

İndüksiyon Bobin Tasarımında Kullanılan İletken Türlerinin İndüksiyon Sıvı Isıtıcı Performansına Etkilerinin Araştırılması

Ahmet ALTINTAŞ

Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, 43500 Simav/Kütahya

ÖZ

Sahip olduğu bazı üstünlükler dolayısıyla, indüksiyon prensibiyle sıvı ısıtma sistemlerinin endüstriyel ve evsel kullanımı giderek artmaktadır. İndüksiyon sıvı ısıtma sistemlerinin en önemli unsurlarından biri indüksiyon bobinleridir. İndüksiyon bobinleri, rezonans durumunda en verimli çalıştıkları ve büyük akımlar taşıdıkları için, büyük kesitli iletkenlerden az sipirli sarılarak oluşturulurlar. Günümüzde, indüksiyon bobin tasarımında kullanılacak birçok iletken türü mevcuttur. Bu çalışmada, COMSOL® Multiphysics yazılımı kullanılarak, 8 farklı iletken türünden oluşturulan indüksiyon bobinlerinin 3B katı modelleri oluşturulmuş, eşit çevresel faktörler ve farklı çalışma frekansları için 2B manyetik ve termal analizleri gerçekleştirilmiş, ısıtıcı aparat üzerinde açığa ısıtma gücü hesaplanarak ısıtıcı performans testi yapılmıştır. Bu çalışma aynı zamanda tasarımcı ve üretici firmalara, indüksiyon bobin tasarımında kullanılacak iletken türü seçiminde yardımcı olmayı da amaçlamaktadır.

Anahtar kelimeler: İndüksiyon sıvı ısıtma, indüksiyon bobin tasarımı, manyetik analiz, Comsol.

Investigating the Effects of Conductor Types of Induction Coil on Performance of the Induction Liquid Heater

ABSTRACT

In residential and industrial applications, the usage of induction liquid heater using induction heating principles is increasingly growing due to having some advantages. One of the components of the induction heating is induction coil. Because of working best at resonance condition and carrying a lot of current, induction coils are constituted from a wire having a big cross-sectional area; and also have a few turn. At present, there are a lot of wire types being used in induction coil design. In this study, by using the COMSOL® Multiphysics software, 3D solid models of a total of eight-induction-coil designed with different wire types are created; magnetic and thermal analysis of those are performed under identical environmental conditions for different working frequencies; and, performance tests of induction heaters are done by computing the heating-power on induction apparatus. This study, also, aims to help designer and manufacturer on choosing favorable wire type for induction coil design.

Keywords: Induction liquid heater, induction coil design, magnetic analysis, Comsol.

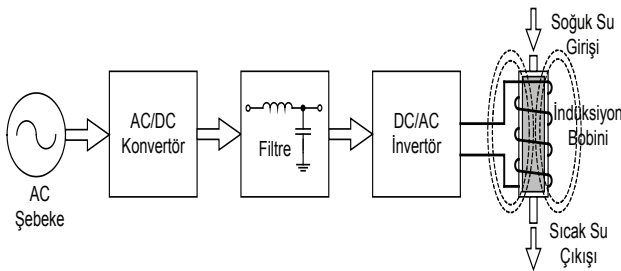
I. GİRİŞ

Günümüzde en yaygın ve en temiz enerji türlerinden olan elektrik enerjisi, ısıtma sistemlerinin vazgeçilmez bir unsurudur. Elektriksel ısıtma, genel olarak rezistif ısıtma ve indüksiyon ısıtma olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir. Rezistif ısıtma sistemlerinde kullanılan temel unsur, krom-nikel telden imal edilen rezistanslardır. Rezistanslar, uygun güç ve şekillerde imal edilerek, gerekli ısı enerjisi elektrik şebekesinden kolaylıkla sağlanmış olur. Diğer bir elektriksel ısıtma yöntemi olan indüksiyon ısıtma,

yüksek frekanslı alternatif akımın oluşturduğu manyetik alanın, ısıtılacak parçalar üzerinde oluşturduğu histerezis ve eddy akımlarıyla sağlanmaktadır. İndüksiyon ısıtma sisteminin temel yapıtaşları, yüksek frekanslı alternatif akımı sağlayacak olan inverter ve manyetik alan kaynağı olan indüksiyon bobinidir [1-3].

Sabit duran ve/veya sürekli akan sıvıların ısıtılmasında her iki elektriksel ısıtma yöntemini kullanmak mümkündür. Endüstriyel ve evsel sıvı ısıtma uygulamalarında rezistif ısıtma yöntemi, indüksiyon ısıtma yöntemine göre çok

daha pratik çözümler üretmektedir. Ancak, sıvıların ısıtılması için kullanılan rezistanslı ısıtma yöntemlerinin bazı olumsuz yönleri vardır. Yüksek akış debili sistemlerde ısıtma süresinin uzunluğu, su içinde bulunan kirecin çökmesi sebebiyle oluşan kireçlenme problemleri, herhangi bir sebeple akışkan veya gövde üzerine olabilecek elektrik kaçağı riski, rezistansların sıvı içine konma zorunluluğu ve sıvı sızdırma problemleri bu sakıncalardan bazılarıdır. Rezistanslı sıvı ısıtma sistemlerinin bu olumsuz etkilerini önlemek için günümüzde, indüksiyon ısıtma prensibi ile çalışan düzenekler hakkında birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. İndüksiyon ısıtma teknolojisi, alışlagelmiş ısıtma sistemlerine göre; işlem süresinin oldukça kısa olması, dış çevreye ısı dağılımının olmaması veya en az olması, yüksek verimliliği, yanma-patlama gibi olaylara izin vermeyen güvenilir bir sistem olması, elektriksel kaçak riskinin bulunmaması, sızdırmazlık problemlerinin ez az yaşanması gibi üstünlüklere sahiptir. Bu üstünlükler sayesinde indüksiyon ısıtma sistemlerinin endüstri ve ev tipi uygulamalarındaki kullanımı giderek artmaktadır [4-7]. İndüksiyon sıvı ısıtma sistemine ait şematik bir gösterim Şekil.1'de verilmiştir. Şekil.1'e göre önce, şebekeden sağlanan AC enerji AC/DC konvertör ve filtre yardımıyla doğrultulmuş; sonra, DC/AC invertör yardımıyla yüksek frekanslı AC enerji elde edilip indüksiyon bobini beslenmiştir. İndüksiyon bobininin oluşturduğu yüksek frekanslı manyetik alan, sıvı akış yoluna ve bobin içine konumlandırılan ferromanyetik malzemeden üretilmiş aparatı ısıtarak akışkan sıvının ısıtılması sağlamıştır.



