TÜBİTAK

Radyo Frekans Dörtkutuplusu Tasarımı Ve Benzetimi

Program Kodu: 1005

Proje No: 114F106

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. Orhan ÇAKIR

Yurt Dışı Araştırmacı:
Doç. Dr. Gökhan ÜNEL

Bursiyerler:
Görkem TÜREMEN
Halime Betül YASATEKİN
Emre ÇELEBİ

NİSAN 2016
ANKARA

TÜBİTAK

ÖNSÖZ

Günümüzde parçacık hızlandırıcılarının çok geniş bir yelpazede kullanım alanı mevcuttur. Protonları ve hafif iyonları hızlandırmak üzere 70'li yılların sonunda icat edilen radyo frekans dört kutuplusu (RFQ), hızlandırıcıların en önemli bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Bir RFQ'nun tasarımının yapılması için bilgisayar yazılımları son derece gerekli ve kaçınılmazdır. Dünyada hali hazırda kullanımda olan ve sayıları 5'i geçmeyen birkaç tane yazılım mevuttur. Türkiye'nin yazılım konusunda dışa bağımlılığını azaltmak amacıyla tasarlanmaya başlanan DEMIRCI yazılımı, TÜBİTAK tarafından 114F106 nolu 1005-Ulusal Yeni Fikirler ve Ürünler Araştırma Destek Programı kapsamında desteklenmiştir. Bu proje kapsamında Türk yapımı bir RFQ tasarım yazılımı geliştirilmiş, dünyadaki diğer RFQ tasarım yazılımlarının yanında yer alması ve bilimsel çalışmalara katkıda bulunması amaçlanmıştır.

Bu proje TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Projenin gerçekleşmesinde ve son ürünün ortaya çıkmasında destekleri için TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

TÜBİTAK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....ii

İÇİNDEKİLER.....iii

TABLO VE ŞEKİL LİSTELERİ.....iv

ÖZET.....v

ABSTRACT.....vi

1. GİRİŞ.....1

2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÖZETİ.....1

3. GEREÇ VE YÖNTEM.....2

4. BULGULAR.....7

4.1. Çok Terimli Potansiyel Hesabı.....8

4.2. Yazılımın Test Edilmesi.....14

4.3. Bulgularla İlgili Yapılan Yayınlar ve Toplantılarda Sunulan Bildiriler.....14

5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....15

KAYNAKLAR.....16

EKLER.....17

TÜBİTAK

TABLO VE ŞEKİL LİSTELERİ

Tablo 1. Potansiyeldeki hesaplanan 8 terimin katsayılarının karşılaştırılması.....10

Tablo 2. Proje kapsamında yapılan çalışmaların yayın, bildiri ve tez çıktıları.....14

Şekil 1. Demirci'nin Windows işletim sistemi üzerinde çalışan sürümü.....6

Şekil 2. Demirci'nin Pardus linux işletim sistemi üzerinde çalıştırılması.....7

Şekil 3. Demirci ana pencere.....8

Şekil 4. Demirci ile Lidos sonuçlarının karşılaştırılması.....8

Şekil 5. Sonlu eleman hesabı (SEH) yönteminde kullanılan geometri.....9

Şekil 6. Demirci ile Toutatis sonuçlarının karşılaştırılması.....11

Şekil 7. Potansiyel hesabı karşılaştırılması ve Gauss eğri yakıştırması.....11

Şekil 8. Grafiksel arayüzün (sürükle-bırak) kullanımı.....12

Şekil 9. Kanat şekli.....12

Şekil 10. Demetin yayınım elipsi.....13

Şekil 11. Tuzluk yöntemi ile yayınım ölçülmesi.....13

TÜBİTAK

ÖZET

Radyo frekans dörtkutuplu (RFQ) son yıllarda geliştirilen en önemli iyon hızlandırma yöntemlerinden biridir. İyon hızlandırıcılarında, kaynaktan hemen sonra, düşük enerjili demeti en etkin işleme yöntemi olan ve radyo frekansında çalışan dört-kutuplu hızlandırma kovuğu, icat edildiği yıldan beri, bütün modern hızlandırıcıların ayrılmaz bir parçası olarak kendini ispatlamıştır. RFQ tasarımı yapmak için kovuk içindeki elektromanyetik alanların tam bir hesabına ve yüklü parçacıkların bu alan içindeki davranışlarının incelenmesine gereksinim vardır. Söz konusu hesaplamalar tamamen bilgisayar yardımı ile yapılmış ve RFQ tasarımına odaklı özel programlar ortaya çıkmıştır. Bu proje RFQ tasarımında kullanılmak üzere bir yazılım geliştirmek ve Türkiye'yi bu alanda içinde olduğu teknolojik açıdan dışa bağımlı durumdan kurtarmak üzerine yapılmıştır. Proje çalışanlarının söz konusu yazılımı geliştirmek için gereken bilgi birikimi (gerek yazılım bilgisi, gerekse hızlandırıcı bilgisi) kullanılarak oluşturulmuş olan yazılımın Unix tabanlı olması, dolayısıyla ulusal bir işletim sisteminde de çalışması amaçlanmıştır. Bunun yanında diğer Unix/Linux sürümlerine ve hatta Windows tabanlı işletim sistemlerine de uygun şekilde çalıştırılabilir hale getirilmiştir. Gereken hesapların yüksek duyarlılıkta ve doğru olarak yapılabilmesi için GNU yapılanmasının bilimsel işlev ve sonsuz duyarlılık kütüphanelerinden yararlanılmıştır. Bunun yanında veri gösterimi ve benzeri grafik yordamlar için de CERN'de geliştirilen açık kaynaklı ROOT program ve kütüphanesi kullanılmıştır. Kütüphaneleri kullanarak asıl hesaplamaları yani RFQ tasarımını yapan program ise modern programlama yöntemleri ile nesne yönelimli olarak C++ dilinde yazılmıştır. Tasarlama yöntemi ise tamamen kullanıcı dostu olarak grafiksel yöntemlerle yapılmıştır. Projede hazırlık aşamasında 2 terimli potansiyel ile bir araştırma prototipi oluşturulmuş, daha sonra 6 terim daha eklenerek 8 terimli potansiyel ile hesaplamalar yapılmış ve iyi bir duyarlılıkla ileri hesapların yapılabildiği gösterilmiştir. Kullanımı için de basit bir grafik arayüzü yazılmış ve kullanıcı etkileşimi test edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Radyo Frekans, Dörtkutuplu, Tasarım, Benzetim

ABSTRACT

Radio Frequency Quadrupole (RFQ) cavities are one of the most important techniques for ion acceleration developed in the last few decades. The most efficient method of processing the ion beam, right after the ion source, is the usage of a quadrupole accelerating cavity operating at radio frequency. Since its invention, the RFQ has proven itself as an indispensible part of all modern ion accelerators. RFQ concept has moved from drawing board to production, the accurate calculation of the electromagnetic fields inside the cavity and of the ion beam's behavior inside the field is needed. These calculations were always made with the help of computers paving the way for dedicated programs to design RFQs.

This project is about the development of a software package aiming to be used for designing an RFQ, thus saving Turkey from its present heavily software dependent position in this field. Using the necessary computing and accelerator science knowledge from project members, the planned software is aimed for Unix-like systems, making it compatible with a national operating system, also keeping an open door for other Unix/Linux distributions and Windows based operating systems. To ensure the high precision and correctness of the calculations, the infinite precision and scientific libraries from GNU foundation have been used. The open source ROOT program and library package developed at CERN have been used for the data display and other graphics routines. The main design software, which will benefit from these libraries, will be constructed with the modern software design tools and in an object oriented language, namely C++. The design procedure will be user friendly, in a completely graphical environment. As a preparatory work for this project, an exploratory prototype has been constructed. Although the prototype uses a simple two term potential, the 6 term potential is used for the field calculations, a simple graphical user interface has also been added to the prototype to test the implementation possibilities and the user interactions in a graphical environment.

