



## DİKDÖRTGEN KESİT ALANINA SAHİP BİR SARGIDA UYGUN SARIM TİPİNİN TESPİTİ İÇİN BİR YAZILIM

### A. ALTINTAŞ\*

#### Özet

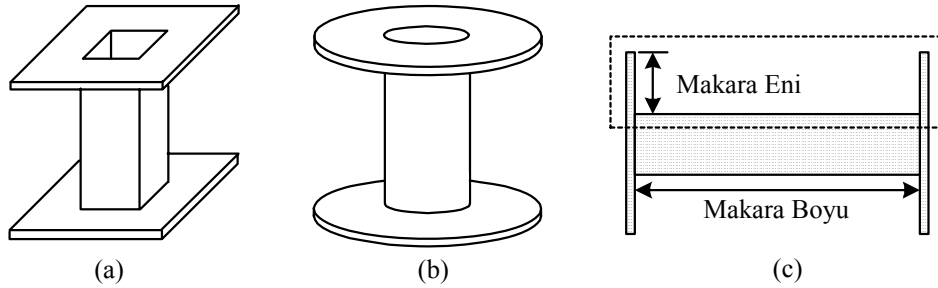
Teknolojik gelişmelere paralel olarak, sarım teknikleri de oldukça gelişmiştir. Bir sargı (endüktör, bobin, selenoid) oluşturmanın farklı metotları vardır. Bu metotlar, sistem gücü ve gerilimine, sargıların kullanılacak olduğu yere ve sargıların kullanılış amacına bağlıdır. Bir sargının en az hacimde, en az ağırlıkta ve en az kayıplı olması; fakat, en yüksek endüktans değerine sahip olması istenilir. Bu şartların bazılarını sağlamak için, optimizasyon işlemleri yapılmalıdır. Optimizasyon işlemleri sargı siper sayısını artırmak için de uygulanabilir. Bu çalışmada, dikdörtgen kesit alanına sahip bir bobinde en uygun sargı tipini belirlemek için bir yazılım geliştirilmiştir; seçilen sargı tipi ile sarılmış bobinin kesit alanı 2B düzlemde gösterilmiştir. Bu sayede yazılım, tasarımcılara en az zamanda en uygun sarım şeklini belirleme imkanı sunmaktadır.

### 1. GİRİŞ

Elektrik sistemlerinde sargılar en karmaşık devre elemanlarıdır. Buna karşın elektrik makinelerinin tamamına yakını sargı kullanmaktadır. Çünkü sargılar, elektromanyetik enerji dönüşümü için kullanılan en pratik elemanlardır. Sargının karmaşıklığı, sargı endüktans değerinin değişik parametrelere bağlı olmasından kaynaklanmaktadır. Bir sargının endüktansı kısaca, nüve olarak kullanılan manyetik malzemenin cinsine, nüve kesit alanına, manyetik yolun ortalama uzunluğuna ve sargı siper sayısına bağlıdır [1]. Hava nüveli olmayan sargılarda kullanılan manyetik malzemelerin, lineer bir mıknatıslanma özelliğine sahip olmaması başka bir sorundur. Mümkün olan en az hacimde, belirli endüktans değerine sahip bir sargı oluşturmak için, bağıl geçirgenliği yüksek manyetik malzemenin kullanılması ve manyetik yolun mümkün olduğu kadar kısaltılması gereklidir. Günümüzde bağıl geçirgenliği yüksek demir, nikel, kobalt ve alaşımlarından (AlNiCo, Permalloy) oluşan manyetik malzemeler imal edilmiştir [2]. Ayrıca, yüksek frekans işaretlerinde kullanılmak üzere, elektriksel olarak yalıtkan ve yüksek bağıl geçirgenliğe sahip malzemeler (Ferrit) de imal edilmiştir. Manyetik yolun kısaltılması, sargı tipinin iyileştirilmesi ile mümkündür. Sargı tipinin iyileştirilmesi ise optimizasyon işlemi gerektirmektedir.

