
DİELEKTRİK YÜKLÜ BİR MİKRODALGA REZONATÖRÜNDE SONLU FARKLAR ZAMAN UZANIMI YÖNTEMİYLE DİNAMİK SICAKLIK ANALİZİ

*Okan SÜLE**
*Sedef KENT***

Özet: Bu çalışmada, günlük hayatta ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaya başlanan mikrodalga, mikrodalga ısıtma açısından incelemesi dikdörtgen bir mikrodalga rezonatörü için yapılmıştır. Mikrodalga ısıtmanın verimini belirleyen, rezonatör içindeki alan dağılımlarıdır. Alan dağılımlarının bulunmasında, kullanım kolaylığı ve işlem süresinin azlığı gibi sahip olduğu avantajlar sebebiyle sonlu farklar zaman uzanımı (FDTD) yöntemi nümerik metot olarak seçilmiştir. Sıcaklık analizi iki farklı malzeme için aynı rezonatörle yapılmıştır. Malzemelerin dielektrik sabitleri sıcaklığa göre değişen bir fonksiyon olarak ifade edilerek iki boyutlu sıcaklık haritaları ve farklı noktalar için tek boyutlu zamana bağlı sıcaklık değişimleri bulunmuştur. Elde edilen sonuçların doğruluğu Ansoft HFSS programı ile karşılaştırılarak verilmiştir. Sonlu farklar zaman uzanımı (FDTD) yöntemi ile elde edilen sonuçların Ansoft HFSS programı ile elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Sonlu farklar zaman uzanımı yöntemi, Ansoft HFSS, dielektrik sabiti, mikrodalga ısıtma, rezonatör, dinamik analiz

Dynamic Heat Analysis on a Microwave Resonator Loaded with Dielectric by Finite Difference Time Domain Method

Abstract: In this paper microwave which has prevalently started to be used in everyday life and industrial applications has been examined from the point of view of microwave heating for a rectangular microwave resonator. The main factor which determines the efficiency of microwave heating is field distributions in the resonator. Finite difference time domain method has been perceived as the numerical method owing to the advantages such as usage profits and the shortness of procedure in reaching the field distributions. Temperature analysis for two different materials has been performed with the same resonator. Expressing dielectric constants of the materials as a heat varying function, two-dimensional heating maps and one-dimensional heating variations according to time for different points have been found out. The accuracy of the obtained results are presented by comparisons with the numerical results of Ansoft HFSS program. It is seen that the results of FDTD method are in good agreement with the results of Ansoft HFSS.

Keywords: Finite Difference Time Domain Method, Ansoft HFSS, dielectric constant, microwave heating, resonator, dynamic analysis

* Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü, Görükle 16059, Bursa
** İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü
İletişim Yazarı: O. Süle (osule@uludag.edu.tr)

1. GİRİŞ

Mikrodalga fırın içerisindeki elektromanyetik ve ısı olaylarının belirlenmesi, ısıtma işleminin uygun ve doğru şekilde yapılmasını sağlayacağından tüm uygulamanın yapısını belirler. Bu tasarımda mikrodalga enerjisinin fırın içerisindeki dağılımının fırının şekline ve boyutlarına, ısıtılacak olan malzemenin elektromanyetik ve fiziksel özelliklerine olan bağımlılığı göz önüne alınmaktadır. Malzemenin dielektrik kayıplarıyla ısı şeklinde açığa çıkan mikrodalga enerjisinin verimliliği, uyarım şeklinin, sisteme verilecek gücün büyüklüğünün ve ısıtma süresinin belirlenmesiyle yapılacak olan doğru tasarımın bir sonucudur.

Zaman uzanımındaki yöntemlerin en yaygın olarak kullanılanı sonlu farklar zaman uzanımı yöntemi (FDTD) dir. 1960'ların ortalarında, Yee (1966) bu yöntemi ortaya koymuştur. FDTD yöntemi basit formülasyonu, çok geniş ve ileri bir bilgisayar kaynağına ihtiyaç duymaması gibi gerekçelerle mikrodalga fırınlarda sıcaklık ve elektromanyetik alan dağılımı hesaplarında çok geniş bir kullanım alanına sahip olmuştur. FDTD yönteminin temelini oluşturmasında Taflove ve Brodwin (1975), Merewether ve ark. (1980), Holland (1977), Mur (1981) ve Liao ve ark. (1984) gibi araştırmacılar önemli adımlar atmışlardır. De Pourcq (1985), FDTD yöntemini farklı tipteki, üç boyutlu dalga kılavuzu yapılarının analizinde kullanmıştır. Choi ve Hofer (1986), bir mikrodalga fırın ve mikroserit yapının analizini FDTD yöntemiyle yapmışlardır. Olivier ve McNamara (1992) H düzlemi T-jonksiyonu yapıları, dalga kılavuzu açıklıkları ve H düzlemi dalga kılavuzu süresizliklerini FDTD yöntemiyle incelemişlerdir. Navarro ve ark. (1992), dikdörtgen, dairesel dalga kılavuzu yapılarına FDTD yöntemini uygulamıştır. Böylece eğri yapılar için de FDTD yönteminin uygulanmasıyla bu konuda önemli adımlar atılarak yöntemin kullanım alanı genişletilmiştir.

1994 yılında FDTD yöntemi, geniş boyutlu çeşitli dielektrik ısıtma problemlerinin simüle edilmesinde etkin ve çok yaygın bir sayısal yöntem olarak kullanılmaya başlanmıştır. Sunberg ve ark. (1996, 1998), mikrodalga fırınların tasarımının temelini oluşturacak malzeme üzerindeki güç dağılımlarını endüstriyel fırınlarda incelemişlerdir. Zhao ve Turner (1996), dielektrik malzeme sınır koşullarının modellenmesinde yeni yaklaşımlar sunmuşlar ve böylelikle FDTD yöntemiyle mikrodalga ısıtma olayının daha hassas bir biçimde incelenmesini sağlamışlardır.

Kriegsmann (1992), tek modlu bir mikrodalga rezonatöründe seramik bir malzemenin ısıtılması üzerine, karma bir yöntem ortaya koyarak çalışmalar yapmıştır. Reader ve ark. (1998) tek modlu ve çok modlu fırınlar için deneysel ve nümerik sonuçlar elde etmişlerdir. Kondylis ve ark. (2001) nümerik metodların bilgisayar hafızasını daha verimli kullanabilmesine yönelik çalışmalar yapmışlardır.

Basit formülasyonu, daha az işlem yoğunluğuna sahip olması dolayısıyla daha az bilgisayar kaynağı gerektirmesi FDTD yönteminin avantajlarıdır. Bunun yanında FDTD yöntemi, iteratif çözüm sunduğundan her zaman yakınsamama tehlikesi mevcut iken daha az program koşturma süresi, daha basit programlama olanağı sunmaktadır. Eğri olmayan yüzeyleri içeren yapıların inceleneceği bu çalışmada, sahip olduğu avantajlar sebebiyle FDTD programı kullanılmıştır.

