

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**RANQUE-HILSCH VORTEKS TÜPÜNDE ENERJİ AYRIŞMASININ
DENEYSEL VE TERMODİNAMİK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Burak MARKAL

**OCAK 2010
TRABZON**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

RANQUE-HILSCH VORTEKS TÜPÜNDE ENERJİ AYRIŞMASININ
DENEYSEL VE TERMODİNAMİK İNCELENMESİ

Mak. Müh. Burak MARKAL

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“Makina Yüksek Mühendisi”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09.12.2009
Tezin Savunma Tarihi : 07.01.2010

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Orhan AYDIN

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Mehmet Emin ARICI

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Fazlı ARSLAN

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2010

ÖNSÖZ

Vorteks tüp, oldukça basit bir yapıya sahip olmasına rağmen, sadece sıkıştırılmış gaz kullanarak, anlık ısıtma ve soğutma yapabilen basit bir cihazdır. 1930'lu yıllarda Fransız bilim adamı Ranque tarafından tasarlanan vorteks tüpleri, 1940'lı yıllarda Hilsch'in yaptığı çalışmalarla bilim dünyasında popüler hale gelmiş ve bu iki isme atfen literatüre Ranque-Hilsch vorteks tüpü olarak girmiştir.

Bu yüksek lisans tezi kapsamında, bazı geometrik ve termofiziksel parametrelerin vorteks tüpü performansı üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiş ve vorteks tüplerinin termodinamik analizleri yapılmıştır. Sistem üzerinde termal kamera ile görüntüler alınmıştır.

Bu tez çalışmasında, değerli görüş ve önerileriyle beni yönlendiren değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Orhan AYDIN'a, deney düzeneğinin kurulması aşamasında bana yardımcı olan Yrd. Doğ. Dr. Mete AVCI ve Arş. Gör. Cemalettin AYGÜN'e teşekkürlerimi bir borę bilirim.

Bu  alışma, Türkiye Bilimler Akademisi (TÜBA) GEBİP programı kapsamında desteklenmiştir. Desteğinden dolayı T BA'ya şukranlarımı sunarım.

Bu çalışmayı, manevi yönden desteğini hiğ esirgemeyen değerli eşim Yasemin MARKAL'a ithaf ediyorum.

Burak MARKAL
Trabzon 2010

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VII
TABLolar DİZİNİ.....	XXVI
SEMBOLLER DİZİNİ	XXVII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Karşıt Akışlı Vorteks Tüpü.....	1
1.3. Paralel Akışlı Vorteks Tüpü	2
1.4. Enerji Ayrışması ve Enerji Ayrışması ile İlgili Teoriler	3
1.5. Vorteks Tüplerinin Uygulama Alanları, Avantaj ve Dezavantajları	4
1.5.1. Vorteks Tüpünün Uygulama Alanları	5
1.5.2. Vorteks Tüpünün Avantajları	7
1.5.3. Vorteks Tüpünün Dezavantajları.....	7
1.6. Literatür Araştırması.....	8
1.7. Tez Çalışmasının Konusu ve Amacı	18
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	20
2.1. Deney Düzenegi	22
2.2. Deneysel Ölçümler ve Kullanılan Ölçüm Cihazları	26
2.2.1. Sıcaklık Ölçümü	26
2.2.2. Debi Ölçümü.....	26
2.2.3. Basınç Ölçümü	26
2.2.4. Basınç Regülasyonu	27
2.3. Deneysel Hesaplama Prosedürü	28
2.3.1. Vorteks Tüpleri İçin Temel İfadeler	28
2.3.1.1. Soğuk Kütle Oranı	28
2.3.1.2. Soğuk Hava Sıcaklık Farkı	28
2.3.1.3. Sıcak Hava Sıcaklık Farkı	29
2.3.1.4. Toplam Sıcaklık Farkı	29

2.4.	Belirsizlik Analizi.....	29
2.5.	Vorteks Tüplerinin Termodinamik Analizi	34
2.5.1.	Termodinamiğin Birinci Yasası Açısından Vorteks Tüplerinin İncelenmesi	34
2.5.2.	Termodinamiğin İkinci Yasası Açısından Vorteks Tüplerin İncelenmesi	36
2.5.2.1.	Termodinamiğin İkinci Yasası ile İlgili Genel Bilgiler.....	36
2.5.2.2.	Sürekli Akışlı Açık Sistemlerin İkinci Yasa Çözümlemesi.....	37
2.5.2.3.	İkinci Yasanın Vorteks Tüplerine Uygulanması	39
2.5.2.4.	Vorteks Tüpleri İçin Ekserji Eşitliği.....	40
2.6.	Vorteks Tüplerinde Verim İfadeleri	42
2.6.1.	Vorteks Tüplerinin Isıl Verimleri	42
2.6.2.	Adyabatik Genişleme Bakımından Vorteks Tüpü Verimi.....	44
2.6.3.	Carnot Verimi	45
2.6.3.1.	Carnot Performans Katsayıları	45
2.6.4.	Carnot Çevrimini Referans Alan Verim İfadeleri	46
3.	BULGULAR	47
3.1.	Ölçülen Değerler.....	47
3.2.	Hesaplanan Değerlerden Elde Edilen Bulgular	47
3.3.	Optimum Geometriye Termodinamiğin Birinci ve İkinci Yasalarının Uygulanması Sonucunda Elde Edilen Bulgular	220
3.4.	Yalıtım Etkisinin İncelenmesi Amacıyla Yapılan Deneylelerden Elde Edilen Bulgular	224
3.5.	Nem Etkisinin İncelenmesi Amacıyla Yapılan Deneylelerden Elde Edilen Bulgular	227
3.6.	Ortam Sıcaklığı Etkisinin İncelenmesi Amacıyla Yapılan Deneylelerden Elde Edilen Bulgular	230
3.7.	Belirsizlik Analizinden Elde Edilen Bulgular	232
3.8.	Termal Kamera Görüntülerinden Elde Edilen Bulgular.....	233
4.	İRDELEME	234
5.	SONUÇLAR.....	239
6.	ÖNERİLER	240
7.	KAYNAKLAR.....	241
	ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Vorteks tüpü, hiçbir kimyasal reaksiyon ve dışarıdan uygulanan enerji olmaksızın, sıkıştırılmış gaz akışını eş zamanlı olarak, sıcak ve soğuk olmak üzere iki farklı akışa ayıran basit bir mekanizmadır.

Bu tez kapsamında vorteks tüpleriyle ilgili olarak deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır. Akışkanın test bölgesine girerken maruz kaldığı enerji kaybını ve ani yön değiştirmesini engellemek amacıyla, helisel formda ve farklı uzunluklarda vorteks üreticileri tasarlanmıştır. Bu geometrik tasarımla birlikte, basınç, tüp uzunluğu ve konik uç açısının sistem performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sıcak akış ve soğuk akış için elde edilen sıcaklıklar arasındaki fark, optimizasyon için hedef parametre seçilmiştir. Seçilen parametrelerin incelenen aralıklarında, maksimum sıcaklık farkını veren değerler optimum değerler olarak tanımlanmıştır. Çalışma kapsamında ayrıca, giriş akışkanının nemi, ortam sıcaklığı ve vorteks tüp yalıtımının etkisi de incelenmiştir. Yine deneysel çalışmalar kapsamında, termal kamera yardımıyla vorteks tüp yüzey sıcaklık dağılımı belirlenmiş ve bu bilgi durma noktasının yerini belirlemede kullanılmıştır. Ayrıca Termodinamiğin 1. ve 2. yasaları kullanılarak termodinamik analiz yapılmış ve elde edilen sonuçlar termodinamik açıdan tartışılmıştır. Nihai olarak, vorteks tüp içerisindeki akış için önemli parametrelerden biri olan durma noktasının yerinin tayininde termal kamera ölçümlerinden yararlanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Vorteks tüp, Vorteks üretici, Termodinamik analiz, Durma noktası

SUMMARY

Experimental and Theoretical Investigation of Energy Separation in Ranque-Hilsch Vortex Tube

Vortex tube is a simple device which separates the compressed gas flow into two flows of high and low temperature.

In this thesis, experimental and theoretical studies are carried out on vortex tubes. In order to prevent energy loss and sudden change in the direction of the flow, helical vortex tubes are designed at different length. Besides the vortex generators, effects of L/D, angle of control valve and pressure on the performance of the system are investigated. The temperature difference between cold and hot flows has been chosen as a target parameter for optimization. For the values investigated the ones which have given the maximum temperature difference, have been chosen as optimum values. Also, humidity of working air, temperature of environment and insulation effect of Vortex tube have been investigated. Furthermore, by using the first and second laws of thermodynamics, the thermo dynamical analysis has been done. The results have been investigated in view of these laws. Lastly, the location of stagnation point has been determined by using thermal camera.

Key Words: Vortex Tube, Vortex Generator, Thermo dynamical Analysis, Stagnation Point

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Karşıt akışlı vorteks tüpü şematik resmi.....	2
Şekil 2.	Paralel akışlı vorteks tüpü şematik resmi	3
Şekil 3.	Frezeleme işleminde spot soğutma olarak.....	5
Şekil 4.	Taşlama işleminde spot soğutma olarak.....	6
Şekil 5.	Kabin soğutucularda vorteks tüpü uygulaması.....	6
Şekil 6.	İtfaiyeci elbiselerinin soğutulması.....	6
Şekil 7.	Ultrasonik kaynak esnasında parçaların soğutulması.....	7
Şekil 8.	Çalışmada kullanılan vorteks üretici.....	20
Şekil 9.	Çalışmada kullanılan konik ucun üç boyutlu çizimi	21
Şekil 10.	Deneyisel çalışmada kullanılan vorteks tüpünün demontajlı gösterimi	23
Şekil 11.	Deney düzeneğinin fotoğrafı	24
Şekil 12.	Test bölgesinin fotoğrafı.....	24
Şekil 13.	Vorteks tüpü deney düzeneğinin şematik olarak gösterimi.....	25
Şekil 14.	Deneyisel çalışmada kullanılan ölçüm cihazları.....	27
Şekil 15.	Karşıt akışlı vorteks tüpü için kontrol hacmi.....	35
Şekil 16.	Sistemin kararlı hale gelme süresi için ΔT 'nin, zamanla (t) değişimi.....	48
Şekil 17.	Soğuk uç sıcaklık farkının (ΔT_c), giriş basıncı (P_i) ile değişimi	49
Şekil 18.	$h=30\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=30^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi	49
Şekil 19.	$h=30\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=45^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi	50
Şekil 20.	$h=30\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=60^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi	50
Şekil 21.	$h=30\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=75^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi	51
Şekil 22.	$h=30\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=90^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi	51
Şekil 23.	$h=30\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=180^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi	52
Şekil 24.	$h=30\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=30^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi	52

Şekil 344.	L/D=20, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi	212
Şekil 345.	L/D=10, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi	213
Şekil 346.	L/D=10, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi	213
Şekil 347.	L/D=10, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi	214
Şekil 348.	L/D=40, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi	214
Şekil 349.	L/D=40, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi	215
Şekil 350.	L/D=40, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi	215
Şekil 351.	L/D=30, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi	216
Şekil 352.	L/D=30, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi	216
Şekil 353.	L/D=30, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi	217
Şekil 354.	L/D=20, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi	217
Şekil 355.	L/D=20, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi	218
Şekil 356.	L/D=20, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi	218
Şekil 357.	L/D=10, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi	219
Şekil 358.	L/D=10, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi	219
Şekil 359.	L/D=10, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi	220
Şekil 360.	Optimum geometride, soğuk uç sıcaklık farkı bakımından teorik ve deneysel Y_c ifadelerinin karşılaştırılması	221
Şekil 361.	Optimum geometride, sıcak uç sıcaklık farkı bakımından teorik ve deneysel Y_c ifadelerinin karşılaştırılması	221
Şekil 362.	Optimum geometri için, farklı basınç değerlerinde entropi üretiminin soğuk kütle oranı (Y_c) ile değişimi	222
Şekil 363.	Optimum geometri için, farklı basınç değerlerinde birim zamanda entropi üretiminin soğuk kütle oranı (Y_c) ile değişimi	222

Şekil 364.	Optimum geometri için, farklı basınç değerlerinde tersinmezliğin soğuk kütle oranı (Y_c) ile değişimi	223
Şekil 365.	Optimum geometri için, farklı basınç değerlerinde toplam sıcaklık farkının (ΔT), soğuk kütle oranı (Y_c) ile değişimi	223
Şekil 366.	Optimum geometri için, farklı basınç değerlerinde sıcaklık değerlerinin, soğuk kütle oranı (Y_c) ile değişimi	224
Şekil 367.	$h=10\text{mm}$, $L/D=40$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için sıcaklık farkları açısından yalıtım etkisini	225
Şekil 368.	$h=10\text{mm}$, $L/D=40$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ da yalıtımlı ve yalıtımsız durumlar için izantropik verim	225
Şekil 369.	$h=10\text{mm}$, $L/D=40$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ da yalıtımlı ve yalıtımsız durumlar için soğutma makinesi olarak vorteks tüp verimlerinin karşılaştırılması	226
Şekil 370.	$h=10\text{mm}$, $L/D=40$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ da yalıtımlı ve yalıtımsız durumlar için ısı pompası olarak vorteks tüp verimlerinin karşılaştırılması	226
Şekil 371.	Kurutucunun devrede ($\phi=\%12.2$) ve devre dışı ($\phi=\%19.6$) olması durumları için nem etkisinin incelenmesi (ΔT_c ve ΔT_h açısından)	227
Şekil 372.	Kurutucunun devrede ($\phi=\%12.2$) ve devre dışı ($\phi=\%19.6$) olması durumları için nem etkisinin incelenmesi (ΔT açısından)	228
Şekil 373.	Kurutucunun devrede ($\phi=\%12.2$) ve devre dışı ($\phi=\%19.6$) olması durumları için nem etkisinin incelenmesi (T_c ve T_h açısından)	228
Şekil 374.	Kurutucunun devrede ($\phi=\%12.2$) ve devre dışı ($\phi=\%19.6$) olması durumları için nem etkisinin incelenmesi (η açısından)	229
Şekil 375.	Kurutucunun devrede ($\phi=\%12.2$) ve devre dışı ($\phi=\%19.6$) olması durumları için nem etkisinin incelenmesi ($\eta_{CN,SM}$ açısından)	229
Şekil 376.	Kurutucunun devrede ($\phi=\%12.2$) ve devre dışı ($\phi=\%19.6$) olması durumları için nem etkisinin incelenmesi ($\eta_{CN,IP}$ açısından)	230
Şekil 377.	$h=10\text{mm}$, $L/D=30$, $P_i=3\text{bar}$ ve $\phi=45^\circ$ için farklı ortam sıcaklıklarında sıcaklık farklarının Y_c ile değişimi	231
Şekil 378.	$h=10\text{mm}$, $L/D=30$, $P_i=3\text{bar}$ ve $\phi=45^\circ$ için farklı ortam sıcaklıklarında toplam sıcaklık farkının (ΔT), Y_c ile değişimi	231
Şekil 379.	$h=10\text{mm}$, $L/D=30$, $P_i=3\text{bar}$ ve $\phi=45^\circ$ için farklı ortam sıcaklıklarında sıcaklık değerlerinin (T_c ve T_h), Y_c ile değişimi	232
Şekil 380.	$Y_c=0.2$, $P_i=4\text{bar}$ için termal kamera görüntüsü	233
Şekil 381.	$Y_c=0.67$, $P_i=4\text{bar}$ için termal kamera görüntüsü	233
Şekil 382.	$Y_c=0.87$, $P_i=4\text{bar}$ için termal kamera görüntüsü	233

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Günümüze kadar yapılan çalışmaların özeti.....	16
Tablo 2. Çalışmada kullanılan geometrik parametreler ve değerleri.....	23
Tablo 3. Çalışmada kullanılan ölçüm cihazları ve özellikleri.....	27
Tablo 4. Belirsizlik analizi sonuçları	232

SEMBOLLER DİZİNİ

c_p	: Sabit basınçta özgül ısı, [kJ/kgK]
c_v	: Sabit hacimde özgül ısı, [kJ/kgK]
COP	: Etkinlik katsayısı
CW	: Kompresör işi, [kJ]
D	: Çap, [m]
e	: Ekserji, [kJ/kg]
F	: Belirsizlikte bir fonksiyon
h	: Özgül entalpi, [kJ/kg]
h	: Helis uzunluğu, [m]
i	: Özgül tesinmezlik, [kJ/kg]
I	: Tersinmezlik, [kJ]
k	: Özgül ısılar oranı
L	: Uzunluk, [m]
m	: Kütle, [kg]
\dot{m}	: Kütleli debi, [kg/s]
P	: Basınç, [bar]
Q	: Toplam ısı geçişi, [kJ]
R	: Gaz sabiti, [kJ/kgK]
s	: Özgül entropi, [kJ/kgK]
S	: Toplam entropi, [kJ/K]
$S_{\text{üretim}}$: Toplam entropi üretimi, [kJ/K]
T	: Sıcaklık, [°C]
V	: Hız, [m/s]
W	: Toplam iş, [kJ]
w	: Birim kütle için iş, [kJ/kg]
x	: Belirsizlikte F fonksiyonunun bağımsız değişkenleri
X	: Boyutsuz basınç düşümü
Y_c	: Soğuk kütle oranı
z	: Yükseklik, [m]

α	: Isı iletim katsayısı, [W/mK]
Δ	: Miktarda sonlu değişim
ΔT	: Sıcaklık farkı, [°C]
ε, η	: Verim
θ	: Birim kütlenin toplam enerjisi, [kJ]
ρ	: Yoğunluk, [kg/m ³]
σ	: Hata (belirsizlik) değeri
v	: Özgöl hacim, [m ³ /kg]
φ	: Bağıl nem
ϕ	: Konik uç açısı
ψ	: Kullanılabilirlik, [kJ/kg]
∇	: Hacimsel debi, [m ³ /s]

Alt indisler

a	: Atmosfer
c	: Soğuk uç çıkış
CN	: Carnot
cs	: İzantropik çıkış
h	: Sıcak uç çıkış
IP	: Isı pompası
i	: Giriş
is	: İzantropik
o,0	: Çevre, ortam
SM	: Soğutma makinesi
tc	: Toplam çıkan
tr	: Tersinir
vt	: Vorteks tüpü
y	: Yararlı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Mühendislik uygulamalarında amaç, mümkün olduğunca az miktarda malzeme kullanımı ve enerji tüketimi ile istenilen amaca ulaşmaktır. Endüstride soğutma veya ısıtma amaçlı kullanılan makinelerin çoğu hem yüksek maliyetlidir, hem de fazla enerji harcamaktadır. Bu amaç doğrultusunda, özellikle spot soğutma gereken yerlerde maliyet ve enerji tüketimini en aza indirmek için alternatif bir yöntem vorteks tüp kullanmaktır.

Vorteks tüpü, hiçbir kimyasal reaksiyon ve dışarıdan uygulanan enerji olmaksızın, sıkıştırılmış gaz akışını eş zamanlı olarak, sıcak ve soğuk olmak üzere iki farklı akışa ayıran basit bir mekanizmadır. Vorteks tüpü, ilk olarak bir fizikçi ve aynı zamanda metalürji uzmanı olan Fransız bilim adamı Ranque (1932) tarafından icat edilmiştir. Termodinamiksel açıdan veriminin düşük olması nedeniyle, bilim komitelerinin bu buluşa ilk tepkisi mesafeli olmuştur. 1940'lı yıllarda Alman bilim adamı Hilsch, vorteks tüpü mekanizmasını yeniden gündeme getirmiştir. Hilsch, sistem performansı üzerine çalışmıştır ve çalışmaları doğrultusunda enerji ayrışması olayını yorumlamıştır. Ranque ve Hilsch'in çalışmaları, konunun bilim dünyasında önem kazanmasına neden olmuştur. 1950'li yıllardan sonra vorteks tüpler üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların genel amacı, performansı arttırmak ve henüz nedeni tam olarak açıklanamayan enerji ayrışması olayının fiziksel mekanizmasını ortaya koymaktır (Eiamsa ve Promvonge, 2008)

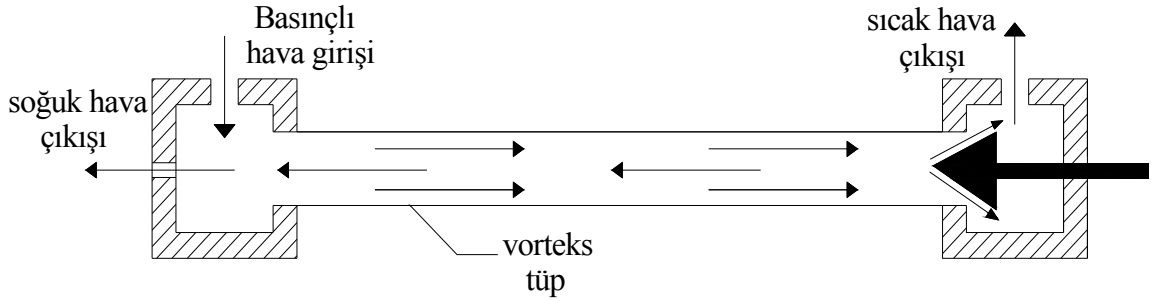
Genel olarak vorteks tüpleri ikiye ayrılmaktadır. Karşıt akışlı (standart) vorteks tüpler ve tek yönlü (paralel) vorteks tüplerdir. Şekil 1 ve 2'de karşıt ve paralel akışlı vorteks tüpler gösterilmektedir.

1.2. Karşıt Akışlı Vorteks Tüp

Karşıt akışlı vorteks tüplerde, tüpün her iki ucunda da birer çıkış bulunmaktadır. Basınçlı gaz tüpün giriş lülesinden teğetsel olarak yüksek hızlarda tüpe girer. Tüpün içerisine giren gaz, dönme hareketi kazanır. Yüksek basınçlı gaz, bir durma noktasından

itibaren cidar boyunca çevresel hareket eden sıcak akış ve bu akışa ters yönde ve daha hızlı bir şekilde, eksen boyunca hareket eden soğuk akış olacak şekilde iki kısma ayrılır.

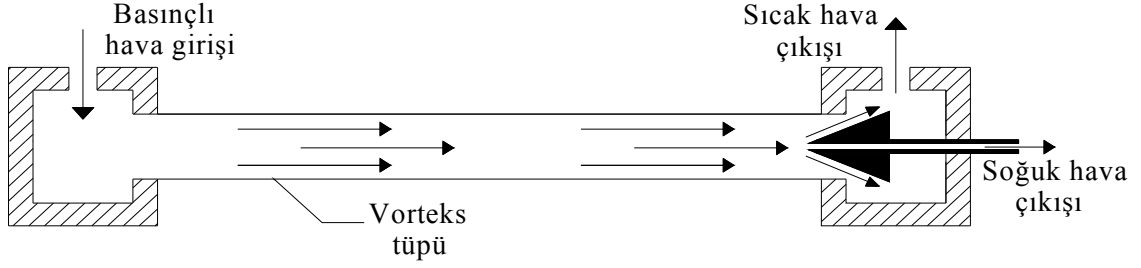
Sıcak havanın tüpü terk ettiği uca sıcak uç, soğuk havanın tüpü terk ettiği uca ise soğuk uç denilmektedir. Soğuk uca dairesel bir orifis bulunur. Eksen etrafında dönerek ters yönde hareket eden akış, bu orifisten geçerek tüpü terk eder. Sıcak ucun bulunduğu kısımda ise soğuk ve sıcak kütleler ayarlamada kullanılan konik bir vana bulunur. Bu konik uç, aksel doğrultuda merkezlenmiştir. Konik ucun ileri-geri hareket ettirilmesi durma noktasının konumunu da etkilemektedir.



Şekil 1. Karşıt akışlı vorteks tüpü şematik resmi

1.3. Paralel Akışlı Vorteks Tüp

Paralel akışlı vorteks tüplerde, giriş lülesi tarafında çıkış bulunmaz. Her iki çıkış da aynı taraftadır. Enerji ayrışması nedeniyle standart vorteks tüplerde olduğu gibi farklı hızlarda ve sıcaklıklarda olan iki akış söz konusudur. Yalnız, standart vorteks tüplerinden farkı, bu akışların zıt yönde değil de aynı yönde hareket etmesidir. Soğuk akışkan, vananın orta kısmına açılan delikten, sıcak akış ise çevresel olarak karşıt akışlı vorteks tüplerinde olduğu gibi tüpü terk eder. Yalnız, paralel akışlı vorteks tüplerde sıcak ve soğuk akışların karışma ihtimali daha yüksek olduğu için, verimleri standart vorteks tüplere göre daha düşüktür ve bu nedenle genellikle tercih edilmezler.



Şekil 2. Paralel akışlı vorteks tüpü şematik resmi

1.4. Enerji Ayrışması ve Enerji Ayrışması ile İlgili Teoriler

Enerji ayrışması; bir akışkan hareketindeki toplam enerjinin, dışarıdan uygulanan herhangi bir iş veya ısı olmaksızın, akışkanın bir kısmının toplam enerjisinin girişteki akışkanın toplam enerjisinden daha yüksek, diğer kısmının toplam enerjisinin ise girişteki akışkanın toplam enerjisinden daha düşük olacak şekilde tekrar dağılmasıdır (Nimbalkar ve Muller, 2008).

Vorteks tüpün icadından günümüze kadar, enerji ayrışması olayının nasıl gerçekleştiği konusunda pek çok teori ortaya atılmıştır. Vorteks tüpe patent alan Ranque (1932), tüp içinde dönerken hareket eden akışta, merkezkaç kaç kuvvetlerin etkisiyle iç tabakaların dış tabakaları sıkıştırdığını belirtmiştir. Bu sıkıştırma sonucunda, dış tabakaların ısındığını, genişleyen iç tabakaların ise soğuduğunu belirtmiştir.

Hilsch (1947), enerji ayrışması olayını iç sürtünme ile açıklamıştır. Giriş alanındaki vorteksin iç tabakalardaki basıncın önemli ölçüde azalmasına neden olacak şekilde bir basınç dağılımı oluşturduğunu ifade etmiştir. Basınç azalmasının ise iç tabakalarda soğumaya neden olduğunu belirtmiştir. Bu teori daha sonraki yıllarda yapılan araştırmalarla da doğrulanmıştır. Vorteks tüplerde sıkışan dış tabakaların düşük hızlara, genişleyen iç tabakaların ise yüksek hızlara dolayısıyla yüksek kinetik enerjiye sahip olduğu birçok çalışma ile ispatlanmıştır. Hız farkından dolayı farklı tabakalar arasında sürtünme meydana gelmekte ve enerjide iç tabakalardan dış tabakalara radyal yönde aktarılmaktadır (Yılmaz vd., 2005).

Vorteks tüplerle ilgili en çok kabul gören teori Fulton'un (1950) öne sürdüğü teoridir. Bu teoriye göre, sıkıştırılmış gaz vorteks tüpün lüle veya lülelerinden teğetsel olarak yüksek hızlarda tüpe girer ve dönerken hareket eder. Merkez kaç kuvveti etkisiyle, akış tüp cidarına doğru açılmaya zorlanır. Böylece, merkez ile cidardaki basınç arasında fark oluşur. Bu nedenle cidardan tüp merkezine doğru radyal akış olur.

Merkeze gelen akışın açısal hızı, açısal momentumun korunumu ilkesi gereğince tüp cidarındaki akışın açısal hızından daha yüksek değerlere ulaşır. Böylece tüp içerisinde farklı hızda dönen ve farklı yönlerde hareket eden iki akış oluşur. Merkezdeki akışın hızı daha fazla olduğu için dış bölgedeki akışı ivmelendirmeye çalışır. Böylece merkezdeki akıştan cidardaki akışa mekanik enerji transferi (momentum transferi) olur. Mekanik enerjisini kaybeden iç akış soğur, dış akış ise hem kazandığı mekanik enerji hem de sürtünme etkileri ile ısınır. Ancak oluşan sıcaklık farkından dolayı dış tabakalardan iç tabakalara ısı geçişi olur. Fakat bu ısı geçişi hızı, mekanik enerji geçiş hızından daha yavaştır. Sonuç olarak, dış tabakalar kaybettikleri ısı enerjisinden daha fazla kinetik enerji alırlar ve sıcaklıkları yükselir. Tersine iç tabakaların sıcaklığı düşer. Bu şekilde vorteks tütün bir ucundan soğuk diğer ucundan da sıcak gaz çıkışı olur (Fröhlingsdorf ve Unger, 1999).

Kurosaka (1982), paralel akışlı vorteks tüpü kullanarak yaptığı çalışma sonucunda, farklı frekanslı bir ses dalgası olan vorteks sesinin neden olduğu akustik akımın, vorteks tüplerde Ranque-Hilsch etkisine (enerji ayrışmasına), neden olduğunu belirtmiştir. Giriş basıncını yavaşça arttırarak soğuk uçtaki sıcaklığın düştüğünü tespit etmiştir. Basınç arttıkça aynı zamanda vorteks sesinin şiddeti ve frekansı da artmıştır. Frekans 4 kHz'e geldiğinde ses şiddetinin aniden azaldığını ve soğuk uçtaki sıcaklığın $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dan $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'a sıçradığını gözlemlemiştir. Sonuç olarak enerji ayrışmasını akustik etkiye bağlamıştır. Bunlara ek olarak enerji ayrışması ile ilgili olarak kabul gören, Görtler vorteksleri (Stephan vd., 1982), türbülans etkisi (Linderstrom-Lang, 1964) gibi teoriler de mevcuttur.

1.5. Vorteks Tüplerin Uygulama Alanları, Avantaj ve Dezavantajları

Vorteks tüpleri, özellikle soğutma amaçlı olarak pek çok mühendislik uygulamasında kullanılmaktadır. Verimlerinin düşük olmasına rağmen, hafif olmaları, anlık soğutma sağlayabilmeleri gibi avantajlarından dolayı özellikle, takım tezgâhları, soğutma kabinleri, kaynak işlemleri gibi alanlarda sıkça kullanılmaktadırlar.

Diğer soğutma makinelerinden farklı olarak herhangi bir soğutucu akışkana gerek duymazlar. Dolayısıyla çevre için de tehlike oluşturmazlar. İhtiyaç duydukları tek şey sıkıştırılmış havadır. Bu nedenle, eğer bir sistemin çalışması esnasında basınçlı hava kullanılıyorsa veya sistemden dışarı basınçlı hava çıkışı oluyorsa, herhangi bir ek maliyet gerektirmeden vorteks tüp kullanılarak soğutma ve ısıtma sağlanabilir.

Son dönemlerde, soğuma teknolojilerinde vorteks tüplerin genişleme sübaplarının yerini alması amaçlanmaktadır. Bu prensip, ekzotermal bir prosesin, iş akışkanının tersinir adyabatik ve izantropik (eş entalpili) genişleme prosesinin yerini almasını mümkün kılacaktır. Böylece, akışkanın soğuma kapasitesi artacağı için entalpisi azalacaktır (Shannak, 2004).

Vorteks tüplerinin, uygulama alanları, avantaj ve dezavantajları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1.5.1. Vorteks Tüpünün Uygulama Alanları

- Gaz ısıtma, soğutma, kurutma, saflaştırma ve ayrıştırma
- DNA uygulamaları
- Doğal gazın sıvılaştırılması
- Makine elemanlarının soğutulması
- Elektronik kontrol ünitelerinin soğutulması
- Yiyeceklerin soğutulması
- Yapay kar üretiminde tohum olarak işlev gören buz kristallerinin üretimi
- Takım tezgâhları
- Termal kameraların merceklelerinin soğutulması
- İtfaiyeci elbiselerinin soğutulması
- Kaynak işlemleri



Şekil 3. Frezeleme işleminde spot soğutma olarak (URL-2, 2008)



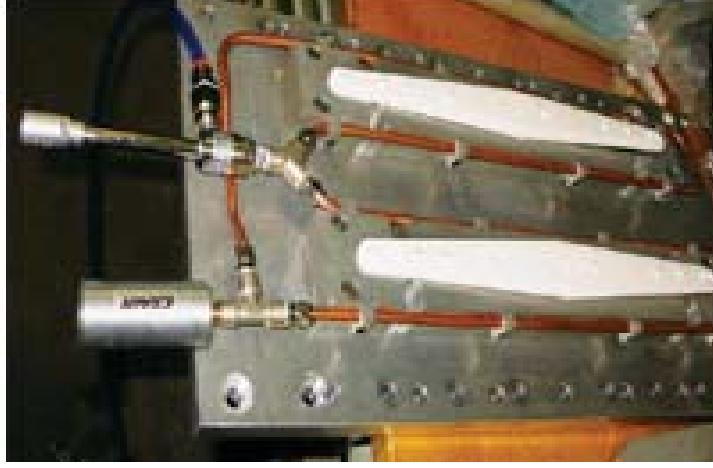
Şekil 4. Taşlama işleminde spot soğutma olarak (URL-2, 2008)



Şekil 5. Kabin soğutucularda vorteks tüpü uygulaması (URL-2, 2008)



Şekil 6. İtfaiyeci elbiselerinin soğutulması (URL-2, 2008)



Şekil 7. Ultrasonik kaynak esnasında parçaların soğutulması (URL-1, 2008)

1.5.2. Vorteks Tüpünün Avantajları

- Basit olması
- Hareketli parçaların olmayışı
- Elektrik veya kimyasalların kullanılmaması
- Küçük ve hafif olması
- Maliyet ve bakımının ucuz olması
- Anlık soğuk ve sıcak hava temin edilebilmesi
- İşletme ömrünün uzun olması
- Sıcaklığın ayarlanabilir olması
- Kirliliğe sebep olan soğutucu akışkanlara ihtiyaç duymaması

1.5.3. Vorteks Tüpünün Dezavantajları

- Veriminin düşük olması
- Gürültülü çalışması
- Sıkıştırılmış havanın gerekliliği

1.6. Literatür Araştırması

Literatürde vorteks tüplerle ilgili olarak yapılan çalışmaları deneysel ve teorik olarak iki gruba ayırabiliriz. Deneysel olarak üç farklı konu üzerinde çalışılmıştır. Bu konular, sırasıyla, kullanılan akışkan türü, geometri ve iç akış alanıdır (Gao vd., 2005). Teorik çalışmalar ise iç akış için hız ve sıcaklık dağılımlarının analitik veya sayısal olarak incelenmesini kapsar. Sayısal çalışmalarda ise, süreklilik, momentum ve enerji denklemlerini kapsayan ana korunum denklemlerini çözmek için genelde Fluent, CFX veya Star CD gibi sayısal akışkanlar dinamiği ticari paket programlarından biri kullanılmıştır. Sayısal çalışmalarla iç akışla ilgili kapsamlı bilgiler elde edilir. (Hamoudi, 2006). Literatüre baktığımızda, son dönemlerde yapılan çalışmaların sayısal ağırlıklı olduğunu görmekteyiz. Yapılan çalışmaları aşağıdaki şekilde özetleyebiliriz.

Deissler ve Perlmutter (1960), yaptıkları teorik çalışmada türbülanslı bir vortekste hız, sıcaklık ve basınç dağılımlarının analizlerini yapmışlardır. Çalışmada, akışı iç ve dış olmak üzere iki bölgeye ayırmışlardır. Çalışma sonucunda enerji ayrışmasına neden olan en önemli etkenin türbülans etkisi olduğunu göstermişlerdir.

Linderstrom-Lang (1964), yaptığı deneysel çalışmada vorteks enerji ayrışmasının, her ne kadar giriş kesit alanına bağlı olsa da, tüp uzunluğunun bir fonksiyonu olarak kısa borularda maksimuma sahip olacağını ileri sürmüştür. Çalışma sonucunda, deneysel verilerin yorumuna olanak sağlayan, radyal ve eksenel akış bileşenlerini içeren bir akış şeması oluşturmuştur.

Gulyaev (1966), yaptığı teorik çalışmada, vorteks tüplerdeki Ranque-Hilsch etkisiyle ilgili önemli temel faktörleri irdelemiştir. Çalışmada, vorteks tüpleri gaz dinamiği açısından incelemiştir. Ayrıca termodinamiğin birinci ve ikinci yasasını kullanarak vorteks tüplerini termodinamik açıdan incelemiştir.

Linderstrom-Lang (1971), yaptıkları teorik çalışmada, Lewellen tarafından geliştirilen, momentum denklemlerine sıfır-mertebe yaklaşımını temel alan, ikincil akış fonksiyonlarını kullanarak, vorteks tüplerdeki teğetsel hız dağılımının radyal ve eksenel değişimlerini hesaplamışlardır. Çalışma sonucunda, tüp içerisindeki hız dağılımının verilerini esas alan ve vorteks tüp performansının tahmin edilmesine olanak sağlayan bir fonksiyon türetmişlerdir.

Marshall (1977), yaptığı deneysel çalışmada, değişik gaz karışımları ve değişik boyutlarda borular kullanarak, gaz ayrışması için kritik bir giriş Reynolds sayısı olduğunu

göstermiştir. Çalışma sonucunda, ayrılma olayının öncelikle merkezkaç kuvvetlerine bağlı olduğunu belirtmiştir.

Takahama ve Kawamura (1979), yaptıkları çalışmada, buharla çalışan bir vorteks tüpte enerji ayrışma performansını deneysel olarak incelemiştir. Çalışma sonucunda, enerji ayrışma performansını tahmin etmek için bazı ifadeler sunmuşlardır. Ayrıca, çalışma sonucunda, kurulum faktörü 0.98'in altında olduğu zaman enerji ayrışması olmadığını belirtmiş ve optimum çalışma koşullarını içeren teknik bilgiler sunmuşlardır.

Takahama ve Yokosawa (1981), yaptıkları deneysel çalışmada, sıcaklık ayrışma performansında hiçbir düşme olmadan, vorteks tüpünün boyunu kısaltmaya çalışmışlardır. Bu amaçla çalışmada, konik tüp kullanmışlardır. Bu geometriyle, daha kısa bir boyla, standart bir vorteks tüp ile aynı performansı yakalamışlardır. Konik vorteks tüpü, kesit alanı sıcak uca doğru artacak şekilde tasarlamışlar ve böylelikle gazın aksel hız değişiminin azalacağını göstermişlerdir. Çalışma sonucunda, koniklik açısının 1.7° ile 5.1° arasında olması gerektiğini belirtmişlerdir.

Kurosaka (1982), yaptığı çalışmada vorteks tüplerde dönen gazın akustik etkisinin enerji ayrılmasına etkisini deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Çalışma sonucunda enerji ayrışmasına, akustik etkinin neden olduğunu göstermiştir.

Stephan vd. (1983), yaptıkları çalışmada vorteks tüplerde meydana gelen enerji ayrışma mekanizmasını deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Çalışmada, vorteks tüpü boyunca yüzey sıcaklığını ölçmüşler ve yüzey sıcaklığının, akış alanının durma noktası hakkında bilgi verdiğini belirtmişlerdir. Teğetsel hız tarafından oluşturulan *Görtler Vorteksleri*'nin, enerji ayrışmasında en büyük zorlayıcı kuvvet olduğu tezini ortaya atmışlardır. Ayrıca, benzer geometrilerdeki vorteks tüpler için soğuk hava sıcaklığını tahmin edebilmek için, boyut analizi kullanarak benzerlik ilişkisi sunmuşlardır. Çalışma sonucunda elde ettikleri sonuçları deneysel verilerle doğrulamışlardır.

Stephan vd. (1984), vorteks tüplerdeki enerji ayrışması ile ilgili teorik ve deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, genel bir matematiksel formül vererek, enerji ayrışmasını ifade etmişlerdir. Temel denklemlere dayanarak, geometrik olarak benzer vorteks tüplerde soğuk gaz çıkış sıcaklığının y_c ile değişimi için benzerlik ilişkisi elde etmişlerdir. Çalışmada, ayrıca farklı gazlar kullanarak yaptıkları deneysel çalışma ile de teorik olarak ifade ettikleri sonuçları doğrulamışlardır. Çalışma sonucunda geometrik olarak benzer vorteks tüpler için benzerlik ilişkisinin çalışma şartlarından bağımsız olduğunu bulmuşlardır.

Balmer (1988), yaptığı teorik ve deneysel çalışmalarda, vorteks tüpündeki sıcaklık ayrışma mekanizmasının sadece sıkıştırılabilir akışkanlarla sınırlandırılmayacağını ileri sürmüştür. Çalışmada, termodinamiğin ikinci yasasını kullanan teorik analizlerin, vorteks tüplerde sıkıştırılmaz akışkanlar kullanıldığı zaman bile sıcaklık ayrışmasına neden olan net bir entropi üretimi olduğunu gösterdiğini vurgulamıştır. Vorteks tüpünde sıvı su kullanarak yaptığı deneylerde, yüksek giriş basınçlarında belirgin bir sıcaklık ayrışması olduğunu göstermiştir. Çalışma sonucunda sıvılardaki vorteks etkisinin, viskoz basınç düşüşlerini belirgin bir şekilde azaltacak bir girdap üretici tasarlanarak iyileştirilebileceğini önermiştir.

Ahlborn vd. (1994), yaptıkları teorik ve deneysel çalışmada, vorteks tüp için yeni bir model geliştirmişlerdir. Çalışmada, sıcak uçtaki sıcaklık artışı için bir üst limit, soğuk uçtaki sıcaklık düşüşü için de bir alt limit belirlemişlerdir. Çalışmada vorteks tüp içindeki ısınma ve soğumayı kinetik enerjinin artması veya azalması ile ilişkilendirmişlerdir. Çalışma sonucunda, $X = (P_i - P_c / P_c)$ şeklinde bir ifade tanımlanarak bunu normalleştirilmiş basınç düşüşü olarak adlandırmışlar ve girişteki akışta kinetik enerjiyi belirlediğini savunmuşlardır.

Ahlborn vd. (1996), yaptıkları deneysel çalışmada, vorteks tüpün sıcak ve soğuk uçlarına vakum uygulayarak, düşük basınçlar için sıcaklık ayrılma etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, vorteks tüpün atmosferik basıncın altındaki ve üstündeki basınçlarda aynı davranışı gösterdiğini belirlemişlerdir.

Ahlborn ve Groves (1997), yaptıkları deneysel çalışmada, sadece bir tane ölçme kanalı bulunan pitot tüpü kullanarak vorteks tüpteki aksenal ve azimutsal hızları ölçmüşlerdir. Çalışmada sonucunda, ters yönde akan akışın soğuk uçtan çıkan akış miktarından daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Bu nedenle vorteks tüp içerisinde geri dönen, iç bölgedeki akıştan, dış bölgelere doğru ikincil bir akış olduğu sonucuna varmışlardır.

Ting-Quan vd. (1997), yaptıkları deneysel çalışmada giriş basıncının enerji ayrışmasını önemli derecede etkilediğini buna karşın giriş sıcaklığının etkisinin ihmal edilebileceğini göstermişlerdir.

Saidi ve Yazdi (1999), yaptıkları teorik çalışma ile vorteks tüplerdeki enerji ayrışmasını termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları açısından incelemişlerdir. Çalışmada entropi üretimi için bir eşitlik türetmişlerdir. Sıcaklık farkının giriş basıncı arttıkça arttığını

belirtmişlerdir. Giriş lülesinin çapı arttıkça, vorteks tüpünün ikinci yasa veriminin arttığını göstermişlerdir.

Lewins ve Bejan (1999), yaptıkları teorik çalışmada, vorteks tüplerde kullanılabilir soğutma verimini arttırmak için bir model geliştirmişlerdir. Bunun içinde girişteki havaya ön soğutma uygulamayı önermişlerdir.

Fröhlingsdorf ve Unger (1999), yaptıkları sayısal çalışma ile vorteks tüplerdeki sıkıştırılabilir akışı ve enerji ayrışması olayını CFX yazılımını kullanarak modellemişlerdir. Ayrıca çalışma sonucunda, enerji ayrışmasının nedenini soğuk gazdan sıcak gaza olan mekanik iş transferi olarak açıklamışlardır.

Khodorkov vd. (2003), yaptıkları çalışmada vorteks tüpleri çeşitlerine göre sınıflandırmışlar ve vorteks tüplerin uygulama alanları ile ilgili ayrıntılı bilgiler sunmuşlardır.

Saidi ve Valipour (2003), yaptıkları çalışmada, vorteks tüpün çalışmasına etki eden parametrelerin verim ve soğuk uç sıcaklık farkı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada öncelikle ilgili parametreleri geometrik ve termodinamik olarak sınıflandırmışlardır. Çalışma sonucunda, optimum L/D oranı ile boyutsuz soğuk uç orifis çapını belirlemişlerdir. Giriş havasının nemli olmasının enerji ayrışmasını azalttığını gözlemişlerdir. Verimin belli bir basınç değerinde maksimum olduğunu ve o noktadan sonra basıncın artmasının verimi azalttığının belirlemişlerdir. Ayrıca çalışmada, özgül ısı oranının, vorteks tüpteki enerji ayrışmasını etkileyen bir gaz karakteristiği olduğunu tespit etmişlerdir.

Poshernev ve Khodorkov (2003), yaptıkları deneysel çalışmada, doğal gazın soğutulmasında kullanılması amacıyla konik bir vorteks tüp (CVT) tasarlamışlardır. Çalışmada, CVT'nin gaz dinamiği ve termodinamik karakteristiklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, CVT'den elde ettikleri soğuk gaz akışını, doğal gazın soğutulması işleminde, sıkıştırılmış gazın ön soğutulması için kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Shannak (2004), yaptıkları çalışmada, vorteks tüp içerisindeki enerji ayrışma mekanizmasını ve sürtünme kayıplarını teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, termodinamik özelliklere bağlı olarak havanın sıcak ve soğuk uçtan çıkış sıcaklıklarını ölçmüşlerdir. Ayrıca çalışmada, iç enerjinin tanımının yanı sıra, enerji ve kütle dengelerine de dayanarak sıcak ve soğuk çıkış gazlarının belirlenmesi için yeni bir model geliştirmişlerdir. Çalışma sonucunda, deneysel olarak elde ettikleri, maksimum

sıcak hava sıcaklığı ile minimum soğuk hava sıcaklığı değerlerinin, model ile hesaplanan değer ile birbirine çok yakın olduğunu göstermişlerdir.

Gao vd. (2005), yaptıkları çalışmada, vorteks tüplerdeki soğuma mekanizmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, basınç ve hız ölçümleri için özel bir pitot tüpü kullanmışlardır. Ayrıca, ölçüm sonuçları ile termodinamiğin birinci ve ikinci kanununa dayalı analizler yapmışlardır. Çalışma sonucunda, tüp içindeki ikincil gaz akışının iyileştirilebileceğini ve verimin arttırılabileceğini göstermişlerdir.

Aljuwayhel vd. (2005), yaptıkları sayısal çalışmada, zıt akışlı bir vorteks tüpündeki akışı ve enerji ayrışma mekanizmasını incelemek için, CFD model kullanmışlardır. Çalışmada CFD sonuçlarını, oda sıcaklığında hava ile çalışan bir vorteks tüpten elde edilen elde edilen deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. CFD sonuçlarını daha sonra vorteks tüpün sıcaklık ayrışmasıyla ilişkili olarak, akışın içyapısını incelemek için kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, vorteks tüpte meydana gelen enerji ayrışmasını, soğuk akış bölgesi ile sıcak akış bölgesini ayıran, dönen bir kontrol yüzeyine etkiyen viskoz kesme kuvvetleri tarafından üretilen bir torkun neden olduğu iş transferi ile açıklamışlardır. Bu iş transferinin, soğuk bölgeden sıcak bölgeye olduğunu belirtmişlerdir.

Behera vd. (2005), yaptıkları çalışmada, değişik lüle profilleri ve sayılarının vorteks tüplerinin performansı üzerindeki etkilerini CFD tekniği ile nümerik olarak incelemişlerdir. Çalışmada girdap hızı, eksenel ve radyal hız bileşenleri ile ikincil akış sirkülasyonunu içeren akış modellerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda elde ettikleri sonuçların, literatürdeki deneysel sonuçlarla uyum içinde olduğunu göstermişlerdir.

Çalışmalarında, L/D oranı arttırılarak sıcak ve soğuk gaz akışı sıcaklık farkının maksimize edilebileceği göstermişlerdir. Ayrıca, akışın durma noktasına kadar serbest ve zorlanmış bileşenlere sahip olduğunu öne sürmüşlerdir.

Yılmaz vd. (2005), yaptıkları literatür araştırması niteliğindeki çalışmada, vorteks tüplerinin detaylı olarak tanımını ve sınıflandırılmasını yaparak enerji ayrışması ve vorteks tüplerin performansı konularını incelemişlerdir.

Tarunin ve Alikina (2005), yaptıkları teorik çalışmada, vorteks tüplerdeki ısı transferi ve hidrodinamikle ilgili hesaplama prosedürlerini tanımlamışlardır. Çalışmada, vorteks tüplerdeki enerji ayrışmasının sadece deneylerle kanıtlandığını belirterek, bu etkiyi hiçbir ek hipoteze başvurmadan sıradan gaz dinamiği ile tanımlamışlardır.

Skye vd. (2006), yaptıkları çalışmada, vorteks tüp içindeki akışı deneysel olarak, CFD modelleme tekniğini kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada, deneysel

sonuçlarla, sayısal model neticesinde elde edilen sonuçları karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda, CFD model sayesinde vorteks tüp performansını etkileyen parametrelerin vorteks tüp üretmeden, hem ekonomik hem de zamandan tasarruf sağlayacak şekilde yapılabileceğini belirtmişlerdir.

Aydın ve Baki (2006), yaptıkları çalışmada, zıt akışlı vorteks tüplerinin performansını ve tasarım parametrelerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, üç farklı gaz kullanmışlardır. Ayrıca, vorteks tüpü içindeki akış hakkında daha fazla bilgi elde edebilmek için, elde ettikleri optimum geometri üzerinde akış gözleme deneyleri yapmışlardır. Çalışma sonucunda giriş basıncı ve soğuk kütle oranının performansı etkileyen en önemli parametreler olduğunu belirtmişlerdir.

Kırmacı vd. (2006), yaptıkları deneysel çalışmada, vorteks tüplerde meydana gelen enerji ayrışması olayını beş farklı akışkan için (Argon, karbondioksit, oksijen, azot, hava) incelemişlerdir. Çalışmada, farklı basınçlarda yaptıkları deneylerde, havanın soğuma veriminin diğer gazlara göre daha düşük olduğu sonucuna varmışlardır. Çalışma sonucunda, uyguladıkları maksimum basınçta (7 bar) en düşük sıcaklığın argon gazında meydana geldiğini göstermişlerdir.

Kırmacı (2006), yaptığı çalışmada hava, oksijen, karbondioksit ve azot olmak üzere dört farklı akışkan kullanmış ve enerji ayrışması olayını bu akışkanlar için deneysel olarak incelemiştir. Sistem performansını termodinamik açıdan incelemiştir. En fazla soğumanın CO₂ gazı kullanılması durumunda elde edildiğini tespit etmiştir.

Wu vd. (2007), yaptıkları deneysel çalışmada, vorteks tüplerin enerji ayrışma verimini iyileştirmek için, yeni bir lüle tasarlamışlardır. Çalışmada, sıcak uçta sürtünmeyi dolayısıyla enerji kaybını azaltmak için yayıcı kullanmışlardır. Ayrıca çalışmada, geometrik olarak yaptıkları yeniliklerle; deneysel olarak, soğutma ve ısıtma verimlerinin geleneksel vorteks tüplerden daha iyi olduğunu göstermişlerdir.

Farouk ve Farouk (2007), yaptıkları çalışmada Ranque-Hilsch vorteks tüpündeki sıcaklık ayrışmasını ve akış alanlarını sayısal akışkanlar dinamiği kullanarak sayısal olarak belirlemişlerdir. Çalışmada elde ettikleri radyal hız profilleri ile radyal doğrultuda enerji ayrışması olabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca çalışmada kullandıkları model ile elde ettikleri sonuçları, literatürdeki k-e model kullanılarak bulunan sonuçlarla ve deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır ve sonuçların uyum içerisinde olduğunu göstermişlerdir.

Eiamsa ve Promvonge (2008), yaptıkları çalışmada, vorteks tüplerle ilgili olarak geçmişten günümüze, mevcut literatürü bir arada toplamışlardır. Çalışmada, hem ters akışlı hem de paralel akışlı vorteks tüplerin içinde gerçekleşen sıcaklık ayrışması esnasında meydana gelen olayla ilgili bilgiler vermişlerdir. Ayrıca çalışmada, önceki çalışmalarda vorteks tüplerdeki sıcaklık ayrışması üzerine yapılan hesaplamalar ve deneyleri de gözden geçirmişlerdir. Çalışmada, hem geometrik hem de termofiziksel parametreler için vorteks tüpündeki sıcaklık ayrışma mekanizmasının ve akış alanının; basınç, hız ve sıcaklık alanlarını ölçerek incelenebileceğini belirlemişlerdir.

Dinçer vd. (2008), yaptıkları deneysel çalışmada, vorteks tüpün sıcak uç tarafına yerleştirilen konik ucun geometrik özelliklerinin ve konumunun verim üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, giriş lülesi sayısının verim üzerindeki etkisini de incelemişlerdir. Çalışmada sonucunda, verimin maksimum olduğu konik uç çapı, konumu ve açısını belirlemişlerdir. Ayrıca, basıncın belli bir değerden sonra verim üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığını gözlemlemişlerdir.

Xue ve Arjomandi (2008), yaptıkları deneysel çalışmada, vorteks açısının, verim ve performans üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada vorteks açısının değişimini sağlamak için değişik vorteks jeneratörleri kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, küçük vorteks açılarında, daha büyük sıcaklık farkı ve ısıtma verimi elde etmişlerdir. Ayrıca çalışmada, küçük vorteks açılarında, yalnızca düşük giriş basıncı değerlerinde daha iyi soğutma verimi elde etmişlerdir.

Nimbalkar ve Muller (2008) , yaptıkları çalışmada, değişik soğuk uç geometrileri, farklı giriş basınçları ve Y_c (soğuk hava kütleli debisi/ sıcak hava kütleli debisi) değerlerinin enerji ayrışması üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, enerji ayrışması ve enerji akısı ayrışmasını tanımlamışlardır. Çalışma sonucunda, maksimum enerji ayrışması için optimum bir orifis çapı olduğunu göstermişlerdir.

Ayrıca çalışma sonucunda, maksimum enerji ayrışmasına %60 Y_c değerinde, orifis çapı ve giriş basıncından bağımsız olarak ulaşılabileceğini ve $Y_c < 60$ için soğuk uç orifis çapının etkisinin ihmal edilebileceğini göstermişlerdir. Ayrıca çalışmada, orifis çapı ile geri dönen akışın çizdiği çap arasında ilişki kurarak ikincil akışın hangi durumlarda oluşabileceğini göstermişlerdir.

Eiamsa ve Promvonge (2008), yaptıkları sayısal çalışmada, paralel akışlı bir vorteks tüpteki enerji ayrışması ve akış alanı için analiz yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada, $k-\epsilon$

model ve ASM (Algebraic Reynolds Stress) model kullanarak elde ettikleri sonuçları literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda, ASM metodu ile yapılan çözümlerin, k- ϵ modelden daha iyi sonuç verdiğini göstermişlerdir.

Pınar vd. (2009), yaptıkları teorik çalışmada vorteks tüpleri için optimum çalışma koşullarını ve parametrelerin sistem üzerindeki etkinlik oranlarını belirlemek için Taguchi Metod'u kullanmışlardır. Giriş basıncı, lüle sayısı ve akışkan cinsi etkilerini bu metoda göre hesaplamışlar ve en büyük etkiyi %89.89'la basıncın oluşturduğunu göstermişlerdir.

Tablo 1. Günümüze kadar yapılan çalışmaların özeti

No.	Çalışmalar (yıllara göre)	Deneysel		Teorik		Açıklama
				CFD		
1	Deissler ve Perlmutter (1960)				√	Hız, sıcaklık ve basınç dağılımı, enerji ayrışmasının nedeni
2	Linderstrom-Lang (1964)	√				Radyal ve eksenel akış, enerji ayrışması
3	Gulyaev (1966)				√	Enerji ayrışması
4	Linderstrom-Lang (1971)				√	Tüp içindeki hız dağılımı ve performans ilişkisi
5	Marshall (1977)		√			Değişik gaz karışımları, geometri ve enerji ayrışması etkisi
6	Takahama ve Kawamura (1979)		√			Enerji ayrışması, iş akışkanı olarak buharın etkisi
7	Takahama ve Yokosawa (1981)		√			Konik geometri etkisi
8	Kurosaka (1982)		√		√	Enerji ayrışması ve akustik etki ilişkisi
9	Stephan vd. (1983)		√		√	Enerji ayrışması ve Görtler vorteksleri ilişkisi
10	Stephan vd. (1984)		√		√	Enerji ayrışmasının matematiksel ifadesi, vorteks tüpler için benzerlik ilişkisi
11	Balmer (1988)		√		√	Sıkıştırılmayan akışkanlar için vorteks etkisi
12	Ahlborn vd. (1994)		√		√	Sıcaklıklar için limit değerler
13	Ahlborn vd. (1996)		√			Vakuum vorteks üzerindeki etkisi
14	Ahlborn ve Groves (1997)		√			Tüp içindeki hız dağılımı, ikincil akış
15	Ting-Quan vd. (1997)		√			Termofiziksel özelliklerin etkisi
16	Saidi ve Yazdi (1999)				√	Vorteks tüplerde ekserji analizi
17	Lewins ve Bejan (1999)				√	Verimi artırma için alternatif yöntem
18	Fröhlingsdorf ve Unger (1999)			√		İç akış ve enerji ayrışması
19	Khodorkov vd.(2003)					Vorteks tüplerin sınıflandırılması
20	Saidi ve Valipour (2003)		√			Optimizasyon, farklı gazlar
21	Poshernev ve Khodorkov (2003)		√		√	Doğal gaz uygulaması ve konik vorteks tüpler
22	Shannak (2004)		√		√	Enerji ayrışması ve sürtünme kayıpları

Tablo 1'in devamı

No.	Çalışma (yıllara göre)	Deneysel		Teorik		Açıklama
				CFD		
23	Gao vd. (2005)	√			√	Enerji ayrışması, ikincil akımlar
24	Aljuwayhel vd. (2005)			√		Tüp içerisindeki akış deseni ve enerji ayrışma mekanizması
25	Behera vd. (2005)			√		Geometrik parametrelerin etkisi CFD ile incelendi
26	Yılmaz vd. (2005)					Hız, sıcaklık ve basınç dağılımı, enerji ayrışmasının nedeni
27	Tarunin ve Alikina (2005)				√	Radyal ve aksel akış, enerji ayrışması
28	Skye vd. (2006)			√		Enerji ayrışması
29	Aydın ve Baki (2006)	√				Tüp içindeki hız dağılımı ve performans ilişkisi
30	Kırmacı vd. (2006)	√				Değişik gaz karışımları, geometri ve enerji ayrışması etkisi
31	Kırmacı (2006)	√			√	Farklı gazlar, enerji ayrışması ve ekserji analizi
32	Wu vd. (2007)	√				Enerji ayrışması, iş akışkanı olarak buharın etkisi
33	Farouk ve Farouk (2007)			√		Konik geometri etkisi
34	Eiamsa ve Promvonge (2008)					Enerji ayrışması ve akustik etki ilişkisi
35	Diğer vd. (2008)	√				Enerji ayrışması ve Görtler vorteksleri ilişkisi
36	Xue ve Arjomandi (2008)	√				Enerji ayrışmasının matematiksel ifadesi, vorteks tüpler için benzerlik ilişkisi
37	Nimbalkar ve Muller (2008)	√				Sıkıştırılmayan akışkanlar için vorteks etkisi
38	Eiamsa ve Promvonge (2008)			√		Sıcaklıklar için limit değerler
39	Pınar vd. (2009)				√	Enerji ayrışması için Taguchi Method kullanıldı

1.7. Tez Çalışmasının Konusu ve Amacı

Vorteks tüpleri, her ne kadar düşük verimli olsalar da bu cihazlar sayesinde, herhangi bir soğutucu akışkan kullanılmasına gerek kalmadan anlık ısıtma ve soğutma yapılabilmektedir.

Yapılarının oldukça basit olmasına rağmen, vorteks tüplerinin içinde gerçekleşen enerji ayrışması olayının fiziksel mekanizması henüz tam olarak açıklanamamıştır. Bu nedenle hem çalışma prensibinin temelindeki mekanizmayı açıklamak hem de düşük olan verimlerini arttırmak için vorteks tüpleri, bilimsel açıdan inceleme konusu olmuşlardır.

Bu çalışmanın amacı, farklı geometrik ve termofiziksel parametrelerin, enerji ayrışması ve vorteks tüpü verimi üzerindeki etkilerini incelemektir. Bu kapsamda, vorteks tüpleri için optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bunun yanı sıra enerji ayrışması olayının önemli bir noktası olan ve hakkında teorik olarak hipotezler sunulan durma noktası ile ilgili olarak deneysel sonuçlar elde etmek de amaçlanmıştır. Bu çalışmada, karşıt akışlı silindirik bir vorteks tüpü üzerinde deneyler yapılmıştır.

Gazın doğrudan giriş lülesinden dairesel akış kanalına girmesi sonucunda akış yönü aniden değişmiş olur. Bu ani değişim girdap oluşumuna, dolayısıyla enerji kaybına neden olmaktadır (Wu vd., 2007). Bu nedenle, diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada akışkanın, farklı uzunluklarda ve tam bir helis adımına denk gelecek şekilde tasarlanmış vorteks üreteçlerinden (helis adımlarından) geçirilerek düzgün bir formda ortama tanıtılması sağlanmıştır. Bu bağlamda, farklı helis uzunluklarının enerji ayrışması üzerindeki etkisi incelenmiştir. Farklı helis uzunluklarının yanı sıra, farklı boru boyları ve farklı konik uç açıları için sistem performansı araştırılmıştır.

Geometrik parametrelerin her bir kombinasyonu için ayrı ayrı deneyler yapılarak farklı kombinasyonlarda meydana gelebilecek farklı etkilerin tespit edilebilmesi amaçlanmıştır. Bu kombinasyonların her biri $P_1=2,3,4$ bar (gösterge) basınçlar için ayrı ayrı incelenmiştir. Her bir deneyde, konik uç açısı mümkün olduğunca kısa adımlarla hareket ettirilmiştir. Bu sayede, çok kısa aralıklarla ölçümler alınarak hassas sonuçlar elde edilmesi sağlanmıştır.

Çalışmanın bir diğer amacı da termofiziksel özelliklerin sistem performansı üzerindeki etkisini belirlemektir. Bu nedenle, basınç etkisinin belirlenmesine ek olarak, nem etkisi ve ortam sıcaklığı etkisi de incelenmiştir. Ayrıca, yalıtım etkisi de incelenmiştir.

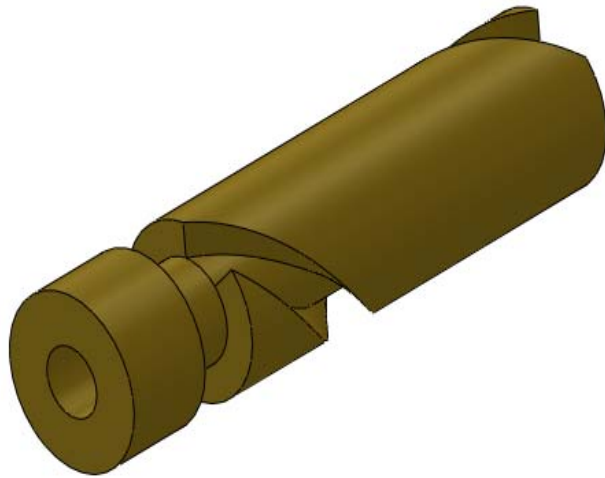
Çalışma kapsamında, vorteks tüplerinin termodinamiğin birinci ve ikinci yasasına göre termodinamik analizleri yapılmıştır. Termodinamiğin Birinci Yasası yardımıyla elde edilen soğuk kütle oranı (cold mass fraction, Y_c) ifadesi kullanılarak hesaplanan sıcaklık farkları ile vorteks tüpler için tanımlanan soğuk kütle oranı ifadesi kullanılarak elde edilen sıcaklık farkları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, deneylerin yapılışı esnasında deney araçlarının hassasiyetinden ve ölçüm hatalarından kaynaklanabilecek hataların belirlenmesi amacıyla belirsizlik analizi yapılmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında, farklı geometrik düzenlemelerin ve termofiziksel özelliklerin karşıt akışlı silindirik bir vorteks tüp performansı ve tüp içerisinde gerçekleşen enerji ayrışması olayı üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

Akışkan, vorteks tüpe yüksek hızlarda girmektedir ve vorteks üreticine çarparak ani bir şekilde yön değiştirmektedir. Bu çalışmada, akışkan özel olarak helisel formda ve tam bir adım olarak tasarlanan vorteks üreteçleri vasıtasıyla ortama tanıtılmıştır. Bu şekilde, akışkanın vorteks tüpüne girerken ortaya çıkan enerji kaybı azaltılmak istenmiştir. Çalışmada, beş farklı uzunlukta vorteks üreteci kullanılmıştır. Vorteks üreticinin üç boyutlu çizimi Şekil 8’de gösterilmektedir.