Şekil 1. İndüksiyon sıvı ısıtma sistemine ait şematik bir gösterim

İndüksiyon sıvı ısıtma sistemleri incelendiğinde, endirekt ısıtma yönteminin kullanıldığı görülecektir; çünkü akışkan sıvılar (çoğunlukla su) genellikle paramanyetik veya diyamanyetik malzeme özelliğine sahiptir. Bu yüzden, değişken manyetik alan ile kolaylıkla ısıtılabilen ferromanyetik malzemeler, indüksiyon ısıtıcılarda ısıtma aparatı olarak kullanılmakta ve endirekt ısıtma

sağlamaktadır. Isıtma aparatları genel olarak iki ana gruba ayrılabilir: ferromanyetik malzemeden üretilmiş ısıtıcı aparatın sıvı içine yüzer bir tarzda konumlandırıldığı sistemler (yüzer tip) veya ferromanyetik malzemenin sıvıyı içine aldığı havuz tarzı sistemler (havuz tip) dir. Havuz tip indüksiyon ısıtıcıların, sürekli akan sıvıların ısıtılmasındaki verimleri düşüktür; çünkü üretilen ısı, deri etkisinden dolayı ısıtma aparatının dış yüzeyinde açığa çıkmakta ve bir miktar ısı dış ortama yayılmaktadır; ayrıca, dış ortama yayılan bu ısı, bazı durumlarda indüksiyon bobinlerinin soğutulmasını da zorunlu kılmaktadır. Yüzer tip indüksiyon ısıtıcılarda bu tür sakıncalar bulunmadığı için verimleri daha yüksektir.

İndüksiyon yöntemiyle sıvı ısıtma hakkındaki çalışmalar 1980'li yıllarda, yoğunluğu fazla olan sıvıların boru içindeki akışını hızlandırmak (sıvı viskozitesini arttırmak) için başlamıştır. Daha sonraki çalışmalar yüksek sıcaklıkta sıvı ve buhar elde etmek üzerine yoğunlaşmıştır. Havuz tip indüksiyon ısıtma sistemini kullanan ilk çalışmalarda [8,9], boru içinden akan yağ ve su, sıvıları taşıyan ferromanyetik borular vasıtasıyla ısıtılmıştır. Daha sonraki çalışmalarda, farklı geometrik şekillere sahip birçok yüzer tip indüksiyon ısıtma aparatları sunulmuştur; boru içindeki su akış yoluna yerleştirilen çelik levhalar [10], spiral biçiminde sarılıp iki ucu birleştirilmiş sac levha [11], delikli silindirik bloklar [12], yüzeyine sıvı akış kanalları açılmış silindirik parçalar [13], iç içe konumlandırılmış silindirik halkalar [14] bunlardan bazılarıdır.

Elektrik enerjisini ve elektriksel sinyalleri iletmek veya iki ve daha fazla sayıdaki elektriksel cihazı birbirine bağlamak için kullanılan, daha çok bakır ve alüminyum gibi elektriksel özellikleri iyi olan metallerden tek veya çok damarlı olarak üretilmiş malzemelere iletken veya kablo denilmektedir. Genel olarak kablolar, kullanılmış oldukları yerlere göre dört temel gruba ayrılabilir: Enerji kabloları, Kumanda ve sinyal kabloları, Telefon kabloları, Haberleşme kabloları. İndüksiyon ısıtıcıların en temel unsuru olan indüksiyon bobinleri, farklı tip enerji kablolarından imal edilebilirler. Çalışma prensibi gereği, yüksek akımlar taşıyacak olan indüksiyon bobinleri, büyük kesitlere sahip enerji kablolarından az sipirli olarak tasarlanırlar. Günümüz şartlarında endüstriyel amaçlı kullanılacak pek çok enerji kablosu mevcuttur; bu alandaki çalışmalar, kablo akım taşıma kapasitelerini arttırmaya yönelik olarak sürdürülmektedir [15]. Üretici firmalar; çok farklı türde kesit alanına, kesit geometrisine ve yalıtım kapasitesine sahip enerji kablosu seçenekleri sunmaktadır; ayrıca, yüksek

frekanslı AC sinyalleri taşımak amacıyla üretilmiş özel tip kablolar da üretilmiştir.

Tarihsel gelişim sürecinde, indüksiyon bobin tasarımında kullanılmış ilk kablo türleri, dairesel kesitli tek damarlı veya çok damarlı bakır iletkenlerdir. Sonraki yıllarda dikdörtgen veya kare kesitli bakır iletkenler kullanılmıştır [16-19]. İndüksiyon ısıtma sistemlerinde oluşan en temel problem, yüksek frekanslı akımın indüksiyon bobin sargıları üzerinde oluşturduğu deri etkisi (skin effect) ve yakınlık etkisi (proximity effect) dir. Bu etkiler sonucunda akım, sargıların dış yüzeyindeki belirli bir bölgeye yoğunlaşma eğilimi göstermekte ve dolayısıyla, bakır sargı kesitinin tümü akım tarafından etkin olarak kullanılmamaktadır. Bu olumsuz etkiler dikkate alınarak, daha sonra yıllarda indüksiyon bobin tasarımı için, içi boşaltılmış silindirik bakır borular kullanılmıştır [9,20]. Yüksek güçlü indüksiyon ısıtma sistemlerinde açığa çıkan ısı, indüksiyon bobin sargılarını da ısıtarak olumsuz etkilemektedir; bu olumsuz etki, içi boşaltılmış bakır boru içinden soğutma sıvısı geçirilerek önlenmiş ve daha verimli bir çalışma sağlanmıştır. Bu yöntem, günümüzde de sıkça kullanılmaktadır. Son olarak, deri ve yakınlık etkilerinin oluşturduğu problemleri aşmak için, indüksiyon bobin sargıları Litz kablolarından imal edilmiştir [11,21,22]. Litz kablosu, her biri yalıtılmış ince bakır iletkenlerden birçoğunun demet haline getirilmesiyle oluşturulmuş özel bir kablodur.

İndüksiyon sıvı ısıtma sistemlerinin performansı, indüksiyon bobininin yapısıyla yakından ilişkilidir. Yüksek frekanslı uygulamalarda daha belirgin hale gelen deri ve yakınlık etkilerinin olumsuz yönlerini aşmak, ısı problemlerini çözmek ve daha yüksek performans sağlamak amacıyla, farklı yapıdaki enerji kablosu araştırmaları devam etmektedir. Bu çalışmada; günümüzde var olan ve indüksiyon sıvı ısıtma sistemlerinde kullanılmış veya kullanılacak tüm kablo türleri araştırılmış, bu kabloların üç boyutlu (3B) katı modelleri oluşturulmuş, seçilen kablolar kullanılarak oluşturulmuş indüksiyon bobinlerinin aynı çalışma koşullarında iki boyutlu (2B) manyetik analizleri yapılmış ve indüksiyon sıvı ısıtıcıların farklı çalışma frekanslarında ürettikleri ısı gücü hesaplanarak performans testi yapılmıştır. Manyetik analiz ve performans testleri için, grafiksel kullanıcı arayüzlü modelleme-simülasyon paket programı olan COMSOL® Multiphysics yazılımı kullanılmıştır. Bu çalışma ayrıca; tasarımcı ve üretici firmalara, farklı çalışma frekansları için, indüksiyon bobini üretiminde kullanılabilecek en verimli kablo türünün seçiminde yardımcı olmayı da amaçlamaktadır.

II. İNDÜKSİYON ISITMA TEMEL DENKLEMLERİ VE DERİ ETKİSİ

Genel olarak indüksiyon ısıtma, manyetik bir malzemenin değişken bir manyetik alana maruz bırakılarak üzerinde gerilim indüklenmesi ve bu gerilimin oluşturacağı yüksek eddy akımlarının manyetik malzemeyi ısıtması ile sağlanır. Bir ortamdaki elektromanyetik alan dağılımı Eş.1 ve Eş.2 ile tanımlanabilir;

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \vec{A}) = \vec{J}_e - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\vec{E} = -j\omega \vec{A} - \nabla V \quad (2)$$

burada; \vec{A} manyetik vektör potansiyel [Wb/m], \vec{J}_e harici uygulanan akım yoğunluğu [A/m²], \vec{E} elektrik alan şiddeti [V/m], V skaler elektrik potansiyeli [V], σ elektriksel iletkenlik [S/m], μ manyetik geçirgenliktir [H/m].