2. SONLU FARKLAR ZAMAN UZANIMI YÖNTEMİ

Günümüzde bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak, analitik çözümü güç olan fiziksel problemlerin çözümleri için çok sayıda sayısal yöntemler geliştirilmektedir. Bu sayısal yöntemler arasında belki de en popülerleri, algoritmanın kurulmasındaki basitliği ve donanım gereksiniminin daha az olması sebebiyle sonlu farklar zaman uzanımı yöntemidir (FDTD). Bu yöntemin temeli, sürekli uzayın bir örgü ile ayrıştırılması ve bu sürekli uzayda tanımlı olan herhangi bir kısmi diferansiyel denklemin, içerdiği zamana ve konuma bağlı türev ifadeleri yerine, Taylor seri açınımları yardımıyla elde edilen fark denklemleri kullanılarak ayrıştırılmış uzayda tanımlanmasıdır.

2. 1. Maxwell denklemlerinin FDTD ile çözümü

Birbirine bağlı altı kısmi diferansiyel denklem FDTD yöntemi için temel denklemleri oluşturur.

$$\mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (1a)$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \quad \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma E_y = \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (1b)$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} + \sigma E_z = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (1c)$$

(1) eşitliğinde verilen altı diferansiyel denklemin FDTD ile çözülebilmesi için öncelikle problem uzayının kartezyen örgüyle ayrıklaştırılması gerekmektedir. Normalde uzayın herhangi bir noktasında elektromanyetik alanların bu altı bileşeni de mevcuttur ve dolayısıyla bu uzayı ayrıklaştıran kartezyen hücrelerin her noktasında da bu alanlar mevcuttur. Fakat Yee, Maxwell denklemlerinin FDTD ile çözümü için belli noktalara sadece alanın bir bileşenini yerleştirdiği (Yee, 1966), hücre yapısını önermiştir. Bu hücre, işlem basitliği ve donanım gereksinimi açısından büyük faydalar sağlamıştır.

Elektromanyetik alanların tahmini için Maxwell denklemlerinin FDTD ile ayrıklaştırılması (1) eşitliği ile verilen diferansiyel denklemlerde görülen zamana ve konuma bağlı türev ifadeleri yerine fark denklemlerinin konulması ile yapılır. Buna göre manyetik alanlar (2) eşitliğindeki gibi ifade edilebilir.

$$H_x^{n+0.5}(i, j+0.5, k+0.5) = H_x^{n-0.5}(i, j+0.5, k+0.5) + R_z [E_y^n(i, j+0.5, k+1) - E_y^n(i, j+0.5, k)] - R_y [E_z^n(i, j+1, k+0.5) - E_z^n(i, j, k+0.5)] \quad (2a)$$

$$H_y^{n+0.5}(i+0.5, j, k+0.5) = H_y^{n-0.5}(i+0.5, j, k+0.5) + R_x [E_z^n(i+1, j, k+0.5) - E_z^n(i, j, k+0.5)] - R_z [E_x^n(i+0.5, j, k+1) - E_x^n(i+0.5, j, k)] \quad (2b)$$

$$H_z^{n+0.5}(i+0.5, j+0.5, k) = H_z^{n-0.5}(i+0.5, j+0.5, k) + R_y [E_x^n(i+0.5, j+1, k) - E_x^n(i+0.5, j, k)] - R_x [E_y^n(i+1, j+0.5, k) - E_y^n(i, j+0.5, k)] \quad (2c)$$

Burada Δx , Δy ve Δz , x , y ve z yönündeki konum adımları ve Δt de zamanda konum adımı olmak üzere,

$$R_x = \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta x} \quad R_y = \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta y} \quad R_z = \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta z} \quad (3)$$

olarak ifade edilir. Elektrik alan ifadeleri (4) eşitliğiyle verilir.

$$E_x^{n+1}(i+0.5, j, k) = Ca(i+0.5, j, k)E_x^n(i+0.5, j, k) + Cby(i+0.5, j, k)[H_z^{n+0.5}(i+0.5, j+0.5, k) - H_z^{n+0.5}(i+0.5, j-0.5, k)] - Cbz(i+0.5, j, k)[H_y^{n+0.5}(i+0.5, j, k+0.5) - H_y^{n+0.5}(i+0.5, j, k-0.5)] \quad (4a)$$

$$E_y^{n+1}(i, j+0.5, k) = Ca(i, j+0.5, k)E_y^n(i, j+0.5, k) + Cbz(i, j+0.5, k)[H_x^{n+0.5}(i, j+0.5, k+0.5) - H_x^{n+0.5}(i, j+0.5, k-0.5)] - Cbx(i, j+0.5, k)[H_z^{n+0.5}(i+0.5, j+0.5, k) - H_z^{n+0.5}(i-0.5, j+0.5, k)] \quad (4b)$$

$$E_z^{n+1}(i, j, k+0.5) = Ca(i, j, k+0.5)E_z^n(i, j, k+0.5) + Cbx(i, j, k+0.5)[H_y^{n+0.5}(i+0.5, j, k+0.5) - H_y^{n+0.5}(i-0.5, j, k+0.5)] - Cby(i, j, k+0.5)[H_x^{n+0.5}(i, j+0.5, k+0.5) - H_x^{n+0.5}(i, j-0.5, k+0.5)] \quad (4c)$$

(4) eşitliğinde Δp x-, y- veya z- yönündeki konum adımın göstermek üzere,

$$Ca(i, j, k) = \frac{2\varepsilon(i, j, k) - \sigma(i, j, k)\Delta t}{2\varepsilon(i, j, k) + \sigma(i, j, k)\Delta t} \quad Cbp(i, j, k) = \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon(i, j, k) + \sigma(i, j, k)\Delta t)\Delta p} \quad (5)$$

dir (ε , dielektrik sabiti, σ , iletkenlik).

2. 2. Hücre boyutu ve sayısal kararlılık

Elde edilen fark denklemlerin bilgisayar ortamında çözümü gerçekleştirilmeden önce hücre boyutunu (Δx , Δy , Δz) ve zaman adımını (Δt) belirlemek gerekmektedir. Hücre boyutları, bir ortamda, bir işaretin sahip olduğu farklı frekans bileşenlerinin farklı yayılım hızlarından dolayı meydana gelecek sayısal dispersiyonu önleyecek şekilde seçilmelidirler. Daha sonra da sayısal kararlılık sağlanacak şekilde zaman adımı belirlenir.

