



FAZ DEĞİŞİMLİ VE FAZ DEĞİŞİMSİZ ISI TRANSFERİ PROBLEMLERİNİN SONUÇLARI ARASINDAKİ İLİŞKİLER

Hüseyin GÜNERHAN

Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 35100, Bornova, İzmir.
gunerhan@bornova.ege.edu.tr, http://bornova.ege.edu.tr/~gunerhan

(Geliş Tarihi: 09.09.2002)

Özet: Bu çalışma, bir ortam içerisinde zamana bağlı faz değişimsiz ısı iletiminin olması durumunda eşsıcaklık eğrilerinin hareket hızı ile, aynı ortam içerisinde faz değişimi olması durumundaki eşsıcaklık eğrilerinin hızı arasında bir ilişkinin olduğu fikrine dayanmaktadır. Bu ilişki, malzemenin iki fazına ait fiziksel özelliklere bağlıdır. Faz değişimi olmayan ısı iletimi problemlerinin analitik çözümleri var olduğundan bu tür bir ilişkinin bilinmesi, faz değişimi olması halinde katı-sıvı ara yüzeyinin bulunmasına olanak sağlayacaktır. Bu fikirden hareketle, kartezyen ve silindirik geometrilerde üç farklı sınır koşul için katılma problemi analitik ve sayısal yöntemler kullanılarak çözülmüş ve faz değişimsiz problemlere ait çözümlerin sonuçlarıyla çoklu regresyon analizleri yapılarak korelasyon katsayıları 0.95 ile 1.00 arasında değişen ilişkiler elde edilmiştir. Bu sonuçlar, yapılan regresyon analizlerinin istatistik açıdan anlamlı olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Zamana Bağlı bir Boyutlu Isı İletimi, Faz Değişimli Isı İletimi, Hareketli Sınır Problemi, Katılma, Entalpi Yöntemi

RELATIONS BETWEEN THE RESULTS OF HEAT TRANSFER PROBLEMS WITH AND WITHOUT PHASE CHANGE

Abstract: This study is to show that there is a relationship between temperature gradients of time dependent heat conduction problems with and without phase change in the same medium. The solidification problem is solved by using analytical and numerical methods for three different types of boundary conditions in cartesian and cylindrical geometries. The results are correlated with the results of problems without phase change. These results have been found to be correlated with multiple correlation coefficients ranging between 0.95 and 1.00, which is statistically significant.

Key Words: Time-dependent One-Dimensional Heat Conduction, Heat Conduction With Phase Change, Moving Boundary Problems, Solidification, Enthalpy Method

SEMBOLLER

a,b	Katsayı	h	Isı taşınım katsayısı [$W/(m^2K)$]
Bi	Biot sayısı ($= h.l/k_s, hL^*/k_s, hr_0/k_s, hr_1/k_s$)	J_0	0.mertebeden birinci tür Bessel fonk.
C	Özgül ısı [$J/(kgK)$]	J_1	1.mertebeden birinci tür Bessel fonk.
C_1	Sıvı fazın özgül ısı [$J/(kgK)$]	k	Isı iletim katsayısı [$W/(mK)$]
C_s	Katı fazın özgül ısı [$J/(kgK)$]	k_1	Sıvı fazın ısı iletim katsayısı [$W/(mK)$]
C^+	Boyutsuz özgül ısı ($= C_s/C_1$)	k_s	Katı fazın ısı iletim katsayısı [$W/(mK)$]
		K^+	Boyutsuz ısı iletim katsayısı ($= k_1/k_s$)
		m	Adım sayısı
		n	Adım sayısı

L	Gizli ısı (J/kg)
L*	Uzunluk (m)
L_{Φ_m}	Boyutsuz olarak T_m eşsıcaklık eğrisinin konumu ($= X_{T_m}^* / L^*$)
q_o	Isı akısı (W/m ²)
q	Boyutsuz ısı akısı $\left(= \frac{q_o l}{T_i k}, \frac{q_o L^*}{T_i k}, \frac{q_o r_o}{T_i k}, \frac{q_o r_l}{T_i k} \right)$
r	Yarı çap (m), Konum (m)
r_o	İç yarı çap (m)
r_l	Dış yarı çap (m)
r^*	Ara yüzey konumu (m)
$r_{T_m}^*$	T_m eşsıcaklık eğrisinin konumu (m)
R	Boyutsuz yarı çap ($= r / r_o, r / r_l$), Korelasyon katsayısı
R_{Φ_m}	Boyutsuz olarak T_m eşsıcaklık eğrisinin konumu ($= r_{T_m}^* / r_o, r_{T_m}^* / r_l$)
R^*	Boyutsuz ara yüzey konumu ($= r^* / r_o, r^* / r_l$)
S	Boyutsuz ara yüzey konumu ($= S^* / l, S^* / L^*$), Katı fazın toplam hacme oranı
S^*	Ara yüzey konumu (m)
Ste	Stefan sayısı
Ste_l	Stefan sayısı $\left\{ = \frac{C_l(T_m - T_{\infty})}{L} \right\}$
Ste_s	Stefan sayısı $\left\{ = \frac{C_s(T_m - T_o)}{L}, \frac{C_l(T_m - T_o)}{L} \right\}$
Ste^*	Stefan sayısı $\left(= \frac{C_l T_i}{L} \right)$
t	Zaman (s)
T	Sıcaklık (°C)
T_i	Başlangıç sıcaklığı (°C)
T_l	Sıvı fazın sıcaklığı (°C)
T_m	Faz değişim sıcaklığı (°C)
T_o	Yüzey sıcaklığı (°C)
T_s	Katı fazın sıcaklığı (°C)
T_{∞}	Hacimsel sıcaklık (°C)
x	Konum (m), Bağımlı değişken
$X_{T_m}^*$	T_m eşsıcaklık eğrisinin konumu (m)
$X_{\Phi_m}^*$	Boyutsuz olarak T_m eşsıcaklık eğrisinin konumu ($= X_{T_m}^* / l$)
y	Bağımsız değişken

$\hat{y}$	Bağımsız değişken
Y_o	0.mertebeden ikinci tür Bessel fonk.
Y_l	1.mertebeden ikinci tür Bessel fonk.
α	Isıl yayınım katsayısı (m ² /s)
α_l	Sıvı fazın ısı yayınım katsayısı (m ² /s)
α_s	Katı fazın ısı yayınım katsayısı (m ² /s)
α_{sl}	Boyutsuz ısı yayınım katsayısı ($= \alpha_s / \alpha_l$)
β	Integral değişkeni
ζ	Boyutsuz konum $\left(= \frac{1}{2\sqrt{\tau}} \right)$
ξ	Boyutsuz konum $\left(= \frac{X_{\Phi_m}}{2\sqrt{\tau}} \right)$
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
ρ_l	Sıvı fazın yoğunluğu (kg/m ³)
ρ_s	Katı fazın yoğunluğu (kg/m ³)
τ	Boyutsuz zaman $\left(= \frac{\alpha t}{l^2}, \frac{\alpha_l t}{l^2}, \frac{\alpha_l t}{L^*}, \frac{\alpha_l t}{r_o^2}, \frac{\alpha_l t}{r_l^2} \right)$
τ_{Φ_m}	T_m eşsıcaklık eğrisi için boyutsuz zaman $\left(= \frac{\alpha_l t}{L^*}, \frac{\alpha_l t}{r_l^2} \right)$
Φ_m	Boyutsuz sıcaklık $\left(= \frac{T_m - T_i}{T_m - T_o}, \frac{T_i - T_m}{T_m - T_o} \right)$
Φ_m^*	Boyutsuz sıcaklık $\left(= \frac{T_i - T_m}{T_m - T_{\infty}} \right)$
Φ_m^*	Boyutsuz sıcaklık $\left(= \frac{T_m - T_i}{T_i} \right)$

GİRİŞ

“Faz değişim” veya “hareketli sınır” problemi, katılaşma veya erime olayını içeren zamana bağlı ısı transferi problemidir. Uygulama alanları için buz üretimi, gıdaların ve biyolojik maddelerin dondurulması, metalurjik işlemler, ısı enerjisinin

gizli ısı olarak depolanması, güneş enerjili ısı depolama sistemleri, denizlerin ve göllerin kışın donması ve yazın erimesi olayı,... örnekleri verilebilir.

