

## İNDÜKSİYON ISITMA YÖNTEMİYLE ÇALIŞAN SIVI ISITICISI APARATLARININ ARAŞTIRILMASI

Ahmet ALTINTAŞ \*, Murat KARAHAN

### Özet

Sürekli akan sıvıların ısıtılması için kullanılan yöntemlerden biri de indüksiyon ısıtmadır. İndüksiyon ısıtma işlemi, yüksek frekanslı manyetik alan içine konulan manyetik malzeme üzerinde indüklenen eddy akımlarıyla gerçekleştirilir. Günümüzde, ferromanyetik malzemelerden farklı geometrilerde üretilen indüksiyon ısıtma aparatları, genel olarak iki gruba ayrılabilir: Havuz tip ve Yüzer tip. Yüzer tip ısıtma aparatları daha az güç kayıplarına sahip oldukları için, havuz tip ısıtma aparatlarına göre daha yüksek verimle çalışırlar. Tarihsel gelişim sürecindeki çalışmalarda birçok yüzer tip indüksiyon ısıtma aparatı modeli sunulmuştur. Bu çalışmada; farklı geometrik şekle sahip olup, indüksiyon sıvı ısıtıcılarda ısıtma parçası olarak kullanılmış tüm ısıtma aparatları araştırılmış, üstünlük ve mahzurları incelenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** İndüksiyon ısıtma, İndüksiyon sıvı ısıtma, Isıtma aparatları.

## INVESTIGATION OF THE FLUID-HEATING APPARATUS OPERATING WITH THE PRINCIPLE OF INDUCTION HEATING

### Abstract

Induction heating is one of the methods for continuously flowing fluid. Induction heating process is accomplished by placing magnetic materials in a high-frequency-electromagnetic field and inducing eddy currents in magnetic materials. Currently, induction heating apparatus produced from ferromagnetic materials at different geometric forms can be grouped into two classes: sink type and floating type. Floating types of induction heating apparatus work more efficiently than sink types due to having small amount of power losses. Various floating types of induction heating apparatus have been introduced in historical evolutionary process of the induction heating. In this study; all heating apparatus used in induction fluid heater, having different geometric forms, have been investigated; also, advantages and disadvantages of them have been determined.

**Key words:** Induction heating, Induction fluid heater, Heating apparatus.

---

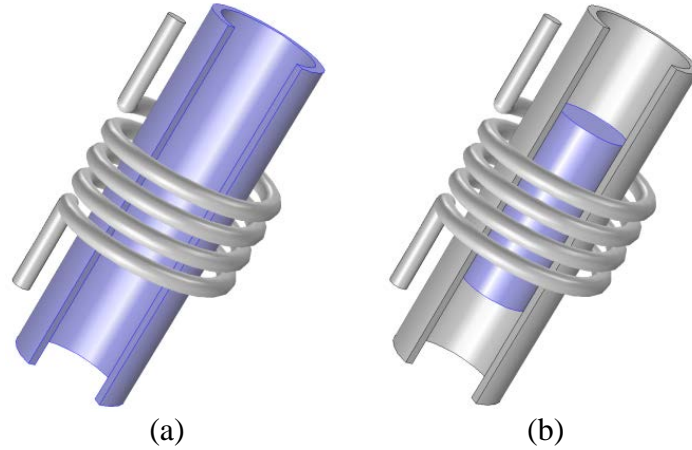
\* Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh., Simav/Kütahya  
E-posta: ahmet.altintas@dpu.edu.tr

## 1. Giriş

Elektrik enerjisi, günümüz şartlarında ısıtma sistemleri için kullanılan en yaygın ve en temiz enerji türüdür. Elektriksel ısıtma, genel olarak rezistif ısıtma ve indüksiyon ısıtma olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir. Rezistif ısıtma günümüzde en ekonomik ve dolayısıyla en yaygın elektriksel ısıtma yöntemidir. 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, manyetik malzemeler üzerinde oluşturduğu histerezis ve eddy akımlarıyla sağlanmaktadır. İndüksiyon ısıtma sistemlerinin temel yapıtaşı; yüksek frekanslı akımı sağlayacak olan inverter, manyetik alan kaynağı olan indüksiyon bobini ve enerji depolama elemanı olan kondansatörlerden oluşmaktadır [1,2].

Akışkan 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 bunlardan bazılarıdır. Rezistanslı sıvı ısıtma sistemlerinin bu olumsuz etkilerinden kurtulmak için günümüzde, indüksiyon ısıtma prensibi ile çalışan düzenekler hakkında birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. İndüksiyon sıvı ısıtma teknolojisi alışlagelmiş ısıtma sistemlerine göre; işlem süresinin oldukça kısa olması, dış çevreye ısı dağılımının olmaması veya en az olması, temassız bir ısıtma yöntemi 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 sıvı ısıtma sistemlerinin endüstriyel ve evsel uygulamalardaki kullanımı giderek artmaktadır [3-7].