Vorteks üreteçlerine ek olarak farklı tüp uzunluğu ve konik uç açısının etkileri de incelenmiştir. Geometrik parametrelerin her bir kombinasyonu için ayrı ayrı deneyler yapılarak farklı kombinasyonlarda meydana gelebilecek farklı etkilerin tespit edilebilmesi amaçlanmıştır. Bu kombinasyonların her biri $P_i=2.3.4$ bar (gösterge) basınçlar için ayrı ayrı incelenmiştir. Dört farklı tüp uzunluğu, altı farklı konik uç açısı ve beş farklı uzunlukta vorteks üreteci (helis adımı) kullanılmıştır. Optimizasyon çalışması kapsamında $5 \times 4 \times 6 \times 3 = 360$ adet deney yapılmıştır. Deneylerde, çalışma basıncına göre değişmekle beraber 20+25 arasında ölçüm alınarak, değişimler oldukça hassas bir şekilde elde edilmiştir. Konik uç (ayar valfinin) üç boyutlu gösterimi Şekil 9’da verilmektedir.



Şekil 8. Çalışmada kullanılan vorteks üretici



Şekil 9. Çalışmada kullanılan konik ucun üç boyutlu çizimi

Deneysel çalışmalarda kullanılan vorteks tüpün dışı thermafex yalıtım malzemesi ile kaplanmıştır. Yalıtım etkisini incelemek amacıyla aynı geometrik ve termofiziksel özelliklere sahip vorteks tüpü sisteminde yalıtım malzemesinin kullanılıp kullanılmaması durumları için deneyler yapılmıştır. Bu şekilde yalıtımın sıcaklık farkları ve verim üzerindeki etkisi incelenmiştir. Mevcut sistemde akışkanın vorteks tüpe girmeden önce bir kurutucu vasıtasıyla nemi azaltılmaktadır. Yine aynı geometrik ve termofiziksel özellikler için kurutucunun devreye alınıp çıkarılması ile nem etkisi incelenmiştir. Bunlara ek olarak farklı ortam sıcaklıklarında da deneyler yapılarak ortam sıcaklığının sistem üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Vorteks tüplerinin en ilgi çekici özelliği enerji ayrışması olayıdır. Tüp merkezindeki akışkanın kinetik enerjisi, cidardaki akışkanın kinetik enerjisinden daha fazladır. Bu nedenle merkezdeki akışkandan cidardaki akışkana enerji transferi olur. Bu nedenle de soğuyan akışkan bir durma noktasından (stagnation point) sonra ana akışa ters yönde sistemi terk eder. (Dinçer vd., 2008). Bu durma noktasının yerini belirlemek ve akışı gözlemlemek amacıyla termal kamera ile vorteks tüpü sistemi farklı soğuk kütle oranlarında görüntülenmiştir.

Deneysel çalışmalar tamamlandıktan sonra, vorteks tüplerin termodinamiğin birinci ve ikinci yasasına göre analizleri yapılmıştır. Termodinamiğin birinci yasası yardımıyla elde edilen soğuk kütle oranı (cold mass fraction, Y_c) ifadesi kullanılarak hesaplanan sıcaklık farkları ile vorteks tüpler için tanımlanan soğuk kütle oranı ifadesi kullanılarak elde edilen sıcaklık farkları karşılaştırılmıştır. İkinci yasa analizi ile farklı Y_c değerleri için entropi ve tersinmezlik değişimleri belirlenmiştir. Ayrıca, deneylerin yapılışı esnasında

deney araçlarının hassasiyetinden ve ölçüm hatalarından kaynaklanabilecek hataların belirlenmesi amacıyla belirsizlik analizi yapılmıştır.

2.1. Deney Düzenegi

Deney düzenegi ana hatlarıyla, kompresör, nem alıcı cihaz, test bölgesi, ölçüm cihazları ile vana ve bağlantı elemanlarından oluşmaktadır. Deney düzenegi kurulum aşamasında, helisel parçalar, vorteks tüp, konik uç gibi çalışmanın temel elemanları ile test bölgesine ait diğer tüm parçalar bilgisayar ortamında çizdirilerek K.T.Ü. Makine Mühendisliği Bölümü Takım Tezgâhları Laboratuvarında üretilmiştir.

Deney düzeneginin ve test bölgesinin fotoğrafları sırasıyla Şekil 11 ve 12’de, şematik resmi ise Şekil 13’te görülmektedir. Ortam havası kompresör (1) yardımıyla, hava tankına (3) basılmaktadır. Hava tankından gelen basınçlı hava, vana (4) ve nem alıcı cihazdan (5) geçtikten sonra basınç regülatörü (6) vasıtasıyla istenilen basınca ayarlanmaktadır. İstenilen basınç değerine getirilen havanın, teğetsel olarak vorteks tüpüne girmeden önce, girişin 1 cm gerisine yerleştirilen termoeleman (7) yardımıyla sıcaklığı ölçülmektedir. Basınçlı hava, vorteks tüpüne girdikten sonra, konik ucun (9) ileri-geri hareket ettirilmesiyle soğuk uç ve sıcak uçtan çıkan havanın debileri ayarlanmaktadır ve bu sayede Y_c değeri değiştirilmiş olmaktadır. Soğuk ve sıcak uç çıkışlarının 1 cm ilerisine yerleştirilen termoelemanlar (7) yardımıyla çıkışlardaki hava sıcaklıkları ölçülmektedir. Çıkışlardaki hava debileri ise rotametreler (8) vasıtasıyla ölçülmektedir. Soğuk uçtan çıkan havanın basıncını ölçmek için ise dijital manometre (11) kullanılmaktadır.

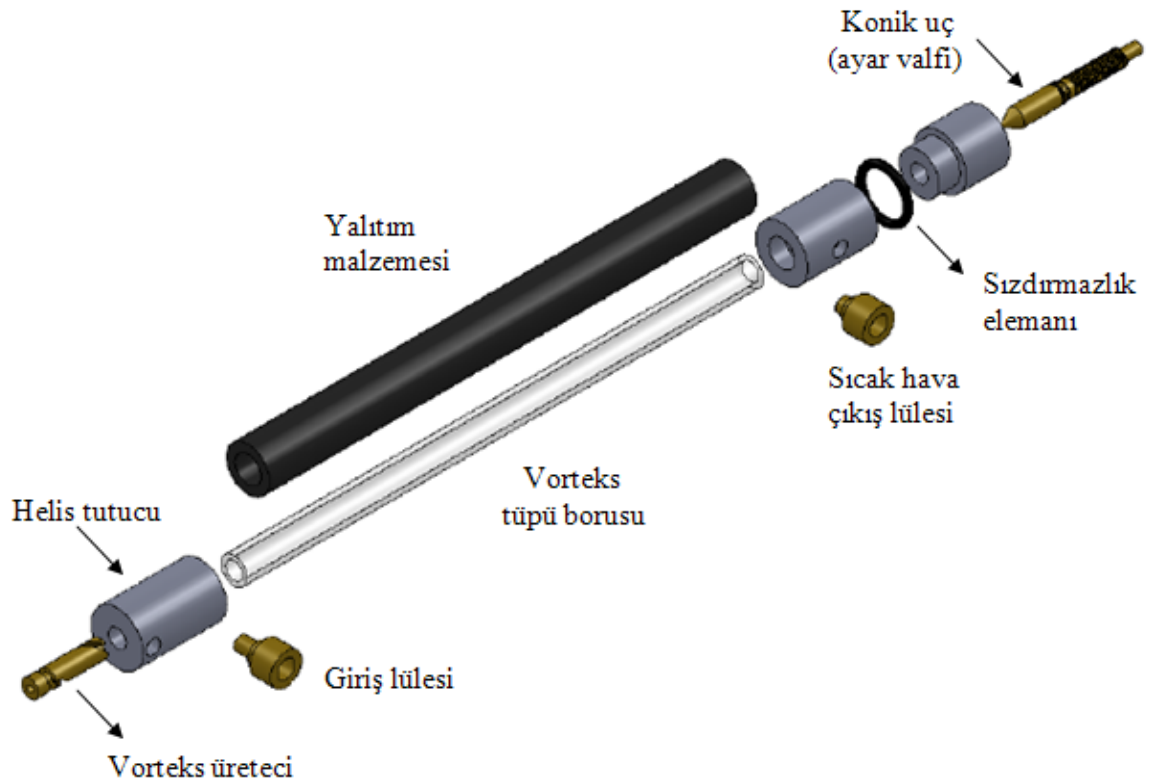
Vorteks tüpü sisteminde; deneyler esnasında, borunun iç çapı, basınçlı havanın girdiği lülenin çapı, soğuk havanın çıktığı kanalın çapı ile sıcak havanın sistemi terk ettiği lülenin iç çapı sabit tutulmuştur. Boru uzunlukları, vorteks üreteçlerindeki helis uzunlukları ve konik uç açıları ise değiştirilmiştir. Geometrik parametrelerin her bir farklı kombinasyonu için yapılan değişimler, $P_i=3,4,5$ bar (mutlak) basınçlar için incelenmiştir.

Vorteks tüpü sisteminde kullanılan boru şeffaf malzemedden (plexiglass) imal edilmiştir. Borunun dışı thermafleks yalıtım malzemesi ile kaplanmış ve ısı kayıpların en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Giriş ve çıkış lüleleri pirinç malzemedden yapılmıştır. Vorteks üretici ile konik ucu tutan parçalar delrin malzemedden yapılmıştır. Delrin malzemenin seçilme nedeni, ısı iletim katsayısının metallere göre oldukça düşük olmasıdır ($\alpha \approx 0.4$ W/m.K). Bu şekilde, sistemdeki ısı kayıpların en aza indirilmesi amaçlanmıştır.

Ayrıca hafif olması da test bölgesinin taşınabilmesini kolaylaştırmaktadır. Bunun yanı sıra sistemin estetik açıdan güzel görünmesini de sağlamaktadır. Deneysel çalışmada kullanılan geometrik parametreler ve değerleri Tablo 2’de, sistemin demontajlı durumu ise Şekil 10’da gösterilmektedir.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan geometrik parametreler ve değerleri

Vorteks tüpü boru boyutları			Konik	Helis	Giriş	Sıcak	Soğuk
Uzunluk (mm) [L]	İç Çap (mm) [D]	L/D	uç açısı	uzunluğu (mm)	lülesiçapı (mm)	hava çıkış çapı (mm)	hava çıkış çapı (mm)
100	10	10	30	10	5	5	4
200	10	20	45	15	5	5	4
300	10	30	60	20	5	5	4
400	10	40	75	25	5	5	4
			90	30	5	5	4
			180		5	5	4



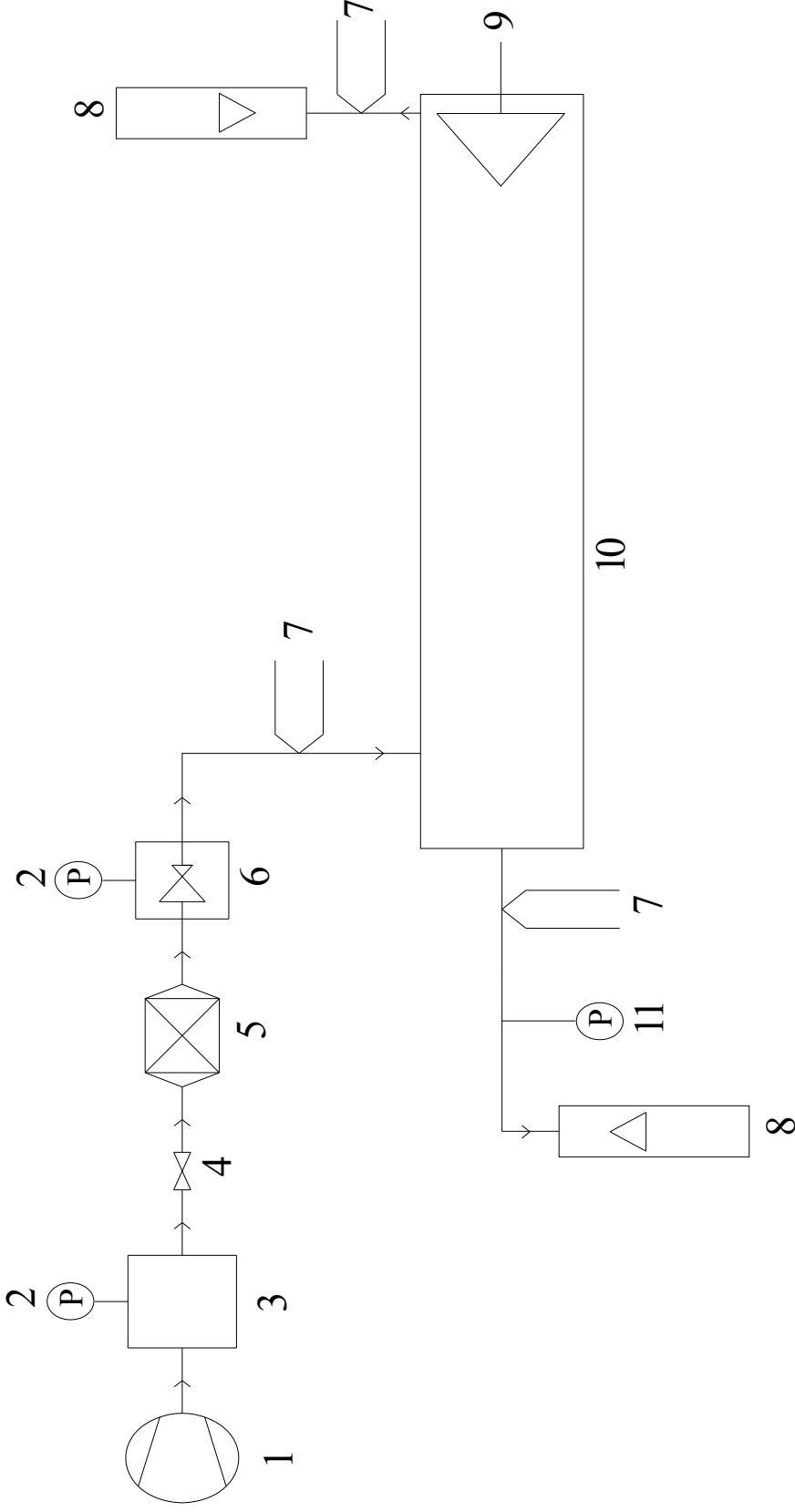
Şekil 10. Deneysel çalışmada kullanılan vorteks tüpünün demontajlı gösterimi



Şekil 11. Deney düzeneğinin fotoğrafı



Şekil 12. Test bölgesinin fotoğrafı



- | | | | |
|----------------------|----------------------|---------------------------|-----------------------|
| 1. Kompresör | 4. Vana | 7. Termoeleman | 10. Vorteks tüp |
| 2. Basınç göstergesi | 5. Kurutucu | 8. Rotametre | 11. Dijital manometre |
| 3. Hava tankı | 6. Basınç regülatörü | 9. Ayar vanası (konik uç) | |

Şekil 13. Vorteks tüpü deney düzenine şematik olarak gösterimi

2.2. Deneysel Ölçümler ve Kullanılan Ölçüm Cihazları

Yapılan deneylerde; sıcaklık, debi ve basınç ölçülmüştür. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazlarının, ölçme aralıkları ile hassasiyet dereceleri Tablo 3'te, fotoğrafı ise Şekil 14'te verilmektedir.

2.2.1. Sıcaklık Ölçümü

Sıcaklık ölçümü üç farklı noktadan, dört kanallı dijital termometre kullanılarak eş zamanlı olarak yapılmıştır. Dijital termometrenin K tipi termoelemanları, vorteks tüpünün girişinden ve çıkışlarından 1'er cm uzağa açılan sıcaklık prizlerinin içine uçları tam kanal merkezine gelecek şekilde yerleştirilmişleridir. Sızdırmazlık sağlamak amacıyla, temas yerleri silikon ile kapatılmıştır. Sıcaklıklar her debi değişiminden sonra, sistemin rejime gelmesiyle okunmuştur.

2.2.2. Debi Ölçümü

Soğuk ve sıcak uçlara yerleştirilen rotametreler ile debiler belirlenmiştir. Rotametreler sistem çıkışlarından yaklaşık 5 cm uzağa yerleştirilmişlerdir. Deneylerde Y_c değişimini arttırıp, daha fazla noktadan sıcaklık ölçümü alabilmek için çalışma basınçlarına uygun geniş skalalı rotametreler seçilmiştir. Bu sayede bir deneyde, çalışma basıncına bağlı değişmekle birlikte yaklaşık 20~25 ölçüm alınarak çok hassas sonuçlar elde edilmiştir.

2.2.3. Basınç Ölçümü

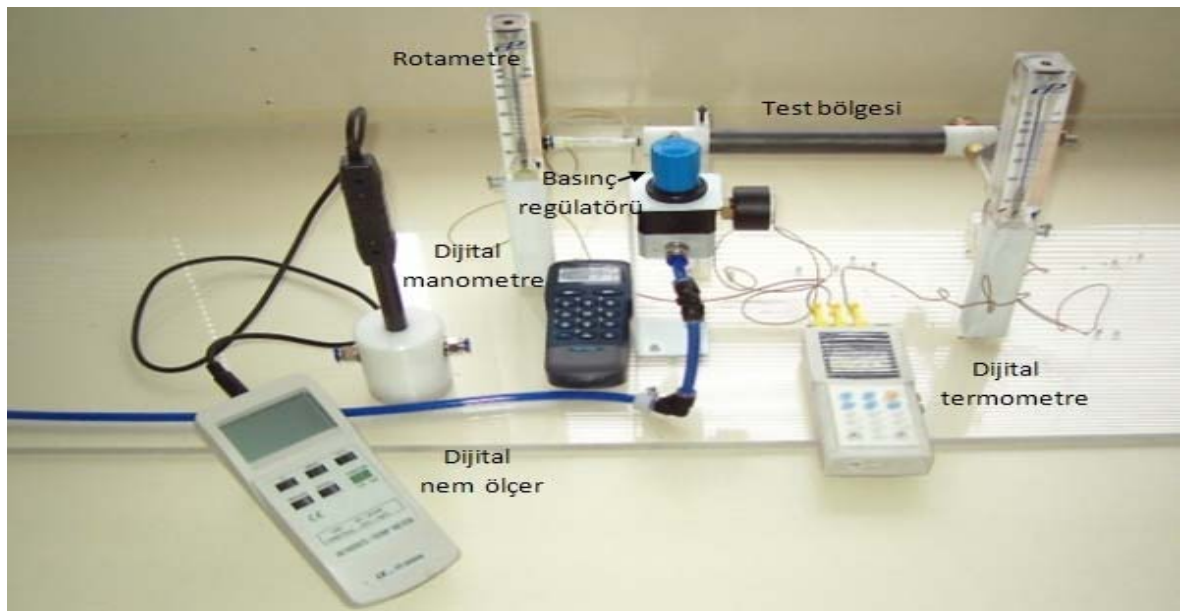
Basınç ölçümü, soğuk uç çıkışına açılan basınç prizine bağlanan dijital manometre ile yapılmıştır. Vorteks tüpü verimini hesaplamak için ve teorik kısımda yararlanılmak amacıyla sadece soğuk uç çıkışında basınç ölçümü yapılmıştır.

2.2.4. Basınç Regülasyonu

Girişte, çalışma basıncını belirlemek amacıyla, hassas basınç regülatörü kullanılmıştır. Basınç regülatörünün üzerine monte edilmiş 0-10 bar göstergeli analog manometreden yararlanılarak, istenilen çalışma basıncı basınç regülatörü vasıtasıyla ayarlanmıştır.

Tablo 3. Çalışmada kullanılan ölçüm cihazları ve özellikleri

Cihaz	Ölçüm aralığı	Belirsizlik
Dijital manometre HHP-2082	0-2 [bar]	$\pm 0.15\%$
Dijital termometre (OM-2041)	-200 – 1370 [oC]	$\pm 0.1\%$
Hacimsel debi ölçer (rotametre) CZ-32458-65	80-560 [LPM]	$\pm 3\%$
Nemölçer HT-3006HA	10-95 [%R.H.]	$\pm 3\%$
Barometre Testo 435-1 (Part no: 0632 1535)	600-1150 [mbar]	$\pm 3\%$
Basınç regülatörü	0-10 [bar]	$\pm 0.16\%$



Şekil 14. Deneysel çalışmada kullanılan ölçüm cihazları

2.3. Deneysel Hesaplama Prosedürü

Yapılan çalışmada, deneyler esnasında, temel olarak farklı basınç ve debi değerleri için sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Sabit basınçta, çıkışlardaki debi değerleri değiştirilerek, soğuk ve sıcak uç çıkışındaki sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Sıcaklık farkı değerlerinden yararlanarak, geometrik ve termofiziksel parametrelerin vorteks tüpleri üzerindeki etkileri yorumlanmaya çalışılmıştır.

2.3.1. Vorteks Tüpleri İçin Temel İfadeler

2.3.1.1. Soğuk Kütle Oranı

Vorteks tüpleri için soğuk kütle oranı, soğuk uçtan çıkan kütleli debinin, girişteki kütleli debiye oranıdır. Bu oran,

$$Y_c = \frac{m_c}{m_i} \quad (1)$$

denklemleri ile belirlenir. Burada, Y_c soğuk kütle oranı (cold mass fraction), m_c soğuk uçtan çıkan akışkanın kütleli debisi, m_i ise girişteki akışkanın kütleli debisidir.

2.3.1.2. Soğuk Hava Sıcaklık Farkı

Soğuk hava sıcaklık farkı, girişteki akışkan sıcaklığı ile soğuk uçtaki akışkan sıcaklık farkıdır ve

$$\Delta T_c = T_i - T_c \quad (2)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada, T_i ve T_c sırasıyla akışkanın girişteki sıcaklığı ile soğuk uçtan çıkışı esnasındaki sıcaklığıdır.

2.3.1.3. Sıcak Hava Sıcaklık Farkı

Sıcak hava sıcaklık farkı, akışkanın sıcak uçtan çıkarkenki sıcaklığı ile girişteki sıcaklığı arasındaki farktır ve

$$\Delta T_h = T_h - T_i \quad (3)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada T_h ve T_i sırasıyla, akışkanın sıcak uçtan çıkarken ve vorteks tüpüne girerken sahip olduğu sıcaklık değerleridir.

2.3.1.4. Toplam Sıcaklık Farkı

Toplam sıcaklık farkı, soğuk ve sıcak uçtan çıkan akışkan sıcaklıkları arasındaki farktır ve

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (4)$$

eşitliği ile ifade edilir

2.4. Belirsizlik Analizi

Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçların doğruluğunu etkileyen hataların derecelerinin ve miktarlarının belirlenmesi oldukça önemlidir (Avcı, 2003). Deneyler esnasında, deney düzeneğinden, ölçüm araçlarından ve deneyi yapan kişiden kaynaklanan hatalar söz konusudur. Bu nedenle deneysel verilerin hata oranlarını belirlemek için belirsizlik analizinin yapılması, sonuçların yorumlanması açısından oldukça önemlidir.

Belirsizlik analizi şu şekilde yapılabilir: Sistemde ölçülmesi gereken büyüklük F olsun ve bu büyüklüğe $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ olmak üzere n adet bağımsız değişken etki etsin. Bu durumda,

$$F = F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (5)$$

şeklinde yazılabilir. Her bir bağımsız değişkene ait belirsizlik değerleri $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_n$ olmak üzere, F için toplam belirsizlik,

$$w_F = \left[\left(\frac{\delta F}{\delta x_1} \sigma_1 \right)^2 + \left(\frac{\delta F}{\delta x_2} \sigma_2 \right)^2 + \left(\frac{\delta F}{\delta x_3} \sigma_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta F}{\delta x_n} \sigma_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

ifadesi ile belirlenebilir.

Bu çalışmada, sıcaklık, debi ve basınç ölçümü yapıldı. Bu ölçümlerden elde edilen değerlerle sıcaklık farkları ve soğuk kütle oranı belirlendi.

Vorteks tüpler için tanımlanan soğuk kütle oranı ile; soğuk hava sıcaklık farkı, sıcak hava sıcaklık farkı ve toplam sıcaklık farkı şeklinde ifade edilen sıcaklık farkı kavramları için belirsizlik analizi yapılmış ve elde edilen belirsizlik ifadeleri sırasıyla aşağıdaki şekilde verilmiştir. Daha sonra ise, bu belirsizlik ifadelerinde yazılan her bir bağımsız değişken için toplam hata değerleri belirlenmiştir.

a) Soğuk kütle oranı (Y_c) için belirsizlik:

Soğuk kütle oranı ölçülen değerler cinsinden;

$$Y_c = \frac{\rho_c \dot{V}_c}{\rho_i \dot{V}_i} \quad (7)$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

Y_c ifadesi için toplam belirsizlik;

$$\frac{\sigma_{Y_c}}{Y_c} = \left[\left(\frac{\sigma_{\rho_c}}{\rho_c} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\rho_i}}{\rho_i} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\dot{V}_c}}{\dot{V}_c} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\dot{V}_i}}{\dot{V}_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

şeklinde belirlenebilir.

b) Soğuk hava sıcaklık farkı için belirsizlik:

Soğuk hava sıcaklık farkı için toplam belirsizlik;

$$\frac{\sigma_{\Delta T_c}}{\Delta T_c} = \left[\left(\frac{\sigma_{T_i}}{\Delta T_c} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{T_c}}{\Delta T_c} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

şeklinde belirlenebilir.

c) Sıcak hava sıcaklık farkı için belirsizlik:

Sıcak hava sıcaklık farkı için toplam belirsizlik;

$$\frac{\sigma_{\Delta T_h}}{\Delta T_h} = \left[\left(\frac{\sigma_{T_i}}{\Delta T_h} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{T_h}}{\Delta T_h} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

şeklinde belirlenebilir.

d) Toplam sıcaklık farkı için belirsizlik:

Toplam sıcaklık farkı için toplam belirsizlik;

$$\frac{\sigma_{\Delta T}}{\Delta T} = \left[\left(\frac{\sigma_{T_c}}{\Delta T} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{T_h}}{\Delta T} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

şeklinde belirlenebilir.

Yukarıda, vorteks tüp sistemi ile ilgili tanımlanan parametreler için elde edilen belirsizlik ifadeleri verilmiştir (Eşitlik 8-11). Bu belirsizlik ifadelerinde yazılan her bir bağımsız değişken için toplam hatanın belirlenmesi gerekmektedir. Söz konusu hataların belirlenmesinde, ölçüm aletlerinin kullanım kılavuzlarındaki hata değerleri ile çeşitli kaynaklarda ifade edilen benzer ölçümlerdeki hata değerleri esas alınmıştır. Bu hata değerlerinin dışındaki belirlenmesi oldukça zor veya mümkün olmayan hatalar tahmini olarak belirlendi. Bu bilgiler doğrultusunda, sıcaklık, basınç ve debi ölçümleriyle ilgili olarak, her bir bağımsız değişken için hata değerleri sırasıyla aşağıdaki şekilde verilebilir (Avcı, 2003).

1-) Sıcaklık ölçümlerinde ortaya çıkabilecek hatalar;

A1) Dijital termometreden kaynaklanan hata: $\pm\%0.1$

A2) Giriş sıcaklığının ölçülmesinde yapılabilecek hata: $\pm\%0.5$

A3) Soğuk uç sıcaklığının ölçülmesinde yapılabilecek hata: $\pm\%0.5$

A4) Sıcak uç sıcaklığının ölçülmesinde yapılabilecek hata: $\pm\%0.5$

Yukarıdaki hata değerleri dikkate alınarak, giriş sıcaklığının belirlenmesinde ortaya çıkabilecek toplam belirsizlik;

$$\sigma_{T_i} = \left[(A1)^2 + (A2)^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

şeklinde belirlenebilir. Akışkanın soğuk uçtan çıkarken sıcaklığında meydana gelebilecek toplam belirsizlik;

$$\sigma_{T_c} = \left[(A1)^2 + (A3)^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

şeklinde belirlenebilir. Akışkanın sıcak uçtan çıkarken sıcaklığında meydana gelebilecek toplam belirsizlik;

$$\sigma_{T_h} = \left[(A1)^2 + (A4)^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

2-) Debi ölçümünde ortaya çıkabilecek hatalar:

B1) Soğuk uçtaki rotametreden kaynaklanan hata: $\pm\%3$

B2) Sıcak uçtaki rotametreden kaynaklanan hata: $\pm\%3$

B3) Rotametrenin okunmasından kaynaklanan hata $\pm\%2$

Akışkanın vorteks tüp sistemine girişteki debisi; soğuk uç ve sıcak uç çıkışına yerleştirilen birer adet akış ölçerden (rotametreden) okunan debi değerlerinin toplamına eşittir. Bu nedenle, girişteki akışkan debisinin belirlenmesinde ortaya çıkabilecek toplam belirsizlik;

$$\sigma_{\dot{V}_i} = \left[(B1)^2 + (B2)^2 + (B3)^2 \right]^{1/2} \quad (15)$$

şeklinde belirlenebilir. Soğuk uçtan çıkan akışkan debisinin belirlenmesinde ortaya çıkabilecek toplam belirsizlik;

$$\sigma_{\dot{V}_c} = \left[(B1)^2 + (B3)^2 \right]^{1/2} \quad (16)$$

şeklinde belirlenebilir.

3-) Basınç ölçümünde ortaya çıkabilecek hatalar:

C1) Dijital manometreden kaynaklanan hata: $\pm\%0.15$

C2) Regülatörden kaynaklanan hata: $\pm 0.02\text{bar} \approx \pm\%0.16$

C3) Bağlantı elemanlarından kaynaklanan hata $\pm\%0.5$

C4) Regülatöre bağlı manometrenin okunmasından kaynaklanan hata $\pm\%1$

Soğuk uç çıkışındaki akışkanın statik basıncının belirlenmesinde için ortaya çıkabilecek toplam belirsizlik;

$$\sigma_{P_c} = \left[(C1)^2 + (C3)^2 \right]^{1/2} \quad (17)$$

şeklinde belirlenebilir. Girişte akışkanın basıncının belirlenmesinde ortaya çıkabilecek toplam belirsizlik;

$$\sigma_{P_i} = \left[(C2)^2 + (C3)^2 + (C4)^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

şeklinde belirlenebilir.

Yukarıda tanımlanan belirsizlik ifadelerinin yanı sıra fiziksel özelliklerin tablo değerlerinin okunmasında da belirsizlik ortaya çıkabileceği göz önüne alınmalıdır.

e) Diğer belirsizlikler

Fiziksel özelliklerin tablo değerlerinin okunmasında ortaya çıkabilecek belirsizlik;

$\sigma_{\rho_i, c} = \sigma_{c\rho} = \sigma_{\alpha} = \pm\%0.1-0.2$ olarak ifade edilebilir.

2.5. Vorteks Tüplerinin Termodinamik Analizi

2.5.1. Termodinamiğin Birinci Yasası Açısından Vorteks Tüplerinin İncelenmesi

Enerjinin korunumu ilkesi olarak da bilinen termodinamiğin birinci yasaı, enerjinin değişik biçimleri arasındaki ilişkileri incelemek için bir temel oluşturur ve enerjinin var veya yok edilemeyeceğini, ancak bir biçimden diğere dönüşebileceğini vurgular (Çengel ve Boles, 1996).

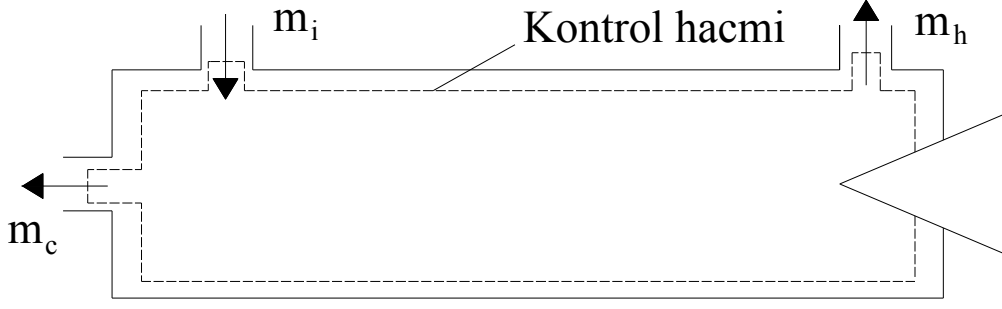
Termodinamik açıdan sistemler, kütle giriş ve çıkışının olup olmamasına göre ikiye ayrılır. Bunlar; açık sistem (kontrol hacmi) ve kapalı sistem (kontrol kütlesi) olarak adlandırılırlar. Açık sistemleri de sürekli akışlı açık sistemler ve zamanla değişen açık sistemler olmak üzere ikiye ayırabiliriz.

Sürekli akışlı açık sistemlerde, akışkanın özellikleri zamandan bağımsızdır, bir başka değişle zamanla değişmez. Ayrıca, sistemin toplam enerjisi sabittir. Bu nedenle, kontrol hacmine ısı, iş veya kütle akışı olarak giren enerjinin, çıkan enerjiye eşit olması zorunludur. Bu koşullar dikkate alınarak en genel halde, sürekli akışlı açık bir sistem için enerjinin korunumu ilkesi matematiksel olarak,

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_c \theta_c - \sum \dot{m}_g \theta_g \quad (19)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada; \dot{Q} kontrol hacmi ile çevresi arasında birim zamandaki ısı geçişi, \dot{W} ise, birim zamanda iş olarak sistem sınırlarını geçen iştir. Burada, θ ; akış işi de içinde olmak üzere, akışkanın birim kütlesinin toplam enerjisidir ve $\theta = h + k_e + p_e$ şeklinde ifade edilir.

Vorteks tüpleri, bir giriş ve iki çıkışı olması sebebiyle termodinamik açıdan açık sistem olarak ele alınırlar. Ayrıca vorteks tüplerinin içerisinde, çalıştıkları süre boyunca sürekli bir akış söz konusudur. Bu nedenle vorteks tüpleri, termodinamik açıdan *sürekli akışlı açık sistemi* ifade ederler. Vorteks tüpü için kontrol hacmi Şekil 15'te gösterilmiştir.



Şekil 15. Karşıt akışlı vorteks tüpü için kontrol hacmi

Çalışmada kullanılan vorteks tüpü adyabatiktir, çevreyle herhangi bir iş veya ısı etkileşimi yoktur. Akışkan olarak kullanılan hava, ideal gaz olarak düşünülebilir (Saidi ve Yazdi, 1999). Tüpün adyabatik olması ve çevre ile herhangi bir iş etkileşiminde bulunmamasından dolayı $\dot{Q} = 0$ ve $\dot{W} = 0$ olarak yazılabilir. Ayrıca, kinetik ve potansiyel enerji değişimleri de ihmal edilip, soğuk uç çıkışı, sıcak uç çıkışı ve giriş için sırasıyla c,h,i indisleri kullanılıp Eşitlik 19 yeniden düzenlenerek,

$$\dot{m}_i h_i = \dot{m}_c h_c + \dot{m}_h h_h \quad (20)$$

eşitliği elde edilir. Soğuk kütle oranı ifadesi

$$Y_c = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_i} \quad (21)$$

eşitliği ile gösterilmektedir. Vorteks tüpü için belirtilen kontrol hacmine, kütlelerin korunumu ifadesinin uygulanmasıyla, vorteks tüpler için kütlelerin korunumu ifadesi,

$$\dot{m}_i = \dot{m}_c + \dot{m}_h \quad (22)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. Eşitlik 21 ile Eşitlik 22'nin düzenlenerek Eşitlik 20'de yerine yazılması ile,

$$h_i = Y_c h_c + (1 - Y_c) h_h \quad (23)$$

denklemini elde edilir. Sabit özgül ısı mükemmel gazlar için $c_p = dh / dT$ yazılabilir. Bu durum göz önüne alınarak, Denklem 23 yeniden düzenlenirse,

$$T_i = Y_c T_c + (1 - Y_c) T_h \quad (24)$$

denklemini elde edilir. Denklem 24'ten Y_c terimi çekilirse;

$$Y_c = \frac{\Delta T_h}{\Delta T} \quad (25)$$

denklemini elde edilir. Burada; $\Delta T_h = T_h - T_i$ ve $\Delta T = T_h - T_c$ 'dir.

2.5.2. Termodinamiğin İkinci Yasası Açısından Vorteks Tüplerin İncelenmesi

2.5.2.1. Termodinamiğin İkinci Yasası ile İlgili Genel Bilgiler

Termodinamiğin birinci yasa, enerjinin niceliği üzerinde dururken, ikinci yasa enerjinin niceliği yanında niteliğini de ön plana çıkartır. İkinci yasa, bir hal değişimi sırasında enerjinin niteliğinin nasıl azaldığını hesaplamak için somut yöntemler ortaya koyar. Ayrıca, ısı makineleri ve soğutma makineleri gibi temel mühendislik sistemlerinin verimlerinin üst sınırını belirlemeye yarar.

Bir hal değişimi sırasında yapılan iş, ilk hale, son hale ve izlenen yola bağlıdır. Bir sistemden elde edilecek en çok işi belirlerken, tersinmezlikler göz önüne alınmaz. Çünkü iki hal arasında, sistem tarafından yapılan en çok iş, sistem belirli bir başlangıç halinden, tersinir bir hal değişimiyle çevrenin bulunduğu hale getirilirse elde edilir. Çevrenin bulunduğu hal, *ölü hal* olarak adlandırılmaktadır. Ölü haldeyken sistem, çevre sıcaklığında ve basıncındadır. Ayrıca sistemin çevresine göre kinetik ve potansiyel enerjileri sıfırdır. Bu hızın ve bir referans noktasına göre yüksekliğin sıfır olması anlamına gelir. Bir sistemin ölü haldeki kullanılabilirliği sıfırdır.

Kullanılabilirlik ise sistemin yararlı iş potansiyeli veya iş yapma olanağı olarak adlandırılmaktadır. Kullanılabilirlik, verilen bir halde bir sistemden elde edilebilecek en çok işi belirlemek açısından yararlıdır (Çengel ve Boles, 1996).

Bir sistemden elde edilen işin tümünden amaçlarımız doğrultusunda yararlanamayız. Çünkü yapılan işin bir kısmı çevreye gidebilir. Bu da, yararlı iş kavramını ortaya koymayı gerekli kılar. Yararlı iş ise, gerçek iş ile çevre işi arasındaki farktır ve

$$W_y = W - W_{\text{çevre}} \Rightarrow W_y = W - mP_o(v_2 - v_1) \quad (26)$$

denklemleri ile ifade edilebilir. Burada W_y yararlı iştir.

Belirli iki hal arasındaki hal değişimi sırasında bir sistemden elde edilebilecek en çok yararlı iş tersinir iştir. Son hal, ölü hal olduğu zaman tersinir iş kullanılabilirliğe eşittir. Tersinir iş ile yararlı iş arasındaki fark, hal değişimi sırasındaki tersinmezliklerden kaynaklanır ve tersinmezlik ifadesi,

$$I = W_{tr} - W_y \quad (27)$$

eşitliği ile belirlenebilir. Burada, W_{tr} tersinir iştir. Tersinir iş ile yararlı iş arasındaki fark olan I , kayıp ekserjidir ve tersinmezlik olarak adlandırılmaktadır.

2.5.2.2. Sürekli Akışlı Açık Sistemlerin İkinci Yasa Çözümlemesi

Vorteks tüplerinin, sürekli akışlı açık bir sistemi ifade ettiği daha önce belirtilmişti. Bu bölümde önce sürekli akışlı açık sistemler için genel olarak ikinci yasa çözümlemesi yapılacak. Daha sonra ise, elde edilen ifadeler vorteks tüplere uyarlanacaktır.

Sürekli akışlı açık sistem için termodinamiğin ilk iki yasası,

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_\zeta \left(h_\zeta + \frac{V_\zeta^2}{2} + gz_\zeta \right) - \sum \dot{m}_g \left(h_g + \frac{V_g^2}{2} + gz_g \right) \quad (28)$$

$$\dot{S}_{\text{üretim}} = \sum \dot{m}_{\zeta} s_{\zeta} - \sum \dot{m}_g s_g + \frac{\dot{Q}_{\text{çevre}}}{T_o} \quad (29)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, $\dot{S}_{\text{üretim}}$ açık sistemin toplam entropi üretimidir. $\dot{Q}_{\text{çevre}} = -\dot{Q}$ dir. Buradan (28) ve (29) ifadeleri eşitlenirse,

$$\dot{W} = \sum \dot{m}_g \left(h_g + \frac{V_g^2}{2} + gz_g - T_o s_g \right) - \sum \dot{m}_{\zeta} \left(h_{\zeta} + \frac{V_{\zeta}^2}{2} + gz_{\zeta} - T_o s_{\zeta} \right) - T_o \dot{S}_{\text{üretim}} \quad (30)$$

eşitliği elde edilir. Buradaki \dot{W} açık sistemde yapılan gerçek iştir. Bu, aynı zamanda yararlı işe eşittir. Çünkü sürekli akışlı açık sistemlerin sınırları sabit olup çevre işi söz konusu değildir. Tersinir iş, Eşitlik 30'daki toplam entropi üretimi sıfıra eşitlenerek bulunur. Bir giriş ve bir çıkışlı sistem için Eşitlik 30 basitleştirilirse,

$$\dot{W}_{tr} = \dot{m} \left[(h_g - h_{\zeta}) - T_o (s_g - s_{\zeta}) + \frac{V_g^2 - V_{\zeta}^2}{2} + g(z_g - z_{\zeta}) \right] \quad (31)$$

eşitliği elde edilir. Sistemden geçen birim kütle için Eşitlik 31 ifadesi tekrar yazılırsa,

$$w_{tr} = (h_g - h_{\zeta}) - T_o (s_g - s_{\zeta}) + \frac{V_g^2 - V_{\zeta}^2}{2} + g(z_g - z_{\zeta}) \quad (32)$$

eşitliği elde edilir. Parantez içindeki ifadeler düzenlenirse,

$$w_{tr} = T_o \Delta s - \Delta h - \Delta ke - \Delta pe \quad (33)$$

eşitliği elde edilebilir.

Bir akışın kullanılabilirliği; akış kullanılabilirliği olarak adlandırılır. Eşitlik 32'de, giriş hali indissiz, çıkış hali ise ölü hal olmak üzere "0" alt indisi ile gösterilirse, ($V_0=0$ ve $z_0=0$),

$$\psi = (h - h_o) - T_o(s - s_o) + \frac{V^2}{2} + gz \quad (34)$$

eşitliği elde edilir. Burada ψ akış kullanılabilirliği. Eşitlik 34'ten yararlanarak tersinir işi akış kullanılabilirliği ile gösterebiliriz.

$$\dot{W}_{tr} = \sum \dot{m}_g \psi_g - \sum \dot{m}_\phi \psi_\phi \quad (35)$$

Bir açık sistemde birim zamandaki tersinmezlik I ile gösterilebilir ve

$$\dot{I} = \dot{W}_{tr} - \dot{W}_y = T_o \dot{S}_{üretim} \quad (36)$$

eşitliği ile ifade edilebilir.

2.5.2.3. İkinci Yasamın Vorteks Tüplerine Uygulanması

Sürekli akışlı açık sistemler için en genel halde entropi üretimi, Eşitlik 29 ile belirtilmişti. Vorteks tüpünün adyabatik olduğu göz önüne alınır ve Eşitlik 29 yeniden düzenlenirse;

$$\dot{S}_{üretim} = \sum \dot{m}_\phi s_\phi - \sum \dot{m}_g s_g \quad (37)$$

eşitliği elde edilir.

Vorteks tüplerinin bir girişi ve iki çıkışı vardır. Çıkışlardan biri soğuk hava, diğeri ise sıcak hava çıkışıdır. Giriş, soğuk çıkış ve sıcak çıkış sırasıyla 'i', 'c', 'h' indisleriyle gösterilip, Eşitlik 37 ifadesi yeniden düzenlenirse;

$$\dot{S}_g = \dot{m}_i [(1 - Y_c)(s_h - s_c) + (s_c - s_i)] \quad (38)$$

eşitliği elde edilebilir. Vorteks tüpündeki gaz, ideal gaz olarak kabul edilirse, mükemmel gazlarda birim kütle için, sabit özgül ısı kabulü altında ikinci yasa;

$$s_c - s_i = c_p \ln \frac{T_c}{T_i} - R \ln \frac{P_c}{P_i} \quad (39)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. Eşitlik 24 ve Eşitlik 39'un Eşitlik 38'de yerine yazılmasıyla vorteks tüpleri için;

$$(\dot{S}_g)_{VT} = \dot{m}_i \left[c_p \ln \frac{(T_h / T_c)^{(1-Y_c)}}{1 + (1-Y_c)(T_h / T_c - 1)} + R \ln \frac{P_i}{P_c} \right] \quad (40)$$

eşitliği elde edilir.

2.5.2.4. Vorteks Tüpleri İçin Ekserji Eşitliği

Belirli iki hal arasındaki hal değişimi sırasında bir sistemden elde edilebilecek en fazla yararlı iş, tersinir iştir. Tümünden tersinir bir hal değişimi sırasında tersinmezliklerin bir ölçüsü olan entropi üretimi olmaz. Gerçek hal değişimleri sırasında ise tersinmezlik sıfırdan büyüktür. Bir başka deyişle tüm gerçek hal değişimleri sırasında tersinmezliklerin bir ölçüsü olan entropi üretimi olmaktadır.

Tersinir iş ile yararlı iş arasındaki fark, hal değişimi sırasındaki tersinmezliklerden kaynaklanır ve I ile gösterilir. I ise, aynı zamanda yok olan kullanılabilirlik veya kayıp ekserji olarak da adlandırılmaktadır ve vorteks tüplerinde birim kütle için kayıp ekserji;

$$i = e_i - \sum e_{iç} \quad (41)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. Bu ifade de kullanılan 'e' terimi Eşitlik 34'teki ' ψ ' terimi yerine kullanılmıştır; kullanılabilirlik olarak tanımlanır ve ekserji olarak da adlandırılabilir.

Diğer tüm termodinamik analizler gibi, ekserji analizi için de sürecin nasıl olduğunun bilinmesi gerekli değildir. Sadece sürecin başlangıç-giriş noktaları ile bitiş-çıkış noktaları için geçerli olan koşulların bilinmesi yeterlidir (Kırmacı, 2006).

Burada vorteks tüpü için giriş ve çıkışlardaki ekserjiler belirlenirken, son hal, yani referans hal olarak ölü hal göz önüne alınacaktır. Ölü halde sistem, çevre basıncı ve sıcaklığındadır.

Vorteks tüpü için giren ekserji;

$$e_i = (h_i - h_o) - T_o(s_i - s_o) \quad (42)$$

eşitliği ile belirlenebilir. Sıcak uçtan çıkan ekserji ise;

$$e_h = (h_h - h_o) - T_o(s_h - s_o) \quad (43)$$

eşitliği ile belirlenebilir. Soğuk uçtan çıkan ekserji;

$$e_c = (h_c - h_o) - T_o(s_c - s_o) \quad (44)$$

eşitliği ile belirlenebilir. Soğuk ve sıcak uçtaki soğuk kütle oranları da hesaba katılarak Eşitlik 43 ve Eşitlik 44 için toplam çıkan ekserji;

$$e_{iç} = Y_c e_c + (1 - Y_c) e_h \quad (45)$$

eşitliği ile belirlenebilir. Yukarıdaki eşitliklerin Eşitlik 41'de yerine yazılması ile;

$$i = (h_i - h_o) - T_o(s_i - s_o) - Y_c e_c + (1 - Y_c) e_h \quad (46)$$

eşitliği elde edilebilir. Vorteks tüpleri için, ikinci yasa verimi;

$$\varepsilon = \frac{\text{çıkan ekserji}}{\text{giren ekserji}} \quad (47)$$

şeklinde ifade edilebilir. Pay ve payda için ilgili eşitliklerin yerine yazılmasıyla vorteks tüplerinin ikinci yasa verimi için;

$$\varepsilon = \frac{Y_c(h_c - h_o) - T_o(s_c - s_o) + (1 - Y_c)(h_h - h_o) - T_o(s_h - s_o)}{(h_1 - h_o) - T_o(s_1 - s_o)} \quad (48)$$

eşitliği elde edilir.

2.6. Vorteks Tüplerinde Verim İfadeleri

Vorteks tüpleri için değişik verim ifadeleri tanımlanmaktadır. Bu verim ifadeleri, aşağıda açıklanmıştır.

2.6.1. Vorteks Tüplerinin Isıl Verimleri

Vorteks tüpü, hem soğutma makinesi hem de ısı pompası olarak düşünülebilir. Bu nedenle hem soğutma veriminin hem de ısıtma veriminin hesaplanması gerekmektedir.

Bir soğutma makinesinin verimi, etkinlik katsayısı ile ifade edilebilir. Etkinlik veya verimin genel bir tanımı, elde edilmek istenen değeri, bu değeri elde etmek için harcanması gereken değere bölerek yapılır (Çengel ve Boles, 1996). Bir soğutma makinesinin performans katsayısı;

$$COP_{SM} = \frac{Q_c}{W_{net}} \quad (49)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada, Q_c yerine \dot{Q}_c ve W_{net} yerine \dot{W}_{net} yazılabilir. Bu durumda Eşitlik 49,

$$COP_{SM} = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}_{net}} \quad (50)$$

eşitliğine dönüşmüş olur. Burada \dot{Q}_c ifadesi, vorteks tüpleri için, birim zamandaki soğutma miktarı olarak tanımlanır ve;

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c c_p (T_i - T_c) \quad (51)$$

şeklinde belirlenebilir. W_{net} ifadesini elde etmek için iki farklı kabul kullanılmaktadır. Bunlardan ilki şu şekilde açıklanabilir: Geleneksel bir soğutma çevriminde, bir kompresör bulunmaktadır ve sistem için yapılan iş, ‘kompresörün havayı, atmosferik basınçtan giriş basıncına izantropik olarak sıkıştırması için gerekli olan iştir’ şeklinde tanımlanır ve

$$CW = \dot{m}_i \frac{k}{k-1} RT_a \left[\left(\frac{P_i}{P_a} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (52)$$

eşitliği ile ifade edilebilir.

İkinci kabul ise şu şekilde açıklanabilir: RHVT (Ranque-Hilsch Vorteks Tüpü) sistemlerinde, hava kompresörü yerine sıkıştırılmış gaz kullanılabilir. Örneğin, hava tankına depolanmış gazın direkt buradan sisteme verilmesi gibi. Bu durumda Eşitlik 52’deki kompresör işi kullanılamaz. Bu kabule göre, yapılan iş; ‘gazın, çıkış basıncından giriş basıncına kadar, tersinir izotermal olarak sıkıştırılabilmesi için birim zamanda yapılması gereken iştir.’ şeklinde tanımlanır ve

$$W = \dot{m}_i RT_i \ln \left(\frac{P_i}{P_c} \right) \quad (53)$$

eşitliği ile ifade edilir. Bu ifade, ilk olarak Fulton (1950) tarafından ortaya atılmıştır (Xue ve Arjomandi, 2008). Eşitlik 50 kullanılarak performans katsayısı,

$$COP_{SM} = \frac{1}{\Gamma} \frac{Y_c (T_i - T_c)}{T_i \ln \left(\frac{P_i}{P_c} \right)} \quad (54)$$

eşitliğiyle belirlenebilir. Burada; k , özgül ısılar oranı, Y_c , soğuk kütle oranı ve $\Gamma = \frac{k-1}{k}$ olarak tanımlanmıştır.

Bir ısı pompasının performans katsayısı ise, birim zamandaki ısıtma miktarının, sistem için harcanan güce oranı olarak tanımlanabilir. Bu durumda ısıtma miktarı;

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_h c_p (T_h - T_i) \quad (55)$$

eşitliği ile belirlenebilir. Vorteks tüpünün bir ısı pompası olarak performans katsayısı ise,

$$COP_{IP} = \frac{1}{\Gamma} \frac{(1 - Y_c)(T_h - T_i)}{T_i \ln\left(\frac{p_i}{p_c}\right)} \quad (56)$$

eşitliği ile ifade edilebilir.

2.6.2. Adyabatik Genişleme Bakımından Vorteks Tüpü Verimi

Vorteks tüplerinde gerçekleşen proseste kullanılan gaz ideal gaz olarak kabul edilebilir. Ayrıca, bu gaz vorteks tüpe girerken adyabatik genişleme olduğu da düşünülürse, verim olarak izantropik verim ifadesi kullanılabilir ve bu durumda,

$$\eta_{is} = \frac{T_i - T_c}{T_i - T_{cs}} \quad (57)$$

eşitliği elde edilebilir. Burada, T_{cs} olarak gösterilen izantropik çıkış sıcaklığının açık formu,

$$T_{cs} = T_i \left(\frac{p_c}{p_i} \right)^\Gamma \quad (58)$$

şeklinde ifade edilebilir. Eşitlik 58'in Eşitlik 57'de yerine yazılmasıyla,

$$\eta_{is} = \frac{T_i - T_c}{T_i \left(1 - \left(\frac{P_c}{P_i} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)} \quad (59)$$

eşitliği elde edilebilir.

2.6.3. Carnot Verimi

2.6.3.1. Carnot Performans Katsayıları

Tersinir Carnot çevrimiyle çalışan sanal ısı makinesine Carnot Isı Makinesi adı verilir. Carnot veya başka bir tersinir ısı makinesinin ısı verimi,

$$\eta_{th,tr} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (60)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu bağıntıya genellikle *Carnot verimi* adı verilir. Bu değer T_H ve T_L sıcaklıklarındaki ısı enerji depoları arasında çalışan bir ısı makinesinin sahip olabileceği en yüksek verimdir (Çengel ve Boles, 1996). Bu ifadeyi vorteks tüplerine uyarlırsak;

$$\eta_{vt,tr} = 1 - \frac{T_i}{T_h} \quad (61)$$

eşitliğini elde ederiz. Carnot performans katsayıları, bir soğutma makinesi veya ısı pompası için tanımlanabilecek maksimum verimi ifade etmektedir. Bu durum vorteks tüpler için de geçerlidir. Vorteks tüpleri için Carnot performans katsayıları, bir soğutma ve ısıtma makinesi olarak sırasıyla aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$COP_{CN,SM} = \frac{T_c}{T_i - T_c} \quad (62)$$

$$COP_{CN,SM} = \frac{T_h}{T_h - T_i} \quad (63)$$

2.6.4. Carnot Çevrimini Referans Alan Verim İfadeleri

Bir soğutma makinesi veya ısı pompası olarak Ranque-Hilsch vorteks tüpünün niteliğini ölçmek için, Carnot çevrim verimi referans olarak kullanılabilir (Gao vd., 2005). Bu amaçla, Eşitlik 54 ve Eşitlik 56 ifadelerini sırasıyla (62) ve (63) ifadelerine oranlarsak, vorteks tüpleri için Carnot çevrimini esas alan verim ifadelerini elde ederiz. Bu ifadeler, 64 ve 65 eşitliklerinde belirtilmiştir.

$$\eta_{CN,SM} = \frac{Y_c (T_i - T_c)^2}{\Gamma T_i T_c \ln\left(\frac{p_i}{p_c}\right)} \quad (64)$$

$$\eta_{CN,IP} = \frac{(1 - Y_c)(T_h - T_i)^2}{\Gamma T_i T_h \ln\left(\frac{p_i}{p_c}\right)} \quad (65)$$

Vorteks tüpleri için verim, soğutma makinesi olarak Eşitlik 64'te, ısı pompası olarak ise Eşitlik 65'te gösterilmiştir.

3. BULGULAR

Bu çalışmada öncelikle; geometrik parametrelerin ve termofiziksel özelliklerin, vorteks tüplerinin ısıtma ve soğutma kapasiteleri üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda vorteks tüpleri için optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu sayede en uygun geometri ve çalışma koşulları belirlenmiştir. Ortam sıcaklığının, ortam neminin ve yalıtımının etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmaların devamında, vorteks tüpleri termodinamiksel açıdan incelenmiştir. Deneysel ölçülen büyüklükler ve hesaplanan karakteristikler aşağıda ara başlıklar halinde verilmektedir.

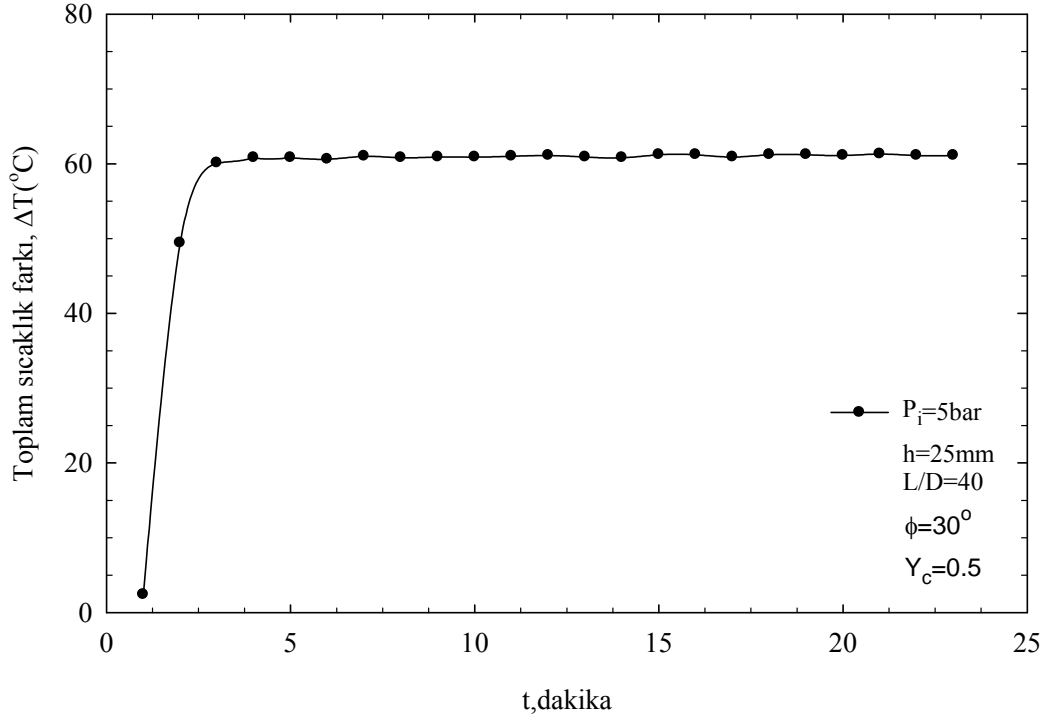
3.1. Ölçülen Değerler

Deneysel; girişte, soğuk ve sıcak havanın vorteks tüpünü terk ettiği uç çıkışlarında sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Soğuk ve sıcak uç çıkışlarında ise debi ölçümü yapılmıştır. Akışkan olarak hava kullanılmıştır ve debi ölçümü rotametreler vasıtasıyla yapılmıştır. Soğuk uç çıkışında ise sıcaklık ölçümüne ek olarak statik basınç ölçümü yapılmıştır. Çalışma basıncının etkisini belirlemek için, tüp girişindeki hassas basınç regülatörü ile giriş basıncı sabitlenmiştir. Ayrıca her çalışma için, ortam sıcaklığı ve nemi ile farklı çalışma basınçlarındaki nem değerleri belirlenmiştir. Ölçülen sıcaklıklar [$^{\circ}\text{C}$], basınçlar [bar], ve debi değerleri ise [l/dk] birimindedir.

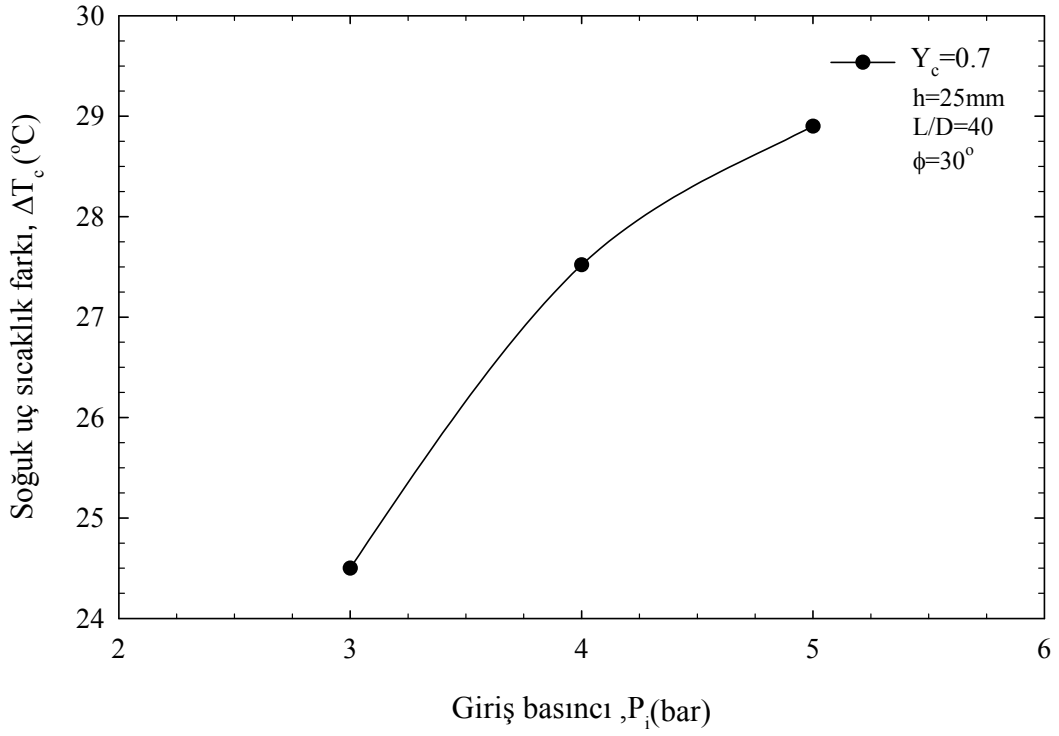
3.2. Hesaplanan Değerlerden Elde Edilen Bulgular

Sistemdeki konik uç (ayar valfi) vasıtasıyla çıkışlardaki akışkan debileri değiştirilebilmektedir. Kütleli debiler oranlanarak soğuk kütle oranları (Y_c) elde edilmiştir. Her bir kütleli debi oranı için soğuk ve sıcak uç sıcaklık farkları (ΔT_c ve ΔT_h) belirlendi ve grafikler halinde verildi. Bu grafikler, her bir geometrik etki incelenmek suretiyle tamamlandı. Bu kapsamda sırasıyla; basınç (Şekil 18-137), konik uç açısı (Şekil 138-197), L/D oranı (Şekil 198-287) ve helis adımı (Şekil 288-359) etkisini gösteren grafikler sunuldu. Optimizasyon çalışmalarının akabinde, termodinamik analiz sonuçlarıyla ilgili grafiklere yer verildi (Şekil 360-366).

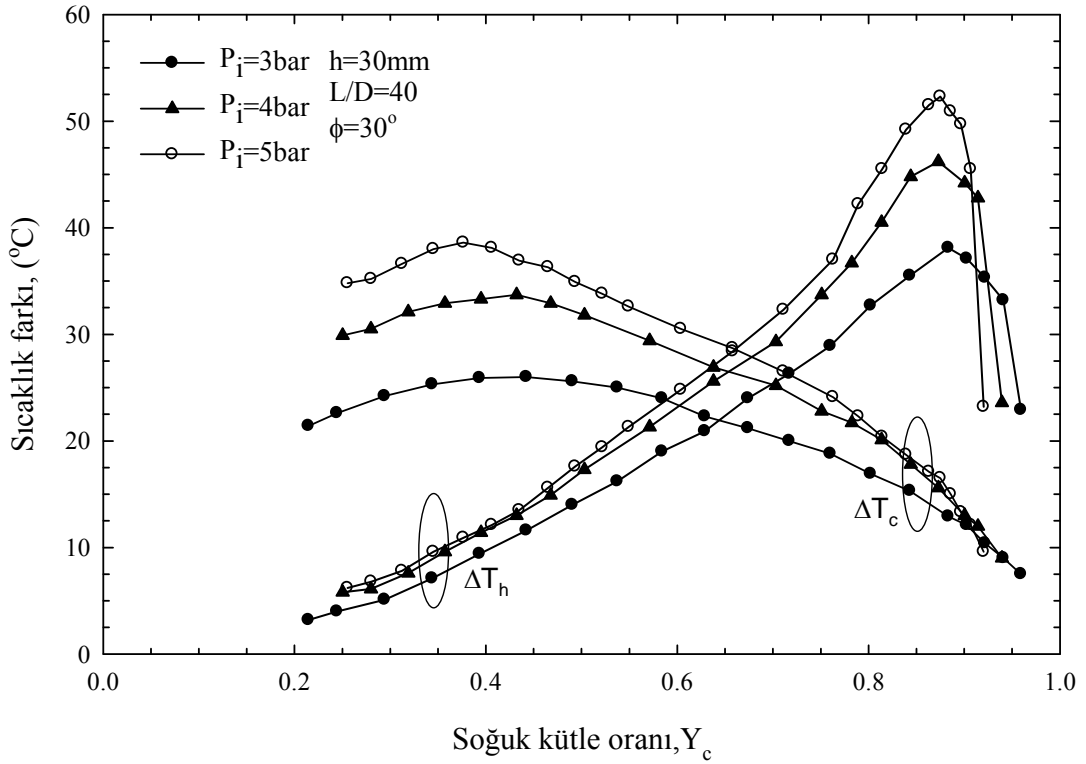
Sonra yalıtım (Şekil 367-370), ortam nemi (Şekil 371-376) ve ortam sıcaklığı (Şekil 377-379) etkisini içeren grafikler belirtildi. Son olarak da belirsizlik analizi sonuçları (Tablo 4) ile termal kamera görüntülerine yer verildi (Şekil 380-382).