Keywords: Radio Frequency, Quadrupole, Design, Simulation

1. GİRİŞ

Parçacık hızlandırıcıları birçok alanda kullanılmaktadır. Başlangıçta kaynaktan hemen sonraki hızlandırma yöntemi demetin kalitesini etkilemektedir. Proton veya iyon hızlandırıcılarında radyofrekans dörtkutuplusu (RFQ) sistemin kullanılması gerekli hale gelmiştir. Bu sistemlerde temelde üç işlev gerçekleşir: odaklama, paketleme ve hızlandırma. Bu işlevlerin en iyi şekilde yapılabilmesi için ayrıntılı bir tasarım ve ileri derecede bir simulasyon yapılması gerekli olduğu görülmüştür. Ülkemizde RFQ tasarımı ve simulasyonu yapmak için yerli bir yazılım bulunmamaktadır. Ayrıca, bu programlar sadece bazı ülkelerin tekelinde kalmıştır, ve ticari programların fiyatları da oldukça yüksek seviyededir.

Bu proje çalışmasında, ülkemizde ihtiyaç duyulan hızlandırıcı alanındaki uygulamalar için RFQ sisteminin simulasyonunu ve tasarımını yapabilen tek ve bağımsız çalışabilen bir yazılım ortaya çıkmıştır. Yazılıma Demirci ismi verilmiştir, ve kullanıcıların programı kolay kullanabilmeleri için bir kullanıcı kılavuzu hazırlanmıştır.

2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÖZETİ

Bir RFQ tasarlanırken geometrinin simetrik olmaması ve el ile tasarımın zor olması nedeniyle farklı fiziksel süreçlere odaklanan en az iki tasarım programına ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlardan biri elektromanyetik tasarım programı diğeri ise kanat tasarımı ve demet dinamiği programıdır. Bu projenin konusu bir RFQ‘nun kanat ucu yapısını tasarlayarak bu yapı içinde demet dinamiği yapabilecek bir program geliştirmek olarak belirlenmiştir.

Elektrik dörtkutuplusu kuvvetleri, düşük enerjili parçacıkların hızlarını artırmaz, fakat bir RF dalgası tarafından üretilen elektrik alan olursa, elektrik dörtkutuplusu içerisinde ilerleyen parçacık demeti değişken alanla karşılaşır. Kapchinsky'nin çalışması, dörtkutuplu alanı üretmek için elektrotlara sinus eğrisi gibi değişen bir modülasyonu eklemek üzerinedir. Bu modülasyon fazladan boyuna elektrik alan bileşeni üretmek içindir. Zamanla değişen boyuna alanın, parçacık demetinin hızı ve fazıyla eşlenerek odaklama ve hızlandırma sağlayacağı düşünülmüştür. İlk problem bu dörtkutuplu RF alanının elde edilmesinde yaşanmış ve bu da Protvino Yüksek Enerji Fizik Enstitüsü'nde (IHEP) çalışmakta olan Tepliakov'un dikkatini çekmiştir. Birlikte çalışıp 1969'da ilk makalelerini çıkarmışlardır (Kapchinsky 1970). Bu çalışmalar ışığında ilk deneysel üretim 1974'te yapılmıştır. 1980'lerde ilk RFQ ilke ispatı amacıyla üretilmiş ve sadece birkaç saat çalıştırılabilmiştir (Vretenar 2011). CERN’de 520 keV'lik ilk RFQ (Linac1) 1984’te ve 750 keV'lik ikinci bir RFQ (Linac2) 1.8 m uzunluğunda daha verimli

olacak şekilde 1993'te üretilmiştir (Gilardoni ve Manglunki 2014a; Gilardoni ve Manglunki 2014b). Günümüzde birçok ülkede, çalışan yüzlerce RFQ bulunmaktadır (Lombardi 2005). Kapchinsky ve Tepliakov'un çalışmalarının ardından günümüze kadar gelen RFQ'larla birlikte birkaç tane de tasarım programı geliştirilmiştir. Bunlardan öne çıkan programlar arasında PARMTEQ (Crandall vd. 1996), LIDOS RFQ DESIGNER (Lidos 2000) ve TOUTATIS (Duperrier 2000) programları vardır.

LIDOS RFQ DESIGNER yazılım paketi, kısaca LIDOS, RFQ tasarımının ve uzay yükü baskın demet benzetiminin yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu yazılım paketi tüm matematiksel hesaplamaları 3 adımda gerçekleştirmektedir ve yalnızca Windows ortamında çalıştırılabilmektedir. TOUTATIS ise RFQ içerisindeki iyon demetinin iletiminin benzetimini yapan bir programdır. Parçacıkların hareketini ve elektrik alanını, kovuk içinde Poisson denklemini çözerek hesaplamaktadır. Hem Windows, hem de Unix ortamlarında çalışmaktadır. Ancak yalnızca demet dinamiği hesabı yaptığı için başka bir programdan elde edilecek girdi kütüğüne ihtiyacı vardır. PARMTEQ programı ise Türkiye'ye satılmamakla birlikte hem tasarım hem de demet dinamiği benzetimini yapmaktadır. CERN veya Fermilab gibi uluslararası araştırma merkezlerinde bu yazılımla tasarlanmış RFQ'lar üretilmekte ve başarı ile çalıştırılmaktadır.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Programı geliştirebilmek için öncelikle kovuk tasarımında kullanılacak fiziksel değişkenler incelendi ve öğrenildi. Bunlar: Kovuk içindeki elektrik alanların parçacık üzerindeki odaklama gücü ile ilgili bir ölçü olan odaklama parametresi,

$$B_0 = \frac{q * V}{m_p * c^2} * \frac{\lambda^2}{a^2}$$

Kovuk içindeki elektrik alanların hızlandırma verimi,

$$\mathrm{A} = \frac{m^2 - 1}{m^2 I_0(k * a) + I_0(m * k * a)}$$

Kovuk içindeki elektrik alanların odaklama verimi,

$$\chi = \frac{I_0(k*a) + I_0(m*k*a)}{m^2 I_0(k*a) + I_0(m*k*a)}$$

Kovuk içindeki elektrik alanların parçacıklar üzerindeki dağıtma gücü,

$$\Delta = \frac{\pi^2}{2} * \frac{q*V}{m*c^2} * \frac{A}{\beta^2} * sin\phi_s$$

Kovuk içindeki parçacıkların belirli bir oda uzunluğu için kinetik enerji kazancı,

$$\Delta W = q * E_0 * T * I_0(k*a) * C_l * \cos\phi_s$$

Kovuk içindeki boyuna elektrik alanın bir oda içindeki tepe değeri,

$$E_0 = \frac{2*A*V}{\beta*\lambda}$$

RFQ kanatlarının üzerindeki tepe yüzey elektrik alanı,

$$E_s = \frac{\kappa*V}{r_0}$$

Kovuk içindeki elektromanyetik alanların kovuk duvarlarında neden olduğu güç kaybı,

$$P_D = \sqrt{\frac{4+3*\pi}{32*\sigma}} * (\omega_0 * C)^{3/2} * {V_0}^2$$

Kovuk içinde depolanan elektromanyetik enerji,

$$W = \frac{C*{V_0}^2}{2}$$

Kovuğun elektromanyetik alanları ne kadar verimli depolayabildiğini gösteren bir ölçü olan kalite ekteni,

$$Q = \frac{\omega_0 * W}{P_D}$$

Yukarıda adı geçen formüllerde kullanılan simgeler ve anlamları şu şekildedir: q parçacık yükü, m_p parçacık kütlesi, V kanatlar arası gerilim, λ RF dalga boyu, c ışık hızı, a kanatlar arasındaki en küçük açıklık, m kiplenim etkeni, k RF dalga sayısı, β relativistik hız, φ_s eşzamanlı evre, T transit zaman etkeni, C_l oda uzunluğu, κ alan çoğaltma etkeni, r_0 ortalama açıklık yarıçapı, σ malzeme iletkenliği, ω_0 açısal frekans, C kapasitans.

