



## Kanatlı-borulu ısı değiştiricilerde belirsizlik analizi

**Erhan KIRTEPE\***

Ege Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir  
[erhan.kirtepe@gmail.com](mailto:erhan.kirtepe@gmail.com), Tel: (232) 311 10 10 (4962)

**Necdet ÖZBALTA**

Ege Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir

Geliş: 11.01.2017, Kabul Tarihi: 01.06.2017

### Öz

*Bu alışmada, L ayaklı spiral kanatlı ve borulu ısı değiştirici hava tarağı performansı deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma akışkanı olarak, hava tarağında evre havası, boru tarağında ise su kullanılmıştır. Deneyleerde hava debisi ve su giriş sıcaklığı değiştirilirken, su debisi sabit tutulmuştur. Her iki çalışma akışkanının kütle debisi, giriş ve çıkış sıcaklıkları, hava tarağına ait basınç duişümü, ısı geçişini hesaplamak için ölçülmüştür. Deneysel alışmalar, hata ve belirsizlikler içerirler. Deneysel çalışmalardaki hata ve belirsizlikler, ölçüm cihazı, kalibrasyon verileri, ölçüm süreci, çalışanların becerileri, çevresel etkiler ve diğer faktörlerden kaynaklanır. Bu nedenle sonuçtaki belirsizlikleri hesaplamak için her ölçümde bu etkiler belirlenmelidir. Bu çalışmada, ısı transfer sistemlerindeki belirsizlik analizi açıklanmıştır*

**Anahtar Kelimeler:** Isı değiştirici; kanatlı boru; spiral kanat; belirsizlik

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

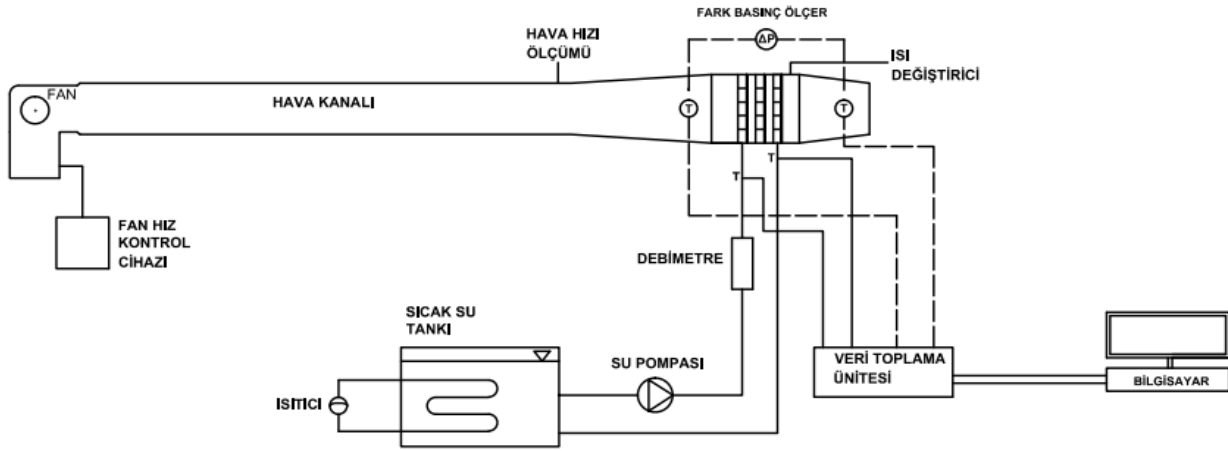
## Giriş

Isı değiştiriciler; ısıtma, havalandırma, soğutma, ısı geri kazanımı gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. En yaygın kullanıma sahip olanlar ise kanatlı-borulu ısı değiştiricilerdir. Sıvı akışkan borular içinden, gaz akışkan ise boru demetlerine çapraz olarak akar. Ancak ısı geçişi, hava tarafındaki ısı direnç nedeniyle sınırlıdır. Kanat geometrisi, kanat yapısı, kanat kalınlığı ve uzunluğu, kanat hatvesi, boru demetlerindeki borular arası mesafe ve boru diziliş şekilleri gibi ısı değiştirici performansını etkileyen birçok parametre sayısal, analitik ve deneysel olarak araştırmacılar tarafından incelenmektedir (Bilirgen vd., 2013; Kawaguchi vd., 2005; Kawaguchi vd., 2006; Ma vd., 2012; Mon ve Gross, 2004; Næss, 2010; Pongsoi vd., 2011; Wang vd., 2000). Deneysel çalışmalar, diğer yöntemlere göre incelenen sistemler hakkında daha doğru ve kesin sonuçlar vermektedir.

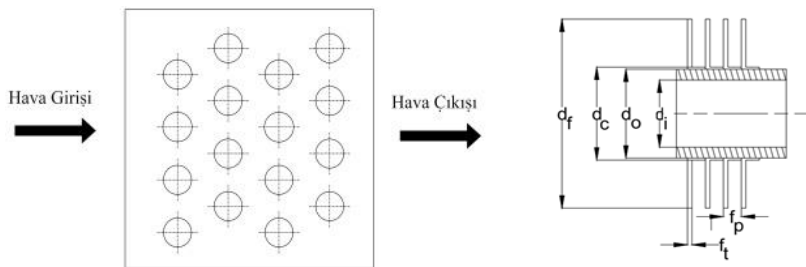
Deneysel çalışmalarda ölçüm değerleri, değişik nedenlerle belirsizlikler içerir. Deneysel olarak gerçekteştirilen ve L ayaklı spiral kanatlı-borulu ısı değiştiricisinde hava tarafındaki ısı geçişinin incelendiği bu çalışmada belirsizlik analizi, örnek uygulama olarak verilmiştir.

## Deneysel Çalışma

Isı değiştirici, fan, hava kanalı, sıcak su tankı, pompa, ölçüm ve kayıt sistemlerinden oluşan deney düzeneğinin şematik resmi Şekil 1'de görölmektedir. Su borular içinden, hava ise boru demeti üzerinden çapraz akışta geçirilmiiştir. Isı değiştiricide borular hava akışına paralel ve dik yönde olacak şekilde dörder sıra halinde dizilmiş 16 borudan oluşmuştur (Şekil 2). Boruların dış yüzeyinde L ayaklı spiral kanatlar yerleştirilmiştir (Şekil 2). Boru iç ve dış çapı sırasıyla 16.1 mm ve 21.3 mm, kanat çapı 45.3 mm, kanat kalınlığı 0.5 mm, kanat hatvesi 3.3 mm'dir.



Şekil 1: Isı değiştirici deney düzeneği



Şekil 2: Isı değiştirici boru yerleşimi ve L ayaklı spiral kanat

Deneyler esnasında fan yardımıyla dış ortamdan çekilip ısı değiştiriciye gönderilen havanın kanal içindeki hızını ölçmek için TESTO marka teleskobik hava hız ölçüm probu kullanılmıştır. Bu probun çalışma aralığı 0 ila 10 m/s hava hızı ve -20 ila 70 °C sıcaklıkları arasındadır. Probun sıcaklık ve hız ölçümündeki doğruluk değerleri sırasıyla  $\pm 0.5$  °C ve  $\pm 0.03$  m/s' dir. Su pompası yardımıyla, su deposundan alınıp ısı değiştiriciye gönderilen suyun debisini ölçmek için elektromanyetik bir debimetre kullanılmıştır. Bu debimetre ile maksimum 10 bar basınç ve 80 °C sıcaklıktaki suyun debisi 0.5 ila 4.5 L/dak arasında  $\pm \%2.5$  doğrulukla ölçülebilmektedir. Spiral kanatlı borular üzerinden geçen havanın basınç düşümünü ölçmek için 0 ila 500 pascal ölçüm aralığına sahip bir fark basınç göstergesi kullanılmıştır. Fark basınç göstergesinin -5 ila 60°C çalışma aralığındaki doğruluk değeri  $\pm \%2$ 'dir. Havanın ısı değiştiriciye giriş sıcaklığını ölçmek için 3 adet, çıkış sıcaklığını ölçmek için ise 6 adet -200 ila +800 °C aralığında ölçüm alınabilmesine olanak sağlayan ve doğruluk değeri  $\pm 0.5$  °C olan J tipi termoeleman kullanılmıştır. Suyun ısı değiştiriciye giriş ve çıkış sıcaklığını ölçmek için ise ısı değiştiricinin su giriş ve çıkış kısmında birer adet, doğruluk değeri  $\pm 0.01$  °C olan PT-100 kullanılmıştır (Kırtepe, 2014).