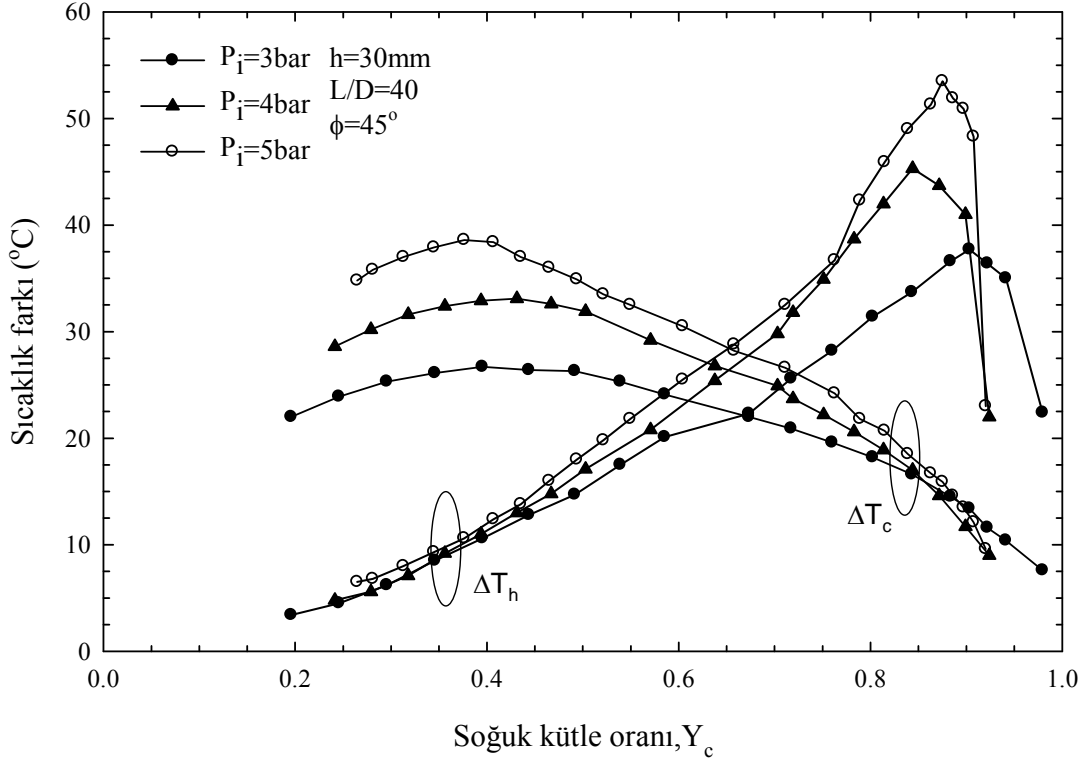
Şekil 16. Sistemin kararlı hale gelme süresi için ΔT 'nin, zamanla (t) değişimi



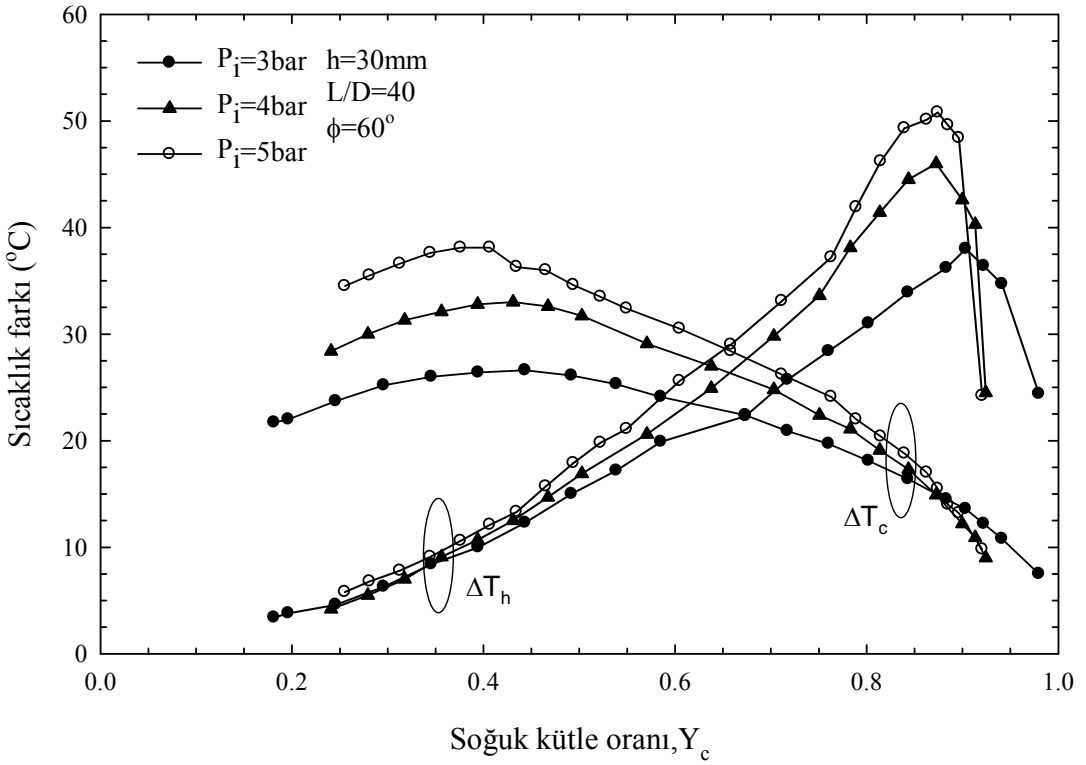
Şekil 17. Soğuk uç sıcaklık farkının (ΔT_c), giriş basıncı (P_i) ile değişimi



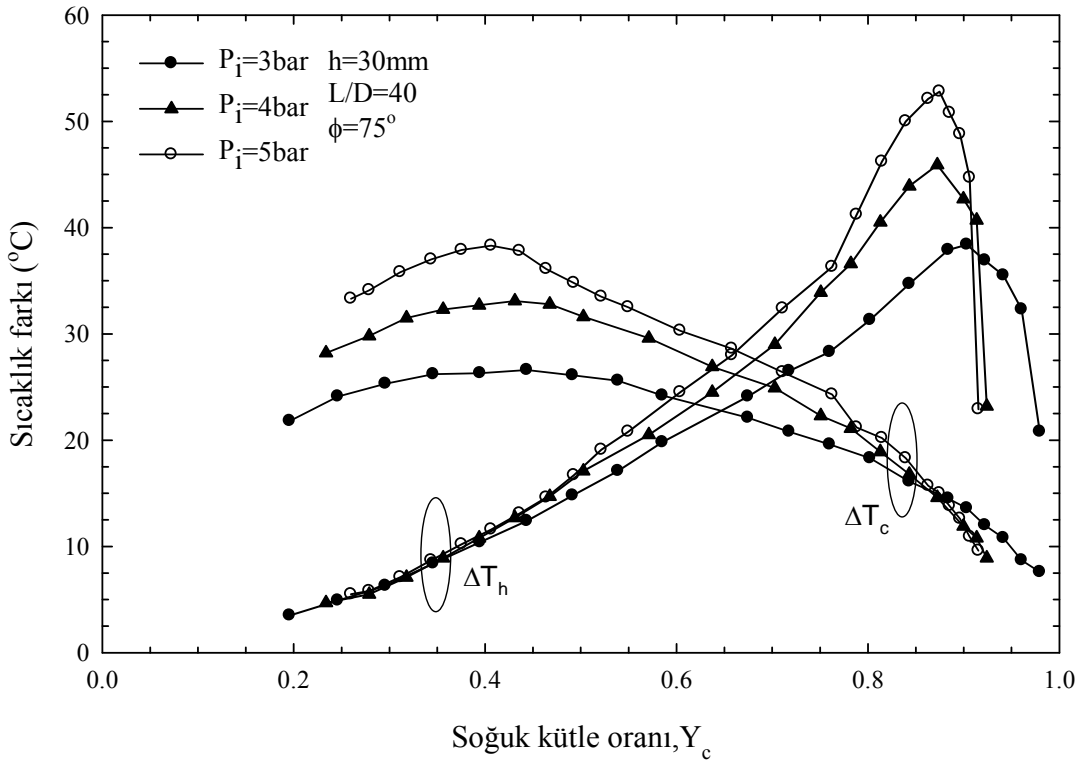
Şekil 18. $h=30$ mm, $L/D=40$ ve $\phi=30^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



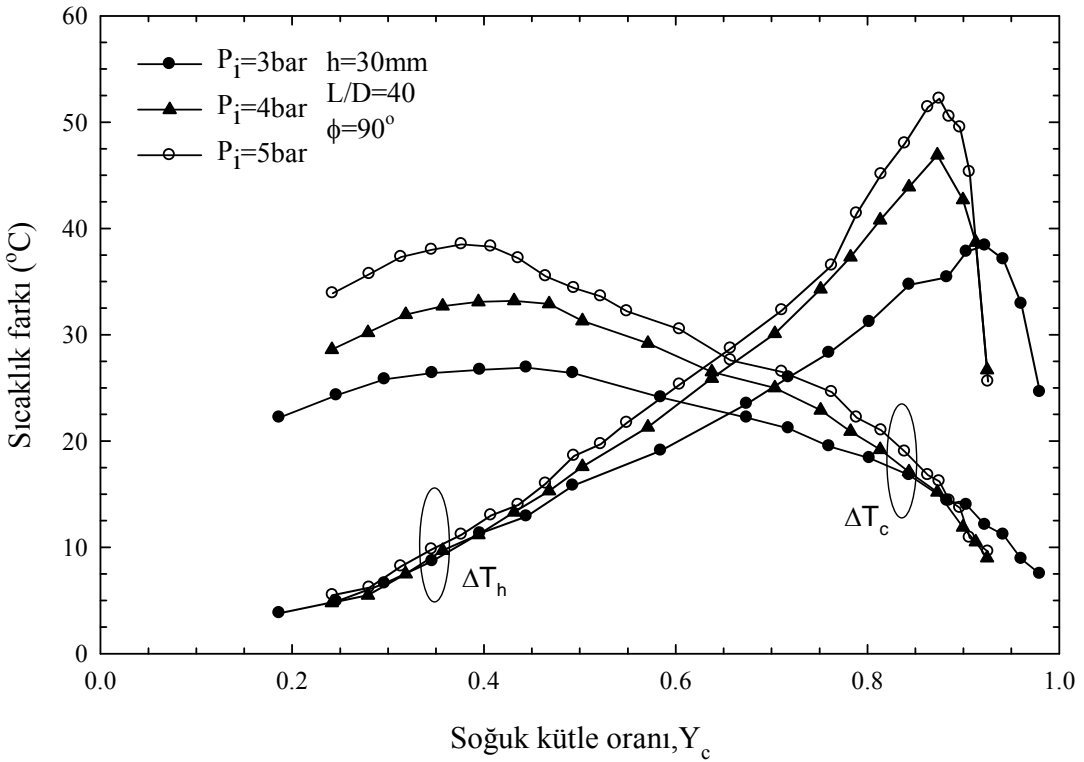
Şekil 19. $h=30\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=45^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



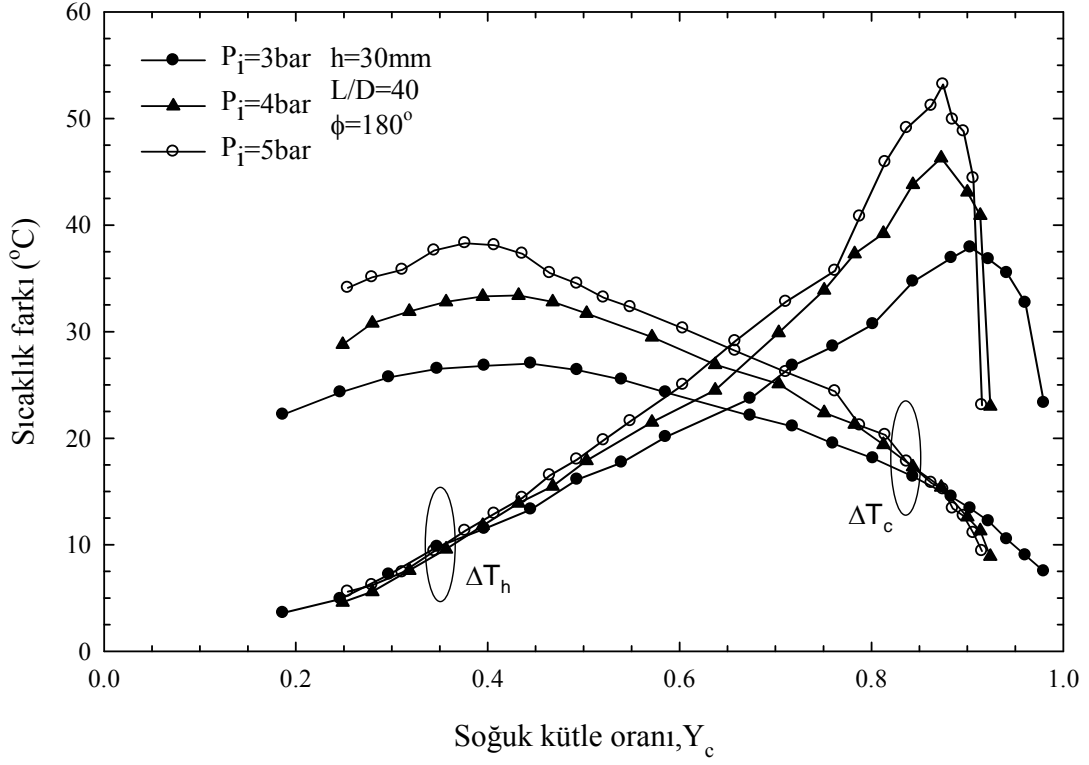
Şekil 20. $h=30\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=60^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



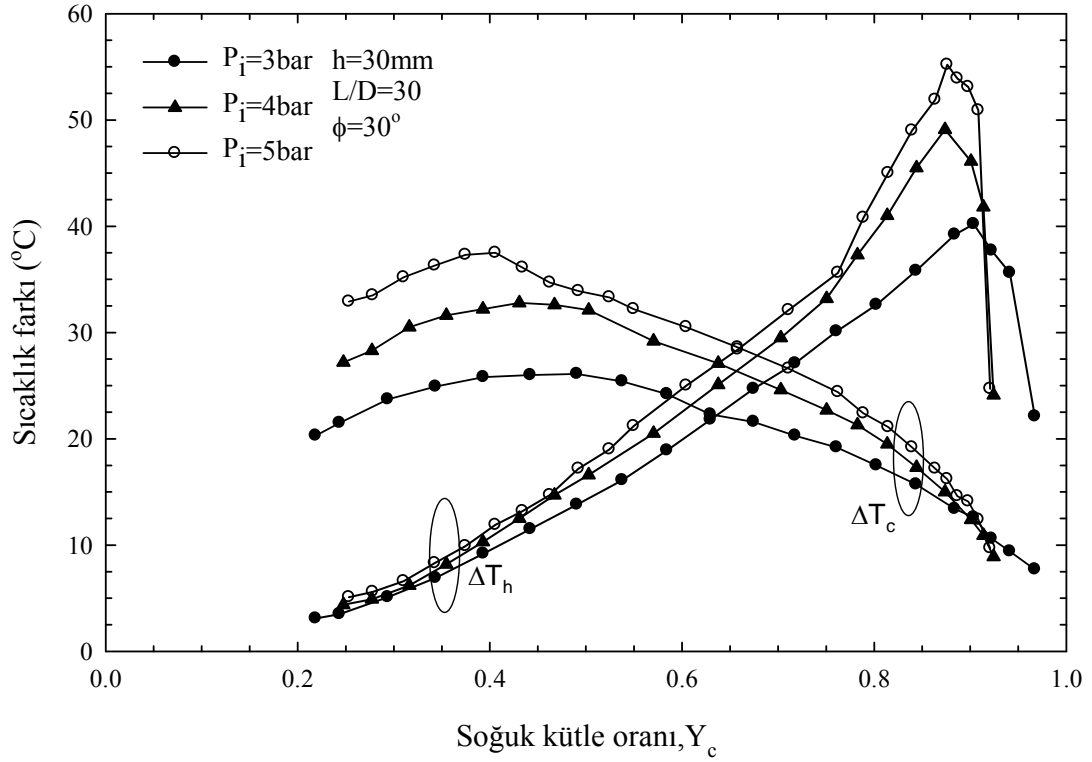
Şekil 21. $h=30\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=75^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



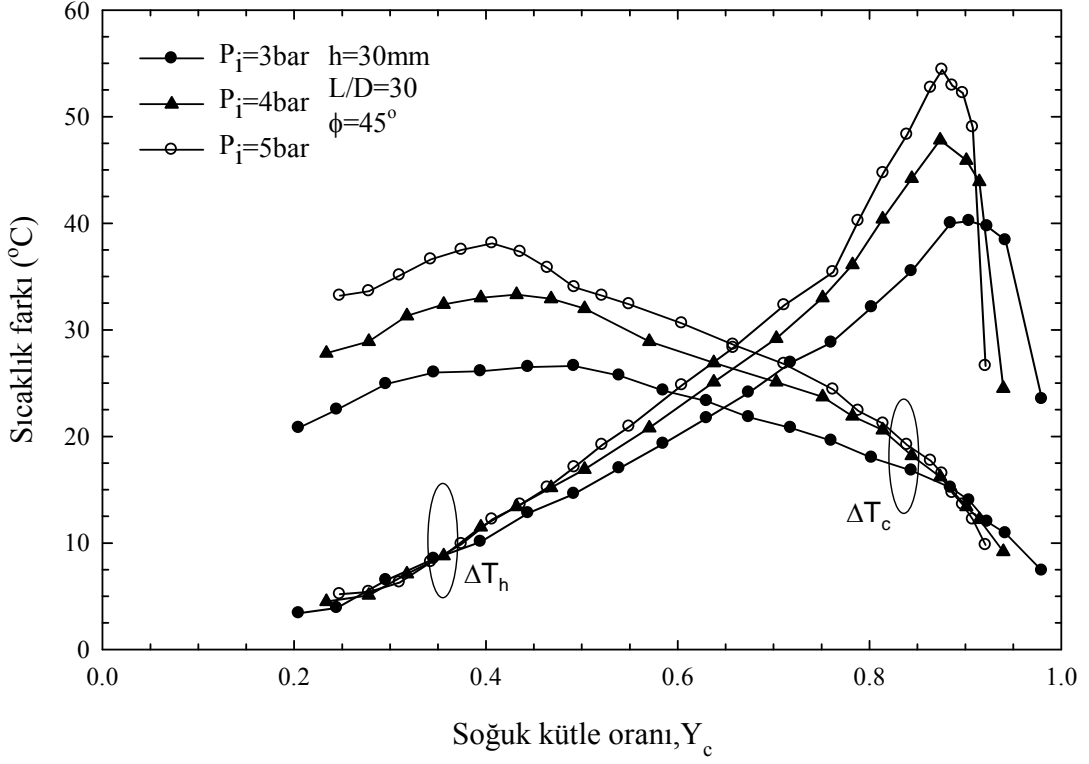
Şekil 22. $h=30\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=90^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



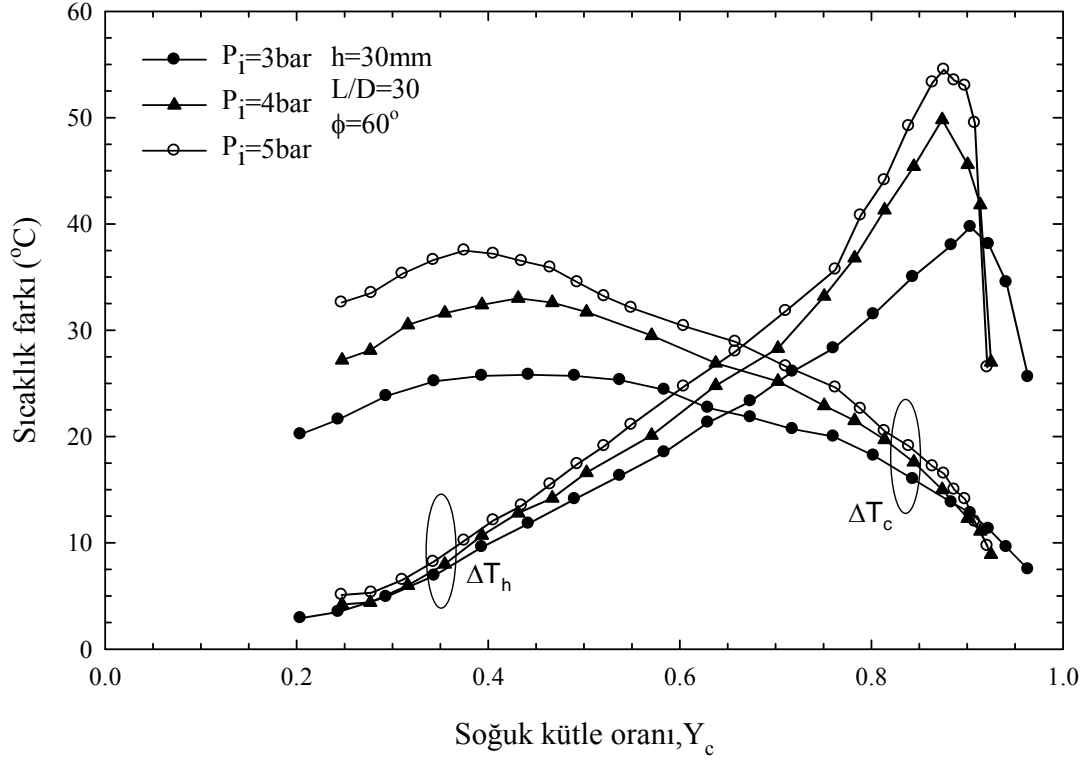
Şekil 23. $h=30\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=180^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



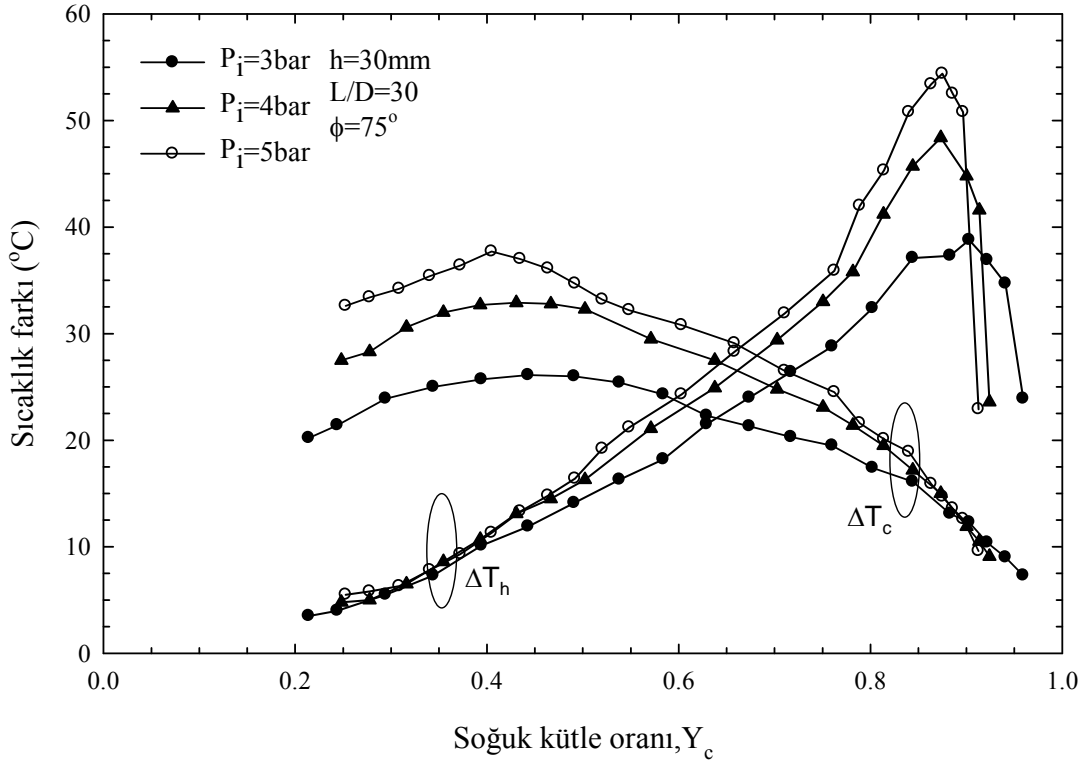
Şekil 24. $h=30\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=30^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



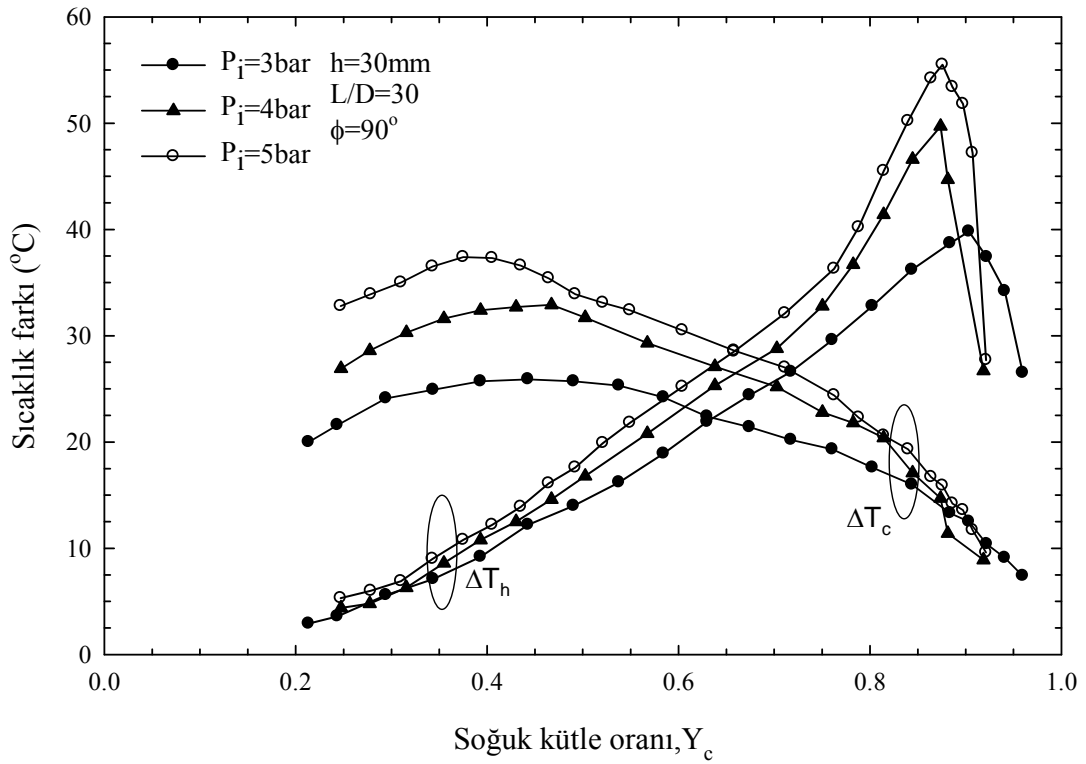
Şekil 25. $h=30\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=45^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



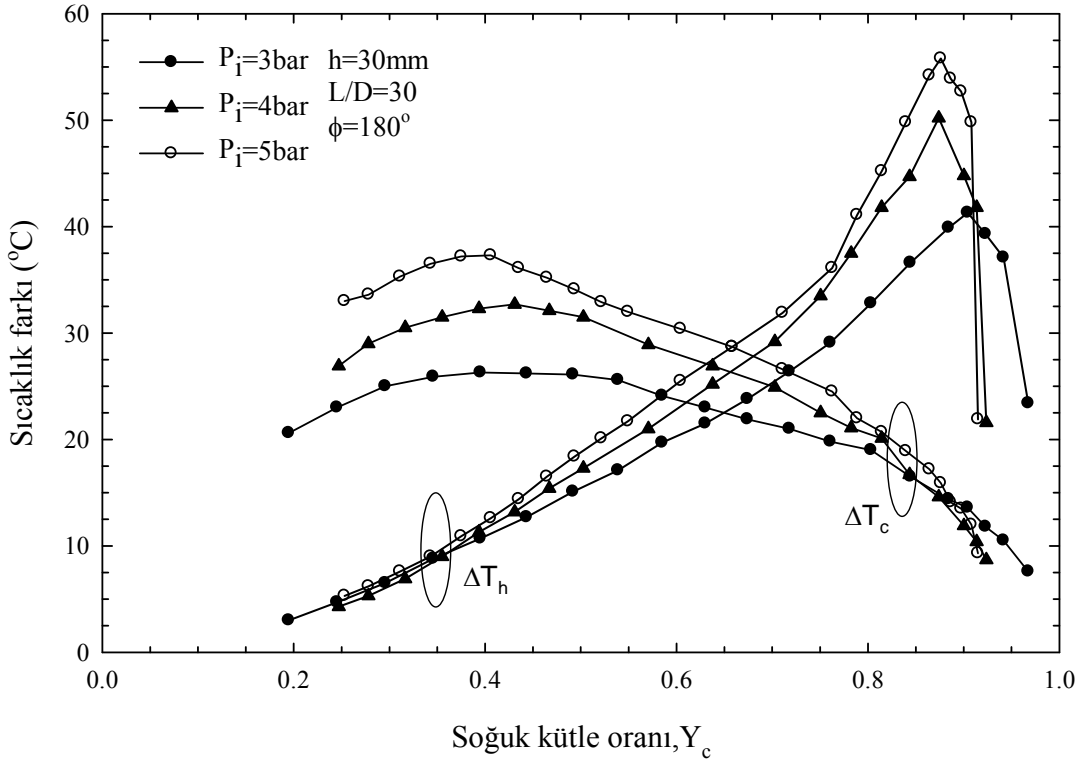
Şekil 26. $h=30\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=60^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



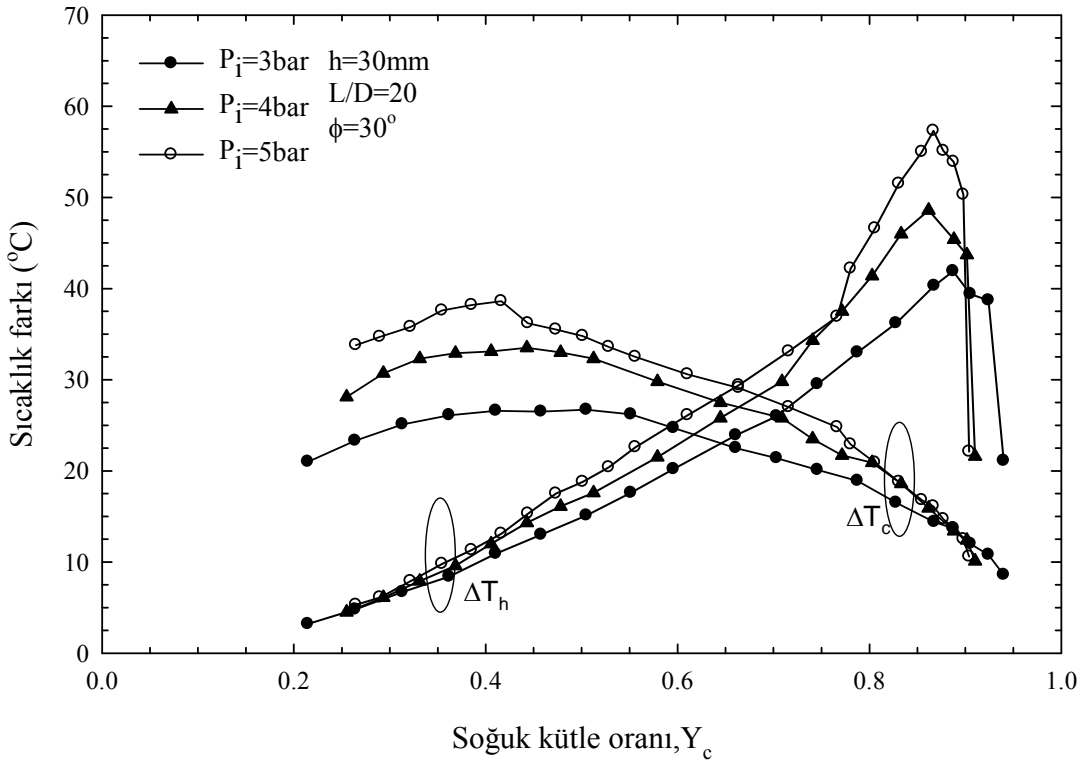
Şekil 27. $h=30\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=75^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



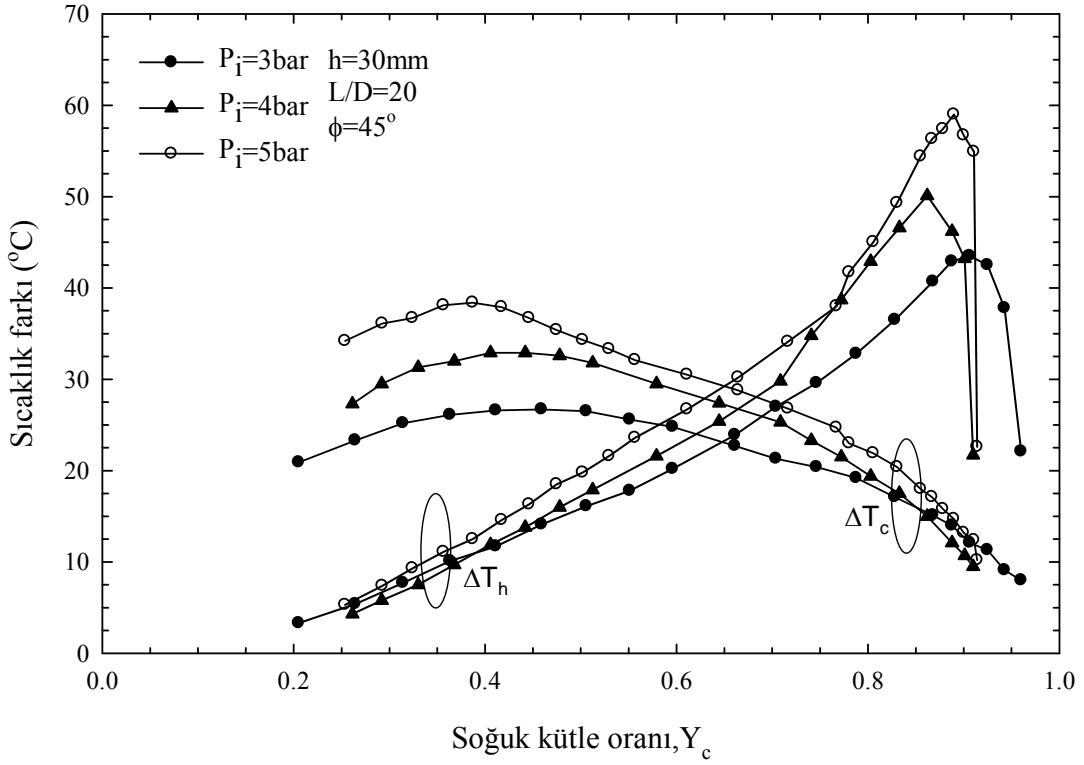
Şekil 28. $h=30\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=90^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



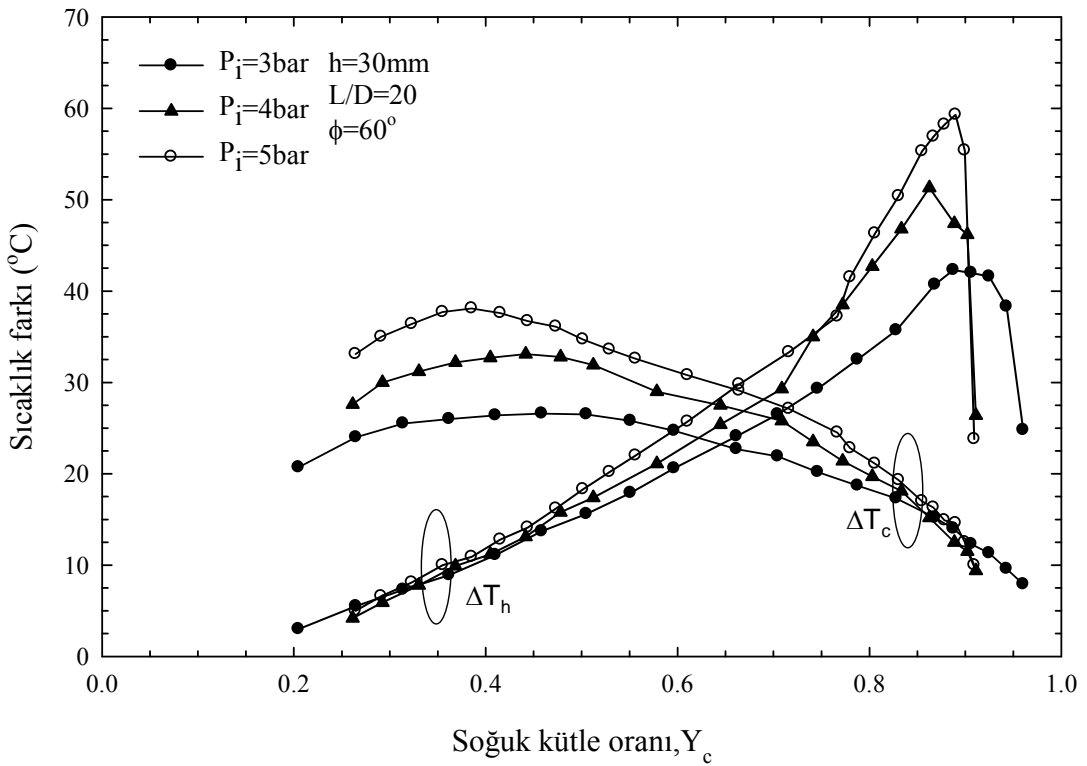
Şekil 29. $h=30\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=180^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



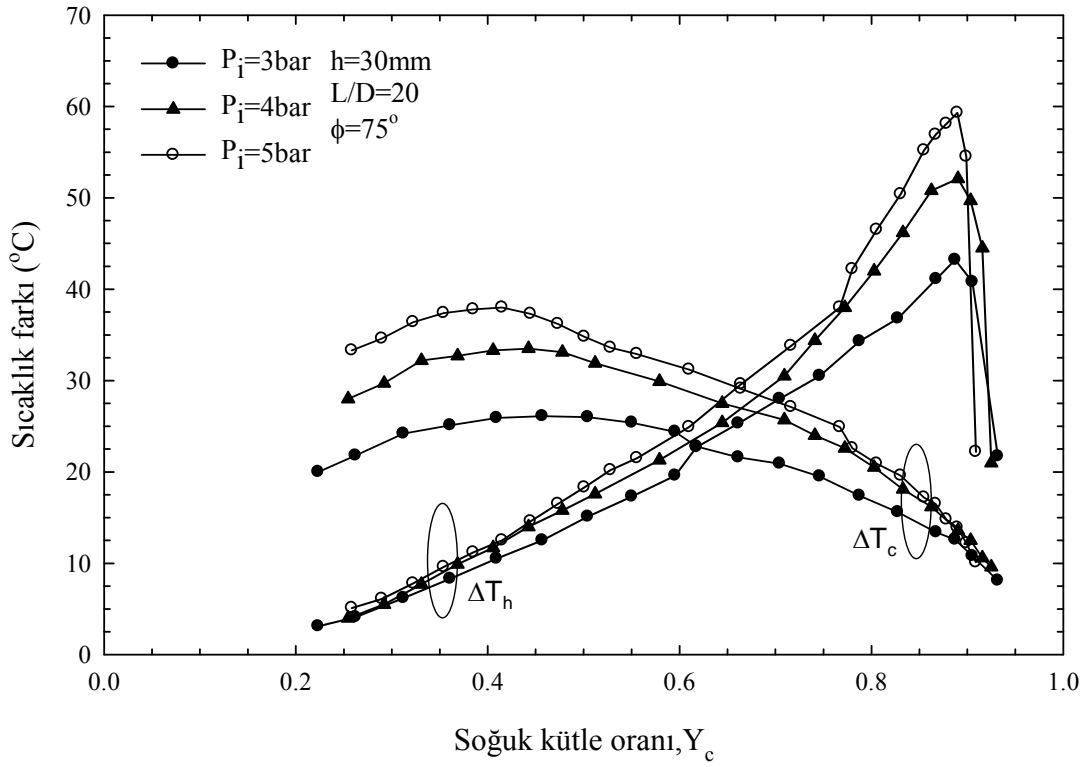
Şekil 30. $h=30\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=30^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



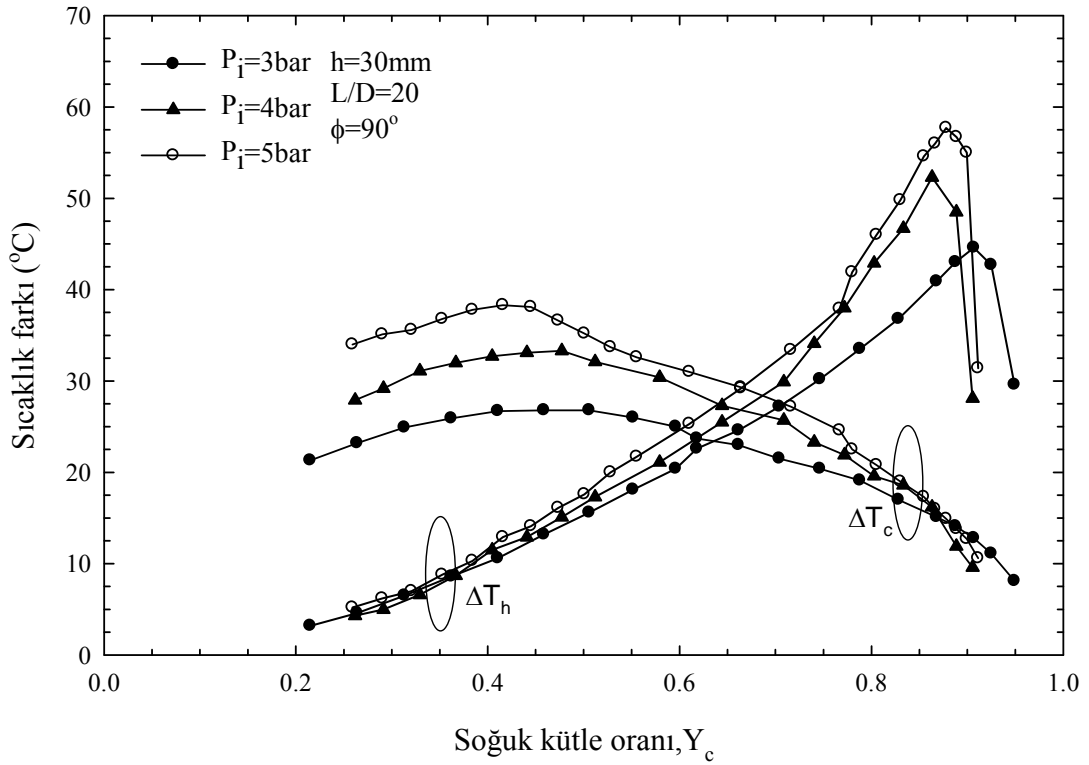
Şekil 31. $h=30$ mm, $L/D=20$ ve $\phi=45^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



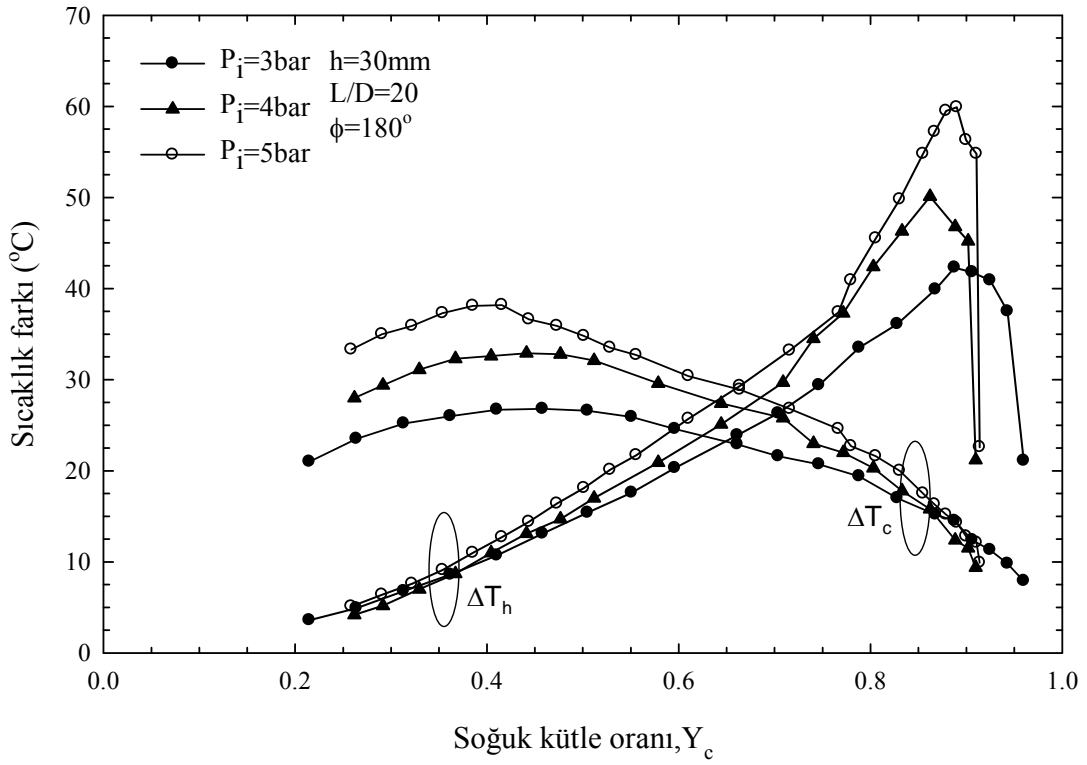
Şekil 32. $h=30$ mm, $L/D=20$ ve $\phi=60^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



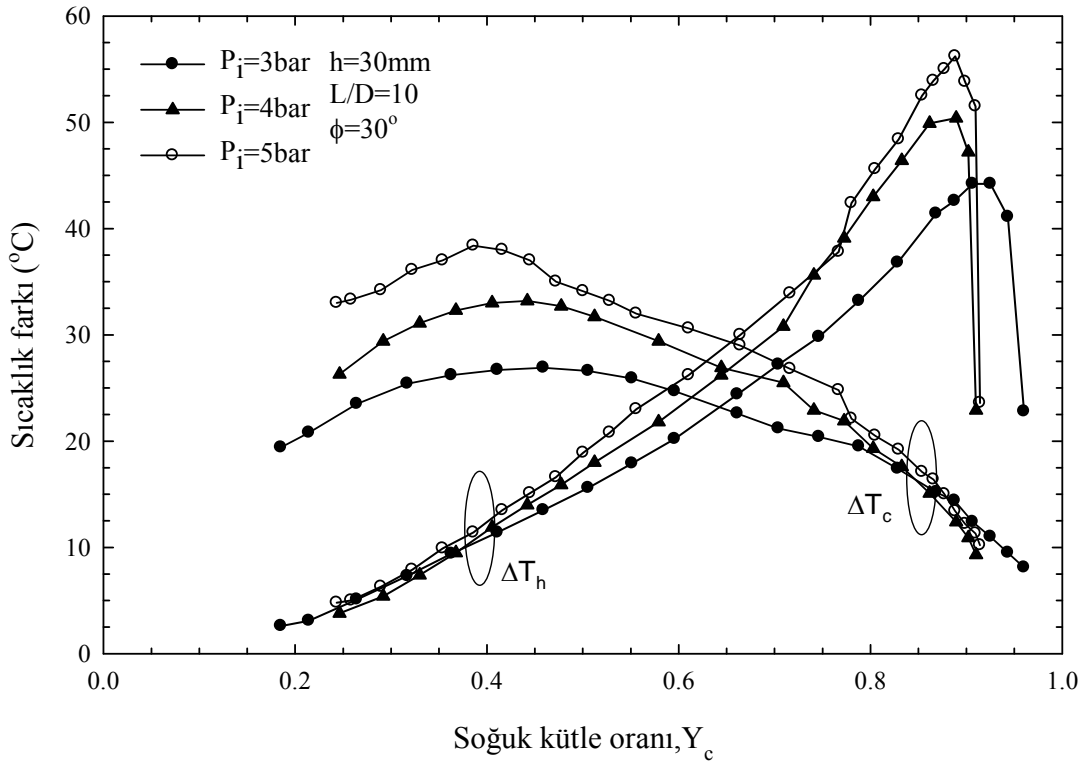
Şekil 33. $h=30\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=75^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



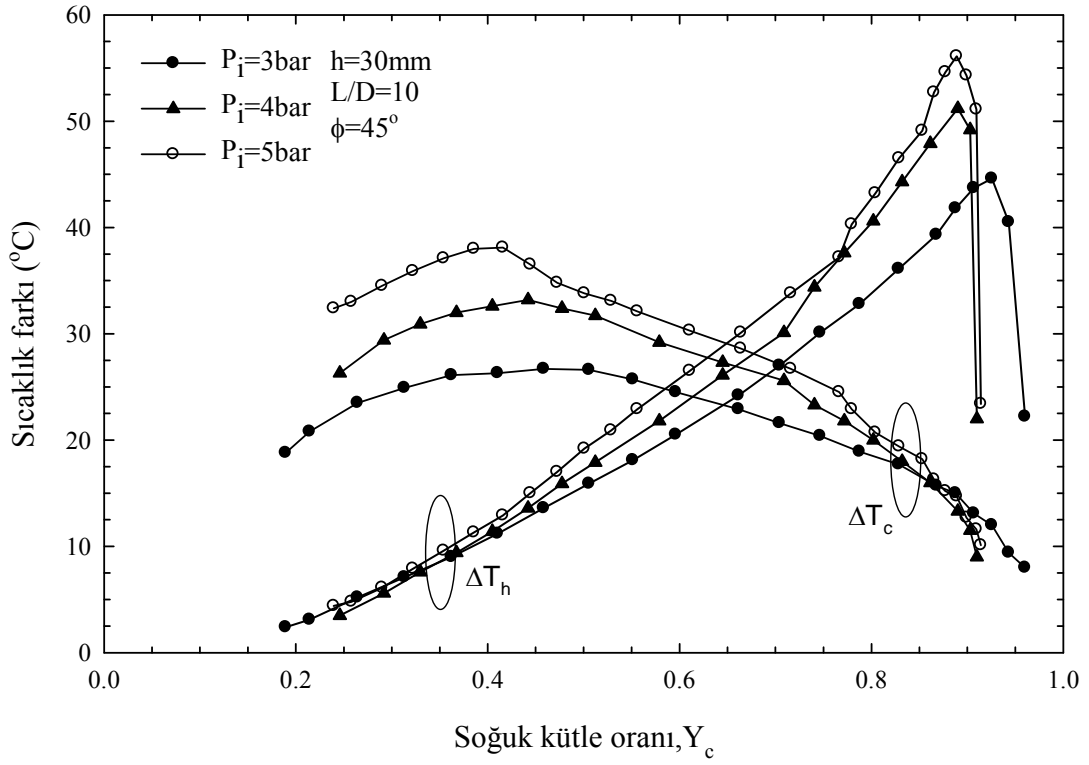
Şekil 34. $h=30\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=90^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



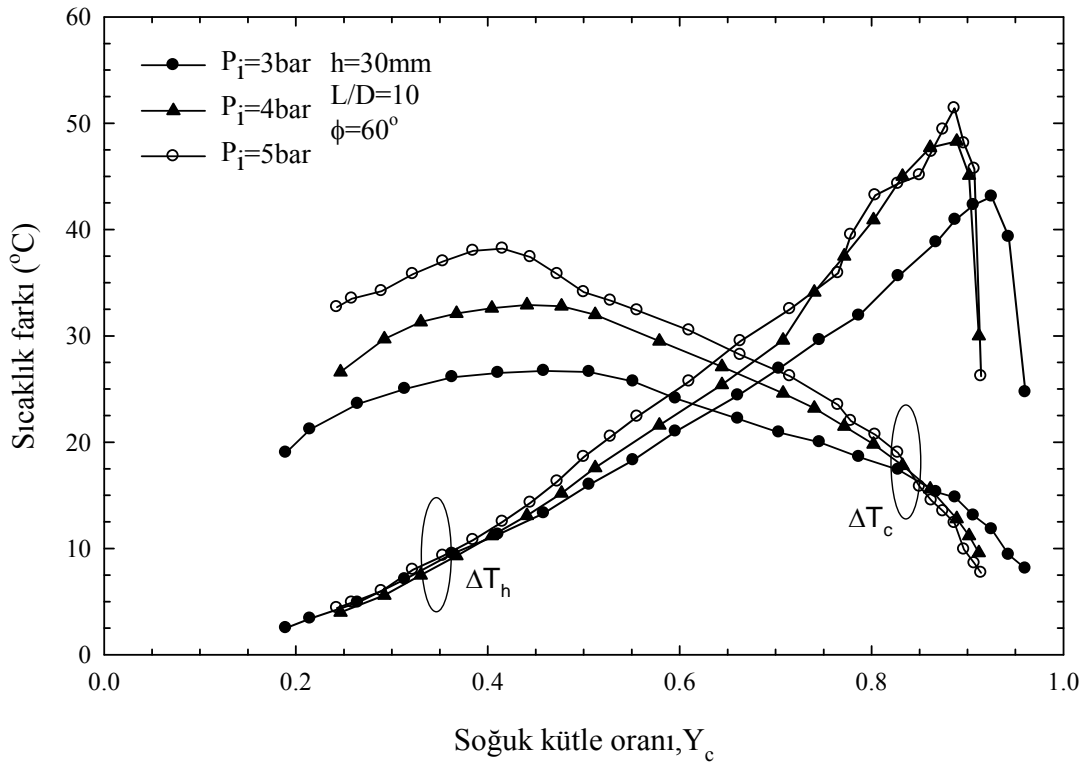
Şekil 35. $h=30\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=180^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



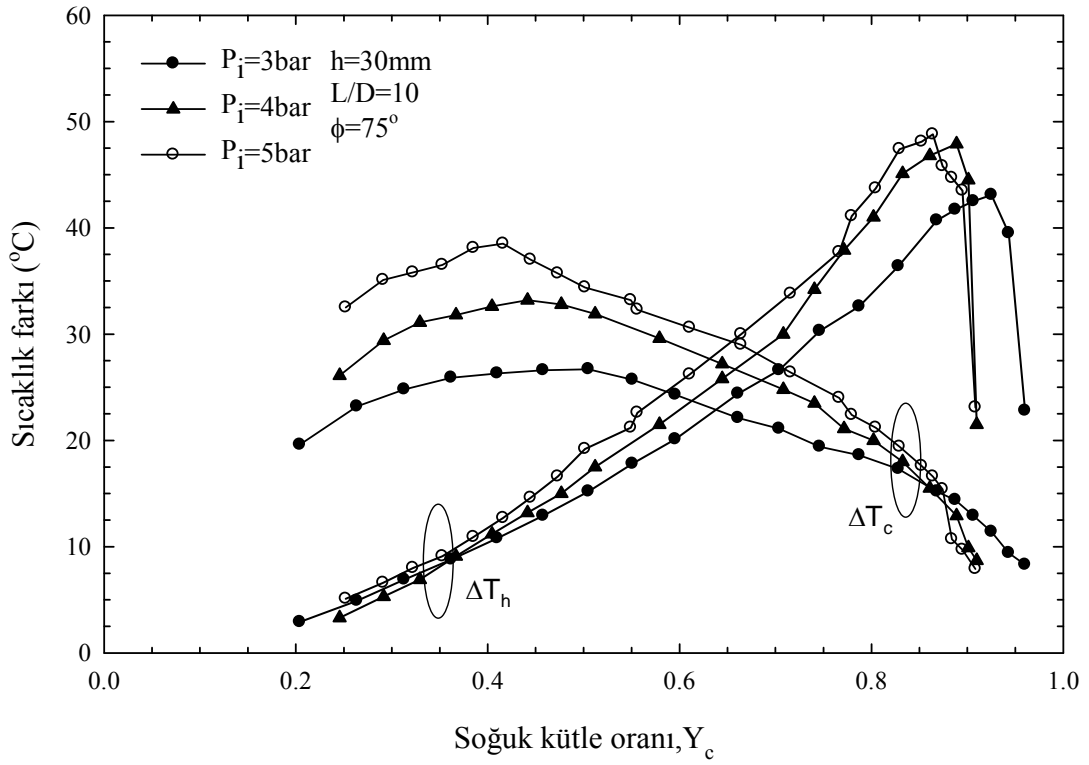
Şekil 36. $h=30\text{mm}$, $L/D=10$ ve $\phi=30^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



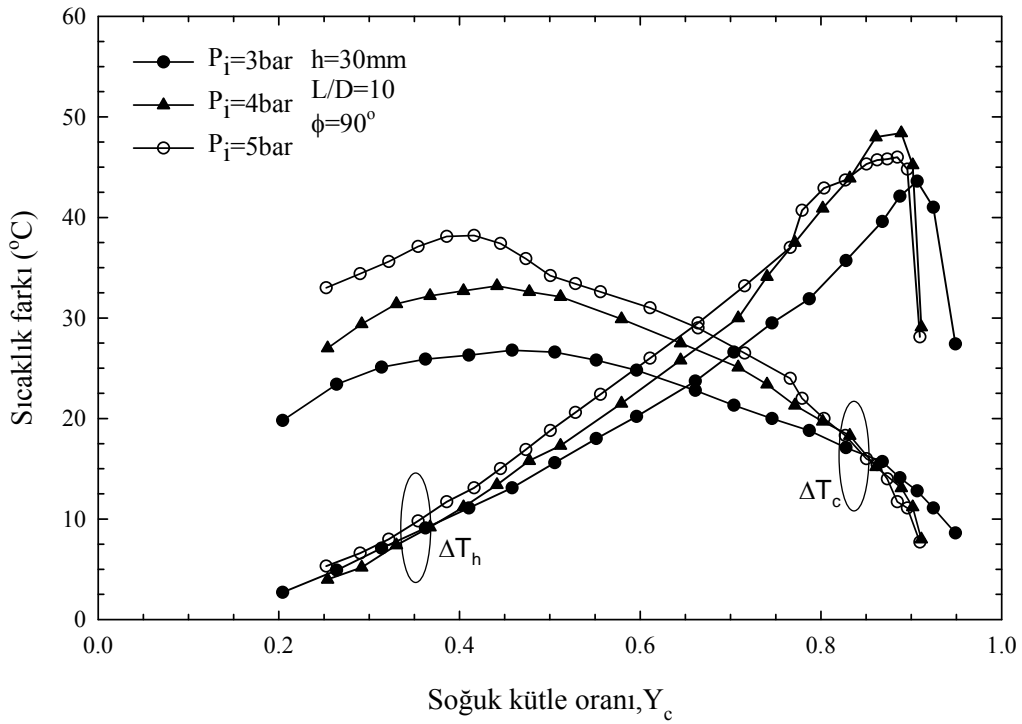
Şekil 37. $h=30\text{mm}$, $L/D=10$ ve $\phi=45^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



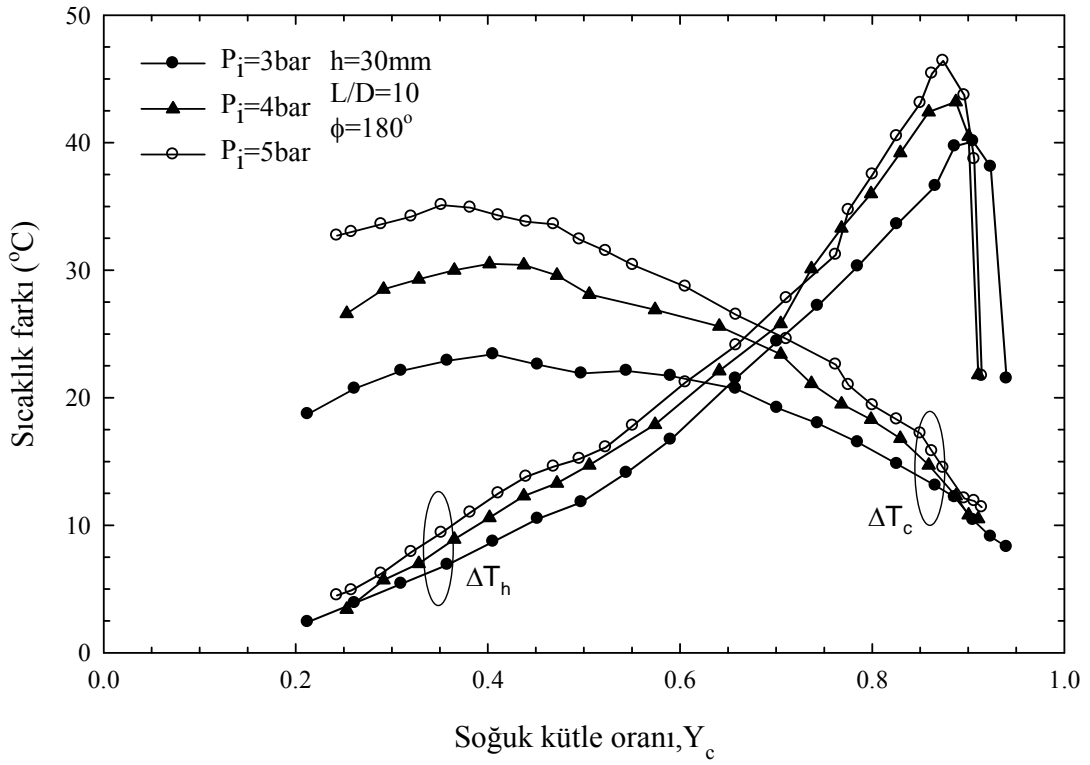
Şekil 38. $h=30\text{mm}$, $L/D=10$ ve $\phi=60^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



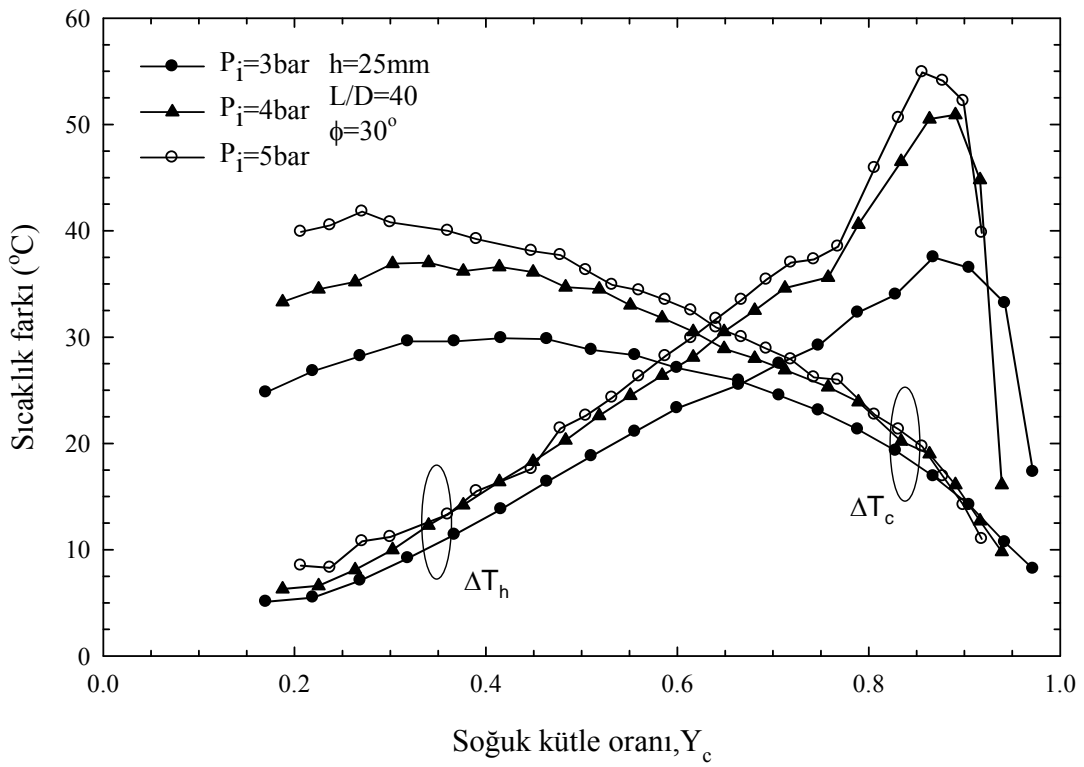
Şekil 39. $h=30$ mm, $L/D=10$ ve $\phi=75^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