Tarihsel gelişim sürecinde ortaya konulan indüksiyon sıvı ısıtma çalışmaları incelendiğinde, sabit duran ve/veya sürekli akan sıvıların ısıtılmasında endirekt indüksiyon ısıtma yönteminin kullanıldığı görülecektir; çünkü akışkan sıvılar (çoğunlukla su veya bazı kimyasal sıvılar) genellikle paramanyetik veya diyamanyetik malzeme özelliğine sahiptirler. Bu yüzden, değişken manyetik alan ile kolaylıkla ısıtılabilen ferromanyetik malzemeler, indüksiyon ısıtıcılarda ısıtma aparatı olarak kullanılmakta ve endirekt ısıtma sağlanmaktadır. Isıtma aparatları genel olarak iki ana gruba ayrılabilir: Ferromanyetik malzemedен 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 ortama yayılmaktadır; ayrıca, ortama yayılan bu ısı bazı durumlarda indüksiyon bobinlerinin soğutulmasını zorunlu kılmaktadır. Yüzer tip indüksiyon ısıtıcılarda bu tür sakıncalar bulunmadığı için verimleri yüksek ve daha güvenlidir. Havuz ve yüzer tip indüksiyon sıvı ısıtıcı modelleri Şekil.1’de verilmiştir.



Şekil 1. İndüksiyon sıvı ısıtıcı modelleri, a) Havuz tip, b) Yüzer tip.

Havuz tip indüksiyon ısıtma sistemlerinde geometrik olarak tek tip ısıtma aparatı (silindirik boru) kullanılmış olsa da, yüzer tip indüksiyon ısıtma sistemlerinde, ısıtma aparatı olarak birçok geometrik şekil kullanılmıştır. Bazı çalışmalarda indüksiyon yüzer tip indüksiyon ısıtma aparatı olarak kullanılan birkaç ferromanyetik ısıtma aparatı tanıtılmıştır [4]. Bununla beraber, yapılan literatür taramasında, tarihsel gelişim süresi içinde açığa çıkan ısıtma aparatlarını ve onların geometrik özelliklerini tanıtan, üstünlük ve mahzurlarını belirten kapsamlı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Sunulan bu çalışmada, yüzer tip indüksiyon sıvı ısıtma sistemlerinde kullanılan ve farklı geometrik şekle sahip olan ısıtma aparatları araştırılmıştır. Bu sayede tasarımcılara, tasarımlarında kullanabilecekleri geometrik ısıtma parçası modelini kolayca seçebilme, manyetik analizi ve performans testlerini yapabilmeye, yeni modeller geliştirebilme ve dolayısıyla üretime katkı sağlama amaçlanmıştır.

## 2. İndüksiyon Isıtma Prensipleri ve Deri Etkisi

Tüm metaller, bir miktar zorluk (direnç) göstermelerine rağmen, elektrik akımını kolaylıkla iletirler. Akıma karşı gösterilen bu zorluk sebebiyle, metal cisimler üzerinde oluşan güç kayıpları, ısı şeklinde açığa çıkar; böylece, enerji korunumuna göre, elektrik enerjisi form değiştirmiş olur. Açığa çıkan güç kaybı, temel elektrik formülü olan  $P=i^2.R$  ile kolayca hesaplanabilir.

Bir bobine alternatif akım uygulandığında, Amper yasasına göre ( $\mathcal{F} = \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = N \cdot I$ ) bobin etrafında değişken bir manyetik alan oluşur. Bu manyetik alan, Faraday Yasasına göre ( $\mathbf{e} = -d\Phi/dt$ ) manyetik alan içinde bulunan diğer cisimler üzerinde bir gerilim indükler. İndüklenen bu gerilim, Lenz yasasına göre cisimler içinde indüksiyon akımlarının (eddy akımlarının) akmasına sebep olur. Uygun ortamlarda yüksek değerlere ulaşabilen bu indüksiyon akımları, metal cisimlerin dirençleri üzerinde yüksek güç kayıplarına ve dolayısıyla ısı üretilmesine sebep olur; bu güç kayıpları Foucault kayıpları olarak ta bilinmektedir. Buna ek olarak, manyetik metal malzemeler üzerinde oluşan histerezis kayıpları da bir miktar ısınmaya sebep olmaktadır. Foucault ve/veya histerezis güç kayıpları ile sağlanan ısıtma tekniğine “indüksiyon ısıtma” adı verilmektedir. İndüksiyon ısıtma, kısaca; manyetik bir malzemenin değişken bir manyetik alana maruz bırakılarak üzerinde gerilim indüklenmesi ve bu gerilimin oluşturacağı yüksek akımların 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],  $\vec{I}_e$  harici uygulanan akım yoğunluğu [ $A/m^2$ ],  $\vec{E}$  elektrik alan şiddeti [V/m],  $V$  skaler elektrik potansiyeli [V],  $\sigma$  elektriksel iletkenlik [S/m],  $\mu$  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.