Sargı tipinin uygun seçilmemesi, beraberinde bazı olumsuz etkileri de getirecektir. Uygun sarım tipinin kullanılmaması nedeniyle, makara kenarında oluşan boşluklar sargı katlarını bozacaktır. Sargı katlarındaki bozulma, sargı katları arasındaki gerilim farkının yüksek olmasına, sargı yalıtımının delinmesine, manyetik gürültüye, fiziksel zorlanmalara ve kısa-devrelere sebep olabilir. Selenoid gibi akım yönünün aynı olduğu tek sargılı sistemlerdeki fiziksel zorlamalar, sargıları (nüveye doğru) çekme eğilimindedir; transformatör gibi akım yönlerinin farklı olduğu çift sargılı sistemlerde ise, üst sargılar dışarıya doğru itilirler. Sarım şeklinin bozuk olması, bakır miktarını arttırdığı için maliyeti yükseltecek ve normal çalışma koşullarındaki bakır kayıplarını arttıracaktır. Manyetik kaçakları arttırdığı için elektrik makinesinin verimini düşürmesi bozuk sargıların başka bir olumsuz etkisidir. Uygun sarım tipinin kullanılması ile manyetik yolun kısaltılması, demir nüvenin küçülmesine sebep olacaktır. Demir nüvenin küçülmesi, demir kayıplarını (Eddy/Foucoult ve Histerezis), nüve hacmini ve ağırlığını ve dolayısıyla maliyeti azaltacaktır [3,4].

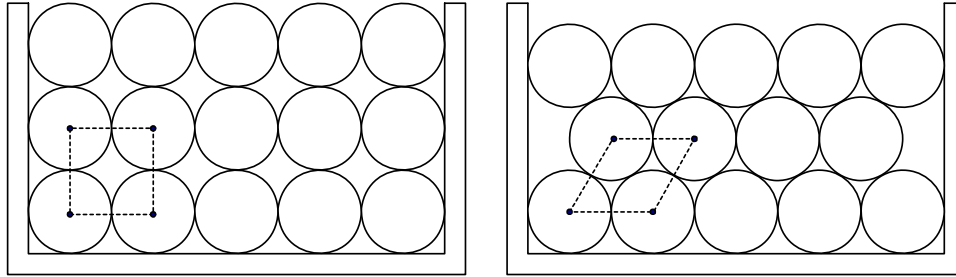
Bu çalışmada, günümüzde farklı amaçlar için sıkça kullanılan dört farklı sarım tipinden, dikdörtgenel bir bölgeye uygulanabilecek en uygun sarım tipinin tespitini yapmak ve 2B düzleminde görsel olarak irdelemek için bir yazılım paketi geliştirilmiştir. 2B görüntü lineer dönüşüm matrisleri ile oluşturulmuştur. Bu yazılım ile, verimi en yüksek (kayıpları en düşük), hacim ve ağırlığı en az, maliyeti en düşük bir sargı tasarımı amaçlanmıştır. Şekil 1'de dikdörtgen sarım bölgelerine sahip bazı makaralar ve kesiti görülmektedir.



Şekil 1.a,b) Dikdörtgen sarım bölgelerine sahip bazı makaralar, c) Bu makaraların kesiti