Faz değişim problemi, matematik model olarak ele alındığında, faz değiştiren bölge sınırlarının hareketli olması nedeni ile doğrusal olmayan özellik göstermekte ve çözümleri güçleşmektedir. Katı ve sıvı bölgeler içindeki sıcaklık dağılımları ve bu bölgeleri birbirinden ayıran ara yüzey konumu bilinmeyenleri oluşturmaktadır. Birbirlerine bağlı olan ve değerleri zamanla değişen bu bilinmeyenlerin ortaya çıkarılması, ait oldukları diferensiyel denklemlerin eşzamanlı çözümlerine bağlıdır (İlken, 1991).

Faz değişim problemleri doğrusal olmayan özellik taşıdıklarından sadece sınırlı sayıda basitleştirilmiş problemler için analitik veya yarı analitik çözümler elde edilmiştir, (Özışık, 1993; Lunardini, 1981). Bu nedenle birçok faz değişim probleminin çözümü ancak sayısal yöntemlerin kullanımı ile elde edilebilmektedir. Bilgisayar teknolojisinin gelişimine bağlı olarak sayısal yöntemlerde elde edilen gelişmeler faz değişim problemlerine de yansımış ve bu problemlere özgü yöntemler geliştirilerek (Voller vd., 1990; Samarskii, vd., 1993) daha hassas sonuçlar elde edilmeye başlanmıştır.

Bugüne kadar yapılan çalışmaların birçoğu özel problemlere ve özel koşullara ait çözümler sunmaktadırlar. Yöntem yeniliği veya yeni yöntem tanıtımı içeren çalışmalardan da yine özel problemlerin çözümü sırasında yararlanmak olası olmaktadır. Bu nedenle, analitik çözüm açısından bu denli kısıtlı olan bir alanda genel mühendislik uygulamaları için geçerli sonuçlara ulaşmak her bir problemin yeniden çözümü ile olası olabilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, kartezyen ve silindirik geometriler için üç çeşit sınır koşulu altında faz değişim problemlerine ait genel çözümlere ulaşmak ve bu çözümleri tasarımcıya yüksek korelasyon katsayısına sahip bir bağıntı ile sunabilmektir. Aynı başlangıç ve sınır koşullara sahip faz değişimsiz bir ısı iletim probleminin sonuçları ile faz değişimli problemin sonuçları arasında bir ilişki olduğu bu çalışmada ileri sürülen fikirdir. Gerçekte fiziksel bir temele dayanan bu fikir, bu çalışmada irdelenmiş ve kartezyen ve silindirik geometri için faz değişimli katılaşma problemi üç çeşit sınır koşulu altında analitik veya sayısal olarak çözümlenerek, katı-sıvı ara

yüzey konumunun zamana göre değişimi elde edilmiştir. Aynı problem, faz değişimsiz ısı iletimi problemi olarak da çözülmüş ve faz değişiminin olması gerektiği sıcaklığa ait eşsıcaklık eğrisinin ilgili zamanlardaki konumları bulunmuştur. Elde edilen bu konumlar arasında bir fonksiyonel ilişki olması gerektiği varsayımı ile, probleme ait değişkenleri içeren çoklu regresyon analizleri yapılmış ve korelasyonlar elde edilmiştir. Anılan faz değişimsiz ısı iletimi problemlerinin tam analitik çözümleri var olduğundan, bu çözümlerin ilgili korelasyonlarla birlikte kullanımı ile, göreceli olarak zor bir faz değişim problemini çözmeden, bu problemin yaklaşık çözümüne ulaşmanın olası olabileceği gösterilmiş olmaktadır.

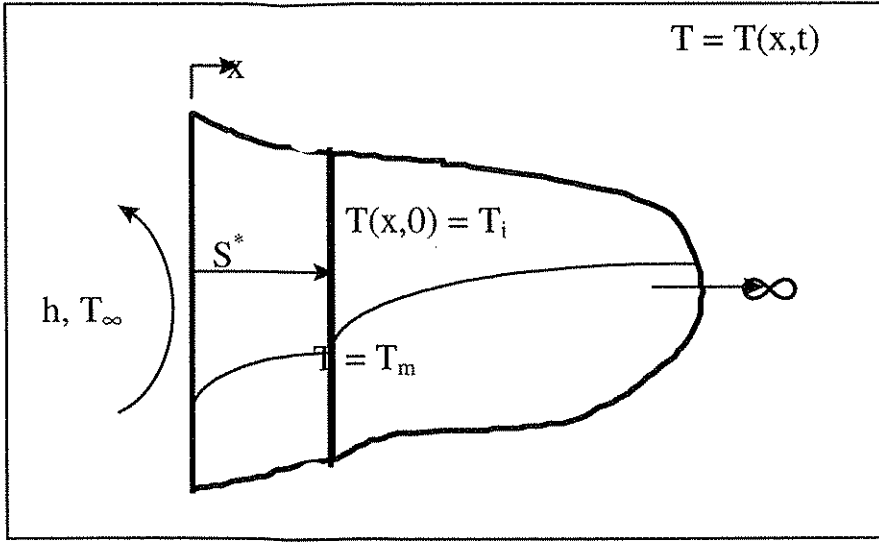
FİZİKSEL YAKLAŞIM

Bir ortam içerisinde zamana bağlı faz değişimsiz ısı iletiminin olması durumundaki eşsıcaklık eğrilerinin hareket hızı ile, aynı ortam içerisinde faz değişimi olması durumundaki eşsıcaklık eğrilerinin hızı arasında bir ilişkinin olduğu fikrine dayanan bu çalışmanın fiziksel yaklaşımı ilk olarak İlken ve Günerhan (1996, 1997) tarafından kartezyen ve silindirik geometri için yapılmıştır.