Projede iş paketleri kapsamında matematiksel formülasyon yapılmış ve tasarım için en uygun parametreler belirlenmiştir. Proje üyelerimizden iş paketi ile ilgili yardımcı araştırmacı, doktora öğrencisi ve yüksek lisans öğrencileri bu parametreleri inceleyip öğrenmiş ve sonrasında RFQ'nun geometrik tasarımını yapabilir hale gelmişlerdir.

El ile yapılan geometrik tasarım çalışmalarından sonra programın bir diğer özelliği olacak olan demet dinamiği hesaplarını yaptırabilmek için bu konudaki formüllerin bilinmesi gerekir. Bu amaç için öncelikle 2 terimli potansiyel fonksiyonu sonra da 8 terimli potansiyel fonksiyonu ile ilgili formüller incelenerek öğrenildi. Daha sonra, bilinmesi gereken elektrik alanlar bu potansiyellerden elde edildi. Bir RFQ hücresi için elektrotlar arasındaki potansiyel,

$$U(r,\theta,z) = \frac{V}{2}\left[\sum_{m=1}^{\infty} A_{0m}(r/r_0)^{2m}\cos(2m\theta) + \sum_{m=0}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty} A_{nm} I_{2m}(nkr)\cos(2m\theta)\cos(nkz)\right]$$

olarak verilir. Burada *r*, ⚠ ve *z* silindirik koordinatları gösterir, *V* kanatlar arası gerilimin genliğini, *k* dalga sayısını, I_{2m} modifiye Bessel fonksiyonlarını ve A_{nm} ise potansiyelin çok kutup açılımı katsayılarını gösterir.

Çok terimli potansiyel için simetri ve seçim koşulları kullanılarak, dört-kanatlı RFQ yapısında sayısal demet dinamiği hesapları için, sekiz terimli potansiyel fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılmıştır:

$$U(r,\theta,z)=\frac{V}{2}[A_{01}(r/r_0)^2\cos(2\theta)+A_{03}(r/r_0)^6\cos(6\theta)$$
$$+A_{10}I_0(kr)\cos(kz)+A_{30}I_0(3kr)\cos(3kz)$$
$$+A_{12}I_4(kr)\cos(kz)\cos(4\theta)+A_{32}I_4(3kr)\cos(3kz)\cos(4\theta)$$
$$+A_{21}I_2(2kr)\cos(2kz)\cos(2\theta)+A_{23}I_6(2kr)\cos(2kz)\cos(6\theta)]$$

Burada sekiz terim (8 terim) potansiyel için elektrik alan bileşenleri analitik olarak $\vec{E}=-\vec{\nabla}U$ işlemi ile hesaplanmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir,

$$E_r=-\frac{\partial U}{\partial r}=-\frac{V}{2}[2A_{01}(r/r_{0^2})\cos(2\theta)+6A_{03}(r^5/r_{0^6})\cos(6\theta)$$
$$+A_{10}kI_1(kr)\cos(kz)+3A_{30}kI_1(3kr)\cos(3kz)$$
$$+A_{12}k(I_3(kr)+I_5(kr))\cos(kz)\cos(4\theta)/2+3A_{32}k(I_3(3kr)+I_5(3kr))\cos(3kz)\cos(4\theta)/2$$
$$+A_{21}k(I_1(2kr)+I_3(2kr))\cos(2kz)\cos(2\theta)+A_{23}k(I_5(2kr)+I_7(2kr))\cos(2kz)\cos(6\theta)]$$

$$E_\theta=-\frac{1}{r}\frac{\partial U}{\partial\theta}=-\frac{V}{2r}[-2A_{01}(r/r_0)^2\sin(2\theta)-6A_{03}(r/r_0)^6\sin(6\theta)$$
$$-4A_{12}I_4(kr)\cos(kz)\sin(4\theta)-4A_{32}I_4(3kr)\cos(3kz)\sin(4\theta)$$
$$-2A_{21}I_2(2kr)\cos(2kz)\sin(2\theta)-6A_{23}I_6(2kr)\cos(2kz)\sin(6\theta)]$$

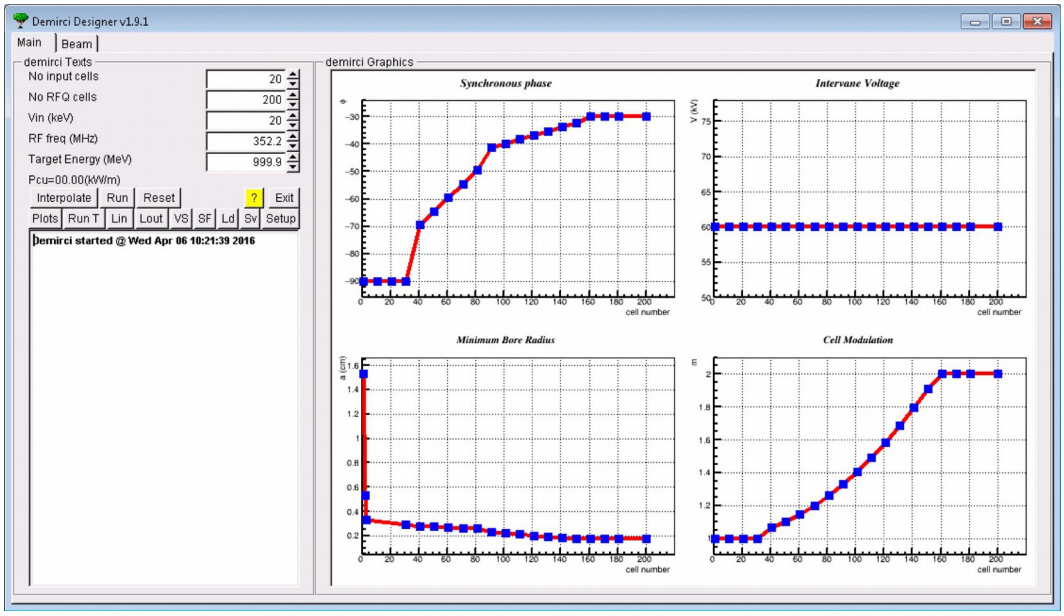
$$E_z=-\frac{\partial U}{\partial z}=-\frac{V}{2}[-A_{10}kI_0(kr)\sin(kz)-3A_{30}kI_0(3kr)\sin(3kz))$$
$$-A_{12}kI_4(kr)\sin(kz)\cos(4\theta)-3A_{32}kI_4(3kr)\sin(3kz)\cos(4\theta)$$
$$-2A_{21}kI_2(2kr)\sin(2kz)\cos(2\theta)-2A_{23}kI_6(2kr)\sin(2kz)\cos(6\theta)]$$

Buna göre iki terim potansiyel kullanıldığında sadece A_{01} ve A_{10} katsayılı terimler yer alır. Elektrik alanın *z*-bileşeni demet üzerinde hızlandırıcı kuvvet uygular. Bu alanın zaman bağımlılığı fonksiyonu da düşünülerek birim hücre üzerinden integrali alınarak enerji kazancı hesaplanabilir. Diğer bileşenlerdeki terimlerin odaklama ve dağıtma özellikleri bulunmaktadır. Buradaki bütün katsayıların hesaplanmasında hem analitik hem de sayısal yöntemler araştırılmış ve kullanılmıştır. Sonuç olarak belirli bir demetin tasarlanan bir RFQ içinde demet dinamiğini gerçekleştirebilmek için gerekli olan bilgi edinilmiştir.