### Verilerin Değerlendirilmesi

Sürekli rejim koşullarında su ve hava tarafı ısı geçişi

$$Q = P_1 C_1 \Delta T_{maks} = P_2 C_2 \Delta T_{maks} \quad (1)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Burada  $P$  sıcaklık etkinliği,  $C$  ısı kapasite debisi ve  $\Delta T_{maks}$  ise sıcak ve soğuk akışkanların giriş sıcaklıkları farkıdır. 1 ve 2 indisleri sıcak veya soğuk akışkanları gösterir. Hesaplamalarda ısı geçişi, hava ve su tarafındaki ısı geçişlerinin ortalaması olarak alınmıştır. Isı değiştirici etkinliği, sıcaklık etkinliği-geçiş birimi sayısı ( $P-NTU$ ) yöntemi kullanılarak incelenmiştir (Shah ve Sekulic, 2003). Çapraz akışlı, akışkan 1'in karıştığı, akışkan 2'nin karışmadığı ısı

değiştiricide akışkan 1 için sıcaklık etkinliği ( $P_1$ )

$$P_1 = \frac{T_{1,\zeta} - T_{1,g}}{T_{2,g} - T_{1,g}} \quad (2)$$

geçiş birimi sayısı

$$NTU_1 = \frac{U_o A_o}{(\dot{m}_1 C_{p1})} \quad (3)$$

ve

$$NTU_1 = \frac{1}{R_1} \ln \left[ \frac{1}{1 + R_1 \ln(1 - P_1)} \right] \quad (4)$$

olarak alınmıştır. Burada  $R_1$ , ısı kapasite debileri oranı olup

$$R_1 = \frac{\dot{m}_1 C_{p1}}{\dot{m}_2 C_{p2}} = \frac{T_{2,g} - T_{2,\zeta}}{T_{1,\zeta} - T_{1,g}} \quad (5)$$

olarak tanımlanmıştır. Toplam ısı geçiş katsayısı

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi k_t L} + \frac{\ln(d_c/d_o)}{2\pi k_f L} + \frac{1}{\eta_o h_o A_o} \quad (6)$$

toplam yüzey verimi

$$\eta_o = 1 - \frac{A_f}{A_o} (1 - \eta) \quad (7)$$

ve kanat verimi (Kraus vd., 2001; Pongsoi vd., 2012a; Pongsoi vd., 2012b)

$$\eta = \frac{2\psi}{\phi(1+\psi)} \frac{I_1(\phi R_f) K_1(\phi R_o) - I_1(\phi R_o) K_1(\phi R_f)}{I_0(\phi R_o) K_1(\phi R_f) + I_1(\phi R_f) K_0(\phi R_o)} \quad (8)$$

biçiminde tanımlanmış olup, burada

$$\phi = (r_f - r_o)^{3/2} \left( \frac{2h_o}{k_f A_p} \right)^{1/2} \quad (9)$$

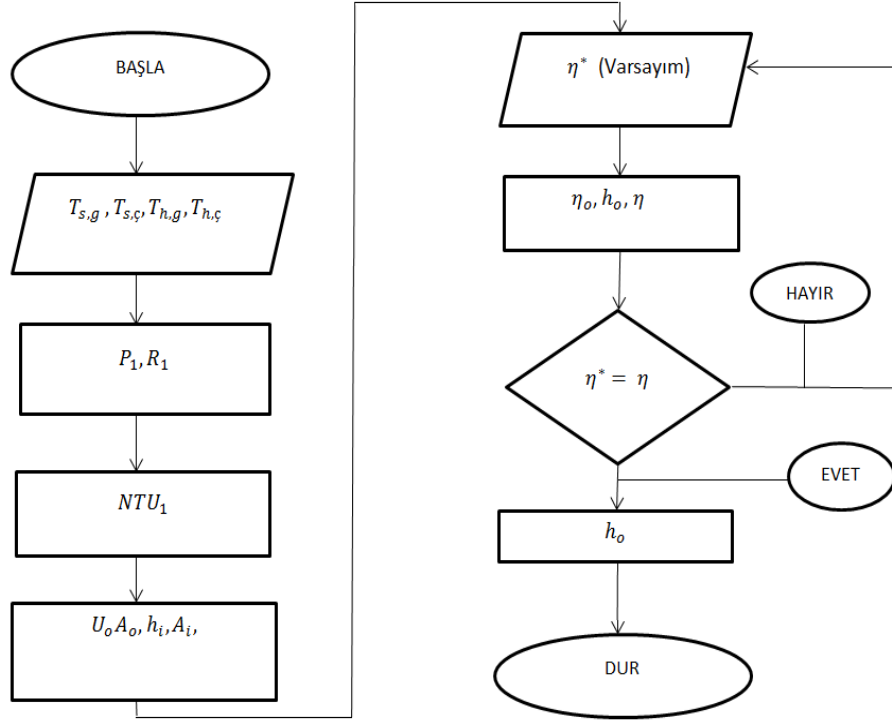
olarak alınmıştır. Boru tarafı ısı taşınım katsayısı

$$Nu = 1,86 \left( \frac{Re_s Pr_s d_i}{L} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_s}{\mu_y} \right)^{0,14} \quad (10)$$

denklemleri ile hesaplanmıştır. Sürtünme faktörü, ölçülen değerler cinsinden (Pongsoi vd., 2012b)

$$f = \frac{A_{min} \rho_m}{A_o} \left[ \frac{2\Delta P}{G_c^2} \right] \quad (11)$$

denklemleri ile hesaplanmıştır. Hava tarafı ısı taşınım katsayısının hesaplanması ile ilgili akış diyagramı Şekil 3'de görülmektedir.



Şekil 3: Hava tarafı ısı taşınım katsayısının hesaplanmasına ait akış şeması

## Belirsizlik Hesaplarında Temel Kavramlar

Bir büyüklüğün değerinin bulunması için yapılan işlemler dizisi ölçüm olarak tanımlanır. Ölçüm işleminde öncelikle, ölçülecek niceliğin, ölçüm metodunun, ölçüm işleminin tanımlanması gereklidir. Genelde ölçüm sonucu, ölçülen büyüklüğün değerinin, belirsizlik değeri ile tahmin edilmesi veya yaklaşımıdır (JCGM 100, 2008; Sadıkhov vd., 1995; Nasa Handbook, 2010; Coleman ve Steele, 2009). Çoğu durumda ölçüm sonucu tekrarlanabilen koşullarda gerçekleştirilen bir dizi gözlemden elde edilir. Tekrarlanan gözlemlerdeki farklılıkların, ölçüm sonucunu etkileyen fakat ölçülmesi mümkün olmayan ve etki büyüklükleri olarak isimlendirilen faktörler nedeniyle meydana geldiği varsayılır (Sadıkhov vd., 1995).

Genelde ölçümdeki mükemmelliğin tam olarak sağlanamaması nedeniyle, ölçüm sonucu hata içerir. Deneysel hata, iki ölçülen değer

arasındaki veya ölçülen ve doğru değer arasındaki farktır. Deneysel hata, doğruluk ve kesinlik ile ölçülür. Doğruluk, ölçülen değer doğru değere veya kabul edilen değere ne kadar yakın olduğunun ölçütüdür. Fiziksel bir niceliğin doğru değeri veya kabul edilen değeri bilinmediğinde, bazı durumlarda ölçümün doğruluğunu belirlemek mümkün olmayabilir. Kesinlik, iki veya daha fazla ölçümün birbirlerine ne kadar yakın olduklarının ölçütüdür (Sadıkhov vd., 1995; Nasa Handbook, 2010).

## Deneysel Hataların Kaynakları ve Tipleri

Hata, rasgele bileşen ve sistematik bileşen olarak incelenir (JCGM 100, 2008; Sadıkhov vd., 1995; Nasa Handbook, 2010; Coleman ve Steele, 2009). Sistematik hatalar, ölçüm doğruluğunu etkileyen hatalardır. Sistematik hatalar tek yönlü hatalar olup, diğer hata tiplerinin yokluğunda, tekrarlanan ölçümlerde sonuç, doğru veya kabul edilen değerden sabit bir farkla elde edilir. Sistematik hatadan kaynaklanan ölçüm doğruluğu, gözlem sayısını arttırmakla yok edilemez. Sistematik hataların istatistik yöntemlerle incelenmesi basit olarak

gerçekleştirilemez. Sistemik hataların ölçüm sonucuna etkisinin belirlenmesi oldukça zordur, ancak ölçüm yöntemi veya ölçüm tekniğini iyileştirerek değeri çok düşürülebilir. Sistemik hatalar, ölçüm cihazının kalibrasyonundan, insan hatasından, cihazın durumundan, ölçüm tekniği ve ölçüm işleminden kaynaklanır. Rasgele hatalar, ölçüm kesinliğini etkileyen hatalardır. Rasgele hatalar, çift yönlü hatalar olup, diğer hata tiplerinin yokluğunda, tekrarlanan ölçümlerde sonuç, doğru veya kabul edilen değer etrafında değişir. Tanımlanamayan ve kontrol edilemeyen birbirinden bağımsız etkiler nedeniyle ölçüm sonucu, tekrarlanan gözlemlerde farklılık gösterir. Rasgele hataya bağlı olarak ölçüm kesinliği, gözlem sayısını artırarak iyileştirilebilir. Rasgele hatalar, istatistiksel yöntemlerden yararlanılarak incelenebilir. Ölçüm yöntemi veya ölçüm tekniği iyileştirilerek ve gözlem sayısı artırılarak rasgele hatalar daha küçük değerlere indirilebilir. Gözlem sayısı arttırılırsa, verinin ortalama değerden sapmasının dağılımı elde edilebilir. Genellikle sonuçlar, ortalama değer etrafında normal dağılım gösterir. Bu değer ortalama değeri, gerçek değer olarak varsayılır (JCGM 100, 2008; Sadikhov vd., 1995; Nasa Handbook, 2010; Coleman ve Steele, 2009).

