

# TİPİK BİR ISI DEĞİŞTİRİCİDE CaCO<sub>3</sub> KİRLENMESİNİN SAYISAL ISIL ANALİZİ

Uygar TAŞKIRAN, L. Berrin ERBAY\*

*Bu çalışmada, kirlenmenin ısı değiştirici akış kanallarında oluşumu ve etkileri araştırılmıştır. Isı değiştirici yüzeylerinde görülen kirlenme, iki-fazlı (katı-sıvı) akış olarak ele alınıp sayısal olarak incelenmektedir. Probleme kirlenme modeli tanımlanmış ve zamana bağlı silindirik koordinatlarda iki faz için yazılan yönetici denklemler sonlu eleman yönteminin kullanıldığı bir yazılım paketi ile çözülmüştür. Yapılan çalışma sonunda, ısı değiştirici yüzeyinde oluşan kirlenme oranının, akışkan içindeki katı parçacık miktarına, akışın yönüne ve akışkan hızına bağlı olarak değiştiği bulunmuştur. Sonuçlar, kirlenme probleminden bekleneneği gibi, ısı transferine karşı artan direnç nedeniyle akışkana aktarılan ısının ve akışkanın ortalama sıcaklığının düşmesine neden olduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen bulguların teorik ve uygulamalı araştırmalarda kullanılabileceği düşünülmektedir.*

**Anahtar sözcükler:** Yatay Borulu Isı Değiştirici, İki Fazlı Akış, CaCO<sub>3</sub> Kirlenmesi, Sayısal Isı Taşınımı, Sayısal Hesaplamalı, Akışkanlar Mekaniği

*In this study, particle deposition (fouling) on tube heat exchanger surfaces and fouling effects have investigated and the parameters which affecting fouling has been studied. Particle deposition (fouling) on heat exchanger surfaces which has been identified as two-phase flow (solid-fluid) has been numerically simulated. Fouling model has been described and governing equations for two phase flow has been solved by a commercial software program. As a conclusion, it was obtained that fouling affects heat transfer due to the increase in thermal resistance of interface between the fluid and tube wall. Parameters of fluid velocity, flow direction and the amount of solid particles have strong effects on fouling. Results have exposed that, average fluid temperature and heat transfer rate has been reduced by fouling as expected. The meseritical channels with respect to fouling have been determined. This study includes important points for both theoretical and practical investigations.*

**Keywords:** Horizontal – Tube Heat Exchanger, Two Phase Flow, CaCO<sub>3</sub> Fouling, Numerical Convective Heat Transfer, Computational Fluid Dynamics (CFD)

\* Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi

## GİRİŞ

**K**irlenme; istenmeyen yabancı maddelerin çeşitli sebeplerle, ısı değiştirici yüzeylerinde birikmesiyle oluşan tabaka ya da tortu olarak tanımlanır. Isı değiştiricileri akışkanlarında bulunan, çözünmemiş ya da süspansiyon halindeki katı parçacıklar, ısı değiştirici yüzeylerinde birikerek ısı değiştiricilerinin kirlenmesine neden olurlar. Bu kirlenmeler, ticari ve endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahip olan ısı değiştiricilerinde ciddi sorunlar doğuran önemli bir problem haline gelmektedir. Kirlenme ile ısı değiştirici yüzeyinde meydana gelen katı tabaka, ısı aktarımına direnç oluşturarak toplam ısı transfer katsayısının düşmesine, sistemin basınç düşüşünün artmasına, dolayısıyla sistemin kapasitesinin ve etkinliğinin düşmesine neden olur. Ayrıca havalandırma sistemlerinde kullanılan ısı değiştiricilerinin kirlenmesi, üretilen temiz hava kalitesinin düşmesine neden olur.

Farklı kirlenme türlerinin, mekanizmalarının ve yürütücü kuvvetlerinin tamamen farklı olmasına rağmen kirlenme, ağırlıklı olarak, fazların ayrılması yani; bir akışkandan (gaz veya sıvı) katı fazın veya yoğunlaşmış fazın ayrılması prensibine dayanır. Karmaşık kirlenme problemleri genellikle, farklı kirlenme türlerinin birlikte oluşmasının sonucu olarak ortaya çıkar. Bu problemlerin çözülebilmesi için fazların birbirleri ile etkileşimini ve olayın mekanizmasını anlamak gerekir. Endüstriyel işlemlerde oluşan kirlenmenin modellenmesi için yapılacak ilk ve en önemli çalışma, sistemde oluşan kirlenmenin mekanizmasını anlamaktır [1,2]. Kirlenme türleri; çökme, kristalleşme, kimyasal tepkime, korozyon ve biyolojik kirlenme şeklinde sıralanabilir. Bu kirlenme türlerinin iki veya daha fazlasının, sistemde bir arada oluşması durumunda görülen kirlenme türü, birleşik kirlenmedir. En sık karşılaşılan kirlenme türü ise, çökme kirlenmesi, kristalleşme kirlenmesi ve kimyasal tepkime kirlenmesinin birlikte görüldüğü birleşik kirlenme türüdür. Isı değiştiricilerinde kullanılan soğutma suları çözünmüş kalsiyum ve magnezyum tuzlarını içerebilirler. Bu tuzlar çoğunlukla bikarbonatlar, klorürler ve sülfatlar halinde bulunurlar ve çözünmeyen çökeltiler meydana getirirler. Bikarbonat içeren sularda kimyasal reaksiyon ile CaCO<sub>3</sub> oluşur. Bu bileşik ısı değiştirici yüzeylerinde birikerek Şekil 1'de görüldüğü gibi ısı geçirgenliği düşük ve oluştuğu sistemlerde tıkanmalara sebep olan kabuk oluşturur[2]. Bikarbonat içeren soğutma

sularının sıcaklığı 60°C'ı aştığı takdirde; aşağıdaki (1) nolu denklikte gösterilen tepkime meydana gelir [3].