Alternatif değişim gösteren elektromanyetik alanın indüklemiş olduğu eddy akımları Eş.3 ile; ve indüklenmiş eddy akımlarının sebep olduğu ısı kayıpları da Eş.4 ile hesaplanabilir.

$$\vec{J} = j\omega \sigma \vec{A} \quad (3)$$

$$Q = \frac{[\sigma]^{-1} \vec{J} \vec{J}^*}{2} \quad (4)$$

Eddy akımlarının açığa çıkarmış olduğu ısı, iş-parçasının diğer bölgelerine ve iş-parçasının içinde bulunduğu ortama yayılacaktır. Zamana bağlı olarak iş-parçası üzerinde oluşan ısı dağılımı, klasik ısı akış denklemiyle tanımlanabilir (Eş.5);

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-k \nabla T) = Q \quad (5)$$

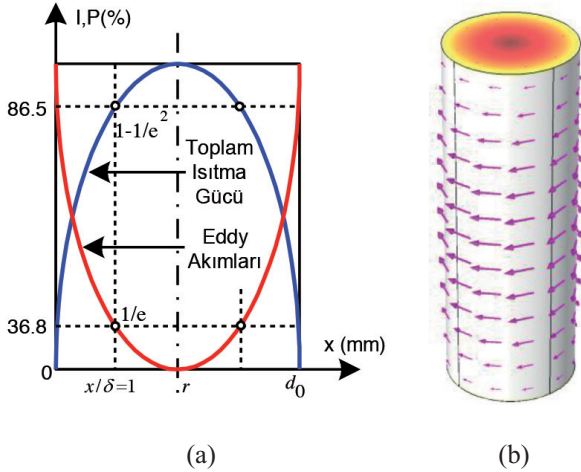
burada; k termal iletkenlik (W/(m.K)); T sıcaklık (K); ρ yoğunluk (kg/m³); C özgül ısı kapasitesidir (J/(kg.K)).

İndüksiyon ısıtma işleminin herhangi bir iş-parçası üzerinde verimli bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için, eddy akımlarını oluşturan manyetik alanın frekansı ve malzeme özelliklerinin uygun değerlerde olması gereklidir. Eddy akımları, doğası gereği, iş-parçasının yüzeyine doğru yoğunlaşma eğilimindedir; bu duruma kısaca “deri etkisi” denir. Yüksek frekanslı uygulamalardaki eddy akımları, deri etkisi neticesinde, iş-parçasının yüzeyinde yoğunlaşacaktır ve iç bölgelerdeki eddy akımları ihmal edilebilir düzeyde kalacaktır. Bunun sonucunda iş-parçasının etkin direnci artmış ve açığa çıkan ısı, iş-parçasının yüzeyine yoğunlaşmış olacaktır. Isıtma derinliği, çalışma frekansına ve iş-parçasının elektriksel direnç ve bağlı manyetik geçirgenliğine bağlıdır.

Pratik uygulamalar için ısıtma derinliği, ortaya çıkan gücün yaklaşık olarak %86'sı kadar değerinin açığa çıktığı derinlik değeri olup Eş.6 ile hesaplanabilir; burada, δ ısıtma derinliği (mm), ω manyetik alanın açısal değişim hızı (rad/s), μ iş-parçasının manyetik geçirgenliği (H/m) ($\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$), σ iş-parçasının elektriksel iletkenliği (S/m) dir.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (6)$$

Silindirik bir iş-parçasında, ısıtma derinliğine göre normalize edilmiş eddy akımları ve toplam ısıtma gücü değişimleri Şekil.2.a'da verilmiştir; şekle göre, değişken manyetik alanın ısıtıcı aparat üzerinde oluşturduğu ısıtma gücünün büyük bir kısmı, aparat yüzeylerine yakın bölgede açığa çıkmaktadır [19]. Bu durum, manyetik analiz programı yardımıyla 3B katı model üzerinde de gösterilmiş olup, ısıtıcı aparat üzerinde indüklenmiş olan eddy akımlarının vektörel ve yüzey yoğunluklu gösterimi Şekil.2.b'de verilmiştir.



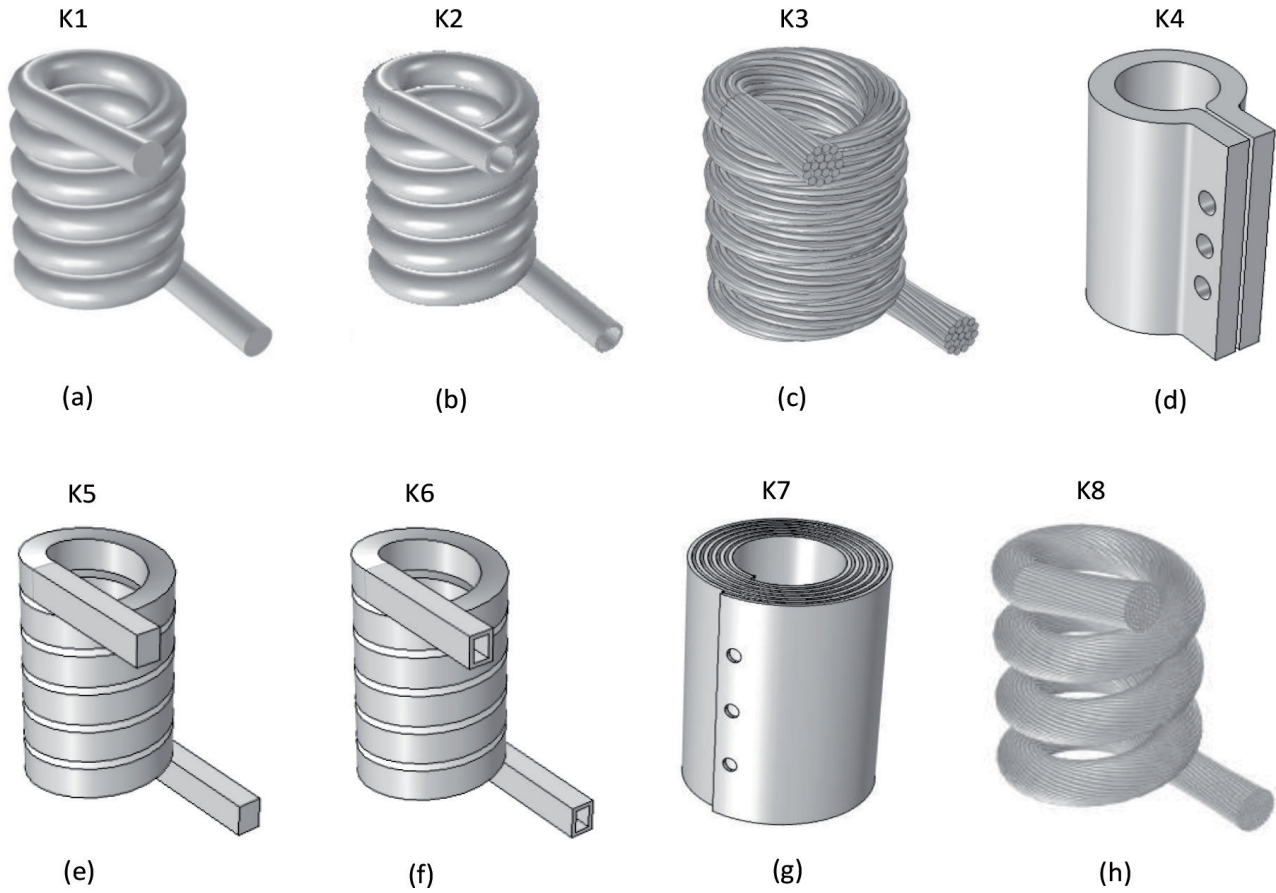
Şekil 2. Silindirik bir parça için; a) Isıtma derinliğine göre normalize edilmiş eddy akımları ve toplam ısıtma gücü değişimleri, b) Isıtıcı aparat üzerinde indüklenmiş olan eddy akımlarının vektörel ve yüzey yoğunluklu gösterimi.