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

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

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);

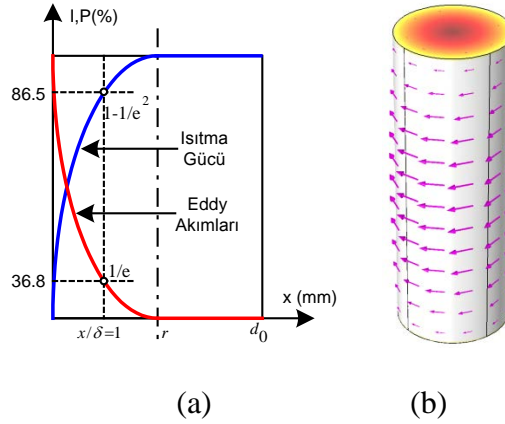
$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-k\nabla T) = Q \quad (5)$$

burada;  $k$  termal iletkenlik (W/(m.K));  $T$  sıcaklık (K);  $\rho$  yoğunluk ( $kg/m^3$ );  $C$  özgül ısı kapasitesi (J/(kg.K)) dir.

Düşük elektriksel ve manyetik geçirgenliğe sahip metal iş-parçaları üzerinde de indüksiyon ısıtma oluşturulabilir. 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 bağıl manyetik geçirgenliğine bağlıdır. Pratik uygulamalar için ısıtma derinliği, ortaya çıkan gücün yaklaşık olarak %86 kadar değerinin açığa çıktığı derinlik değeri olup Eş.6 ile hesaplanabilir; burada,  $\delta$  ısıtma derinliği (mm),  $\omega$  manyetik alanın açısal değişim hızı (rad/s),  $\mu$  iş-parçasının manyetik geçirgenliği (H/m) ( $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ ),  $\sigma$  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. Bu durum, bir manyetik analiz programı yardımıyla üç boyutlu model üzerinde de gösterilmiş olup, ısıtıcı aparat üzerinde indüklemiş olan eddy akımlarının vektörel ve yüzeysel gösterimi Şekil.2.b’de verilmiştir.



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

### 3. İndüksiyon Sıvı Isıtma Aparatları

1831 yılında Michael Faraday tarafından keşfedilen ve 20.yüzyılın başlarında kullanılmaya başlanılan indüksiyon ısıtma; ergitme, kaynak yapma, lehimleme, sıcak şekil verme, tavlama, yüzey sertleştirme ve muhtelif ısıl işlemler için uzun yıllardır yaygın olarak kullanılmaktadır. Temassız bir ısıtma yöntemi olan bu teknik daha sonraları, akışkan sıvıların ısıtılması, sıcak buhar elde edilmesi, mutfak (kaynatma-pişirme) uygulamaları, evsel ısıtma uygulamaları vb. amaçlar için kullanılmıştır.

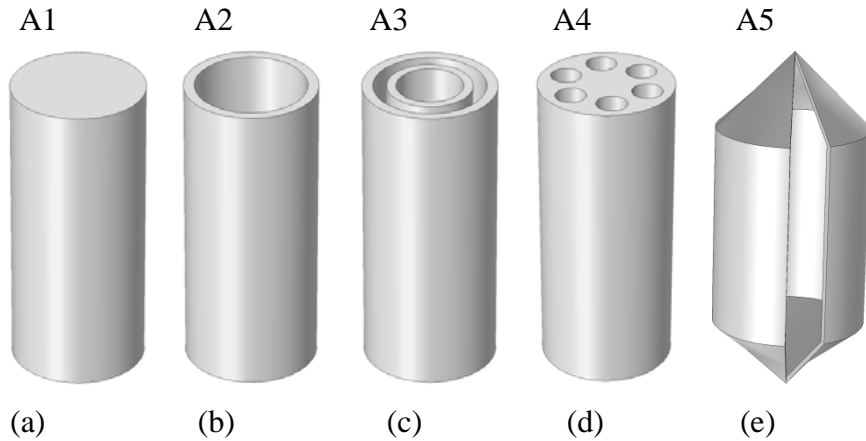
İndüksiyon yöntemiyle sıvı ısıtmada kullanılan ilk ve en basit yöntem “havuz tipi” indüksiyon ısıtmadır. Bu yöntemde ısıtma işlemi, içerisinde sıvı veya gaz barındıran veya taşıyan manyetik metal bir haznenin indüksiyon yoluyla ısıtılmasıyla sağlanmaktadır [8]. Havuz tip indüksiyon ısıtma ile ilgili çalışmalar, 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. Bir çalışmada [9], paslanmaz çelik borular üzerine indüksiyon bobinleri sarılarak, boru içinden akan yağın ısıtılması sağlanmıştır; ısıtılan yağ, kapalı çevrim bir ısı değiştiriciden geçirilerek indirekt yöntemle başka bir su sirkülasyon sisteminin ısıtılması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, indüksiyon ısıtma aparatı olarak, ısıtılan yağı taşıyan paslanmaz çelik borular kullanılmıştır. Başka bir çalışmada [10], PWM kontrollü paralel rezonans devresi, çelik boru içinden akan suyun ısıtılması için kullanılmıştır. İndüksiyon ısıtma yöntemiyle çelik boru ısıtılmış ve dolayısıyla boru içinden akan su ısıtılmıştır. İndüksiyon bobini olarak, içinden soğutma sıvısının geçirildiği bakır borular kullanılmıştır; bu sayede daha yüksek çalışma ısalarına çıkılmış ve bobinin zarar görmesi engellenmiştir. Tüm havuz tip indüksiyon ısıtıcıları benzer yapıdaki geometrilere sahiptir (Şekil.1.a) [11,12].