Programı geliştirmek için gerekli bilgiler tamamlandıktan sonra program tasarımında nelere öncelik verilmesi gerektiğini öğrenebilmek için hızlandırıcı camiası içinde bir anket çalışması yapılarak kullanıcı beklentileri belirlendi. 65 kişilik kullanıcı topluluğu üzerinde gerçekleştirilen anket sonuçlarını gösteren bir kullanıcı beklenti belgesi oluşturuldu (EK-2). Anket sonucundaki geri-dönüşler dikkate alınarak program tasarımı oluşturulmaya başlandı.

Anket sonuçlarına uygun şekilde kullanıcıların istekleri göz önünde bulundurularak program tasarımının yapılabilmesi için gerekli adımlar belirlendi. Yapılacak bu tasarım ile ilgili olarak yazılım tasarım belgesi oluşturuldu (EK-3). Belgede adı geçen amaçlara yönelik program tasarımı yapıldı.

DEMIRCI'nin Microsoft Windows işletim sisteminde de kullanılabilmesine yönelik alınan geri bildirimler üzerine Windows üzerinde de çalışan bir sürümü geliştirildi. Şekil 1' den Windows üzerinde çalışan DEMIRCI versiyonunun bir ekran görüntüsü görülebilir.

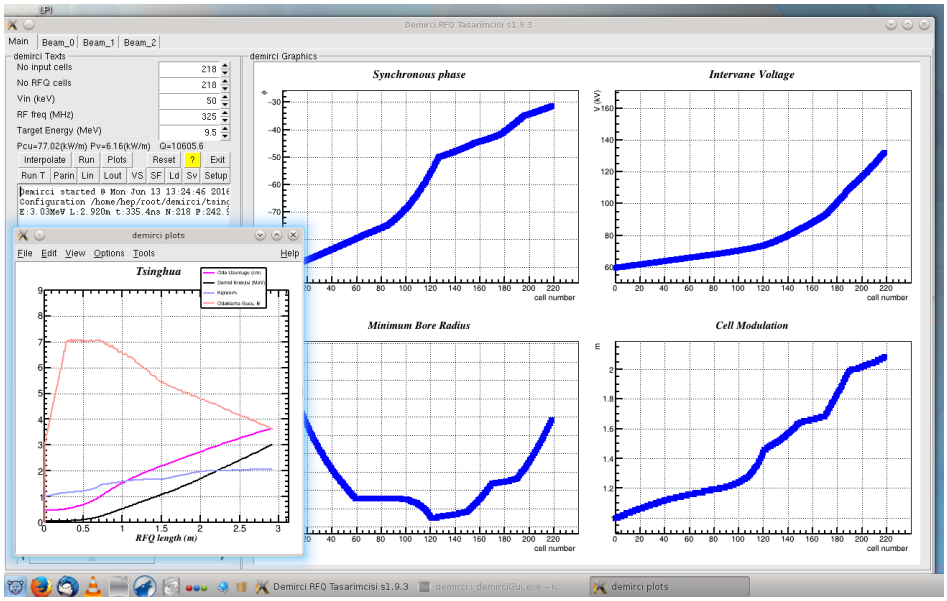


Şekil 1. Demirci'nin Windows işletim sistemi üzerinde çalışan sürümü

Program gereksinimleri olarak ücretli herhangi bir başka yazılıma bağlı kalınmadan geliştirilmeye çalışıldı. DEMIRCI'nin Windows üzerinde derlenme aşamasında "Gnu Scientific Library", ROOT ve Microsoft Visual Studio C++ version 2010 Express yazılımları kullanıldı. Bahsi geçen bu programlar tamamiyle serbest olup aşağıdaki bağlantılardan indirilerek kurulum yönergeleri takip edilebilir.

- https://root.cern.ch/downloading-root
- http://www.gnu.org/software/gsl/
- https://www.visualstudio.com/code-vs

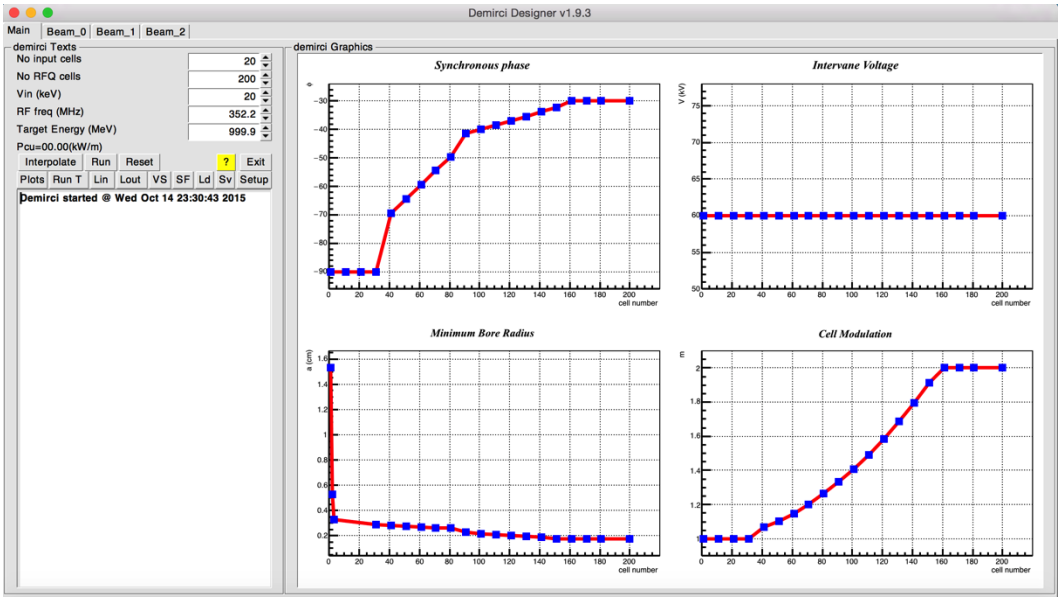
Hazırlanan yazılımın Unix tabanlı olması, dolayısıyla Pardus gibi ulusal bir işletim sisteminde de çalışması amaçlanmıştır. Burada da benzer şekilde ROOT programı, GSL kütüphanesi, Gnuplot ve C++ derleyicisi kurulup hazırlandıktan sonra Demirci yazılımı Pardus (Pardus Kurumsal 5 Sürümü) üzerine kurulmuş ve aşağıdaki şekildeki (Şekil 2) çalışma ekran görüntüsü alınmıştır.



Şekil 2. Demirci'nin Pardus linux işletim sistemi üzerinde çalıştırılması

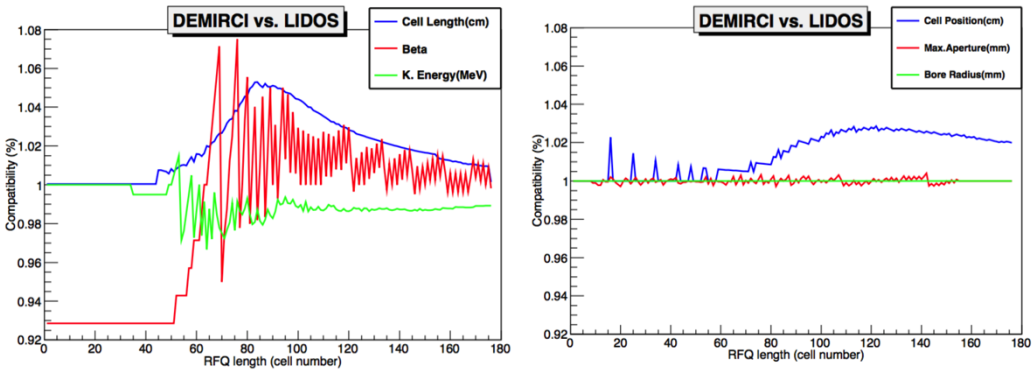
3. BULGULAR

Gerekli formüller incelenip kullanıcı beklentileri toplandıktan sonra ilgili bağıntılar yazılıma tümlenerek RFQ geometrik tasarımı ve 2 terimli potansiyel ile demet dinamiği yapabilecek bir kütüphane oluşturuldu. Oluşturulan bu kütüphanenin üzerine ROOT (Brun 1996) ortamında bir arayüz yazılarak kullanıcı ile grafiksel etkileşim mümkün hale getirildi (Şekil 3). Aynı zamanda komut satırı arayüzü de kullanılabilir tutularak kullanıcılara dilediklerini seçme şansı verildi.