Kartezyen geometride, başlangıçta belirli bir T_i sıcaklığında olan ($T_i > T_m$) yarı sonsuz bir ortamda katılaşma problemini ele alalım, (Şekil 2.1). Katılaşma üçüncü çeşit sınır koşulu altında ve T_∞ sıcaklığında bir ortam ($T_\infty < T_m$) etkisiyle gerçekleşiyorsa, ısı iletimi modeline göre matematik denklemlerin içerdiği parametreler cinsinden katı-sıvı ara yüzeyin konumu, katılaşmanın başladığı (yüzeyin T_m sıcaklığına indiği) t_1 anından itibaren fonksiyonel olarak (2.1) ifadesi ile gösterilebilir.

$$S^* = S^*(k_i, k_s, \rho_i, \rho_s, C_i, C_s, h, L, T_i - T_m, T_m - T_\infty, t) \quad t > t_1 \quad (2.1)$$

Aynı yarı sonsuz ortam problemini bu kez faz değişimi olmaması durumu için sadece bir ısı iletimi problemi olarak ele alırsak (başka bir deyişle ortamın faz değiştirmesi gerektiği T_m sıcaklığında ve daha düşük sıcaklıklarda faz değiştirmediyini varsayarsak), T_m eşsıcaklık eğrisinin konumu fonksiyonel olarak (2.2) ifadesi ile gösterilebilir.



Şekil 2.1. Yarı sonsuz bir ortamda katılaşma problemi

$$X_{T_m}^* = X_{T_m}^* (k_i, \rho_i, C_i, h, T_i - T_m, T_m - T_\infty, t) \quad t > t_1 \quad (2.2)$$

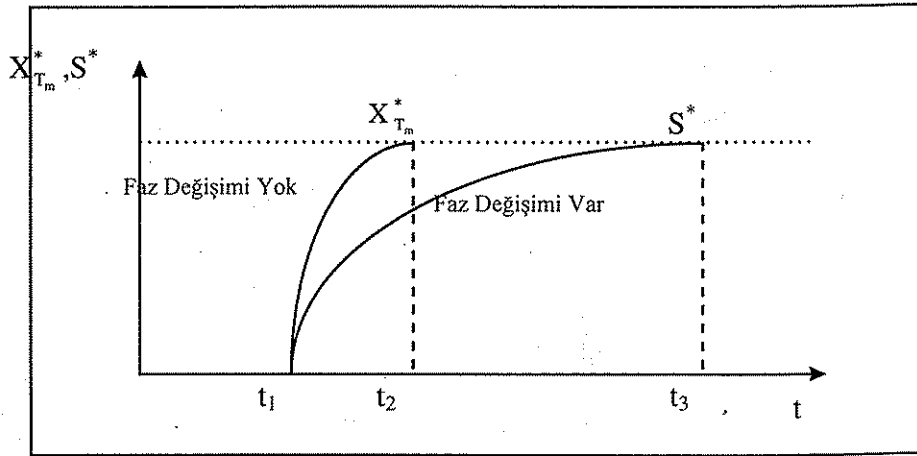
(2.1) ve (2.2) ifadelerinin karşılaştırılmasından, faz değişimli yarı sonsuz bir ortamda katılaşma problemine ait çözümle faz değişimsiz aynı ısı iletimi problemine ait çözüm arasında, malzemenin fiziksel özelliklerine ve malzemenin fiziksel özelliklerinin oranlarına bağlı güçlü bir ilişki olduğu yorumu yapılabilir. Faz değişimsiz ve değişimli ısı iletim problemleri arasındaki bu fonksiyonel benzeşim boyutlu olarak Şekil 2.2 ile verilmiştir.

Şekil 2.2 ile verilen, t_1 eşsıcaklık eğrisinin T_m sıcaklığına ulaştığı ilk anı ve faz değişiminin başladığı anı, t_2 ; T_m eşsıcaklık eğrisinin belirli bir değere ulaştığı anı, t_3 ; faz değişim ara yüzeyinin T_m eşsıcaklık eğrisi ile aynı değere ulaştığı anı göstermektedir.

Kartezyen geometride, yarı sonsuz bir ortamda katılaşma problemi için yapılan bu fiziksel yaklaşım, kartezyen ve silindirik geometrilerdeki bütün faz değişim problemleri için de geçerli olacaktır.

Bu çalışmada, yukarıda yapılan fiziksel yaklaşım ışığında, kartezyen ve silindirik geometrilerdeki katılaşma problemleri, problem değişkenlerinin farklı değerleri ve üç farklı sınır koşul için çözülmüş ve ara yüzey konumunun zamana bağlı değerlerini veren ve boyutsuz sayılar

içeren veri setleri oluşturulmuştur. Çözüm yöntemi olarak "Entalpi Yöntemi" seçilmiş ve Voller ve Cross (1981, 1983) tarafından önerilen algoritma temel alınmıştır. Kartezyen ve silindirik geometrilerdeki faz değişimsiz ısı iletim problemleri, analitik ve sayısal yöntemler kullanılarak çözülmüş ve belirli boyutsuz zamanlardaki boyutsuz T_m eşsıcaklık eğrisine ait konumlar belirlenerek ikinci veri setleri oluşturulmuştur. Faz değişimli ve faz değişimsiz ısı iletim problemlerinin çözümlerinden elde edilen ve boyutsuz sayılardan oluşan veri setleri, çoklu regresyon analizi yöntemi kullanılarak, boyutsuz sayılardan oluşan korelasyonların elde edilmesinde kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan boyutsuz sayıların sınırları, H_2O , $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ ve $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ olarak gösterilen faz değişim malzemelerinin özellikleri (Hale, vd., 1971; Kakaç, vd., 1989) alınarak saptanmıştır. Bu üç malzeme, faz değişimli ısı iletimi uygulamalarında en çok kullanılan malzemeler olması ve bu malzeme özellikleri içinde en küçük ve en büyük değerleri içermelerinden dolayı seçilmiştir. Faz değişimli ve değişimsiz durumlara ait veri setleri arasında yapılan çoklu regresyon analizleri sonucunda, kartezyen ve silindirik geometrilerdeki 12 farklı durum için 12 korelasyon elde edilmiştir.

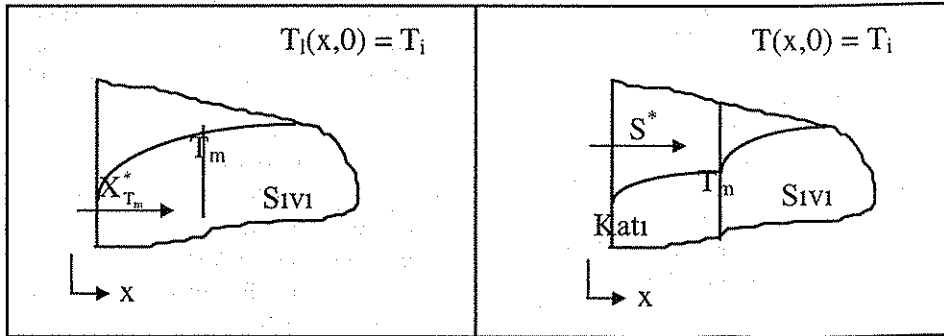


Şekil 2.2. Faz değişimsiz ve değişimli ısı iletim problemleri arasındaki fonksiyonel benzeşim