III. MATERYAL VE METOT

İndüksiyon ısıtma sistemlerinde, sürekli akan sıvılar için ısıtma sağlayabilecek indüksiyon bobin tasarımı için birçok kablo türü mevcuttur. Bu kablolar kullanılarak oluşturulmuş indüksiyon bobininin performans analizini deneysel olarak yapmak oldukça zor ve zahmetli bir yöntemdir. Çünkü tüm çevresel faktörlerin ve çalışma şartlarının eşit koşullarda tutulması, istenen fiziksel boyutlarda kablo üretimi veya temini, kabloya ait tüm elektriksel özelliklerin eşit olması,

performans ölçüm sistemlerine ihtiyaç duyulması, tasarım ve süreç maliyeti vb. gibi zorluklar mevcuttur. Bu zorlukları aşmak için bilgisayar tabanlı modelleme ve simülasyon paket programlarından faydalanmak uygun bir yöntemdir. Bu yüzden, modeli oluşturulan indüksiyon bobinlerinin performans analizini gerçekleştirmek için COMSOL® Multiphysics yazılımı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ve kısmi diferansiyel denklemler (PDE) ile çözüm üreten COMSOL programı, farklı programlar (Matlab, AutoCad, Catia, Solid-Works, vb.) ile etkileşimli çalışabilen güçlü bir modelleme ve simülasyon paket programıdır ve birçok mühendislik bilim dalında sıkça kullanılmaktadır [23,24]. Yazılım, indüksiyon ısıtma ile ilgili birçok çalışmada da kullanılmıştır [17,18,25].

İndüksiyon bobin tasarımında kullanılacak iletken türleri araştırıldığında, genel olarak 8 farklı kablo tipine ulaşılmıştır. Farklı tip bu kablolar kullanılarak COMSOL 3B modelleme ortamında oluşturulan indüksiyon bobinleri Şekil.3'te verilmiştir. Bu bobinlerin ortak özelliği; eşit iç silindirik çap ve yüksekliğe, eşit toplam kablo kesit değerine (K2 ve K6 hariç) ve eşit manyeto-motor-kuvvet (mmk) değerine sahip olmalarıdır. Şekil.3.a'da verilen K1 modeli, tek damarlı dairesel kesitli silindirik bakır kablodan 6 sipir sarılarak üretilmiş indüksiyon bobin modelidir; kablo yarıçapı 7.3mm olup kablo kesiti 167.4mm² olarak hesaplanmıştır. Şekil.3.b'de verilen K2 modeli, yüksek frekanslı uygulamalarda kullanmak ve aynı zamanda soğutma sağlamak amacıyla K1 modelinin içinin boşaltılmış versiyonudur. Çok telli konsantrik iletkenlerden 5 sipir sarılarak üretilen K3 indüksiyon bobin modeli Şekil.3.c'de verilmiştir; 19 adet 10.52mm² lik iletkenlerden oluşan bu kablo, K1 modeline göre daha esnek bir yapıya sahiptir. Şekil.3.d'de verilen K4 modeli, dikdörtgen kesitli bakır lamadan tek sipir olarak üretilmiş indüksiyon bobinini temsil etmektedir; kesit kenar uzunlukları 10mm/100mm olan kablo, 1000mm²lik kesit alanına sahiptir. Dikdörtgen kesitli kablodan 6 sipir sarılarak oluşturulan K5 indüksiyon bobin modeli Şekil.3.e'de verilmiştir; kenar uzunlukları 11.1mm/15mm olan kablo, 166.5mm² lik kesit alanına sahiptir. Yüksek frekanslarda kullanmak ve soğutma sağlamak amacıyla K5 modelinin içinin boşaltılmasıyla elde edilen K6 indüksiyon bobin modeli Şekil.3.f'de verilmiştir. Şekil.3.g'de verilen K7 modeli, ince kesitli bakır yaprak levhadan 6 sipir sarılarak oluşturulmuş indüksiyon bobin modelidir; levha kalınlığı 1.67mm olarak seçilmiştir. 2.164mm²lik demet iletkenlerden 5sipirlik Litz kablosu olarak sarılmış K8 indüksiyon bobin modeli Şekil.3.h'da verilmiştir; silindirik kesite sahip Litz kablosu demetinde 91 bağımsız iletken bulunmaktadır.



Şekil 3. Farklı tip kablolar kullanılarak COMSOL 3B modelleme ortamında oluşturulan indüksiyon bobinleri

İndüksiyon bobinleri aksel simetrik yapıya sahip oldukları için, manyetik analizler ve performans testleri '2B Axisymmetric' ortamda gerçekleştirilmiştir. 3B modelleme ortamı, her türlü modelin oluşturulmasına imkân sağlasa da, simülasyon için oluşturulacak ağ (mesh) yapı elemanlarının sayısını, bilgisayar hafıza gereksinimini ve model çözüm süresini ciddi oranda arttırmaktadır; bu yüzden modellemeler için 2B ortam tercih edilmiştir. 2B Axisymmetric çizim ortamında oluşturulan indüksiyon bobinlerinin simülasyonları, sayısal ve grafiksel verilerin elde edilmesi için, COMSOL® Multiphysics programının 'Magnetic Fields (MF)', 'Heat Transfer in Solid (HT)' ve 'Fluid-Laminar Flow (SPF)' fizik modülleri kullanılmıştır.

3.1. Sistem Tanıtımı, Fiziksel Boyutlar ve Kabuller

İndüksiyon ısıtma sistemi üç ana unsurdan oluşmaktadır; bunlar: ısıtılacak sıvıyı taşıyacak olan plastik (paramanyetik) boru, indüksiyon ısıtma aparatı ve indüksiyon bobinidir. Sıvıyı taşıyacak olan plastik borunun iç ve dış yarıçapları

sırasıyla 16mm ve 19mm olarak seçilmiştir. Isıtıcı aparat olarak, içi dolu silindirik manyetik malzeme kullanılmış olup yüksekliği 100mm ve yarıçapı 12mm'dir. İndüksiyon bobinlerinin maksimum yüksekliği, ısıtıcı aparat yüksekliğiyle eşit değerde olup 100mm'dir; ısıtma aparatına eşit yakınlığı sağlamak için tüm indüksiyon bobin iç yarıçapları $r=20\text{mm}$ olarak seçilmiştir; dış yarıçaplar, iletken türüne göre değişiklik arz etmektedir. Bobinde kullanılan net toplam bakır kesiti 1000mm^2 olarak seçilmiştir.