## 2. SARGI TIPLERİ

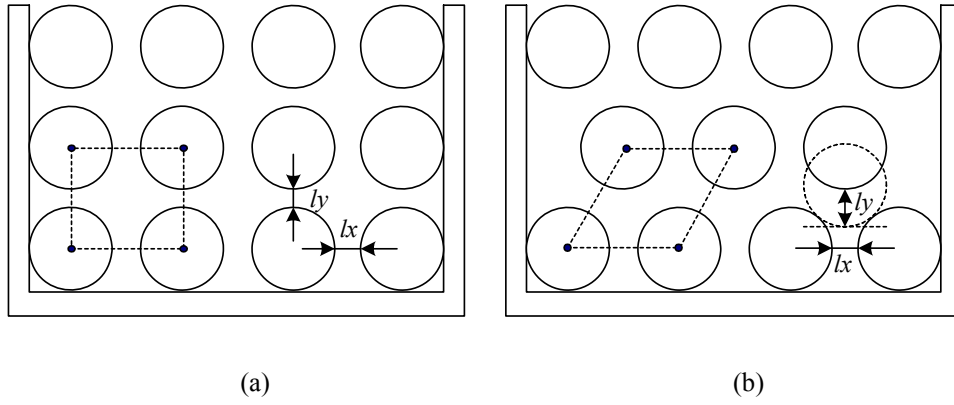
Gelişen teknolojiye paralel olarak mikroişlemci veya mikrodenetleyici kontrollü sarım makineleri, seri üretimin vazgeçilmez parçaları olmuşlardır. Dikdörtgensel bir kesit alanı için, günümüzde yaygın olarak kullanılan iki sargı tipi mevcuttur. Bu iki sargı tipinin kesit görünüşleri Şekil 2’de görülmektedir. Birinci sargı tipinde iletkenler üst üste gelecek şekilde sarılmaktadır. İkinci sargı tipinde ise iletkenler bir önceki sargı katının arasına gelecek şekilde sarılmaktadır. Sargı tiplerini ayırt etmek için isimlendirme yoluna gidilmiştir. Bu nedenle, komşu dört iletken merkezi birleştirildiğinde birinci sargı tipinde kareler, ikinci sargı tipinde paralel kenarlar oluşmaktadır. Bu yüzden birinci sargı tipine K1, ikinci sargı tipine P1 ismi verilmiştir. K1 ve P1 sargı tiplerinin katları arasında yalıtım için izolasyon maddesi kullanılması durumunda sargı tipleri Şekil 3’deki gibi olacaktır. Şekil 2’deki sargı tiplerinin bir türevi olan bu sargı tiplerine de K2 ve P2 isimleri verilmiştir. K2 ve P2 sargı tiplerinde, katlar arası izolasyon x-ekseni boyunca konacak olmasına rağmen, programı esnek bir yapıya sokmak için, iletkenler arasında y-ekseni boyunca da izolasyon konacak şekilde düzenlenmiştir. Küçük boyutlu selenoid ve transformatör gibi katlar arası izolasyonun gerekli olmadığı yerlerde K1 ve P1 sargı tipleri kullanılır. Büyük boyutlu tasarımlarda ise basit sargılar, dilimli sargılar ve silindirik sargılar kullanılmaktadır. İzolasyonun korunması için sargı katları arası yalıtılmalıdır. Bu durumda K2 ve P2 sargı tipleri tercih edilir.



(a)

(b)

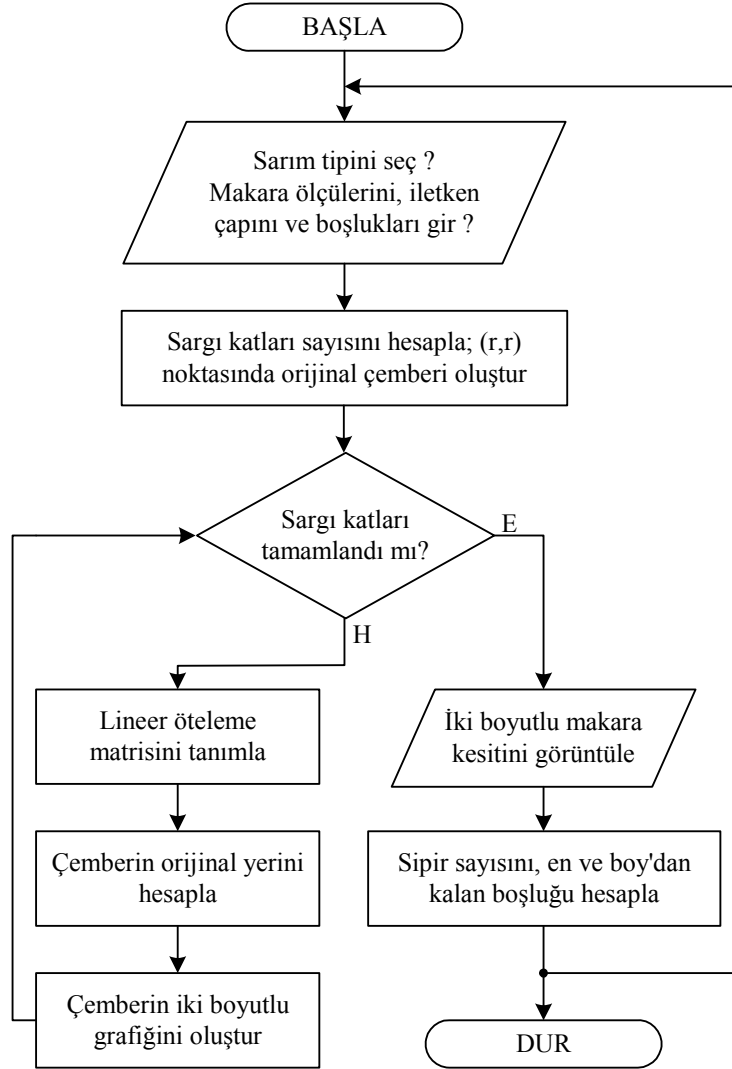
Şekil 2. Sargı tipleri, a) K1 tipi, b) P1 tipi