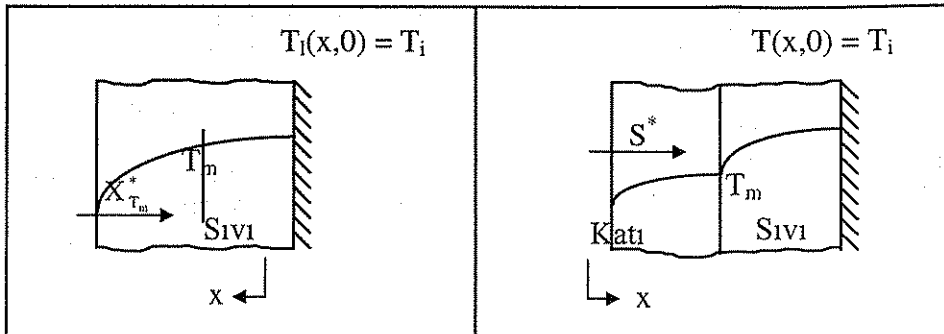
KARTEZYEN GEOMETRİ İÇİN İLİŞKİLERİN BULUNMASI

Kartezyen geometride, yarı sonsuz ortam ve düzlem levha ele alınmıştır. Yarı sonsuz ortam ve düzlem levha için faz değişimsiz ve faz değişimli ısı iletiminde, faz değişimsiz duruma ait eşsıcaklık

eğrisinin konumu (ortamın T_m sıcaklığına geldiği ve faz değiştirmedeği konum) $X_{T_m}^*$ ile, faz değişimli duruma ait ara yüzey konumu (ortamın T_m sıcaklığına geldiği ve faz değiştirdiği konum) ise, S^* ile gösterilmiştir, (Şekil 3.1 ve 3.2).



Şekil 3.1. Faz değişimsiz ve faz değişimli yarı sonsuz ortam



Şekil 3.2. Faz değişimsiz ve faz değişimli " L^* " uzunluğundaki düzlem levha

Faz değişimsiz yarı sonsuz ortam ve düzlem levha için enerji eşitliği, sınır ve başlangıç koşulları Tablo 3.1 ile verilmiştir.

Dirichlet, Neumann ve Robin olarak isimlendirilen üç çeşit sınır koşulunda enerji denklemi, $T_1(x,t) = T_m$ için $x = X_{T_m}^*$ koşulunda,

Tablo 3.1 ile verilen sınır ve başlangıç koşulları da kullanılarak çözülmüş ve sonuçlar boyutsuz olarak yarı sonsuz ortam için Tablo 3.2, düzlem levha için Tablo 3.3 ile verilmiştir. Yarı sonsuz ortam ve düzlem levha için faz değişimli enerji eşitliği, sınır ve başlangıç koşulları Tablo 3.4 ile verilmiştir.

Tablo 3.1. Faz değişimsiz ısı iletimi için enerji eşitliği, sınır ve başlangıç koşulları

	Yarı sonsuz ortam	Düzlem levha
Enerji Eşitliği: $\frac{\partial^2 T_1(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_1(x,t)}{\partial t}$	$x \geq 0, t > 0$	$0 < x < L^*, t > 0$
Başlangıç Koşulu: $T_1(x,t) = T_i$	$t = 0, x \geq 0$	$t = 0, 0 < x < L^*$
Sınır Koşulu: $T_1(x,t) \rightarrow T_i$	$x \rightarrow \infty, t > 0$	
Sınır Koşulu: $\frac{\partial T_1(x,t)}{\partial x} = 0$		$x = 0, t \geq 0$

Tablo 3.2. Yarı sonsuz ortamda faz değişimsiz ortam için çözümler, (Incropera ve De Witt, 1990)

$x = 0, t > 0$ için sınır koşulu	Faz değişimsiz çözüm
Dirichlet: $T_1(x,t) = T_o$	$ \Phi_m = \frac{1 - \text{erf}(\xi)}{\text{erf}(\xi)}$
Neumann: $-k \frac{\partial T_1(x,t)}{\partial x} = q_o$	$ \Phi_m^* = q^* \left\{ \frac{x_{\Phi_m}}{\xi \sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) - x_{\Phi_m} [1 - \text{erf}(\xi)] \right\}$
Robin: $-k \frac{\partial T_1(x,t)}{\partial x} = h[T_\infty - T_1(x,t)]$	$\Phi^+ = \text{erfc}(\xi) - \left[\exp(2\xi\sqrt{\tau}\text{Bi} + \tau\text{Bi}^2) \right] \left[\text{erfc}(\xi + \sqrt{\tau}\text{Bi}) \right]$ $\Phi_m^+ = \Phi^+ / (1 - \Phi^+)$

Faz değişimli ısı iletiminde yarı sonsuz ortam için Tablo 3.4 ile verilen enerji eşitlikleri, $T_s(x,t) = T_1(x,t) = T_m$ için $x = S^*$ alınarak, Tablo 3.4 ile verilen sınır ve başlangıç koşulları ile birinci çeşit sınır koşulunda, "Neumann Problemi" (Özışık, 1993), ikinci ve üçüncü çeşit sınır koşullarında ise "Entalpi Yöntemi" (Voller ve Cross, 1981; Voller ve Cross, 1983; Fukusako ve Seki, 1987) yardımıyla analitik ve sayısal olarak çözülmüştür. Düzlem levha için ise, üç çeşit sınır koşulunda, "Entalpi Yöntemi" (Voller ve Cross, 1981; Voller ve Cross, 1983; Fukusako ve Seki, 1987) yardımıyla sayısal olarak çözülmüştür.

Faz değişimsiz ve faz değişimli yarı sonsuz ortam ve düzlem levha için Tablo 3.5 ve 3.6 ile verilen boyutsuz sayılar ve sınırlar kullanılarak, üç çeşit sınır koşulu için veri setleri oluşturulmuş ve çoklu regresyon analizi (Hoffmann, 1993; Ilken, 1993) yardımıyla faz değişimsiz problem ile faz değişimli problem arasında (3.1) denklemindeki gibi doğrusal olmayan bir ilişki kurulmuş ve bu ilişkiye ait korelasyon ve regresyon katsayıları yarı sonsuz ortam için Tablo 3.5, düzlem levha için Tablo 3.6 ile verilmiştir. (3.1) denklemi ile verilen ifade, en yüksek regresyon katsayılarını sağladığı için seçilmiştir.

Tablo 3.3. Düzlem levhada faz değişimsiz ortam için çözümler, (Dağsöz, 1974; Carslaw & Jaeger, 1959; Mills, 1995)

$x = 0, t > 0$ için sınır koşulu	Faz değişimsiz çözüm
Dirichlet: $T_1(x, t) = T_0$	$\Phi = -2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{\beta_m} \exp(-\beta_m^2 \tau_{\Phi_m}) \cos(\beta_m L_{\Phi_m})$ $\beta_m = [(2m-1)\pi]/2, \Phi_m = (1 - \Phi)/\Phi$
Neumann: $-k \frac{\partial T_1(x, t)}{\partial x} = q_0$	$ \Phi_m^* = \frac{ q^* }{\zeta} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \text{ierfc}[\zeta(2n+1 - L_{\Phi_m})] + \text{ierfc}[\zeta(2n+1 + L_{\Phi_m})] \right\}$
Robin: $-k \frac{\partial T_1(x, t)}{\partial x} = h[T_1(x, t) - T_\infty]$	$\Phi^{++} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4 \sin(\beta_m)}{2\beta_m + \sin(2\beta_m)} \cos(\beta_m L_{\Phi_m}) \exp(-\beta_m^2 \tau_{\Phi_m})$ $\beta_m \tan(\beta_m) = Bi, \Phi_m^+ = (1 - \Phi^{++})/\Phi^{++}$

Tablo 3.4. Faz değişimli ısı iletimi için enerji eşitliği, sınır ve başlangıç koşulları