İndüksiyon bobinlerinin eşit etkin değerdeki manyetomotor-kuvvete ($\mathcal{F}_{mmk} = 2000 \text{ As}$) sahip olduğu kabul edilmiştir. Performans kıyaslamasına olanak sağlayabilen eşit kesite sahip indüksiyon bobinleri oluşturmak amacıyla, kullanılan iletken geometrisine uygun olarak 1-4-6 siperlik sargı kullanılmıştır. Isıtma aparatının yüzeyinde oluşan ısıyı akan sıvıya kolayca iletme ve ısıyı, plastik boruya verebileceği zararı önlemek için, ısıtma aparatı ile boru arasına 4mm boşluk bırakılmıştır. Böylece, sıvının akış yolu üzerine konulan ısıtma aparatının kesit alanı 452mm^2 ve

boru iç kesit alanı 804mm² seçilerek, sıvı için 352mm² lik bir akış yolu kesiti bırakılmıştır. Isıya maruz kalmadığı için indüksiyon bobin sargı direncinin sıcaklıkla değişmediği kabul edilmiştir. Simülasyon çözümleme bölgesi, 300mm çap ve 800mm yüksekliğe sahip içi hava dolu bir silindir ile sınırlandırılmış; dış sınır yüzeyler, manyetik yalıtkan malzeme olarak tanımlanmıştır ($n \times \vec{A} = 0$). Bazı durumlarda çözümleyicide yakınsama (converging) problemlerine sebep olan hava'nın elektriksel iletkenliği, çözümü etkilemeyecek şekilde $\sigma_{hava} = 1 S/m$ olarak alınmıştır.

3.2. Bölge (Domain) ve Sınır (Boundary) Koşulları

İndüksiyon bobinlerinin performans testlerini gerçekleştirmek için aynı çalışma koşullarının sağlanması gereklidir. Bu amaçla, indüksiyon ısıtma simülasyonlarında, aynı özelliklere sahip ferromanyetik malzeme kullanmak için ısıtma aparatları 'demir' (Iron) olarak tanımlanmıştır. Manyetik malzemelerin bağıl manyetik geçirgenliği sıcaklık ile ters orantılı olarak değişmektedir; bu yüzden, ısıtma aparatının bağıl manyetik geçirgenliği çalışma sıcaklığına göre tespit edilmelidir. Isıtılacak olan sıvı, su olarak alınırsa, kaynama noktası ve dolayısıyla ısıtma aparatının çalışma sıcaklığı en fazla 100°C olacaktır. Bu yüzden, ısıtma aparatı olarak seçilen demir malzemenin 100°C'deki bağıl manyetik geçirgenliği $\mu_r = 3850$ olarak girilmiştir; demir malzemenin elektriksel iletkenliği, düşük ısılar için değişmediği kabul edilerek $\sigma = 1.12e7 S/m$ olarak alınmıştır. İndüksiyon bobinlerine, 'bakır' (copper) malzeme özellikleri atanmış olup elektriksel iletkenlik $\sigma = 5.998e7 S/m$ ve bağıl manyetik geçirgenlik olarak kabul edilmiştir. İndüksiyon bobinlerine herhangi bir yöntemle soğutma uygulandığı için ısınmadıkları ve iç ohmik dirençlerinin sıcaklıkla değişmediği varsayılmıştır. Manyetik analiz, tüm indüksiyon bobinleri için 'Frequency-Stationary' çalışma tipi ve frekans tabanlı parametrik çözüm kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

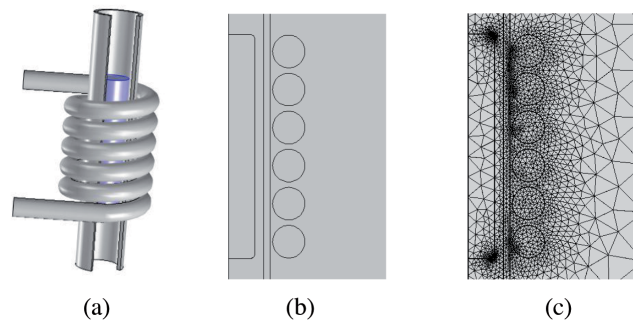
COMSOL programı, modellenmiş olan tüm fiziksel sistemleri, sonlu elemanlar yöntemine (FEM) göre sonlu parçalara ayırıp; modelin fiziksel boyutlarını, model bölge özelliklerini, sınır koşullarını, giriş-çıkış parametrelerini, modelde kullanılan malzeme özelliklerini (manyetik, elektriksel, ısıl, vb.), çözüm-çözümleyici türünü ve kullanılan fizik modülündeki yapısal denklemleri kullanarak bir çözümleme yapmaktadır. Manyetik alanlar (MF) fizik modülünün kullanmış olduğu yapısal denklemler Eş.8'de verilmiştir.

$$(j\omega\sigma - \omega^2\epsilon_0\epsilon_r)\vec{A} + \nabla \times \vec{H} = \vec{J}_e \quad \vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (8)$$

Fiziksel modeli sonlu parçalara ayırma işlemi, belirtilen özelliklerde ağ örgüsü oluşturmakla sağlanmaktadır. Ağ örgüsünün kalitesi (parça sayısı), simülasyon çözüm sonuçlarını ve çözüm süresini etkilemektedir; bu yüzden modelde, aynı kalitede ağ örgüsü oluşturmak amacıyla, ısıtıcı aparat bölgesinde en büyük ağ boyutu 1mm ile sınırlandırılmıştır; diğer bölgelerdeki mesh kalitesi iyi-kalite (fine) olarak ayarlanmıştır. İndüksiyon bobin geometrik şekillerinin çok farklı yapıda olması, eşit sayıda parça (element) sayısına bölünmesine imkân tanımamaktadır.

Isıtıcı aparatların dış sınır bölgelerine, 'Empedans Sınır Koşulu' (Impedance Boundary Condition) ataması yapılmıştır. Bu sınır koşulu, manyetik alanların bu sınırlardan içeriye çok az girişim yapabildiği, diğer bir deyişle, eddy akımlarının sadece aparat yüzeylerinde akabileceğini belirtmektedir. Empedans Sınır Koşulu, yüksek frekanslı indüksiyon ısıtma uygulamalarındaki deri etkisini en iyi şekilde modelleyebilmekte ve simülasyon çözüm süresini ciddi oranda kısaltabilmektedir.

Model bünyesindeki indüksiyon bobin bölgeleri, silindirik yapıda sarılmış tek-sipirli bobin (Single-Turn Coil) ve/veya bobin grubu (Coil Group) bölge özelliğine sahiptir. Bu sayede tüm bobin parametreleri (direnç, endüktans, empedans, gerilim, güç, vb.) kolaylıkla hesaplanabilecektir. Tüm modellerdeki indüksiyon bobin beslemesi, akım kaynağından sağlanmıştır. Belirtilen tüm bu koşullar altında, K1 tipi indüksiyon bobini kullanılarak katı modeli oluşturulan indüksiyon sıvı ısıtıcısının 3B görüntüsü Şekil.3.a'da, 2B Axisymmetric ortamda manyetik analiz için oluşturulan model Şekil.3.b'de ve ağ yapısı Şekil.3.c'de verilmiştir.