Zaman adımının seçimi Courant kararlılık kriterine (Taflove ve ark. 1975) göre yapılır. Bu kritere göre, sayısal sonuçların iraksamaması için zaman adımı,

$$\Delta t \leq \left(c \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}} \right)^{-1} \quad (6)$$

eşitsizliğini sağlayacak şekilde seçilmelidir. Burada c ışık hızıdır. Yee yaklaşımında uniform örgü kullanıldığında ($\Delta x = \Delta y = \Delta z$) bu ifade

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c\sqrt{3}} \quad (7)$$

haline dönüşmektedir.

2. 3. Isı transfer denklemlerinin FDTD ile çözümü

Bir ortamdaki sıcaklık dağılımının elde edilmesi, bu ortam üzerinde ısı transfer denkleminin çözümüyle mümkündür. Bu kısımda bahsedilen bu denklemin bilgisayar ortamında çözümü için gerekli sayısal modelin FDTD yöntemi kullanılarak çıkartılması yapılmıştır.

FDTD yönteminin karakteri gereği, elde edilen sayısal modelin bilgisayar ortamında çözümü esnasında kararlılığının sağlanması şarttır. Bu kararlılık da, seçilecek zaman adımının sınırlanmasıyla yapılır. Fakat bu tür süreçlerde, ısıtma süresi uzundur. Dolayısıyla zaman adımına bir sınırlama koymak, bilgisayar ortamında problemin koşturma zamanını çok fazla uzatır ya da problemin çözümünü imkânsızlaştırır. Bu tür sorunların ortadan kaldırılması ancak kapalı çözüm sunmakla mümkündür. Bu amaçla bu denklemlerin FDTD ile çözümünde, her durumda, kararlılık koşulunu yerine getiren Crank-Nicholson yaklaşımı kullanılmıştır (Crank ve Nicholson 1947).

Crank-Nicholson yaklaşımında, zamana göre türevler için, ileri fark eşitliği kullanılırken, konuma göre olan ikinci dereceden türev ifadeleri yerine ise,

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{2} \left[\frac{T^{n+1}(i-1, j, k) - 2T^{n+1}(i, j, k) + T^{n+1}(i+1, j, k)}{(\Delta x)^2} + \frac{T^n(i-1, j, k) - 2T^n(i, j, k) + T^n(i+1, j, k)}{(\Delta x)^2} \right] \quad (8)$$

eşitliği kullanılır (Torres ve Jecko 1997). (8) ile verilen ısı transfer denkleminin üç boyutta çözümü için, bu denklem açık bir şekilde ifade edilirse,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\kappa}{C_p \rho_o} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{P_v}{C_p \rho_o} \quad (9)$$

elde edilir. (9) ile verilen denklemde C_p özgül ısı, ρ_o özgül kütle, κ ısı iletim katsayısı, T sıcaklık ve P_v hacimsel güç dağılımıdır. Bu denkleme Crank-Nicholson yaklaşımı uygulanırsa,

$$\begin{aligned} & (1 + 3\beta_1)T^{n+1}(i, j, k) - \frac{\beta_1}{2} [T^{n+1}(i-1, j, k) + T^{n+1}(i, j-1, k) + T^{n+1}(i, j, k-1) + \\ & T^{n+1}(i+1, j, k) + T^{n+1}(i, j+1, k) + T^{n+1}(i, j, k+1)] \\ & = (1 - 3\beta_1)T^n(i, j, k) + \frac{\beta_1}{2} [T^n(i-1, j, k) + T^n(i, j-1, k) + T^n(i, j, k-1) + \\ & T^n(i+1, j, k) + T^n(i, j+1, k) + T^n(i, j, k+1)] + \beta_3 P^n(i, j, k) \end{aligned} \quad (10)$$

fark denklemini elde edilir. Burada,

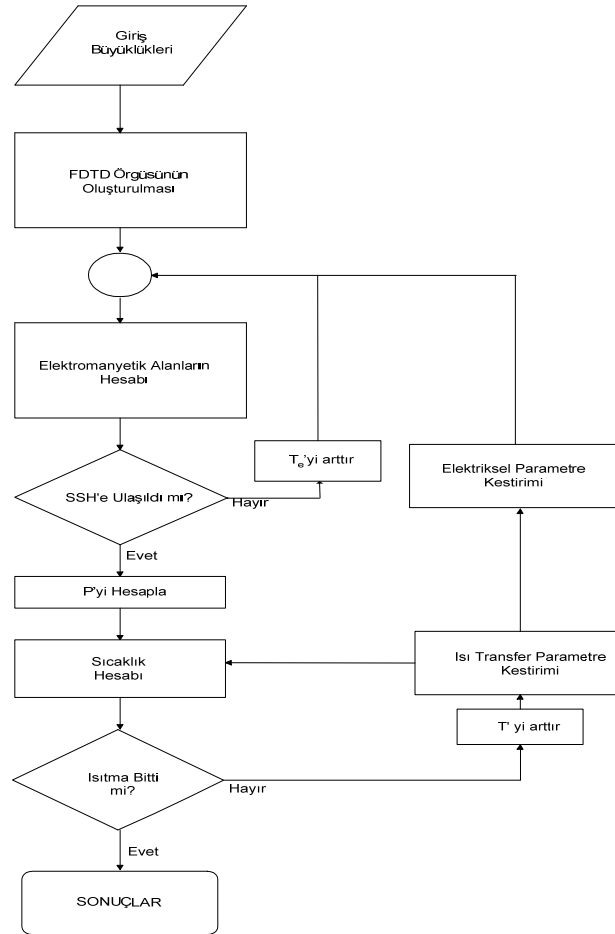
$$\beta_1 = \frac{\kappa \Delta t}{\rho_o C_p (\Delta x)^2} \quad \beta_3 = \frac{\Delta t}{\rho_o C_p}$$

şeklindedir. Bu hesaplamalarda uniform örgü kullanılmaktadır ve elektromanyetik alanların hesabı için kullanılan örgü ile aynıdır.

(10) denkleminde dikkat edilecek olursa, bu denkleminde birden fazla $n+1$ zamanına ait bilinmeyen mevcuttur. Dolayısıyla, bu denklemin iteratif olarak çözülmesi mümkün değildir. Bu denklemin çözümü Gauss-Seidel yöntemi kullanılarak yapılmıştır (Süle, 2011).

2.4. Sonlu Farklar Zaman Uzanımı Yöntemi ile Isıtmanın Bilgisayar Algoritması

Mikrodalga ile ısıtma karmaşık bir yapıya sahiptir. Burada da görüldüğü gibi, bu süreci modellemek için farklı karakteristikteki fiziksel olayların birlikte incelenmesi gereklidir. Elektromanyetik olaylar, daha hızlı değişirken, ısı transferi daha yavaş değişen olaylardır. Bu sebeple elektromanyetik alanların ve ısı transfer olaylarının aynı zaman adımlarında hesaplanmaları yersiz olacaktır. İkinci bir sorun da elektromanyetik alanların çözümünde Courant kararlılık kriterinin sağlanması zorunluluğudur. Bu zorunluluk zaman adımının nano hatta piko saniyeler mertebesinde seçilmesini gerektirir. Bu durum da ısıtma süresinin uzun olduğu bu tür süreçlerde koşturma zamanını çok fazla uzatır hatta problemin çözümünü imkansızlaştırır. Bu sebeple, mikrodalga ısıtmanın sayısal modelinin çözümünde Şekil 1’de verilen akış diyagramı takip edilmiştir.