Şekil 3. İzolasyonlu sargı tipleri, a) K2 tipi, b) P2 tipi

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

Yazılan program, milimetre olarak verilen makara kesit ölçülerini, milimetre olarak verilen sargı tel çapını (izoleli) ve sarım tipini kullanarak, makaraya sarılabilecek maksimum sipir sayısını, sargı kat sayısını, kalan boşlukları ve kullanılmayan kesit alanını hesaplayıp, sarım uygulanmış makara kesitini iki boyutlu ortamda görüntüler. İki boyutlu ortamda sarımlar oluşturulurken, sarımın soldan sağa doğru yapıldığı kabul edilmiştir. Dolayısıyla makara boyundan kalan boşluk, makaranın sağ tarafında olacaktır. İki boyutlu görüntüyü oluşturmak için lineer dönüşüm matrisleri kullanılmıştır. Lineer dönüşüm matrisleri bilgisayar grafiklerinin temelini oluşturmaktadır. Program, Matlab bilgisayar paket programında oluşturulmuştur. Matlab programı, matris tabanlı işlem yapabilen en iyi yazılımlardan bir tanesidir [5,6,7,8]. Kullanıcı ile aktif çalışabilme özelliği (interactive mod), sahip olduğu çeşitli grafik işlemcileri, içermiş olduğu hazır fonksiyonlar, yeni fonksiyonlar eklenebilme özelliği ve program yazma kolaylığı Matlab programının üstünlüklerindedir. Yazılan programın geliştirilmiş akış diyagramı Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Programın akış diyagramı

### 3.1. Lineer Dönüşümler

İki boyutlu uzayda noktalar, koordinatları yardımıyla ifade edilirler. Noktaların koordinatları  $x$  ve  $y$  olmak üzere iki rakamdan oluşmaktadır. Bu rakamlar satır veya sütun vektör şeklinde ifade edilebilir. Bir şekli oluşturan bu vektörlere aynı zamanda pozisyon vektörleri de denilmektedir. İki boyutlu uzayda lineer dönüşüm matrisi  $2 \times 2$ 'lik matris boyutundadır. Lineer dönüşüm matrisleri ile  $(0,0)$  orijin

noktasına göre çevirme (rotation), yansıma (reflection), eğme (shearing) ve ölçekleme (scaling) işlemleri gerçekleştirilebilir. Pozisyon vektörlerinden oluşan matris ile lineer dönüşüm matrisi ( $T$ ) çarpılarak istenen dönüşüm elde edilir. İki matrisin çarpılabilmesi için, birinci matrisin sütun sayısı ile ikinci matrisin satır sayısı eşit olmalıdır. Bu kural nedeniyle, pozisyon matrisi iki sütunluk ise lineer dönüşüm matrisinden önce, iki satırlık ise lineer dönüşüm matrisinden sonra yazılıp çarpma işlemi yapılmalıdır (iki satırlık pozisyon vektöründe dönüşüm matrisinin transpozu alınmalıdır). Çarpma işleminin sonucunda elde edilen matris, lineer dönüşümü yapılan şeklin koordinatlarını verecektir (Eş.1).

$$T = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad A = [x \ y].T \quad B = T^T \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (1)$$