### Standart Belirsizliğin Hesaplanması

Ölçülen değer belirli bir olasılıkla ortalama değer etrafında bulunduğu aralık, belirsizlik olarak tanımlanır. Belirsizliğin nedenleri olarak ölçülen değer tanımındaki yetersizlik, ölçülen değer tanımının gerçekleşmesindeki yetersizlik, gözlemlerin ölçülen değeri temsil etmemesi, ölçülen değer üzerine çevresel koşulların etkilerinin tam olarak bilinmemesi veya çevresel koşulların ölçümündeki yetersizlikler, analog cihaz okumalarında personel eğilimleri, sonlu cihaz çözünürlükleri, referans malzemelerinin ve ölçüm standartları ile ilgili bilgilerin yetersiz olması, verilerin değerlendirilmesinde kullanılan ve dış kaynaklardan elde edilen sabitler ve diğer parametrelerin değerlerinin tam olarak bilinmemesi, ölçüm yöntemi ve işlemlerindeki yaklaşım ve varsayımlar, görünürde özdeş

koşullarda tekrarlanan gözlemlerde, ölçülen değerlerde farklılıklar olması sayılabilir (JCGM 100, 2008; Sadikhov vd., 1995; Nasa Handbook, 2010; Coleman ve Steele, 2009).

Çoğu durumda, ölçülen büyüklük  $Y$ 'nin doğrudan ölçülmesi mümkün olmayabilir. Böyle durumlarda ölçülen büyüklük  $Y$ ,  $f$  fonksiyonel ilişkisi kullanılarak,  $N$  adet ölçülebilen değer ( $X_1, X_2, \dots, X_N$ ) nicelikten belirlenir (JCGM 100, 2008; Sadikhov vd., 1995; Nasa Handbook, 2010; Coleman ve Steele, 2009).

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (12)$$

Girdi nicelikleri ( $X_1, X_2, \dots, X_N$ ) iki grupta sınıflandırılır:

- Gerçekleştirilen ölçümlerden (örneğin tek bir gözlemden, tekrarlanan gözlemlerden, önceki deneyimlerden) doğrudan belirlenen girdi nicelikleri ve belirsizlikleri,
  - El kitaplarından alınan referans verileri, kalibrasyon ve sertifikalarda bulunan veriler, ölçüm standartları gibi dış kaynaklardan elde edilen girdi nicelikleri ve belirsizlikleri.
- Ölçülen nicelik  $Y$  için kestirilen  $y$  değerleri, ( $X_1, X_2, \dots, X_N$ ) nicelikleri için kestirilen  $N$  adet girdi değeri ( $x_1, x_2, \dots, x_N$ ) kullanılarak bulunur. Burada kestirilen  $y$  değeri, ölçüm sonucu elde edilmiş olup,

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (13)$$

bağıntısı ile tanımlanır.

Bazı durumlarda kestirilen  $y$  değeri aşağıdaki bağıntı ile verilir.

$$y = \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Y_k = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n f(X_1, X_2, \dots, X_{N,k}) \quad (14)$$

Ölçüm sonucu bulunan  $y$  değerine ait birleşik standart belirsizlik [ $u_c(y)$ ], her girdi değerine ( $x_i$ ) ait standart belirsizlik  $u(x_i)$  değerlerinden hesaplanır.

### Standart Belirsizliğin A Tipi Hesaplanması

Bu yaklaşımda tekrarlanan ölçüm sonuçlarına dayanarak istatistik yöntemlerden yararlanarak standart belirsizlik hesaplanır. Çoğu durumda özdeş koşullarda yapılan  $n$  bağımsız gözlemlerde, rasgele değişken  $q$  için beklenen değer en iyi

kestirimi, bu gözlemlerin aritmetik ortalamasıdır (JCGM 100, 2008; Sadikhov vd., 1995; Nasa Handbook, 2010; Coleman ve Steele, 2009; Freund ve Simon, 1992):

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (15)$$

Girdi niceliği  $X_i$  için, yapılan  $n$  adet tekrarlan bağımsız gözlem sonucunun ( $X_{i,k}$ ), aritmetik ortalaması  $\bar{X}_i$ , denklem 15 kullanılarak bulunur. Elde edilen bu aritmetik ortalama değeri de  $x_i = \bar{X}_i$  varsayılarak ölçüm sonucu  $y$ 'nin eldesinde denklem 13'de  $x_i$  girdi değeri olarak kullanılır.

Ortam koşullarındaki rasgele değişimler ve etki faktörleri nedeniyle gözlemler ( $q_k$ ) farklılık gösterir.

Gözlemlerin deneysel varyansı,

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad (16)$$

olarak verilir.

Varyansın bu kestirimi ve deneysel standart sapma olarak isimlendirilen varyansın pozitif karekökü, gözlenen değerlerin ortalama değer etrafında dağılımını tanımlar. Gözlemler ortalamasının varyansı aşağıdaki denklemle verilir:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (17)$$

Gözlemler ortalamasının varyansı  $s^2(\bar{q})$  ve onun pozitif kareköküne eşit olan ortalamanın deneysel standart sapması  $s(\bar{q})$ , rasgele değişken  $\bar{q}$  için belirsizliğin ölçüsü olarak kullanılır:

$$s(\bar{q}) = \sqrt{\frac{s^2(q_k)}{n}} \quad (18)$$

$n$  adet tekrarlan bağımsız gözlem sonucu ( $X_{i,k}$ ), kullanılarak, bulunan girdi niceliği  $X_i$  için kestirilen değer,  $x_i = \bar{X}_i$  için standart belirsizlik olarak isimlendirilir. Standart belirsizlik  $u(x_i) = s(\bar{X}_i)$  ve varyans  $u^2(x_i) = s^2(\bar{X}_i)$  olarak alınır. Standart belirsizliğin A tipi hesaplanmasında bu yaklaşımın kullanılabilmesi

için gözlem sayısı yeterince büyük olmalıdır. Ölçüm sayısı az ise hesaplanan standart sapma, student-t istatistiği kullanılarak bulunan faktör ile çarpılmalıdır.

#### Standart Belirsizliğin B Tipi Hesaplanması

Bu yaklaşımda girdi değeri  $X_i$  için kestirilen değer olan  $x_i$ , tekrarlanan ölçümlerden elde edilmemektedir ve standart belirsizlik değeri de istatistik yöntemler kullanılarak hesaplanmamaktadır. Kestirilen varyans  $u^2(x_i)$  veya standart belirsizlik  $u(x_i)$ , üreticinin sağladığı bilgiler, kullanılan malzemeler ve cihazlarla ilgili deneyim, daha önce gerçekleştirilmiş başka bir çalışmadaki ölçümlerden alınan veriler, daha önce edinilen bilgiler, kalibrasyon ve diğer sertifikalarda bulunan veriler, el kitaplarından alınan referans verilerine ait belirsizlikler kullanılarak hesaplanır (JCGM 100, 2008; Sadikhov vd., 1995; Nasa Handbook, 2010; Coleman ve Steele, 2009).

Kestirilen değer  $x_i$ , üreticiden alınan bilgiler, kalibrasyon sertifikası, el kitapları ve diğer kaynaklardan elde edilmiş ise verilen belirsizlik, standart sapmanın belli bir katsayı ile çarpımı olarak ifade edilebilir. Böylesi durumda standart belirsizlik  $u(x_i)$ , basit olarak verilen belirsizlik değerinin bu katsayıya bölümü ile elde edilir. Kestirilen varyans  $u^2(x_i)$  ise, bölme işlemi sonucunda hesaplanan değerın karesine eşittir.