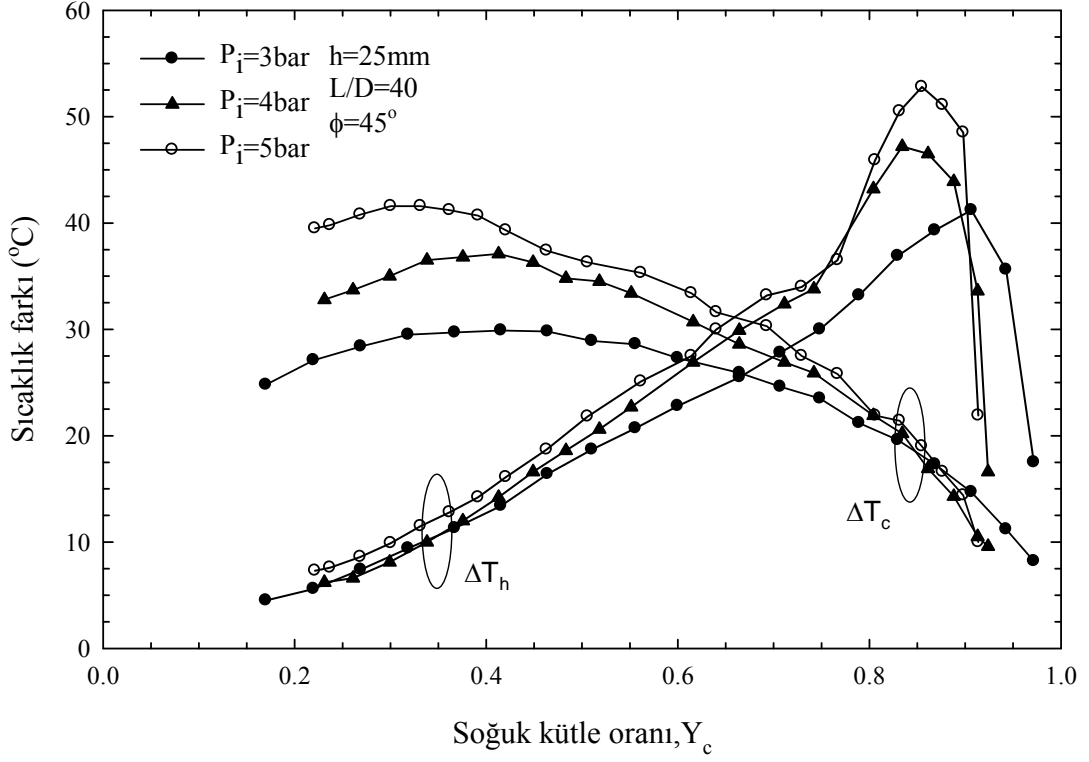
Şekil 40. $h=30$ mm, $L/D=10$ ve $\phi=90^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



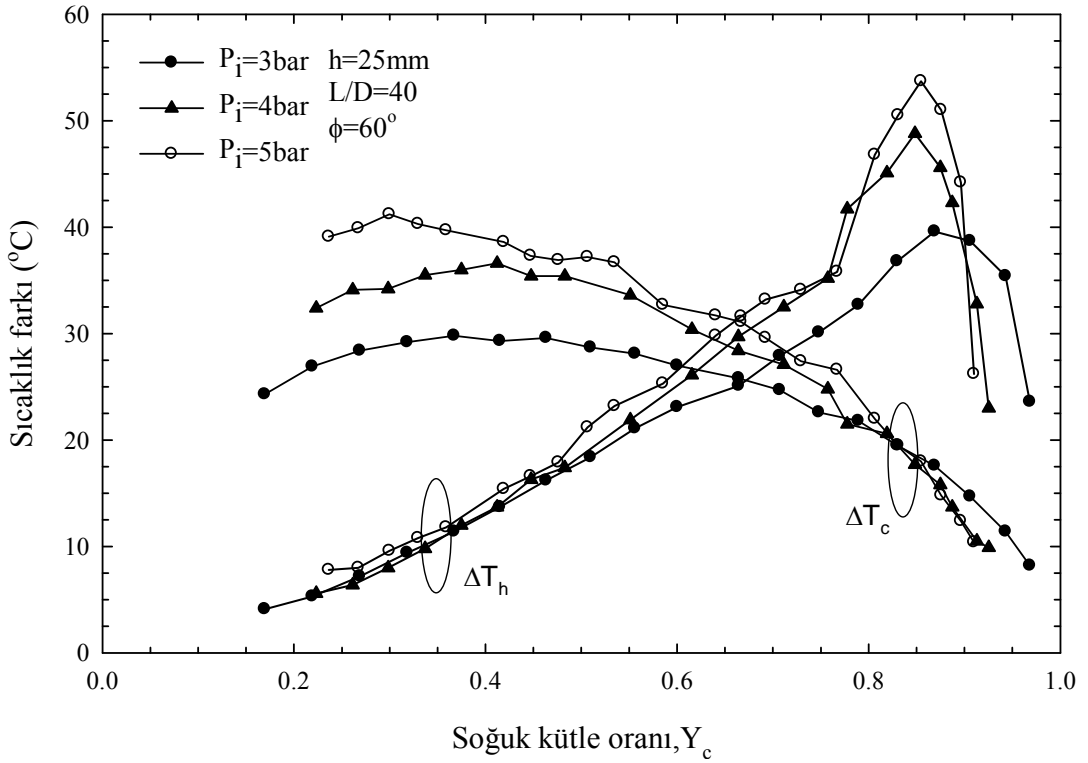
Şekil 41. $h=30\text{mm}$, $L/D=10$ ve $\phi=180^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



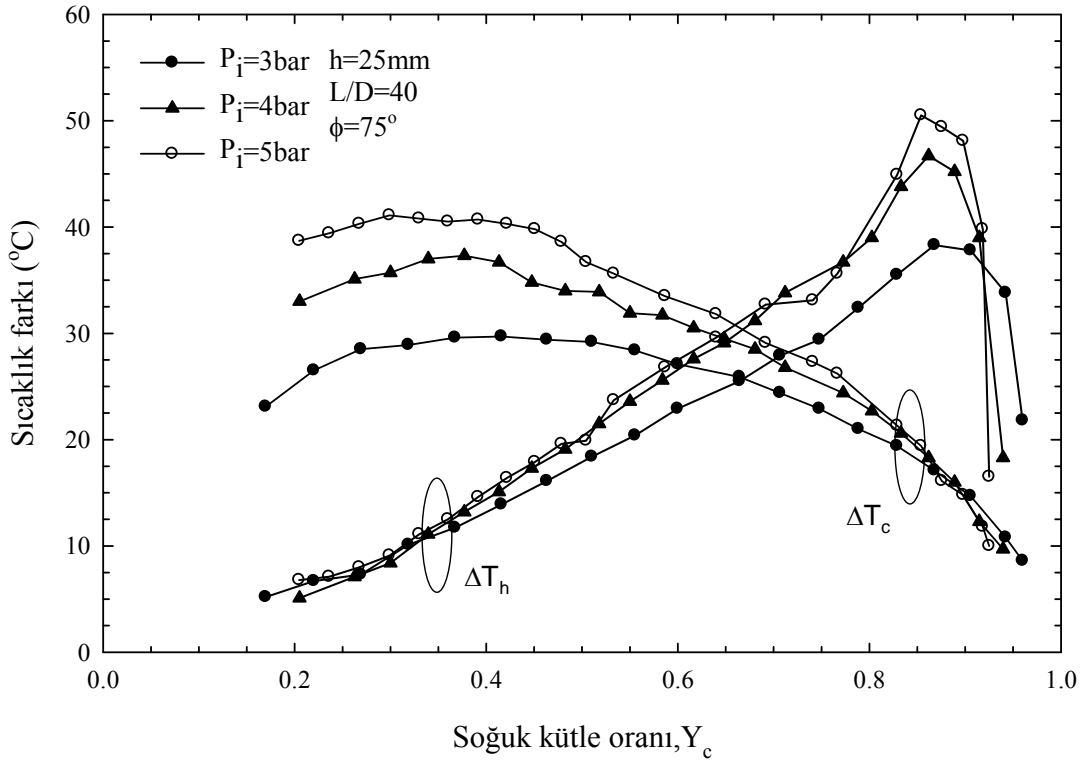
Şekil 42. $h=25\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=30^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



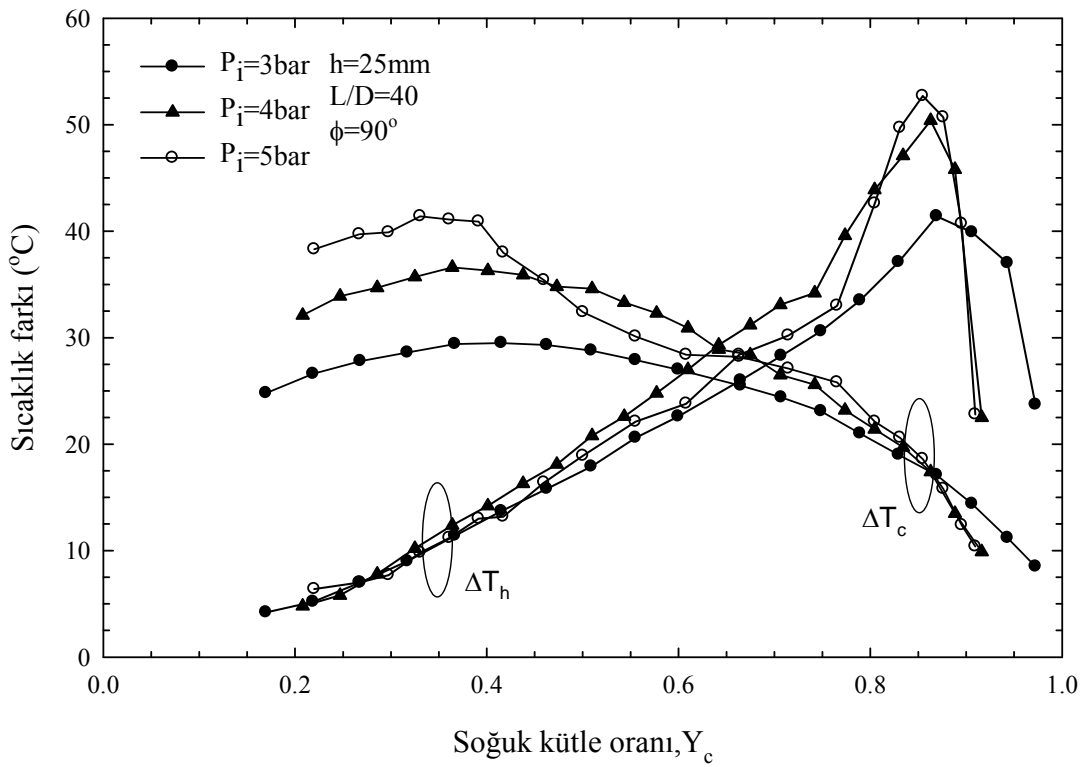
Şekil 43. $h=25$ mm, $L/D=40$ ve $\phi=45^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



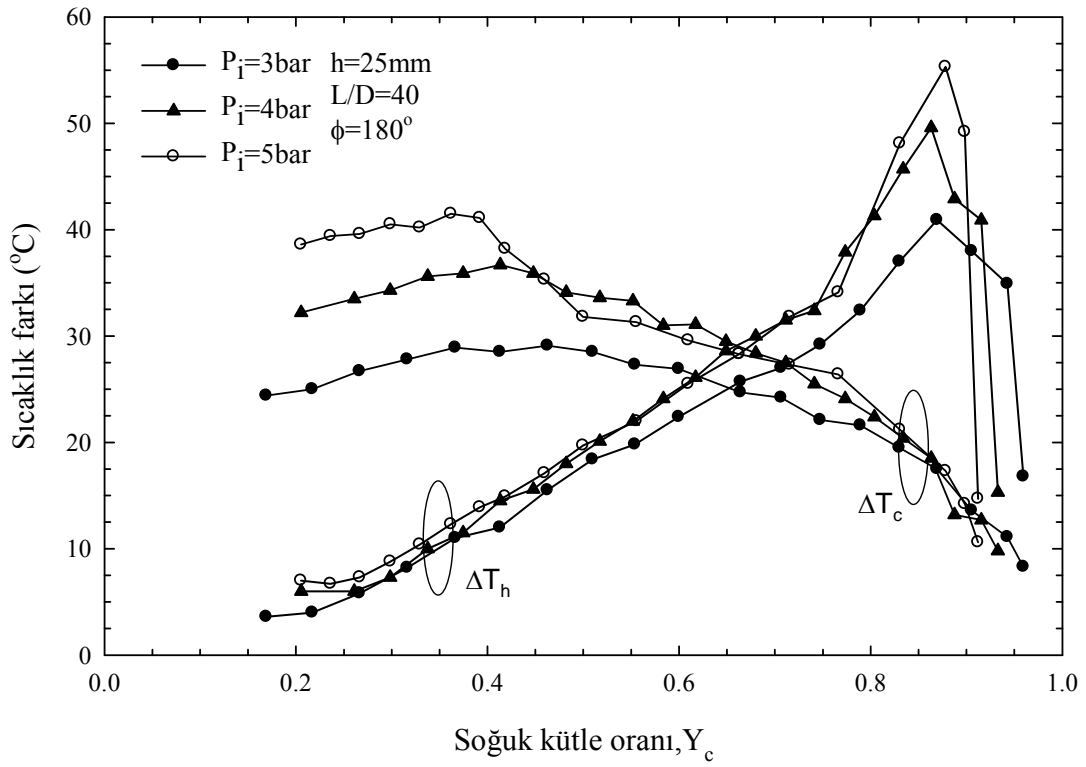
Şekil 44. $h=25$ mm, $L/D=40$ ve $\phi=60^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



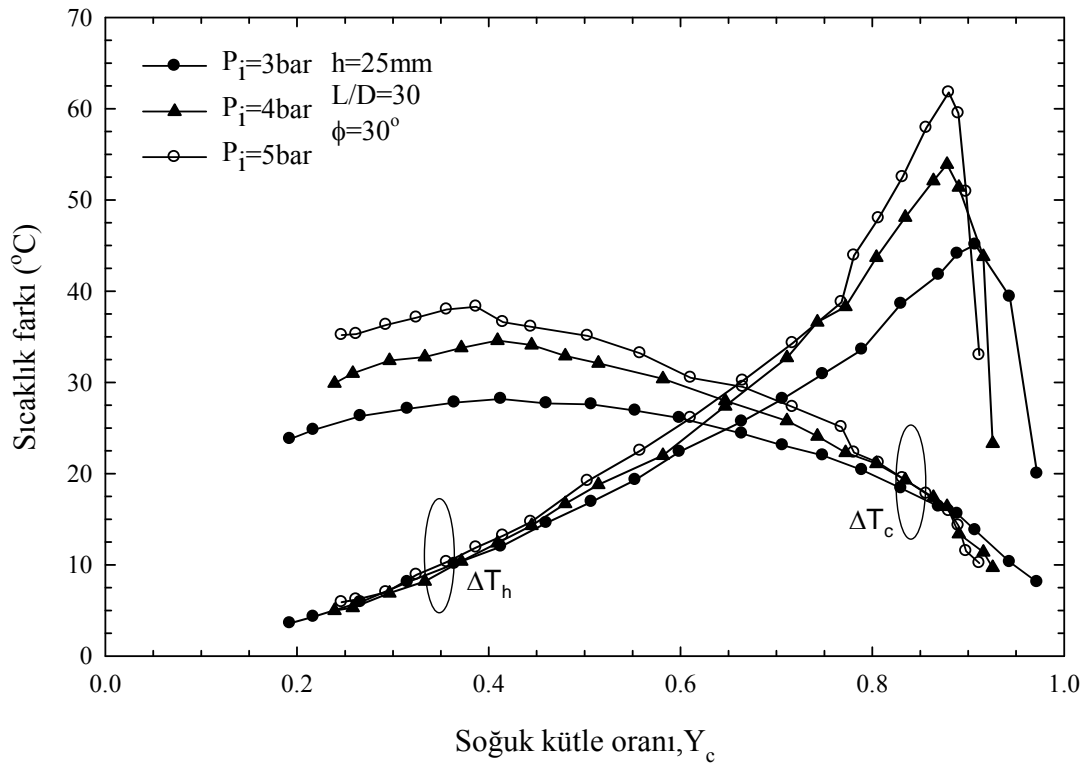
Şekil 45. $h=25\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=75^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



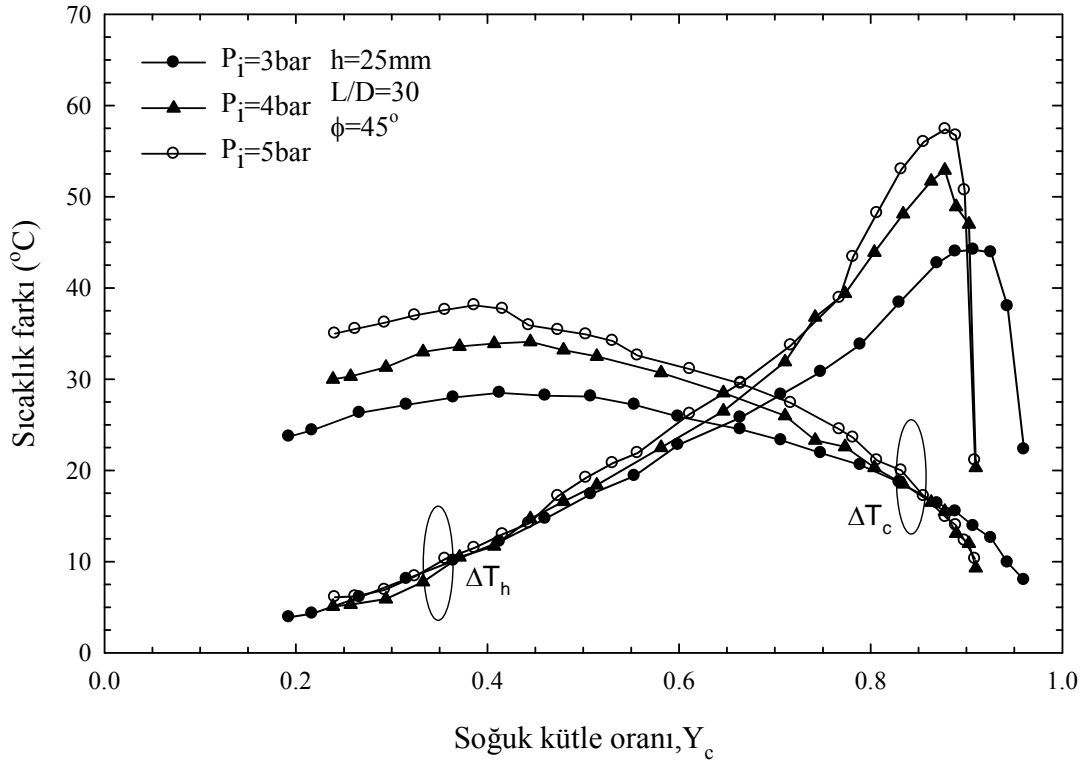
Şekil 46. $h=25\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=90^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



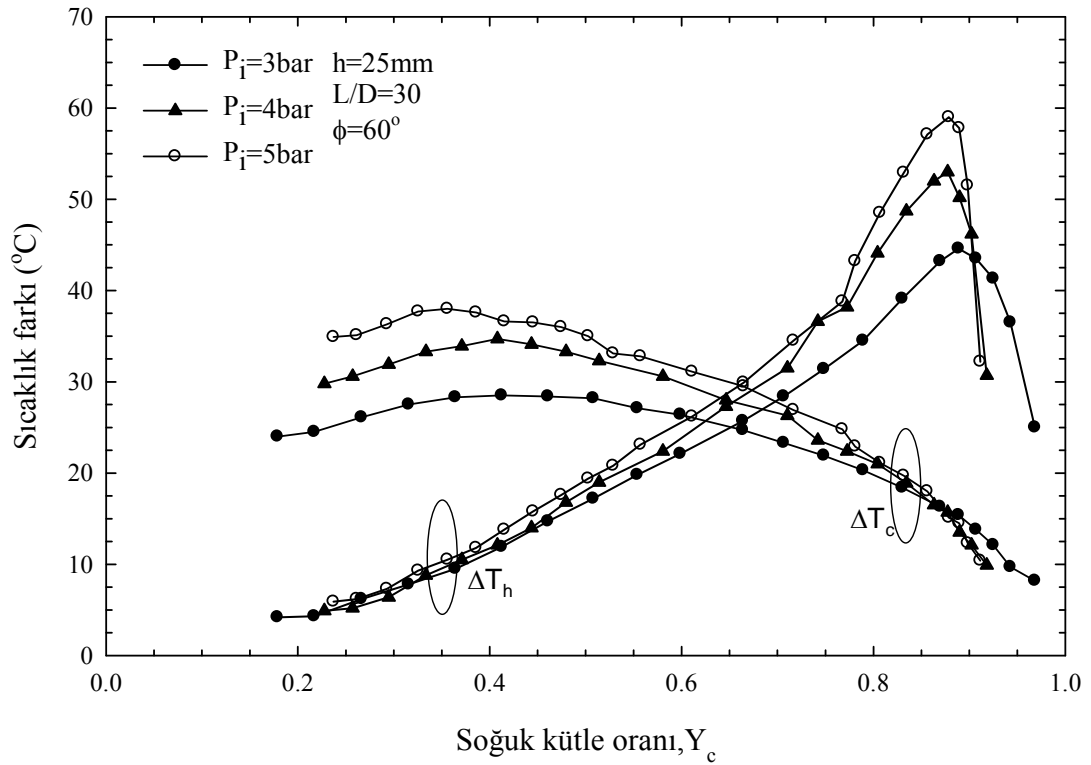
Şekil 47. $h=25\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=180^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



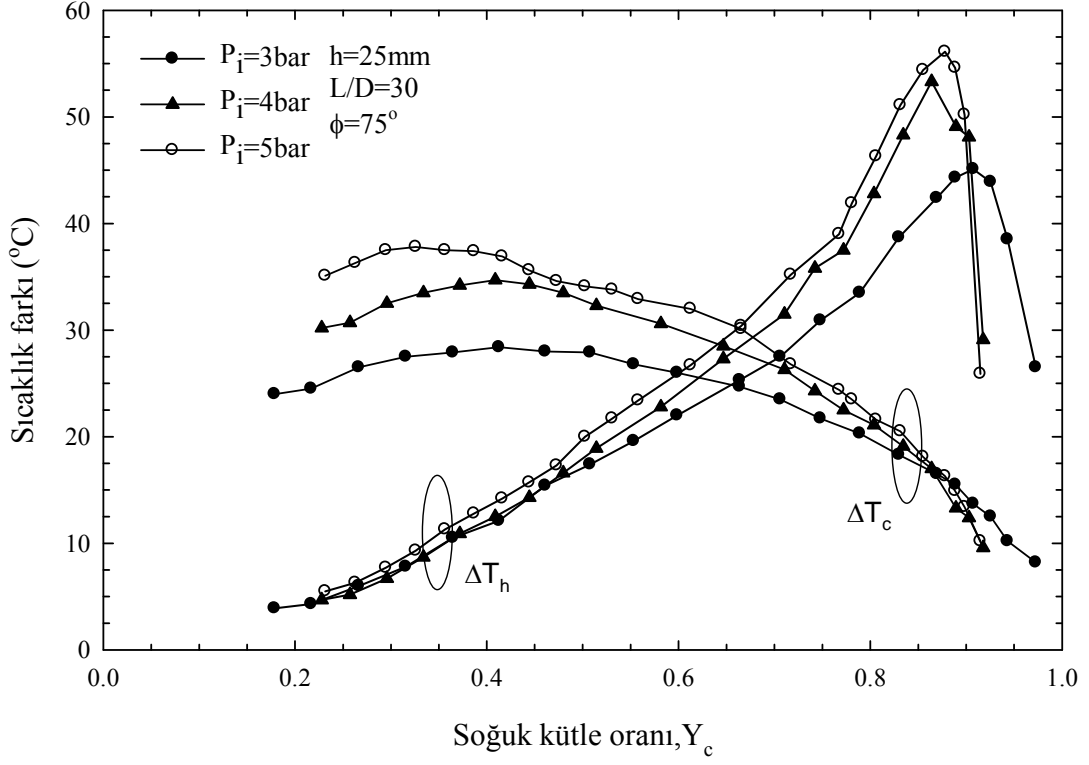
Şekil 48. $h=25\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=30^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



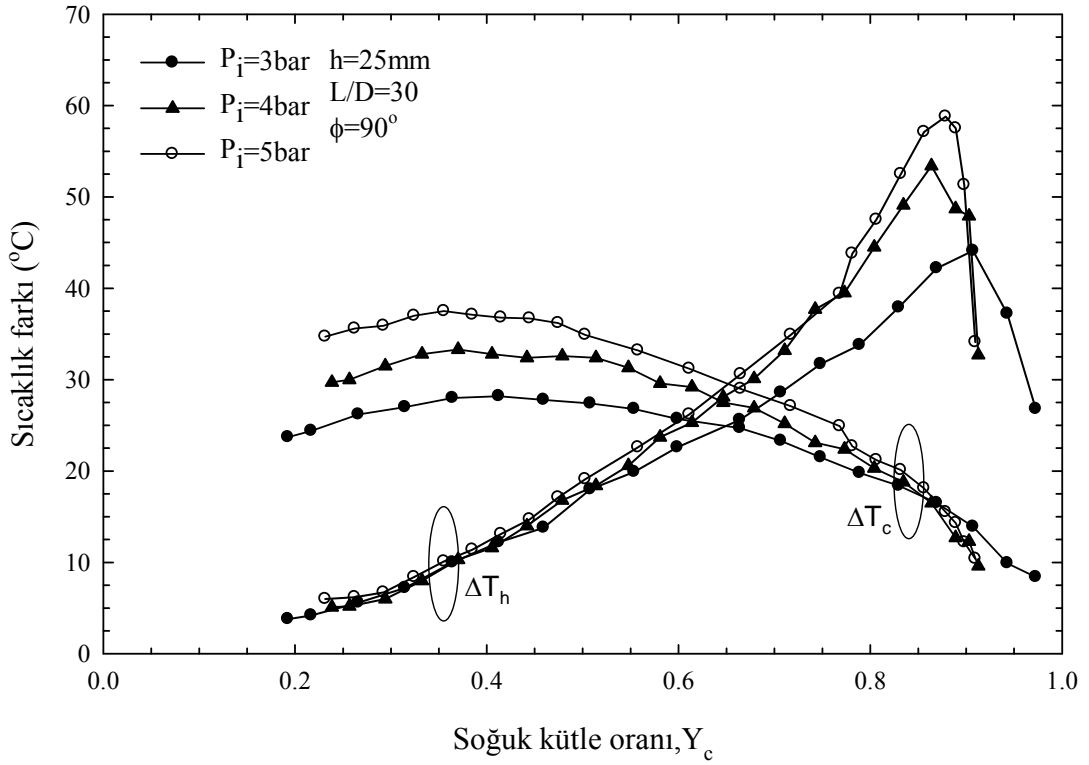
Şekil 49. $h=25\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=45^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



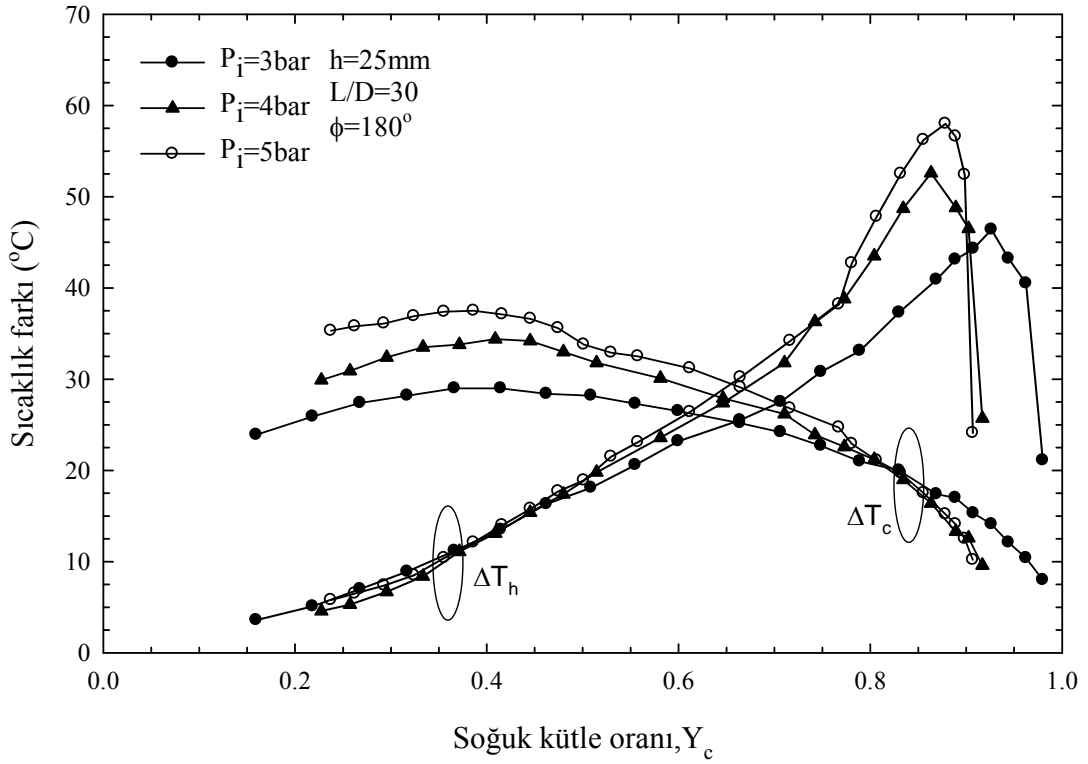
Şekil 50. $h=25\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=60^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



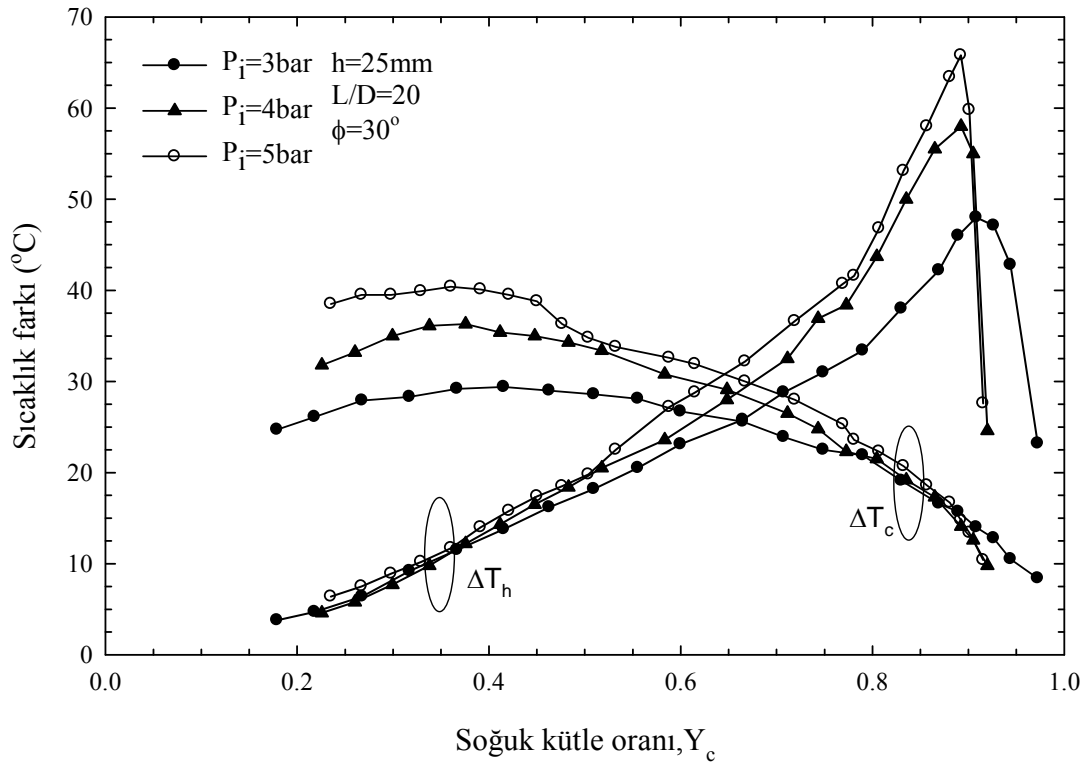
Şekil 51. $h=25\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=75^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



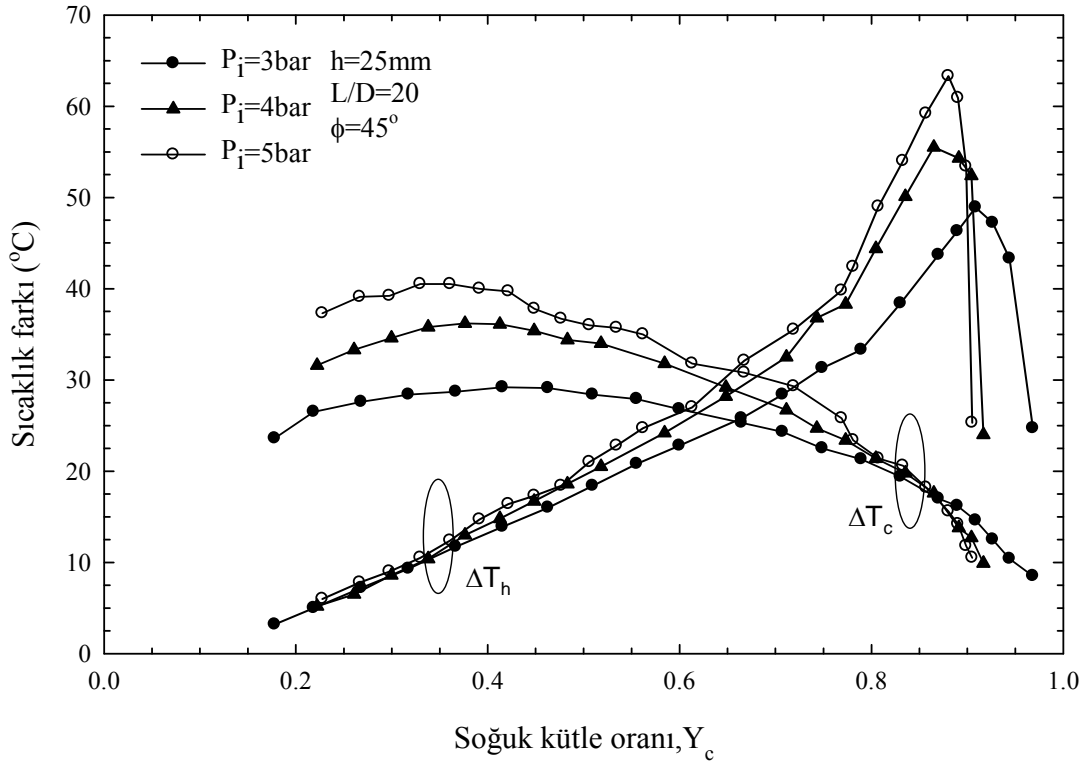
Şekil 52. $h=25\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=90^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



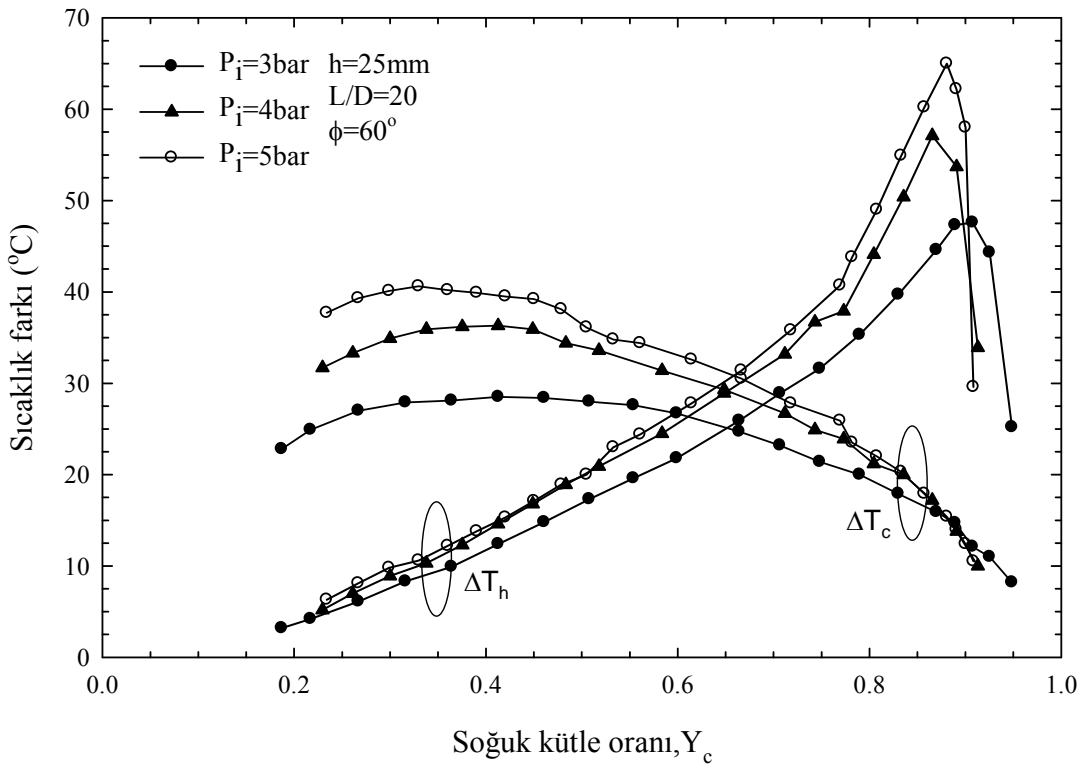
Şekil 53. $h=25\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=180^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



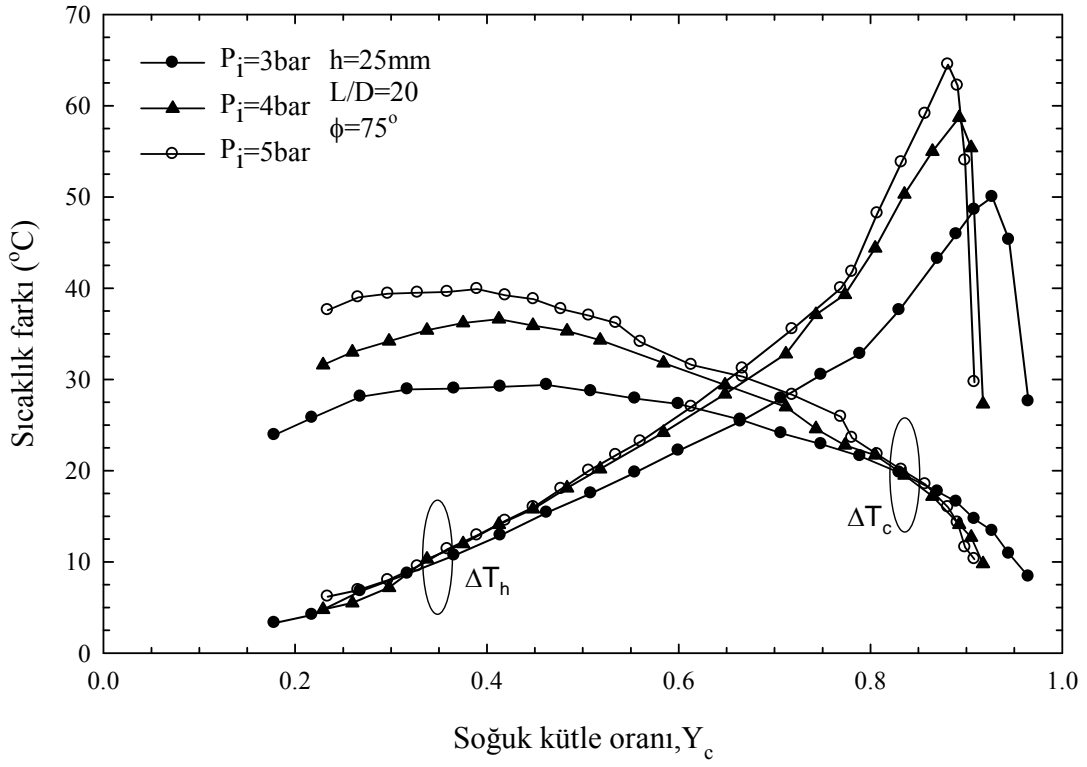
Şekil 54. $h=25\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=30^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



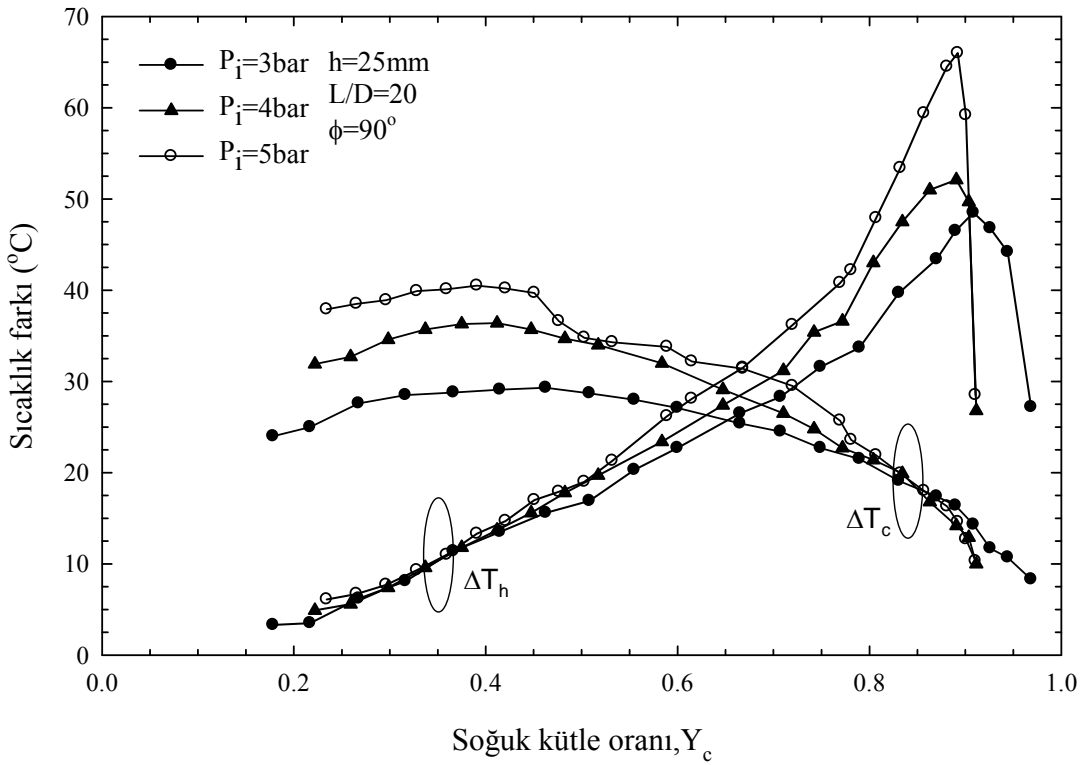
Şekil 55. $h=25\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=45^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



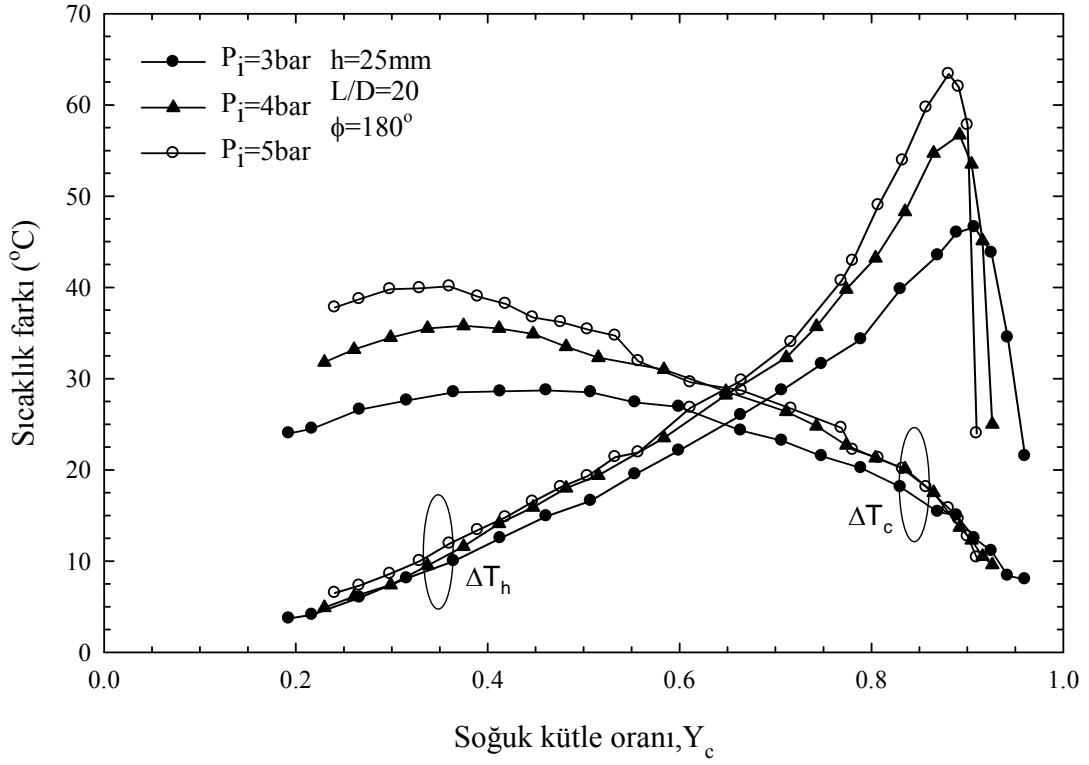
Şekil 56. $h=25\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=60^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



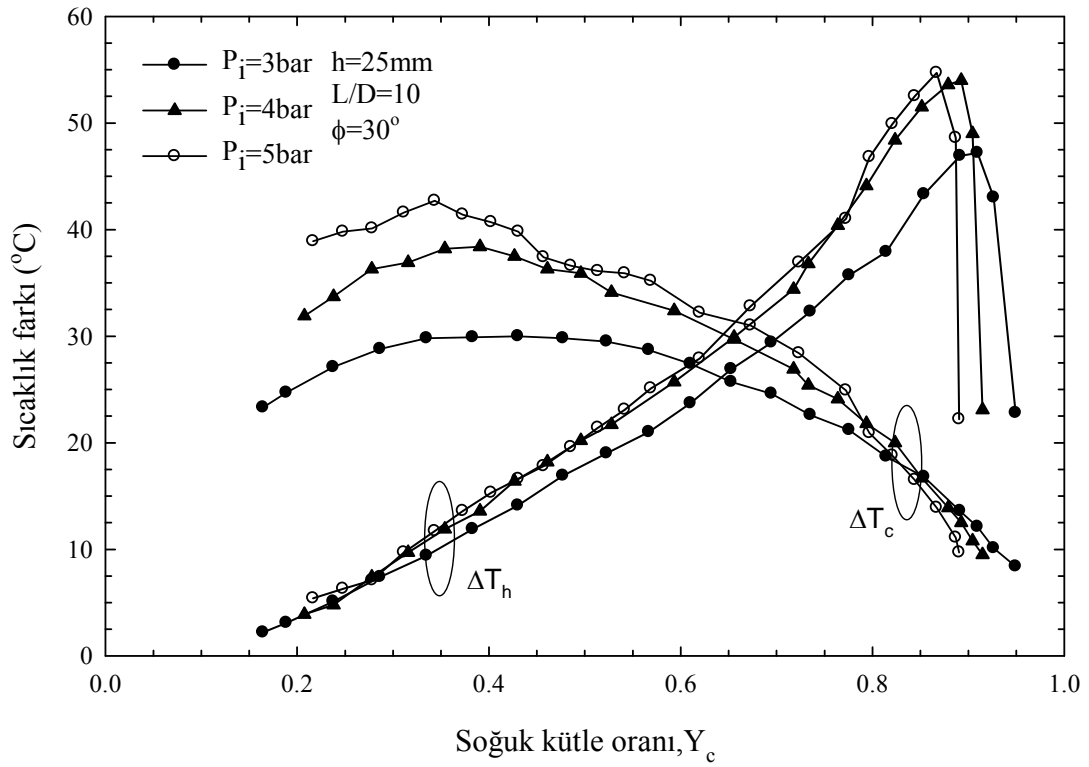
Şekil 57. $h=25\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=75^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



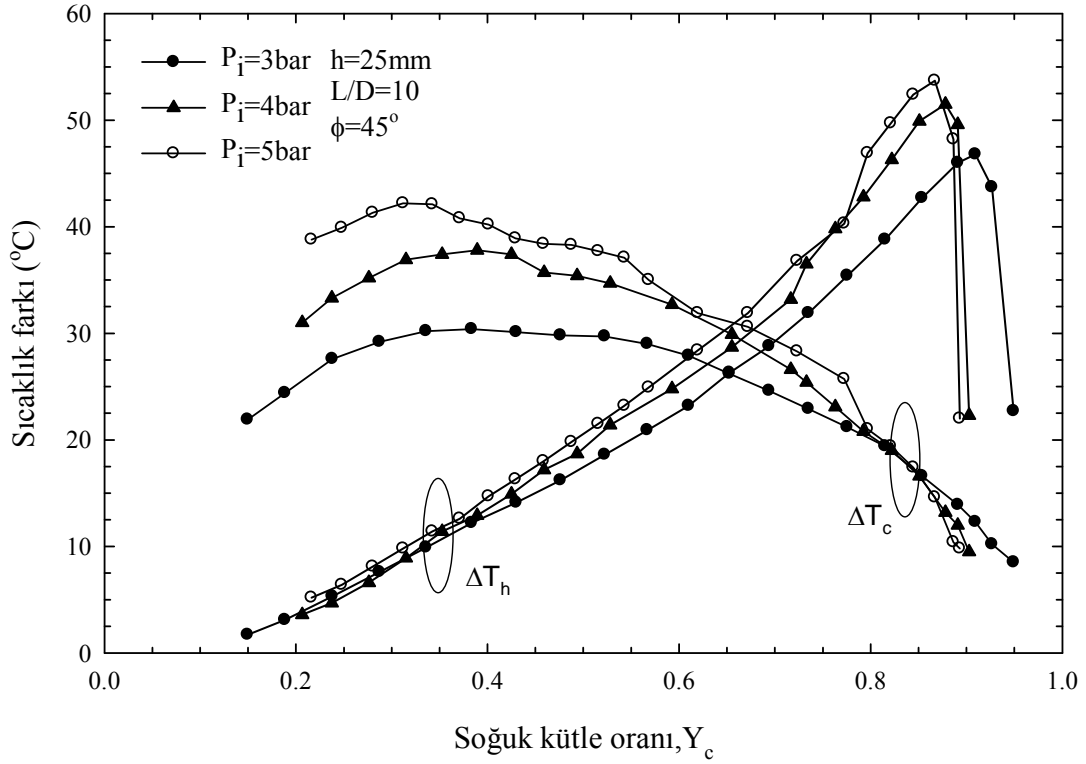
Şekil 58. $h=25\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=90^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



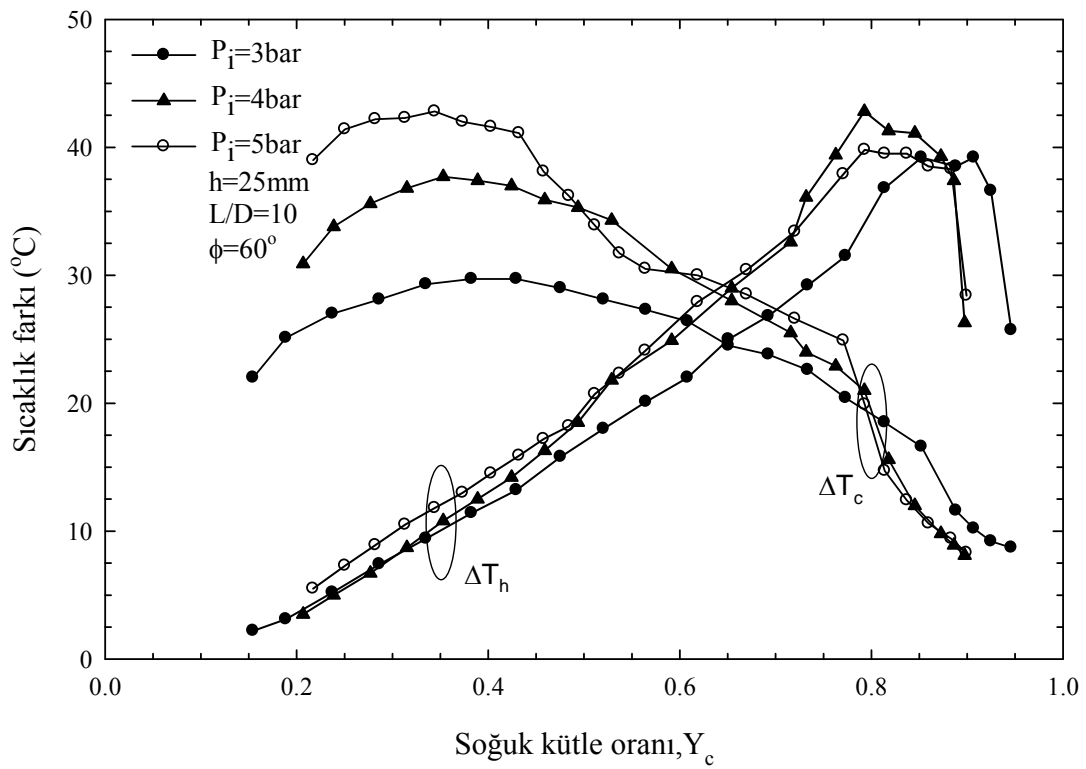
Şekil 59. $h=25\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=180^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



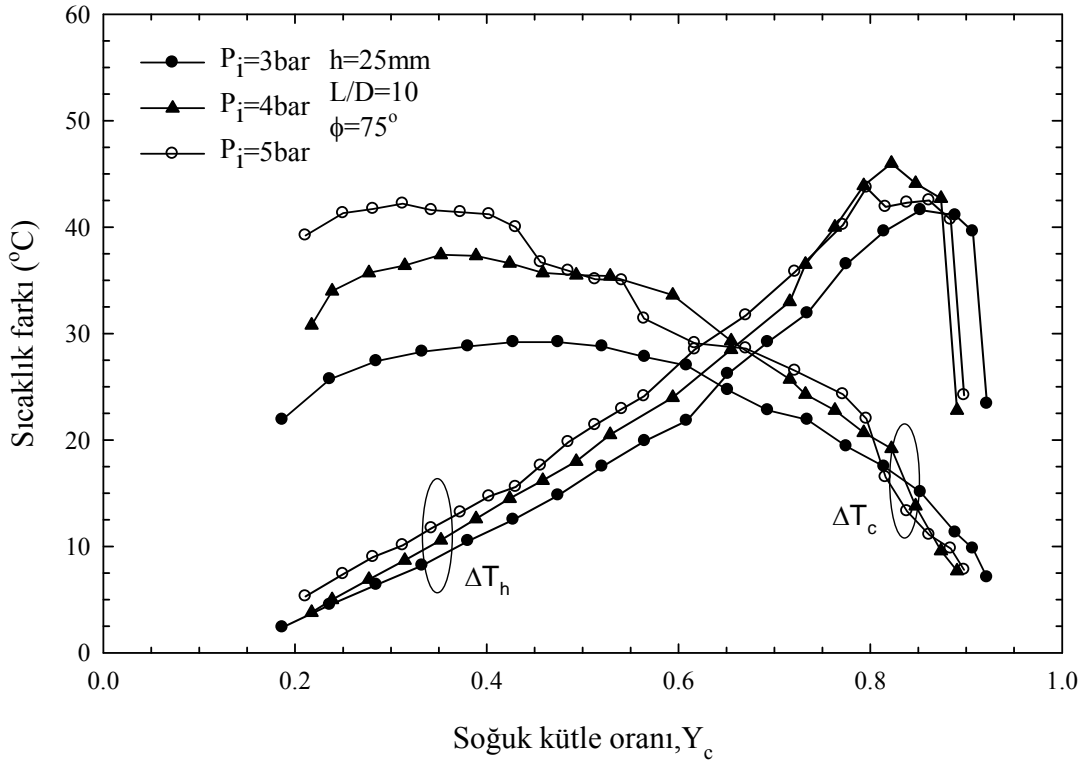
Şekil 60. $h=25\text{mm}$, $L/D=10$ ve $\phi=30^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



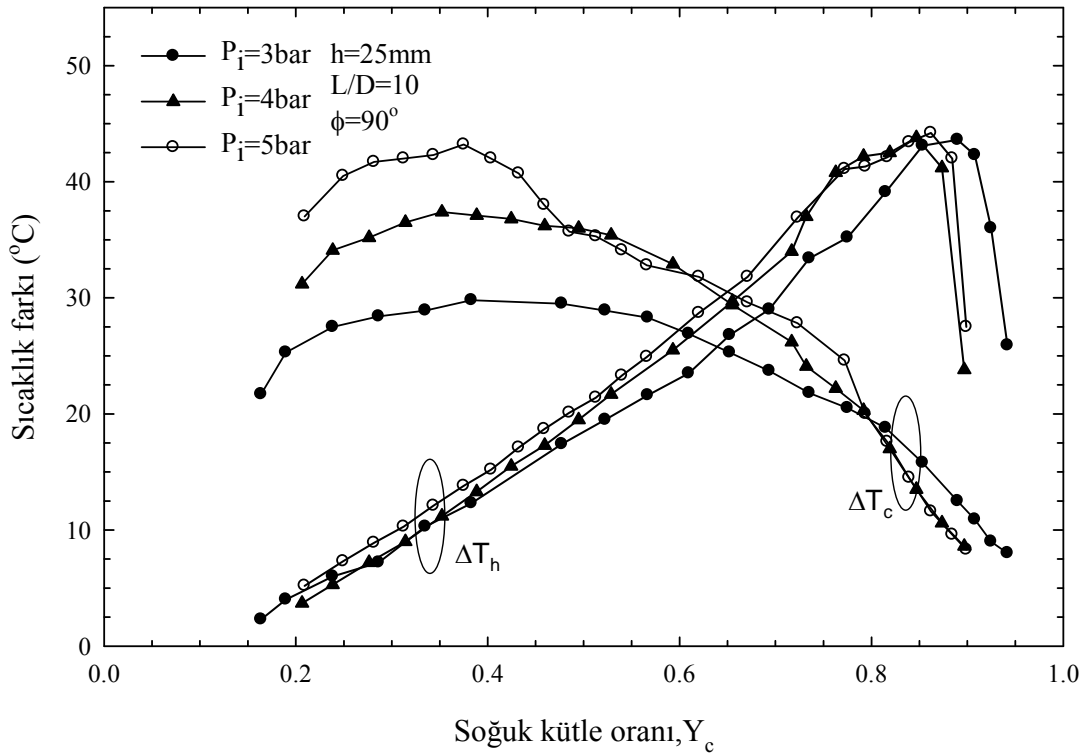
Şekil 61. $h=25\text{mm}$, $L/D=10$ ve $\phi=45^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



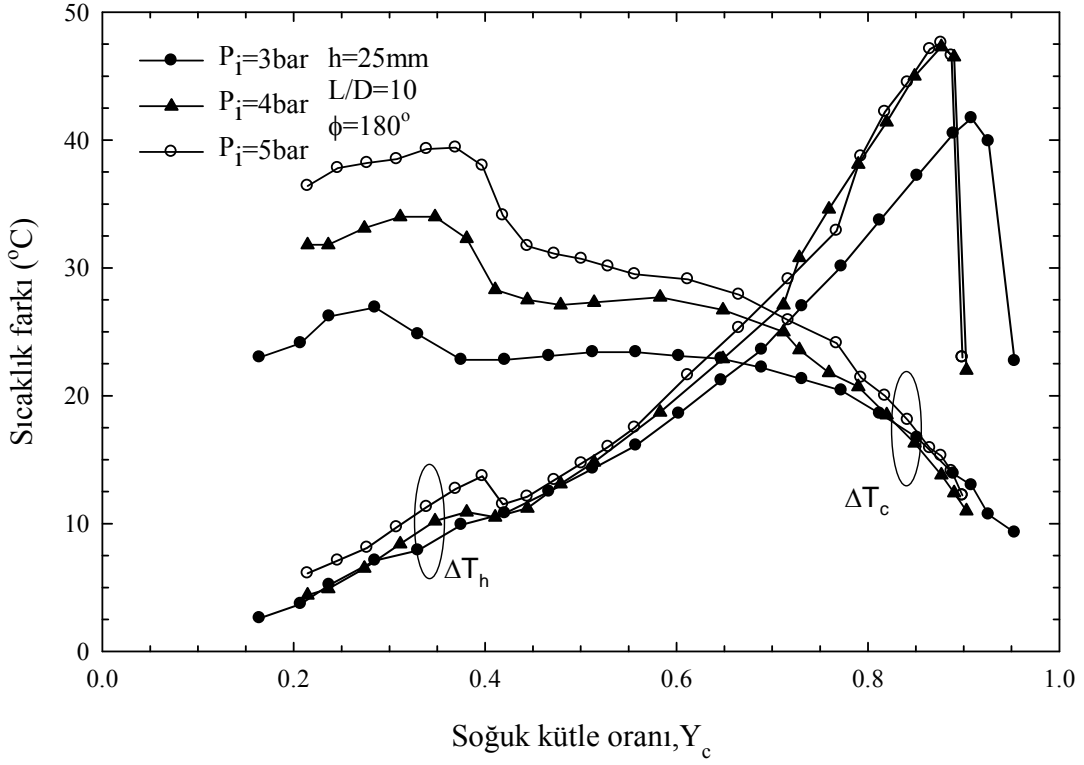
Şekil 62. $h=25\text{mm}$, $L/D=10$ ve $\phi=60^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



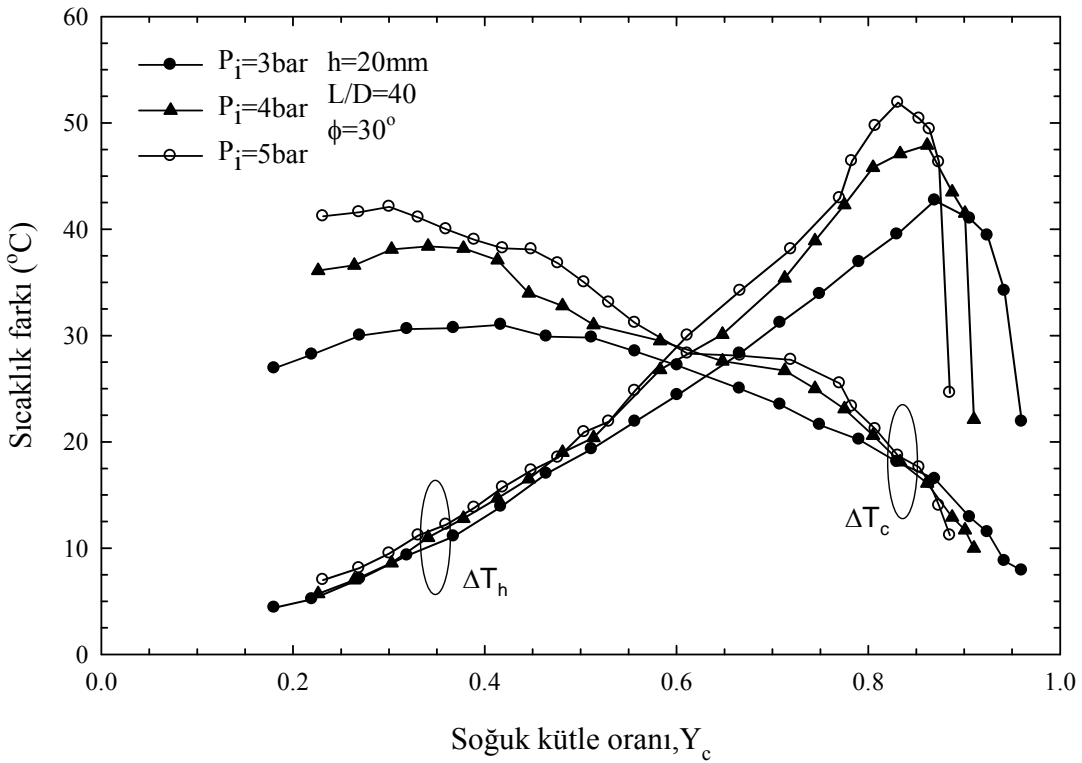
Şekil 63. $h=25\text{mm}$, $L/D=10$ ve $\phi=75^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