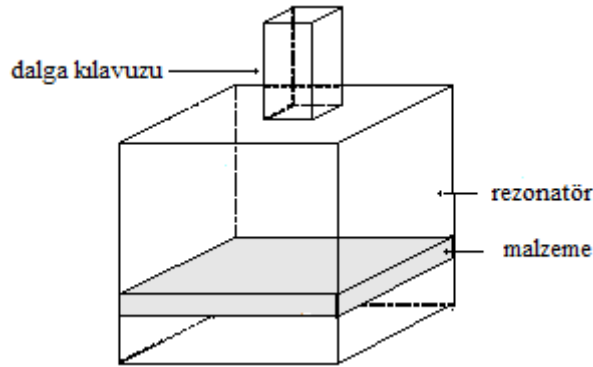
Şekil 1:

Mikrodalga ısıtmanın sayısal modelinin bilgisayar akış diyagramı

Hücre boyutları, zaman adımı, elektriksel ve fiziksel parametreler, ısıtma süresi ve kaynak gücü gibi büyüklükler program tarafından giriş olarak kabul edilmektedir. Daha sonra örgü oluşturulmaktadır. Elektromanyetik alanlar, kararlılık kriterini sağlayacak bir zaman adımı ile sinüsoidal sürekli hale ulaşmaya kadar hesaplatılmaktadır. Elektromanyetik alanlar zamanla sinüsoidal olarak değiştiği için bulunan bu sürekli sinüsoidal hal (SSH) değerlerinden ısı transferinin hesaplatılacağı zaman noktasındaki elektromanyetik alanların değeri tahmin edilecektir. Daha sonra malzeme üzerindeki kayıp gücü hesaplanarak ısı transfer denklemi çözülecektir. Elde edilen yeni sıcaklık değerleri için elektriksel ve fiziksel parametrelerin yeni değerleri kestirilecek ve tekrar elektromanyetik alanların hesabına dönecektir. Bu işlem ısıtma süresi sona erinceye kadar devam edecektir. Böylece program koşturma zamanının kısaltılması sağlanmış olacaktır.

3. FDTD İLE SICAKLIK ANALİZİNİN YAPILMASI

Boyutları x doğrultusunda 378,4 mm, y doğrultusunda 258 mm, z doğrultusunda 352,6 mm olarak belirlenen rezonatör için malzeme d=210 mm yüksekliğine (tabandan itibaren olan yükseklik değeri) x-y kesitinin tamamını kapsayacak ve kalınlığı 25,8 mm olacak şekilde konularak dalga kılavuzunun konumu rezonatörün merkezinde alınarak ısı analiz yapılmıştır (Şekil 2). Malzemelerin konulduğu yükseklik değerlerinin belirlenmesi yansıma katsayısının düşük olmasını içeren bir optimizasyonla yapılmıştır (Süle, 2011). Rezonatörün uyarımı, WR-340 dalga kılavuzu ile (x boyutu 86 mm, y boyutu 43 mm), temel mod TE₁₀ uyarımı 172 mm uzunluğundaki kılavuzun z=129 mm düzleminde seçilerek yapılmıştır. Dielektrik malzemenin ısı özellikleri, ısı kapasitesi $C_p=2150$ J/kg.K, ısı iletkenliği 0,51 W/m.K olarak belirlenmiştir. Malzemenin yoğunluğu ise $\rho=450$ kg/m³ olarak alınmıştır. Oda sıcaklığında dielektrik sabiti $\epsilon_r=4,17-j1,55$ olarak belirlenen malzemenin dielektrik sabiti rezonatör içindeki artan sıcaklık değerine bağlı bir fonksiyon şeklinde $\epsilon' = 5,37 - 0,06.T$, $\epsilon'' = 3,11 - 0,1.T + 0,0011.T^2$ olarak ifade edilmiştir (T, sıcaklık; ϵ' , dielektrik sabitinin reel kısmı; ϵ'' , dielektrik sabitinin sanal kısmı). Çalışma frekansı 2,45 GHz olarak belirlenmiştir.



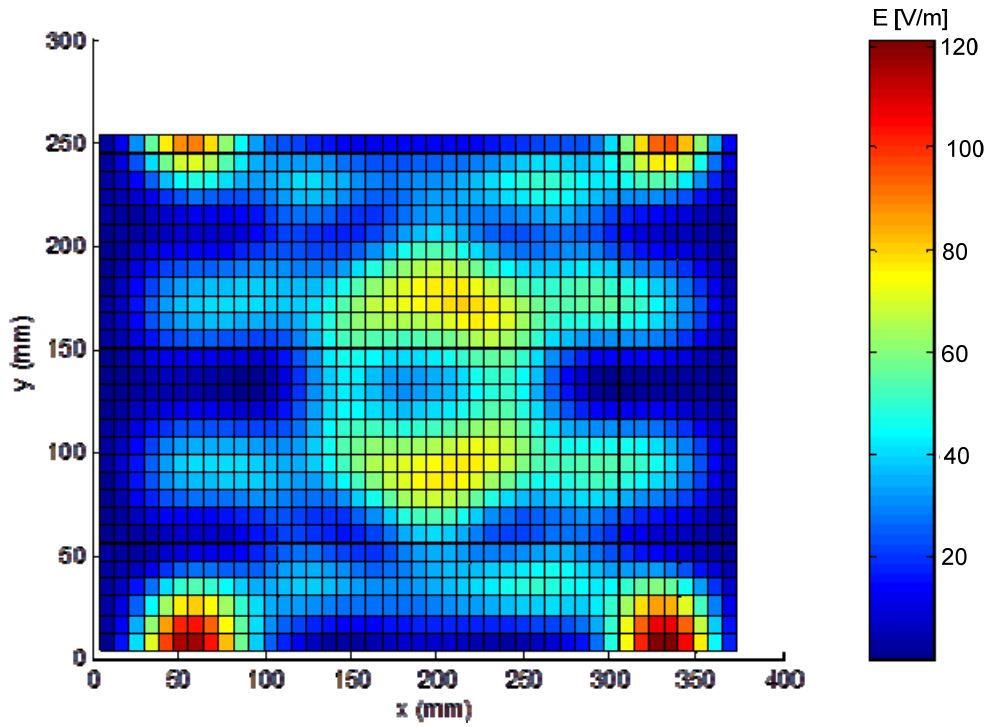
Şekil 2:

Dilim şeklinde tüm kesiti kaplayan malzeme ile yüklenmiş rezonatör

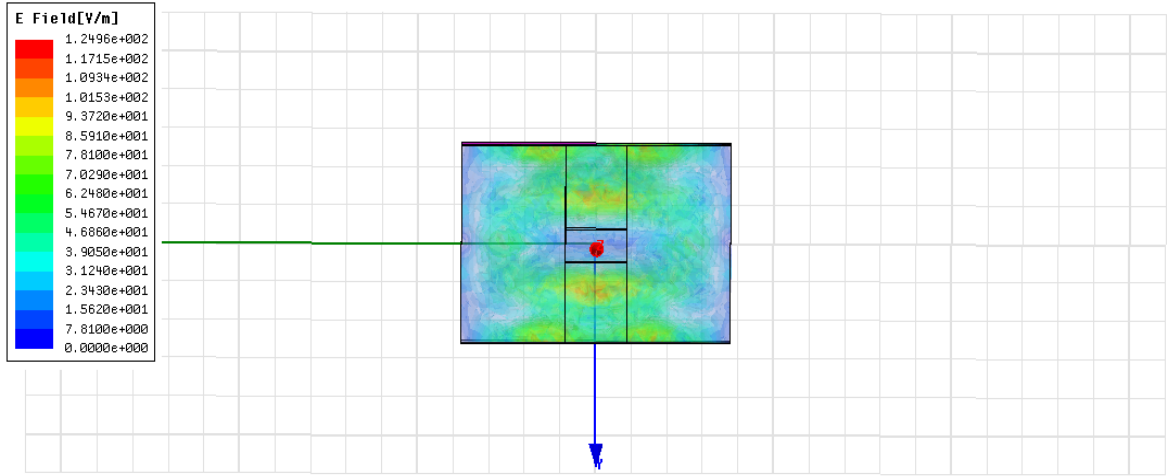
Şekil 3' te FDTD ile elde edilen alan dağılımı, Şekil 4' te Ansoft HFSS ile elde edilen alan dağılımı gösterilmiştir. Malzeme beş dakikalık bir ısıtma sürecine tabi tutularak, yüzey x-y kesitindeki sıcaklık dağılımı (iki boyutlu konuma bağlı sıcaklık haritası) Şekil 5' te ve üzerindeki iki noktanın sıcaklık değişimleri (tek boyutlu zamana bağlı sıcaklık değişimi) Şekil 6 ve Şekil 7' de gösterilmiştir.

Aynı işlemler, yine beş dakikalık ısıtma süreci için rezonatörün tabanından itibaren $d=140$ mm yüksekliğine konulan x-y kesitinin tamamını kapsayan dielektrik sabiti $\epsilon_r=22-j9$ (oda sıcaklığında $T=20^{\circ}\text{C}$ için) olan malzeme için yapılmıştır. FDTD ile elde edilen elektrik alan dağılımı Şekil 8’ de, Ansoft HFSS ile elde edilen elektrik alan dağılımı Şekil 9’da gösterilmiştir. Malzeme üzerindeki iki boyutlu sıcaklık değişimi FDTD yöntemi ile Şekil 10’ da ve seçilen iki farklı noktadaki tek boyutlu sıcaklık değişimleri sırasıyla Şekil 11 ve Şekil 12’de gösterilmiştir. Rezonatörü besleyen kaynak WR-340 dalga kılavuzu (TE_{10} temel modunu üreten) için TE_{10} uyarımı $z=129$ mm düzleminde seçilerek yapılmıştır.

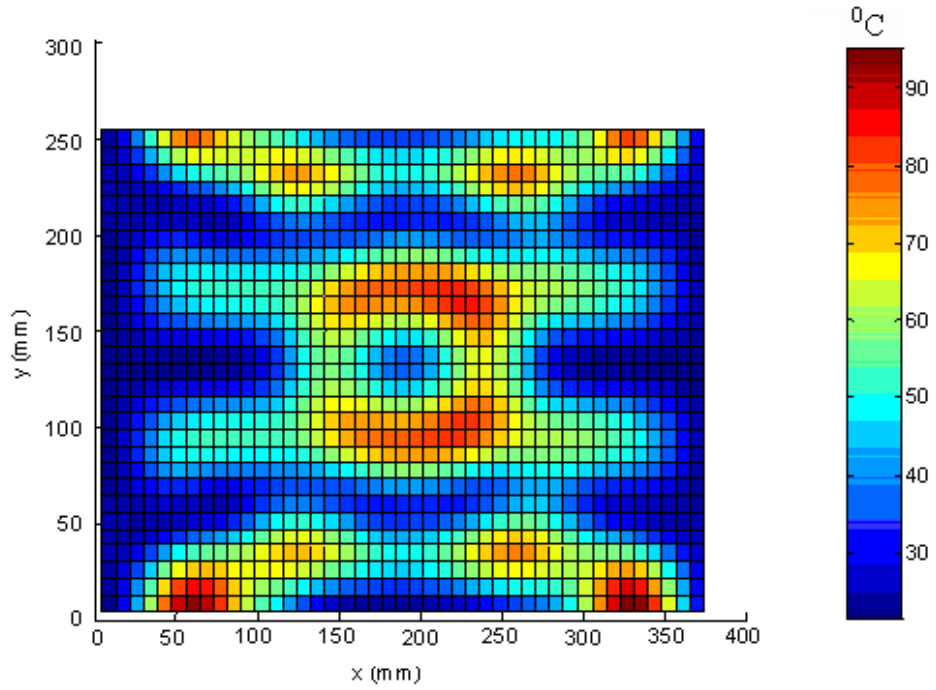
İkinci malzeme için ısıl özellikler ortam sıcaklığı $T=20^{\circ}\text{C}$, malzeme yoğunluğu $\rho=750$ kg/m^3 , ısıl kapasite $C_p=2600$ $\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{K}$, konveksiyon katsayısı $h=5$ $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$, ısıl iletkenlik $0,6$ $\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{K}$ olarak belirlenmiş ve malzemenin dielektrik özellikleri sıcaklığın bir fonksiyonu olarak dielektrik sabiti $\epsilon' = 23,6 - 0,08 \cdot T$, $\epsilon'' = 11,536 - 0,15 \cdot T + 0,00116 \cdot T^2$ olarak seçilmiştir (T sıcaklık).