Kestirilen değer  $x_i$  için belirsizlik, standart sapmanın belli bir katsayı ile çarpım sonucu olarak verilmek yerine %90, %95, %99 güvenilirlik düzeyleri ile verilebilir. Normal dağılımın geçerli olduğu varsayıldığında, standart belirsizlik  $u(x_i)$ , verilen belirsizlik değerinin bu güvenilirlik düzeyine karşı gelen kapsam faktörüne (sırasıyla 1.645, 1.960, 2.576) bölünmesi ile elde edilir (JCGM 100, 2008; Sadikhov vd., 1995; Nasa Handbook, 2010; Coleman ve Steele, 2009; Freund ve Simon, 1992).

Teknik ölçümlerde, karşılaşılan sistematik hatalarda ölçülen değer, doğru değer etrafında simetrik olarak düzenlenmiş iki sınır  $a_-$  ve  $a_+$  değerleri arasında yer alır. Ölçülen değerın  $a_-$  ve  $a_+$  değerleri arasında bulunma olasılığı bir, bu aralığın dışında bulunma olasılığı ise sıfırdır.

Genişliği 2a olan bu dağılım dikdörtgen dağılım olarak isimlendirilir ve ölçümdeki belirsizlik

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (19)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Bazı durumlarda ölçülen değer, orta noktalarda yoğunlaşır, buna karşın kenarlarda azalan bir dağılım gösterir. Böylesi durumlarda simetrik dikdörtgen dağılım yerine alt taban genişliği  $a_+ - a_- = 2a$ , üst taban genişliği  $2a\beta$  ( $0 \leq \beta \leq 1$ ) ve yanal kenarları eşit eğimde olan simetrik yamuk dağılımı gözlenir.  $\beta$  değeri 1'e yaklaşırsa yamuk dağılımı, dikdörtgen dağılıma,  $\beta$  değeri 0'a yaklaşırsa üçgen dağılıma dönüşür. Yamuk dağılımda girdi değeri  $X_i$  için kestirilen değer  $x_i = (a_+ + a_-)/2$  ve varyans  $u^2(x_i) = a^2(1 + \beta^2)/6$  olarak verilir. Belirsizlik ise  $u(x_i) = a[(1 + \beta^2)/6]^{1/2}$  olarak elde edilir.

Üçgen dağılımda ise  $\beta = 0$  olur, dolayısıyla varyans  $u^2(x_i) = a^2/6$ , belirsizlik ise  $u(x_i) = a/\sqrt{6}$  olarak bulunur.

#### Bileşik Belirsizliğin Hesaplanması

##### a) Girdi Büyüklüklerinin Birbirinden Bağımsız Olması

Ölçülen nicelik  $Y$ 'nin ölçüm sonucunun bulunabilmesi için kestirilen  $y$  niceliğinin standart belirsizliği,  $(x_1, x_2, \dots, x_N)$  girdi değerlerine ait standart belirsizlik değerleri kullanılarak hesaplanır (JCGM 100, 2008; Sadikhov vd., 1995; Nasa Handbook, 2010; Coleman ve Steele, 2009; Sabatelli vd., 2002; Müller-Schöll ve Frei, 2000; Mathioulakis v.d., 1999). Bu şekilde bulunan belirsizlik, bileşik standart belirsizlik  $[u_c(y)]$  olarak isimlendirilir ve bileşik varyansın  $[u_c^2(y)]$ , pozitif karekökü olup aşağıdaki eşitlikten elde edilir.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (20)$$

Standart belirsizlik  $[u(x_i)]$  değerleri, A-tipi veya B-tipi hesaplama yöntemlerinden uygun olanı kullanılarak elde edilir.

Bileşik standart belirsizlik  $[u_c(y)]$ , ölçülen büyüklük  $Y$ 'nin kestirilen  $y$  değerlerinin dağılımın açıklar. Eşitlik 20 ve 25,  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$  fonksiyonun birinci

dereceden Taylor serisi açılımına dayanır ve belirsizliğin yayılması kanunu olarak isimlendirilir.  $f$  fonksiyonunun doğrusal olmadığı durumlarda bileşik varyansın  $[u_c^2(y)]$  eldesi için Taylor serisi açılımının daha yüksek dereceli terimleri dikkate alınmalıdır. Her bir  $X_i$  normal dağılım gösteriyorsa, eşitlik 20'ye daha yüksek dereceli terimler eklenir:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right)^2 + \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial^3 f}{\partial x_i \partial x_j^2} \right] u^2(x_i) u^2(x_j) \quad (21)$$

$X_i = x_i$  değerleri için  $\partial f / \partial x_i$  türevleri,  $\partial f / \partial X_i$  türevlerine eşit olur. Bu türevler genellikle duyarlılık katsayıları olarak isimlendirilir ve kestirilen değer  $y$ 'nin girdi büyüklükleri  $(x_1, x_2, \dots, x_N)$  değerlerindeki değişimler ile nasıl değiştiğini gösterir. Girdi büyüklüğü  $x_i$ 'deki  $\Delta x_i$  küçük değişimi ile  $y$  değerindeki değişim  $(\Delta y)_i = (\partial f / \partial x_i)(\Delta x)_i$  olarak elde edilir. Eğer bu değişim,  $x_i$  girdi büyüklüklerinin standart belirsizliklerinden kaynaklanıyorsa, buna uygun olarak  $y$ 'de meydana gelen değişim  $(\partial f / \partial x_i)u(x_i)$  biçiminde ifade edilebilir. Bu durumda bileşik varyans  $[u_c^2(y)]$ , her bir girdi büyüklüğü  $x_i$ 'ye ait varyanslardan elde edilen çıktı değeri  $y$ 'ye ait varyansların toplamından elde edilir.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2 = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (22)$$

Burada  $c_i = (\partial f / \partial x_i)$  ve  $u_i(y) = |c_i| u(x_i)$  olarak alınmıştır. Gerçekte ise  $\partial f / \partial x_i = \partial f / \partial X_i$  kısmi türevleri  $X_i$ 'nin beklenen değeri için hesaplanmalıdır. Genelde kısmi türevler

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \Big|_{x_1, x_2, \dots, x_N} \quad \text{ifadesi ile hesaplanır.}$$

Eğer ölçülen büyüklük  $Y$  ile girdi büyüklükleri  $(X_1, X_2, \dots, X_N)$  arasında  $(Y = c_1 X_1 + c_2 X_2 + \dots + c_N X_N)$  biçiminde doğrusal bir bağıntı varsa ve sabitler  $c_i = +1$  veya  $-1$  ise ölçülen büyüklük  $Y$ 'nin kestirilen değeri  $y$ 'nin bileşik varyansı

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(x_i) \quad (23)$$

eşitliği ile bulunur.

Eğer ölçülen büyüklük  $Y$  ile girdi büyüklükleri  $(X_1, X_2, \dots, X_N)$  arasında  $[Y = cX_1^{p_1} X_2^{p_2} \dots X_N^{p_N}]$  biçiminde polinom ilişkisi varsa ve  $P_i$  değerleri çok küçük belirsizlikleri olan pozitif veya negatif sayılarsa  $Y$ 'nin kestirilen değeri  $y$ 'nin bileşik varyansı

$$[u_c(y)/y]^2 = \sum_{i=1}^N [P_i u(x_i)/x_i]^2 \quad (24)$$

olarak verilir (JCGM 100, 2008; Sadikhov vd., 1995; Nasa Handbook, 2010; Coleman ve Steele, 2009).

b) *Girdi büyüklüklerinin birbirine bağımlı olması*

Girdi büyüklükleri birbirine bağımlı ise bileşik varyans  $[u_c^2(y)]$ , aşağıdaki eşitlik ile bulunur.

$$\begin{aligned} u_c^2(y) &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \\ &= \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \\ &+ 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \end{aligned} \quad (25)$$

Burada  $f$  ölçüm modelini tanımlayan fonksiyon,  $x_i$  ve  $x_j$ , girdi büyüklükleri  $X_i$  ve  $X_j$  için kestirilen değerleri,  $u(x_i, x_j) = u(x_j, x_i)$  ise  $x_i$  ve  $x_j$ 'ye ait kovaryanslardır.  $x_i$  ve  $x_j$  arasındaki bağıntı, korelasyon katsayısı ile belirlenir (JCGM 100, 2008; Sadikhov vd., 1995; Nasa Handbook, 2010; Coleman ve Steele, 2009; Sabatelli vd., 2002; Müller-Schöll ve Frei, 2000; Mathioulakis vd., 1999).