	Yarı sonsuz ortam	Düzlem levha
Katı Faz için Enerji Eşitliği: $\frac{\partial^2 T_s(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{dT_s(x, t)}{dt}$	$0 \leq x < S^*, t > 0$	$0 \leq x < S^*, t > 0$
Sıvı Faz için Enerji Eşitliği: $\frac{\partial^2 T_l(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_l} \frac{dT_l(x, t)}{dt}$	$x > S^*, t > 0$	$S^* < x \leq L^*, t > 0$
Ara Yüzey için Enerji Eşitliği: $k_s \frac{\partial T_s(x, t)}{\partial x} - k_l \frac{\partial T_l(x, t)}{\partial x} = \rho L \frac{d}{dt}$	$x = S^*, t > 0$	$x = S^*, t > 0$
Başlangıç Koşulu: $T_1(x, t) = T_i$	$t = 0, x \geq 0$	$t = 0, S^* < x < L^*$
Sınır Koşulu: $T_1(x, t) \rightarrow T_i$	$x \rightarrow \infty, t > 0$	
Sınır Koşulu: $\frac{\partial T_1(x, t)}{\partial x} = 0$		$x = 0, t \geq 0$

$$\hat{y} = a \quad x_1^{b_1} \quad x_2^{b_2} \quad x_3^{b_3} \dots \quad (3.1)$$

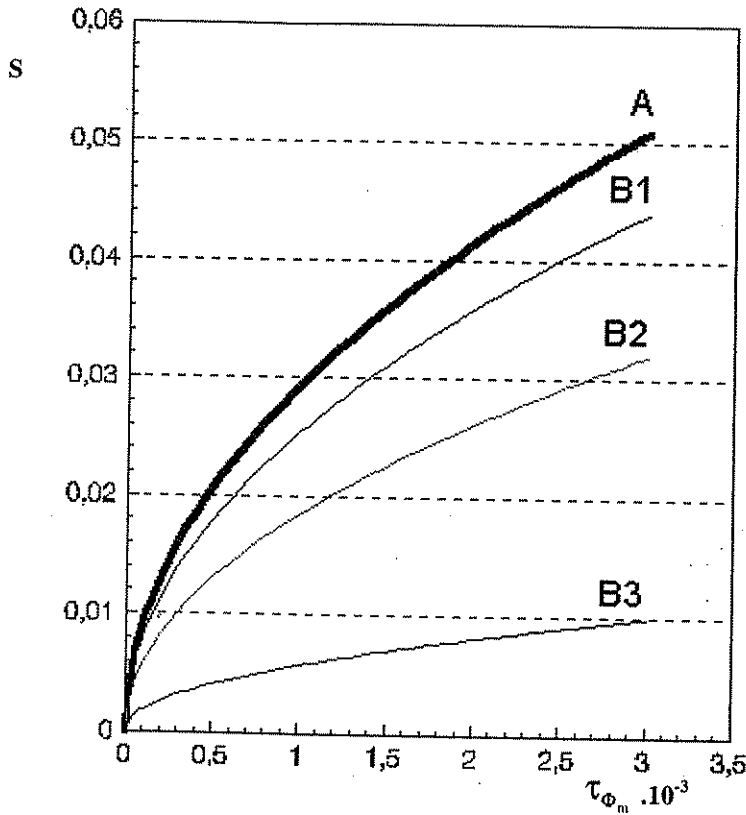
Denklem (3.1) birçok bağımsız değişken içeren doğrusal olmayan çoklu regresyon denklemidir.

(3.1) denklemi ile verilen $\hat{y}$, bağımlı değişkeni göstermektedir. Kartezyen geometride yarı sonsuz

ortam için bağımlı değişken, boyutsuz ara yüzey konumu (S), düzlem levha için ise, boyutsuz zaman (τ) olarak alınmıştır. $x_1 \quad x_2 \quad x_3 \dots$ ise, bağımsız değişkenleri göstermektedir. Analitik çözüm ile regresyon denklemlerinin karşılaştırılması, Neumann çözümü temel alınarak Şekil 3.3 ile verilmiştir, (Ilken ve Gunerhan, 1996).

Tablo 3.5. Yarı sonsuz ortam için sonuçlar, (Günerhan, 1998)

Sınır Koşulları	Regresyon Denklemleri	Veri Sayısı (Adet) - R (%)
Dirichlet	$S = 0.838 X_{\Phi_m}^{0.996} \Phi_m ^{0.254} Ste_s^{0.347} (K^+)^{-0.230} \alpha_{sl}^{-0.165}$	2430x6 - 100
Neumann	$S = 0.974 X_{\Phi_m}^{1.071} \Phi_m^* ^{0.173} q^* ^{0.225} (Ste^*)^{0.365} (K^+)^{-4.368} (C^+)^{7.566}$	4949x7 - 99
Robin	$S = 3.785 X_{\Phi_m}^{1.041} (\Phi_m^+)^{0.289} Bi^{0.013} Ste_1^{0.327} (K^+)^{-9.875} (C^+)^{18.042}$	23910x7 - 98
Sınırlar		
$H_2O, CaCl_2.6H_2O$ ve $Na_2HPO_4.12H_2O$ için $0.0 < S \leq 1.0, 0.1 \leq (\Phi_m \text{ ve } \Phi_m^+) \leq 1.0$ $0.1 \leq (Ste_s, Ste^* \text{ ve } Ste_1) \leq 1.0, 10 \leq Bi \leq 100$ $CaCl_2.6H_2O$ ve $Na_2HPO_4.12H_2O$ için $0.1 \leq \Phi_m^* \leq 0.5, 10 \leq q^* \leq 50$ H_2O için $ \Phi_m^* = 1.0, 100 \leq q^* \leq 500$		



Şekil 3.3. H_2O Malzemesi ve $Ste_s=0.5$ için Analitik Çözüm ile Regresyon Denklemlerinin Karşılaştırılması. (A:Neumann Çözümü, $\phi_m=1.0$; B1: $\phi_m=0.9$; B2: $\phi_m=0.5$; B3: $\phi_m=0.1$)

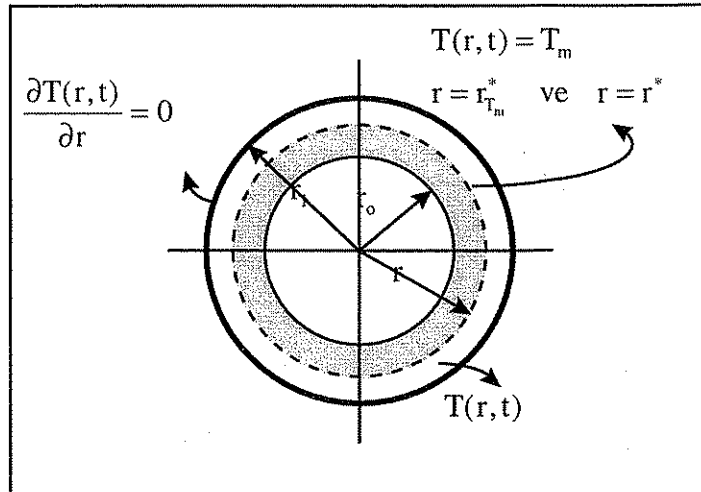
Tablo 3.6. Düzlem Levha için sonuçlar, (Günerhan, 1998)