Havuz tip ısıtıcıların aksine, yüzer tip indüksiyon ısıtıcıları çok fazla çeşitliliğe sahiptir. Isıtma aparatları, sıvının geçiş bölgesine yüzer bir tarzda konumlandırıldığı için, süreç içinde farklı birçok ısıtma aparatı modeli sunulmuştur. Bunlar, bazı temel geometrik şekiller, onların türevleri, karmaşı veya optimize edilmiş formlarını kapsamaktadır. Tüm indüksiyon sıvı ısıtıcılarının ortak özelliği, hepsinin yüksek manyetik geçirgenliğe sahip paslanmaz ferromanyetik malzemelerden üretilmiş olmalarıdır. Yüzer tip ısıtıcı aparatların performansını etkileyen temel faktörler şunlardır: Aparatın indüksiyon bobinine yakınlığı, Aparatın etkin direnci, Aparatın yüzey alanı, Sıvı akış hızı. İndüksiyon bobinine yakınlık, aparat üzerinde

oluşacak eddy akımlarının büyüklüğünü; aparat etkin direnci, aparat üzerinde üretilecek olan ısı gücünü; aparat yüzey alanı, ısı transferinin hızını etkileyen en önemli faktördür. Sıvı akış hızı, ısıtılan sıvının sıcaklığını belirler.

Bu çalışmada araştırılan yüzer tip indüksiyon ısıtıcı aparatları üç ana başlık altında gruplanmıştır: A, B ve C grubu. A grubu aparatları, dolgulu veya iç hacmi boşaltılmış silindirik modelleri kapsamaktadır. B grubu aparatları, ısıtıcı aparat yüzeyine farklı sıvı akış kanallarının açılmış olduğu modelleri kapsamaktadır. C grubu ise, A ve B gruplarına dâhil olmayan veya onların karma özelliklerini taşıyan tasarımları kapsamaktadır.

En temel yüzer tip indüksiyon ısıtıcı aparat formu, içi dolu silindirik yapıdır (A1) (Şekil.3.a). Sıvı akış yolu üzerine yerleştirilen silindirik yapıya indüksiyon ısıtma sağlanarak, aparatın dış yüzeyinden akan sıvının ısıtılması sağlanmaktadır. Sıvının sadece aparatın dış bölgesinden akmak zorunda kalması, silindir çapının (boru çapına göre) daha küçük olmasını zorunlu kılmakta ve daha az ısıtma gücü üretmesine sebebiyet vermektedir. Bu mahzuru aşmak için, içi boş silindirik veya halhalı yapı önerilmiştir (A2) [13]; çünkü deri etkisi sonucu eddy akımlarının aparatın dış yüzeyine yoğunlaşması, oyuk hacimli model tasarlamaya imkân tanımaktadır (Şekil.3.b). Bu sayede sıvıya, alternatif bir akış yolu sunulmuş ve silindir çapı arttırılmıştır. Ayrıca, aparat yüzey alanı artmış ve ısı transferi hızlanmıştır. Bu modelin farklı bir üstünlüğü de, yapısında daha az manyetik malzeme kullanıldığı için daha hafif yapıya sahip olmasıdır.