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)} \quad (26)$$

Burada  $r(x_i, x_j) = r(x_j, x_i)$  ve  $-1 \leq r(x_i, x_j) \leq +1$ 'dir. Eğer  $x_i$  ve  $x_j$ , birbirinden bağımsız ise  $r(x_i, x_j) = 0$  olur. Eğer korelasyon katsayıları, kovaryanslardan daha kolay yorumlanabiliyorsa eşitlik 25 aşağıdaki biçimde verilebilir.

$$\begin{aligned} u_c^2(y) &= \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) \\ &+ 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j) \end{aligned} \quad (27)$$

Özel bir durum olarak tüm girdi büyüklükleri arasında korelasyon katsayısı  $r(x_i, x_j) = +1$  ilişkisi varsa eşitlik 27 aşağıdaki biçimde yazılabilir.

$$u_c^2(y) = \left[ \sum_{i=1}^N c_i u(x_i) \right]^2 = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right]^2 \quad (28)$$

Bu özel durumda bileşik standart belirsizlik  $[u_c(y)]$ , her bir girdi büyüklüğünün kestirilen değeri olan  $x_i$ 'lere ait belirsizliklerinin sonucu olarak meydana gelen  $y$ 'deki değişimlerin toplamının karesidir (JCGM 100, 2008; Sadikhov vd., 1995; Nasa Handbook, 2010; Coleman ve Steele, 2009).

### Genişletilmiş Belirsizlik

Birleşik standart belirsizlik, ölçüm sonucundaki belirsizliği bir standart sapma olarak ifade eder. Ölçüm sonuçlarının ancak %68.27'si bileşik standart sapma olarak tanımlanan bu aralık içinde yer alır (JCGM 100, 2008; Sadikhov vd., 1995; Nasa Handbook, 2010; Müller-Schöll ve Frei, 2000). Dolayısıyla bileşik standart belirsizlik için güvenilirlik düzeyi %68.27'dir. Güvenirlik düzeyini arttırmak için genişletilmiş belirsizlik tanımından yararlanır. Genişletilmiş standart belirsizlik ( $U$ ), bileşik standart belirsizlik  $[u_c(y)]$  ve kapsam faktörü ( $k$ ) kullanılarak hesaplanır (JCGM 100, 2008; Sadikhov vd., 1995; Nasa Handbook, 2010; Coleman ve Steele, 2009).

$$U = k u_c(y) \quad (29)$$

$y$  ve  $U$ 'nun birimleri de verilerek ölçüm sonucu  $Y = y \pm U$  olarak verilebilir. Daha yüksek bir güvenilirlik düzeyi ile ölçülen  $Y$  değeri,  $y + U$  ve  $y - U$  aralığında yer alabilir. Ölçüm sonuçları normal dağılım gösteriyorsa kapsam faktörü ve güvenilirlik düzeyi ilişkisi Tablo 1'de verilmiştir.



**Tablo 1.** Kapsam faktörü-güvenirlilik düzeyi ilişkisi (Evaluation of measurement data, 2008)

Kapsam faktörü ( <i>k</i> )	1.000	1.645	1.960	2.000	2.576	3.000
Güvenirlilik düzeyi (%)	68.27	90.00	95.00	95.45	99.00	99.73

### Isı Değiştiricilerde Belirsizlik Hesabı

Isı değiştiricilerin ısıl-hidrolik performansları, akışkan özelliklerine, ısı geçiş yüzeyinin geometrisine, Reynolds sayısına, sistemdeki basınç düşümüne bağlıdır. Bu etkili parametrelerin belirlenmesi, akışkan debilerinin, akışkanların giriş-çıkış sıcaklıklarının, her iki akışkan tarafındaki basınç düşümlerinin ölçülmesini ve akışkanların ısıl özelliklerinin kullanımını gerektirmektedir. Yapılan ölçümlerin ve kaynaklardan alınan verilerin içerdiği belirsizlikler, sonuç üzerinde oldukça etkilidir. Bu çalışmada sistem performansının deneysel olarak araştırılmasındaki belirsizlik incelenmiştir (Uhia vd., 2013; Coblenz, 2009; Tatar ve Lupia, 2011; Claesson, 2004).

### Su Tarafında Olan Isı Geçişi İçin Belirsizlik Hesabı

Su tarafından olan ısı geçişi,

$$Q_s = \dot{m}_s C_{P_s} (T_{s,g} - T_{s,\zeta}) = \rho_s \dot{V}_s C_{P_s} (T_{s,g} - T_{s,\zeta}) \quad (30)$$

denklemleri ile hesaplanır. Denklem 30'dan da görüldüğü üzere su tarafında olan ısı geçişi, ölçülen değerlerin fonksiyonu  $Q_s = f(\rho_s, \dot{V}_s, C_{P_s}, T_{s,g}, T_{s,\zeta})$  olup bağıl belirsizliği

$$\frac{W_{Q_s}}{Q_s} = \left[ \left( \frac{W_{\rho_s}}{\rho_s} \right)^2 + \left( \frac{W_{\dot{V}_s}}{\dot{V}_s} \right)^2 + \left( \frac{W_{C_{P_s}}}{C_{P_s}} \right)^2 + \left( \frac{W_{T_{s,g}}}{(T_{s,g} - T_{s,\zeta})} \right)^2 + \left( - \frac{W_{T_{s,\zeta}}}{(T_{s,g} - T_{s,\zeta})} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (31)$$

olarak elde edilir.

### Hava Tarafında Olan Isı Geçişi İçin Belirsizlik Hesabı

Hava tarafında olan ısı geçişi,

$$Q_h = \dot{m}_h C_{P_h} (T_{h,\zeta} - T_{h,g}) = \rho_h V_h (ab) C_{P_h} (T_{h,\zeta} - T_{h,g}) \quad (32)$$

denklemleri ile hesaplanır. Hava tarafında olan ısı geçişi, ölçülen değerlerin fonksiyonu  $Q_h = f(\rho_h, V_h, a, b, C_{P_h}, T_{h,\zeta}, T_{h,g})$  olarak yazılabilir. Hava tarafından olan ısı geçişi için bağıl belirsizlik ifadesi 33 numaralı denklemdeki gibi olmaktadır.

$$\frac{W_{Q_h}}{Q_h} = \left[ \left( \frac{W_{\rho_h}}{\rho_h} \right)^2 + \left( \frac{W_{V_h}}{V_h} \right)^2 + \left( \frac{W_a}{a} \right)^2 + \left( \frac{W_b}{b} \right)^2 + \left( \frac{W_{C_{P_h}}}{C_{P_h}} \right)^2 + \left( - \frac{W_{T_{h,g}}}{(T_{h,\zeta} - T_{h,g})} \right)^2 + \left( \frac{W_{T_{h,\zeta}}}{(T_{h,\zeta} - T_{h,g})} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (33)$$

### Su Tarafına Ait Reynolds Sayısı İçin Belirsizlik Hesabı

Su tarafına ait Reynolds sayısı,

$$Re_s = \frac{V_s d_i}{\nu_s} = \frac{4 \dot{V}_s}{\nu_s \pi d_i} \quad (34)$$

denklemleri ile tanımlanır.

Denklem 34'den de görüldüğü üzere su tarafına ait Reynolds sayısı, ölçülen değerlerin fonksiyonu  $Re_s = f(\nu_s, d_i, \dot{V}_s)$  olarak yazılabilir. Su tarafına ait Reynolds sayısı için bağıl belirsizlik ifadesi 35 numaralı denklemdeki gibi olmaktadır.

$$\frac{W_{Re_s}}{Re_s} = \left[ \left( - \frac{W_{\nu_s}}{\nu_s} \right)^2 + \left( - \frac{W_{d_i}}{d_i} \right)^2 + \left( \frac{W_{\dot{V}_s}}{\dot{V}_s} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (35)$$

### Hava Tarafına Ait Reynolds Sayısı İçin Belirsizlik Hesabı

Hava tarafına ait Reynolds sayısı,

$$Re_h = \frac{V_{h,maks} d_c}{\nu_h} \quad (36)$$

ölçülen değerlerin fonksiyonu  $Re_h = f(V_{h,maks}, d_c, \nu_h)$  olarak yazılabilir. Hava tarafına ait Reynolds sayısı için bağıl belirsizlik ifadesi 37 numaralı denklemdeki gibi olmaktadır.

$$\frac{W_{Re_h}}{Re_h} = \left[ \left( -\frac{W_{\nu_h}}{\nu_h} \right)^2 + \left( \frac{W_{d_c}}{d_c} \right)^2 + \left( \frac{W_{V_{h,maks}}}{V_{h,maks}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (37)$$

### Su Tarafına Ait Isı Taşınım Katsayısı İçin Belirsizlik Hesabı

Su tarafına ait ısı taşınım katsayısı,

$$Nu = 1,86 \left( \frac{Re_s Pr_s d_i}{L} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_s}{\mu_y} \right)^{0,14} \quad (38)$$

denklemini ile hesaplanır. Su tarafına ait ısı taşınım katsayısı, ölçülen ve tablodan okunan değerlerin fonksiyonu  $h_i = f(k_s, d_i, Re_s, Pr_s, L, \mu_s, \mu_y)$  olarak düzenlenir ve ısı taşınım katsayısı için bağıl belirsizlik

$$\begin{aligned} \frac{W_{h_i}}{h_i} = & \left[ \left( \frac{W_{k_s}}{k_s} \right)^2 + \left( \left( -\frac{2}{3} \right) \frac{W_{d_i}}{d_i} \right)^2 + \left( \left( \frac{1}{3} \right) \frac{W_{Re_s}}{Re_s} \right)^2 \right. \\ & + \left( \left( \frac{1}{3} \right) \frac{W_{Pr_s}}{Pr_s} \right)^2 + \left( \left( -\frac{1}{3} \right) \frac{W_L}{L} \right)^2 \\ & + \left( 0,14 \frac{W_{\mu_s}}{\mu_s} \right)^2 \\ & \left. + \left( -0,14 \frac{W_{\mu_y}}{\mu_y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (39) \end{aligned}$$

olarak elde edilir.