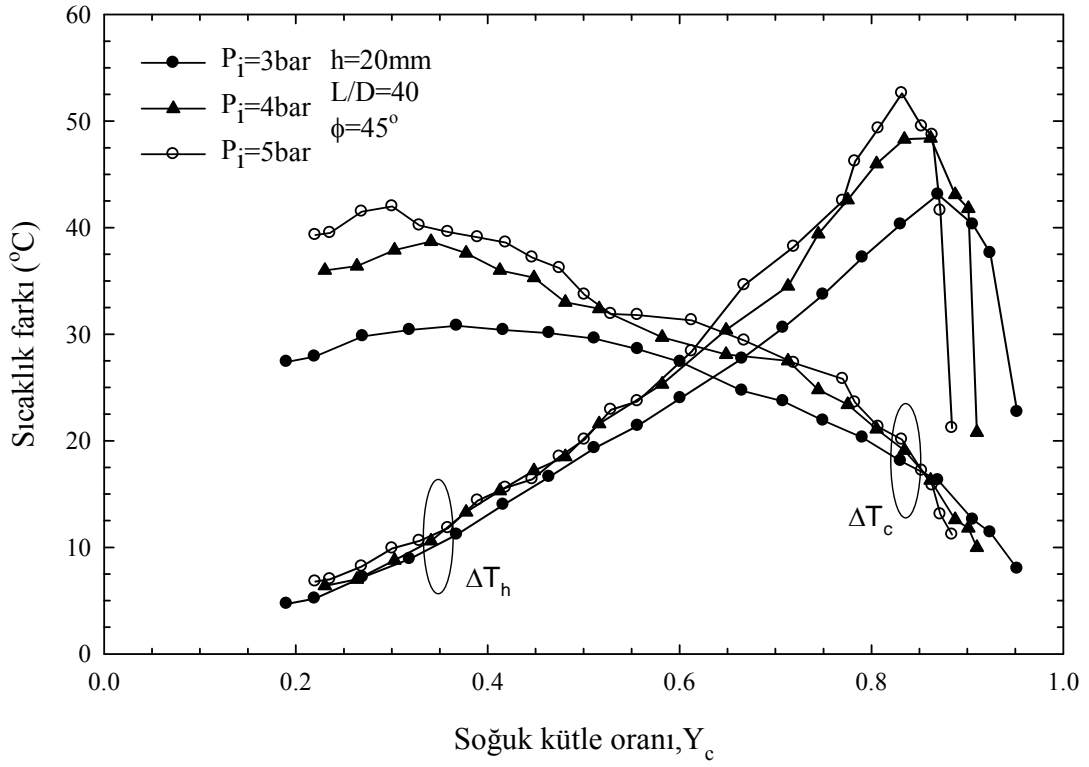
Şekil 64. $h=25\text{mm}$, $L/D=10$ ve $\phi=90^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



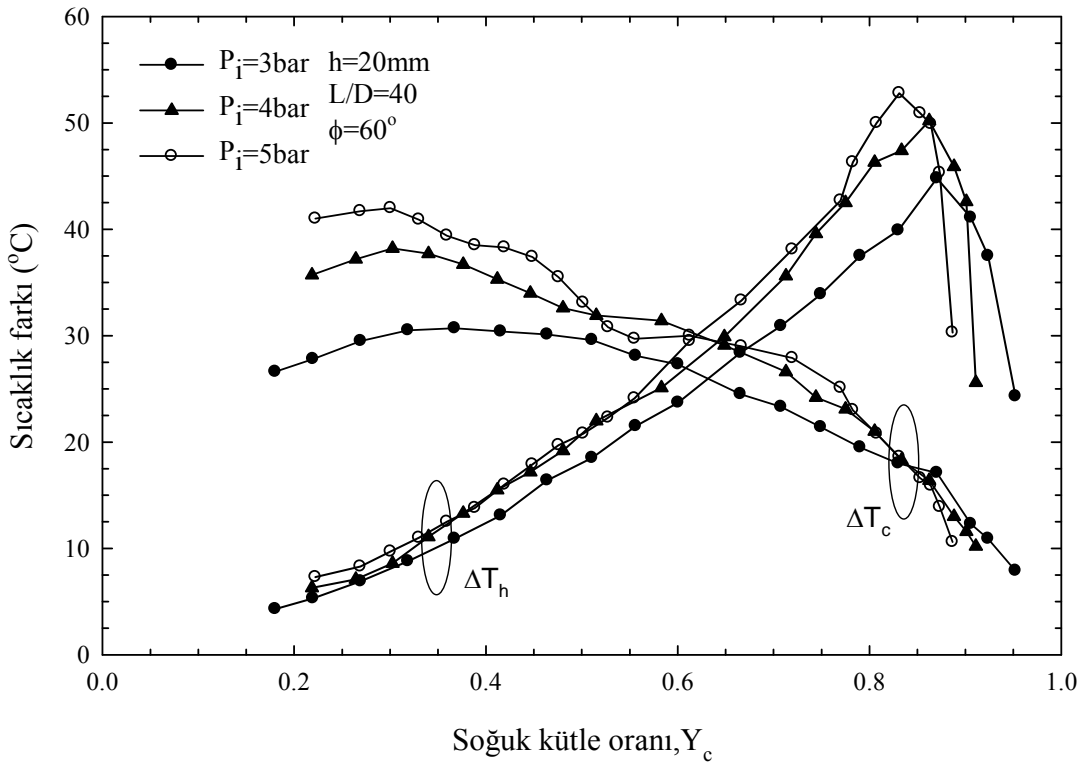
Şekil 65. $h=25\text{mm}$, $L/D=10$ ve $\phi=180^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



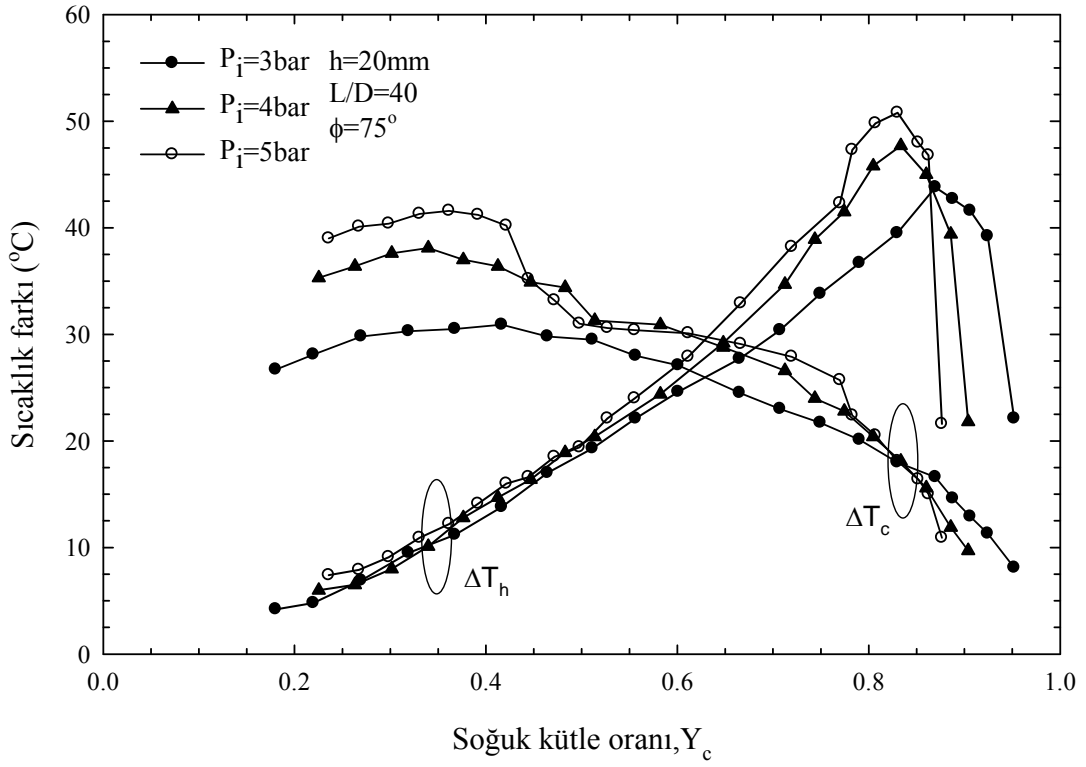
Şekil 66. $h=20\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=30^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



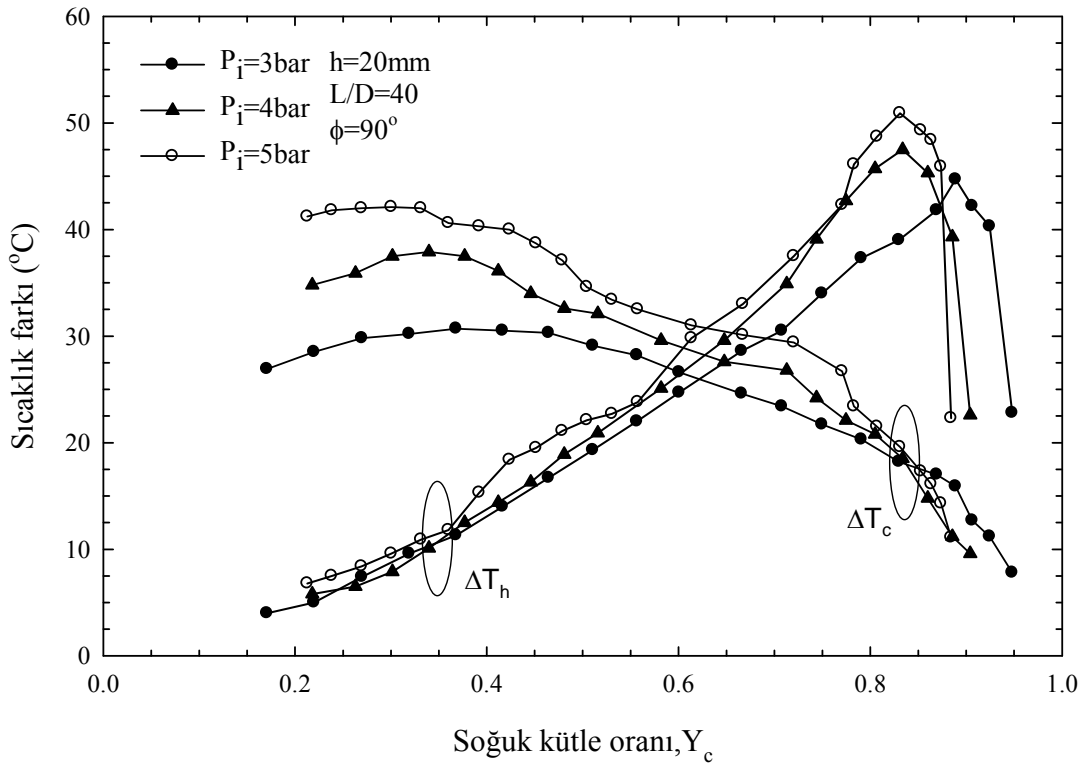
Şekil 67. $h=20\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=45^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



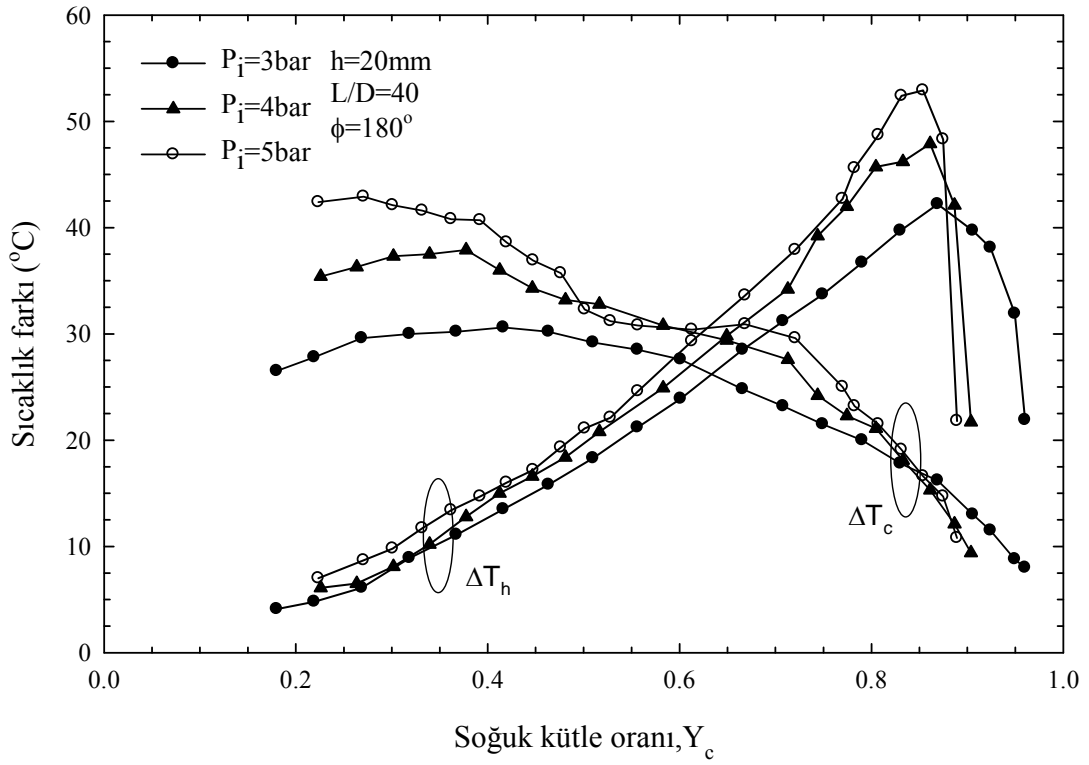
Şekil 68. $h=20\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=60^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



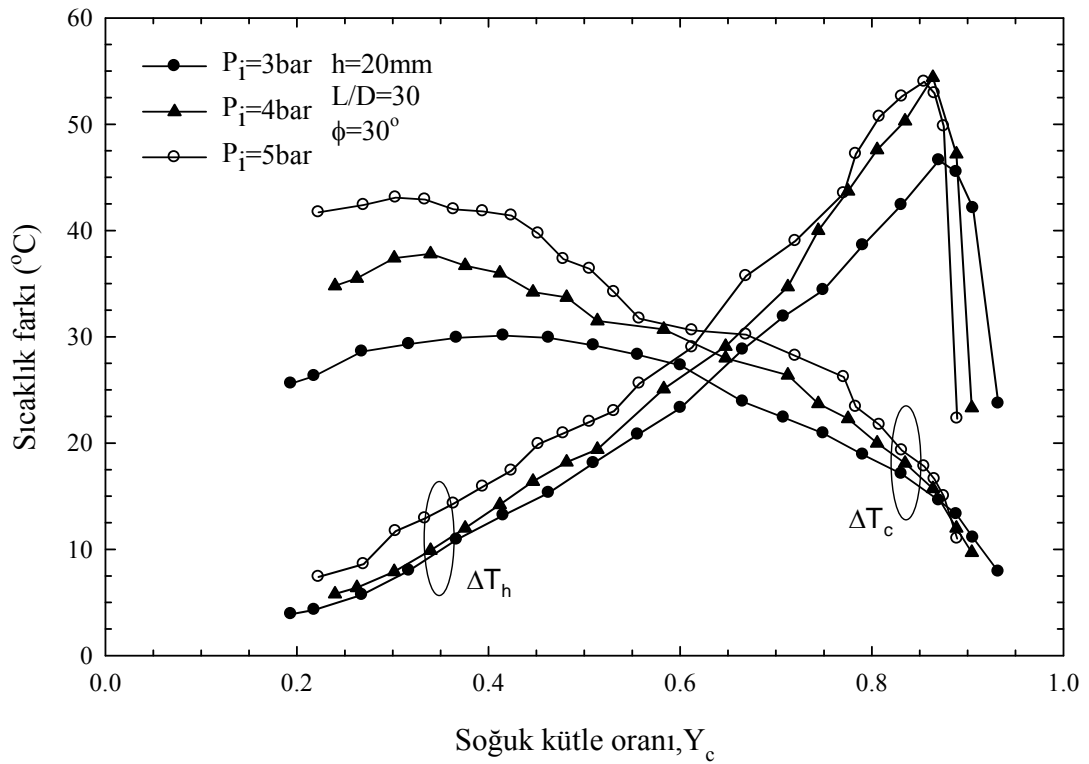
Şekil 69. $h=20\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=75^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



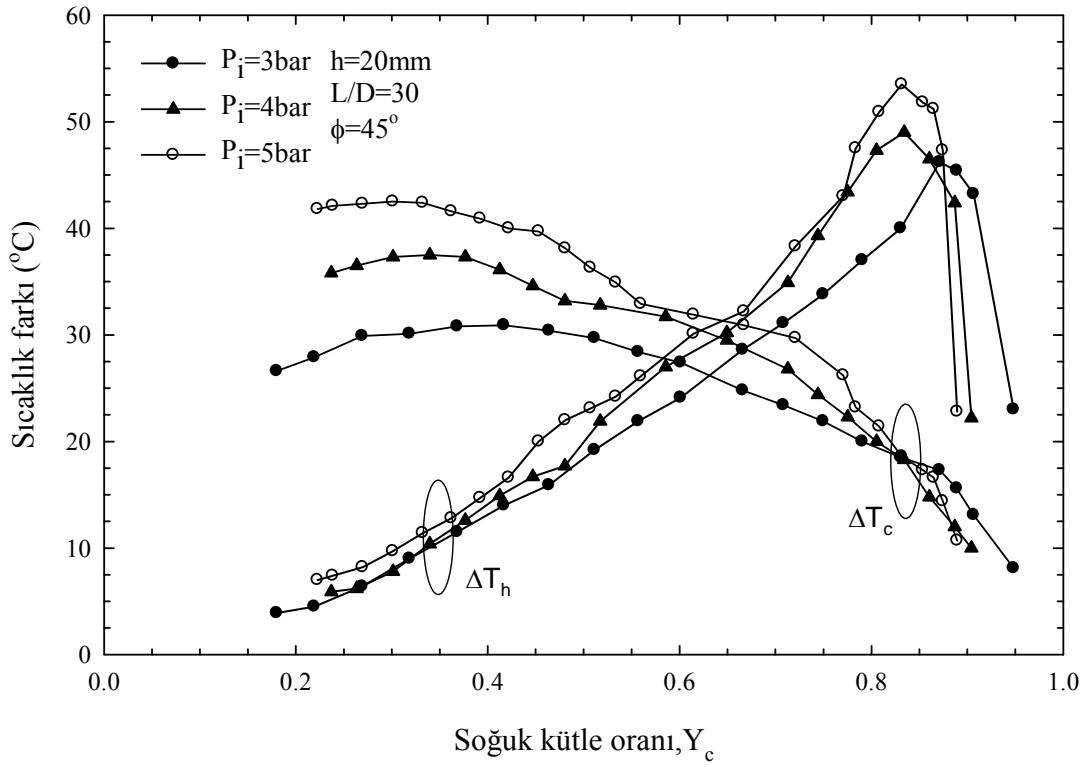
Şekil 70. $h=20\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=90^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



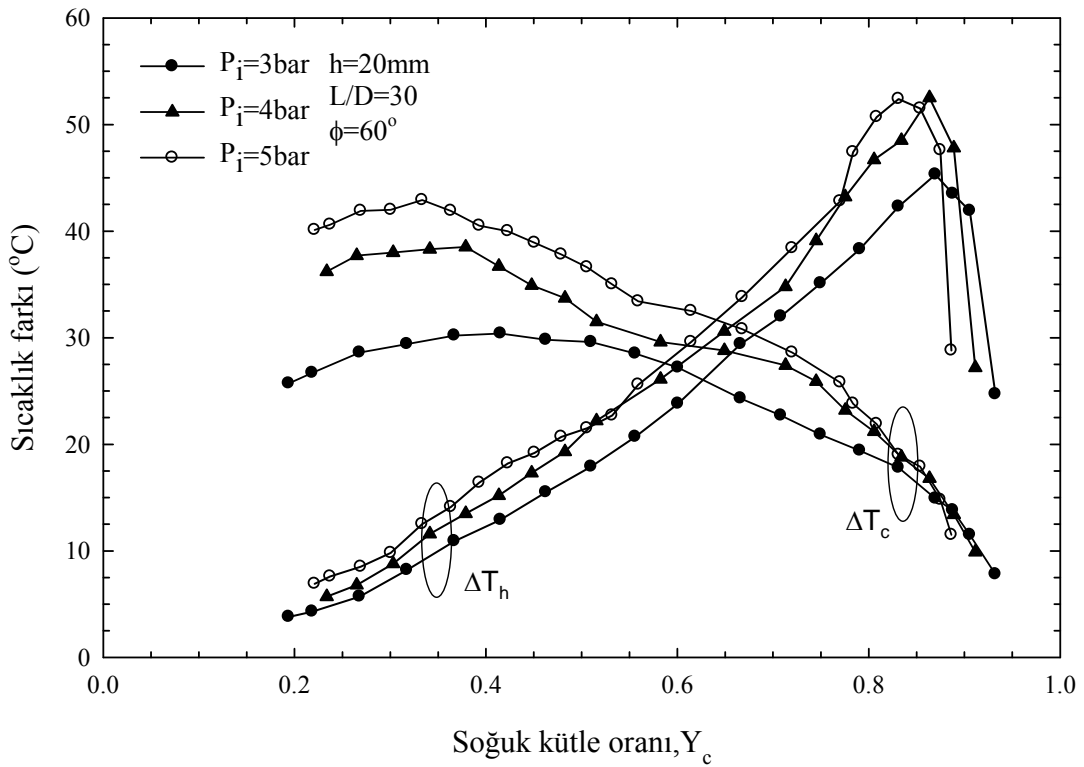
Şekil 71. $h=20\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=180^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



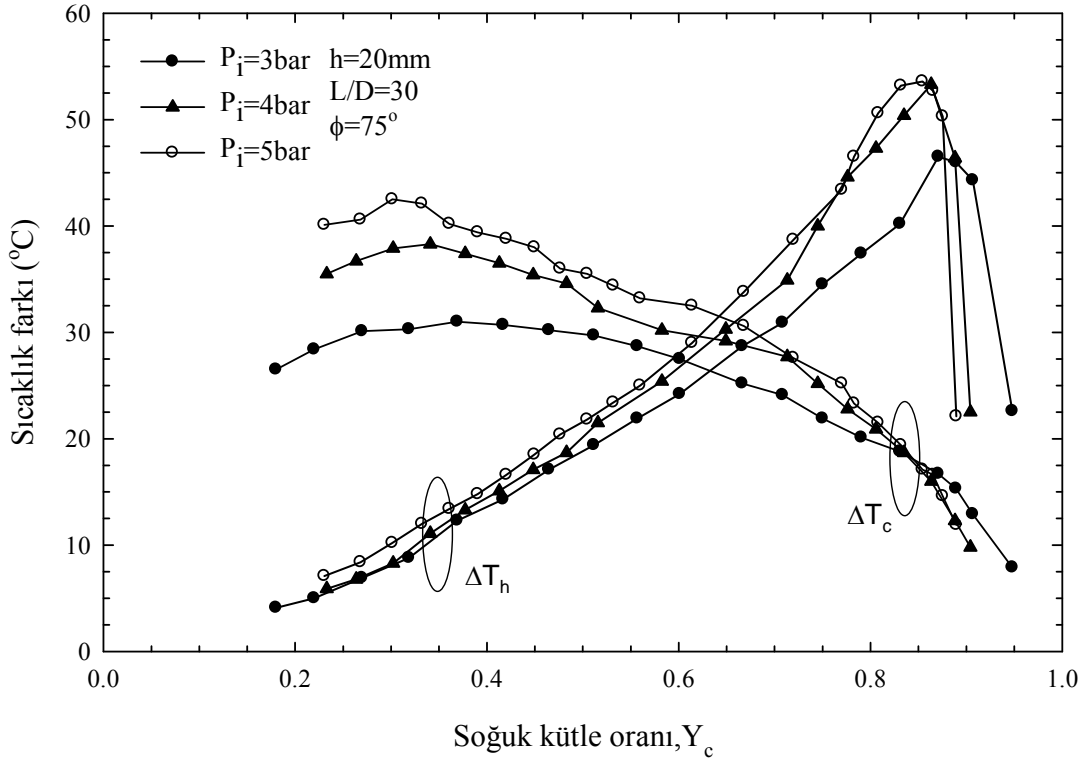
Şekil 72. $h=20\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=30^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



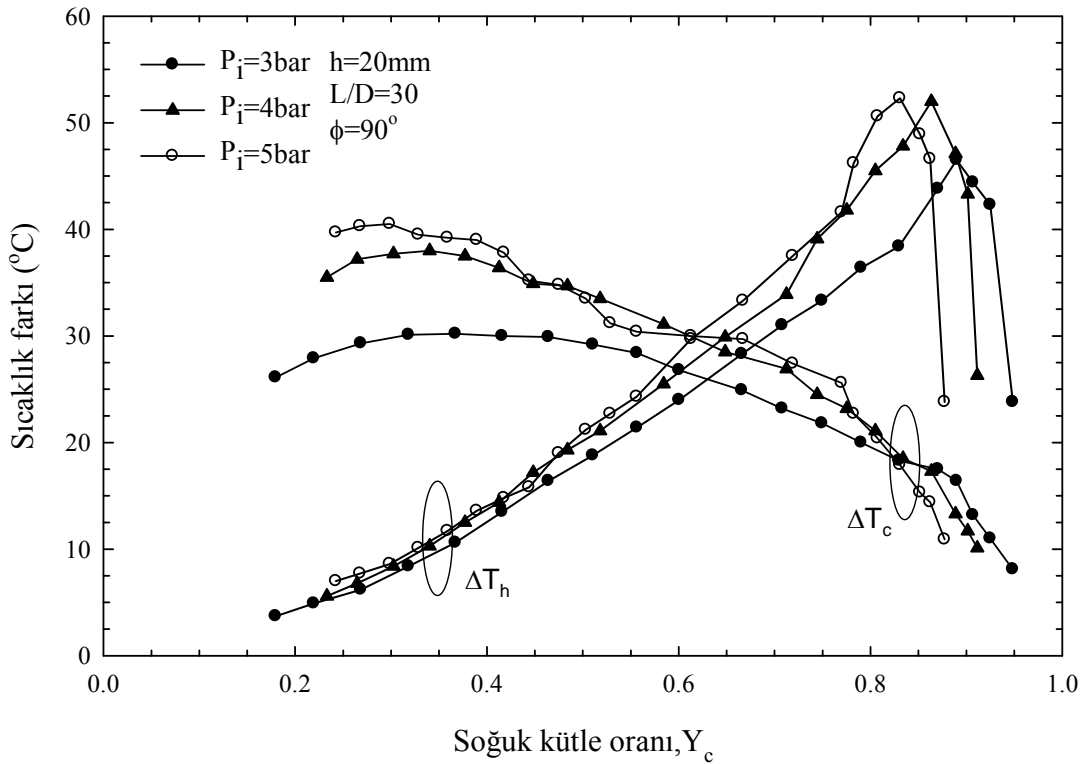
Şekil 73. $h=20\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=45^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



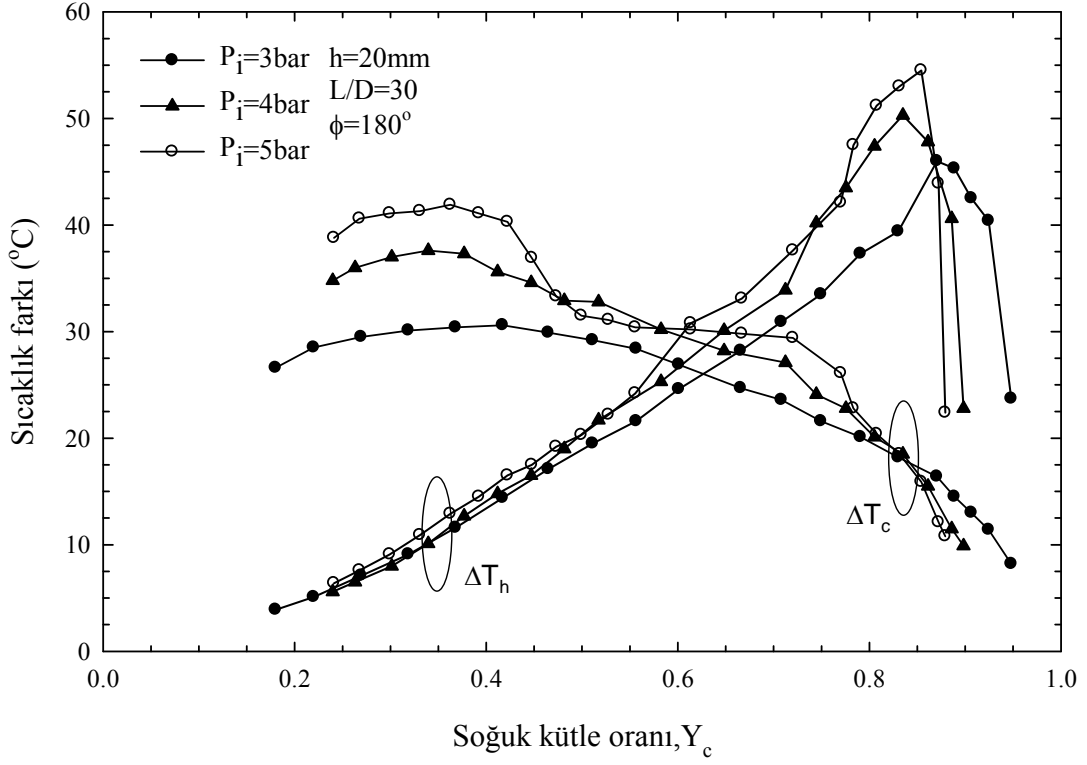
Şekil 74. $h=20\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=60^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



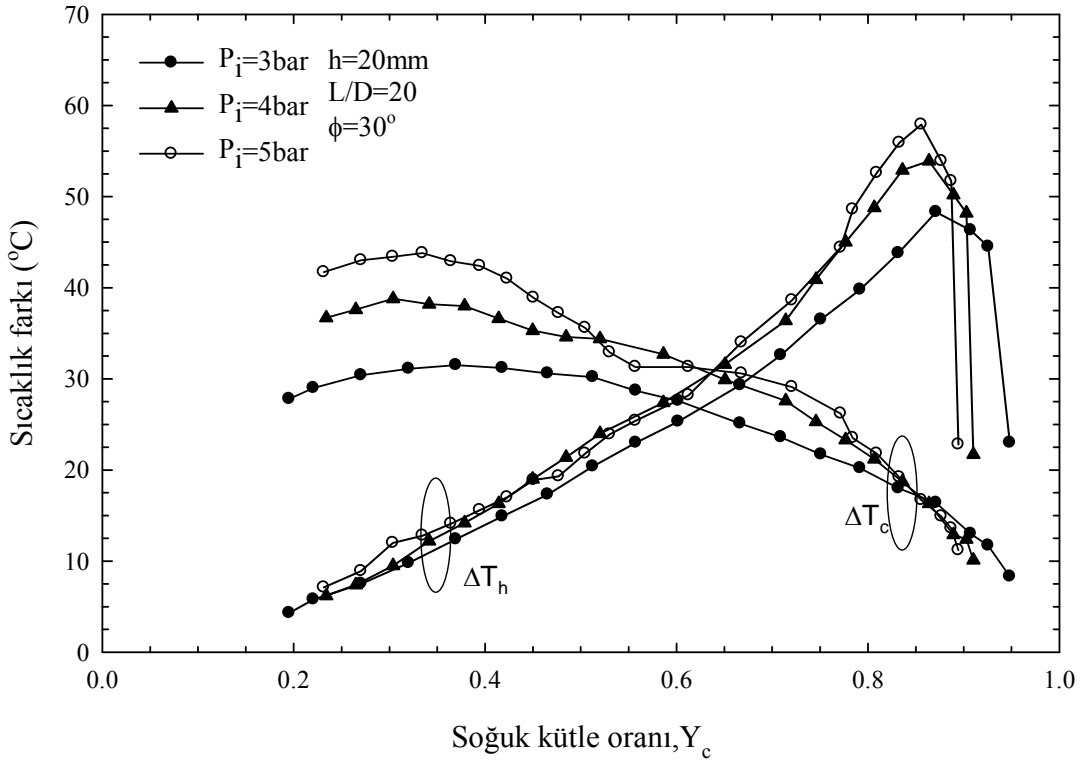
Şekil 75. $h=20\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=75^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



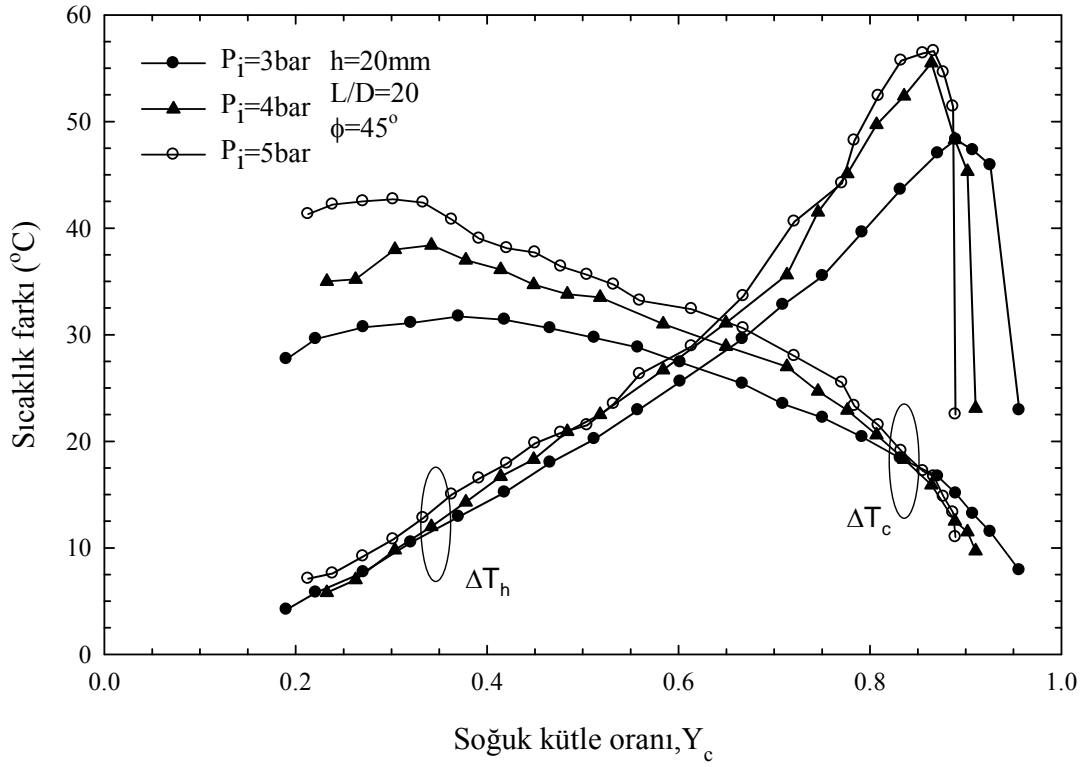
Şekil 76. $h=20\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=90^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



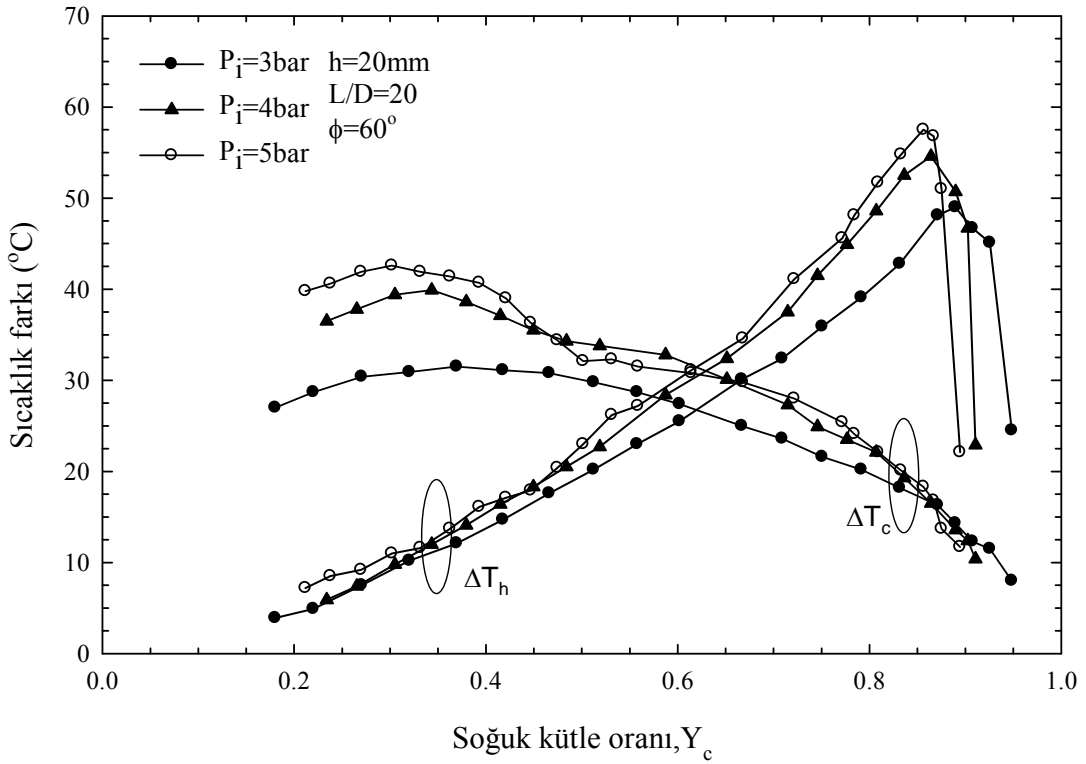
Şekil 77. $h=20\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=180^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



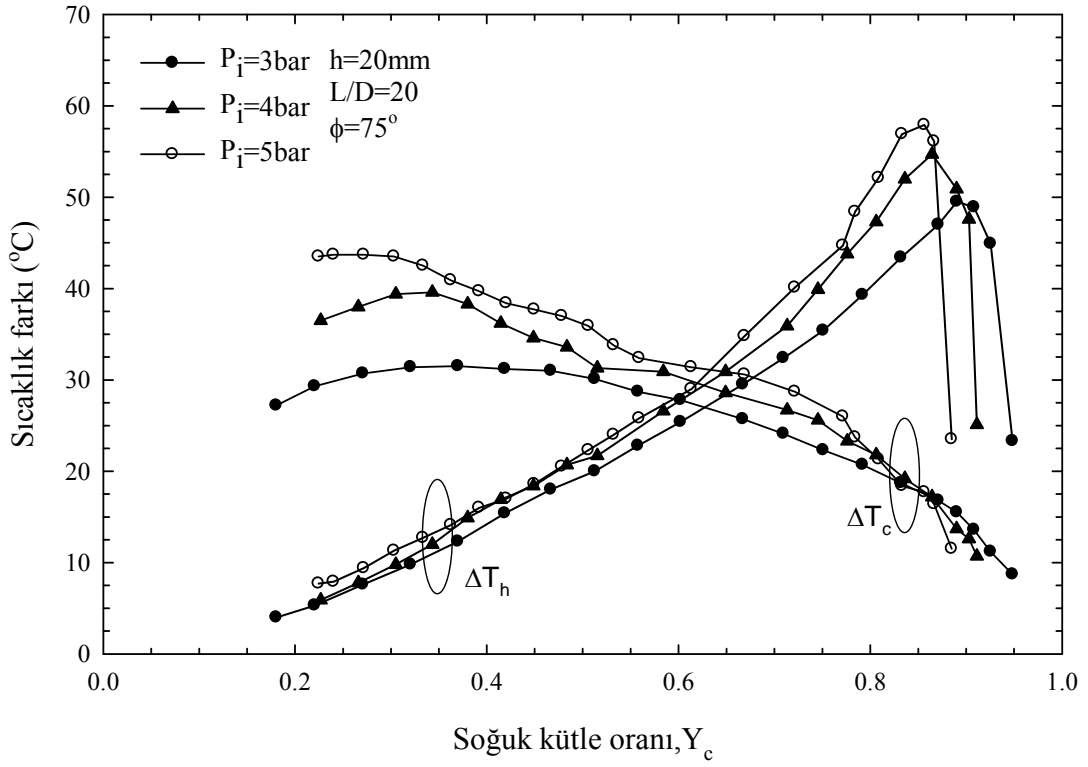
Şekil 78. $h=20\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=30^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



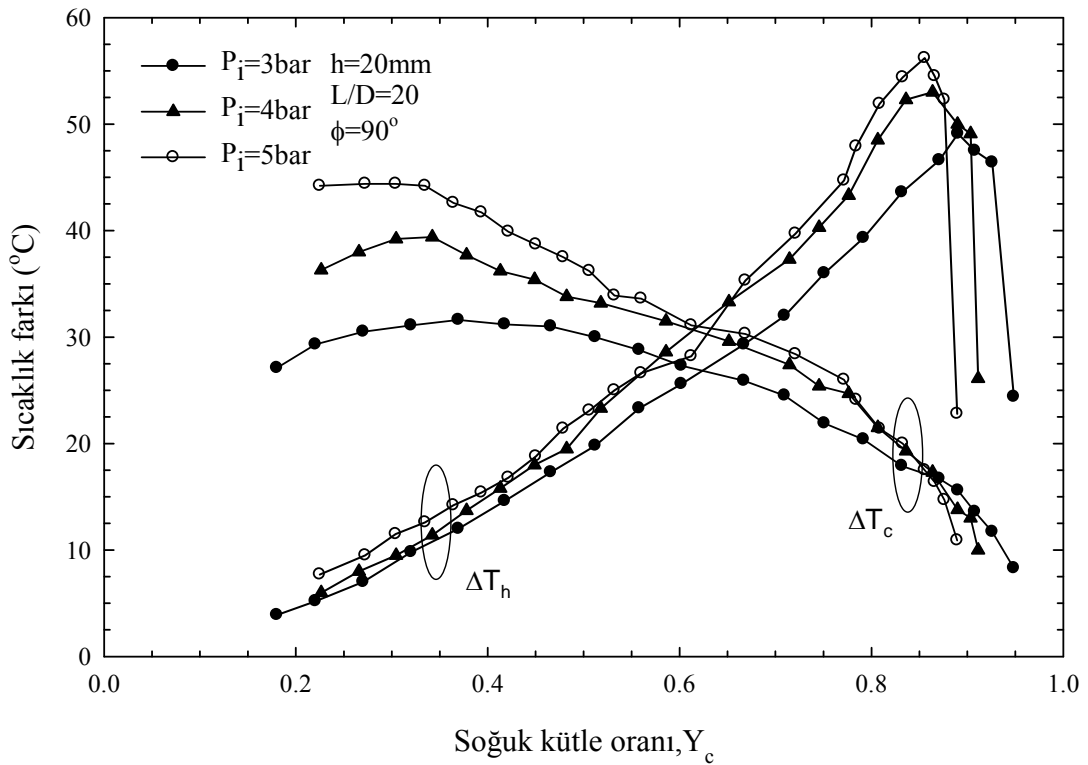
Şekil 79. $h=20\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=45^{\circ}$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



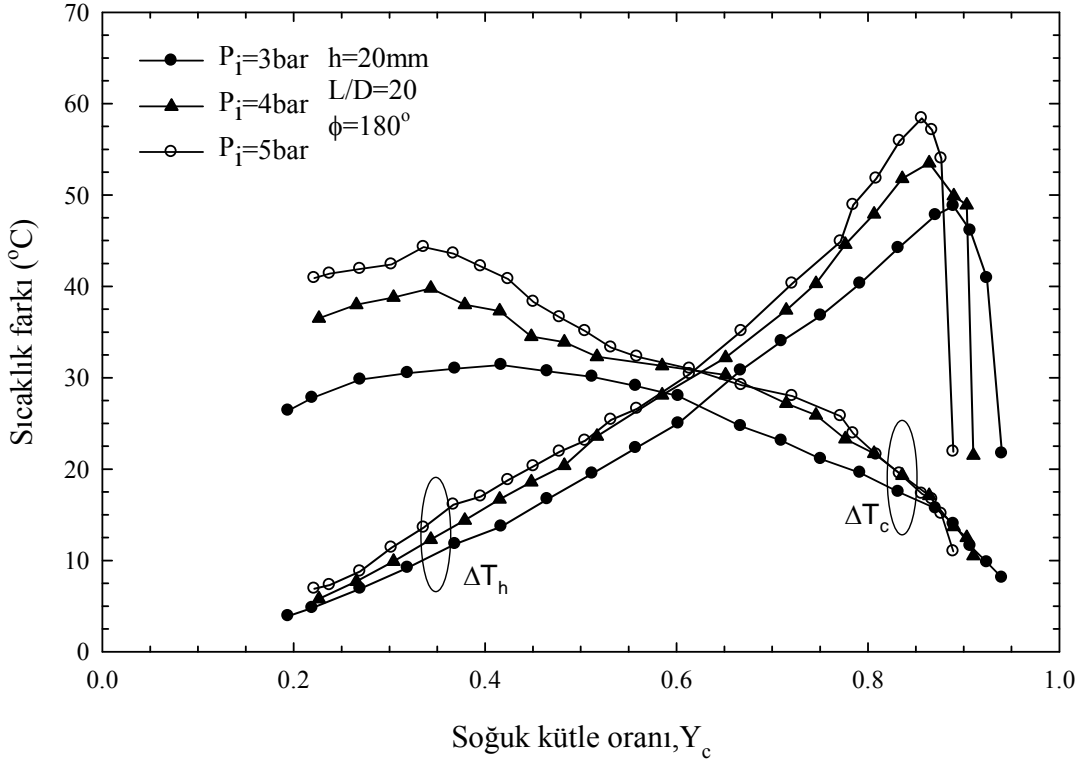
Şekil 80. $h=20\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=60^{\circ}$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



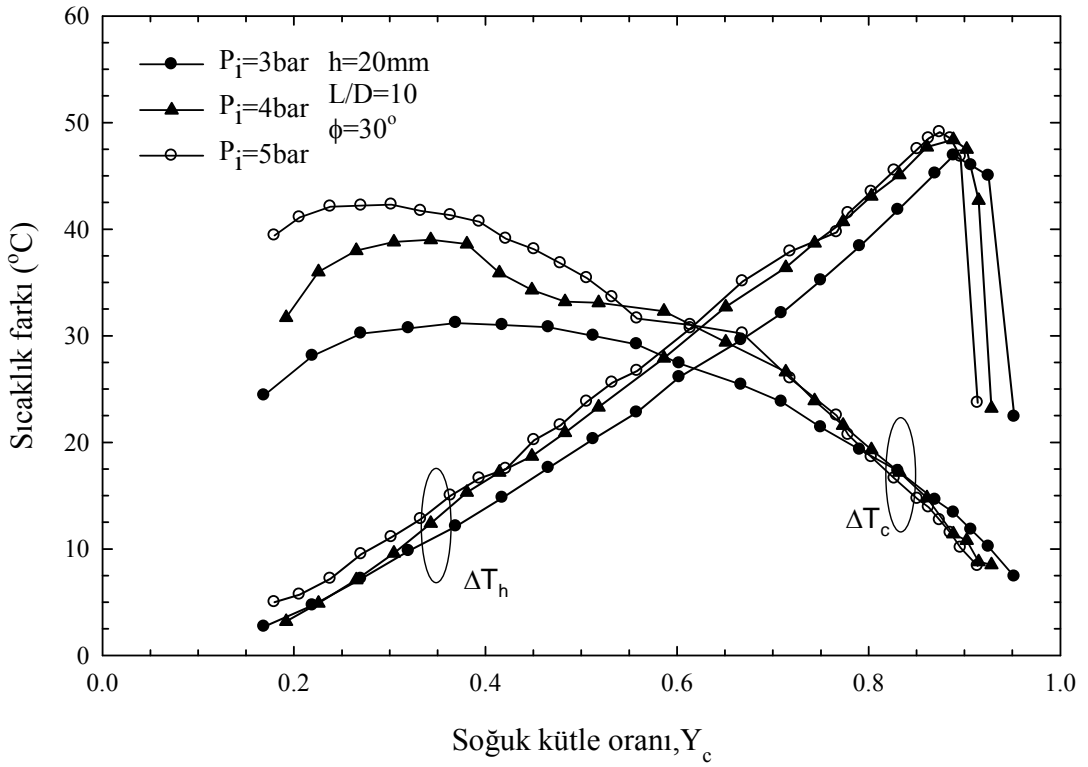
Şekil 81. $h=20\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=75^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



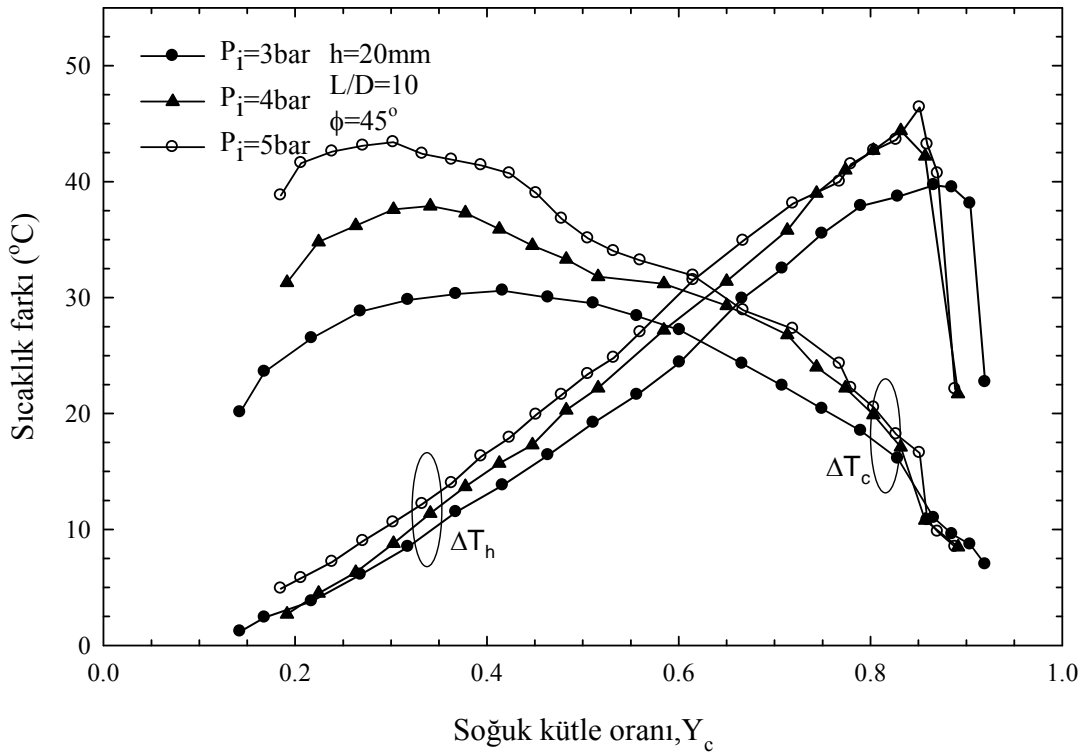
Şekil 82. $h=20\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=90^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



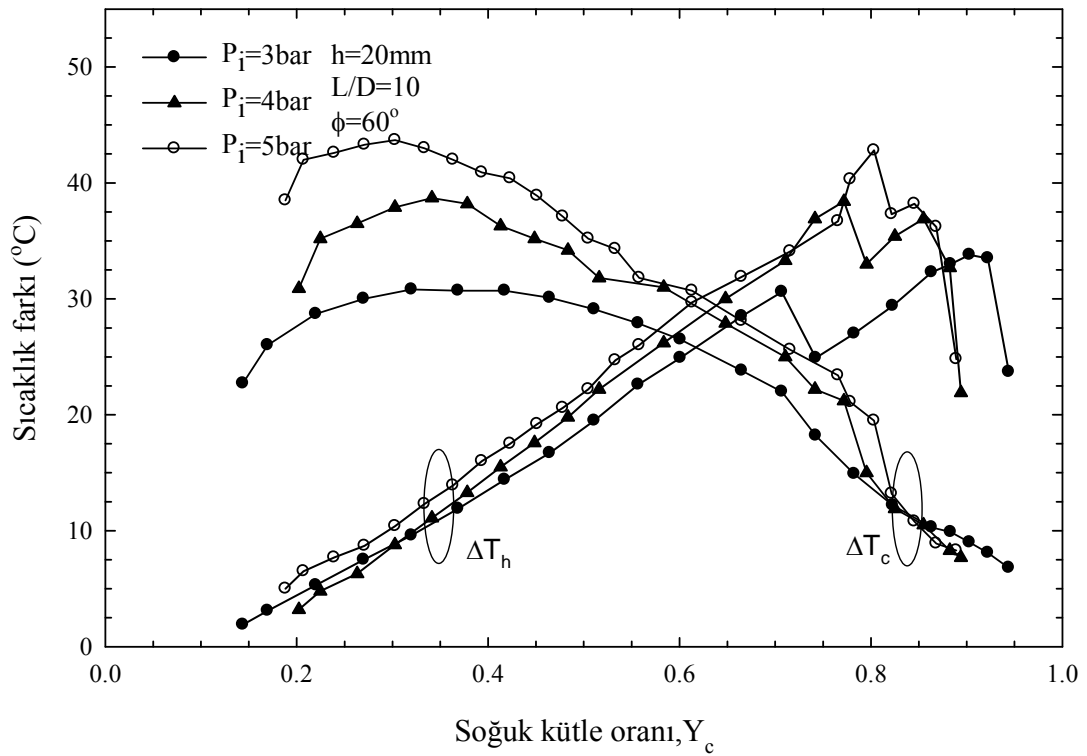
Şekil 83. $h=20\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=180^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



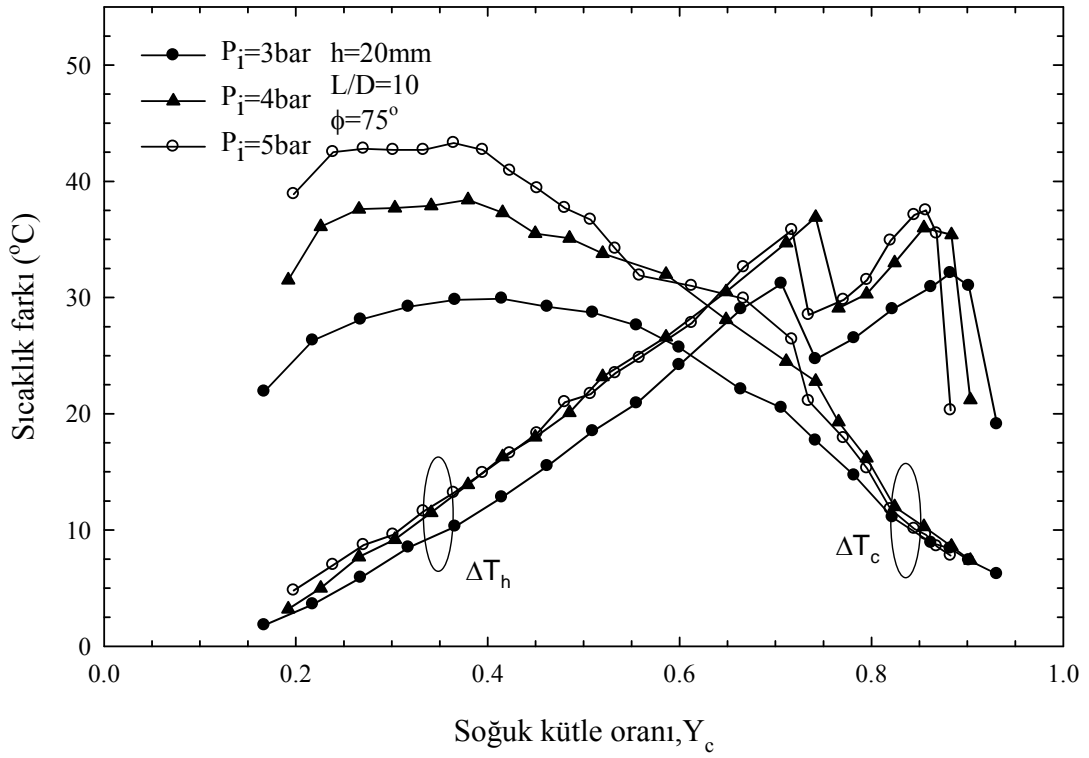
Şekil 84. $h=20\text{mm}$, $L/D=10$ ve $\phi=30^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



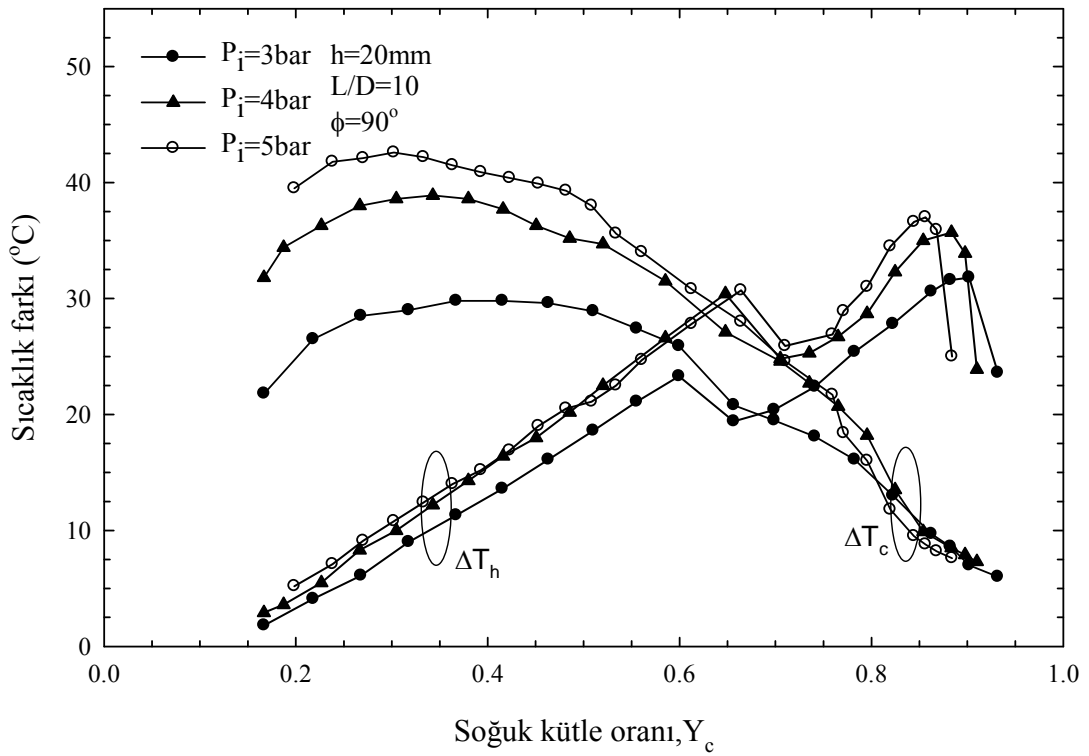
Şekil 85. $h=20\text{mm}$, $L/D=10$ ve $\phi=45^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



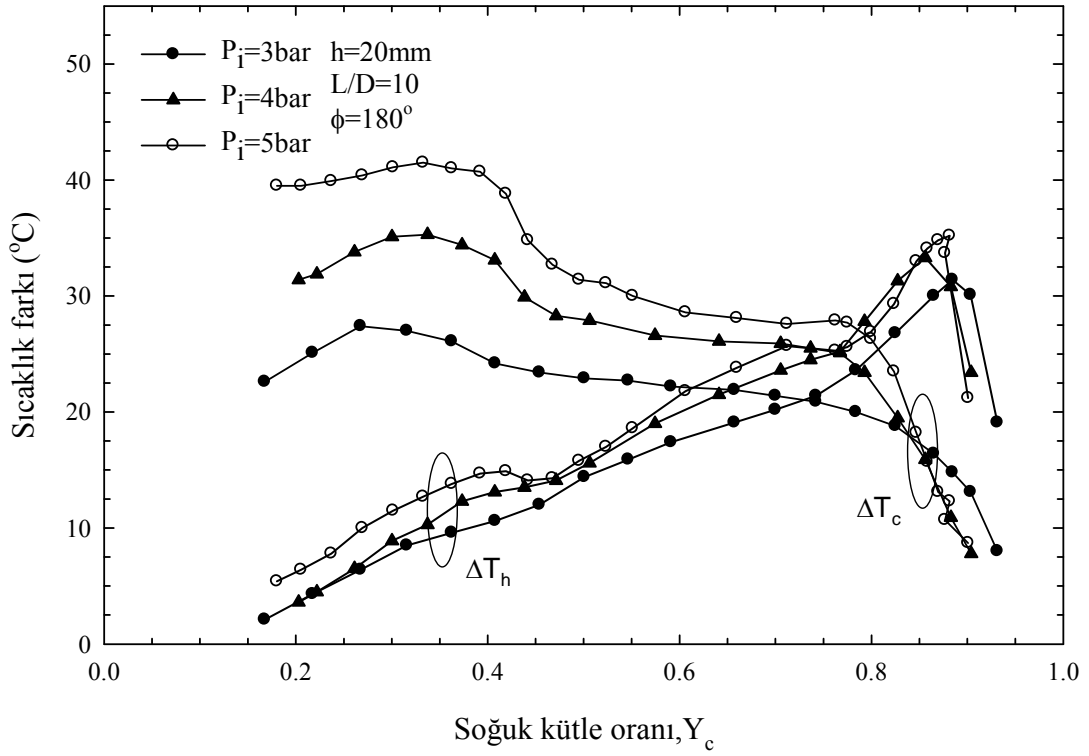
Şekil 86. $h=20\text{mm}$, $L/D=10$ ve $\phi=60^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



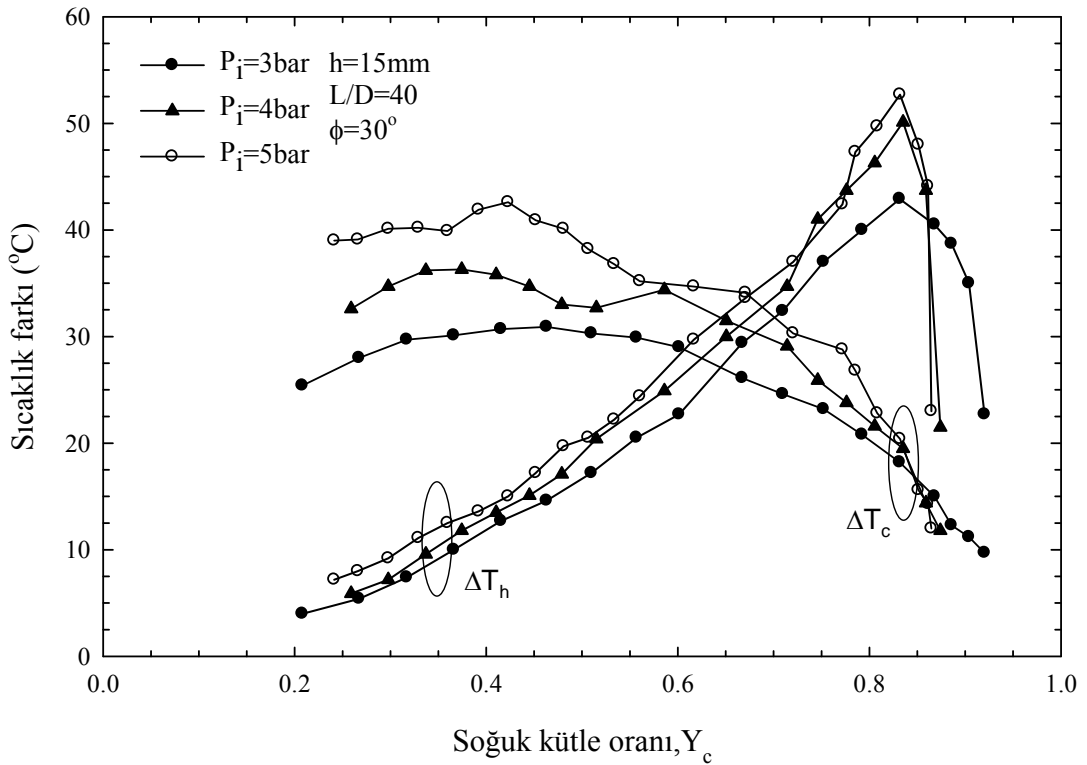
Şekil 87. $h=20\text{mm}$, $L/D=10$ ve $\phi=75^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