Şekil 3:
Malzemenin yüzey x-y kesitindeki FDTD ile elde edilen elektrik alan dağılımı

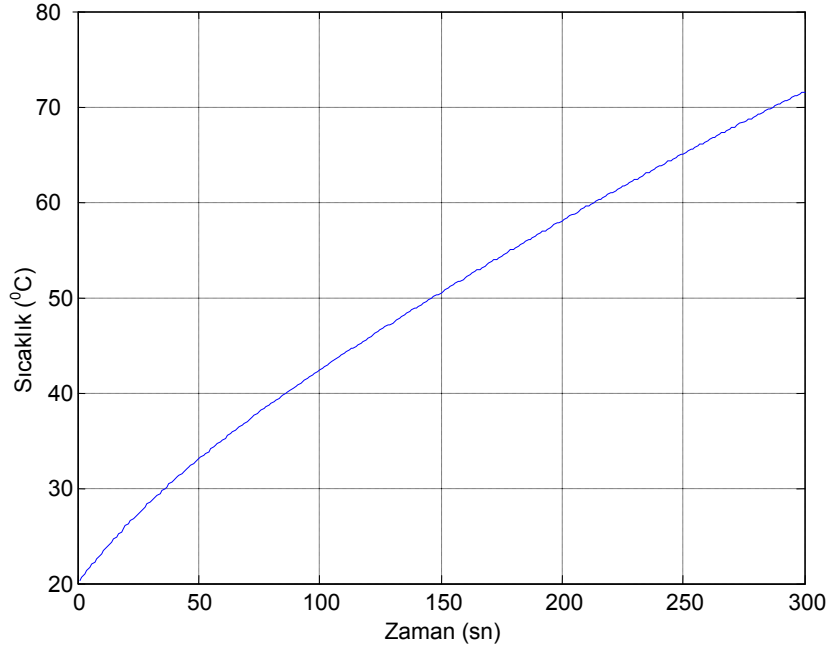


Şekil 4:
Malzemenin yüzey x-y kesitindeki Ansoft HFSS ile elde edilen elektrik alan dağılımı

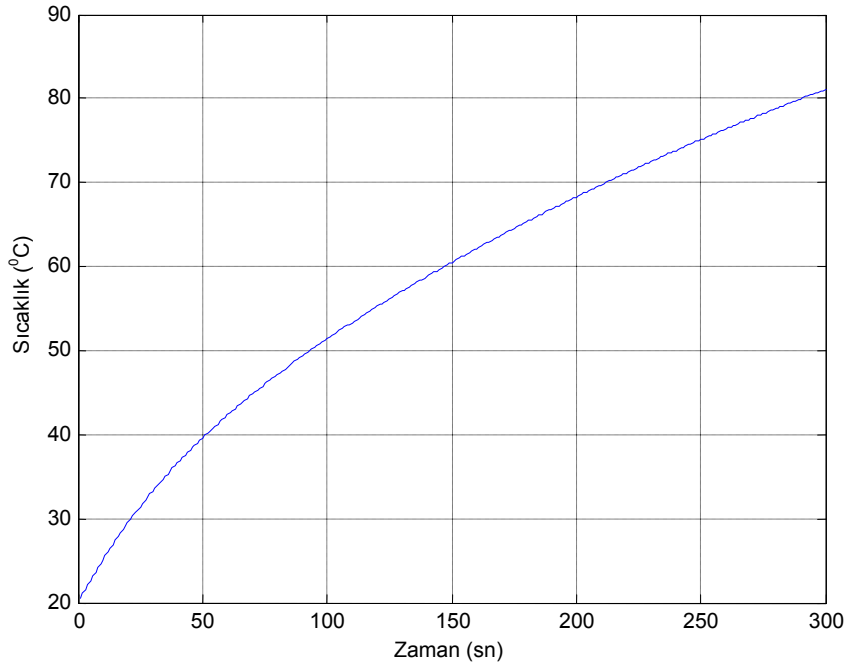


Şekil 5:
Malzemenin yüzey x-y kesitindeki sıcaklık dağılımı (ısıtma süresi 5 dakika)

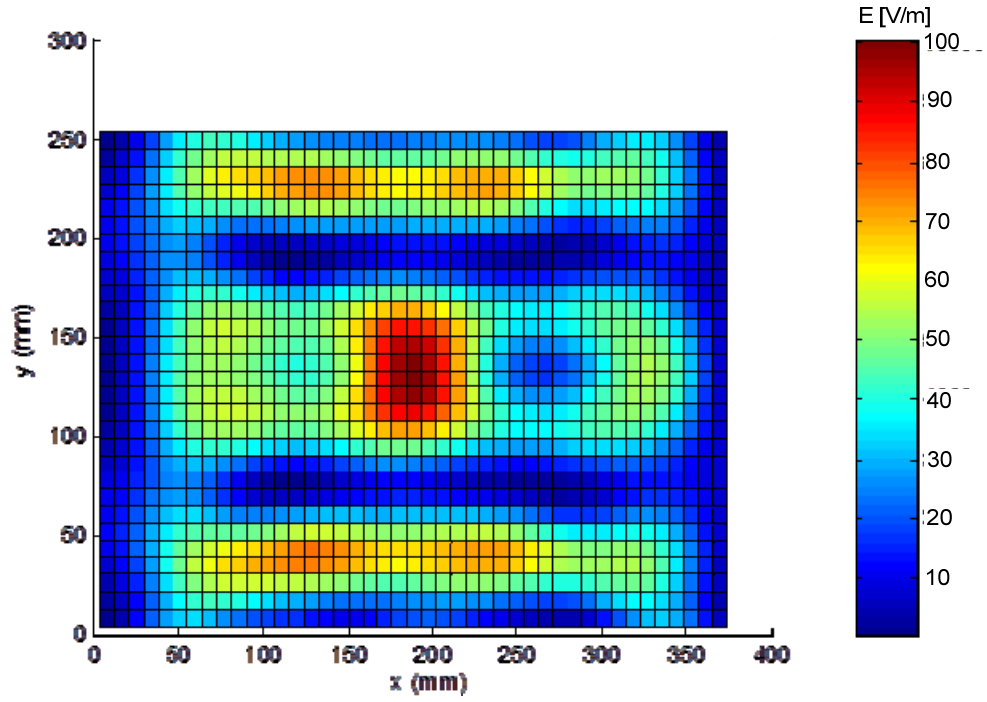
Elektrik alan dağılımlarını gösteren Şekil 3 ve Şekil 4 karşılaştırıldığında sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir. Sıcaklık dağılımını gösteren Şekil 5 incelendiğinde malzeme yüzeyinde sıcak nokta bölgelerinin sayısı fazla ve elektrik alana bağlı genel sıcaklık dağılımının oldukça geniş bir bölgeye etki ettiği anlaşılmaktadır. Şekil 6 ve Şekil 7 sırasıyla sıcak nokta olarak tanımlanan elektrik alan dağılımının yüksek olduğu iki noktadaki sıcaklık değişimlerini zamana bağlı olarak göstermektedir.