### Toplam Isı Geçiş Katsayısı İçin Belirsizlik Hesabı

Toplam ısı geçiş katsayısı,

$$NTU = \frac{U_0 A_0}{(\dot{m}_h C_{P_h})} \quad (40)$$

denkleminde hesaplanır. Bu denklem 2, 4 ve 5 numaralı denklemler kullanılarak düzenlenip toplam ısı geçiş katsayısı yalnız bırakılırsa

$$U_0 = -\rho_s \dot{V}_s C_{P_s} A_0^{-1} \ln \left[ 1 + \frac{T_{s,g} - T_{s,\zeta}}{T_{h,\zeta} - T_{h,g}} \ln \left( \frac{T_{s,g} - T_{h,\zeta}}{T_{s,g} - T_{h,g}} \right) \right] \quad (41)$$

denklemini elde edilir. Toplam ısı geçiş katsayısı, ölçülen ve tablodan okunan değerlerin fonksiyonu  $U_0 = f(\rho_s, \dot{V}_s, C_{P_s}, A_0, T_{s,g}, T_{s,\zeta}, T_{h,g}, T_{h,\zeta})$  olarak düzenlenir ve toplam ısı geçiş katsayısı için bağıl belirsizlik

$$\frac{W_{U_0}}{U_0} = \left[ \left( \frac{W_{\rho_s}}{\rho_s} \right)^2 + \left( \frac{W_{\dot{V}_s}}{\dot{V}_s} \right)^2 + \left( \frac{W_{C_{P_s}}}{C_{P_s}} \right)^2 + \left( -\frac{W_{A_0}}{A_0} \right)^2 \right. \\ + \left( \frac{\left[ \frac{1}{(T_{h,\zeta} - T_{h,g})} \ln \left( \frac{T_{s,g} - T_{h,\zeta}}{T_{s,g} - T_{h,g}} \right) + \left( \frac{(T_{s,g} - T_{s,\zeta})}{(T_{s,g} - T_{h,g})(T_{s,g} - T_{h,\zeta})} \right) \right]}{\left[ 1 + \frac{T_{s,g} - T_{s,\zeta}}{T_{h,\zeta} - T_{h,g}} \ln \left( \frac{T_{s,g} - T_{h,\zeta}}{T_{s,g} - T_{h,g}} \right) \right] \ln \left[ 1 + \frac{T_{s,g} - T_{s,\zeta}}{T_{h,\zeta} - T_{h,g}} \ln \left( \frac{T_{s,g} - T_{h,\zeta}}{T_{s,g} - T_{h,g}} \right) \right]} W_{T_{s,g}} \right)^2 \\ + \left( \frac{\left( \frac{-1}{T_{h,\zeta} - T_{h,g}} \right) \ln \left( \frac{T_{s,g} - T_{h,\zeta}}{T_{s,g} - T_{h,g}} \right)}{\left[ 1 + \frac{T_{s,g} - T_{s,\zeta}}{T_{h,\zeta} - T_{h,g}} \ln \left( \frac{T_{s,g} - T_{h,\zeta}}{T_{s,g} - T_{h,g}} \right) \right] \ln \left[ 1 + \frac{T_{s,g} - T_{s,\zeta}}{T_{h,\zeta} - T_{h,g}} \ln \left( \frac{T_{s,g} - T_{h,\zeta}}{T_{s,g} - T_{h,g}} \right) \right]} W_{T_{s,\zeta}} \right)^2 \\ + \left( \frac{\left( \frac{1}{(T_{h,\zeta} - T_{h,g})} \right) \left[ \left( \frac{1}{(T_{h,\zeta} - T_{h,g})} \right) \ln \left( \frac{T_{s,g} - T_{h,\zeta}}{T_{s,g} - T_{h,g}} \right) + \left( \frac{1}{(T_{s,g} - T_{h,g})} \right) \right]}{\left[ 1 + \frac{T_{s,g} - T_{s,\zeta}}{T_{h,\zeta} - T_{h,g}} \ln \left( \frac{T_{s,g} - T_{h,\zeta}}{T_{s,g} - T_{h,g}} \right) \right] \ln \left[ 1 + \frac{T_{s,g} - T_{s,\zeta}}{T_{h,\zeta} - T_{h,g}} \ln \left( \frac{T_{s,g} - T_{h,\zeta}}{T_{s,g} - T_{h,g}} \right) \right]} W_{T_{h,g}} \right)^2 \\ \left. + \left( \frac{\left( \frac{T_{s,\zeta} - T_{s,g}}{T_{h,\zeta} - T_{h,g}} \right) \left[ \left( \frac{1}{(T_{h,\zeta} - T_{h,g})} \right) \ln \left( \frac{T_{s,g} - T_{h,\zeta}}{T_{s,g} - T_{h,g}} \right) + \left( \frac{1}{(T_{s,g} - T_{h,\zeta})} \right) \right]}{\left[ 1 + \frac{T_{s,g} - T_{s,\zeta}}{T_{h,\zeta} - T_{h,g}} \ln \left( \frac{T_{s,g} - T_{h,\zeta}}{T_{s,g} - T_{h,g}} \right) \right] \ln \left[ 1 + \frac{T_{s,g} - T_{s,\zeta}}{T_{h,\zeta} - T_{h,g}} \ln \left( \frac{T_{s,g} - T_{h,\zeta}}{T_{s,g} - T_{h,g}} \right) \right]} W_{T_{h,\zeta}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (42)$$

olarak elde edilir.

### Hava Tarafına Ait Isı Taşınım Katsayısı İçin Belirsizlik Hesabı

Hava tarafına ait ısı taşınım katsayısı,

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi k_t L} + \frac{\ln(d_c/d_o)}{2\pi k_f L} + \frac{1}{\eta_o h_o A_o} \quad (43)$$

denklemini ile hesaplanır. Hava tarafına ait ısı taşınım katsayısı, ölçülen değerlerin fonksiyonu  $h_o = f(\eta_o, U_o, A_o, d_o, d_i, h_i, A_i, k_t, L, d_c, k_f)$  olarak yazılabilir. Hava tarafına ait ısı taşınım katsayısı için bağlı belirsizlik ifadesi 44 numaralı denklemdenki gibi olmaktadır.

$$\frac{W_{h_o}}{h_o} = \left( \left( \frac{\eta_o}{U_o} - \frac{\eta_o A_o}{h_i A_i} - \frac{\eta_o A_o \ln \left( \frac{d_o}{d_i} \right)}{2\pi k_t L} - \frac{\eta_o A_o \ln \left( \frac{d_c}{d_o} \right)}{2\pi k_f L} \right)^{-1} \right. \\ \times \left[ \left( -\frac{\eta_o}{U_o^2} W_{U_o} \right)^2 + \left( \frac{1}{U_o} W_{\eta_o} \right)^2 + \left( -\frac{A_o}{h_i A_i} W_{\eta_o} \right)^2 + \left( -\frac{\eta_o}{h_i A_i} W_{A_o} \right)^2 + \left( \frac{\eta_o A_o}{h_i^2 A_i} W_{h_i} \right)^2 \right. \\ + \left( \frac{\eta_o A_o}{h_i A_i^2} W_{A_i} \right)^2 + \left( -\frac{A_o \ln \left( \frac{d_o}{d_i} \right)}{2\pi k_t L} W_{\eta_o} \right)^2 + \left( -\frac{\eta_o \ln \left( \frac{d_o}{d_i} \right)}{2\pi k_t L} W_{A_o} \right)^2 + \left( -\frac{\eta_o A_o \left( \frac{1}{d_o} \right)}{2\pi k_t L} W_{d_o} \right)^2 \\ + \left( \frac{\eta_o A_o \left( \frac{1}{d_i} \right)}{2\pi k_t L} W_{d_i} \right)^2 + \left( \frac{\eta_o A_o \ln(d_o/d_i)}{2\pi k_t^2 L} W_{k_t} \right)^2 + \left( \frac{\eta_o A_o \ln(d_o/d_i)}{2\pi k_t L^2} W_L \right)^2 \\ + \left( -\frac{A_o \ln(d_c/d_o)}{2\pi k_f L} W_{\eta_o} \right)^2 + \left( -\frac{\eta_o \ln(d_c/d_o)}{2\pi k_f L} W_{A_o} \right)^2 + \left( -\frac{\eta_o A_o \left( \frac{1}{d_c} \right)}{2\pi k_f L} W_{d_c} \right)^2 \\ \left. + \left( \frac{\eta_o A_o \left( \frac{1}{d_o} \right)}{2\pi k_f L} W_{d_o} \right)^2 + \left( \frac{\eta_o A_o \ln(d_c/d_o)}{2\pi k_f^2 L} W_{k_f} \right)^2 + \left( \frac{\eta_o A_o \ln(d_c/d_o)}{2\pi k_f L^2} W_L \right)^2 \right]^{1/2} \quad (44)$$