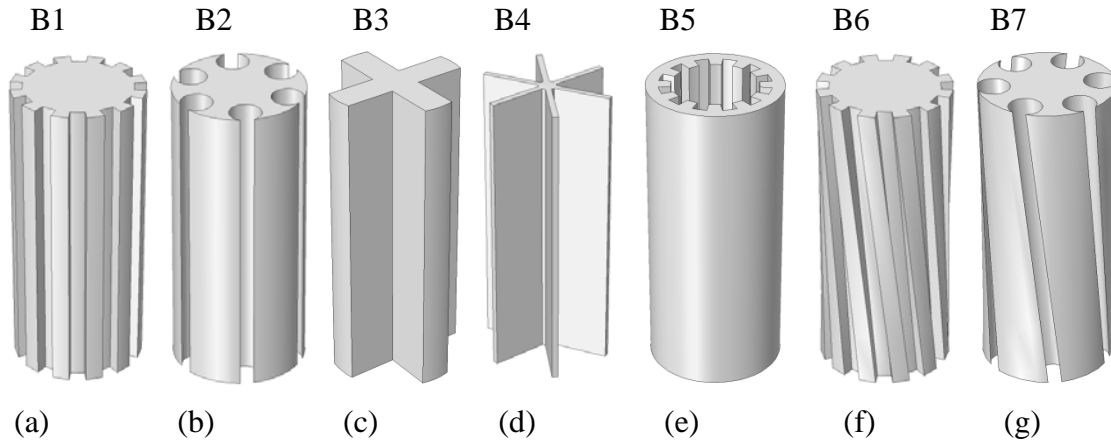


Şekil 3. A grubu indüksiyon sıvı ısıtıcı aparat modelleri

A2 aparat modelinin gelişmiş bir versiyonu olan A3 modeli, iç içe geçirilmiş silindirlerden oluşmaktadır (Şekil.3.c); tasarımda kullanılacak silindir sayısı ve silindir çap değerleri değişkendir [14]. A3 aparat modelinin farklı bir versiyonu olan A4 modeli Şekil.3.d'de verilmiştir; A4 aparat modeli, silindir bir parça üzerine silindirik delikler açılarak oluşturulmuştur; silindirik deliklere ait parametreler, sıvı akış özelliklerine bağlı olarak değişim göstermektedir. A4 modelinin sunulmuş olduğu çalışmada [15], üzerine delikler açılmış silindir blok şeklindeki indüksiyon ısıtma parçası, manyetik olmayan ve yüksek ısıya dayanıklı bir tüp içine yerleştirilerek, tüp içinden akan sıvının ısıtıldığı belirtilmiştir; çalışmada, çok yüksek sıcaklıklara çıkılabileceği ve açılan delikler sayesinde ısı transferinin çok daha hızlı gerçekleştiği belirtilmiştir. A1 modelinin içinin boşaltılması ve sıvı akış yönünde esnetilmesiyle oluşturulan A5 modeli Şekil.3.e'de verilmiştir [16,17]; iç hacminde hava bulunan bu model, daha hafif yapıya sahiptir.

Bir diğer temel ısıtıcı aparat formu olan B1 modeli Şekil.4.a'da verilmiştir [18]. B1 aparat modeli, silindir yüzeyine sıvı akış kanalları açılarak dişli çark formuna benzer yapıda oluşturulmuş bir modeldir. Bu modeldeki amaç, aparatın dış yüzeyine yoğunlaşan eddy akımlarının akacak olduğu yolu uzatmaktır; diğer bir deyişle, aparatın yüzey direncini arttırmaktır; bu sayede daha fazla ısı gücü üretmek amaçlanmıştır. Ayrıca, yüzey alanı arttığı için, ısı transferi daha hızlı gerçekleşecektir. Dişli çark formununun sahip olduğu diş sayısı ve diş dibi derinliği, modele ait değişken parametrelerdir. Daha sonraki yıllarda, dolgulu bir iç hacme sahip olan B1 modeline eşdeğer başka aparat modelleri de sunulmuştur. Örneğin, Şekil.4.b'de verilen B2 aparat modeli, silindir üzerine yine silindirik sıvı akış kanalları açılarak oluşturulmuş bir ısıtıcı aparat modelidir [19]. Bu sınıfta tanımlanabilecek bir diğer ısıtıcı aparat modeli olan B3 ve B4 te Şekil.4.c,d'de verilmiştir [19-21]. Isıtıcı aparatın iç bölgesine, dişli çark formu açılarak oluşturulmuş başka bir model olan B5, Şekil 4.e'de verilmiştir [22]; bu çalışmada, aparatın iç bölgesinden akan sıvının ısıtıldığı ve sıvı akış kanallarının spiral biçiminde açılacağı da belirtilmiştir. Farklı bir çalışmada da benzer bir model, sıvı ve gazları ısıtmak için önerilmiştir [23].