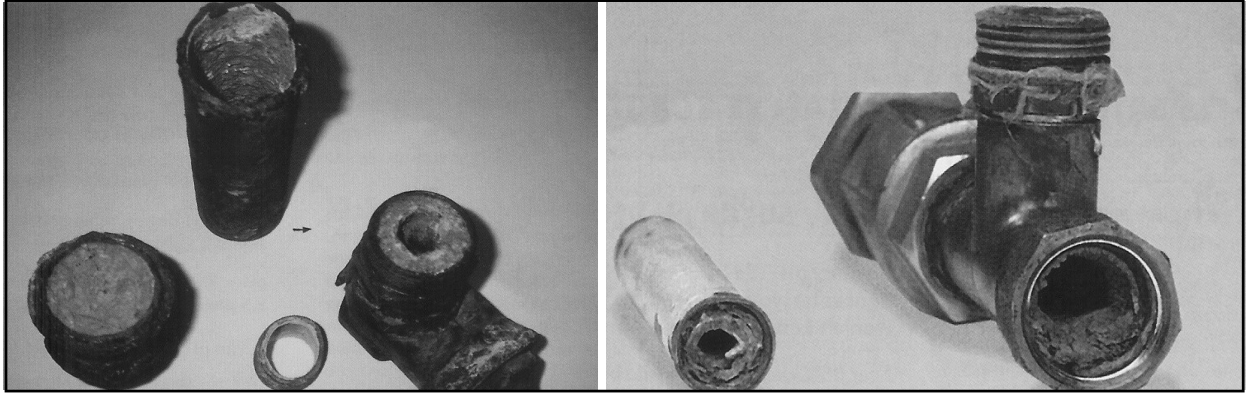


Burada kimyasal reaksiyon ile oluşan  $\text{CaCO}_3$ , yüksek cidar sıcaklığı sebebiyle kristalleşir ve suda süspansiyon halinde bulunan katı parçacıklar ile birlikte ısı değiştirici yüzeylerine çökerek tortu oluşturur. Dolayısıyla, incelenen kirlenme türü, soğutma sistemlerinde sıkça görülen, kimyasal tepkime, kristalleşme ve çökeltme kirlenmelerinin bir arada görüldüğü birleşik kirlenme mekanizmasıdır.

Bu çalışmada modelleme; problemin tanımlanması, matematik modelin oluşturulması, geometrinin belirlenmesi ve çözüm düzleminin oluşturulması, matematik modelin oluşturulması, simülasyon, sonuçlarının değerlendirilmesi aşamalarında oluşturulmuştur.

2'de gösterilen endüstride yaygın olarak kullanılan bir ısı değiştirici geometrisi temel alınmıştır. Tasarlanan ısı değiştiricinin boyutları Tablo 1'de verilmiştir.

Tasarlanan ısı değiştirici geometrisi üzerindeki düğüm noktaları, 0,005 m düğüm noktası aralığı ile oluşturulmuştur. Daha küçük düğüm noktası aralıkları, düğüm noktalarının oluşturulabilmesi ve problemin çözümü için çok fazla zaman ve çok yüksek bilgisayar kapasitesi gerektirmektedir. Matematik model, kütle ve enerjinin korunumu yasalarını içeren diferansiyel denklemleri kapsar. Bu denklemlerin çözümü tasarım parametrelerinin davranış ve karakteristiğini ortaya koyar [4]. Matematik model,  $D_{b,i} = 0,02m$  iç çapındaki boruya sabit  $V_g$  giriş hızı ile giren soğuk akışkanın boru cidarından  $q''_0 = \text{sabit}$  ısı akışı ile ısıtılması problemi şeklinde tanımlanmıştır.



Şekil 1. Tesisat Elemanlarında Oluşan  $\text{CaCO}_3$  Kirlenmesi [3]

## PROBLEMİN TANIMLANMASI VE MODELLENMESİ

Endüstriyel uygulamalarda çok yaygın olarak kullanılan ısı değiştiricilerinde görülen kirlenmenin, sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı bir yazılım ile modellenmesi ve kirlenmenin ısı değiştirici üzerindeki etkileri, çözümü aranan problemidir. Kirlenme,  $\text{CaCO}_3$  parçacıklarının ısı değiştirici yüzeyinde birikmesi olarak tanımlanmış ve yazılımın çok fazlı akış seçeneği kullanılarak modellenmiştir. Isı değiştirici modeli tasarımında, Şekil

## Çok Fazlı Akış İçin Korunum Denklemleri

Çok fazlı akış problemlerinin çözümünde, bilinen korunum denklemlerinden başka fazların birbirleri ile etkileşimlerinin tanımlandığı, fazlar arası değişim katsayılarını içeren korunum denklemlerinin de çözülmesi gerekmektedir.

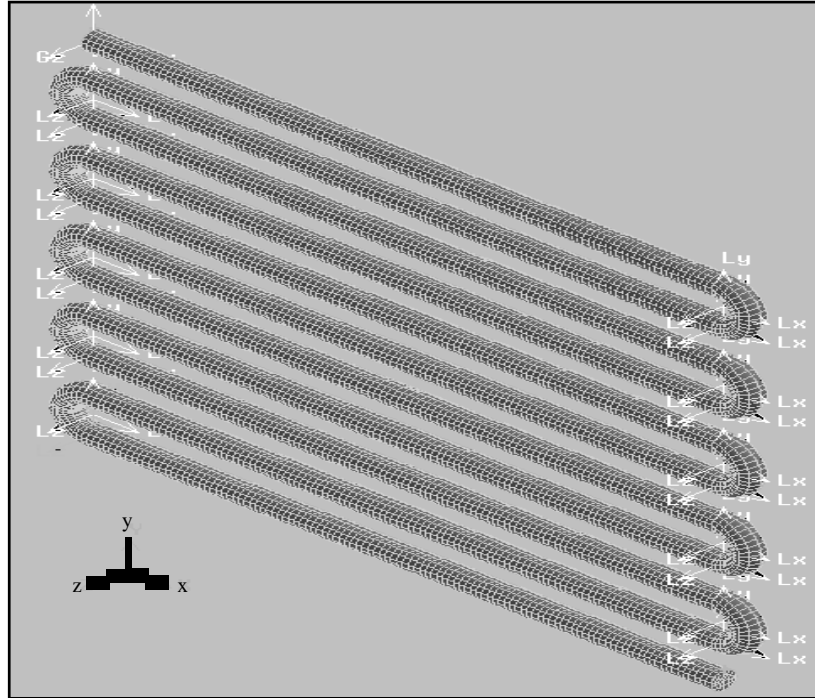
### Hacim Kesri

Bir faz için hacim kesri, fazın sistemde işgal ettiği hacmi temsil etmektedir.  $q$  fazının hacmi  $V_q$ ; denklem 2'de verildiği gibi yazılır [5].

$$V_q = \int \alpha_q dV \quad (2)$$

**Tablo 1. Tasarımda Dikkate Alınan Isı Değiştirici Boyutları**

Boru iç çapı	$D_{b,i}$	0,02 m
Boru dış çapı	$D_{b,d}$	0,024 m
Boru uzunluğu	$L_b$	0,5 m
Boru et kalınlığı	$(D_{b,d} - D_{b,i})/2$	0,002 m
Dirsek iç yarıçapı	$r_{d,i}$	0,01 m
Dirsek dış yarıçapı	$r_{d,d}$	0,03 m
Toplam boru uzunluğu	$\Sigma L_b$	5,50 m
Toplam dirsek uzunluğu	$\Sigma L_d$	0,314 m
Toplam ısı değiştirici boru uzunluğu	$\Sigma L$	5,814 m
Toplam ısı değiştirici hacmi	$\Sigma V$	$1,827 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$



**Şekil 2. Tasarlanan Isı Değiştiricinin İzometrik Görünüşü**

### Süreklilik Denklemi

$q$  fazı için süreklilik denklemi aşağıdaki eşitlik [3] ile tanımlanabilir [5];

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q) + \nabla(\alpha_q \vec{v}_q) = \frac{1}{\rho_q} \left( \sum_{p=1}^n \dot{m}_{pq} - \alpha_q \frac{d_q \rho_q}{dt} \right) \quad (3)$$

Burada  $\vec{v}_q$ ,  $q$  fazının hızıdır ve  $\dot{m}_{pq}$ ,  $p$  fazından  $q$  fazına transfer olan kütleyi temsil eder.