**Sürtünme Faktörü İçin Belirsizlik Hesabı**

Sürtünme faktörü,

$$f = \frac{A_{min}\rho_m}{A_o} \left[ \frac{2\Delta P}{\left(\frac{\dot{m}_h}{A_{min}}\right)^2} \right] \quad (45)$$

denklemini ile hesaplanır. Havanın giriş ve çıkış etkileri ihmal edilerek  $\rho_1 = \rho_2$  olarak alınmıştır (Pongsoi, 2012a). Sürtünme faktörü, ölçülen değerlerin fonksiyonu  $f = f(A_{min}, \Delta P, A_o, \rho_h, V_h, a, b)$  olarak yazılabilir. Sürtünme faktörü için bağıl belirsizlik ifadesi

$$\frac{W_f}{f} = \left[ \left( \frac{3W_{A_{min}}}{A_{min}} \right)^2 + \left( \frac{W_{\Delta P}}{\Delta P} \right)^2 + \left( -\frac{W_{A_o}}{A_o} \right)^2 + \left( -\frac{W_{\rho_h}}{\rho_h} \right)^2 + \left( -2\frac{W_{V_h}}{V_h} \right)^2 + \left( -2\frac{W_a}{a} \right)^2 + \left( -2\frac{W_b}{b} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (46)$$

olarak elde edilir.

**Ölçülen Değerlerin Belirsizliklerinin Belirlenmesi**

31, 33, 35, 37, 39, 42, 44 ve 46 numaralı denklemlerde ölçülen değerler cinsinden yazılan bağımsız değişkenlerin belirsizliklerinin belirlenmesi için ölçüm cihazlarını üreten firmaların ölçüm cihazları için belirttiği belirsizlik değerleri de dikkate alınmıştır. Tablo 2’ de ölçülen değerlerin doğruluk ve B tipi belirsizlik değerleri gösterilmiştir.

Termofiziksel özelliklerin belirsizliği termofiziksel özellikleri veren deneysel fonksiyonların ve ölçülen sıcaklığın belirsizliğinin birleşiminden oluşmaktadır. Bu çalışmada termofiziksel özelliklerin belirsizliği hesaplanan değerlerin %5’i olarak alınmıştır (Claesson, 2004). Geometrik parametrelerin belirsizliği hesaplanan değerinin %2 si olarak ele alınmıştır (Claesson, 2004).

Deneysel çalışmada yapılan ölçümlerden kaynaklanan ve hesaplanan değerler için yapılan belirsizlik hesaplamaları sonucu 3 numaralı Tabloda gösterilmiştir.

**Tablo.2** Ölçülen değerlerin belirsizlikleri

Ölçülen Değerler	Doğruluk	B tipi Belirsizlik
Havanın giriş sıcaklığı	$\pm 0.5$ °C	$U_{T_{h,g}} = 0.29$ °C
Havanın çıkış sıcaklığı	$\pm 0.5$ °C	$U_{T_{h,c}} = 0.29$ °C
Suyun giriş sıcaklığı	$\pm 0.01$ °C	$U_{T_{s,g}} = 5.8 \times 10^{-3}$ °C
Suyun çıkış sıcaklığı	$\pm 0.01$ °C	$U_{T_{s,c}} = 5.8 \times 10^{-3}$ °C
Hava tarafı basınç kaybı	$\pm \%2$	$U_{\Delta P} = 0.012$ Pa
Suyun hacimsel debisi	$\pm \%2.5$	$U_{V_s} = 0.014$ L/dak
Havanın hızı	$\pm 0.03$ m/s	$U_{V_h} = 0.017$ m/s

**Tablo.3** Belirsizlik analizi sonuçları

Hesaplanan Değerler	Belirsizlik Değeri ( $\pm\%$ )
Su tarafında olan ısı geçişi ( $Q_s$ )	1.743
Hava tarafında olan ısı geçişi ( $Q_h$ )	9.104
Su tarafına ait Reynolds sayısı ( $Re_s$ )	2.087
Hava tarafına ait Reynolds sayısı ( $Re_h$ )	2.325
Toplam ısı geçiş katsayısı ( $U_o$ )	2.231
Su tarafına ait ısı taşınım katsayısı ( $h_i$ )	1.661
Hava tarafına ait ısı taşınım katsayısı ( $h_o$ )	2.453
Sürtünme faktörü ( $f$ )	5.066

**Sonuçlar ve Tartışma**

Bu çalışmada, kanatlı borulu ısı değiştirici için yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçların ve hesaplanan değerlerin belirsizlik analizi yapılmıştır. Tablo 2’de ölçülen değerlerin B tipi belirsizlik sonuçları görülmektedir. Kullanılan cihazların ölçüm hassasiyetine bağlı olarak B tipi belirsizlik değerlerinin değiştiği ve daha hassas ölçüm alınabilen cihazların B tipi belirsizliklerinin de düşük olduğu Tablo 2’de açıkça görülmektedir. Tablo 3’de tablodan okunan ve deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara göre hesaplanan değerler için yapılan belirsizlik analizi sonucunda elde edilen belirsizlik

değerleri görülmektedir. Hava ve su tarafına olan ısı geçişleri için yapılan belirsizlik analizi sonucunda hava tarafına olan ısı geçişinin belirlenmesindeki belirsizliğin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise havanın giriş ve çıkışında kullanılan termoelemanların su tarafının ölçülmesinde kullanılan termoelemanlardan daha az hassasiyette ölçüm yapması ve havanın giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın düşük, suyun giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın ise yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Su hava tarafından olan ısı geçişinin dışındaki hesaplanan değerlere bakıldığında ise en yüksek belirsizlik değerinin sürtünme faktöründe olduğu görülmektedir. Yapılan bu çalışma ile deneysel sonuçlardan elde edilen verilerin ne ölçüde gerçeği yansıttığı anlaşılmaktadır. Ayrıca bundan sonra yapılacak olan deneysel çalışmaların hesaplamaları için yapılacak olan belirsizlik analizine yardımcı olmak amaçlanmaktadır. Deneysel çalışmalara başlanmadan önce hesaplama adımlarının çıkarılması, her bir ölçülen ve hesaplanacak olan değer için belirsizlik analizi yapılarak elde edilecek sonuçların belirsizliğinin ne oranda olduğunun belirlenmesi ve sistem kurulmadan önce belirsizlik değerini minimuma indirecek önlemlerin alınması deneysel çalışma sonunda elde edilecek verilerin gerçeğe en yakın oranda yaklaşmasını sağlayacaktır.

## Semboller

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$A_o$	Toplam ısı geçiş yüzey alanı, $m^2$
$A_i$	Toplam boru içi yüzey alanı, $m^2$
$c_p$	Özgül ısı, $J/kg K$
$d_i$	Boru iç çapı, $m$
$d_c$	Kanat ayak dış çapı, $m$
$d_o$	Boru dış çapı, $m$
$f$	Sürtünme faktörü
$f_p$	Kanat hatvesi, $m$
$f_t$	Kanat kalınlığı, $m$
$h_i$	Su tarafına ait ısı taşınım katsayısı, $W/m^2K$
$h_o$	Hava tarafı ısı taşınım katsayısı, $W/m^2K$
$k$	Isı iletim katsayısı, $W/mK$
$L$	Boru boyu, $m$
$\dot{m}$	Kütle debisi, $kg/s$
$Nu$	Nusselt sayısı
$NTU$	Geçiş birimi sayısı

$P_1$	Sıcaklık etkinliği
$Pr$	Prandtl sayısı
$Q$	Isı geçişi, $W$
$R_1$	Isıl kapasite debileri oranı
$Re$	Reynolds sayısı
$T$	Sıcaklığı, $K$
$U_o$	Toplam ısı geçiş katsayısı, $W/m^2K$
$V_h$	Havanın ısı değiştiriciye giriş hızı, $m/s$
$\dot{V}$	Hacimsel debi, $m^3/s$
$\rho$	Yoğunluk, $kg/m^3$
$\mu$	Dinamik viskozite, $kg/m \cdot s$
$\nu$	Kinematik viskozite, $m^2/s$
$\eta_o$	Toplam yüzey verimi
$\eta$	Kanat verimi