Sıvı akış hızına bağlı olarak, indüksiyon ısıtıcı aparat ile akışkan sıvı arasındaki ısı transferinin çok hızlı bir şekilde sağlanması gerekmektedir. Bu işlem için kullanılacak en önemli parametre, ısıtıcı aparatın sahip olduğu yüzey alanıdır. Bir geometrik şeklin yüzey alanını arttırmanın en pratik şekli, burma yöntemini kullanmaktır. Bu yöntem kullanılarak, B1 ve B2 aparat modellerinin burulmasıyla, aparat yüzeyinde helisel sıvı akış kanallarının oluşturulduğu ve dolayısıyla, daha büyük yüzey alanına sahip B6 ve B7 modelleri elde edilmiştir. Uygulamada, üç adet helisel kanala sahip aparat modeli sıvı ısıtmak için kullanıldığı ve iyi sonuçlar alındığı belirtilmiştir [24].



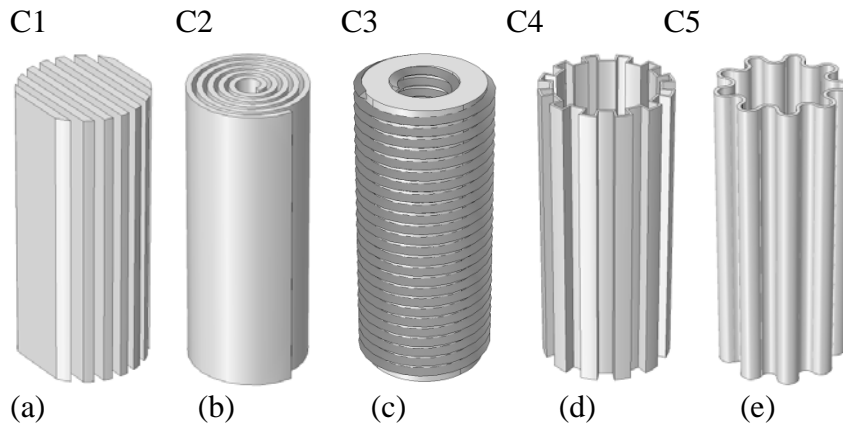
Şekil 4. B grubu indüksiyon sıvı ısıtıcı aparat modelleri

Bir diğer çalışmada [25], seramik borular içine yerleştirilen çelik levhalar indüksiyon yöntemiyle ısıtılıp, boru içinden geçen suyun ısıtılması sağlanmıştır. İndüksiyon bobini olarak Litz kablosu kullanılmış ve yüksek frekansın olumsuz etkisi olan 'deri olayı' en aza indirilmiştir. Uygulamada, iki adet tasarım seri bağlanarak 200°C'lik su buharı üretilmiştir. Bu ve benzer bir çalışmada [26], diğerlerinden farklı bir indüksiyon sıvı ısıtma aparatı olarak, aralarında yeterli boşluk bırakılarak paketlenen çelik levhalar kullanılmıştır (C1) (Şekil.5.a). Başka bir çalışmada [27], yüksek frekanslı ayna inverter topolojisi kullanılarak, boru içine konumlandırılmış çelik levhaların ve dolayısıyla akışkan sıvının ısıtılması sağlanmıştır. C1 aparat modeli, aynı tasarım kriterlerine sahip modeller içinde en fazla yüzey alanına sahip ısıtıcı aparattır.

Diğer çalışmada [28], spiral biçiminde sarılmış ve iki ucu kısa devre edilmiş manyetik sac metal malzeme, teflon boru içine yerleştirilip, Litz kablosundan sarılmış rezonans bobini içine konumlandırılmış ve akışkan sıvı ısıtılmıştır. Bir diğer benzer çalışmada [29], 13kHz'lik bir paralel rezonans devresiyle, belirli bir akış debisine sahip suyun ısıtılması ve farklı debilerdeki performans analizi yapılmıştır. Bu çalışmada ve yine benzer çalışmalarda [30,31], indüksiyon ısıtma aparatı olarak spiral biçiminde sarılmış sac levha kullanılmıştır (C2) (Şekil.5.b). Büyük bir yüzey alanına sahip olduğu için ısı transferini hızlı gerçekleştirmesi; etkin direncinin siper sayısına bağlı olarak kolayca ayarlanabilmesi; çok basit yapıda olması sebebiyle üretiminin kolay olması bu modelin üstünlüklerindedir.

Isıtma aparatının yüzey alanını arttırarak, ısı transfer hızının arttırılmaya çalışıldığı bir diğer aparat modeli C3, Şekil.5.c'de verilmiştir. C3 modeli, aparat yüzeylerine açılan vida dişleriyle diğer modellerden farklı bir geometrik yapıya sahiptir [3]. Aparat yüzeyine vida dişine benzer helisel kanalların açıldığı benzer çalışmalar da mevcuttur [32].