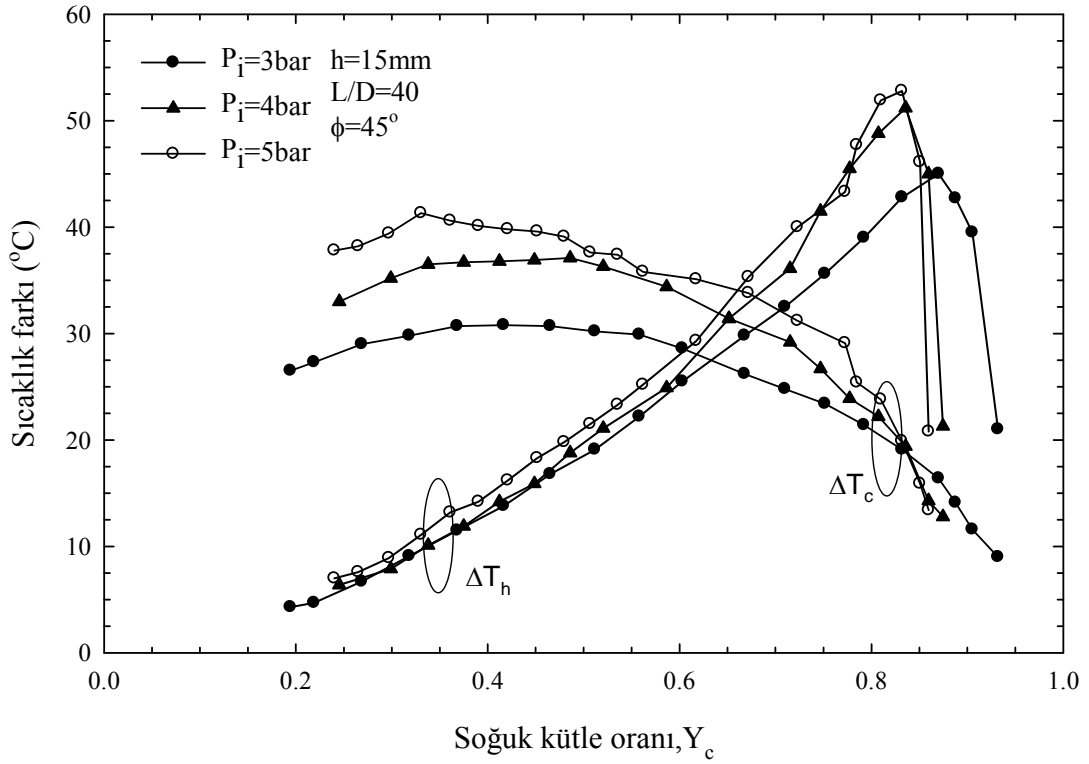
Şekil 88. $h=20\text{mm}$, $L/D=10$ ve $\phi=90^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



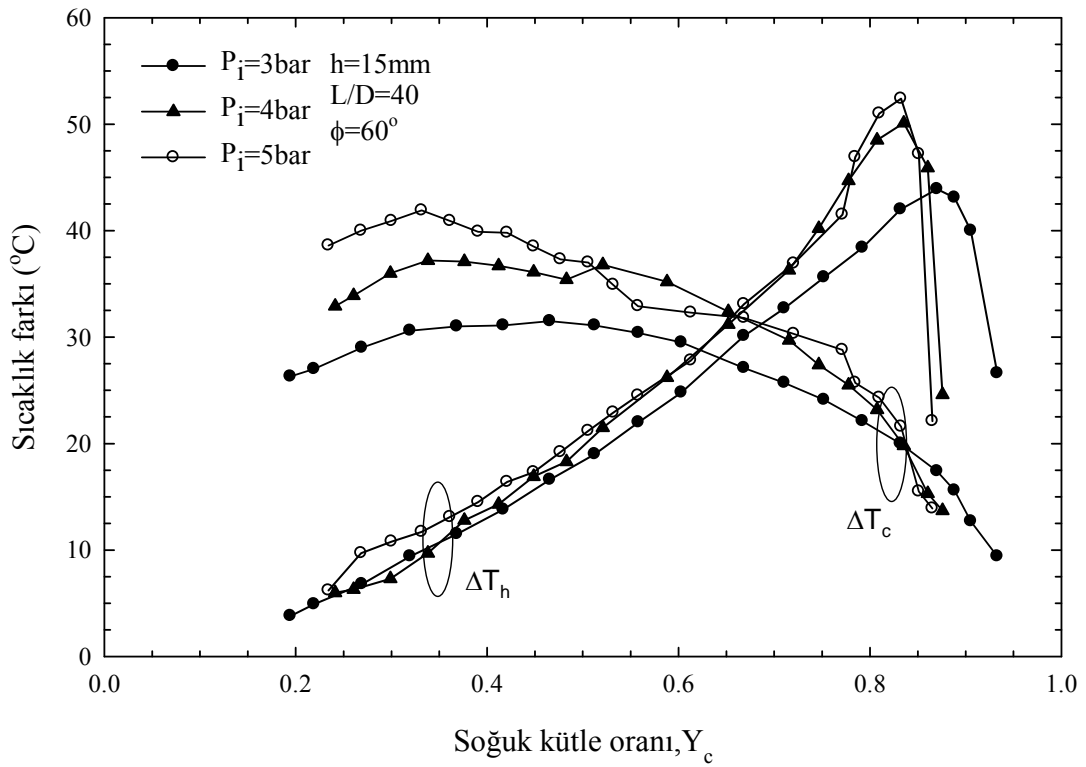
Şekil 89. $h=20\text{mm}$, $L/D=10$ ve $\phi=180^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



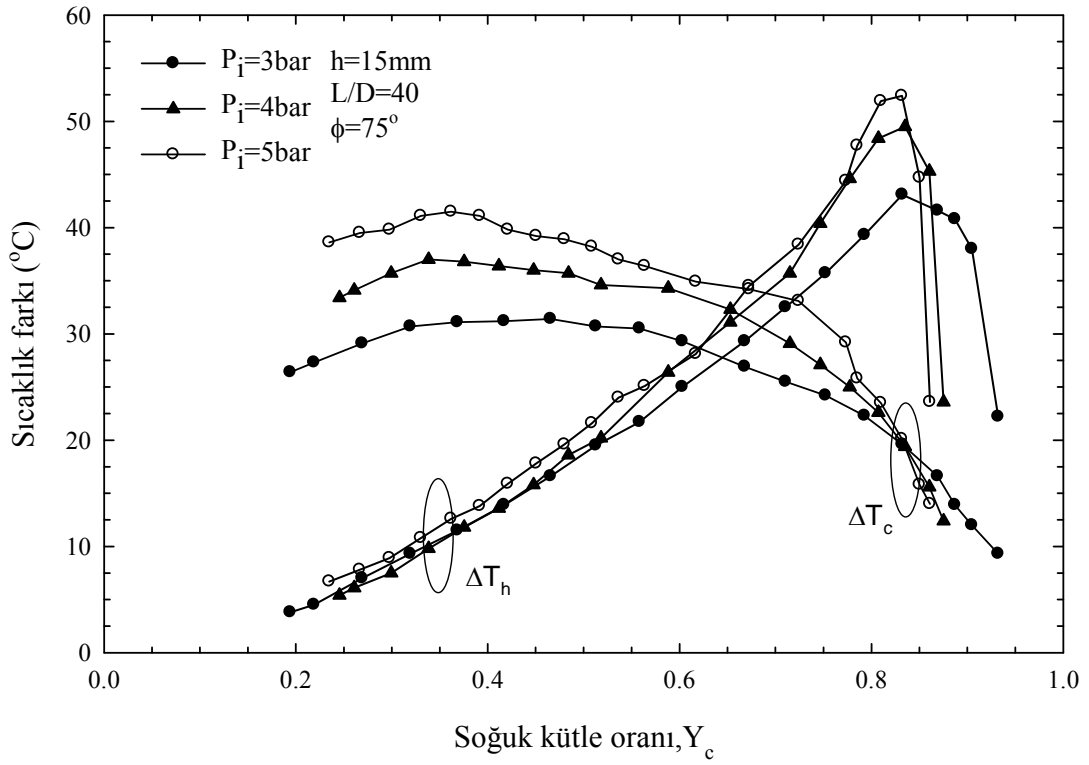
Şekil 90. $h=15\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=30^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



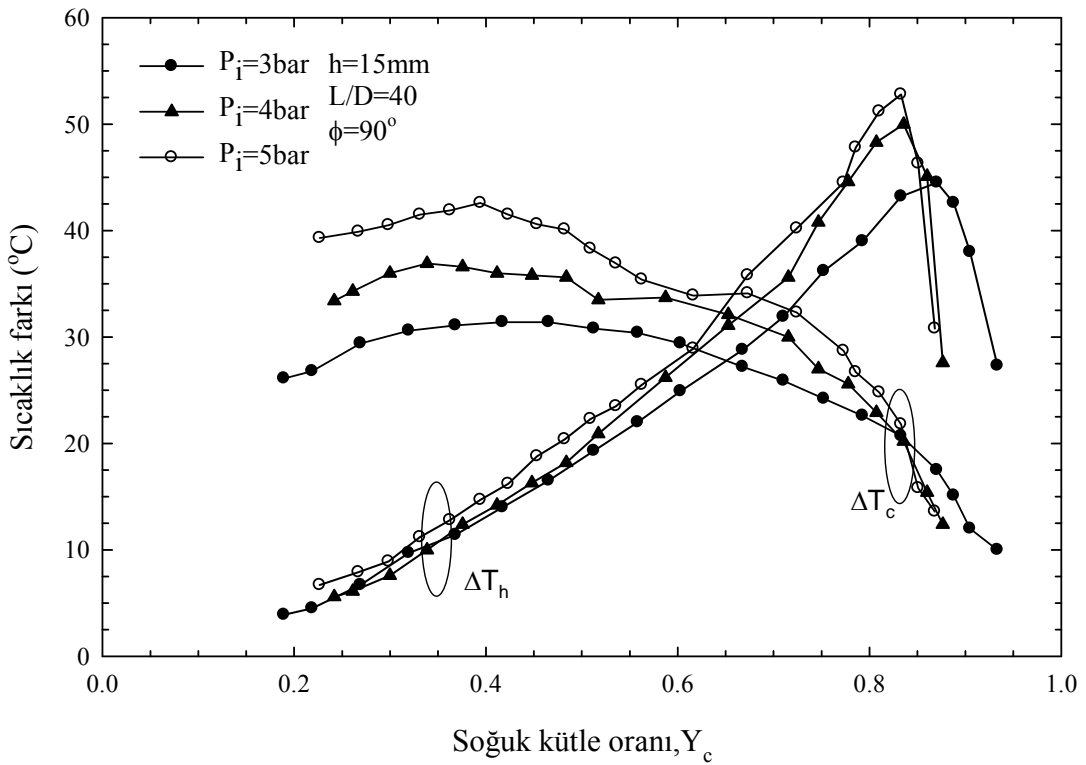
Şekil 91. $h=15\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=45^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



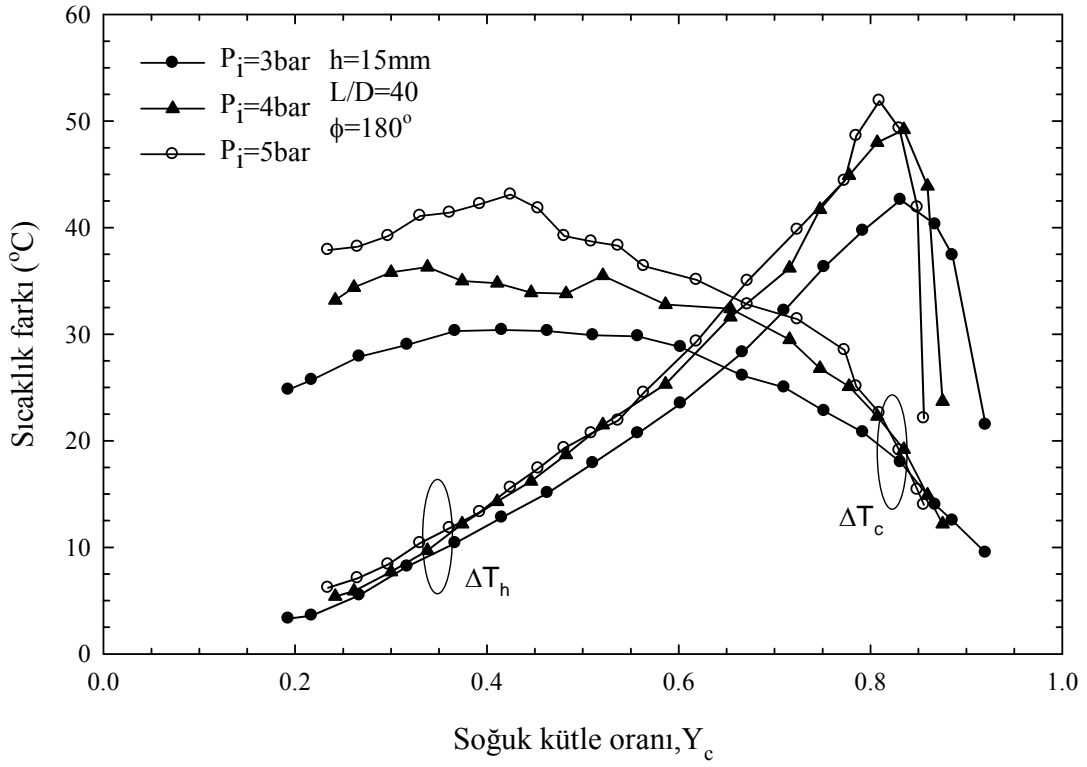
Şekil 92. $h=15\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=60^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



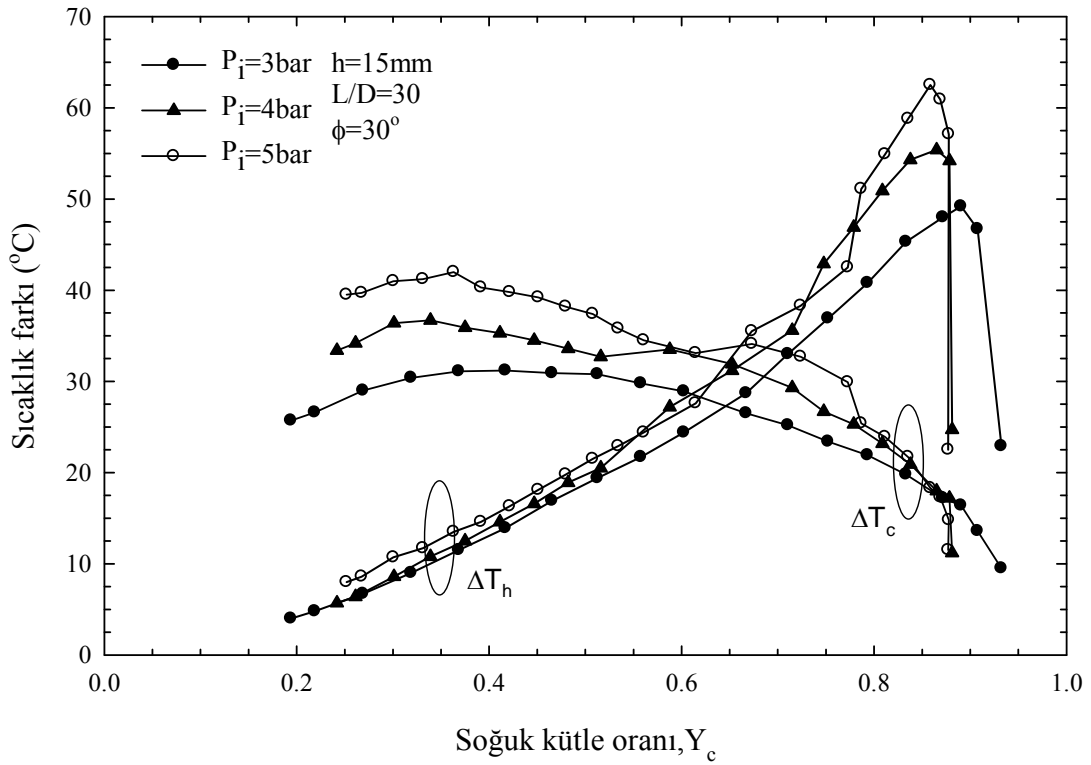
Şekil 93. $h=15\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=75^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



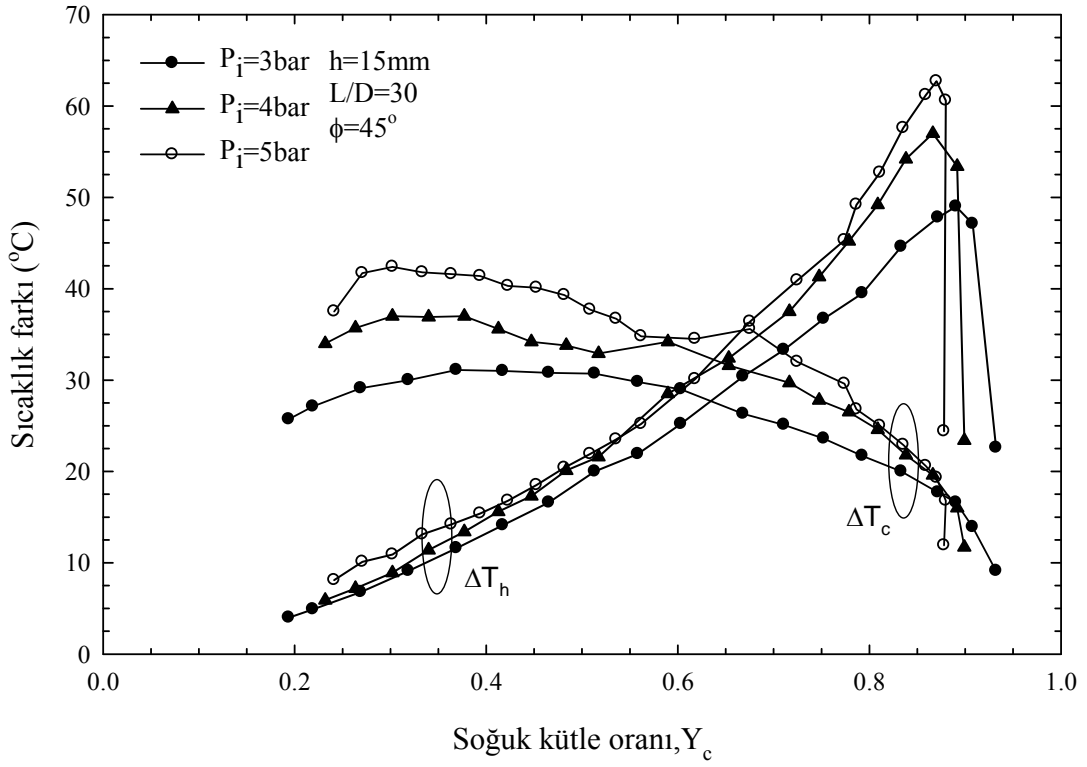
Şekil 94. $h=15\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=90^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



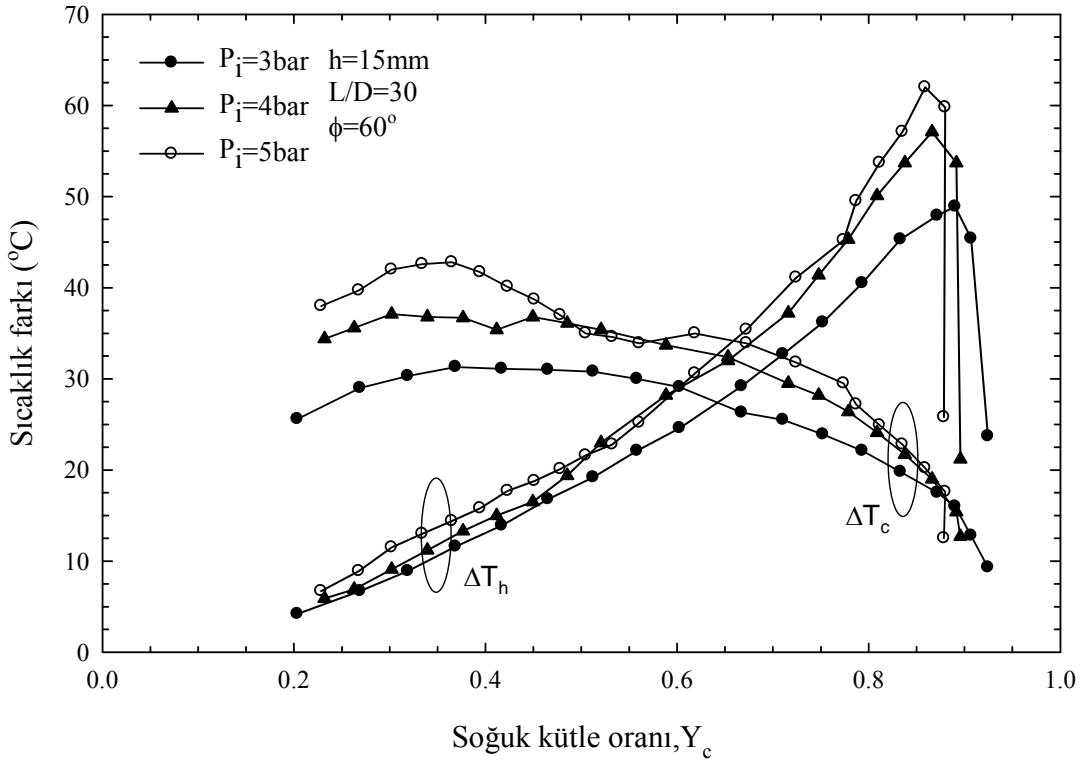
Şekil 95. $h=15\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=180^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



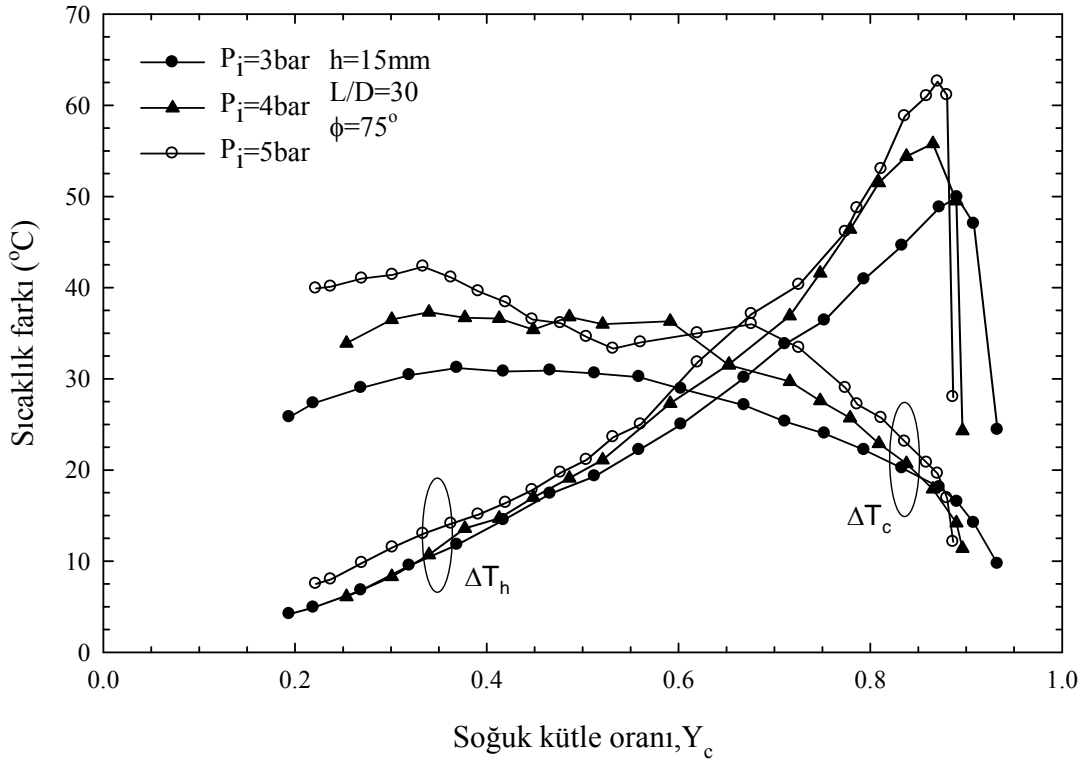
Şekil 96. $h=15\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=30^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



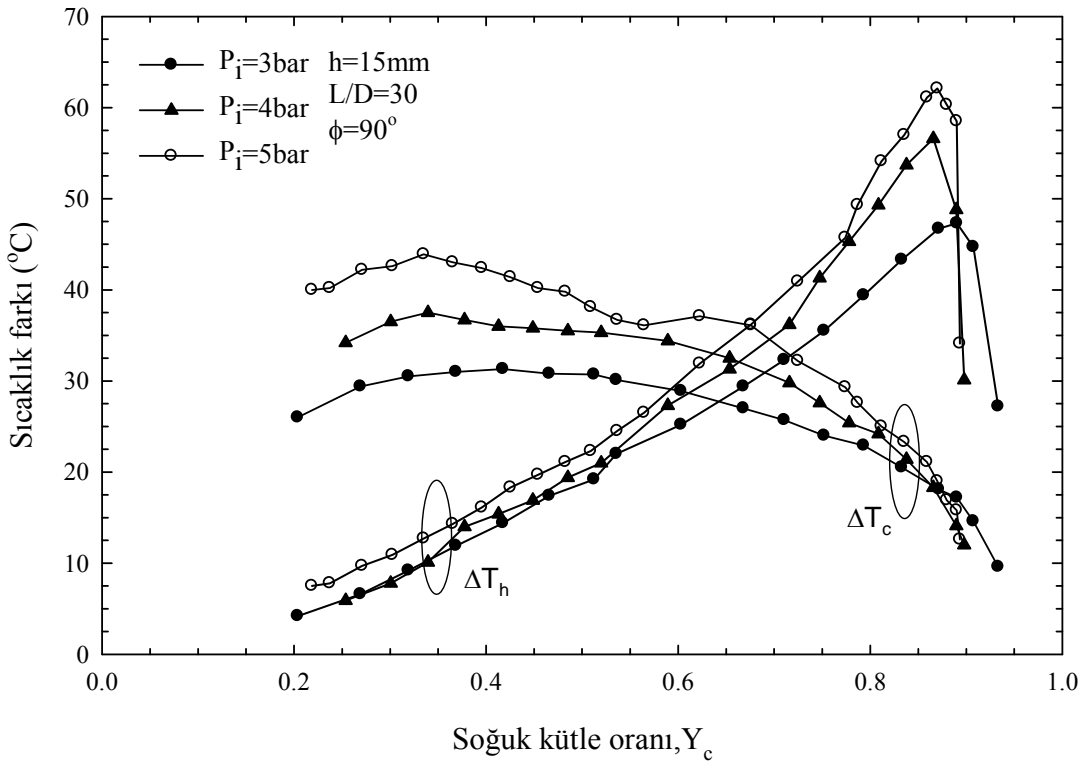
Şekil 97. $h=15\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=45^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



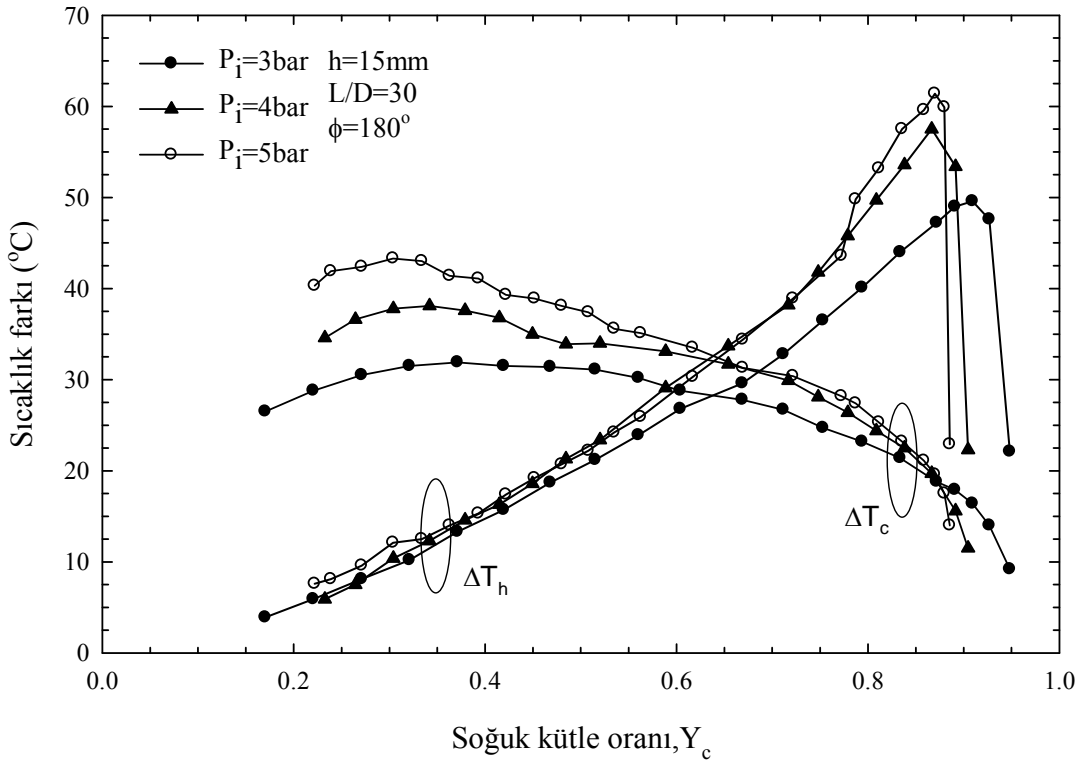
Şekil 98. $h=15\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=60^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



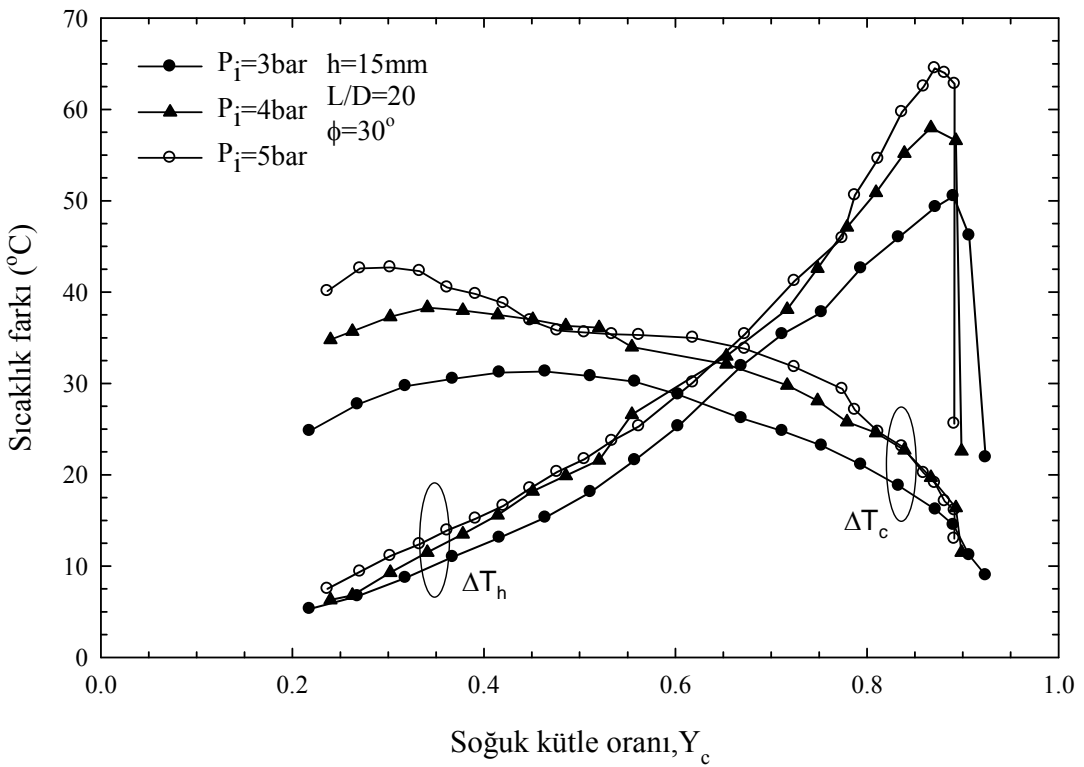
Şekil 99. $h=15\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=75^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



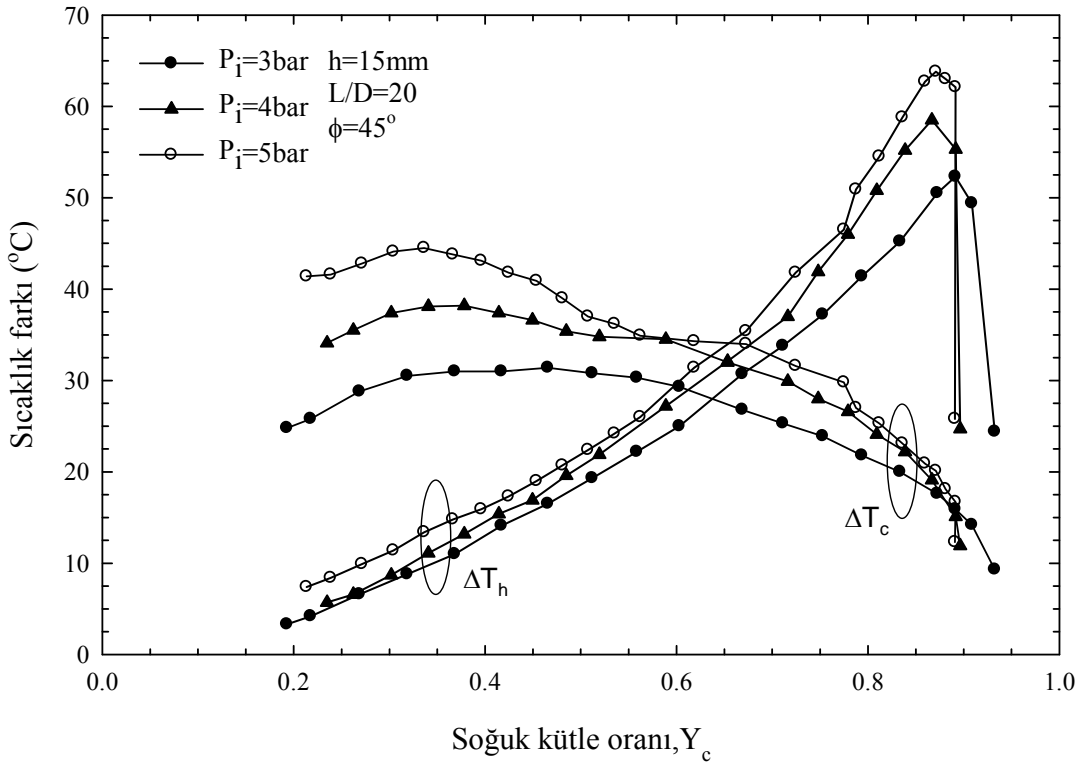
Şekil 100. $h=15\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=90^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



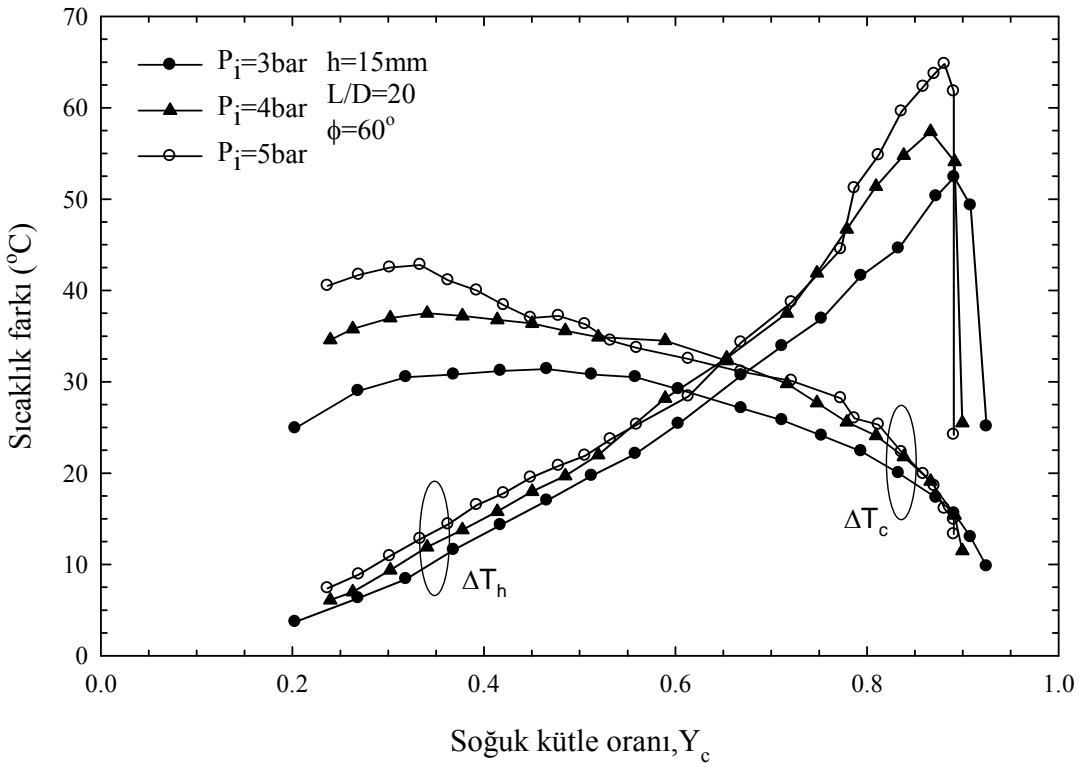
Şekil 101. $h=15\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=180^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



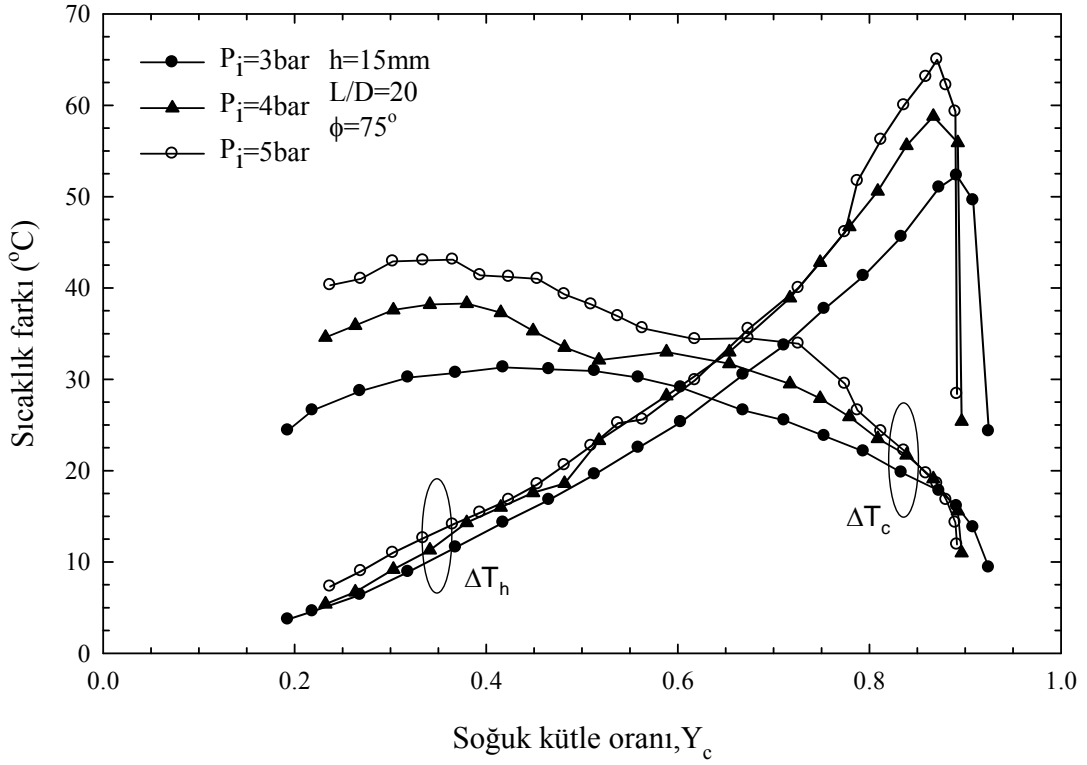
Şekil 102. $h=15\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=30^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



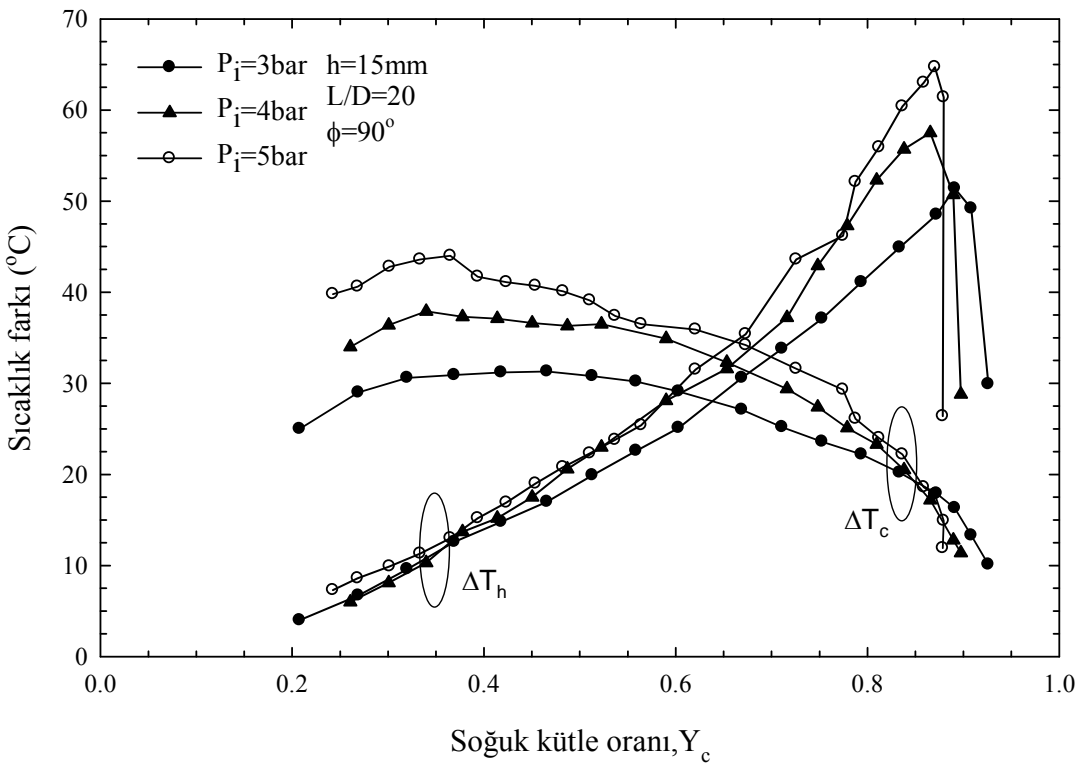
Şekil 103. $h=15\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=45^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



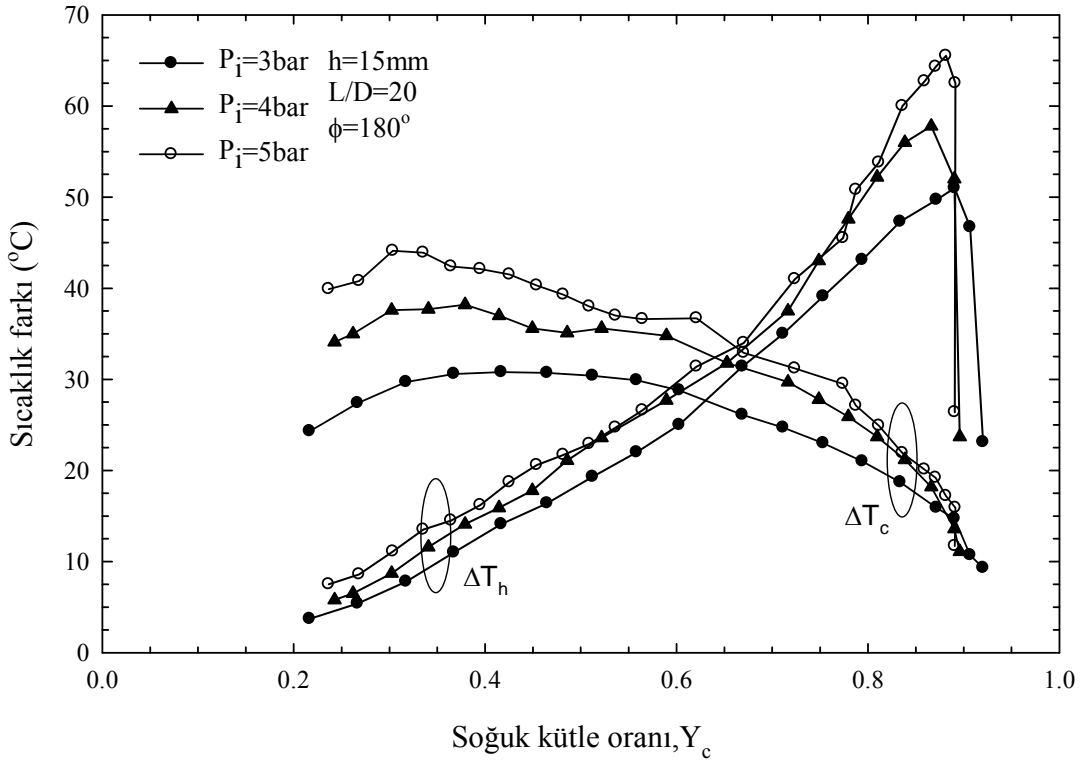
Şekil 104. $h=15\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=60^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



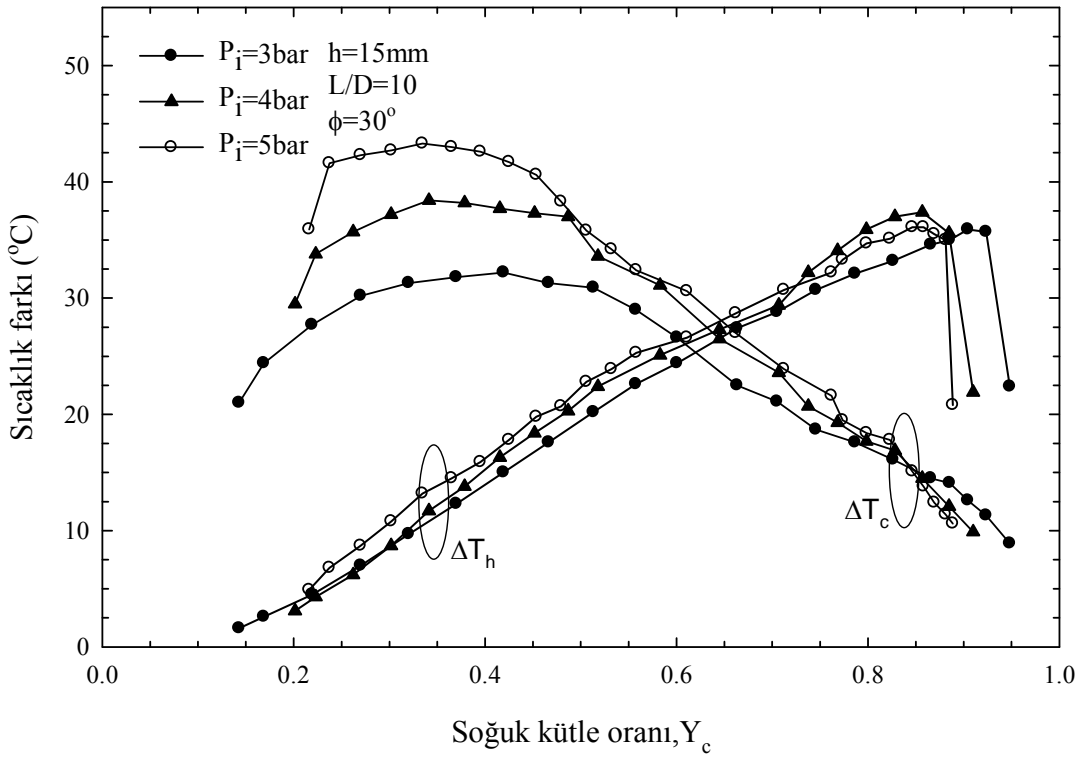
Şekil 105. $h=15\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=75^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



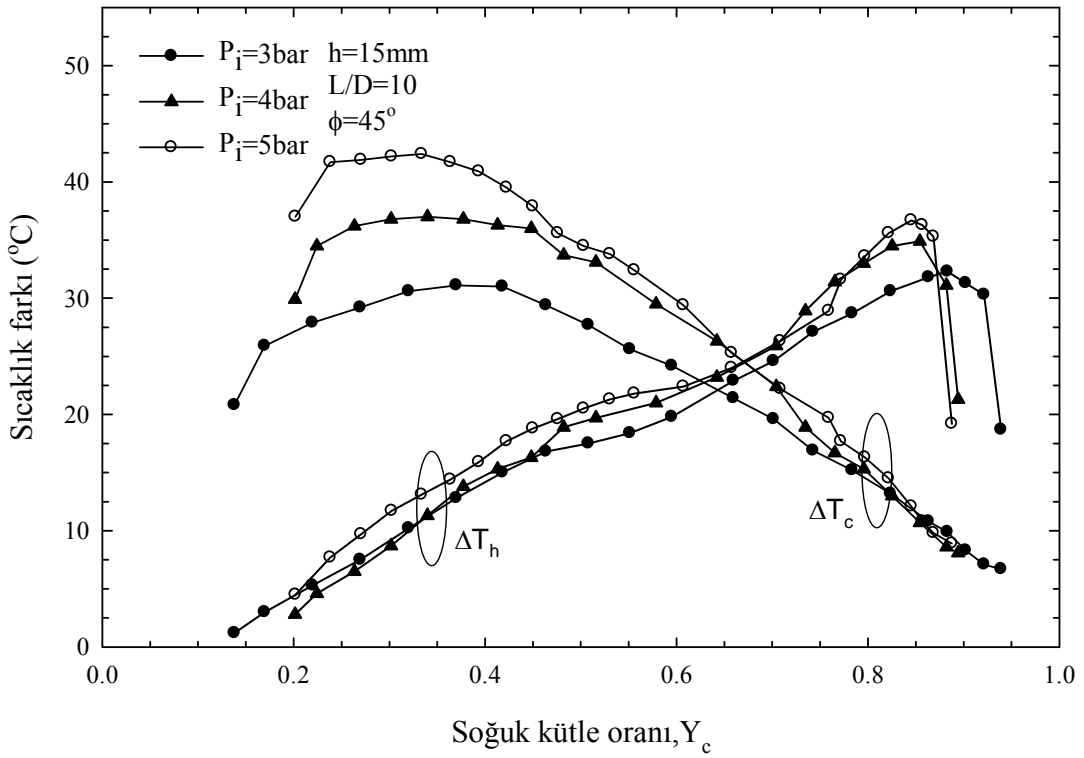
Şekil 106. $h=15\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=90^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



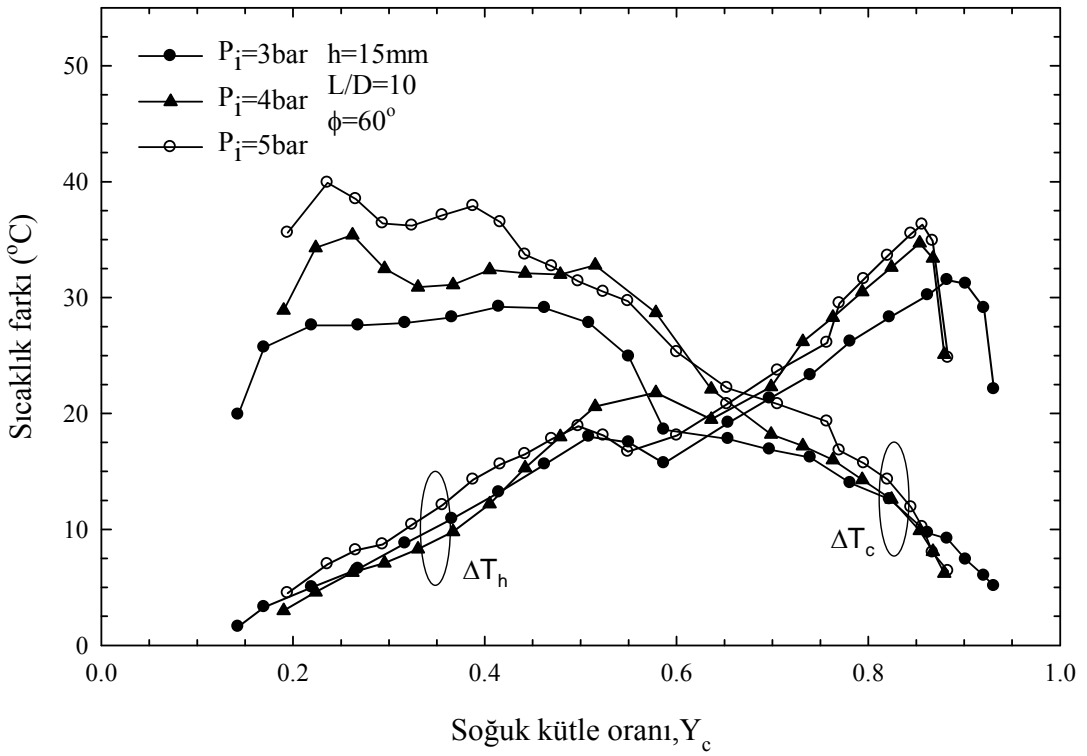
Şekil 107. $h=15\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=180^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



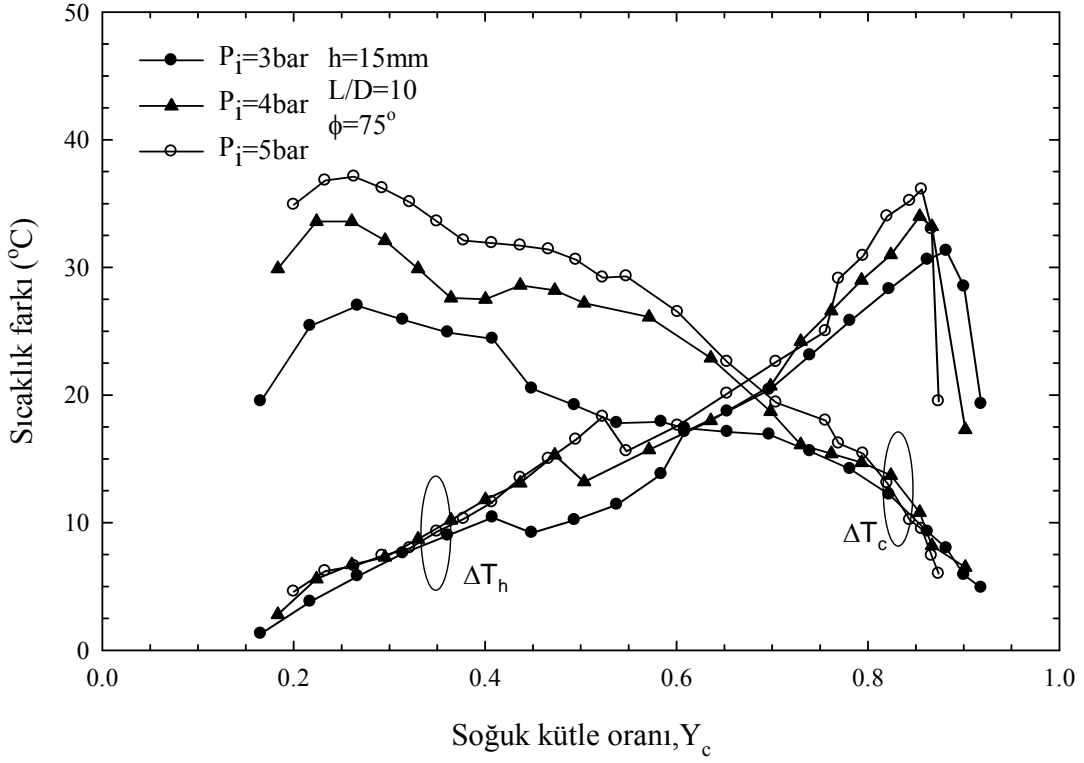
Şekil 108. $h=15\text{mm}$, $L/D=10$ ve $\phi=30^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



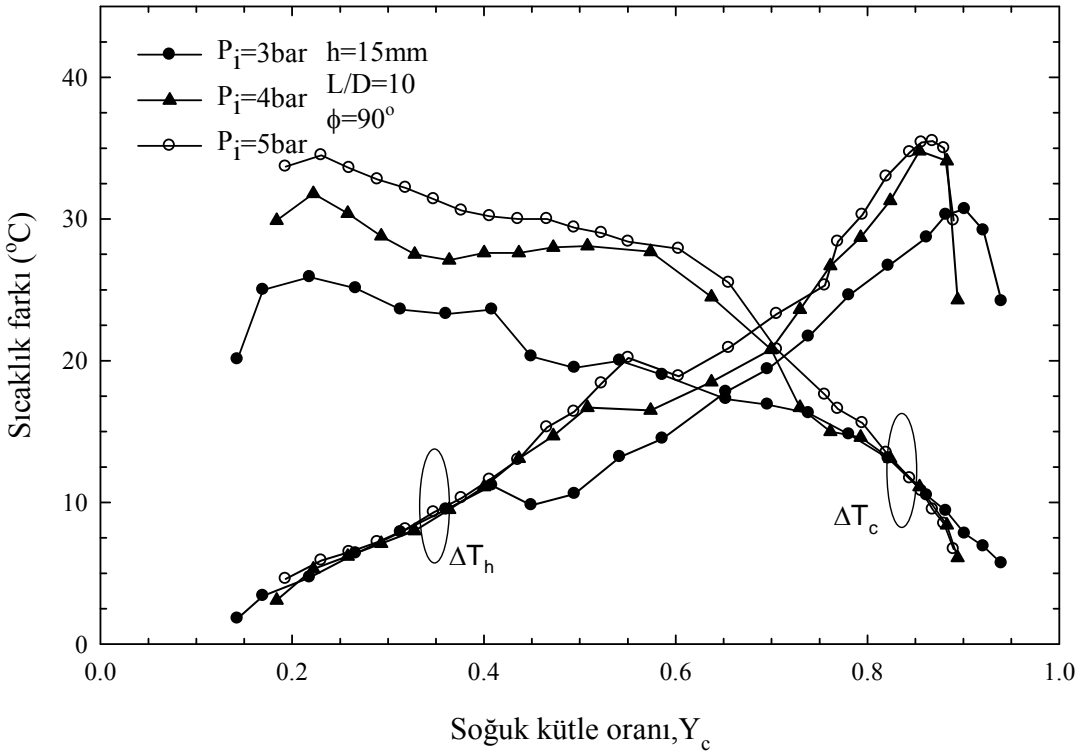
Şekil 109. $h=15$ mm, $L/D=10$ ve $\phi=45^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



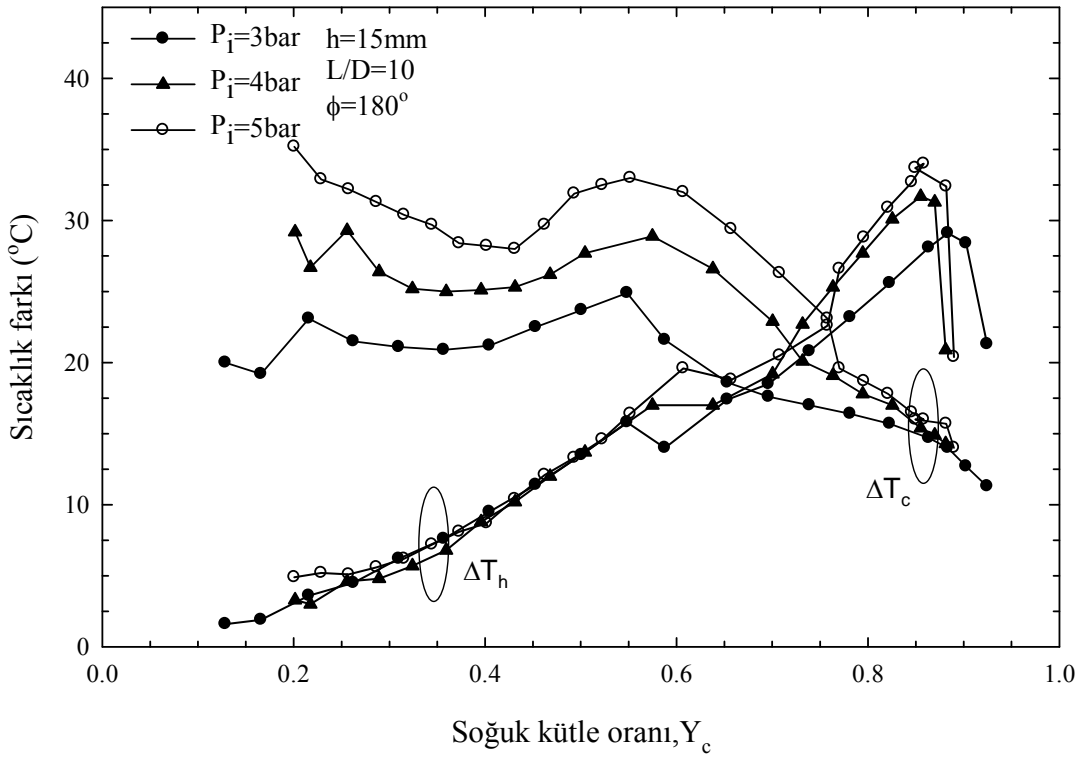
Şekil 110. $h=15$ mm, $L/D=10$ ve $\phi=60^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



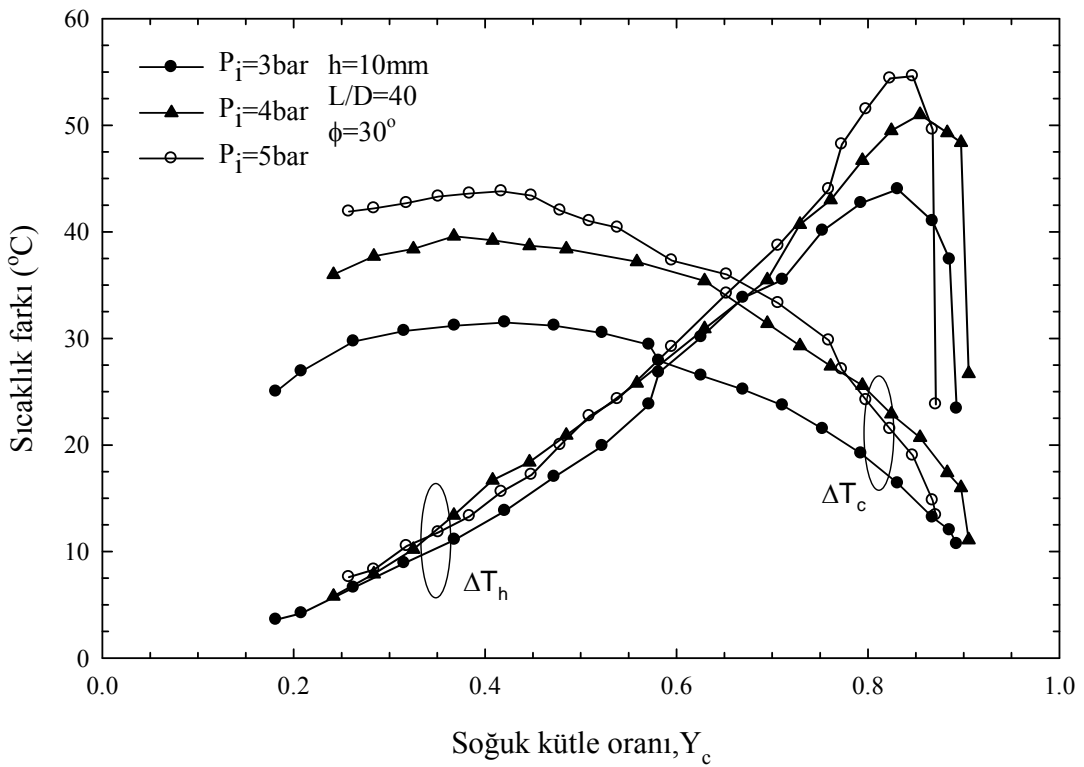
Şekil 111. $h=15\text{mm}$, $L/D=10$ ve $\phi=75^{\circ}$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