Sınır Koşulları	Regresyon Denklemleri	Veri Sayısı (Adet) - R (%)
Dirichlet	$\tau = 1.926 \tau_{\Phi_m}^{1.048} \Phi_m ^{-0.476} Ste_s^{-0.697} (K^+)^{0.462} \alpha_{sl}^{0.331}$	2430x6 - 99
Neumann	$\tau = 1.053 \tau_{\Phi_m}^{0.940} \Phi_m^* ^{-0.263} q^* ^{-0.337} (Ste^*)^{-0.548} (K^+)^{5.959} (C^+)^{-10.127}$	4949x7 - 100
Robin	$\tau = 0.165 \tau_{\Phi_m}^{1.026} (\Phi_m^+)^{-0.483} Bi^{0.021} Ste_l^{-0.603} (K^+)^{14.913} (C^+)^{-26.955}$	24292x7 - 98
Sınırlar		
<p><u>H₂O, CaCl₂.6H₂O ve Na₂HPO₄.12H₂O için</u></p> <p>$0.0 < (S \text{ ve } L_{\Phi_m}) \leq 1.0, 0.1 \leq (\Phi_m \text{ ve } \Phi_m^+) \leq 0.9$</p> <p>$0.1 \leq (Ste_s, Ste^* \text{ ve } Ste_l) \leq 1.0, 10 \leq Bi \leq 100$</p> <p><u>CaCl₂.6H₂O ve Na₂HPO₄.12H₂O için</u></p> <p>$0.1 \leq \Phi_m^* \leq 0.5, 10 \leq q^* \leq 50$</p> <p><u>H₂O için</u></p> <p>$\Phi_m^* = 1.0, 100 \leq q^* \leq 500$</p>		

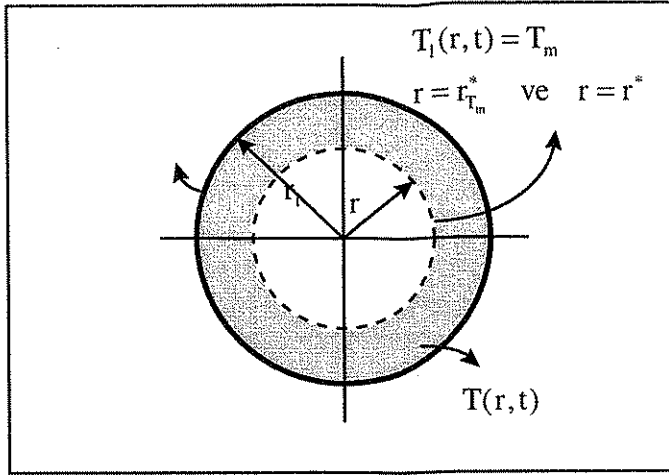
SİLİNDİRİK GEOMETRİ İÇİN İLİŞKİLERİN BULUNMASI

Silindirik geometride, dışa doğru katılma ve içe doğru katılma problemi ele alınmıştır. Dışa doğru ve içe doğru katılma için faz değişimsiz ve faz değişimli ısı iletiminde, faz değişimsiz duruma

ait eşsıcaklık eğrisinin konumu (ortamın T_m sıcaklığına geldiği ve faz değiştirmedeği konum) $r_{T_m}^*$ ile, faz değişimli duruma ait ara yüzey konumu (ortamın T_m sıcaklığına geldiği ve faz değiştirdiği konum) ise, r^* ile gösterilmiştir, (Şekil 4.1 ve 4.2).



Şekil 4.1. Faz değişimsiz ve faz değişimli dışa doğru katılma problemi



Şekil 4.2. Faz değişimsiz ve faz değişimli içe doğru katılma problemi

Faz değişimsiz dışa doğru katılma ve içe doğru katılma için enerji eşitliği, sınır ve başlangıç koşulları Tablo 4.1 ile verilmiştir.

Dirichlet, Neumann ve Robin olarak isimlendirilen üç çeşit sınır koşulunda enerji denklemi, $T_1(r, t) = T_m$ için $r = r_{T_m}^*$ koşulunda, Tablo 4.1 ile verilen sınır ve başlangıç koşulları da kullanılarak çözülmüş ve sonuçlar boyutsuz olarak dışa doğru katılma için Tablo 4.2, içe doğru katılma için Tablo 4.3 ile verilmiştir.

Dışa doğru ve içe doğru katılma için faz değişimli enerji eşitliği, sınır ve başlangıç koşulları Tablo 4.4 ile verilmiştir.

Faz değişimli ısı iletiminde dışa doğru ve içe doğru katılma için Tablo 4.4 ile verilen enerji eşitlikleri, $T_s(r, t) = T_l(r, t) = T_m$ için $r = r^*$ alınarak, Tablo 4.4 ile verilen sınır ve başlangıç koşulları ile üç çeşit sınır koşulunda "Entalpi Yöntemi" (Voller

ve Cross, 1981; Voller ve Cross, 1983; Fukusako ve Seki, 1987) yardımıyla sayısal olarak çözülmüştür.

Faz değişimsiz ve faz değişimli dışa doğru ve içe doğru katılma için Tablo 4.5 ve 4.6 ile verilen boyutsuz sayılar ve sınırlar kullanılarak, üç çeşit sınır koşulu için veri setleri oluşturulmuş ve çoklu regresyon analizi (Hoffmann, 1993; İlken, 1993) yardımıyla faz değişimsiz problem ile faz değişimli problem arasında (3.1) denklemindeki gibi doğrusal olmayan bir ilişki kurulmuş ve bu ilişkiye ait korelasyon ve regresyon katsayıları dışa doğru katılma için (Tablo 4.5), içe doğru katılma için (Tablo 4.6) ile verilmiştir.

Denklem (3.1) ile verilen $\hat{y}$, bağımlı değişkeni göstermektedir. Silindirik geometride dışa doğru katılma için bağımlı değişken, boyutsuz ara yüzey konumu (R^*), içe doğru katılma için ise, boyutsuz zaman (τ) olarak alınmıştır.

Tablo 4.1. Faz değişimsiz ısı iletimi için enerji eşitliği, sınır ve başlangıç koşulları

	Dışa doğru katılma	İçe doğru katılma
Enerji Eşitliği: $\frac{\partial^2 T_1(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial t}$	$r_0 < r < r_1, t > 0$	$0 < r < r_1, t > 0$
Başlangıç Koşulu: $T_1(r, t) = T_i$	$t = 0, r_0 \leq r \leq r_1$	$t = 0, 0 \leq r \leq r_1$
Sınır Koşulu: $\frac{\partial T_1(r, t)}{\partial r} = 0$	$r = r_1, t > 0$	
Sınır Koşulu: $2 \frac{\partial^2 T_1(r, t)}{\partial r^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial t}$		$r = 0, t > 0$

Tablo 4.2. Dışa doğru katılaşmada faz değişimsiz ortam için çözümler, (Özişik, 1993; Carslaw ve Jaeger, 1959; Rohsenow, vd., 1998)