Şekil 3. Demirci ana penceresi

Program bir RFQ'nun kullanıcı parametrelerine göre kanat-ucu geometrisini tasarlayabilecek şekilde geliştirildikten sonra bir ticari yazılım olan LIDOS ile karşılaştırma çalışmaları yapıldı. 2 terimli potansiyel fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilen geometrik tasarım sonuçlarının LIDOS ile uyumlu (< %5) olduğu görüldü, Şekil 4.



Şekil 4. Demirci ile Lidos karşılaştırması

4.1. Çok Terimli Potansiyel Hesabı

RFQ için gerçekleştirilen hesaplamaların üretime yönelik daha hassas sonuçlar verebilmesi için potansiyel fonksiyonuna fazladan 6 terim daha eklenmesi gerektiği bilinmektedir. Bu amaç için 8 terimli potansiyel fonksiyonundaki eksik katsayıları hesaplamak amacıyla farklı

yöntemler incelendi. Bu yöntemler sanal yük yöntemi ve sonlu elemanlar hesabı (SEH) olarak sıralanabilir. Daha önce yapılan çalışmaların sonuçlarına göre SEH yöntemi daha hızlı sonuç verdiği için bu yöntem DEMİRCİ programı dahilinde kullanılmak üzere öğrenildi.

Bu yöntemde yapılanlar: Herhangi bir RFQ hücresinde potansiyel hesabı yapabilmek için önce ilgili hücre x ve y yönlerinde sonlu sayıda elemana bölünür. Bu dik elemanlar daha sonra koordinat dönüşümü ile aşağıda solda görülen (Şekil 5) ve çözülmek istenen probleme uygun hale getirilir. Bunlara daha sonra z yönü de eklenerek 3 boyutlu isoparametrik 20li tuğlalar elde edilir. Bu tuğlalar için önce yerel sertlik matrisi (stiffness matrix) daha sonra da konum değerleri yazılır. Bunlardan yola çıkılarak yazılan bağlantı matrisi (connection matrix) kullanılarak genel sertlik matrisi yazılır. Burada hedeflenen yöntem elektrik potansiyeli bulmak için diferansiyel denklemi SEH ile çözmek için Mu=F eşitliğini oluşturmaktır. Ancak RFQ hücreleri için kaynak terimi (F) daima sıfırdır ve yine aynı problemde sınır koşulları daima Dirichlet tipinde ve sadece kanat uçlarında tanımlıdır.

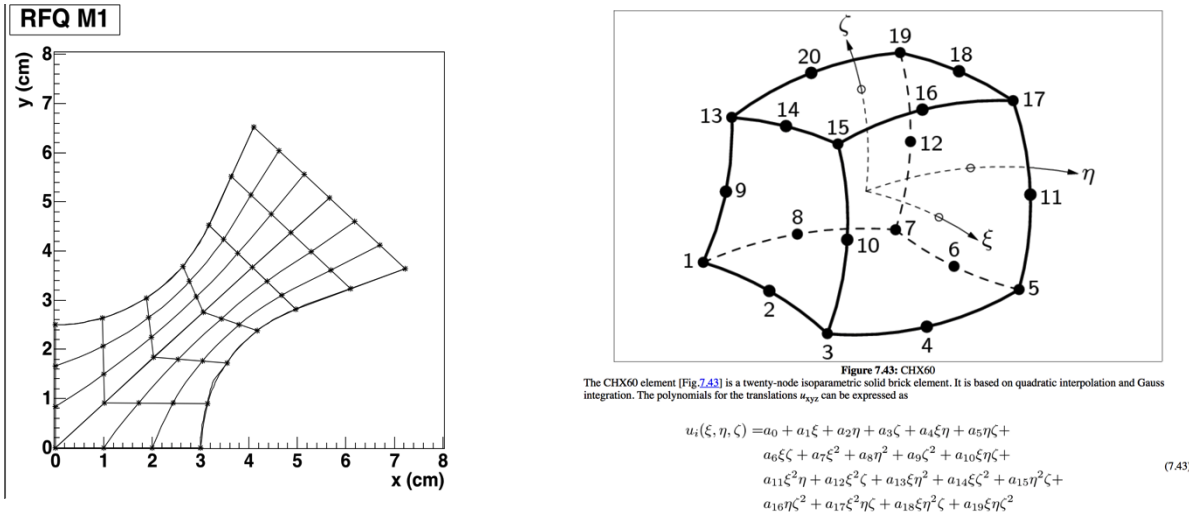


Figure 7.43: CHX60

The CHX60 element [Fig.7.43] is a twenty-node isoparametric solid brick element. It is based on quadratic interpolation and Gauss integration. The polynomials for the translations u_{xyz} can be expressed as

$$\begin{aligned} u_i(\xi,\eta,\zeta) = & a_0 + a_1\xi + a_2\eta + a_3\zeta + a_4\xi\eta + a_5\eta\zeta + \\ & a_6\xi\zeta + a_7\xi^2 + a_8\eta^2 + a_9\zeta^2 + a_{10}\xi\eta\zeta + \\ & a_{11}\xi^2\eta + a_{12}\xi^2\zeta + a_{13}\xi\eta^2 + a_{14}\xi\zeta^2 + a_{15}\eta^2\zeta + \\ & a_{16}\eta\zeta^2 + a_{17}\xi^2\eta\zeta + a_{18}\xi\eta^2\zeta + a_{19}\xi\eta\zeta^2 \end{aligned} \quad (7.43)$$

Şekil 5. Sonlu eleman hesabı (SEH) yönteminde kullanılan geometri

Tipik olarak x, y, z de 6x6x8 eleman alındığında M matrisi 1589x1589 elemanlı çıkmaktadır. Ancak bu matrisin diyagonal olmayan elemanlarının sınır olduğu göz önüne alınarak M önce sparse matrix haline getirilir. Bu adımdan sonra u değerlerinin bulunması için conjugate gradiyent metdodu kullanılır. Yakınsama kabul edilebilir hata en çok 10^{-10} olarak verildiğinde, u değerlerinin bulunması yaklaşık 200 yineleme sürer ve bu yine yaklaşık 30 saniye zaman alır. Elde edilen u değerlerinin minimum bore yarıçapı içerisinde kalan düğüm

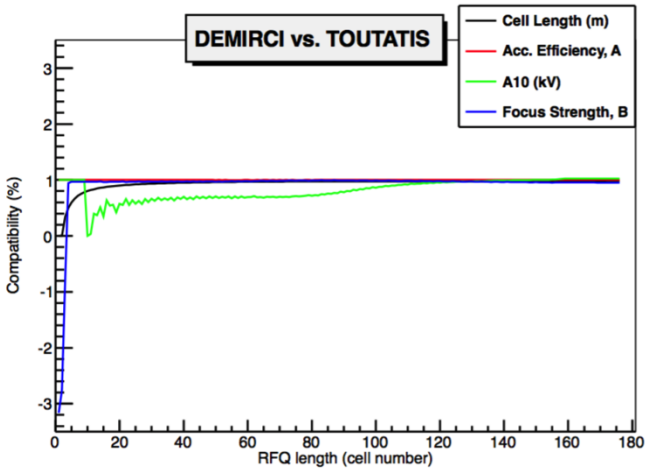
noktalarındaki değerlerine MINUIT programı kullanılarak yapılan eğri oturtmasından (curve fit) çok terimli potansiyelin ilk 8 teriminin katsayıları bulunur.