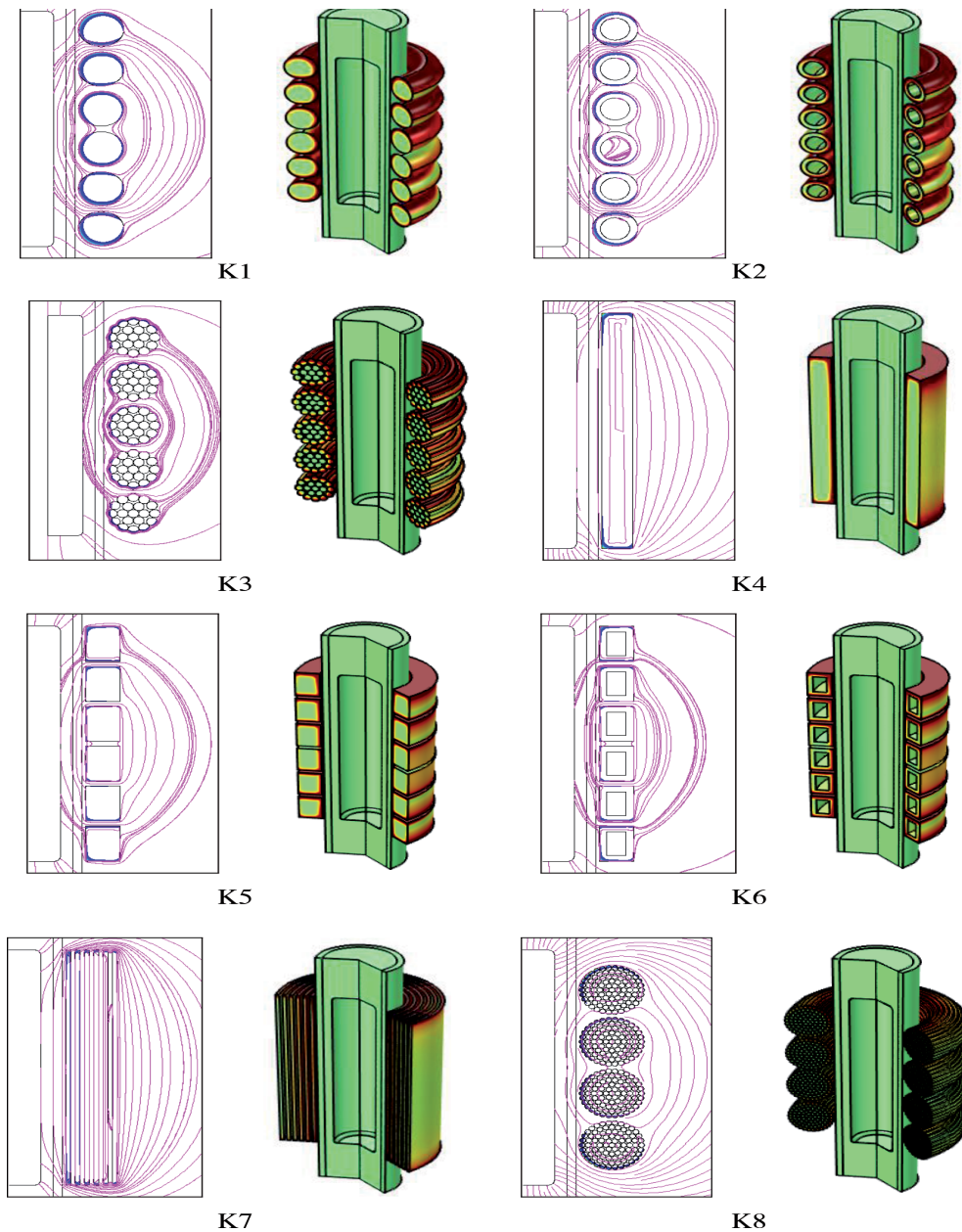
Şekil 4.a) K1 tip indüksiyon bobininin kullanıldığı indüksiyon sıvı ısıtıcının 3B görüntüsü, b) 2B Axisymmetric ortamda oluşturulan K1 modeli, c) K1 modeline ait ağ yapısı

IV. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Tasarım prensipleri, çalışma koşulları, kullanılan malzemelerin elektriksel-manyetik özellikleri, belirlenen fiziksel ölçüler ve bazı kabuller çerçevesinde; daha önce

Şekil.3'te verilen farklı tipteki kablolar kullanılarak tasarımı gerçekleştirilen indüksiyon bobin modelleri, aynı çevresel faktörleri sahip indüksiyon ısıtıcının dışına konumlandırılarak 2B manyetik analizler gerçekleştirilmiştir. İndüksiyon bobinlerinin performans analizi, COMSOL bünyesinde bulunan entegrasyon hesaplayıcı yardımıyla, ısıtıcı aparat yüzeyinde açığa çıkan ısı gücü (mf.Qsrh) hesap edilerek gerçekleştirilmiştir. Aparat üzerinde açığa çıkan ısı gücü, aynı zamanda akışkan sıvıya transfer edilecek olan ısı gücüne de eşittir. İndüksiyon bobinlerinin $f=10\text{kHz}$ çalışma frekansı için, 2B eksenel simetri çizim modundaki manyetik

analiz sonuçları ve 3B gösterimi Şekil.5'de verilmiştir; 2B şekillerde kablo kesiti üzerindeki renklendirmeler 'akım yoğunluğunu' ve çizgisel hatlar 'manyetik akıyı' temsil etmektedir; 3B şekillerdeki renklendirmeler 'akım yoğunluğunu' belirtmektedir. Şekil.5'deki tüm modellerde bobin akımının, deri etkisinden dolayı iletkenlerin dış yüzeyine yoğunlaştığı ve yakınlık etkisinden dolayı da iletken dış yüzeylerine simetrik olarak dağılmadığı açıkça görülmektedir; daha yüksek çalışma frekanslarında bu etkiler çok daha belirgin hale geldiği için, bobin akımları iletken yüzeyinde çizgisel şekilde oluşmaktadır.