$2 \times 2$ 'lik lineer dönüşüm matrisleri ile (0,0) orijin noktasına ve bazı eksenlere göre dönüşümler yapılabilirken, orijin noktasının değişmesi durumunda bu işlemler geçersiz kalmaktadır. Örneğin, herhangi bir noktaya göre döndürme işlemi, herhangi bir doğru denklemine göre yansıma işlemi  $2 \times 2$ 'lik matrislerle mümkün değildir. Ayrıca, orijin noktası değişmese bile, bir noktanın başka bir koordinata ötelenmesi (taşınması) işlemi için lineer dönüşüm matrisleri yetersizdir. Bu gibi durumlarda homojen koordinat sistemi bir çözümdür. Homojen olmayan sistemde bir pozisyon vektörü  $[x \ y]$  nin homojen koordinatları  $[x' \ y' \ h]$  şeklindedir. Burada  $x = x'/h$  ve  $y = y'/h$  olup  $h$  herhangi bir reel sayı olabilir. Homojen koordinatların en çok kullanımı  $[x \ y \ 1]$  şeklindedir. Bu kullanım şeklinde, sütun (satır) şeklindeki pozisyon vektörlerine 1'lerden oluşan sütun (satır) vektörü ilave edilmelidir. Örneğin, (3,2), (5,2), (5,4), (3,4) pozisyon vektörleri ile bir kare tanımlanmış olsun. Bu karenin homojen olmayan ( $H'$ ) ve homojen olan ( $H$ ) satır vektör koordinatları ile homojen sistemlerdeki genel dönüşüm matrisi ( $T$ ) Eş.2'de verilmiştir.

$$H' = \begin{bmatrix} 3 & 2 \\ 5 & 2 \\ 5 & 4 \\ 3 & 4 \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} 3 & 2 & 1 \\ 5 & 2 & 1 \\ 5 & 4 & 1 \\ 3 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} a & b & 0 \\ c & d & 0 \\ m & n & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Genel dönüşüm matrisindeki  $a, b, c, d$  elemanları, homojen olmayan sistemlerdeki dönüşümleri (ölçekleme, döndürme, yansıma, vb) sağlarken,  $m$  ve  $n$  öteleme faktörüdür [9].

### 3.2. Öteleme İşlemleri

İki boyutlu makara kesitindeki sargı telleri çember olarak tanımlanmıştır.  $(r,r)$  noktasında oluşturulan çemberler bir dizi işlemlerden sonra lineer öteleme matrisleri kullanılarak orijinal yerlerine taşınmıştır. Bir çember oluşturmanın en kolay yolu çemberin parametrik denklemlerini kullanmaktır. Bu yöntem, bir çok trigonometrik hesaplama gerektirdiği için yavaş olmakla beraber, ideal bir çember görüntüsü oluşturur.  $r$  yarıçaplı ve orijin merkezli bir çemberin parametrik denklemi Eş.3'de verilmiştir. Burada  $\theta$ , kullanılan parametre olup  $[0-2\pi]$  aralığında değişmektedir.

$$x = r \cdot \cos(\theta), \quad y = r \cdot \sin(\theta), \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi$$

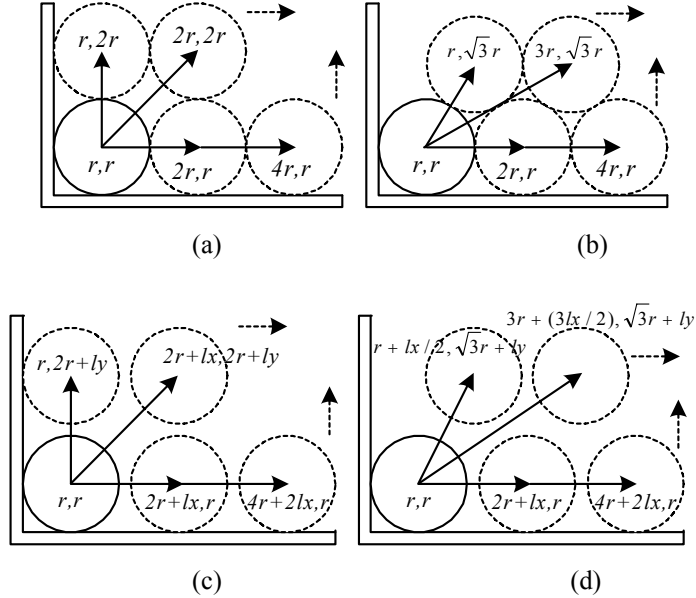
(3)