## Alt İndis

$\zeta$	Çıkan
$f$	Kanat
$g$	Giriş
$h$	Hava
$s$	Su
$t$	Boru
$y$	Yüzey

## Kaynaklar

- Bilirgen H, Dunbar S, Levy EK. (2013). "Numerical modeling of finned heat exchangers". *Journal Applied Thermal Engineering*, 61(2), 278-288.
- Claesson J. (2004). Thermal and Hydraulic Performance of Compact Braze Plate Heat Exchangers Operating as Evaporators in Domestic Heat Pumps. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, KTH, Stockholm, Sweden.
- Coblentz LC. (2009). Uncertainty Analysis of Heat Exchanger. Msc Thesis, Mechanical Engineering in the Faculty of Engineering at the Rand Africans University, Johannesburg, South Africa.
- Coleman HW, Steele WG. (2009). Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers. 3rd ed. Hoboken, New Jersey, USA, John Wiley and Sons.
- Freund JE, Simon GA. (1992). Modern Elementary Statistics. 8th ed. New Jersey, USA, Prentice-Hall International, Inc.
- JCGM 100:2008, (2008). "Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement". First edition, September. [http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM\\_100\\_2008\\_E.pdf](http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf) (22.09.2015)

- Kawaguchi K, Okui K, Kashi T. (2005). "Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Finned Tube Banks in Forced Convection (Comparison of the Heat Transfer Characteristics between Spiral Fin and Serrated Fin)". *Heat Transfer—Asian Research*, 34(2), 120-133.
- Kawaguchi K, Okui, K, Asai, T, Hasegawa Y. (2006). "The Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of the Finned Tube Banks in Forced Convection (Effects of Fin Height on Heat Transfer Characteristics)". *Heat Transfer—Asian Research*, 35(3), 194-208.
- Kırtepe E. (2014). Kanatlı Dairesel Borularda Isı Transfer Etkinliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Kraus AD, Aziz A, Welty J. (2001). *Extended Surface Heat Transfer*. New York, USA, John Wiley & Sons.
- Mathioulakis E, Vorpoulos K, Belessiotis V. (1999). "Assessment of Uncertainty In Solar Collector Modeling and Testing". *Solar Energy*, 66(5), 337-347.
- Ma Y, Yuan Y, Liu Y, Hu X, Huang Y. (2012). "Experimental investigation of heat transfer and pressure drop in serrated finned tube banks with staggered layouts". *Applied Thermal Engineering*, 37, 314-323.
- Mon MS, Gross U. (2004). "Numerical study of fin-spacing effects in annular-finned tube heat exchangers". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 1953-1964.
- Müller-Schöll, C, Frei, U. (2000). "Uncertainty Analyses In Solar Collector Measurement". EuroSun Conference, Copenhagen, Denmark.
- Næss E. (2010). "Experimental investigation of heat transfer and pressure drop in serrated-fin tube bundles with staggered tube layouts". *Applied Thermal Engineering*, 30, 1531-1537.
- Nasa Handbook, (2010). "Measurement Uncertainty analysis principles and methods". NASA-HDBK-8739.19-3.  
<http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/doctree/NH BK873919-3.pdf> (06.10.2015)
- Pongsoi P, Pikulkajorn S, Wang CC, Wongwises S. (2011). "Effect of fin pitches on the air-side performance of crimped spiral fin-and-tube heat exchangers with a multipass parallel and counter cross-flow configuration". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 2234-2240.
- Pongsoi P, Pikulkajorn S, Wongwises S. (2012a). "Experimental study on the air-side performance of a multipass parallel and counter cross-flow L-footed spiral fin-and-tube heat exchanger". *Heat transfer engineering*, 33(15), 1251-1263.
- Pongsoi P, Pikulkajorn S, Wongwises S. (2012b). "Effect of fin pitches on the optimum heat transfer performance of crimped spiral fin-and-tube heat exchangers". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 6555-6566.
- Sabatelli V, Marano D, Braccio G, Sharma VK. (2002). "Efficiency test of solar collectors: uncertainty in the estimation of regression parameters and sensitivity analysis". *Energy Conversion and Management*, 43, 2287-2295.
- Sadikhov E, Kangı R, Uğur S. (1995). "Ölçüm Belirsizliği", Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME), 95-104.
- Shah RK, Sekulic DP. (2003). *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. Hoboken, New Jersey, USA, John Wiley & Sons.
- Tatara RA, Lupia GM. (2011). "Assessing heat exchanger performance data using temperature measurement uncertainty". *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 3(8).
- Uhia FJ, Campo A, Fernandez-Seara J. (2013). "Uncertainty Analysis for Experimental Heat Transfer Data Obtained by the Wilson Plot Method Application to Condensation on Horizontal Plain Tubes". *Thermal Science*, 17(2), 471-487.
- Wang CC, Chi KY, Chang CJ. (2000). "Heat transfer and friction characteristics of plain fin-and-tube heat exchangers, part II: Correlation". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 2693-2700.

## Uncertainty analysis of fin and tube heat exchangers

### Extended abstract

*In this experimental study, air side heat transfer and flow characteristics of L-footed spiral fin-and-tube heat exchanger have been analyzed. The experimental set-up consisted of heat exchanger, air duct, blower, blower speed regulation unit, hot water tank, water pump, temperature control system (Proportional Integral Derivative), velocity and temperature measuring devices and data collection unit. There were four rows of tubes in the air flow direction and four tubes per row in the heat exchanger. The hot water was flowed through the tubes while the ambient air was flowed cross flow over the tubes. The tubes in the heat exchanger were placed as four lines each as shifted rows in both parallel and perpendicular directions to the air flow. Tubes were in staggered arrangement in the heat exchanger. In the experiments, the frontal velocity of the ambient air passing in cross-flow over the tubes was kept in six different values while the inlet temperature of the water passing through the pipes was kept in four different values and the flow rate of the water was fixed to  $3.83 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ . For measuring the air velocity, telescopic air velocity measuring sensor with the operating range between 0 and 10 m/s and between -20 and 70 °C temperature was used. Accuracy of the sensor in terms of temperature and velocity was  $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$  and  $\pm 0.03 \text{ m/s}$ , respectively. For measuring the pressure drop, differential pressure meter with operating range between 0 and 500 Pascal and with accuracy of  $\pm 2\%$  was used. For measuring the water flow rate, an electromagnetic flow meter with operating range between 0 °C and 80 °C and with accuracy of  $\pm 2.5\%$  was used. J Type thermocouple with operating range between -200 and +800 °C and with accuracy of  $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$  was used for measuring the air temperature. PT-100 with accuracy of  $\pm 0.01 \text{ }^\circ\text{C}$  was used for measuring the water temperature. Experimental studies are not free of errors and uncertainties. Errors are defined as the difference between the measured value and the true value of measurand. Experimental errors can be classified in two groups: systematic errors and random errors. Systematic errors can be defined as the difference between the measured value and the true value of measurand. Systematic errors affect the accuracy of a measurement. Systematic errors are one-sided errors. Random errors affect the precision of a*

*measurement. Random errors are two-sided errors. The uncertainty of measurement is defined as a parameter characterizing the dispersion of the values attributed to a measured quantity. Standard uncertainties in experimental data are determined by taking into account type A and type B uncertainties. Type A uncertainty depends on the specific conditions of the measurement. It can be reduced by increasing the number of measurements. Type B uncertainty depends on the measuring instrument. It can not be reduced by increasing the number of measurements. Errors and uncertainties in experimental studies can come from measuring instrument, data provided in calibration, measurement process, operator skill, nonrepresentative sampling, finite instrument resolution, environment, others. Therefore all these sources have to be identified for each measured in order to calculate the uncertainty of the result. Uncertainty analysis is a power tool for the planning and designing of experiments. In this study, the uncertainty analyses in fin-and-tube heat exchanger were explained. The uncertainty in determining the heat transfer rate, the heat transfer coefficient, the overall heat transfer coefficient and friction factor were calculated. The uncertainties for the water side and the air side heat transfer rate were calculated as  $\pm 1.743\%$  and  $\pm 9.104\%$  respectively. The uncertainties for the water side and the air side heat transfer coefficient, the overall heat transfer coefficient were calculated as  $\pm 1.66\%$ ,  $\pm 2.453\%$  and  $\pm 2.231\%$  respectively. The uncertainty for friction factor was calculated as  $\pm 5.066\%$ .*

**Keywords:** Heat exchanger, finned tube, spiral fin, uncertainty