İndüksiyon ısıtma; düşük, orta ve yüksek frekanslarda gerçekleştirilebilir. Isıtma derinliğinin çok küçük olduğu yüksek frekanslı uygulamalarda içi dolgulu ısıtma aparatları kullanmak anlamsız ve gereksizdir; çünkü eddy akımları sadece yüzeylerde akacak ve iç bölgeleri kullanamayacaktır. Bu nedenle, yüksek frekanslı indüksiyon ısıtıcılarda, ısıtma aparatı olarak ince sac levhaların kullanıldığı tasarımlar geliştirilmiştir. Bu mantıkla geliştirilen birbirine benzer C4 ve C5 aparat modelleri Şekil.4.f ve Şekil.4.g'de verilmiştir; sıvı akışını engellememeleri, hafif yapıda olmaları ve üretimlerinin kolay olması bu modellerin üstünlüklerindedir [33].



Şekil 5. C grubu indüksiyon sıvı ısıtıcı aparat modelleri

#### 4. Sonuç ve Öneriler

İndüksiyon prensibiyle çalışan sıvı ısıtma sistemleri 'havuz tip' ve 'yüzer tip' olmak üzere iki ana başlığa ayrılabilir. Tarihsel gelişim sürecinde, yüzer tip indüksiyon ısıtma aparatı olarak kullanılacak birçok geometrik model sunulmuştur. Isıtma aparatlarının performanslarını arttırmaya yönelik çalışmalar, ısıtma aparatı olarak kullanılacak manyetik malzemenin geometrik şeklinin çok önemli olduğunu ortaya koymuştur.

Bu çalışmada; farklı geometrik şekle sahip olup, indüksiyon sıvı ısıtıcılarda ısıtma parçası olarak kullanılmış birçok ısıtma aparatı araştırılmış, üstünlük ve mahzurları incelenmiştir. Yapılan incelemede, indüksiyon bobinine en yakın konumlandırılan veya en kısa manyetik yola sahip olan tasarımların, en fazla ısı gücünü ürettiği belirlenmiştir. Ayrıca, yüzey alanı



büyük olan ısıtıcı aparatların, ısı transferini en hızlı gerçekleştirdiği ve daha homojen bir sıvı ısıtması sağladığı tespit edilmiştir. Ek olarak, verimli bir indüksiyon ısıtma sağlanabilmesi için, ısıtıcı aparat etkin direncinin uygun değerde olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Etkin direnç, eddy akımlarının dolaştığı yol uzunluğu ve ısıtma derinliği dikkate alınarak hesaplanabilirse de, karmaşık formlu ısıtma aparatları için bu hesaplama oldukça zordur. Isıtıcı aparatın performansını etkileyen bir diğer parametre, aparat kesit alanıdır; uygulamalarda, kesit alanı küçük olan ve sıvı akışını engellemeyen aparat modelleri tercih edilmektedir; ayrıca, üretim maliyetini ve ağırlığı düşürmek için, dolgu hacimli aparat yerine ince sac kesitli modeller tavsiye edilmektedir.

Bu çalışmada sunulan tüm indüksiyon sıvı ısıtma aparatları, modeli geliştiren kişi/kişiler tarafından alternatif bir yöntem (geometri) olarak sunulmuştur. Sunulan bu modeller arasında doğru bir performans sıralaması yapmak oldukça zordur; çünkü karşılaştırmaya imkân tanımayan çok farklı tasarım kriterleri ve çalışma ortamları mevcuttur. İleriki çalışmalarda, eşit çevresel ve çalışma koşullarının oluşturulduğu bir manyetik analiz programı yardımıyla, indüksiyon ısıtma aparatlarının performans analizleri gerçekleştirilebilir; parametrik çözümler yardımıyla en uygun etkin dirence sahip modeller geliştirilebilir; modeller üzerinde iyileştirmeler yapılabilir.

## 5. Kaynaklar

1. Rudnev, V.I., Handbook of Induction Heating, Marcel Dekker Inc., 2003.
2. Zinn, S., Semiatin, S.L., Elements of Induction Heating, Design, Control, and Application, Electric Power Research Institute, Inc., 2002.
3. Altıntaş, A., Yıldız, M.N., Kızılkaya, İ., “İndüksiyon Isıtma Prensipleri ile Çalışan Mikrokontrol Denetimli Bir Sıvı Isıtıcısı Tasarımı”, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt 29, 45-52, 2012.
4. Yıldız, M.N., Alan, İ., “Sıvıların İndüksiyonla Isıtılması”, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 3(2), 45-50, 2006.
5. Sarnago, H., Lucia, O., Mediano, A., Burdio, J.M., "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, 2013.
6. Al-Shaikhli, A.K.M., Meka, A.T., “Design and Implementation of Practical Induction Heating Cooker”, Int. J. of Soft Computing and Engineering (IJSCE), 4(4), 73-76, 2014.
7. Sadhu, P.K., Roy, D., Pal, N., “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, 2015.
8. Handa K., “Induction Warming System for Fiber Composite Gas Storage Cylinders”, U.S. Patent, No: 8796600, Honda Motor Co., Ltd., 2014.
9. Curran, J.S., Featherstone, A.M., “Electric-Induction Fluid Heaters”, Power Engineering Journal, 2(3), 157-160, 1988.
10. Kenada, M., Hishikawa, S., Tanaka, T., Guo, B., Nakaoka, M., “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, 1999.