Öteleme işlemi için tanımlanan lineer dönüşüm matrisi ( $O$ ) Eş.4'de verilmiştir. Bir şeklin  $(m,n)$  kadar ötelenmesi işlemi, şekli oluşturan her bir  $(x,y)$  noktasına  $(m,n)$  sayısının ilave edilmesi ile gerçekleştirilir.  $m$  sayısı x-ekseni boyunca,  $n$  sayısı y-ekseni boyunca öteleme işlemi yapacaktır.

$$O = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ m & n & 1 \end{bmatrix}$$

(4)

$r$ , iletkenin yarıçapı olmak üzere; K1 sargı tipi, iletkenlerin x ve y-ekseni boyunca  $2r$  kadar ötelenmesi ile oluşturulur. P1 sargı tipinde iletkenler x-ekseni boyunca  $2r$  kadar, y-ekseni boyunca  $\sqrt{3} \cdot r$  kadar ötelenir.  $l_x$  ve  $l_y$  sırasıyla sütun ve satırlar arasındaki boşluklar olmak üzere; K2 sargı tipi, iletkenlerin x-ekseni boyunca  $2r+l_x$  kadar, y-ekseni boyunca  $2r+l_y$  kadar ötelenmesi ile oluşturulur. P2 sargı tipinde ise iletkenler x-ekseni boyunca  $2r+l_x$ , y-ekseni boyunca  $\sqrt{3} \cdot r + l_y$  kadar ötelenir (Şekil 5).



Şekil 5. Öteleme işleminin fonksiyonel ifadeleri, a) K1 tipi, b) P1 tipi, c) K2 tipi, d) P2 tipi

#### 4. ÖRNEK UYGULAMALAR

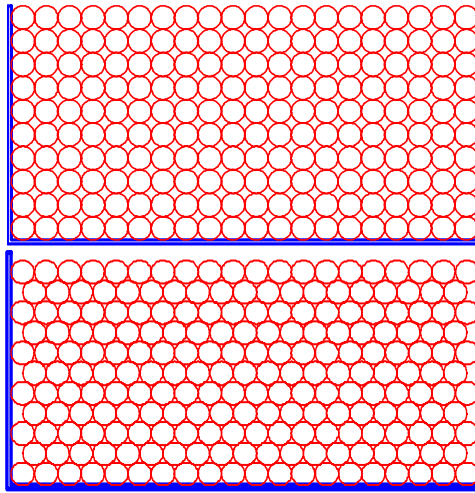
K1 ve P1, K2 ve P2 sargı tipleri arasında kıyaslama yapılabilmesi için aynı makara ölçüleri ve tel çapı kullanılmalıdır. Bu nedenle K1-P1 sarım tipi için 20x10mm'lik makara ölçüleri ve 1mm'lik tel çapı seçilmiştir. İki boyutlu kesit görünüşlerin değerlendirilebilmesi için makara boyutları küçük seçilmiştir. Çalışma, büyük makara kesitleri içinde doğrulanmıştır.

Programın çalıştırılması ile elde edilen sonuçlar Çizelge 1'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre, 20x10mm'lik ölçülerdeki makaraya 1mm'lik çapa sahip tel ile sarım yapıldığında, K1 sarım tipinde 200 sipir sarılabilirken, P1 sarım tipinde 215 sipir sarılabilmektedir (Şekil 6). Aynı zamanda, K1 sarım tipinde makara kesitinde hiç bir boşluk kalmazken, P1 sarım tipinde makara boyunda 0,34mm boşluk kalmaktadır. Bu boşluk, makara boyutlarının küçültülmesine olanak sağlar. Seçilmiş olan makara boyutlarının ve tel çapının farklı olması durumunda, sonuçlar da farklı olacaktır. Kullanılmayan kesit alanları, sargının üst ve/veya sağ tarafında kalan alanların toplamından oluşmaktadır.