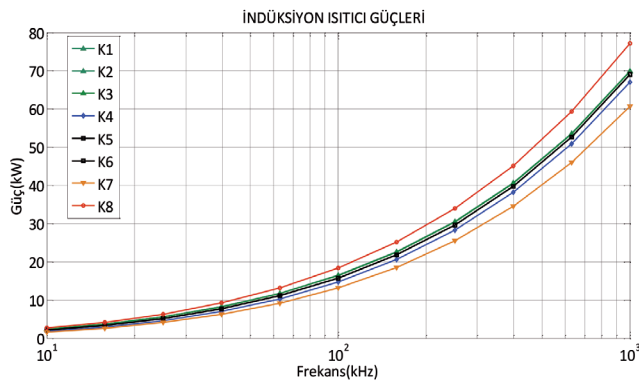
Şekil.5. İndüksiyon bobinlerinin manyetik analiz sonuçları

İndüksiyon bobin modellerinin performanslarına ilişkin simülasyon sonuçları Tablo.1’de verilmiştir. Tablo.1, 8 farklı kablodan imal edilen indüksiyon bobinlerinin, 11 farklı çalışma frekansında üretmiş oldukları güçleri içermektedir; parametrik manyetik analiz için gerekli olan çalışma frekansları, 10kHz ve 1MHz arasında logaritmik bir artışla tanımlanmıştır. Tablo.1’de verilen sonuçlara göre; bu çalışmada belirtilen tasarım kriterlerine göre en iyi performansa sahip indüksiyon bobin tipi K8 türüdür. Litz kablosundan üretilen K8 tipi indüksiyon bobini, deri ve yakınlık etkisinin olumsuz yönlerini azaltarak en fazla indüksiyon ısıtma gücünü sağlamıştır; Litz kablosunun performansı, yüksek frekanslarda daha da belirgin hale gelmektedir. İkinci sıradaki en iyi performans, aynı güçlere

sahip olan K1 ve K2 modellerine aittir; bu sonuç, benzer geometrik şekle sahip olan bu iletkenler için beklenen bir durumdur. Bu modelleri sırasıyla, çok az bir farkla K3, K5 ve K6 türleri izlemektedir. K5 ve K6 tipi modeller de yine, benzer geometriye sahip oldukları için, hemen hemen eşit indüksiyon ısıtma gücünü sağlamıştır. Tek sipirlik sargıdan oluşan K4 tipi ve ince kesitli bakır levhadan üretilen K7 tipi modeller daha düşük performans değerlerine sahiptir. Tablo.1’de verilen simülasyon sonuçları, Şekil.6’da grafiksel olarak ta verilmiştir; K1, K2 ve K3 tipleri yakın güç değerlerine sahip oldukları için grafikler çakışık durumda oluşmuştur; benzer durum, K5 ve K6 tipleri için de geçerlidir.

Tablo 1. İndüksiyon bobin performanslarına ait simülasyon sonuçları

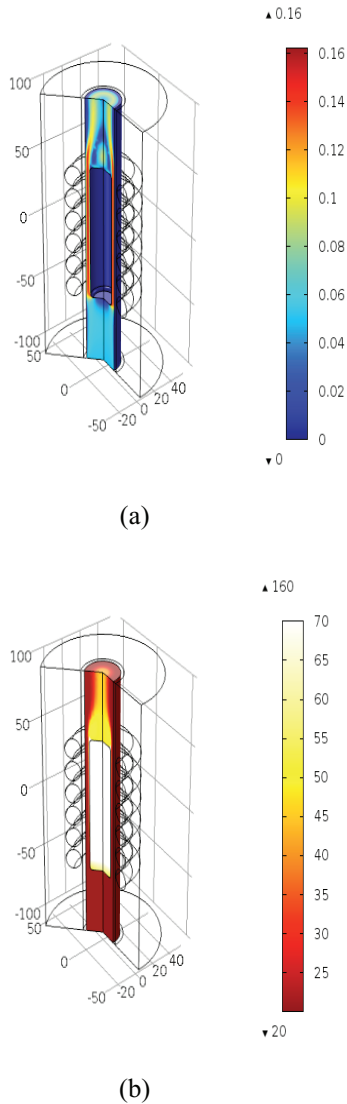
İndüksiyon Bobin Tipi	Farklı Frekans Değerleri için İndüksiyon Isıtma Güçleri (Watt)										
	10kHz	15.85kHz	25.12kHz	39.81kHz	63.1kHz	100kHz	158.5kHz	251.2kHz	398.1kHz	631kHz	1MHz
K1	2412	3732	5618	8235	11777	16476	22613	30539	40688	53602	69937
K2	2412	3732	5618	8235	11777	16477	22615	30540	40689	53602	69936
K3	2378	3689	5566	8174	11710	16404	22539	30463	40606	53508	69821
K4	1871	2992	4650	7019	10307	14756	20653	28348	38272	50956	67048
K5	2172	3401	5184	7696	11137	15748	21814	29687	39802	52700	69041
K6	2172	3401	5184	7695	11136	15745	21809	29679	39786	52670	68985
K7	1634	2639	4128	6255	9210	13218	18546	25516	34520	46046	60655
K8	2729	4219	6338	9270	13221	18445	25246	33999	45169	59334	77197



Şekil.6. İndüksiyon bobin tiplerinin performans grafiği

Son aşamada, tasarımı yapılan indüksiyon bobinlerinin, sıvı akış yoluna konumlandırılan ısıtma aparatı üzerinde oluşturdukları ısıtma gücü ve akışkan sıvı içindeki çalışma şekli ‘Fluid-Laminar Flow’ fizik modülü ile simüle edilmiştir. Simülasyonda sıvı olarak 5cm/s akış hızına sahip su (liquid

water) kullanılmıştır; su akış haznesindeki tüm yüzeylerin sabit durduğu (wall) ve sürtünmeli olduğu (no slip), boru dış çeperinin termal yalıtkan olduğu kabul edilmiştir. Bu şartlar altında, K1 tipi indüksiyon bobininin $f=10\text{kHz}$ için elde edilen simülasyon sonuçları Şekil.7’de verilmiştir. Şekil.7a’da, boru içinde tanımlanmış olan sıvının 3B akış hız grafiği verilmiştir; ısıtıcı aparatın bulunduğu ve kesitin daraldığı bölgede, sıvı akış hızının artmış olması beklenen bir sonuçtur; ısıtıcı aparat çeperinde sıvı akış hızı 16cm/s’ye kadar yükselmiştir. Şekil.7b’de, ısıtıcı aparatın akışkan sıvıyı ısıtma şekline ait kesit görüntü verilmiştir. Sıvı giriş sıcaklığı 20°C olarak tanımlanmıştır. Isıtıcı aparat yüzeyindeki maksimum sıcaklık değeri 160°C olarak hesaplanmıştır. 5cm/s’lik akış hızına sahip sıvının, ısıtıcı aparat üzerindeki ısıyı alarak uzaklaştığı ve borunun merkezine doğru yoğunlaştığı açıkça görülmektedir. Daha yüksek çalışma sıcaklıkları elde etmek için, daha yüksek çalışma frekansları veya daha düşük sıvı akış hızları kullanılmalıdır.



Şekil 7. K1 tipi indüksiyon bobinine ait sıvı ısıtma simülasyon sonuçları, a) Sıvının akış hızı grafiği, b) Isıtıcı aparatın akışkan sıvıyı ısıtma şekline ait kesit görüntü