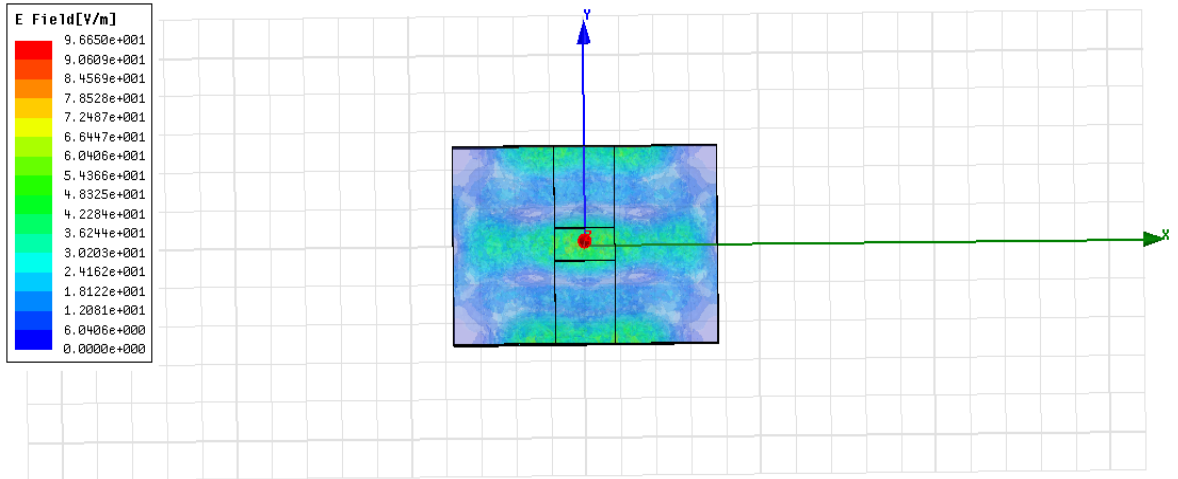
Şekil 6:
(240mm, 180 mm, 210 mm) noktasındaki sıcaklık değişimi



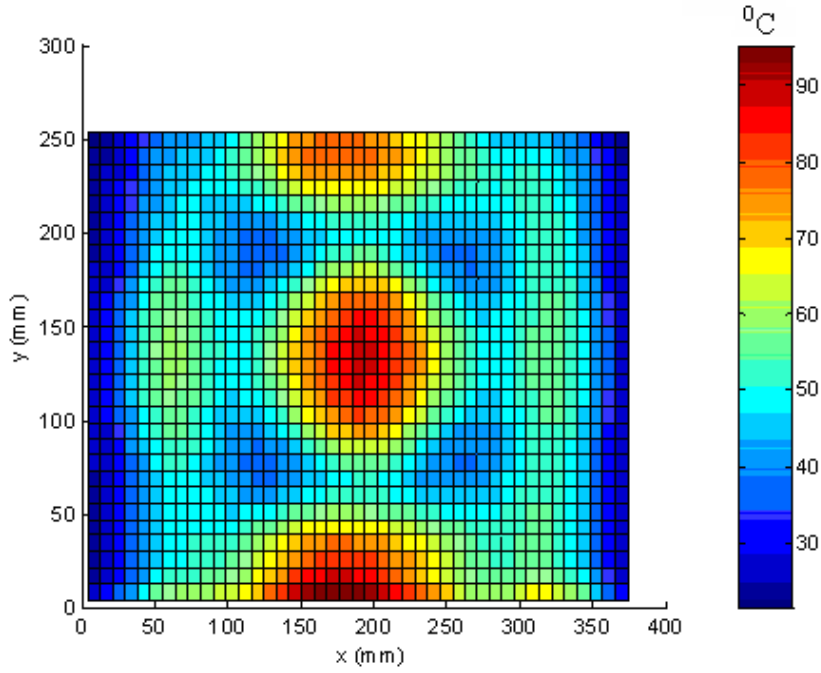
Şekil 7:
(340 mm, 20 mm, 210 mm) noktasındaki sıcaklık değişimi



Şekil 8:
Malzemenin yüzey x-y kesitindeki FDTD ile elde edilen elektrik alan dağılımı



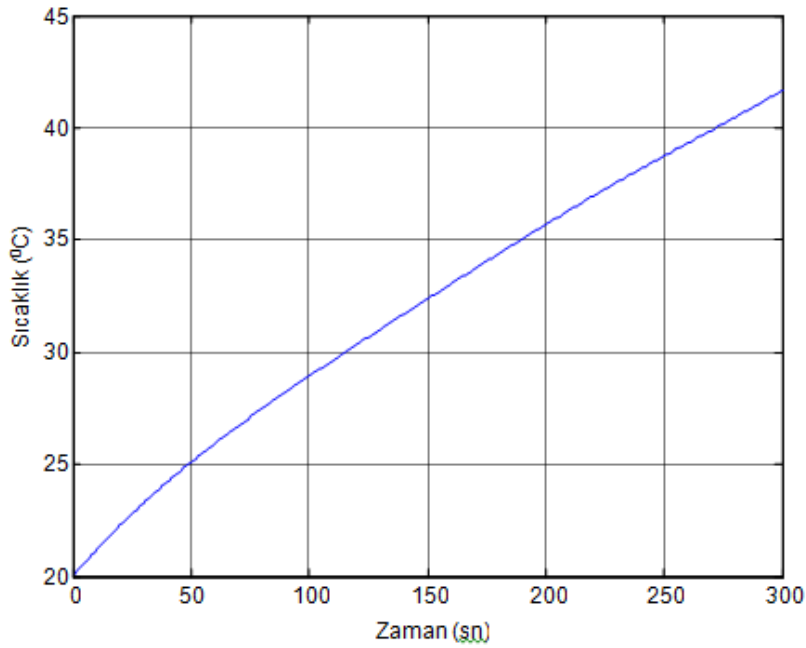
Şekil 9:
Malzemenin yüzey x-y kesitindeki Ansoft HFSS ile elde edilen elektrik alan dağılımı



Şekil 10:

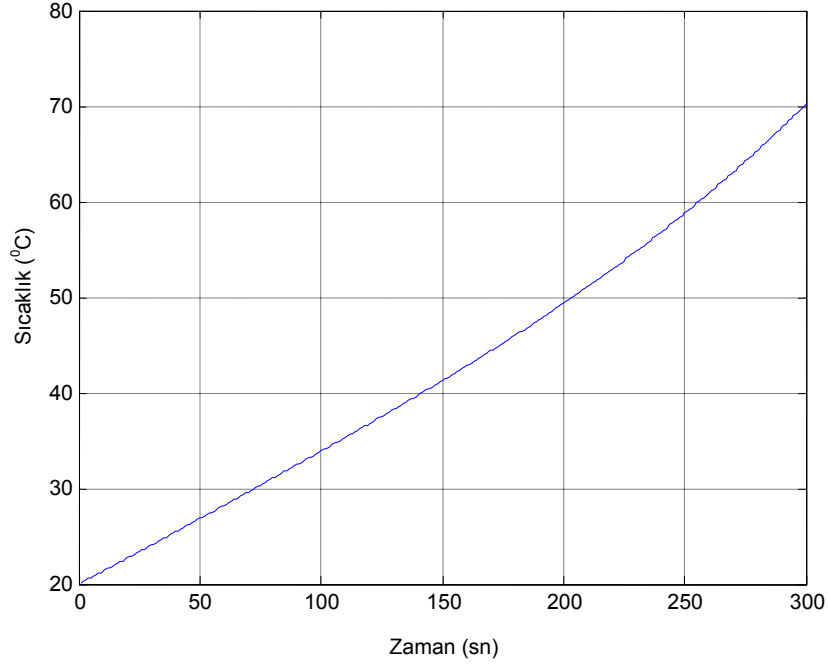
Malzemenin üst x-y kesitindeki sıcaklık dağılımı (ısıtma süresi 5 dakika)

Elektrik alan dağılımlarını gösteren Şekil 8 ve Şekil 9 karşılaştırıldığında sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir. Genel olarak malzemelerin sıcaklık haritaları incelendiğinde malzemelerin üzerinde sıcaklık farkının çok farklı olduğu sıcak ve soğuk bölgelerin olduğu görülmektedir. Bu durum malzeme üzerindeki alan dağılımının farklılığından kaynaklanmaktadır.



Şekil 11:

(240 mm, 150 mm, 140 mm) noktasındaki sıcaklık değişimi (ısıtma süresi 5 dakika)



Şekil 12:
(189 mm, 172 mm, 140 mm) noktasındaki sıcaklık değişimi (ısıtma süresi 5 dakika)

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada kullanım kolaylığı, bilgisayarda diğer sayısal yöntemlere göre daha az çalışma zamanına sahip olması, birçok elektromanyetik yapıya uygulanabilir olması ve genel olarak çok yaygın bir kullanıma sahip olan sonlu farklar zaman uzanımı (FDTD) yöntemiyle mikrodalga uygulamalarının temelini oluşturan ısıtma sürecini bir mikrodalga rezonatöründe modellemek üzere ısı denklemleri ayrıklaştırılarak bulunan alan ve mikrodalga kayıp güç hesabıyla elde edilen sonuçlar ışığında malzeme üzerindeki sıcaklık dağılımları bulunmuştur.

Kullanılan iki malzemenin de dielektrik sabitleri sıcaklığa bağlı değişken olarak tanımlanmıştır. Bu durum incelenen malzemelerin dielektrik özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişiminin göz önüne alındığı, diğer bir deyişle yeni sıcaklık değerlerinin belirlediği yeni dielektrik parametrelerin FDTD yöntemiyle alan hesabı yapılırken program girişi olarak alındığı anlamına (dinamik analiz) gelmektedir. Bu çalışmada incelenen iki farklı malzemenin dinamik analizinin yapılması literatürde bir ilktir. Elde edilen sonuçlar Ansoft HFSS programı ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak verilmiş ve sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. FDTD yönteminin dinamik sıcaklık analizi için uygun ve etkin bir şekilde kullanılabilir olduğu gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Choi, D. H. and Hofer, J. R. (1986). The finite difference time domain method and its applications to eigenvalue problems, *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 34, 1464-1470.
2. Crank, J., Nicholson, P. (1947). A practical method for numerical integration of solutions of partial differential equations of heat conduction type, *Proc. Camb. Phil. Soc.*, 43, 50-67.

3. De Pourcq, M. (1983). Field and power density calculations by three dimensional finite elements, *IEEE Proc.*, 130, 377-380.
4. Holland, R. (1977). Threde: A free-field EMP coupling and scattering code, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 24, 2416–2421.
5. Kondylis, G.D., Flavis, F.D., Pottie, G.J. (2001). A memory efficient formulation of the finite difference time domain method for the solution of maxwell equations, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 49(7), 1310-1320.
6. Kriegsmann, G.A. (1992). Thermal runaway in microwave heated ceramics: A one dimensional model, *Journal of Applied Physics*, 71(4), 1960-1966.
7. Liao, Z.P., Wong, H.L., Yang, B.P., Yuan, Y.F. (1984). A transmitting boundary for transient wave analysis, *Sci. Sin. Ser. A*, 27(10), 1063-1076.
8. Merewether, D.E., Fisher, R., Smith, F.W. (1980). On implementing a numeric Huygen's source scheme in a finite difference program to illuminate scattering bodies, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 27(6), 1829-1833.
9. Mur, G. (1981). Absorbing boundary conditions for the finite difference approximation of the time domain electromagnetic field equations, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 23(4), 377-382.
10. Navarro, E.A., Such, V., Gimeno, B., Cruz, J.L. (1992). Analysis of H-plane waveguide discontinuities with an improved finite difference time domain algorithm, *IEE Proceedings*, 139(2), 183-185.
11. Olivier, J.C. and McNamara, D.A. (1992). Analysis of multiportrectangular waveguide devices using pulsed finite difference time domain (FDTD), *Electronics Letters*, 28(2), 129-130.
12. Reader, H.C., Chow Ting Chan, T.V. (1998). Experimental and numerical field studies in loaded multimode and single mode cavities, *Journal of Microwave Power and Elecromagnetic Energy*, 33(2), 256-263.
13. Sunberg, M., Risman, P.O., Kildal, P.S., Ohlsson, T. (1996). Analysis and design of industrial microwave ovens using the finite difference time domain method, *Journal of Microwave Power and Elecromagnetic Energy*, 31(3), 142-157.
14. Sunberg, M., Kildal P.S., Ohlsson, T. (1998). Moment method analysis of a microwave tunel oven, *Journal of Microwave Power and Elecromagnetic Energy*, 33(1), 36-48.
15. Süle, O. (2011). Dielektrik yüklü bir mikrodalga rezonatöründe elektrik alının ve ısı dağılımının FDTD metodu ile incelenmesi, *Doktora Tezi*, Uludağ Üniversitesi Görükle, Bursa.
16. Taflove, A. and Brodwin, M.E. (1975). Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 23, 623–630.
17. Torres, F., Jecko, B. (1997). Complete FDTD analysis of microwave heating processes in frequency-dependent and temperature-dependent media, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 45, 108–117.
18. Yee, K. (1966). Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 14(3), 302–307.

19. Zhao, H., Turner, I.W. (1996). An analysis of the finite difference time domain method for modelling the microwave heating of dielectric materials within a three dimensional cavity system, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 31(4), 199-214.

Makale 27.02.2012 tarihinde alınmış, 25.04.2012 ve 17.05.2012 tarihlerinde düzeltilmiş, 17.05.2012 tarihinde kabul edilmiştir.