Çizelge 1. Program Giriş ve Çıkış Verileri

PROGRAM GİRİŞ VERİLERİ						PROGRAM ÇIKIŞ VERİLERİ				
Sarım Tipi	İletken Çapı (mm)	Makara Eni (mm)	Makara Boyu (mm)	Sütun Aralığı (mm)	Satır Aralığı (mm)	Sarım Kat Sayısı	Sarım Spir Sayısı	Boy'dan kalan Boşluk (mm)	En'den Kalan Boşluk (mm)	Kullanılmayan Kesit (mm <sup>2</sup> )
K1	1	20	10	0	0	10	200	0	0	0
P1	1	20	10	0	0	11	215	0	0.34	6.8
K2	0.95	20	9.5	0	0.25	8	168	0.05	0.15	3.4675
P2	0.95	20	9.5	0	0.25	8	164	0.05	1.04	21.223
K2	1	20	10	0.25	0.25	8	128	0.25	0.25	7.4375
P2	1	20	10	0.25	0.25	9	140	0.25	0.07	3.8825

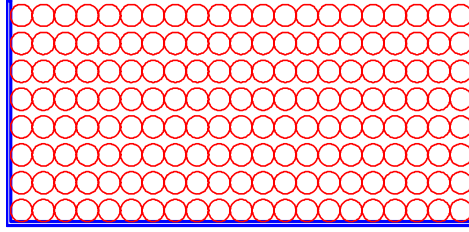


(a)

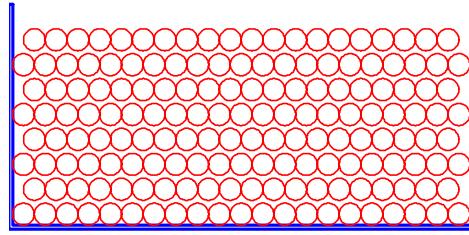
(b)

Şekil 6. Sarım uygulanmış makara kesitleri, a) K1 tipi, b) P1 tipi

K2-P2 sarım tipinde; 20x9,5mm'lik ölçülerdeki makaraya, 0mm sütun aralık değeri, 0,25mm satır aralık değeri bırakılarak, 0,95mm'lik çapa sahip tel ile sarım yapıldığında, K2 sarım tipinde 168 sipir sarılabilirken, P2 sarım tipinde 164 sipir sarılabilmektedir (Şekil 7). Bu ölçülerdeki tasarım, bir kaç sipirin önemli olmadığı bir tasarım ise, P2 sargı tipini seçip sargı boyutlarını küçültmek avantajlı olacaktır; aksi halde K2 sargı tipi seçilmelidir.

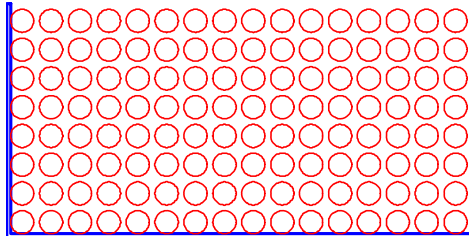


(a)

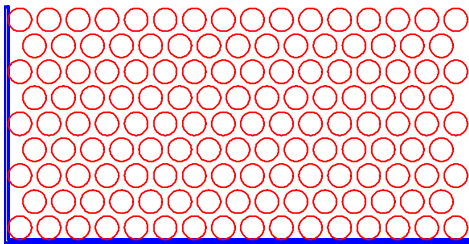


(b)

Şekil 7. Sarım uygulanmış makara kesitleri, a) K2 tipi, b) P2 tipi  
K2-P2 sarım tipinin başka bir uygulamasında; 20x10mm'lik ölçülerdeki makaraya, 0,25mm sütun aralık değeri, 0,25mm satır aralık değeri bırakılarak, 1mm'lik çapa sahip tel ile sarım yapıldığında, K2 sarım tipinde 128 sipir sarılabilirken, P2 sarım tipinde 140 sipir sarılabilmektedir (Şekil 8). Makara en ve boy oranları ile tel çapının daha büyük olması durumunda aradaki farklar daha belirgin olacaktır.