$r = r_o, t > 0$ için sınır koşulu	Faz değişimsiz çözüm
Dirichlet: $T_1(r, t) = T_o$	$\Phi = 1 + \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \exp(-\tau \beta^2) \frac{J_o(R\beta)Y_o(\beta) - Y_o(R\beta)J_o(\beta)}{J_o^2(\beta) + Y_o^2(\beta)} \frac{d\beta}{\beta}$ $R = R_{\Phi_m}$ için $\Phi_m = \Phi / (1 - \Phi)$
Neumann: $-k \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial r} = q_o$	$ \Phi^* = -\frac{2 q^* }{\pi} \int_0^\infty [1 - \exp(-\tau \beta^2)] \frac{J_o(R\beta)Y_1(\beta) - Y_o(R\beta)J_1(\beta)}{J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta)} \frac{d\beta}{\beta^2}$ $R = R_{\Phi_m}$ için $ \Phi_m^* = \Phi^* $
Robin: $k \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial r} = h[T(r, t) - T_\infty]$	$\Phi^+ = 1 + \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \exp(-\tau \beta^2) \frac{R_o(R\beta)}{N(\beta)} \frac{d\beta}{\beta}$ $R_o(R\beta) = J_o(R\beta)[\beta Y_1(\beta) + Bi Y_o(\beta)] - Y_o(R\beta)[\beta J_1(\beta) + Bi J_o(\beta)]$ $N(\beta) = [\beta J_1(\beta) + Bi J_o(\beta)]^2 + [\beta Y_1(\beta) + Bi Y_o(\beta)]^2$ $R = R_{\Phi_m}$ için $\Phi_m^+ = \Phi^+ / (1 - \Phi^+)$

Tablo 4.3. İçe doğru katılaşmada faz değişimsiz ortam için çözümler, (Dağsöz, 1974, Carslaw ve Jaeger, 1959; Poulidakos, 1994; Arpacı, 1966)

$x = 0, t > 0$ için sınır koşulu	Faz değişimsiz çözüm
Dirichlet: $T_1(r, t) = T_o$	$\Phi = 2 \sum_{n=1}^\infty \exp(-\beta_n^2 \tau) \frac{J_o(R\beta_n)}{\beta_n J_1(\beta_n)}$ $J_o(\beta_n) = 0$, $R = R_{\Phi_m}$ için $\Phi_m = (1 - \Phi) / \Phi$
Neumann: $k \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} = q_o$	$ \Phi^* = 2 q^* \left[\tau + \frac{1}{4} - \frac{R^2}{2} - 2 \sum_{n=1}^\infty \exp(-\beta_n^2 \tau) \frac{J_o(R\beta_n)}{\beta_n^2 J_o(\beta_n)} \right]$ $J_1(\beta_n) = 0$, $R = R_{\Phi_m}$ için $ \Phi_m^* = \Phi^* $
Robin: $-k \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} = h[T(r, t) - T_\infty]$	$\Phi^+ = 2Bi \sum_{n=1}^\infty \exp(-\beta_n^2 \tau) \frac{J_o(R\beta_n)}{(\beta_n^2 + Bi^2) J_o(\beta_n)}$ $\beta_n J_1(\beta_n) + Bi J_o(\beta_n) = 0$, $R = R_{\Phi_m}$ için $\Phi_m^+ = (1 - \Phi^+) / \Phi^+$

Tablo 4.4. Faz değişimli ısı iletimi için enerji eşitliği, sınır ve başlangıç koşulları

	Dışa doğru katılaşma	İçe doğru katılaşma
Katı Faz için Enerji Eşitliği: $\frac{\partial^2 T_s(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s(r,t)}{\partial r} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial T_s(r,t)}{\partial t}$	$r_0 < r < r^*, t > 0$	$0 < r < r^*, t > 0$
Sıvı Faz için Enerji Eşitliği: $\frac{\partial^2 T_l(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_l(r,t)}{\partial r} = \frac{1}{\alpha_l} \frac{\partial T_l(r,t)}{\partial t}$	$r^* < r < r_l, t > 0$	$r^* < r < r_l, t > 0$
Ara Yüzey için Enerji Eşitliği: $k_s \frac{\partial T_s(r,t)}{\partial r} - k_l \frac{\partial T_l(r,t)}{\partial r} = \rho L \frac{dr}{dt}$	$r = r^*, t > 0$	$r = r^*, t > 0$
Başlangıç Koşulu: $T_l(r,t) = T_i$	$t = 0, r_0 \leq r \leq r_l$	$t = 0, 0 \leq r \leq r_l$
Sınır Koşulu: $\frac{\partial T_l(r,t)}{\partial r} = 0$	$r = r_l, t > 0$	
Sınır Koşulu: $2 \frac{\partial^2 T_l(r,t)}{\partial r^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_l(r,t)}{\partial t}$		$r = 0, t > 0$

Tablo 4.5. Dışa doğru katılaşma sonuçlar, (Günerhan, 1998)

Sınır Koşulları	Regresyon Denklemleri	R Veri Sayısı (Adet) - R (%)
Dirichlet	$R^* = 0.884 R_{\Phi_m}^{0.661} \Phi_m^{0.068} Ste_s^{0.091} (K^+)^{0.467} (C^+)^{-1.153}$	2998x6 - 96
Neumann	$R^* = 1.325 R_{\Phi_m}^{0.866} \Phi_m^* ^{0.064} q^* ^{0.067} (Ste^*)^{0.115} (K^+)^{-2.472} (C^+)^{4.617}$	5499x7 - 96
Robin	$R^* = 1.158 R_{\Phi_m}^{0.843} (\Phi_m^+)^{0.132} Bi^{-0.001} Ste_l^{0.091} (K^+)^{-0.577} (C^+)^{0.855}$	29970x7 - 95
Sınırlar		
<u>H₂O, CaCl₂.6H₂O ve Na₂HPO₄.12H₂O için</u>		
$1.0 < R^* \leq 2.0, 0.1 \leq (\Phi_m \text{ ve } \Phi_m^+) \leq 1.0$		
$0.1 \leq (Ste_s, Ste^* \text{ ve } Ste_l) \leq 1.0, 10 \leq Bi \leq 100$		
<u>CaCl₂.6H₂O ve Na₂HPO₄.12H₂O için</u>		
$0.1 \leq \Phi_m^* \leq 0.5, 10 \leq q^* \leq 50$		
<u>H₂O için</u>		
$ \Phi_m^* = 1.0, 100 \leq q^* \leq 500$		

Tablo 4.6. İçe doğru katılma için sonuçlar, (Günerhan, 1998)

Sınır Koşulları	Regresyon Denklemleri	Veri Sayısı (Adet) - R (%)
Dirichlet	$\tau = 5.603 \tau_{\Phi_m}^{1.043} \Phi_m^{-0.412} Ste_s^{-0.649} (K^+)^{-5.512} (C^+)^{10.532}$	2698x6 - 97
Neumann	$\tau = 34.053 \tau_{\Phi_m}^{1.318} \Phi_m^* ^{-0.157} q^* ^{-0.483} (Ste^*)^{-0.603} (K^+)^{0.423} (C^+)^{-0.352}$	4949x7 - 99
Robin	$\tau = 0.465 \tau_{\Phi_m}^{1.055} (\Phi_m^+)^{-0.399} Bi^{0.029} Ste_1^{-0.652} (K^+)^{8.187} (C^+)^{-15.825}$	26971x7 - 95
Sınırlar		
$H_2O, CaCl_2.6H_2O$ ve $Na_2HPO_4.12H_2O$ için $0.0 < (R^* \text{ ve } R_{\Phi_m}) \leq 1.0, 0.1 \leq (\Phi_m \text{ ve } \Phi_m^+) \leq 1.0$ $0.1 \leq (Ste_s, Ste^* \text{ ve } Ste_1) \leq 1.0, 10 \leq Bi \leq 100$ $CaCl_2.6H_2O$ ve $Na_2HPO_4.12H_2O$ için $0.1 \leq \Phi_m^* \leq 0.5, 10 \leq q^* \leq 50$ H_2O için $ \Phi_m^* = 1.0, 100 \leq q^* \leq 500$		