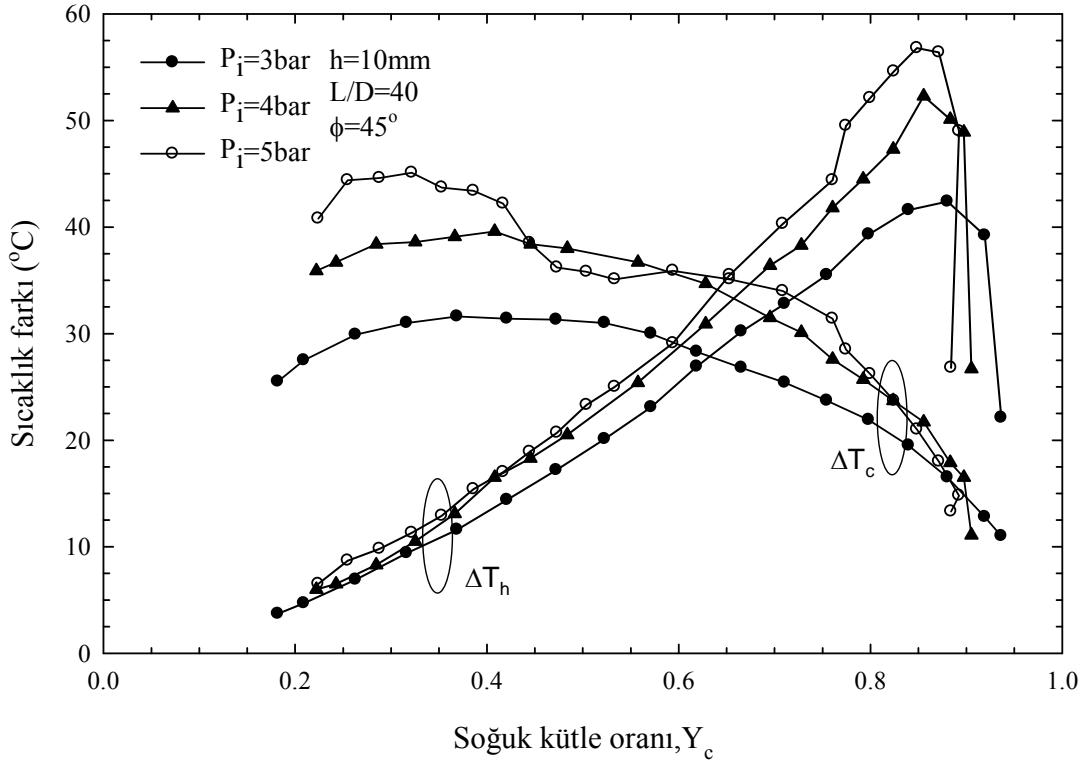
Şekil 112. $h=15\text{mm}$, $L/D=10$ ve $\phi=90^{\circ}$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



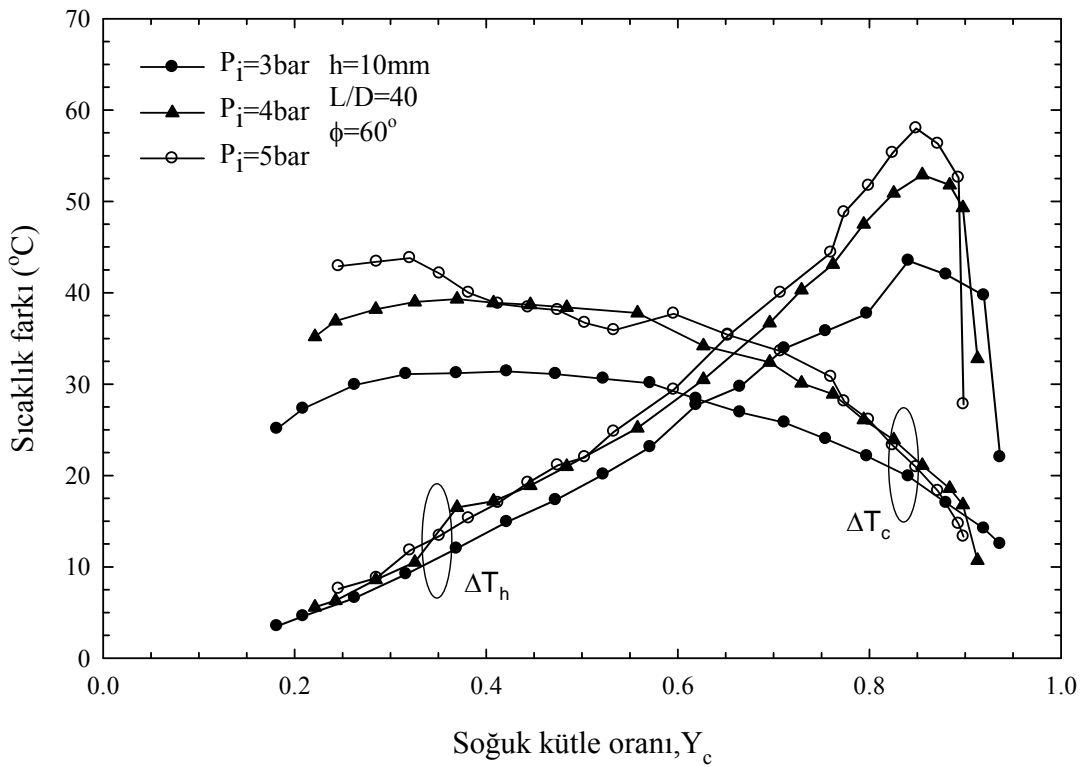
Şekil 113. $h=15\text{mm}$, $L/D=10$ ve $\phi=180^{\circ}$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



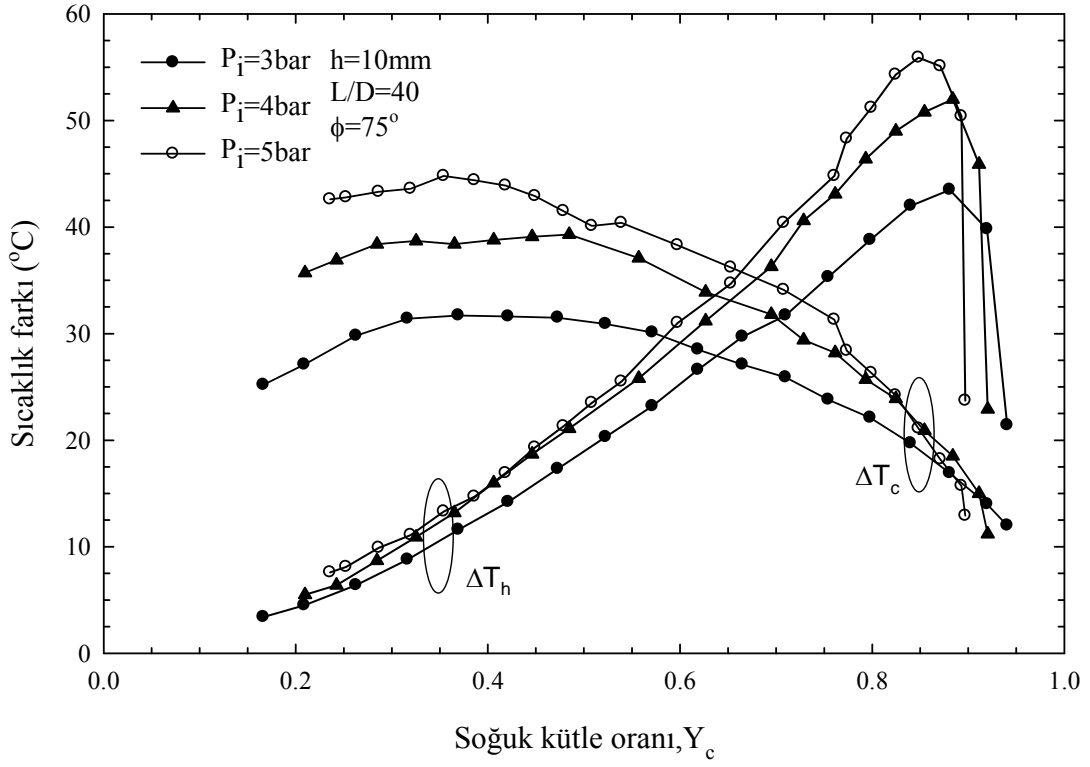
Şekil 114. $h=10\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=30^{\circ}$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



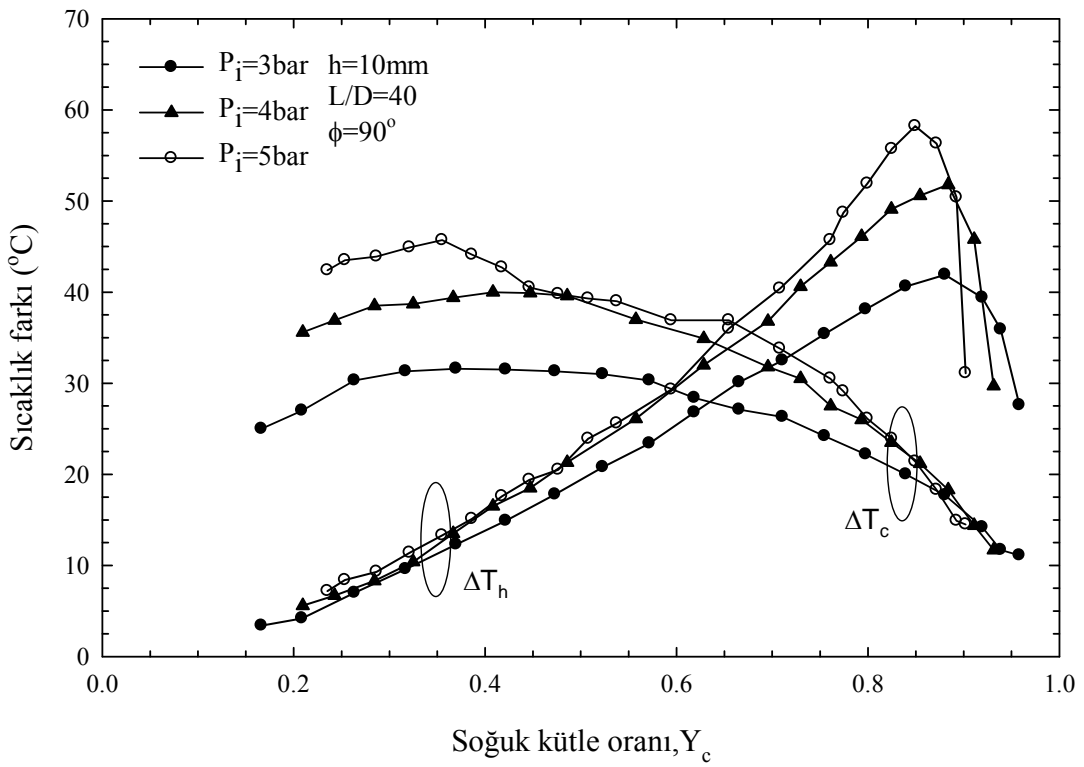
Şekil 115. $h=10\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=45^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



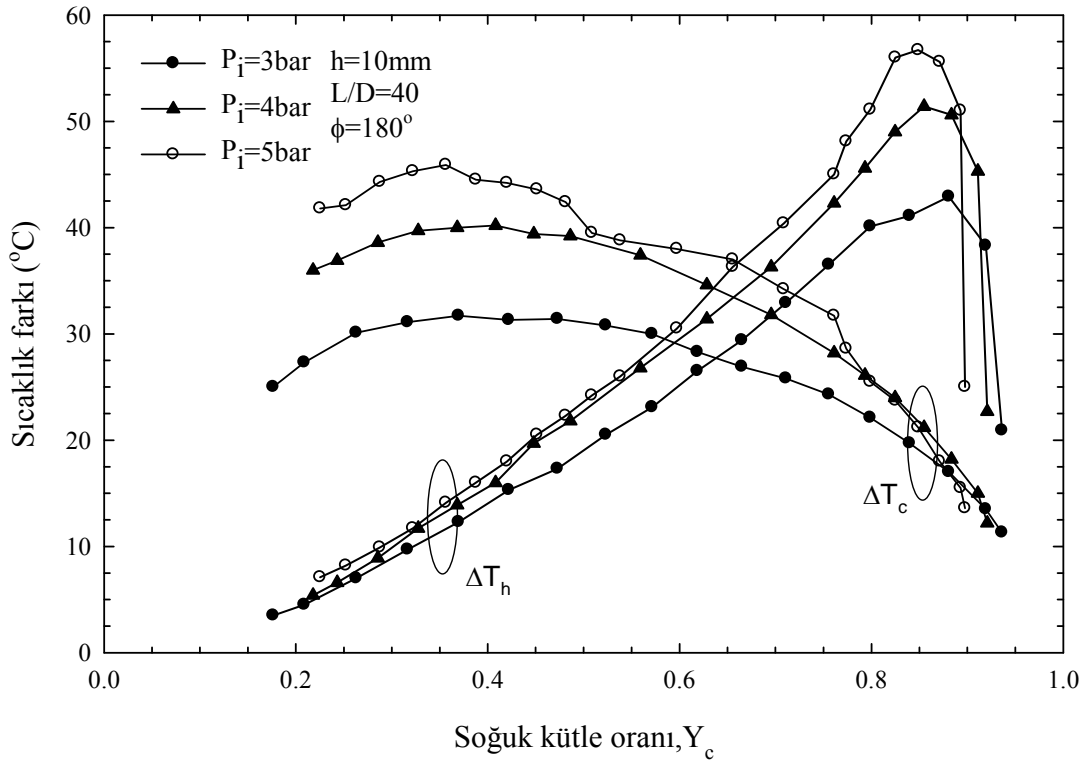
Şekil 116. $h=10\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=60^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



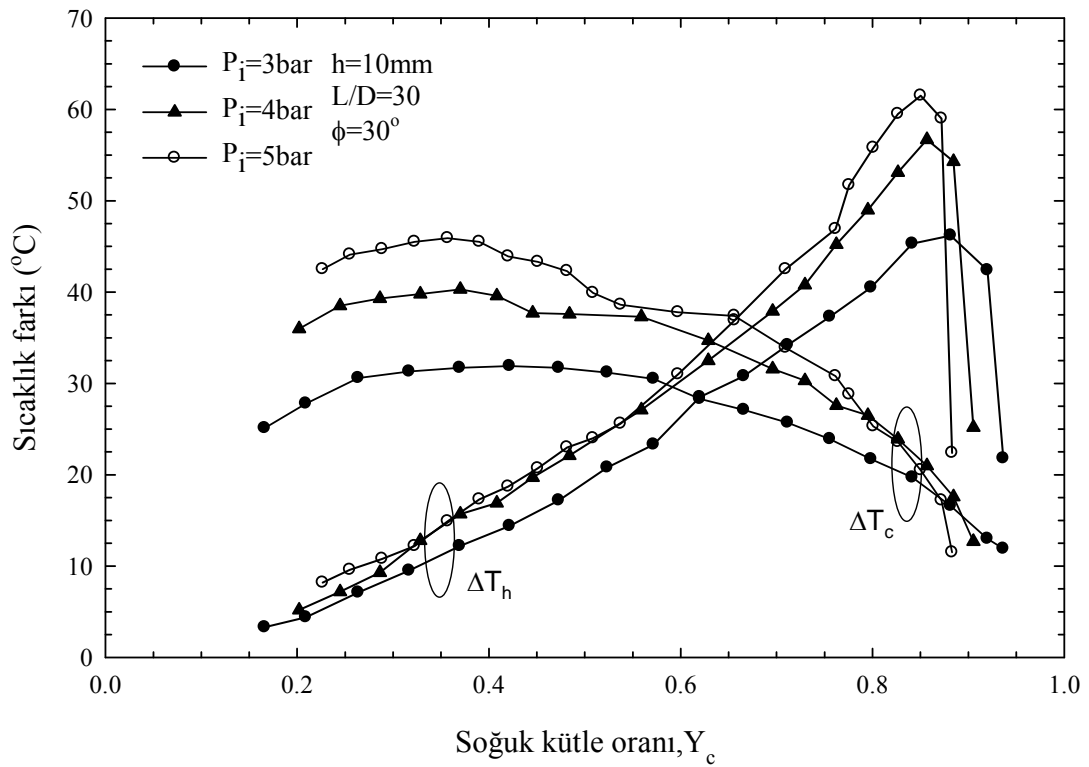
Şekil 117. $h=10\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=75^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



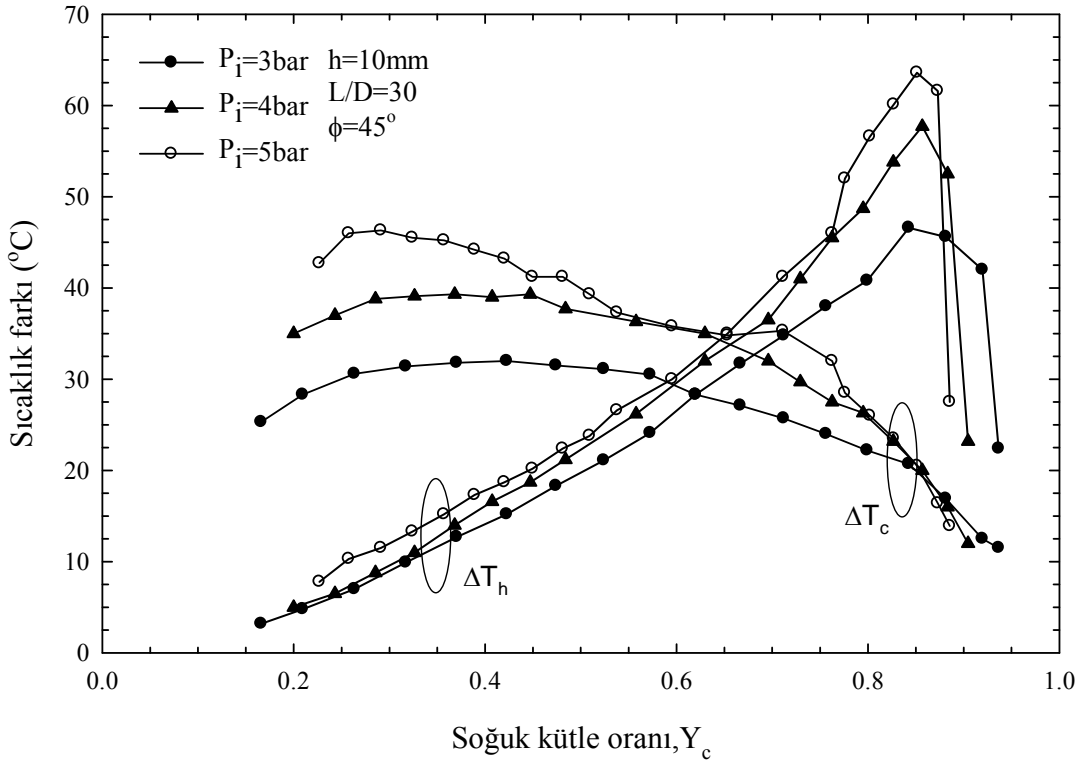
Şekil 118. $h=10\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=90^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



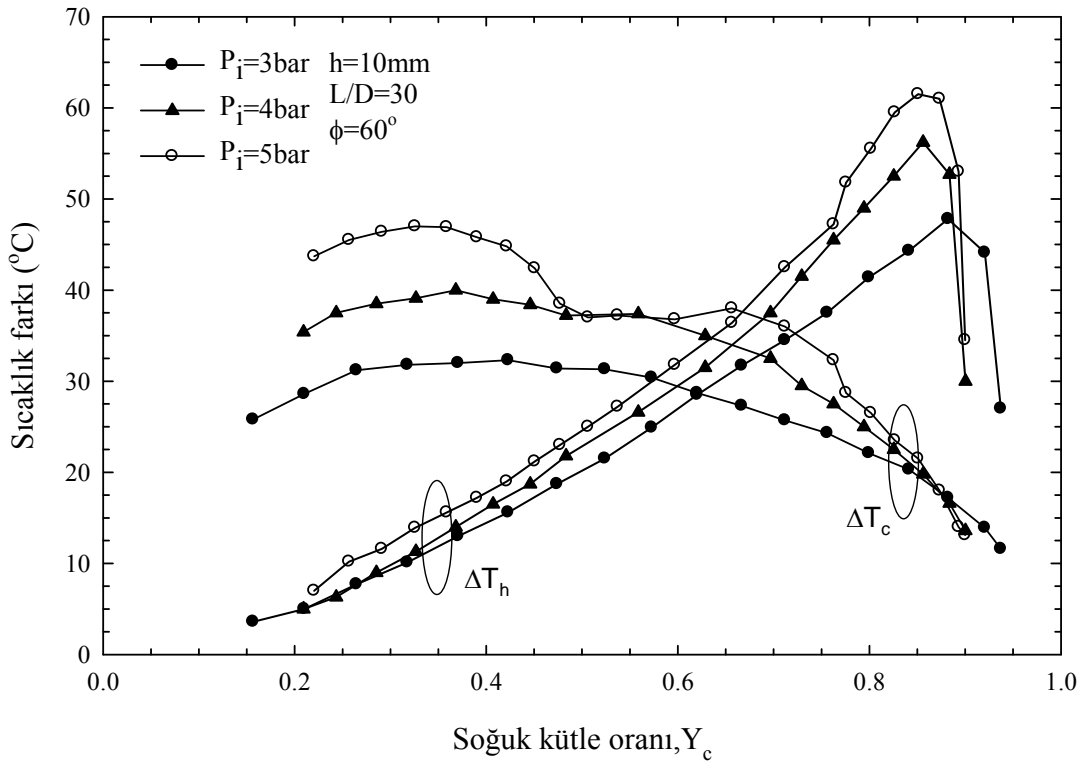
Şekil 119. $h=10\text{mm}$, $L/D=40$ ve $\phi=180^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



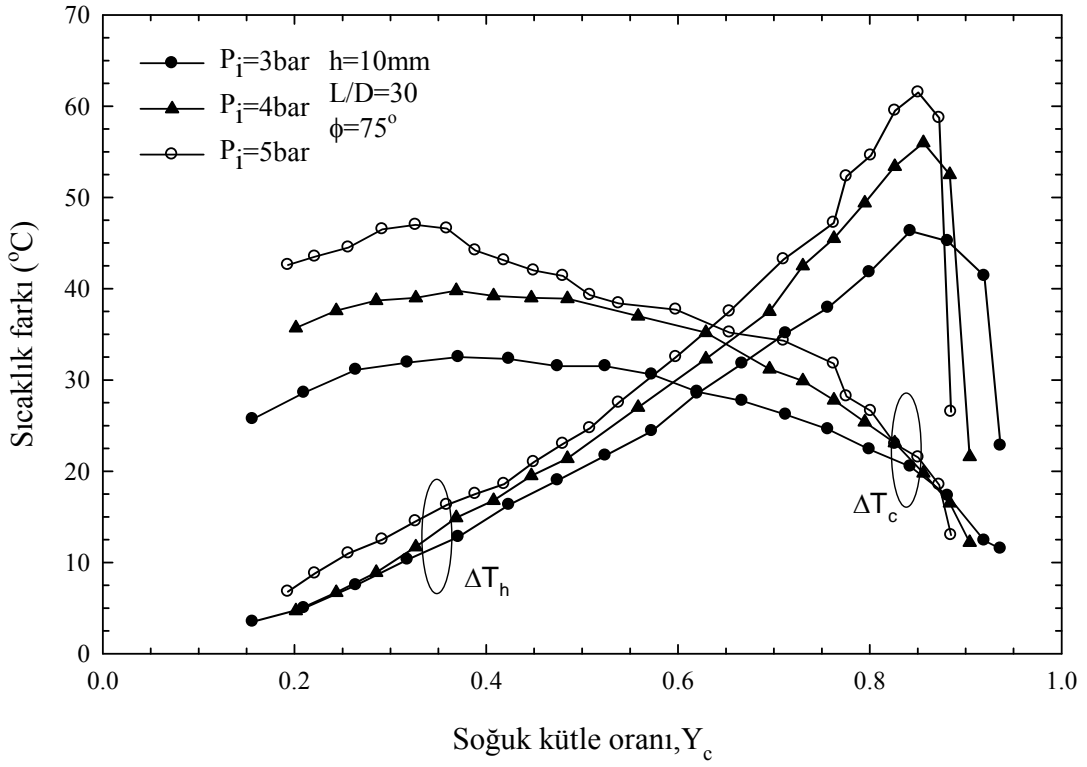
Şekil 120. $h=10\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=30^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



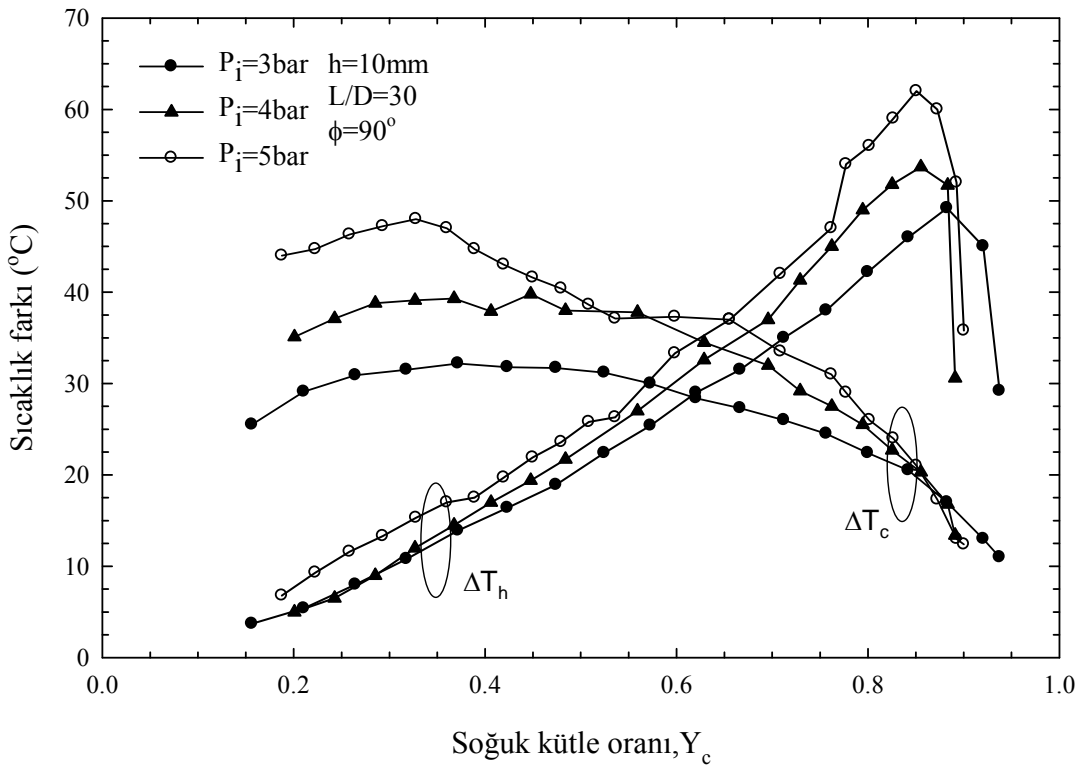
Şekil 121. $h=10$ mm, $L/D=30$ ve $\phi=45^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



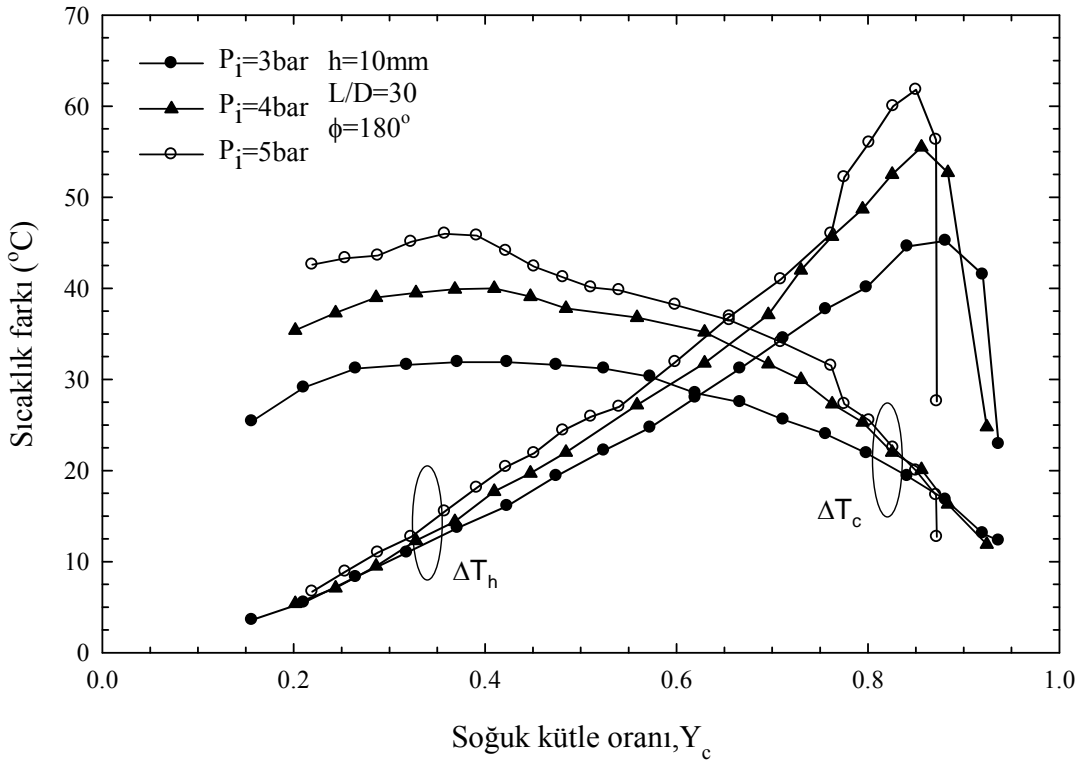
Şekil 122. $h=10$ mm, $L/D=30$ ve $\phi=60^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



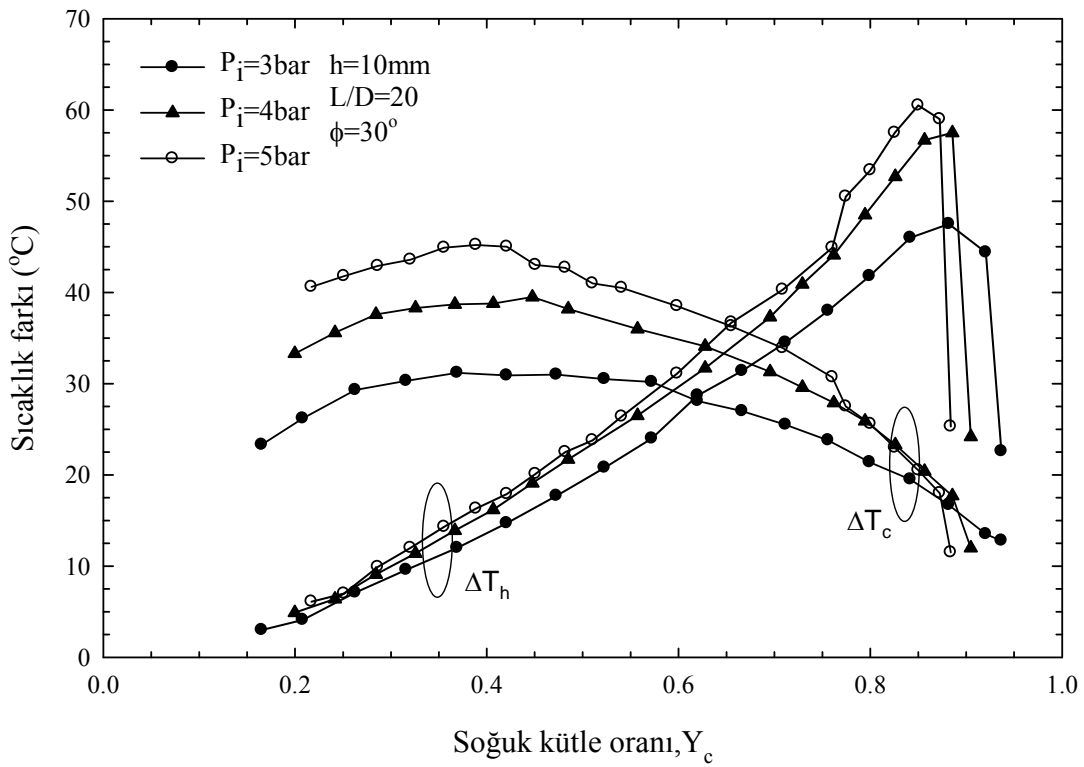
Şekil 123. $h=10\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=75^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



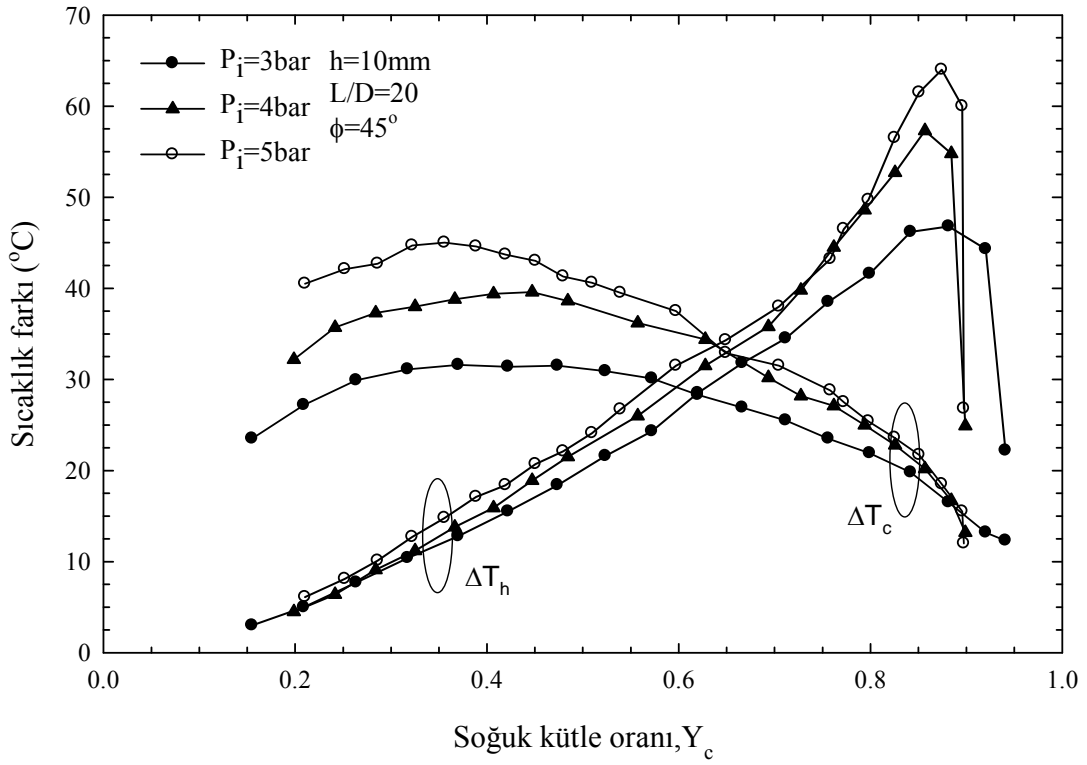
Şekil 124. $h=10\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=90^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



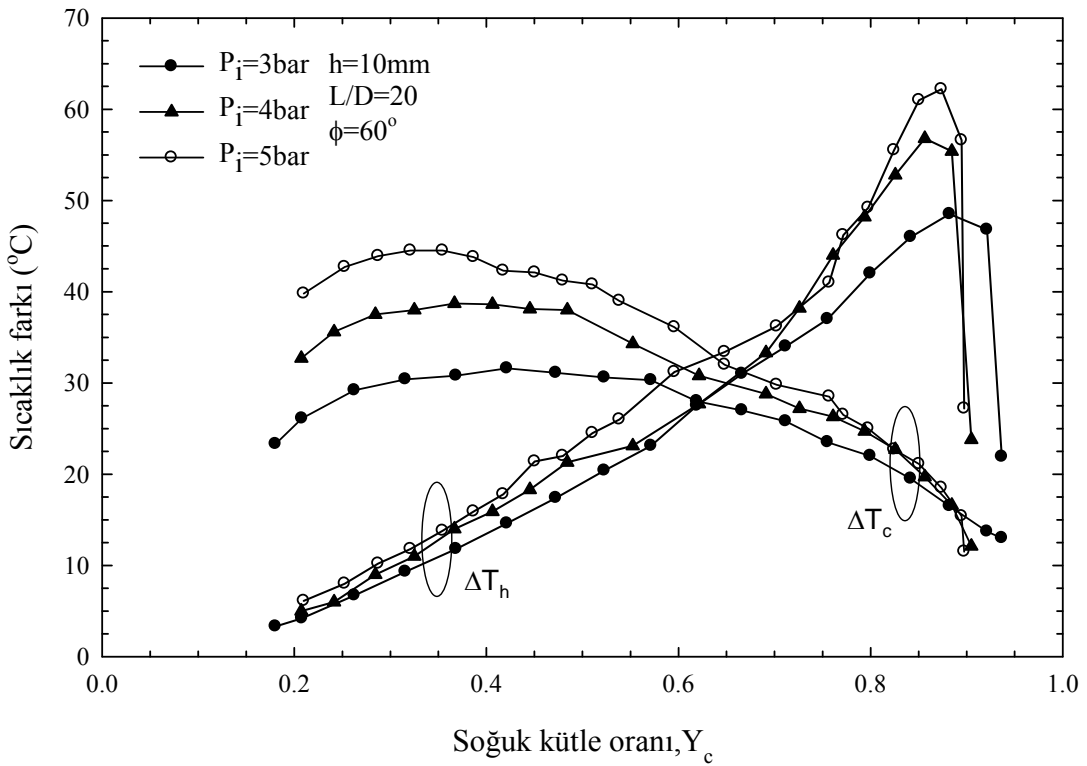
Şekil 125. $h=10\text{mm}$, $L/D=30$ ve $\phi=180^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



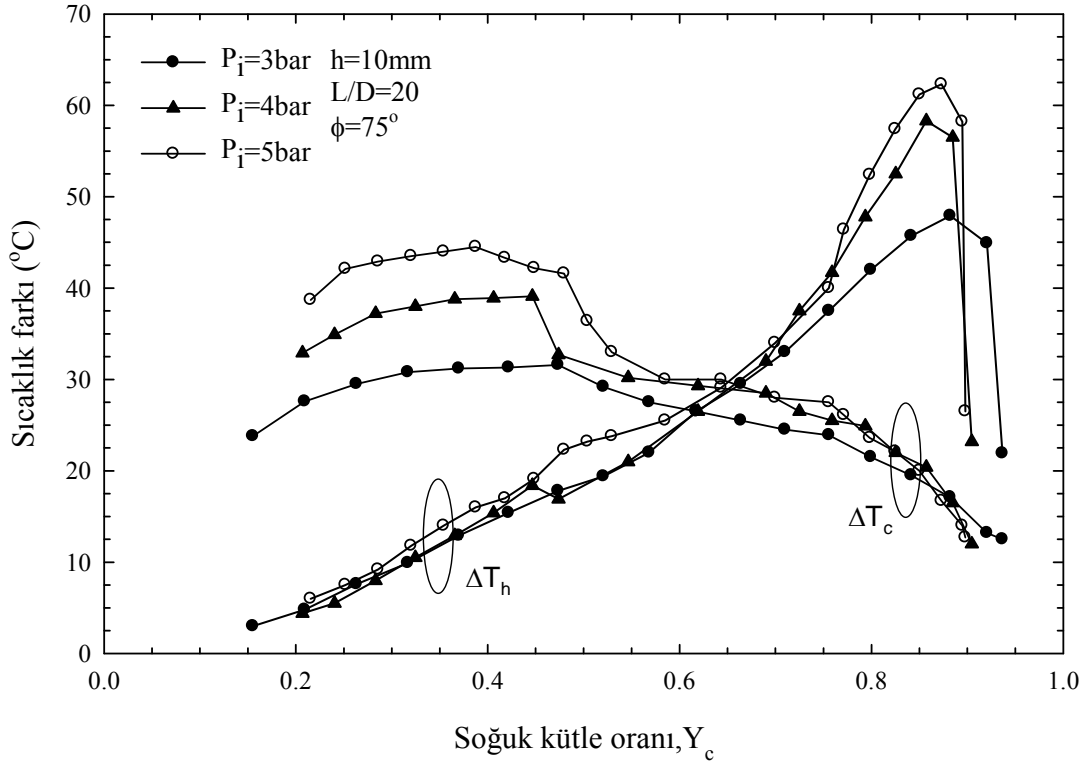
Şekil 126. $h=10\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=30^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



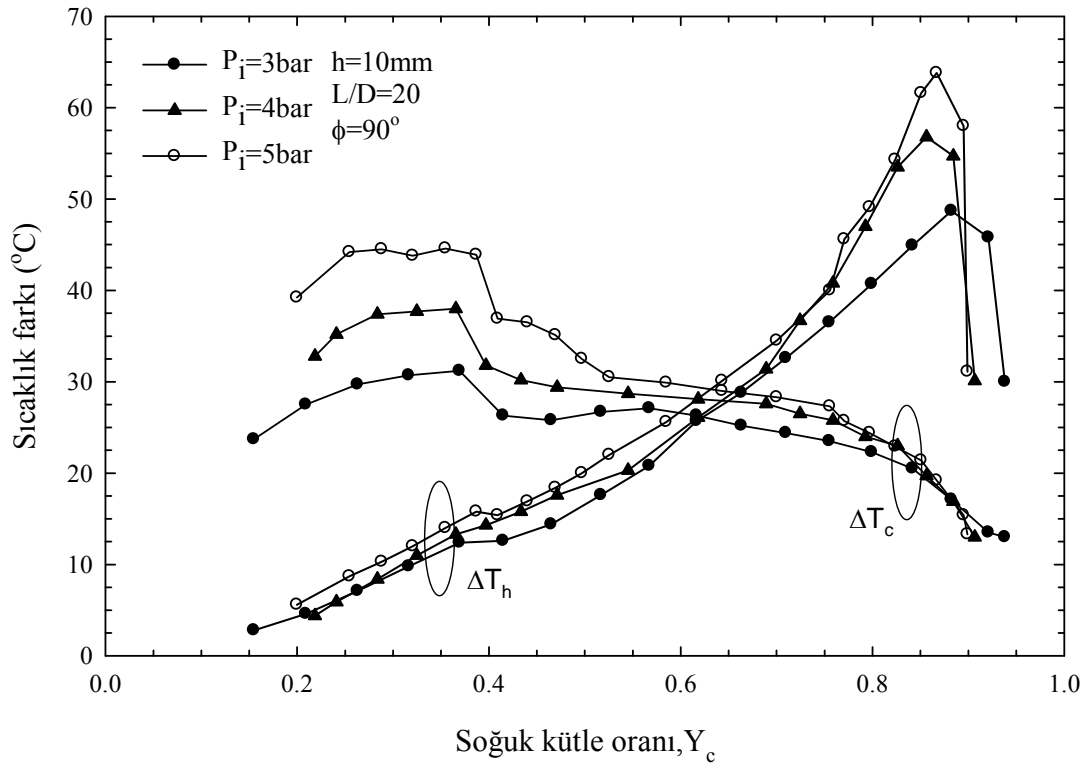
Şekil 127. $h=10\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=45^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



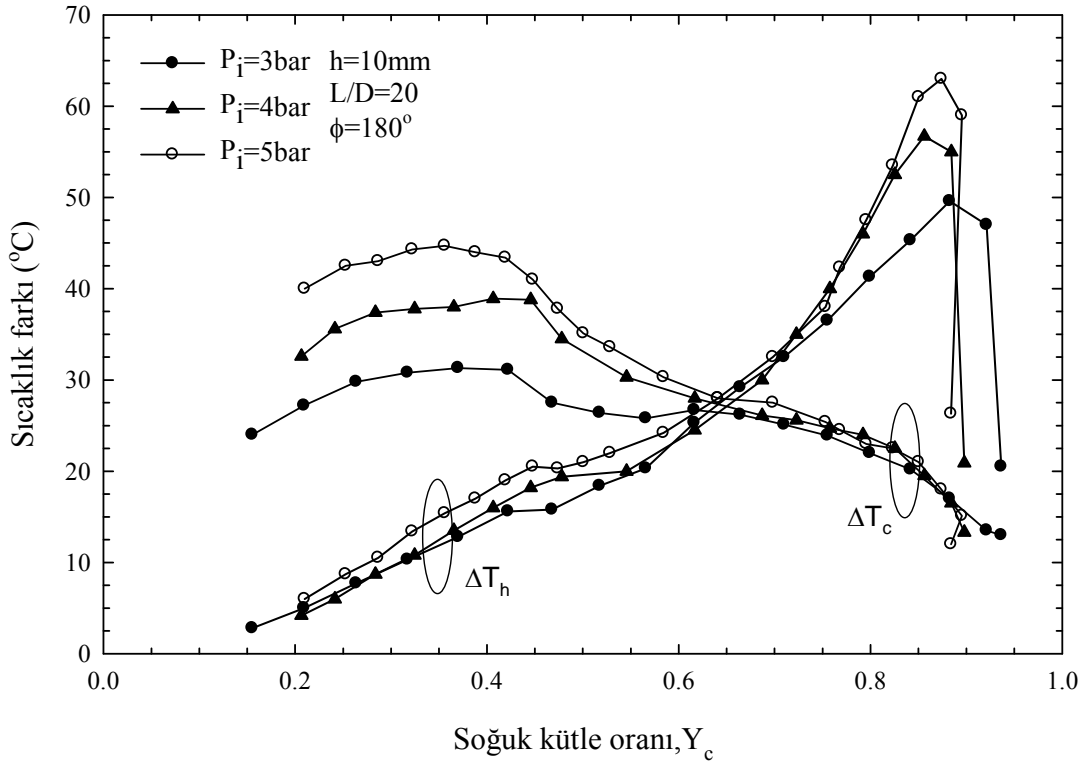
Şekil 128. $h=10\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=60^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



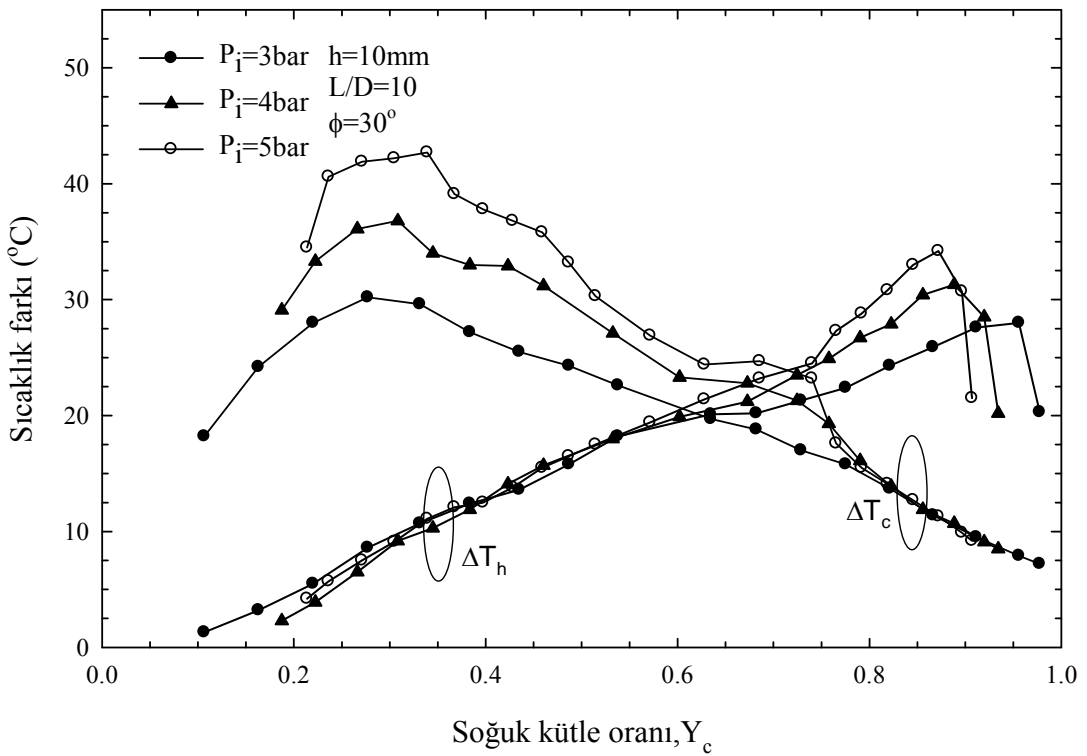
Şekil 129. $h=10\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=75^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



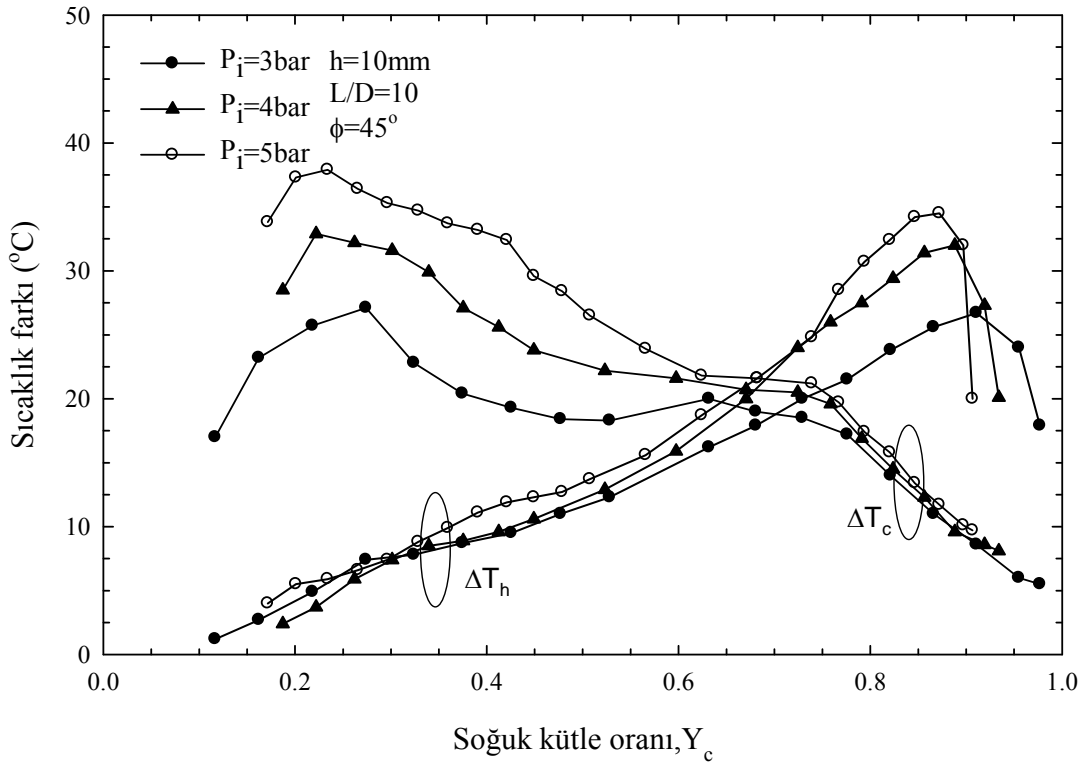
Şekil 130. $h=10\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=90^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



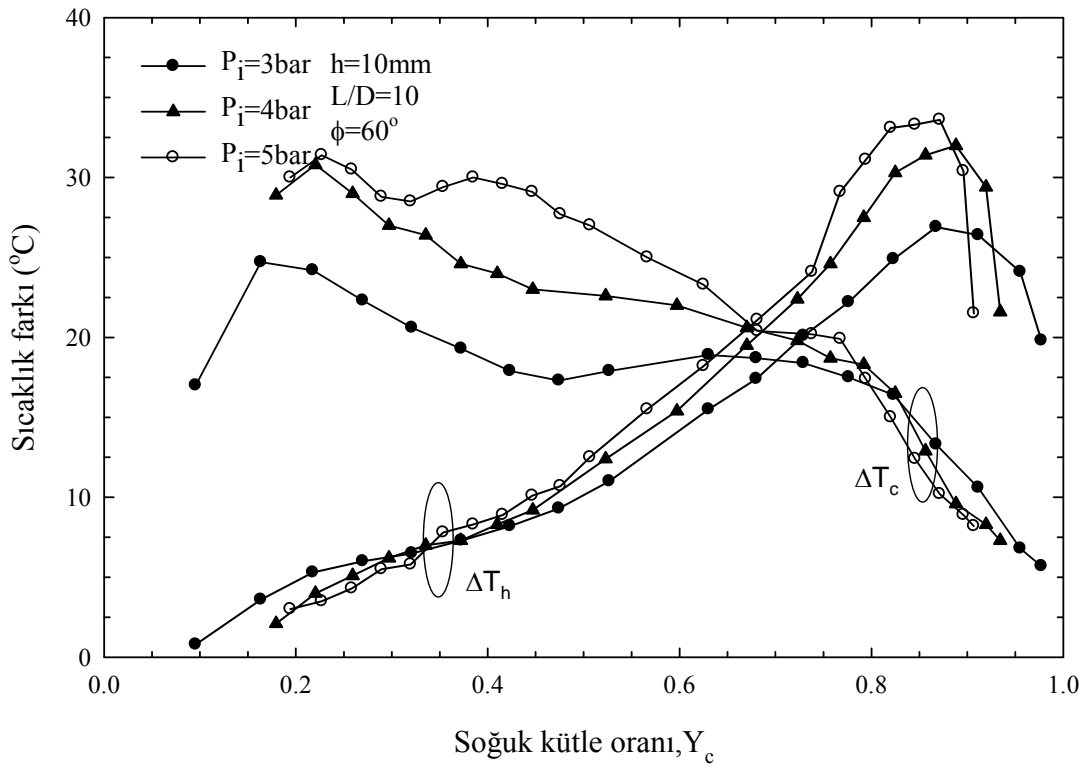
Şekil 131. $h=10\text{mm}$, $L/D=20$ ve $\phi=180^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



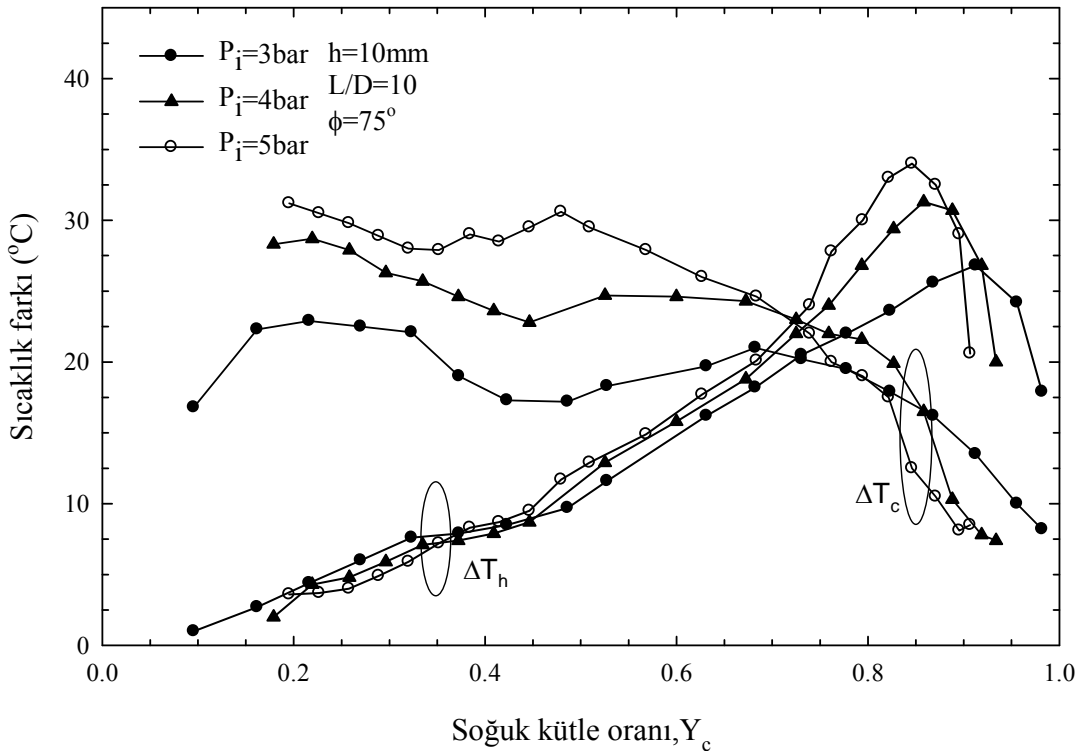
Şekil 132. $h=10\text{mm}$, $L/D=10$ ve $\phi=30^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



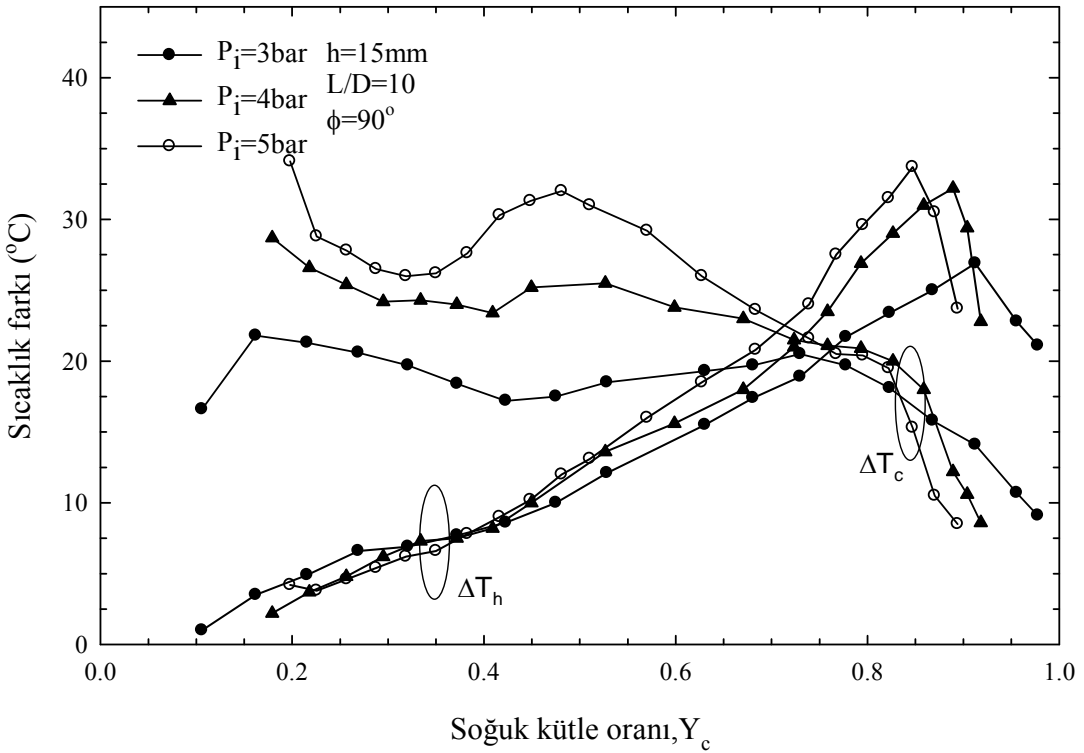
Şekil 133. $h=10$ mm, $L/D=10$ ve $\phi=45^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



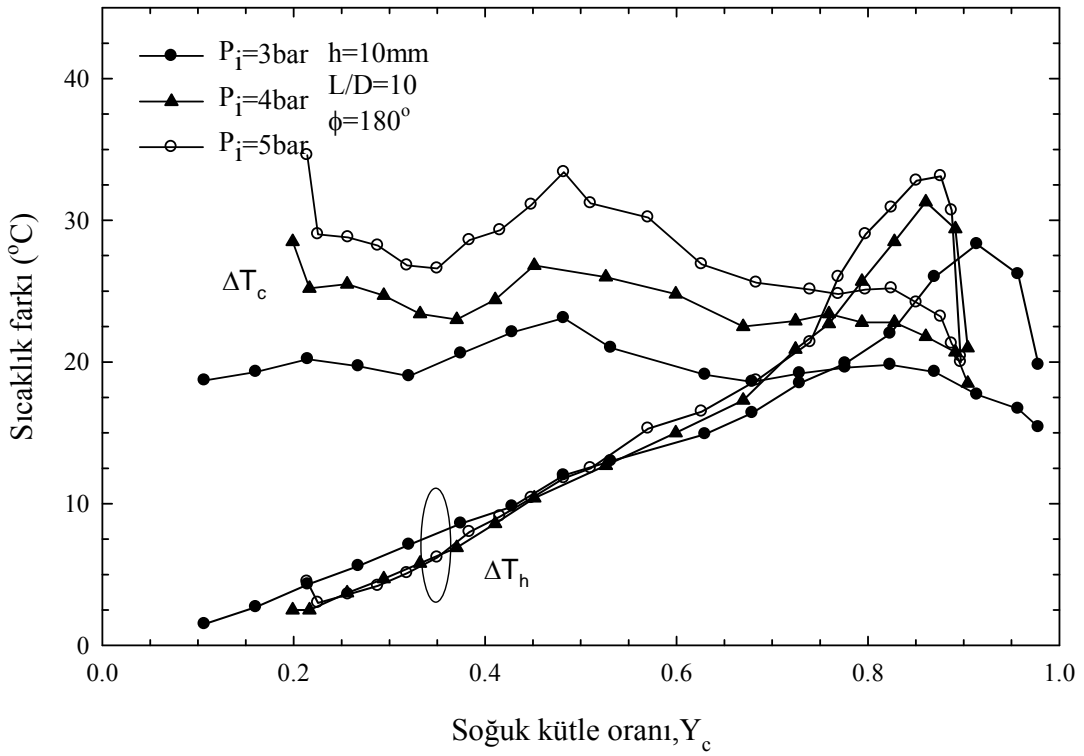
Şekil 134. $h=10$ mm, $L/D=10$ ve $\phi=60^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



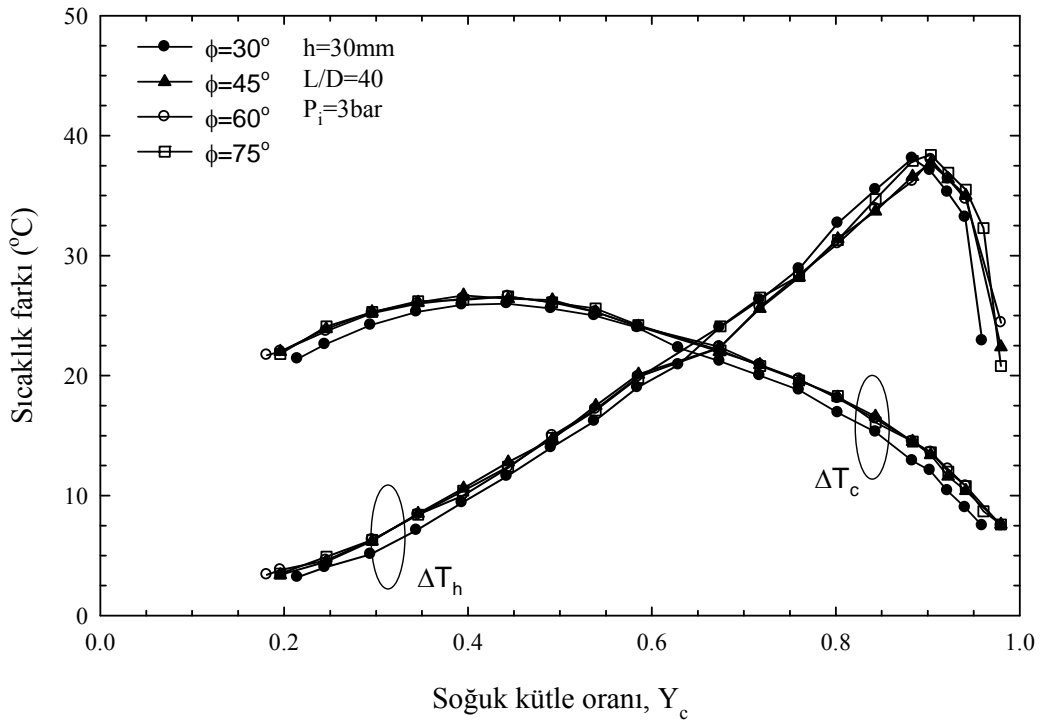
Şekil 135. $h=10\text{mm}$, $L/D=10$ ve $\phi=75^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



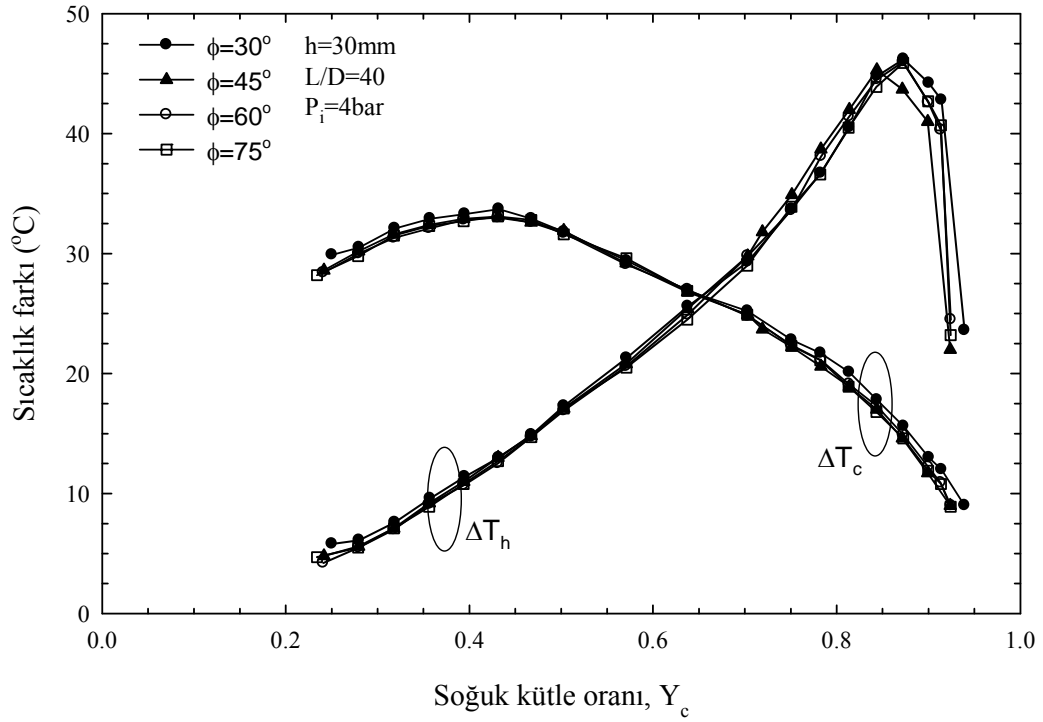
Şekil 136. $h=10\text{mm}$, $L/D=10$ ve $\phi=90^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



