazi Üniversitesi.
10. Mustafa Biçer, doktora tez çalışmaları devam etmektedir, başlık: TAC SASE FEL Project, Electron Dump System with FLUKA Code and Determining Dump Material Properties”, Ankara Üniversitesi.