### Momentum Korunumu

Sıvı faz için momentum korunumu aşağıdaki denklem (4) ile verilebilir [5];

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \bar{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \bar{v}_q \bar{v}_q) = \\ -\alpha_q \nabla P - \nabla \cdot \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \bar{g} + \alpha_q \rho_q \bar{F}_q + \\ \sum_{p=1}^n (K_{pq} (\bar{v}_p - \bar{v}_q) + \dot{m}_{pq} \bar{v}_{pq}) \end{aligned} \quad (4)$$

Burada  $\bar{\tau}_q$ , fazının kayma gerilimi tensörüdür,  $K_{pq}$  ( $= K_{qp}$ )  $p$  sıvı fazı ile  $q$  katı fazı fazlar arası momentum değişim katsayısını,  $n$  toplam faz sayısını belirtir.  $\bar{v}_{pq}$  ise fazlar arasındaki hız vektörüdür.

### Enerji Korunumu

Eulerian çok fazlı akış uygulamalarında enerji korunumu, entalpi denkleminin her faz için yazılması ile tanımlanabilir.  $q$  fazı için entalpi değişimi denklem (5) ile;

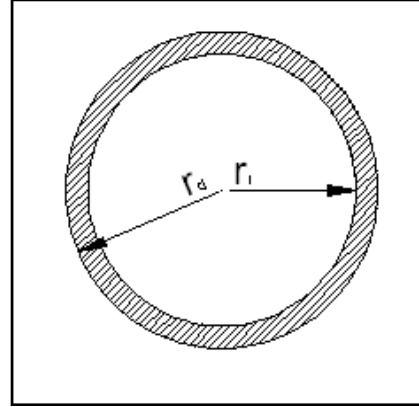
$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q h_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \bar{u}_q h_q) = \\ -\alpha_q \frac{\partial P}{\partial t} + \bar{\tau}_q : \nabla \bar{u}_q - \nabla \bar{q}_q + \\ S_q + \sum_{p=1}^n (\bar{Q}_{pq} + \dot{m}_{pq} h_{pq}) \end{aligned} \quad (5)$$

şeklinde yazılır [5].  $S_q$  kaynak terimini (kimyasal tepkime veya radyasyondan kaynaklanan entalpi üretimini içerir),  $Q_{pd}$ ,  $p$  fazı ile  $q$  fazı arasındaki ısı değişim miktarını,  $h_{pd}$  fazlar arası entalpi değerini belirtmektedir. Fazlar arasındaki ısı değişim bağıntıları

ise  $Q_{pd} = -Q_{qp}$  ve  $Q_{qq} = 0$  olarak verilir.

### Sınır Koşullarının Belirtilmesi

Tanımlanan problemde akış ve ısı geçişi söz konusu olduğu için sistemi oluşturan yüzeylerde hem hız hem de sıcaklık koşullarının tanımlanması gerekmektedir (Tablo 2).



Şekil 3. Isı Değiştirici Borusunun Dairesel Kesiti

Sabit ısı akışı sınır koşulu ile taşınım sınır koşullarının  $r=r_i$  konumunda ortak çözümleri vardır; dolayısıyla belirtilen sınır için iletim taşınımına eşit olduğu yazılabilir.

### Sayısal Modelleme ve Simülasyon

Akışkanın (su), Şekil 2'de görülen ısı değiştiriciye iki farklı şekilde girdiği düşünülecektir. Akışkanın; ısı değiştiricinin üst girişinden, pozitif x eksen yönünde sabit  $V_g$  giriş hızı ile (üst giriş), ısı değiştiricinin alt girişinden, negatif x eksen yönünde sabit  $V_g$  giriş hızı ile (alt giriş) sisteme girdiği düşünülecektir. Sayısal simülasyonda kullanılan akışkan giriş hızı ve  $\text{CaCO}_3$  oluşum değerleri

Tablo 2. Simülasyonda Kullanılan  $V_g$  Giriş Hızı ve  $\text{CaCO}_3$  Oluşum Değerleri

Sınırdaki hız koşulu	$r = r_i$ için	$u = v = w = 0$
Yüzeyde sabit ısı akışı koşulu	$r_d \geq r \geq r_i$ için	$q_0'' = -k(\partial T / \partial r)_{r_d}$
Taşınım sınır koşulu	$r = r_i$ için	$q_0'' = h_{r_i}(T_r - T_a)$
İletim = Taşınım	$r = r_i$ için	$q_0'' = -k(\partial T / \partial r)_{r_d} = h_{r_i}(T_r - T_a)$

Tablo 3'te verilmiştir. Problemdede, ısı değiştirici borularının yüzeyinde tanımlanan sabit ısı akısı  $q_0'' = 15kW$  olarak belirlenmiştir. Modellenen problemde; ısı değiştirici malzemesi olarak bakır (Cu), Soğutma akışkanı olarak su (H<sub>2</sub>O), ısı değiştirici yüzeylerinde biriken madde olarak kalsiyum karbonat (CaCO<sub>3</sub>) kullanılmıştır.

ettiği hacmi temsil etmektedir. Şekil 4'te, sistemde oluşan CaCO<sub>3</sub> miktarının artması ile ısı değiştirici içindeki birikimin arttığı gözlenmektedir. Bu artış beklenen bir sonuçtur; daha fazla katı fazın bulunması, doğal olarak sistemdeki CaCO<sub>3</sub> birikimini artıracaktır. Şekil 4, suyun ısı değiştiricinin alt girişinden girmesi durumunda sistemde

**Tablo 3.** Simülasyonda Kullanılan  $V_g$  Giriş Hızı ve CaCO<sub>3</sub> Oluşum Değerleri

Alt ve üst giriş için $V_g$ giriş hızı (m/sn)									
0,010	0,025	0,050	0,075	0,10	0,25	0,50	1	5	10
CaCO <sub>3</sub> oluşumu (kg/m <sup>3</sup> .sn)									
0	50	100	150	200	250	500	1000		