Bu çalışma REFX'deki makale ile karşılaştırılmış ve sonuçlar aşağıdaki tabloda özetlenmiştir. Burada her hücre için ilk satır sanal yük yöntemi, ikinci RFQcoef yazılımı ile yapılan hesapları üçüncü satır ise DEMİRCİ sonuçlarını göstermektedir. Görüleceği üzere DEMİRCİ sonuçları uzun zaman alan sanal yük yöntemi sonuçlarına oldukça yakındır.

Tablo 1. Potansiyeldeki hesaplanan 8 terimin katsayılarının karşılaştırılması

Cell	a	m	cl	C10	C00/a2	C11	C01/a6	C30	C20	C31	C21
				A10	A01	A12	A03	A30	A21	A32	A23
20	0.409	1.020	0.58	0.00606	5.73007	0.05304	4.94852	0.0	-0.00003	0.0	0.00072
RFQcoef				0.00601	5.74846	0.05031	4.41814	0.0	-0.00002	-0.00001	-0.00077
demirci				0.00553	5.72866	0.06878	4.95937	-0.00000	0.00002	-0.00001	0.00070
100	0.392	1.111	0.68	0.04307	5.74320	0.45675	4.88818	0.0	0.00018	0.0	0.00087
RFQcoef				0.04296	5.75630	0.48357	4.03974	-0.00001	0.00022	-0.00002	0.00628
demirci				0.03898	5.73126	0.63090	4.98608	-0.00000	0.00065	-0.00001	0.00250
140	0.381	1.171	0.92	0.09684	5.74616	1.40462	4.74544	0.00000	0.00076	0.00000	-0.04081
RFQcoef				0.09662	5.75831	1.35976	3.84250	0.00000	0.00096	-0.00015	-0.09994
demirci				0.08693	5.74303	2.59943	4.94224	0.00001	0.00267	0.00009	0.03508

Kovuk kanat-ucu geometrisi tasarlandıktan sonra bu kanatların oluşturduğu elektrik alanlar potansiyel fonksiyonundan (2 veya 8 terimli) hesaplanabilecek hale getirildi. Hesaplanan bu alanların içinde taşınacak çok parçacık demetinin özellikleri kullanıcı tarafından tanımlanabilir hale getirildi. Daha sonra kullanıcı tarafından istenilen demet hesaplanan elektrik alan içinden geçirilerek davranışı incelendi. Öncelikle 2 terim ile gerçekleştirilen bu hesapların sonuçları hem LIDOS hem de TOUTATIS yazılımları ile karşılaştırıldı. RFQ boyunca hücre uzunluğu, hızlandırma verimliliği, A_{10} ve odaklama gücü değişimlerinin TOUTATIS ve DEMIRCI ile yapılan hesaplama sonuçlarının oranı Şekil 6'de gösterilmiştir. Gerçekleştirilen 2 terimli hesap sonuçlarına göre DEMIRCI ile ticari yazılımların uyumlu olduğu görüldü.

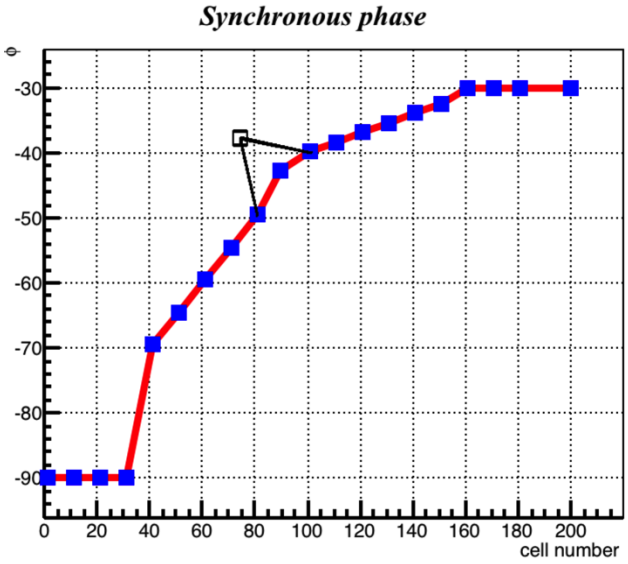


Şekil 6. Demirci ile Toutatis sonuçlarının karşılaştırılması

8 terimli hesaplar sonucunda DEMIRCI'nin diğer ticari yazlımlar ile uyumu ise Şekil 7'de gösterilmiştir. Soldaki resimde minimum bore yarıçapı içinde 20. Hücre için SEH yöntemi ile sanal yük yöntemi ile yapılan elektrik potansiyel hesabın karşılaştırması görülebilir. Sağdaki resimde ise aynı karşılaştırmanın 1boyutlu hali ve buna yapılan bir gauss eğri yakıştırması bulunabilir. Yapılan hata yaklaşık % 0.4 kadardır.

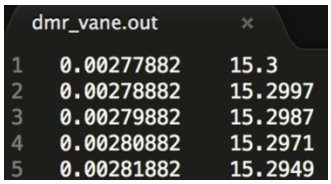
Şekil 7. Potansiyel hesabı karşılaştırılması ve Gauss eğri yakıştırması

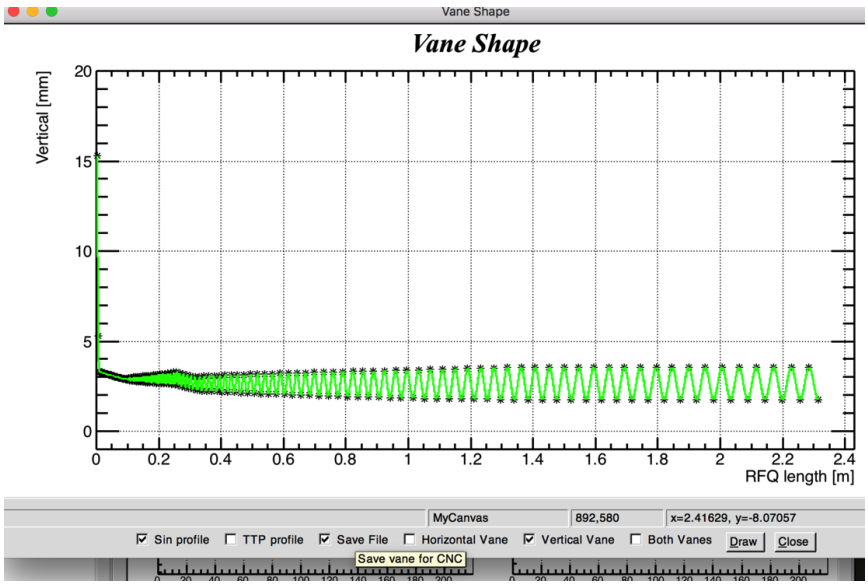
DEMIRCI'nin kütüphane ile ilgili hesapları bittikten sonra kullanıcı isteklerine göre iyileştirmeler yapıldı. Kanat-ucu geometrisini belirleyen parametreler ayarlanırken grafiksel yöntemler (sürükle-bırak) kullanılabilir hale getirildi (Şekil 8).



Şekil 8. Grafiksel arayüzün (sürükle-bırak) kullanımı

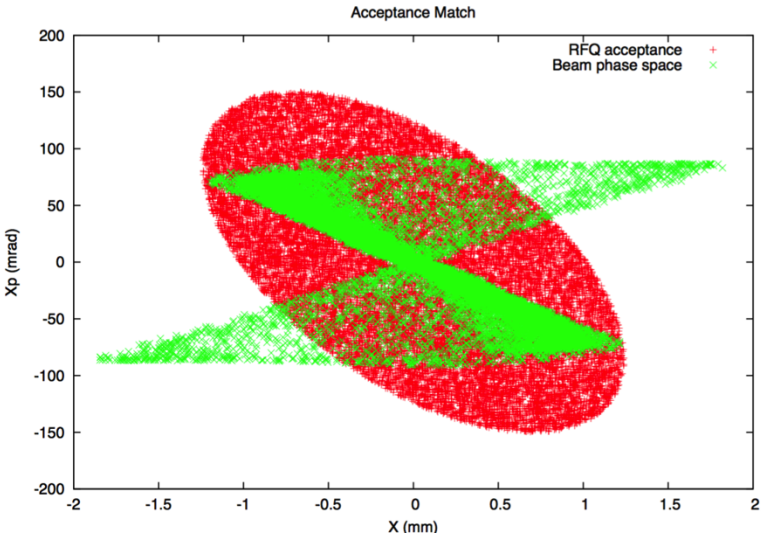
DEMIRCI tarafından tasarlanan ve hesaplanan kovuk geometrisinin rapor başında bahsedilen elektromanyetik çözüm programlarında kullanılabilmesi için gerekli olan 3 boyutlu koordinatlar bir program çıktısı (z (m)-r (mm)) olarak elde edilebilir hale getirildi (Şekil 9).