V. SONUÇ VE ÖNERİLER

İndüksiyon sıvı ısıtma sistemlerinin performansını etkileyen en önemli unsurlardan biri, yüksek frekanslı manyetik alanı sağlayacak olan indüksiyon bobinleridir. Günümüzde, indüksiyon bobin tasarımı için kullanılan (veya kullanılabilecek olan) iletken geometrileri çok fazla çeşitlilik arz etmektedir. Bu çalışmada, 8 farklı iletken türünden imal edilen indüksiyon bobinleri COMSOL® Multiphysics yazılımı ile 3B olarak modellenmiş, farklı çalışma frekansları için eşit koşullarda 2B Axisymmetric manyetik analizleri gerçekleştirilmiş ve performans değerleri hesaplanmıştır; hesaplanan sonuçlar tablo ve

grafik ortamında verilmiştir. Bu sonuçlara göre, indüksiyon bobin tasarımında kullanılabilecek en verimli iletken türü Litz (K8) kablosudur. Tek damarlı dairesel kesitli silindirik kablolar (K1 ve K2) ve çok telli konsantrik kablo (K3) verimlilik açısından ikinci sırada yer almaktadırlar. Litz kablusunun diğerlerine göre üstünlüğü, orta ve yüksek çalışma frekanslarında daha belirgin hale gelmektedir; düşük çalışma frekanslarında, Litz kablosu ile diğerlerinin arasında çok belirgin bir fark görülmemektedir. Dikdörtgen kesitli kablolar (K4, K5, K6), her ne kadar doluluk (sıklık) oranı yüksek sargı oluşturmaya imkân tanısa da, indüksiyon ısıtma sitemlerinde orta dereceli bir performansa sahiptir. En düşük verimlilik, ince kesitli bakır levhadan üretilen K7 tipi indüksiyon bobinine aittir. Geometrik yapısı gereği üst üste sarılan sivriler ve sargı boşlukları, bobin akımının (ve dolayısıyla manyetik alanın) ısıtıcı olarak kullanılan demir aparatın uzaklaşmasına sebebiyet vermiş ve ısıtma gücünü azaltmıştır. İndüksiyon bobinlerinin performansını etkileyen diğer bir önemli parametre, bobin sargılarından geçen yüksek akımların oluşturduğu ısı kayıplarıdır (joule heating). Bu ısı kayıpları, bazı durumlarda indüksiyon bobinlerinin soğutulmasını zorunlu kılmaktadır. Bu tip çalışma durumları için, geometrik yapısı gereği iyi bir soğutmaya imkân tanıyan K2 veya K6 tipi iletkenlerin indüksiyon bobin tasarımında kullanılması uygun olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Fairchild Semiconductor Inc. (2000). Induction Heating System Topology Review, Application Note, AN-9012.
- [2] Rudnev, V.I. (2003), Handbook of Induction Heating, Marcel Dekker Inc..
- [3] Zinn, S., Semiatin, S.L. (2002). Elements of Induction Heating, Design, Control, and Application, Electric Power Research Institute, Inc.
- [4] Sadhu, P.K., Roy, D., Pal, N., (2015). Design and Implementation of High Frequency Inverter Operation for Induction Heating Cooking Application Using PSIM Software, Int. J. of Electronics & Communication Technology (IJECT), 6(1), 130-133.
- [5] Altıntaş, A., Yıldız, M.N., Kızılkaya, İ., (2012). İndüksiyon Isıtma Prensibi ile Çalışan Mikrokontrol Denetimli Bir Sıvı Isıtıcısı Tasarımı, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt 29, 45-52.
- [6] Al-Shaikhli, A.K.M., Meka, A.T., (2014). Design and Implementation of Practical Induction Heating Cooker, Int. J. of Soft Computing and Engineering (IJSCE), 4(4), 73-76.
- [7] Sarnago, H., Lucia, O., Mediano, A., Burdío, J.M., 2013. Modulation Scheme for Improved Operation of a RB-IGBT Based Resonant Inverter Applied to Domestic Induction Heating, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 60(5), 2066-2073.

- [8] Curran, J.S., Featherstone, A.M., (1988). Electric-Induction Fluid Heaters, *Power Engineering Journal*, 2(3), 157-160.
- [9] Kenada, M., Hishikawa, S., Tanaka, T., Guo, B., Nakaoka, M., (1999). Innovative Electromagnetic Induction Eddy Current-Based Dual Packs Heater Using Voltage-Fed High-Frequency PWM Resonant Inverter for Continuous Fluid Processing in Pipeline, *IEEE Engineering Technologies*, Vol.2, 797-802.
- [10] Nakamizo, T., Guo, B., Nakaoka, M., (1999). New Generation Electromagnetic Induction-Based Fluid-Heating Energy Processing Appliance Using Voltage-Fed PWM Resonant Inverter, *Proceeding of PCIM-Tokyo, Japan*, 597-607.
- [11] Sadakata, H., Nakaoka, M., Yamashita, H., Omori, H., Terai, H., (2002). Development of Induction Heated Hot Water Producer Using Soft Switching PWM High Frequency Inverter, *IEEE, PCC-Osaka-2002*, Vol.2, 452-455.
- [12] Nakamizo, T., Kenada, M., Hishikawa, S., Guo, B., Iwamoto, H., Nakaoka, M., (1999). New Generation Fluid Heating Appliance Using High Frequency Load Resonant Inverter, *IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS'99, Hong Kong*, Vol.1, 309-314, .
- [13] Zhang S.J., Yang Z.Q., Zhao Q.H., (2004). Electromagnetic Water Heater, U.S. Patent, No: 6674055.
- [14] Greis I., Ostlund A., (1984). Device for Heating Fluent Material Flowing Past Short-Circuited Heating, U.S. Patent, No: 4471191, Asea Ab.
- [15] G.J. Anders, (2011). Rating of Electric Power Cables, Ampacity Computations for Transmission, Distribution and Industrial Applications, *IEEE Press Power Engineering Series*, Mc-Graw Hill Comp.
- [16] Ahmed, T., Ogura, K., Chandhaket, S., Nakaoka, M., (2003). Asymmetrical Duty Cycle Controlled Edge Resonant Soft Switching High Frequency Inverter for Consumer Electromagnetic Induction Fluid Heater , *Automatica*, ATKAAF 44(1-2), 21-26.
- [17] Djellabi, K., Latreche, M.E.H., (2014). Induction Heating Process Design Using COMSOL® Multiphysics Software 4.2a , *Int. J. of Electrical, Computer, Electronics and Communication Engineering*, 8(1).
- [18] Istardi, D., Triwinarko, A., (2011). Induction Heating Process Design Using COMSOL® Multiphysics Software, *Telkomnika*, 9(2), 327-334.
- [19] <http://www.dw-inductionheating.com/heating%20coil%20design.pdf>, Dawei Induction Heating Machine Co.,Ltd (Erişim tarihi: 02.11.2015)
- [20] Iatcheva I., Gigov G., Kunav G., Stancheva R., (2012). Analysis of Induction Heating System for High Frequency Welding, *Facta Universitatis, Elec. Energ.*, 25 (3), 183-191.
- [21] Sugimura H., Muraoka H., Ahmed T., Chandhaket S., Hiraki E., Nakaoka M., Lee H.W., (2004). Dual Mode Phase-Shifted ZVS-PWM Series Resonant High-Frequency Inverter for Induction Heating Super-Heated Steamer, *Journal of Power Electronics*, 4(3), 138-151.
- [22] Roßkopf A., Bär E., Joffe C., (2014). Influence of Inner Skin and Proximity Effects of Conduction in Litz Wires, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(10).
- [23] Zimmerman, W.B.J., (2006). Multiphysics Modelling with Finite Element Methods, *Series on Stability*, World Scientific Pub., 432 p.
- [24] Pryor, R.W., (2011). Multiphysics Modelling using COMSOL: A first principles approach, *Jones & Bartlett Pub., Mass.*, 852 p.
- [25] Ernest, R., Perrier, D., Feigenblum, J., Hemous, R., (2006). 3D Inductive Phenomena Modelling, *In The Proceeding of the COMSOL Users conference*, Paris, 81-86.