### BULGULAR VE YORUMLAR

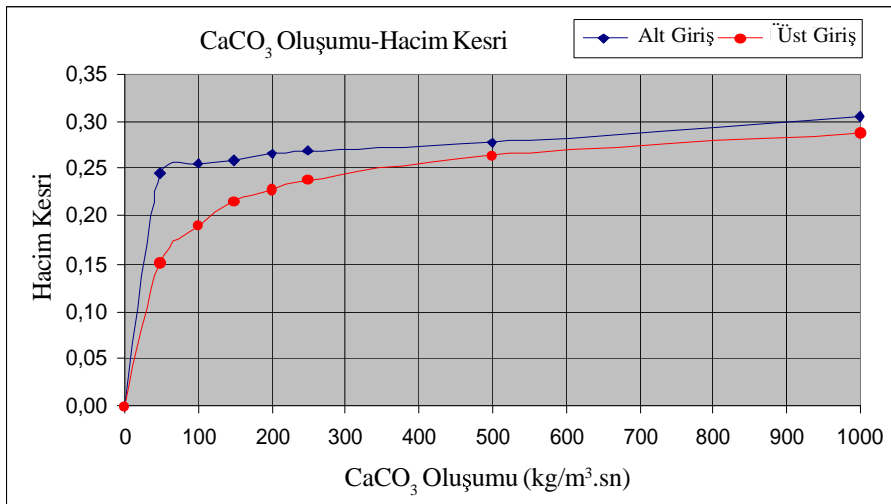
Soğuk akışkanın, ısı değiştiriciye giriş konumuna bağlı olarak alt ve üst girişleri için elde edilen sonuçlar, ısı değiştirici hacmi boyunca integre edilerek hacim ağırlıklı ortalamalar olarak hesaplanmıştır. Hacim ağırlıklı ortalamaların hesaplanması için kullanılan bağıntı;

$$\frac{1}{V} \int \phi dV = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n \phi_i |V_i| \quad (6)$$

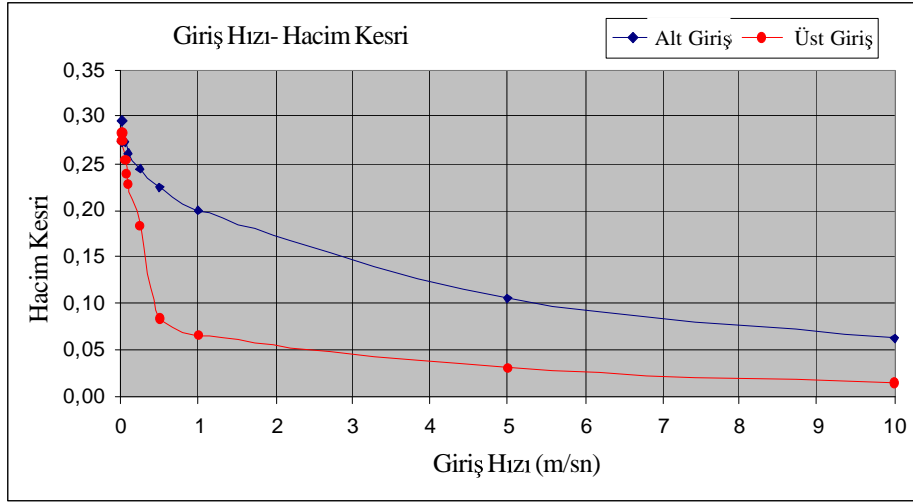
şeklinde tanımlanabilir. Burada  $\phi$ , V hacmi boyunca ortalaması hesaplanan fonksiyondur. Isı değiştirici borularında biriken CaCO<sub>3</sub> miktarı hacim kesri olarak verilmiştir. Bir faz için hacim kesri, fazın sistemde işgal

biriken CaCO<sub>3</sub> miktarının, suyun üstten girmesi durumunda sistemde biriken CaCO<sub>3</sub> miktarına göre daha fazla olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, üst giriş durumunda CaCO<sub>3</sub> parçacıklarının, sürüklenme kuvvetinin ve yerçekimi ivmesinin etkisi altında akışkan ile birlikte hareket ederek taşınmasına bağlanmaktadır.

Su giriş hızının artması ile sistemdeki parçacık birikiminin, yani kirlenmenin azaldığı Şekil 5'de gösterilmektedir. Suyun ısı değiştirici içinde yüksek hızla akması, CaCO<sub>3</sub> parçacıklarının çökmesini engellediği gibi yüksek hız nedeniyle oluşan türbülans, ısı değiştirici yüzeyine çökmüş olan CaCO<sub>3</sub> parçacıklarını tekrar kaldırıp ısı değiştirici dışına taşınmasına, yani sistem içindeki CaCO<sub>3</sub> birikiminin azalmasına neden olur.