11. Magnusson C.E., Curtis L.F., “Electric Heater”, U.S. Patent, No: 1260564, 1918.
12. Bailey E.L. “Heating Apparatus”, U.S. Patent, No: 2513779, Chrysler Corp., 1950.
13. Greis I., Ostlund A., “Device for Heating Fluent Material Flowing Past Short-Circuited Heating”, U.S. Patent, No: 4471191, Asea Ab, 1984.
14. Wakamatu T., Kanou T., Ogihara M., “Superheated Vapor Generator”, U.S. Patent, No: 7145114, Pai Corporation, 2006.
15. Nakamizo, T., Kenada, M., Hishikawa, S., Guo, B., Iwamoto, H., Nakaoka, M., “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, 1999.
16. Carl S., Emil F., “Electric Heater for Circulating Fluids”, U.S. Patent, No: 1918637, Lg Farbenindustrie Ag, 1933.
17. Walker R.J.H, Bodger P.S., “Electrically Powered Flued Heater Including a Coreless Transformer and Electrically Conductive Jacket”, U.S. Patent, No: 5216215, Transflux Holdings limited, 1993.
18. Lofgren E.G., “Induction Heater”, U.S. Patent, No:2407562, 1946.
19. Inman H.C., “Electric Fluid Heater”, U.S. Patent, No:2513242, 1950.
20. Lofgren E.G., “Electrical Induction Boiler”, U.S. Patent, No:2427361, 1947.
21. Luo S., Ding Y., “High Frequency Induction Heating Instantaneous Tankless Water Heaters”, U.S. Patent, No: 20090092384, 2009.
22. Holmes, A.J., “Induction Water Heater”, U.S. Patent, No: 1425968, Big Four Electric Company, 1922.
23. Azuma H., “Heating Apparatus”, U.S. Patent, No: 8071914, Noboru Oshima - J.C. Jordan, 2011.
24. Zhang S.J., Yang Z.Q., Zhao Q.H., “Electromagnetic Water Heater”, U.S. Patent, No: 6674055, 2004.
25. Nakamizo, T., Guo, B., Nakaoka, M., “New Generation Electromagnetic Induction-Based Fluid-Heating Energy Processing Appliance Using Voltage-Fed PWM Resonant Inverter”, Proceeding of PCIM-Tokyo, Japan, 597-607, 1999.
26. Nakaoka M., Kawamura Y., Uchihon Y., “Electromagnetic Induction-Heated Flued Energy Conversion Processing Appliance”, U.S. Patent, No: 5990465, Omron Corporation, 1999.
27. Sadhu, P.K., Pal, N., Bandyopadhyay, A., “Choice of Semiconductor Switches for Energy Efficient Induction Heated Pipe-Line using H.F. Mirror Inverter”, Proceeding of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientist, IMECS 2012, Hong Kong, Vol.2, 1002-1005, 2012.
28. Sadakata, H., Nakaoka, M., Yamashita, H., Omori, H., Terai, H., “Development of Induction Heated Hot Water Producer Using Soft Switching PWM High Frequency Inverter”, IEEE, PCC-Osaka-2002, Vol.2, 452-455, 2002.
29. Yıldız, M.N., Alan, İ., “2,2 kW’lık İndüksiyonlu Sıvı Isıtıcısı Tasarımı ve Denenmesi”, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 3(3), 11-23, 2006.

30. Ahmet, T., Ogura, K., Chandhaket, S., Nakaoka, M., “Asymmetrical Duty Cycle Controlled Edge Resonant Soft Switching High Frequency Inverter for Consumer Electromagnetic Induction Fluid Heater”, *Automatica*, ATKAAF 44(1-2), 21-26, 2003.
31. Sadahira M., Uetani Y., Kondoh S., Yamashita H, Omori H., Obata T., Urata T., “Induction Heating of Heating Element”, U.S. Patent, No: 6297483, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd., 2001.
32. Kimura T.T., “Capacitive Induction Heating Method and Apparatus for The Production for Instant Hot Water and Steam”, U.S. Patent, No: 5523550, 1996.
33. Price N.B., Fright W.R., Nixon M.A., McCallum B.C., “Fluid Heater”, U.S. Patent, No: 6118111, Bbmr Limited, 2000.