(a)



(b)

Şekil 8. Sarım uygulanmış makara kesitleri, a) K2 tipi, b) P2 tipi

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, dikdörtgensel kesit alanına sahip bir makaraya uygulanabilecek sarım tiplerinin uygunluğu araştırılmıştır. Bu amaçla geliştirilen yazılım paketi ile, sarımı oluşturacak kat sayısı, siper sayısı, makara en ve boyundan kalan boşluklar ve kullanılmayan kesit alanı hesaplanmıştır. Hesaplama sonuçlara göre sarılacak olan sargı ile; en çok sipire ve en kısa manyetik yola sahip bir tasarım elde edilebilir. Manyetik yolun fiziksel olarak kısılması aynı oranda demir kayıplarını da azaltacaktır. Seçilen sargı tipi, makara ölçüleri ve tel çapı kullanılarak sargısı tamamlanmış bobinin iki boyutlu kesit alan görüntüsü de elde edilmiştir; bu sayede, yapılan çalışma görsel olarak da irdelenmiştir. Bu yazılım paketi, tasarımcılara en az zamanda en uygun sarım tipini seçme olanağı sunmaktadır.

Bu yazılımda, makara kesitinin dikdörtgensel bir bölgeye sahip olduğu ve tel kesitinin dairesel olduğu varsayılmıştır. Az da olsa bazı uygulamalarda çeşitli makara kesitlerine (konik, dairesel, vb.) ve tel kesitlerine rastlanmaktadır. Yazılım bu tür makara ve tel kesitlerinde de kullanılabilmesi için geliştirilebilir. Bu yazılımda makara ölçülerinin bilindiği varsayıp ona göre siper sayısı hesabı yapılmıştır; bazı tasarımlar sabit bir siper sayısı kullanır; bu durumda makara kesit hesabı içinde yeni bir program geliştirilebilir.

## 6. KAYNAKÇA

- [1] O. Gürdal, *Elektromanyetik Alan Teorisi*, Nobel Yayın Dağıtım, 2000.
- [2] M. T. Aydemir, E. Afacan, C. Nakiboğlu, *Elektromanyetik, Schaum's Outline Series*, Mc Graw-Hill, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 2000.
- [3] McLyman, C. W. T., *Transformer and Inductor Design Handbook*, 2<sup>nd</sup> ed., Marcel Dekker, Inc., 1988.
- [4] Pearman, Richard A., *Electric Machinery and Transformer Technology*, Fort Worth, Saunders College Publications, 1994.
- [5] Biran, A., Breiner, M., 1995, *MATLAB for Engineers*, Addison-Wesley Publishing Company.
- [6] M. Uzunoğlu, A. Kızıl, Ö. Ç. Onar, *Kolay Anlatımı ile İleri Düzeyde Matlab 6.0-6.5*, Türkmen Kitapevi, İstanbul, 2002.

- [7] İ. Yüksel, *Matlab ile Mühendislik Sistemlerinin Analizi ve Çözümü*, Vipaş A.Ş, Uludağ Üniversitesi, Bursa, 2000.
- [8] MATLAB® for Microsoft Windows, MathSoft Inc., (1999)
- [9] D. F. Rogers, J. A. Adams, *Mathematical Elements for Computer Graphics*, McGraw-Hill Publication Company, 1990.

## A SOFTWARE FOR CHOOSING APPROPRIATE WINDING TYPE OF A COIL HAVING RECTANGULAR CROSS-SECTIONAL AREA

A. ALTINTAŞ

*Abstract* As parallel with technological developments, the techniques of winding also rather improved. There are different winding methods to build a coil (inductor, bobbin, solenoid). These methods depend on the power and voltage of the system, the place where the winding will be employed, the purpose for which the winding will be used. It is demanded that the windings have minimum volume, minimum weight and minimum losses; but, maximum inductance. To provide some of these conditions, the optimization processes should be done. The optimization processes can be also applied to increase turn numbers of winding. In this study, a software for choosing appropriate winding type of a coil, with rectangular cross-sectional area, has been developed; cross-sectional area of the coil, having been wound with chosen winding type, was shown on two-dimensional (2D) plane. Thus, the software provides that the designers are enable to determine the most proper winding type in the least time.

**Keywords:** Bobbin, Linear transformations, Winding technology

\* Dumlupınar Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektrik Eğitimi  
Bölümü,  
Simav - Kütahya, Türkiye  
a\_altintas@dumlupinar.edu.tr