**Şekil 4.** Üst ve Alt Giriş İçin CaCO<sub>3</sub> Oluşumu – Hacim Kesri Grafiği

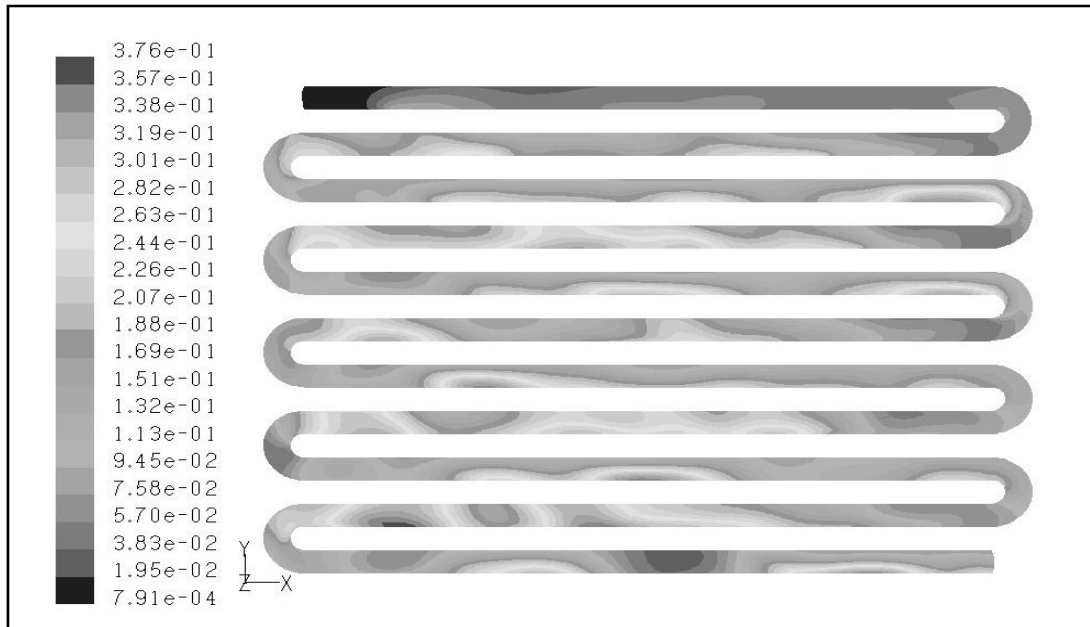


Şekil 5. Üst ve Alt Giriş İçin Giriş Hızı – Hacim Kesri Grafiği

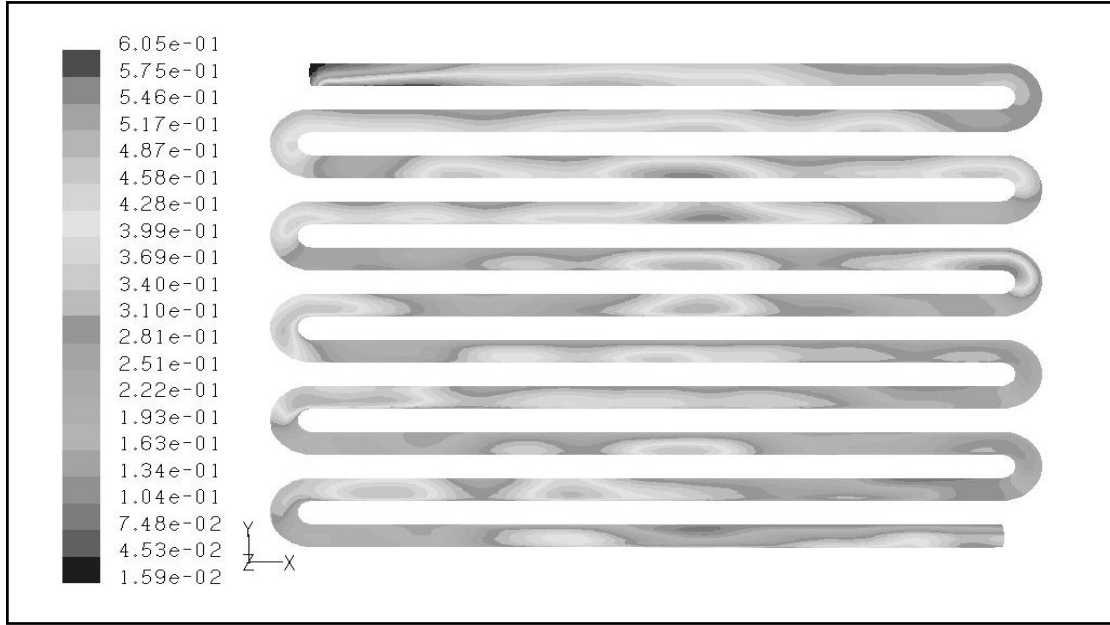
Şekil 6 - 9 ile üst giriş için verilen simülasyon sonuçları, kirlenmenin genellikle ısı değiştiricinin belirli bölgelerinde; dirsek girişlerinde ve boruların orta bölümlerinde yoğunlaştığını,  $\text{CaCO}_3$  oluşumunun artması ile parçacık birikiminin de arttığını ortaya koymaktadır. Parçacık birikiminin (kirlenmenin) bu bölgelerde yoğunlaşması, farklı kirlenme mekanizmalarının etkilerine bağlı olarak açıklanabilir [7-15]. Isı değiştirici içindeki  $\text{CaCO}_3$

birikiminin artması, ısı değiştirici iç çapının daralmasına, akışkan akışının engellenmesine, sistemin basınç düşüsünün artmasına ve ısı değiştirici içinde akışın devamlılığının sağlanabilmesi için daha büyük pompa gücüne ihtiyaç duyulmasına neden olacaktır.

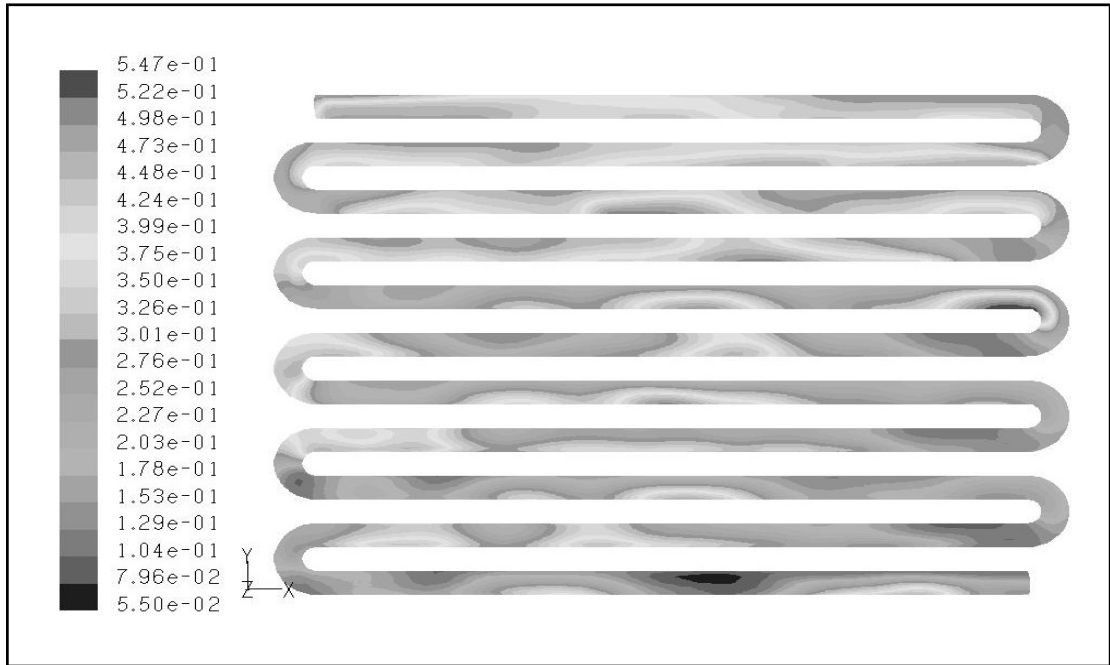
Şekil 8 ve 9 ile verilen simülasyon sonuçları, akışkanın ısı değiştiriciye giriş hızının, ısı değiştirici içindeki parçacık birikimine etkisini göstermektedir. Kirlenmenin yoğun



Şekil 6. Üst Giriş İçin  $V_g = 0,1 \frac{m}{sn}$  ve  $\text{CaCO}_3$  Oluşumunun  $50 \text{ kg/m}^3\text{sn}$  Olması Durumunda Isı Değiştiricide Görülen  $\text{CaCO}_3$  Birikimi