5. SONUÇ

Katılma problemlerinde, katılma süresi veya katılma kalınlığının değişimi, bilinmesi gerekli olan en önemli parametreyi oluşturmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, analitik çözümleri bilinen kartezyen ve silindirik geometrideki ısı iletimi problemlerinin sonuçlarını kullanarak aynı geometri ve koşullara sahip faz değişimli ısı iletimi problemlerinin sonuçlarına belirli bir hassasiyetle ulaşabileceğini göstermektir. Faz değişimli problem ile faz değişimsiz problem arasında bulunan ilişkilere ait korelasyon katsayıları, 0.95 ile 1.00 arasında değişmektedir. Bu sonuç, yapılan çoklu regresyon analizleri sonucunda istatistik açıdan anlamlı ilişkiler elde edildiğini göstermektedir.

Tablo 3.5, 3.6, 4.5 ve 4.6; bu çalışma sonucu bulunan korelasyon ve regresyon katsayılarını içermektedir. Elde edilen korelasyonlarla, çözümü bilinen veya basit olarak elde edilebilecek ısı iletim problemlerinden karmaşık yöntemler gerektiren faz değişim problemlerinin çözümlerine ulaşılması sağlanmıştır. Bu çalışma sonucu elde edilen denklemler yardımıyla, faz değişim problemlerine ait katılma süresi veya katılma kalınlığı ile ilgili bilgilere, faz değişimli problemleri çözmeden – belirli bir hata oranı altında- ulaşılabilir olacaktır.

KAYNAKLAR

- Arpacı, V.S., *Conduction Heat Transfer*, Addison-Wesley Pub. Company, 1966.
- Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C., *Conduction of Heat in Solids*, Oxford Clarendon Press, 1959.
- Dağsöz, A.K., *Isı Geçişi, Cilt 1, Isı İletimi*, İTÜ Kütüphanesi, Sayı:978, İstanbul, 1974.
- Fukusako, S. and Seki, N., Fundamental aspects of analytical and numerical methods on freezing and melting heat-transfer problems, *Annual Review of Numerical Fluid Mechanics and Heat Transfer*, Vol.1, 351-402, 1987.
- Günerhan, H., Faz Değişimli ve Değişimsiz Isı İletim Problemlerinin Sonuçları Arasındaki İlişkiler Üzerine Bir Araştırma, *Doktora Tezi*, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bornova, İzmir, 1998.
- Hale, D.V., Hoover, M.J. and O'Neill, M.J., *Phase Change Materials Handbook*, NASA Contractor Report, NASA CR-61363, 1971.
- Hoffman, J.D., *Numerical Methods for Engineers and Scientists*, McGraw-Hill Inc., 1993.
- Ilken, Z., Computational Heat Transfer and Fluid Flow, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik

Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, *Basılmamış Ders Notları*, İzmir, 1993.

Ilken, Z. and Gunerhan, H., An investigation about the relations between the results of heat conduction problems with and without phase change, *Int. Comm. in Heat and Mass Transfer*, Volume 23, Number 6, 899-905, October 1996.

Ilken, Z. and Gunerhan, H., The relations between the results of cylindrical heat conduction problems with and without phase change, *MEGASTOCK'97, 7th International Conference on Thermal Energy Storage Proceedings*, Volume 1, Hokkaido University, Sapporo, Japan, pp.331-336, June 18-21, 1997.

Incropera, F.P. and DeWitt, D.P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (Third Edition), John Wiley & Sons, 1990.

Ilken, Z., Silindir çevresinde katılaşma problemlerinin farklı sınır koşulları için çözümü, *TIBTD, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, Cilt 14, Sayı 3, 10-14, Ankara, Eylül 1991.

Kakaç, S., Paykoç, E. and Yener, Y., Storage of solar thermal energy, *Energy Storage Systems*, Edited by Birol Kılıç & Sadık Kakaç, NATO ASI Series, Series E: Applied Sciences, Vol. 167, Kluwer Academic Publishers, pp.129-161, 1989.

Lunardini, V.J., *Heat Transfer in Cold Climates*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1981.

Mills, A.F., *Heat and Mass Transfer*, Richard D. Irwin Inc., 1995.

Özişik, M.N., *Heat Conduction* (Second Edition), John Wiley & Sons Inc., 1993.

Poulikakos, D., *Conduction Heat Transfer*, Prentice Hall, 1994.

Rohsenow, W.M., Hartnett, J.P. and Cho, Y.I., *Handbook of Heat Transfer* (Third Edition), McGraw-Hill Company, 1998.

Samarskii, A.A., Vabishchevich, P.N., Iliev, O.P. and Churbanov, A.G., Numerical simulation of convection/diffusion phase change problems-A review, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.36, No.17, 4095-4106, 1993.

Voller, V.R. and Cross, M., Accurate solutions of moving boundary problems using the enthalpy method, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.24, 545-556, 1981.

Voller, V.R. and Cross, M., An explicit numerical method to track a moving phase change front, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.26, No.1, 147-150, 1983.

Voller, V.R., Swaminathan, C.R. and Thomas, B.G., Fixed grid techniques for phase change problems:A review, *Int. J. Numer. Methods Engng.*, Vol.30, No.4, 875-898, 1990.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, "Faz Değişimli ve Değişimsiz Isı İletim Problemlerinin Sonuçları Arasındaki İlişkiler Üzerine Bir Araştırma" isimli doktora tezinin bir özetidir. Doktora tezi olarak "faz değişimli ısı transferi" konusunu öneren, düzenli bir çalışma ortamı oluşturarak ısı transferini ve bilimsel çalışma yöntemlerini sevdiren, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makina Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Prof.Dr.Zafer İLKEN'e teşekkür ederim.



Hüseyin GÜNERHAN

3.04.1966 tarihinde Urla-İzmir'de doğdu. 1983 yılında İzmir Atatürk Lisesini bitirdi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünü (Termodinamik-Enerji) 31.01.1990 tarihinde, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü Enerji Teknolojisi Anabilim Dalında yaptığı yüksek lisans öğrenimini 03.08.1992 tarihinde ve Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Güneş Enerjisi Anabilim Dalında yaptığı doktora öğrenimini 11.01.1999 tarihinde tamamladı. 23.01.1991-21.08.2001 tarihleri arasında, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü Enerji Teknolojisi Anabilim Dalında öğretim elemanı görevi ve araştırma görevlisi ünvanı ile çalıştı. 15.03.2001 tarihinden beri Ege Üniversitesi Bilim-Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (EBİLTEM)- Enerji Verimliliği ve Yönetimi Ar-Ge Biriminde (EVYAB) kurucu üye olarak çalışmaktadır. 22.08.2001 tarihinde Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim Dalında öğretim üyesi görevi ve yardımcı doçent doktor ünvanı ile çalışmaya başlamıştır. İngilizce bilmektedir.