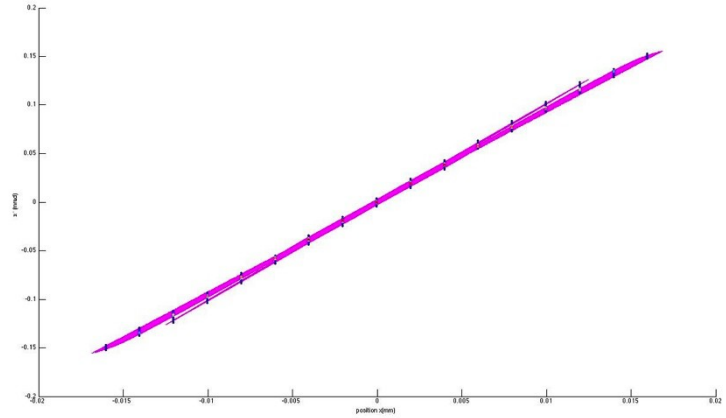
Şekil 9. Kanat şekli

Kovuğu tasarlamak için RFQ'ya gelen demetin yayınım elipsinin kovuğun demet kabul elipsi içinde kalması gereklidir. Program kullanıcısının bu gibi bir durumu sorgulayabilmesi için programa ek bir birim eklenerek Şekil 10'de görüldüğü gibi yayınım karşılaştırması yaptırılabilir hale getirildi. Bu sayede kullanıcının belirleyeceği giriş demetinin, tasarladığı RFQ'ya uygunluğunu inceleyebilmesi sağlandı.



Şekil 10. Demetin yayınım elipsi

Parçacık hızlandırıcılar için yayınımın kritik önemi olduğu bilindiğinden programa, tuzluk yöntemi ile yayınım ölçülmesi amacıyla kullanılacak tuzluğun değişkenlerini yeğleştirecek (optimize edecek) bir birim de eklendi (Şekil 11).



Şekil 11. Tuzluk yöntemi ile yayınım ölçülmesi

Kullanıcıların programı kullanabilmesi için gerekli olan bir kullanım kılavuzu iki dilde (Türkçe-İngilizce) hazırlanarak program ile beraber dağıtılacak hale getirildi (EK-4).

4.2. Yazılımın Test Edilmesi

Hızlandırıcı Alanında Yazılım Geliştirme ve Kullanıcı Potansiyeli Belirlenmesi Anketi Uygulanmıştır. Ankette,

- Hızlandırıcının önemli işlevlerinin benzetimini yapabilen programlar kullanıyor musunuz veya gelecekte kullanmayı düşünür müsünüz?

Sorusuna "Zaten kullanıyorum" veya "Eğitimi verilirse kullanmayı düşünürüm" şeklinde cevaplayanlar ile aynı zamanda

- Hangi tür hızlandırıcı ile ilgilenirsiniz?

Sorusuna "Proton / Hafif iyon düşük beta (β)" veya "Proton / Hafif iyon yüksek beta (β)" şeklinde cevap veren ankete katılan 27 kişiyle kontak kurulmuş ve özelikle düşük beta (β) seçenlerden Demirci'nin başlangıç kullanıcıları potansiyeli belirlenmiştir.

4.3. Bulgularla İlgili Yapılan Yayınlar ve Toplantılarda Sunulan Bildiriler

Yapılan çalışmalarla ilgili yayın ve sunulan bildiriler Tablo 2 de verilmiştir.

Tablo 2. Proje kapsamında yapılan çalışmaların yayın, bildiri ve tez çıktıları

Sıra	**Çıktı türü**	**Yazarlar**	**Başlık**	**Yayın yeri**	**Durumu***
1	Makale	G.Türemen, G. Ünel, B. Yasatekin	A graphical approach to radio frequency	Computer Physics Communications , 192 (2015) 108	Yayınlandı

			quadrupole design		
2	Bildiri	B. Yasatekin, G. Turemen, A. Alaçakır, G. Ünel	Design Studies with Demirci for SPP RFQ	Proceedings of LINAC2014, p.740, 2014, Geneva, Switzerland	Yayınlandı
3	Bildiri	B. Yasatekin, G. Turemen, E. Celebi, G. Unel, O. Cakir	Demirci: An RFQ Design Software	Proceedings of ICAP2015, Shang-hai, China	Yayınlandı
4	Yüksek Lisans Tezi	B. Yasatekin (Danışman: Prof.Dr. Orhan ÇAKIR)	Radyo frekans dört kutuplusu tasarımı ve demet dï-namïğï hesapları	Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü	Kabul edildi

TARTIŞMA VE SONUÇ

Radyo frekans dörtkutuplusu'nun temel bileşenlerini tasarlamak ve benzetimini yapmak amacıyla proje ekibi tarafından Demirci programı hazırlanmıştır. Program hem komut satırından hem de grafik arayüzü aracılığı ile RFQ temel bileşenlerinin hesaplamalarını yapabilir duruma getirilmiştir. Demirci, mevcut RFQ tasarım yazılımlarına kıyasla kullanıcı dostu bir yazılımdır. Program çok kullanılan işletim sistemlerinden Mac OSX, Microsoft Windows ve Linux'da çalışabilmektedir. Bu yazılımın geliştirilmesi ile Türkiye RFQ tasarım alanında dışa bağımlılığını azaltmış, ayrıca bu alanda dünyada birkaç yazılım arasında yer almayı başarmıştır. Proje kapsamında geliştirilmiş olan yazılımla TAEK bünyesinde yapımı devam eden 1-5 MeV RF kovuklu proton hızlandırıcısı yapımı projesinin RFQ tasarımı yapılarak gerekli hesaplamaları yapılmış, bu alanda kullanılan diğer yazılımlarla

karşılaştırmaları yapılarak doğruluğu test edilmiştir. Bu sonuçlar ışığında üretimine geçilmiş bulunan SANAEM RFQ'sunun testleri devam etmektedir. Ortaya çıkan ürünün bu konudaki benzeri yazılımlarla hem girdi çıktı kütüklerinde, hem de sonuçlarda uyumlu olması ana amaçtır. Bu amaca ulaşıldığında ticarileşilerek ulusal ekonomiye ve ArGe çalışmalarına katkı yapılması hedeflenmiştir.

KAYNAKLAR

Brun, R., Rademakers, F. 1996. "ROOT – An Object Oriented Data Analysis Framework", Proceedings AIHENP'96 Workshop, Lausanne, Nucl. Inst. & Meth. In Phys. Res., A 389, 81-86.

Crandall, K.R., Wangler, T.P., Young, L.M., Billen, J.H., Neuschafer, G.H., Schrage, D.L. 1996. "PARMTEQ – RFQ Design Codes", LA-UR-96-1836.

Duperrier, R. 2000. "TOUTATIS: A Radio Frequency Quadrupole Code", Phys. Rev. Vol.3, 124201.

Gilardoni. S., Manglunki. D. 2014a. "Linac1". Report on 50th anniversary of the CERN Proton Synchrotron. https://project-ps50.web.cern.ch/project-PS50/Document_draft/PS50_Linac1.pdf . Son erişim tarihi: 25 Mart 2014.