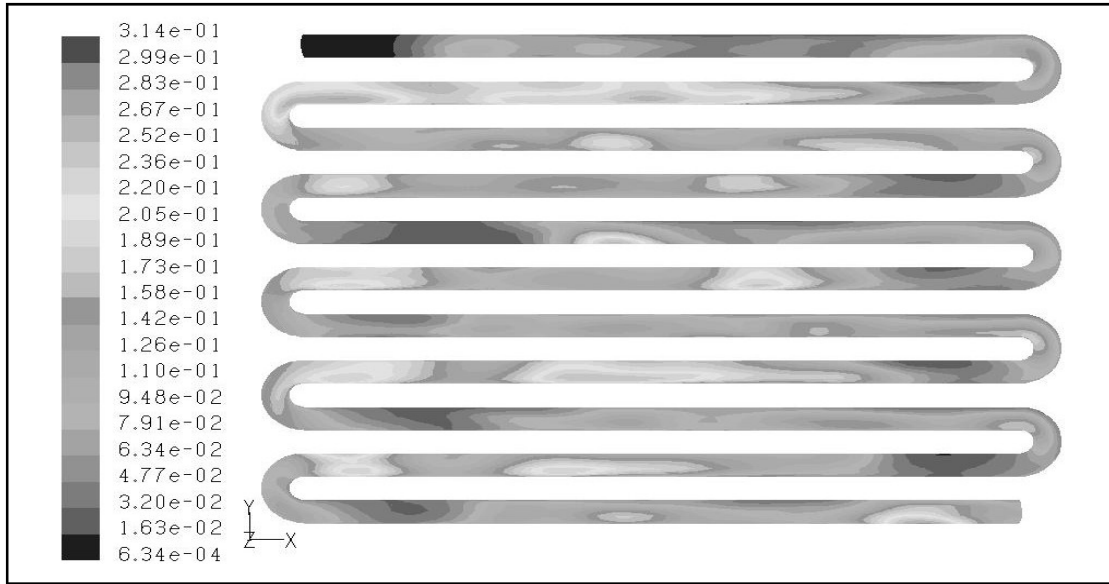
**Şekil 7.** Üst Giriş İçin  $V_g=0,1$  m/sn ve  $\text{CaCO}_3$  Oluşumunun  $1000 \text{ kg/m}^3\text{sn}$  Olması Durumunda Isı Değiştiricide Görülen  $\text{CaCO}_3$  birikimi



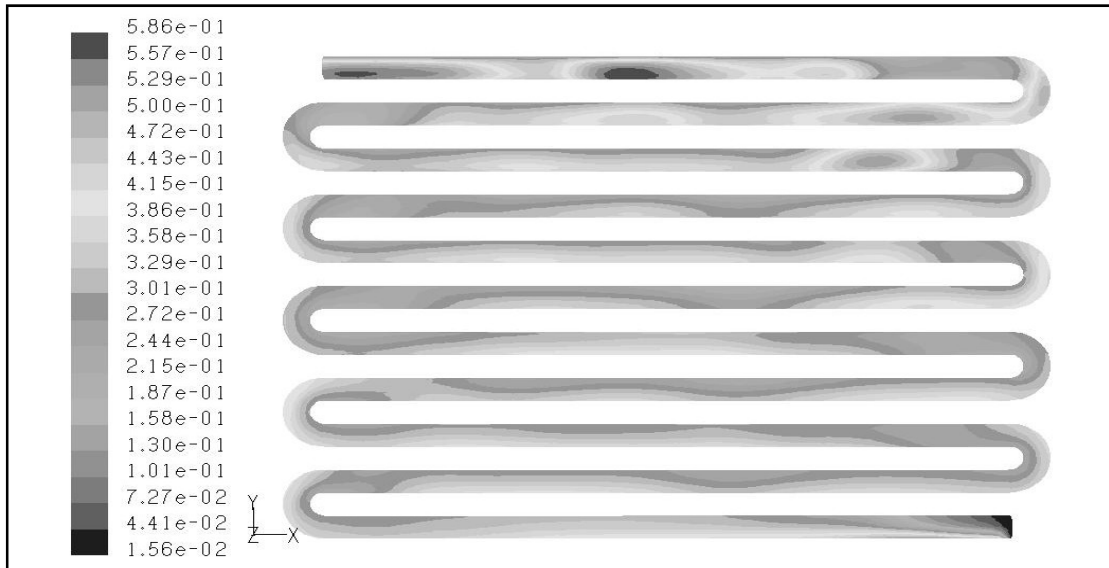
**Şekil 8.** Üst Giriş İçin  $V_g=0,1$  m/sn ve  $\text{CaCO}_3$  Oluşumunun  $200 \text{ kg/m}^3\text{sn}$  Olması Durumunda Isı Değiştiricide Görülen  $\text{CaCO}_3$  Birikimi

olduğu bölgeler değişmemekle birlikte, akışkanın giriş hızın artması parçacık birikimini, dolayısıyla kirlenmeyi azaltmaktadır. Akışkan hızının artması,  $\text{CaCO}_3$  parçacıklarının akışkan ile birlikte ısı değiştirici dışına sürüklenmesine neden olmaktadır. Şekil 10 – 11 alt giriş için simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Alt giriş durumunda, akışın sağlanabilmesi için ısı değiştirici giriş ve çıkışı arasına uygulanan yüksek basınç farkı nedeniyle üst borulara taşınan  $\text{CaCO}_3$  parçacıkları bu borularda

birikerek, üst boruların alt borulara göre daha çok kirlenmesine neden olmaktadır. Alt giriş durumunda kirlenmenin, üst girişte de olduğu gibi yine dirseklerin etrafında ve yatay boruların orta kısımlarında yoğunlaştığı görülmektedir. Ancak alt giriş durumunda gözlenen kirlenmenin üst giriş kirlenmesinden farkı, üst borular dahil edilmemek şartıyla, kirlenmenin tüm borularda hemen hemen eşit olarak dağılmasıdır (Şekil 10 ve 11).



**Şekil 9.** Üst Giriş İçin  $V_g=0,5$  m/sn ve  $\text{CaCO}_3$  Oluşumunun  $200$   $\text{kg/m}^3\text{sn}$  Olması Durumunda Isı Değiştiricide Görülen  $\text{CaCO}_3$  Birikimi

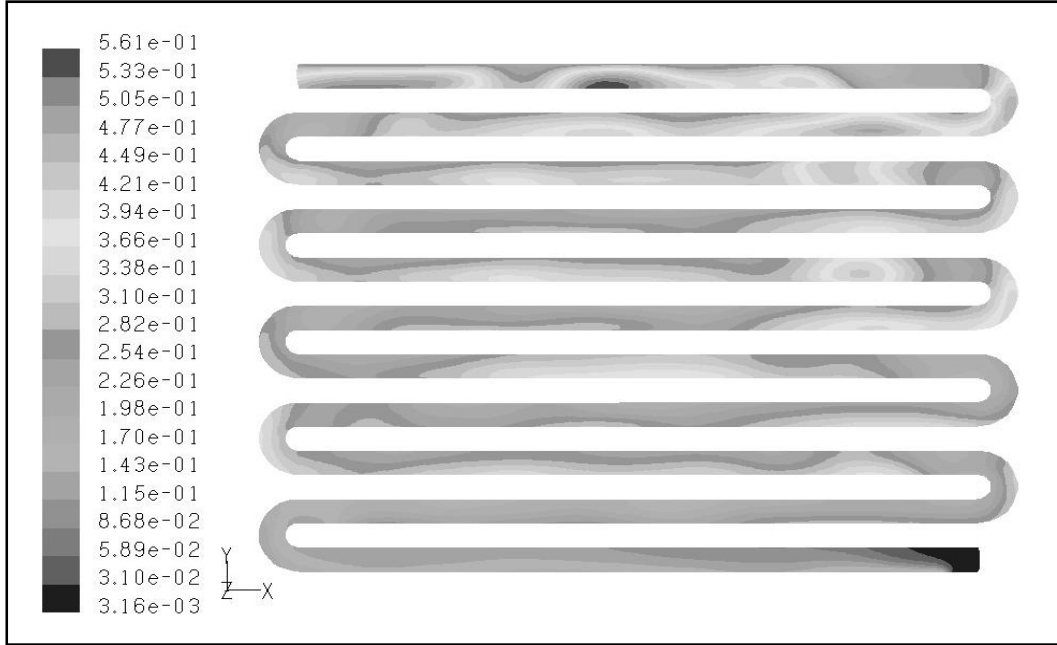


**Şekil 10.** Alt Giriş İçin  $V_g=0,1$  m/sn ve  $\text{CaCO}_3$  Oluşumunun  $1000$   $\text{kg/m}^3\text{sn}$  Olması Durumunda Isı Değiştiricide Görülen  $\text{CaCO}_3$  Birikimi

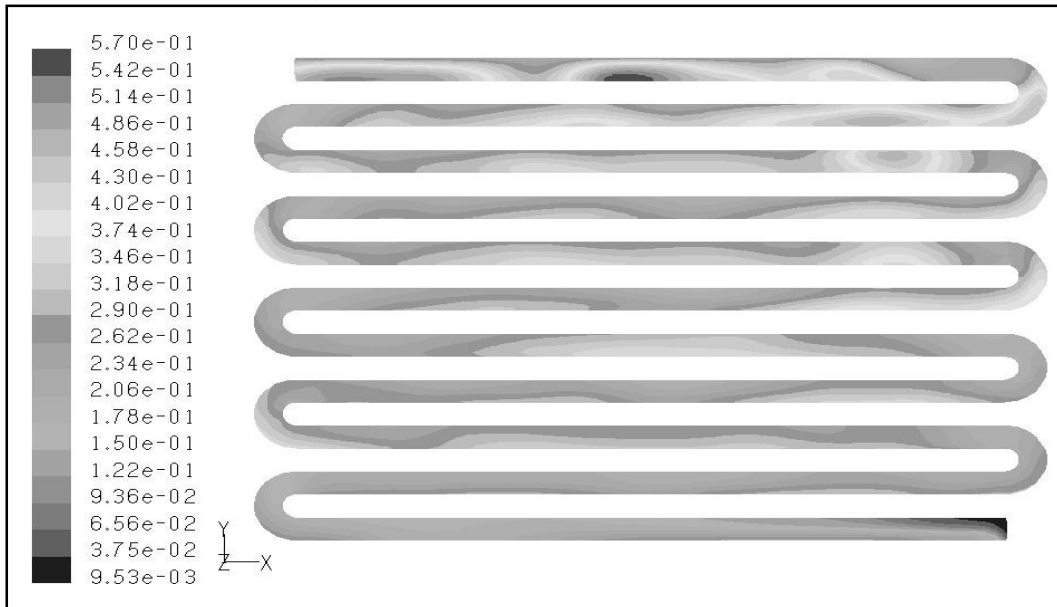


Şekil 13'te,  $\text{CaCO}_3$  oluşum değerlerinin artışı ile düşey ekseninde, akışkanın ortalama sıcaklığının azaldığını gösteren grafik yer almaktadır.  $\text{CaCO}_3$  oluşumu ile ısı değiştirici yüzeyindeki birikimin artması, toplam ısı aktarım direncinin artmasına, dolayısıyla akışkana aktarılan ısı miktarının azalmasına neden olmaktadır. Isı

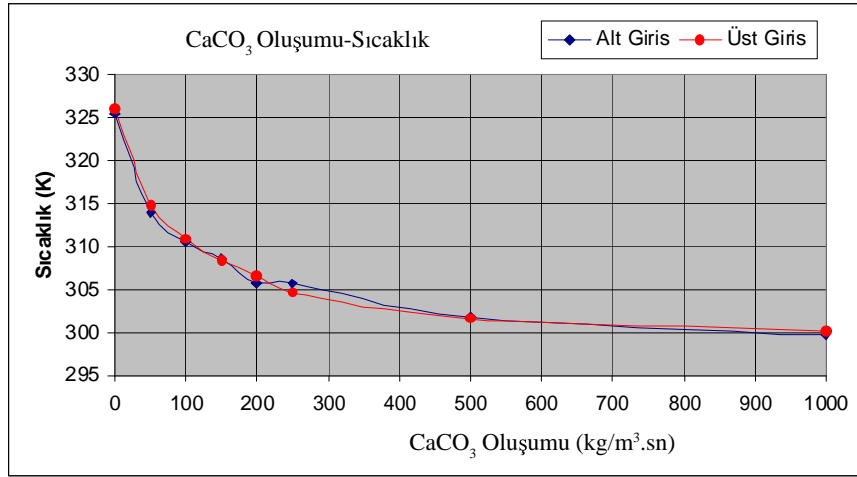
değiştirici içinde  $\text{CaCO}_3$  birikiminin artması, ısı değiştiricinin iç yüzey alanının ve ısı aktarım yüzeyinin küçülmesine dolayısıyla akışkana aktarılan ısı azalmasına neden olacaktır.  $\text{CaCO}_3$  birikiminin, ısı aktarımına karşı oluşturduğu direnç dolayısıyla toplam ısı aktarım katsayısını düşüreceği dikkate alınır, yüksek