Gilardoni. S., Manglunki. D. 2014b. "Linac2". Report on 50th anniversary of the CERN Proton Synchrotron. https://project-ps50.web.cern.ch/project-PS50/Document_draft/PS50_Linac2-v2(KH).pdf . Son erişim tarihi: 25 Mart 2014.

Kapchinsky, I.M., Tepliakov, V.A., 1970. "Prib. Tekh. Eksp." 2, 19-22 (Rusça).

Lidos 2000. LIDOS.RFQ.DESIGNER Version 1.3, http://www.ghga.com/accelsoft/, Son erişim tarihi: 25 Mart 2014.

Lombardi, A. 2005. "Radio Frequency Quadrupole", The CERN Accelerator School (CAS), Zeegse. https://cas.web.cern.ch/cas/Holland/PDF-lectures/Lombardi/RFQ.pdf . Son erişim tarihi: 25 Mart 2014.

Pardus Kurumsal 5 Sürüm, https://www.pardus.org.tr/anasayfa, Son erişim tarihi: 15 Nisan 2016.

Turemen, G., Unel, G., Yasatekin, B. 2014. "A Graphical Approach to Radio Frequency Quadrupole Design", Computer Physics Communications (2015) pp. 108-113.

Vretenar, M. 2011. "The Radio-Frequency Quadrupole", CERN Accelerator School (CAS), Spain, CERN Yellow Report CERN- 2013-001, pp.207-223.

EKLER

EK-1. Proje Süresinde İdari Gelişmeler

Projenin başvuru zamanından itibaren değerlendirme, sözleşme ve imzalanması sürecinde uzun zaman geçtiğinden, projede tam zamanlı olarak çalışması planlanan doktora (G.Türemen) ve yüksek lisans öğrencisi (B.Yasatekin) bursiyerlerimiz, başka bir işte çalışmaya başlamışlardır. Bu durumda projemizin süresi içinde iş planı ve zamanlamaya uymak için tam zamanlı çalışacak yeni bir bursiyer öğrenci (E.Çelebi) talebimiz olmuştu. Yenilenen iş-zaman çizelgesi ile birlikte, projemiz bütçesinde yer alan 2 yüksek lisans ve 1 doktora öğrencisi bursiyer olarak değiştirilmiştir ve bursiyer bütçe planı yeniden oluşturulmuştur. Adı geçen bursiyerlerin eğitim alanları ve tez konuları proje konusu ile doğrudan ilgilidir.

Projemize, yüksek lisans öğrencisi E.Çelebi, bursiyer olarak 30/04/2015 tarihinde katılmış ve bursiyer bütçe ayarlaması yapılmıştır.

Projemizin "03.4.9.90 Diğer Görev Giderleri" faslında yer alan bilimsel etkinliğe katılım için ödeneğin (birinci ve ikinci dönem birlikte) kullanılması konusunda talebimiz kabul edilmişti, bununla ilgili olarak proje üyelerimizin yurt dışı bilimsel etkinliğe katılmaları özendirilmiştir.

Proje üyemiz Halime Betül Yasatekin 24 Temmuz 2015 tarihinde Yüksek Lisans Tezi'ni tamamlamış ve başarılı olmuştur. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Lisansüstü Doktora Programına başlamıştır. Tezde proje kapsamında TÜBİTAK desteği belirtilmiştir.

Kamu kurum ve kuruluşları tarafından desteklenen projelerde görevli bursiyerler ibaresine göre, TÜBİTAK tarafından desteklenen projelerde görevli ve herhangi bir kurumda çalışmayan bursiyerlerin özel sigortalılar kapsamına alınması hakkındaki kanun gereği, bursiyerlerimizin Bursiyer SGK Bilgi Formu ve ekinde nüfus cüzdanı fotokopileri 25 Mart 2016 günü Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teslim edilmiştir.

EK-2

Hızlandırıcı Alanında Yazılım Geliştirme ve Kullanıcı Potansiyeli Belirlenmesi Anketi

EK-3

Yazılım Tasarım / Gereksinim Belgeleri

EK-4

Demirci Kullanıcı Kılavuzu – Türkçe ve İngilizce

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. ORHAN ÇAKIR
Proje No:	114F106
Proje Başlığı:	Radyo Frekans Dörtkutuplusu Tasarımı Ve Benzetimi
Proje Türü:	1005 - Yeni Fikirler ve Ürünler
Proje Süresi:	18
Araştırmacılar:	GÖKHAN GÜNEL (Yurt Dışı)
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ANKARA Ü. FEN F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/10/2014 - 15/04/2016
Onaylanan Bütçe:	143678.0
Harcanan Bütçe:	126449.27
Öz:	Radyo frekans dörtkutuplu (RFQ) son yıllarda geliştirilen en önemli iyon hızlandırma yöntemlerinden biridir. İyon hızlandırıcılarında, kaynaktan hemen sonra, düşük enerjili demeti en etkin işleme yöntemi olan ve radyo frekansında çalışan dört-kutuplu hızlandırma kovuğu, icat edildiği yıldan beri, bütün modern hızlandırıcıların ayrılmaz bir parçası olarak kendini ispatlamıştır. RFQ tasarımı yapmak için kovuk içindeki elektromanyetik alanların tam bir hesabına ve yüklü parçacıkların bu alan içindeki davranışlarının incelenmesine gereksinim vardır. Söz konusu hesaplamalar tamamen bilgisayar yardımı ile yapılmış ve RFQ tasarımına odaklı özel programlar ortaya çıkmıştır. Bu proje RFQ tasarımında kullanılmak üzere bir yazılım geliştirmek ve Türkiye?yi bu alanda içinde olduğu teknolojik açıdan dışa bağımlı durumdan kurtarmak üzerine yapılmıştır. Proje çalışanlarının söz konusu yazılımı geliştirmek için gereken bilgi birikimi (gerek yazılım bilgisi, gerekse hızlandırıcı bilgisi) kullanılarak oluşturulmuş olan yazılımın Unix tabanlı olması, dolayısıyla ulusal bir işletim sisteminde de çalışması amaçlanmıştır. Bunun yanında diğer Unix/Linux sürümlerine ve hatta Windows tabanlı işletim sistemlerine de uygun şekilde çalıştırılabilir hale getirilmiştir. Gereken hesapların yüksek duyarlılıkta ve doğru olarak yapılabilmesi için GNU yapılanmasının bilimsel işlev ve sonsuz duyarlılık kütüphanelerinden yararlanılmıştır. Bunun yanında veri gösterimi ve benzeri grafik yordamlar için de CERN?de geliştirilen açık kaynaklı ROOT program ve kütüphanesi kullanılmıştır. Kütüphaneleri kullanarak asıl hesaplamaları yani RFQ tasarımını yapan program ise modern programlama yöntemleri ile nesne yönelimli olarak C++ dilinde yazılmıştır. Tasarlama yöntemi ise tamamen kullanıcı dostu olarak grafiksel yöntemlerle yapılmıştır. Projede hazırlık aşamasında 2 terimli potansiyel ile bir araştırma prototipi oluşturulmuş, daha sonra 6 terim daha eklenerek 8 terimli potansiyel ile hesaplamalar yapılmış ve iyi bir duyarlılıkla ileri hesapların yapılabildiği gösterilmiştir. Kullanımı için de basit bir grafik arayüzü yazılmış ve kullanıcı etkileşimi test edilmiştir.
Anahtar Kelimeler:	Radyo Frekans, Dörtkutuplu, Tasarım, Benzetim
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- A graphical approach to radio frequency quadrupole design (Makale - Diğer Hakemli Makale), 2- RADYO FREKANS DÖRTKUTUPLUSU TASARIMI VE DEMET DİNAMİĞİ HESAPLARI (Tez (Araştırmacı Yetiştirilmesi) - Yüksek Lisans Tezi), 3- DEMIRCI: An RFQ Design Software (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum),

TÜBİTAK