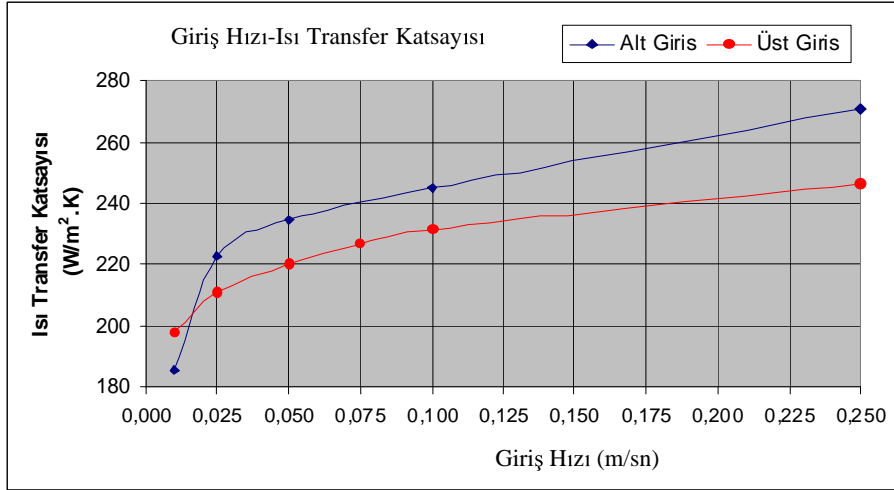
Şekil 11. Alt Giriş İçin  $V_g=0,1$  m/sn ve  $\text{CaCO}_3$  Oluşumunun  $200 \text{ kg/m}^3\text{sn}$  Olması Durumunda Isı Değiştiricide Görülen  $\text{CaCO}_3$  Birikimi



Şekil 12. Alt Giriş İçin  $V_g=0,05$  m/sn ve  $\text{CaCO}_3$  Oluşumunun  $200 \text{ kg/m}^3\text{sn}$  Olması Durumunda Isı Değiştiricide Görülen  $\text{CaCO}_3$  Birikimi



Şekil 13. Üst ve Alt Giriş İçin CaCO<sub>3</sub> Oluşumu - Sıcaklık Grafiği



Şekil 14. Üst ve Alt Giriş İçin Giriş Hızı - Isı Transfer Katsayısı Grafiği

h değerlerinin elde edilmesinde akışkan hızının artırılması ve dolayısıyla pompa gücünün artması gibi sonuçlar ortaya çıkacaktır.

## SONUÇ

Bu çalışmada, akış kanallarında kirlilik problemi tipik bir ısı değiştirici dikkate alınarak sayısal olarak modellenmiştir. Görülen kirlenme ve kirlenme tesirlerinin sayısal analizinin bulguları kısaca şöyle özetlenebilir; kirlenme miktarı ve kirlenmenin yoğunlaştığı kısımlar, CaCO<sub>3</sub> oluşumuna, akışkanın ısı değiştiriciye giriş hızına ve giriş konumuna bağlı olarak değişmektedir. Kirlenme

genellikle dirseklerde, dirsek çevrelerinde ve boruların orta kısımlarında yoğunlaşmaktadır. Alt giriş için kirlenme ısı değiştiricinin üst borularında daha yoğun, diğer borularda ise hemen hemen eşit miktarda oluşmaktadır. Akışkanın ısı değiştiriciye giriş konumu, ısı değiştirici içindeki CaCO<sub>3</sub> birikimini (kirlenme miktarını) önemli ölçüde etkilemektedir. Akışkanın ısı değiştiricinin alt girişinden girmesi, ısı değiştirici yüzeylerindeki birikimi artırmaktadır. Akışkanın ısı değiştiriciye giriş hızı, akışkanın ortalama hızını, CaCO<sub>3</sub> birikimini ve ısı transfer katsayısını etkileyen önemli bir değişkendir. Akışkanın ısı değiştiriciye yüksek hızlarla girmesi, ısı değiştirici içinde oluşan CaCO<sub>3</sub> taneciklerinin akışkan ile birlikte sürüklenmesini, dolayısıyla

parçacık birikimi (kirlenme miktarını) azaltmakta, akışkanın ortalama hızını da artırarak sistemin ısı transfer katsayısının yükseltmektedir. Kirlenmenin artması, akışkan akışının engellenmesine, sistemin basınç düşüsünün artmasına, ısı değiştirici iç çapının daralmasına hatta ısı değiştiricinin tamamen tıkanmasına neden olabilmektedir. Isı değiştirici yüzeyinde oluşan  $\text{CaCO}_3$  birikimi, ısı aktarımına karşı direnç oluşturarak ve ısı aktarım yüzeyini küçülterek akışkana aktarılan ısının azalmasına, dolayısıyla akışkanın ortalama sıcaklığının düşmesine neden olmaktadır.

**NOT:** Bu çalışma Osmangazi Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından dekteklenen 200315049 nolu proje kapsamında yapılmıştır

#### KAYNAKÇA

1. **Taşkıran, U.**, Akış Kanallarında Kirlilik Problemi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir, 2005
2. **Mansoori, G.Ali.**, Deposition and Fouling of Heavy Organic Oils and Other Compounds, Department of Chemical Engineering, University of Illinois, Chicago, USA, 2001
3. **Dağsöz, A.K.**, Sıcak Sulu Kalorifer Tesisatı, Demirdöküm Teknik Yayınlar No:6, Mas Matbacılık, İstanbul, 1998
4. **Jaluria, Y.**, Design and Optimization of Thermal Systems, McGraw – Hill International Eddition, Singapore, 1998
5. **FLUENT Inc.**, Fluent 6.1 Tutorial and User's Guide, Lebanon, 2003
6. **Incropera, F.P., Dewitt, D.P.**, 'Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri', Literatür Yayıncılık, Beyoğlu-İstanbul, 2001
7. **Andritos, N., Karabelas, A.J.**, Calcium Carbonate Scaling in a Plate Heat Exchanger in the Presence of Particles, International Journal of Heat and Mass Transfer, Thessaloniki, Greece, 2003
8. **Yiantsios, S.G., Karabelas, A.J.**, The Effect of Gravity on The Deposition of Micron – Sized Particles on Smooth Surfaces, International Journal of Multiphase Flow, Thessalonokki, Greece, 1997
9. **Brahim, F., Augustin, W., Bohnet, M.**, Numerical Simulation of the Fouling process, International Journal of Thermal Sciences, Braunschweig, Germany, 2002
10. **Siegel, J., Carrey, V.P.**, Fouling of HVAC Fin and Tube Heat Exchangers, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA, 2001
11. **Siegel J.A., Nazaroff, W.W.**, Predicting Particle Deposition on HVAC Heat Exchangers, Atmospheric Environment, USA, 2003
12. **Adameczyk, Z., Warszyński, P., Warszyńska, L.S., Weroński, P.**, Role of convection in particle deposition at solid surfaces, Colloids and Surfaces A., Cracow, Poland, 2000
13. **Chamka, A.J., Pop, I.**, Effect of Thermophoresis Particle Deposition In Free Convection Boundry Layer From A Vertical Plate Embedded In A Porous Medium, 2004
14. **Tandon, P., Adewumi, M.A.**, Particle Deposition From Turbulent Flow in a Pipe, Journal of Aerosol Science, Philadelphia, USA, 1997
15. **van de Ven, T.G.M.**, The Capture of Colloidal Particles on Surfaces and in Porous Material: Basic Principles, Colloids and Surfaces A., Montreal, Canada, 1998