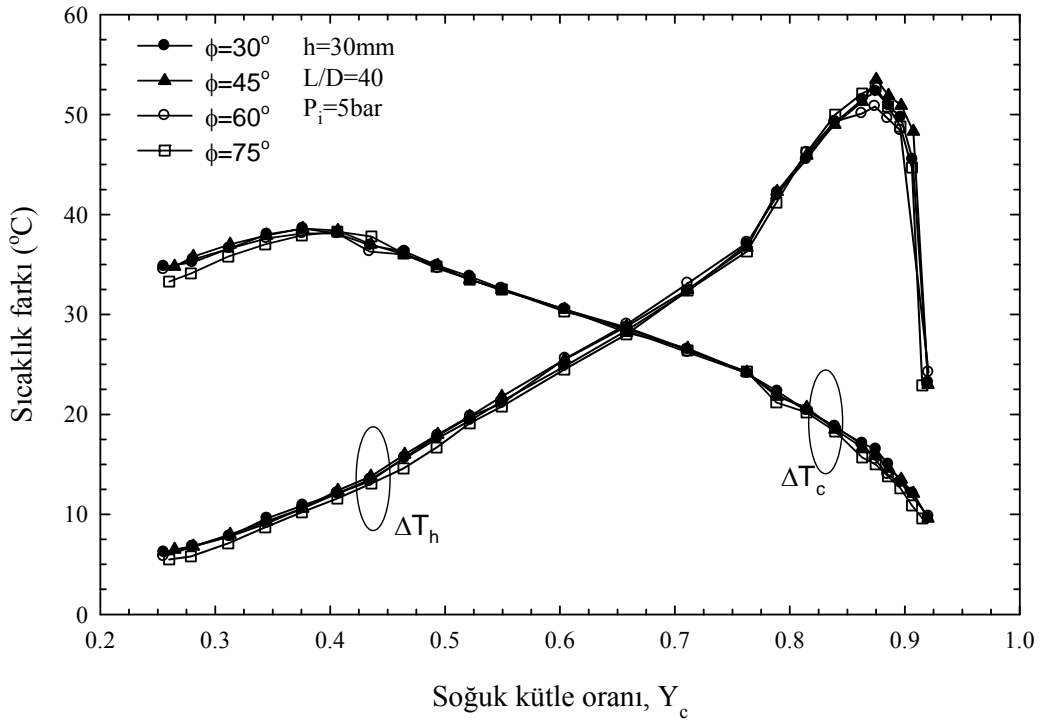
Şekil 137. $h=10\text{mm}$, $L/D=10$ ve $\phi=180^\circ$ için farklı basınçlarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



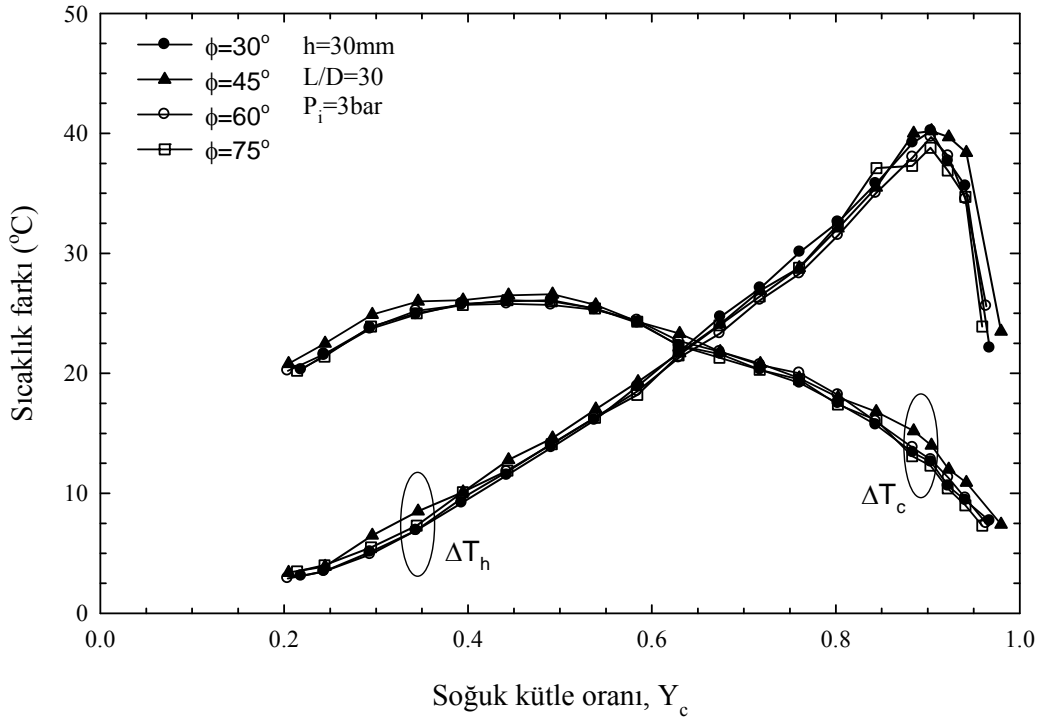
Şekil 138. $h=30\text{mm}$, $L/D=40$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



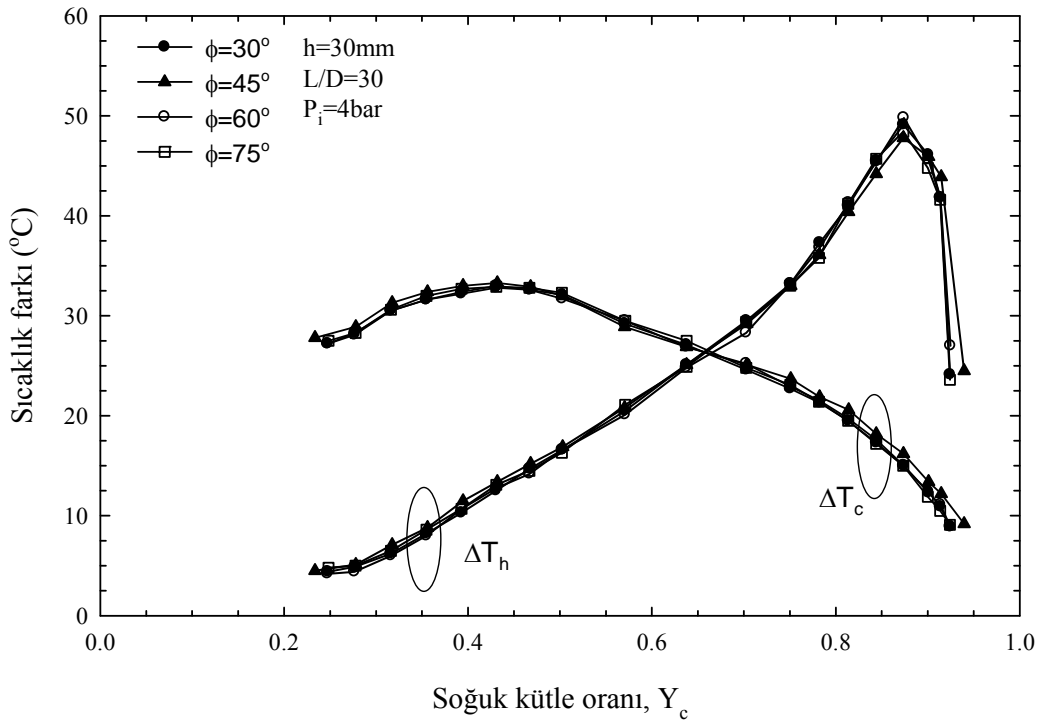
Şekil 139. $h=30\text{mm}$, $L/D=40$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



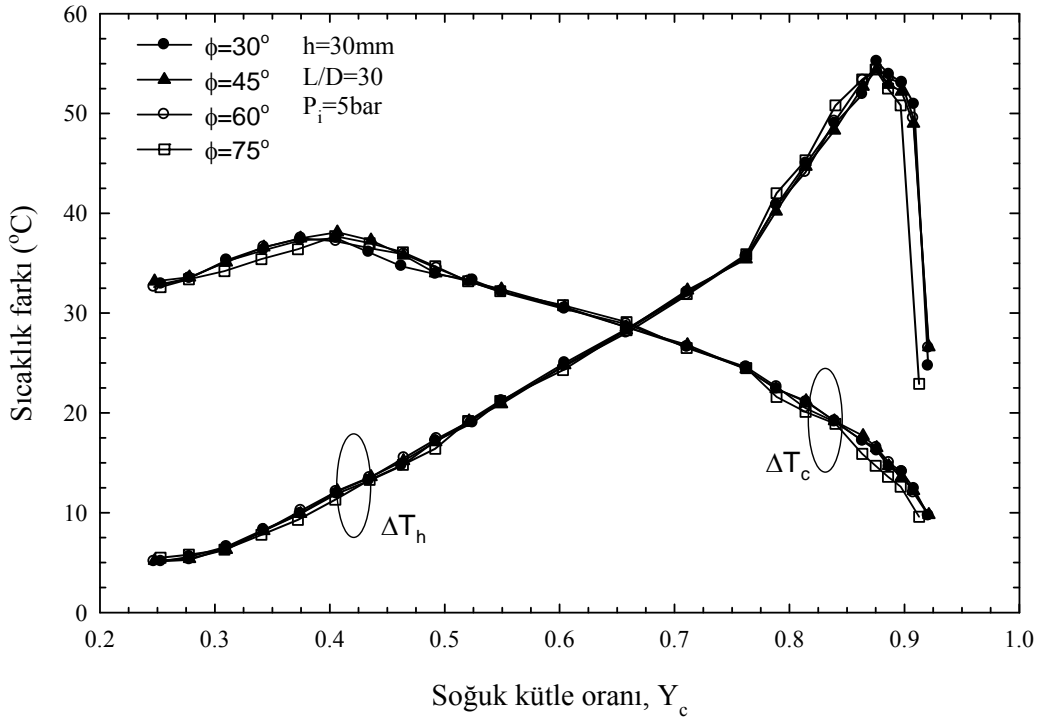
Şekil 140. $h=30\text{mm}$, $L/D=40$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



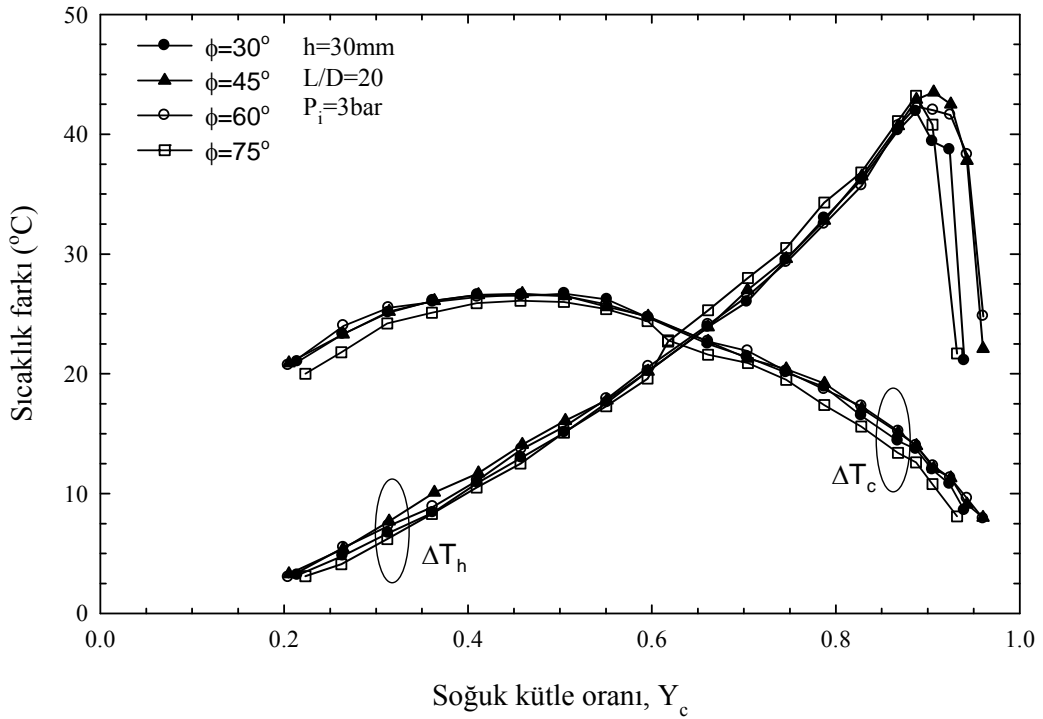
Şekil 141. $h=30\text{mm}$, $L/D=30$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



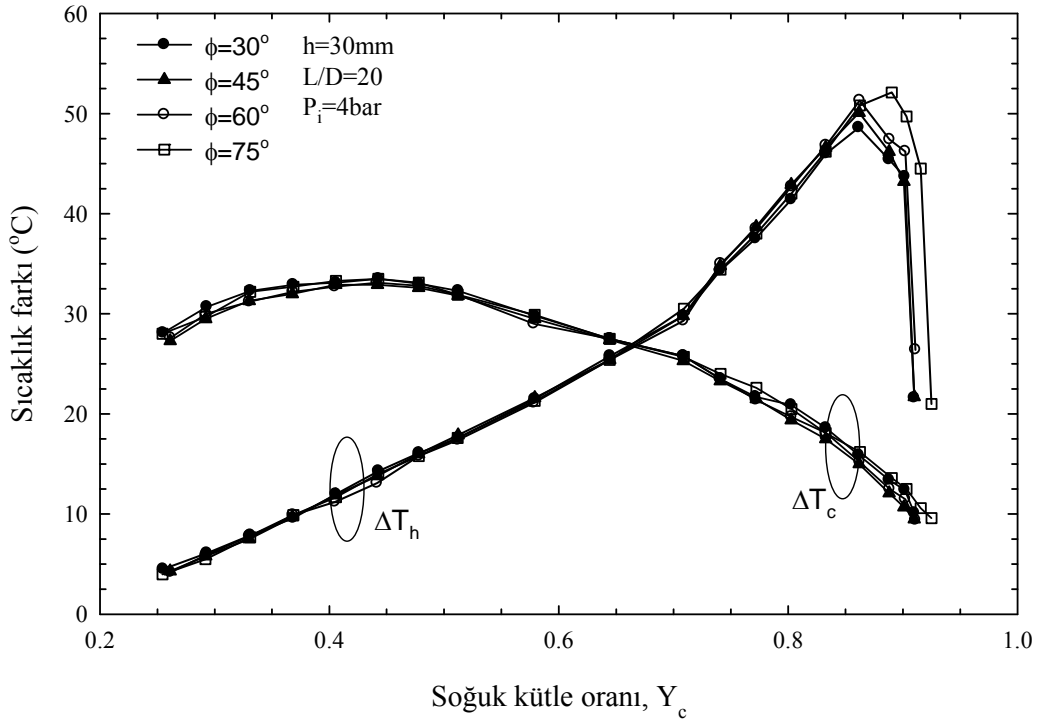
Şekil 142. $h=30\text{mm}$, $L/D=30$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



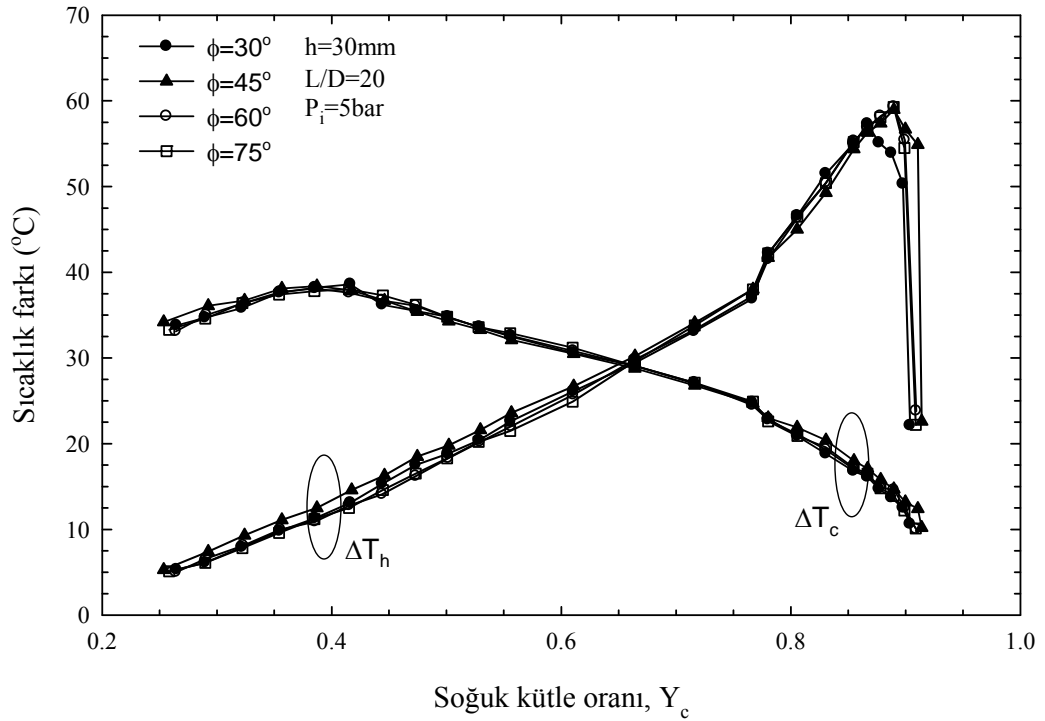
Şekil 143. $h=30\text{mm}$, $L/D=30$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



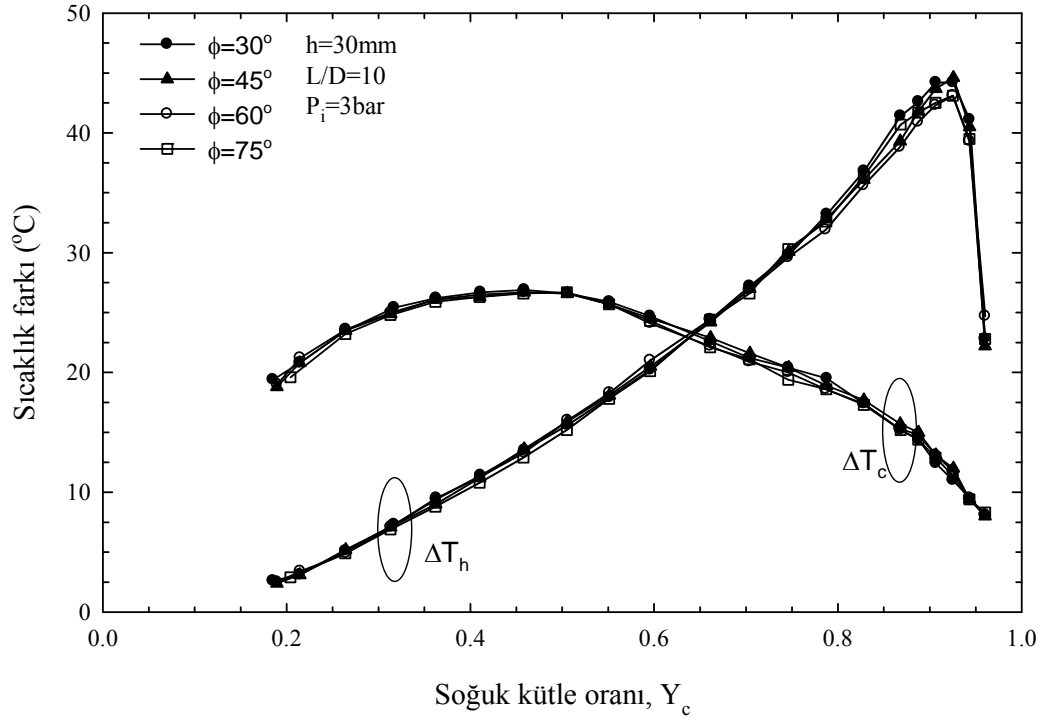
Şekil 144. $h=30\text{mm}$, $L/D=20$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



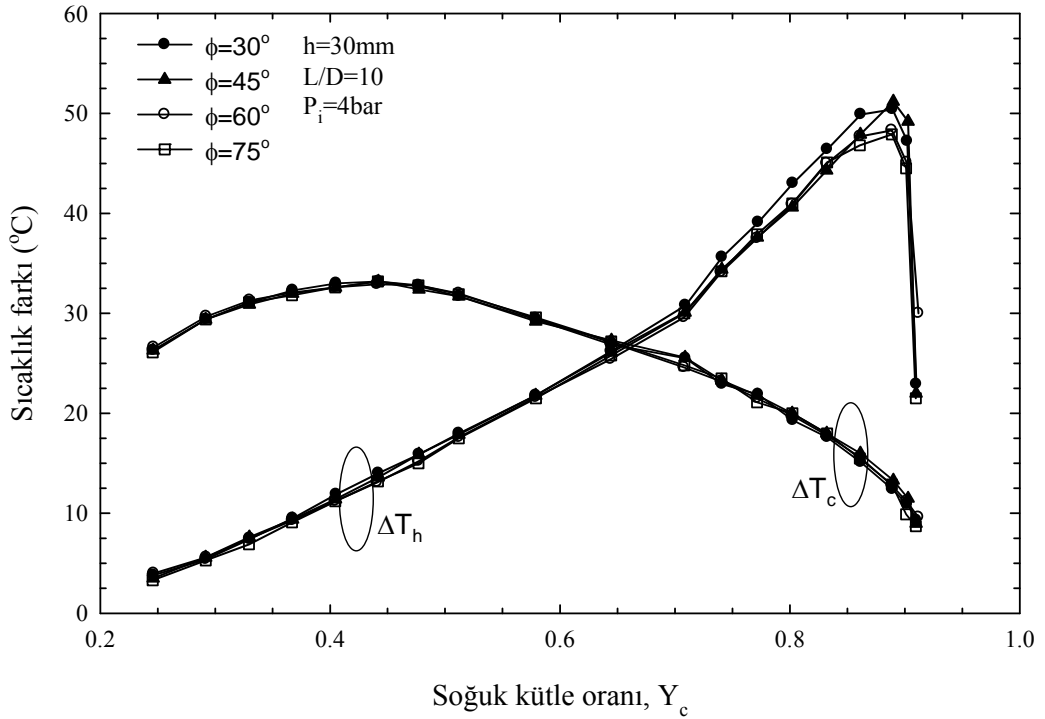
Şekil 145. $h=30\text{mm}$, $L/D=20$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



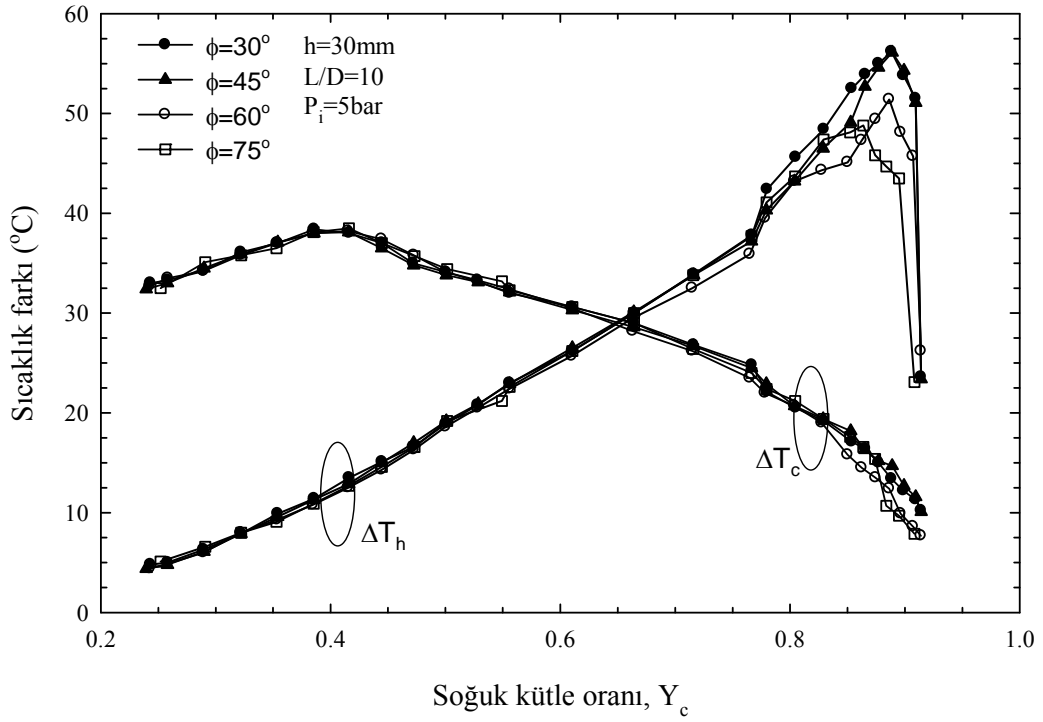
Şekil 146. $h=30\text{mm}$, $L/D=20$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



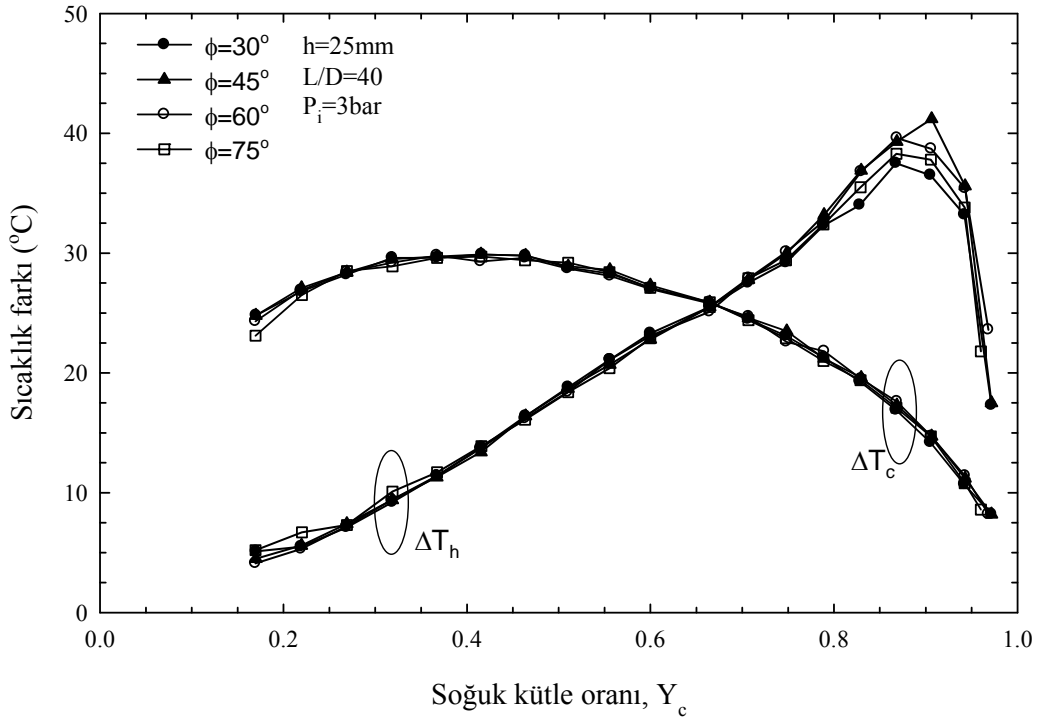
Şekil 147. h=30mm, L/D=10 ve P₁=3bar için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



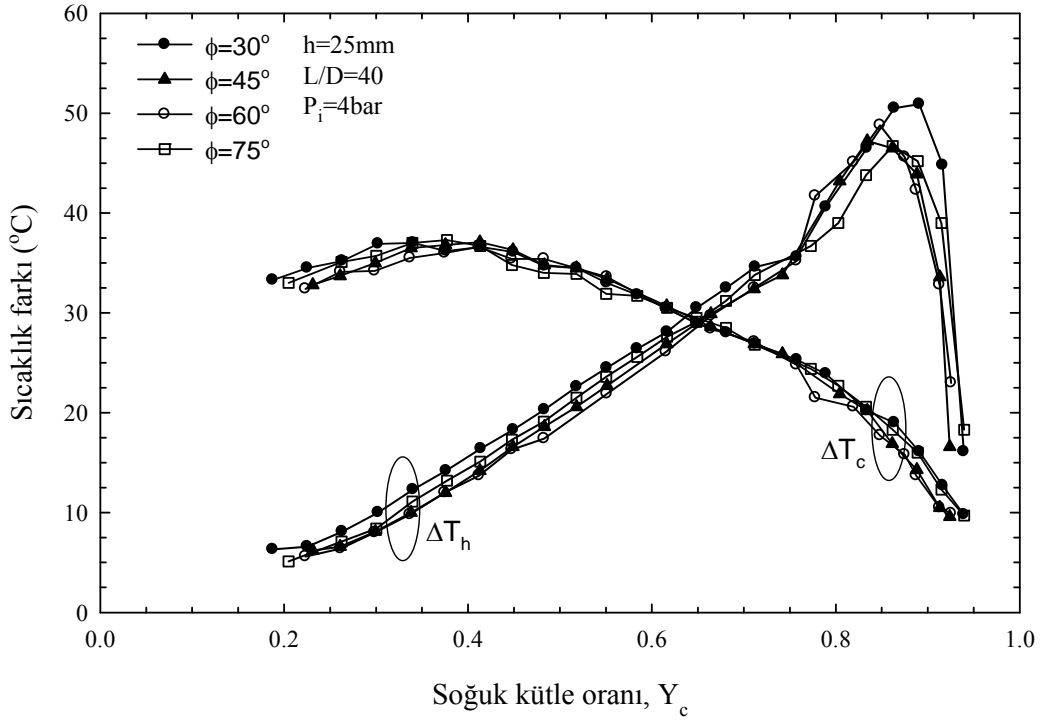
Şekil 148. h=30mm, L/D=10 ve P₁=4bar için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



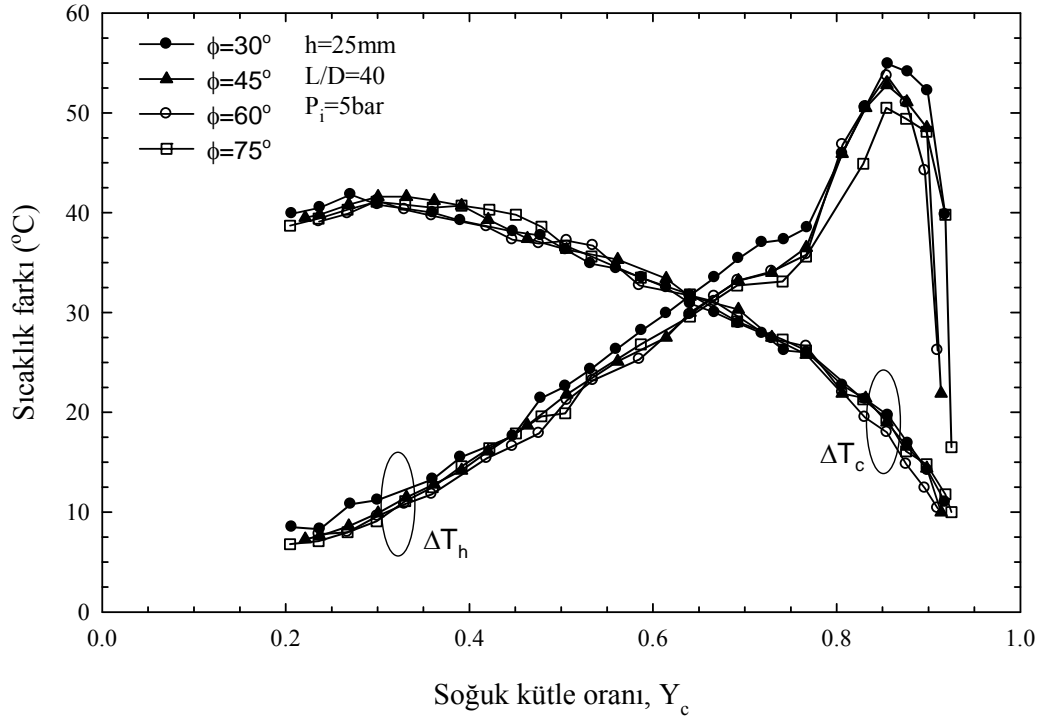
Şekil 149. $h=30\text{mm}$, $L/D=10$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



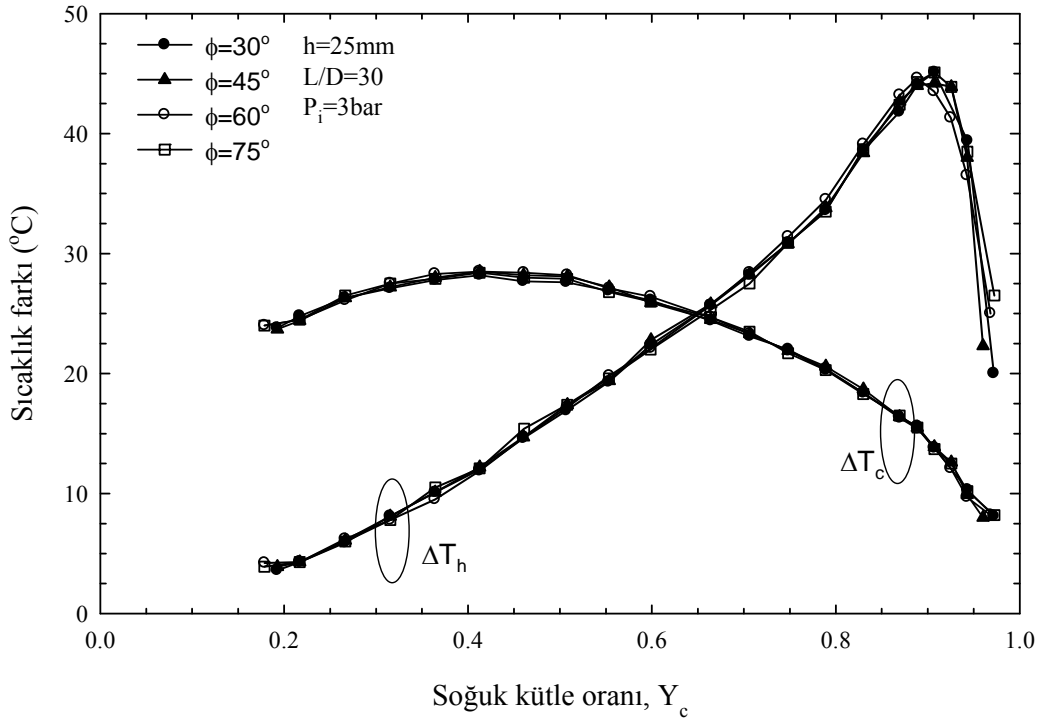
Şekil 150. $h=25\text{mm}$, $L/D=40$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



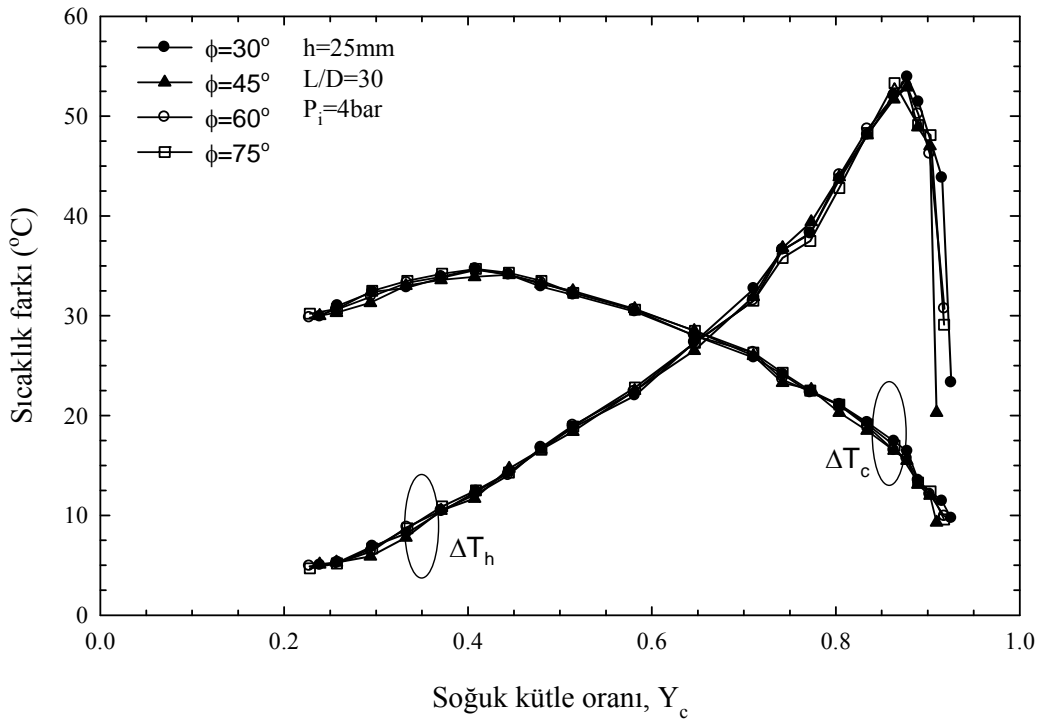
Şekil 151. $h=25\text{mm}$, $L/D=40$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



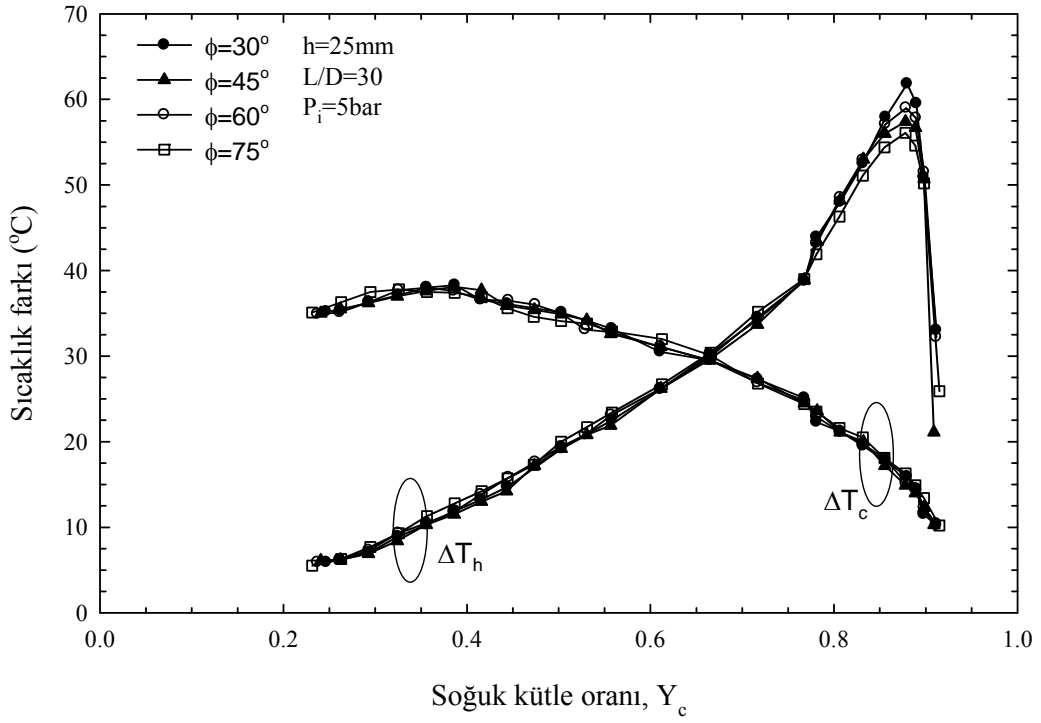
Şekil 152. $h=25\text{mm}$, $L/D=40$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



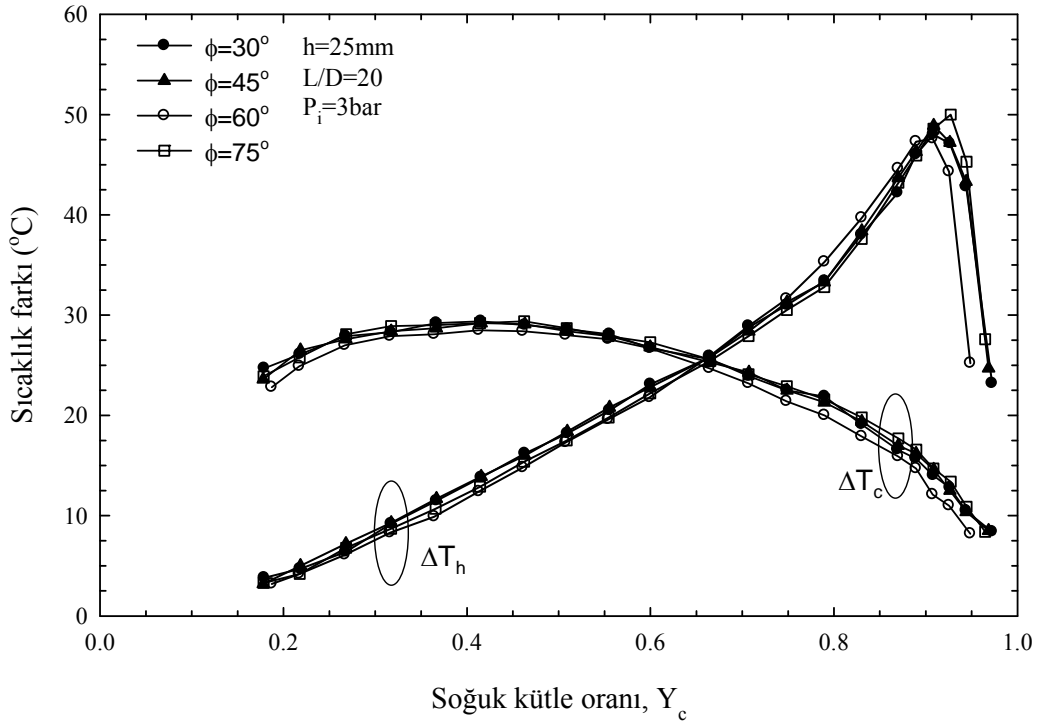
Şekil 153. $h=25\text{mm}$, $L/D=30$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



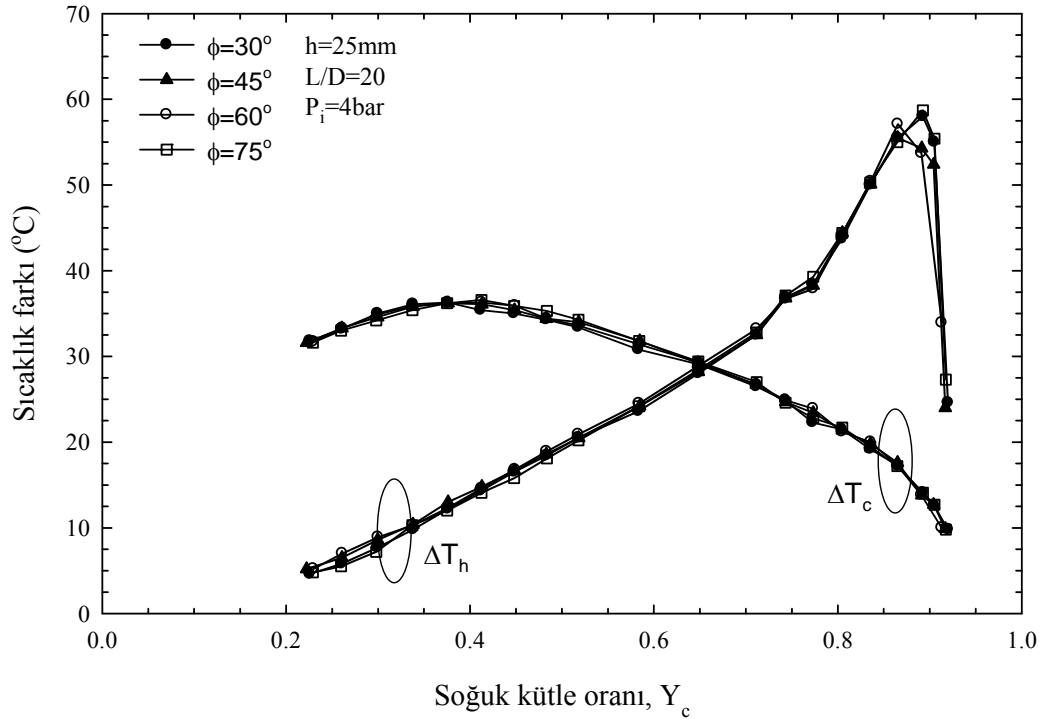
Şekil 154. $h=25\text{mm}$, $L/D=30$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



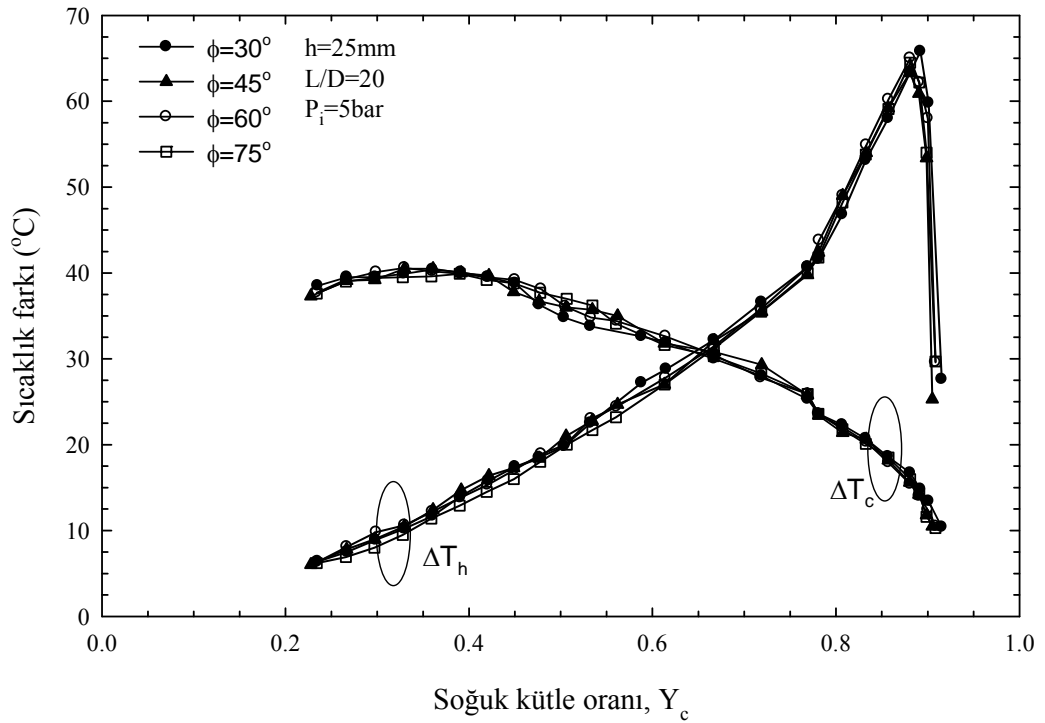
Şekil 155. $h=25\text{mm}$, $L/D=30$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



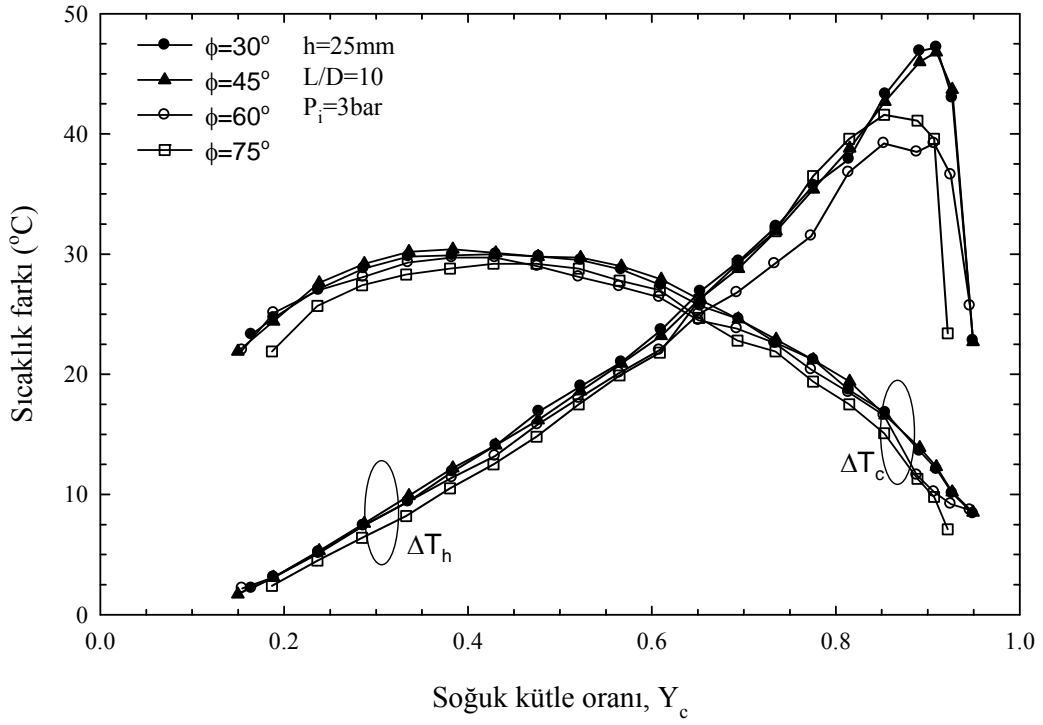
Şekil 156. $h=25\text{mm}$, $L/D=20$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



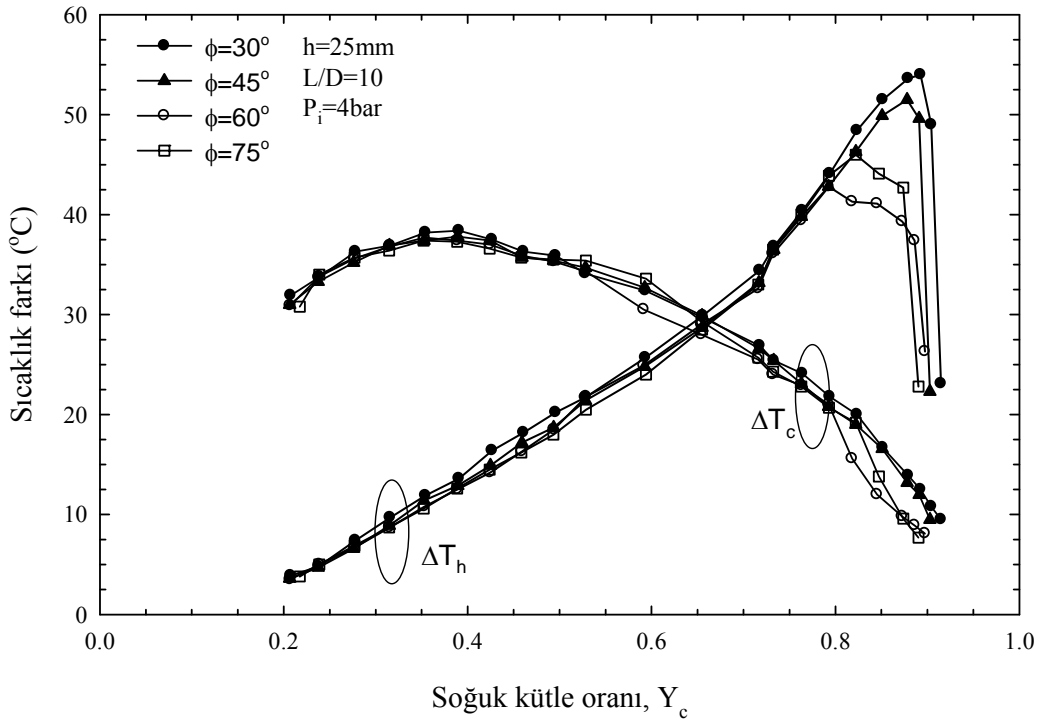
Şekil 157. $h=25\text{mm}$, $L/D=20$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



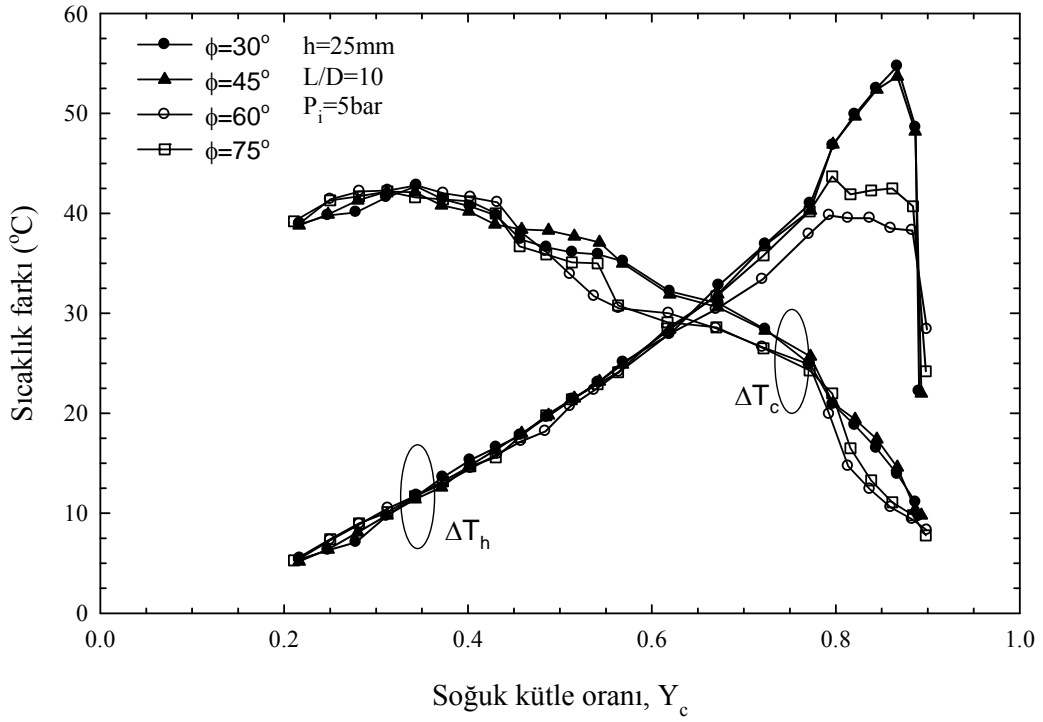
Şekil 158. $h=25\text{mm}$, $L/D=20$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



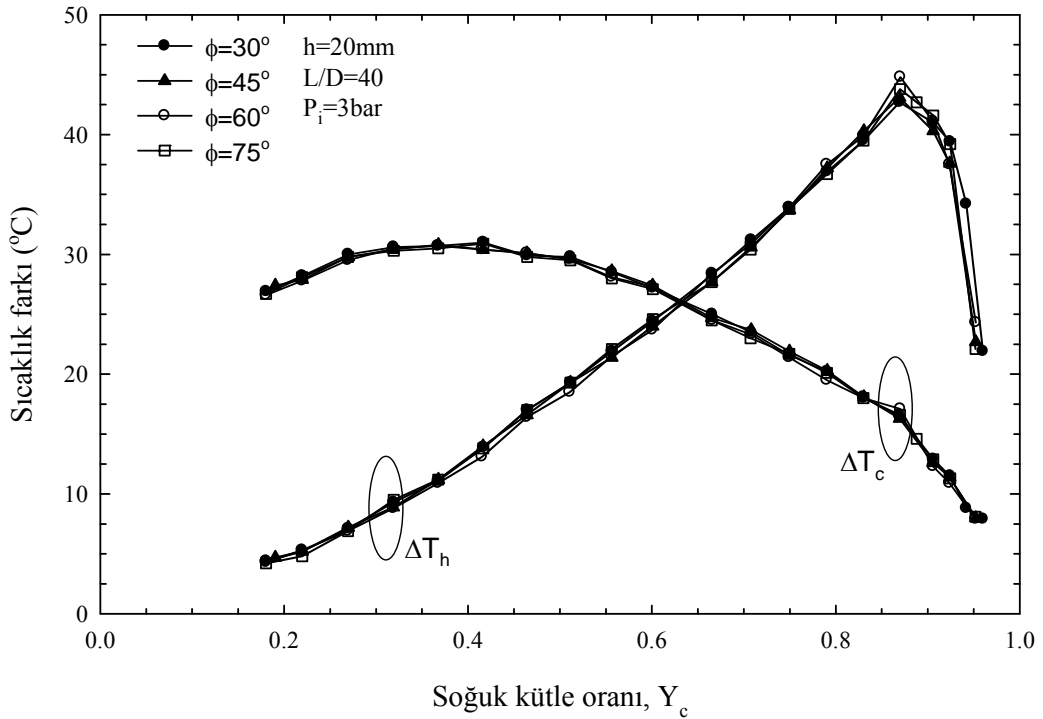
Şekil 159. $h=25\text{mm}$, $L/D=10$ ve $P_1=3\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



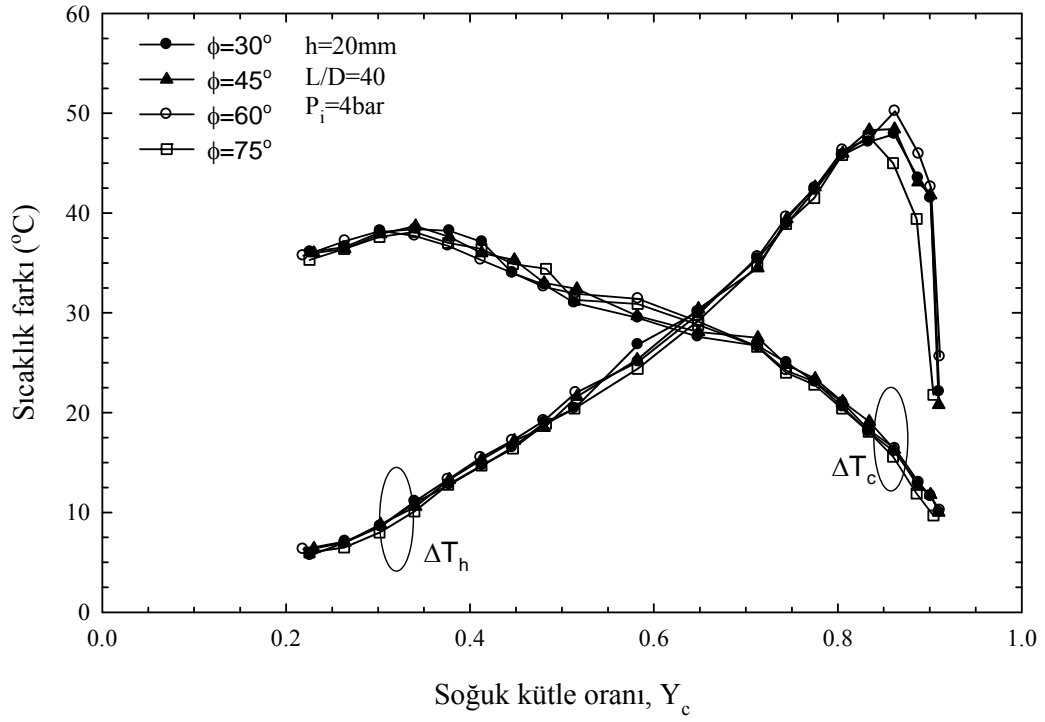
Şekil 160. $h=25\text{mm}$, $L/D=10$ ve $P_1=4\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



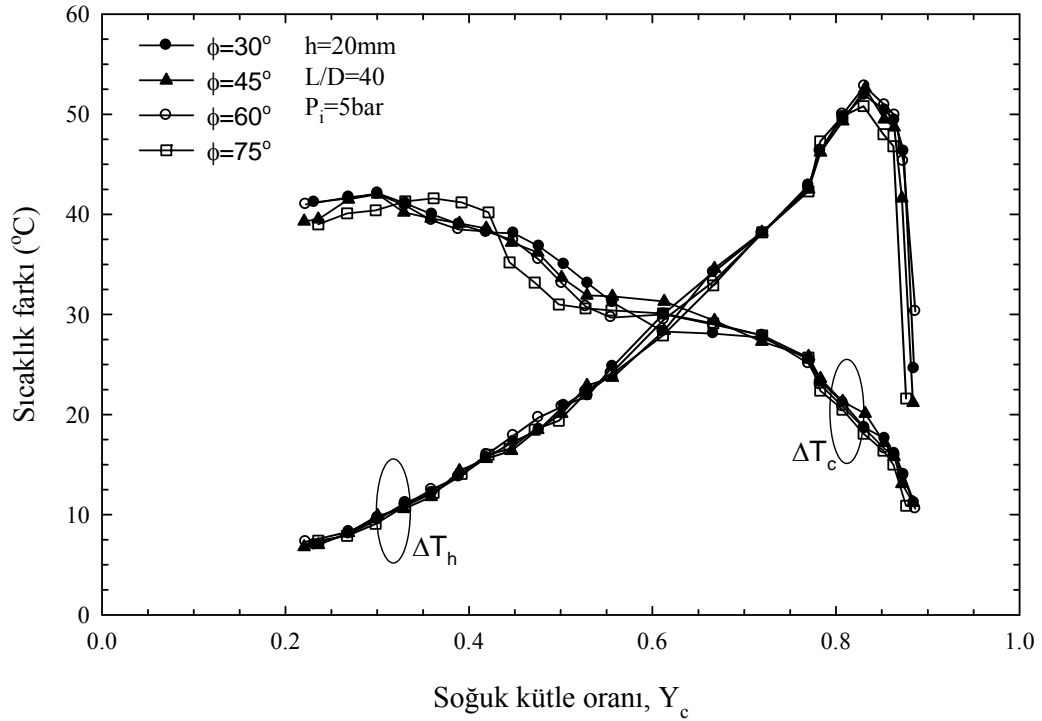
Şekil 161. h=25mm, L/D=10 ve P_i=5bar için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



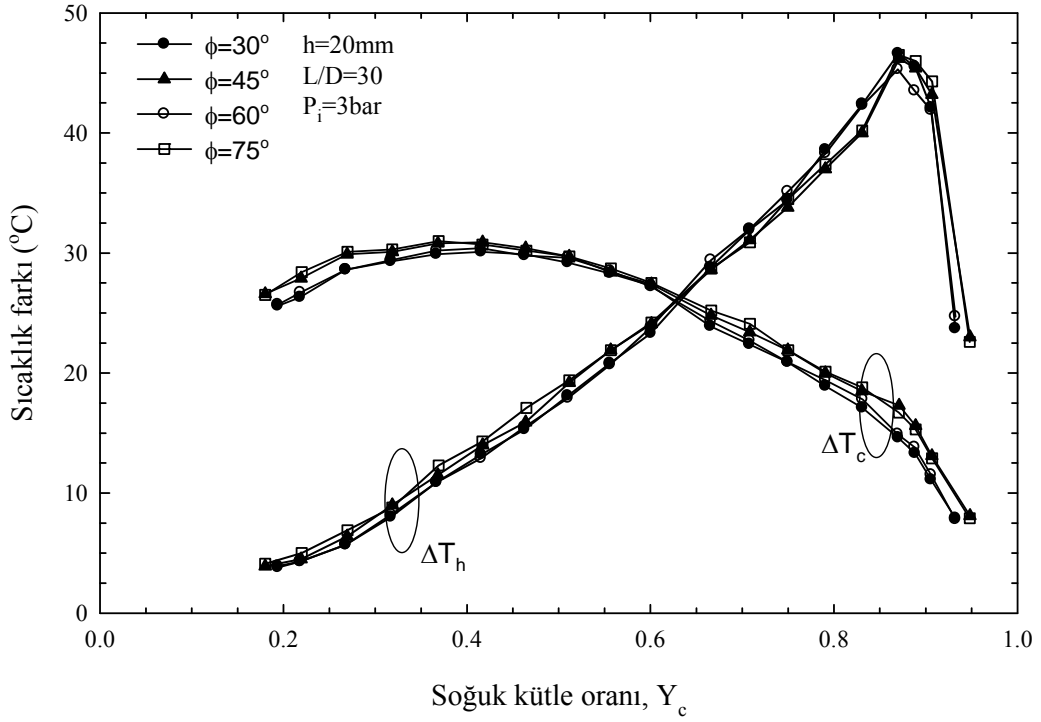
Şekil 162. h=20mm, L/D=40 ve P_i=3bar için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



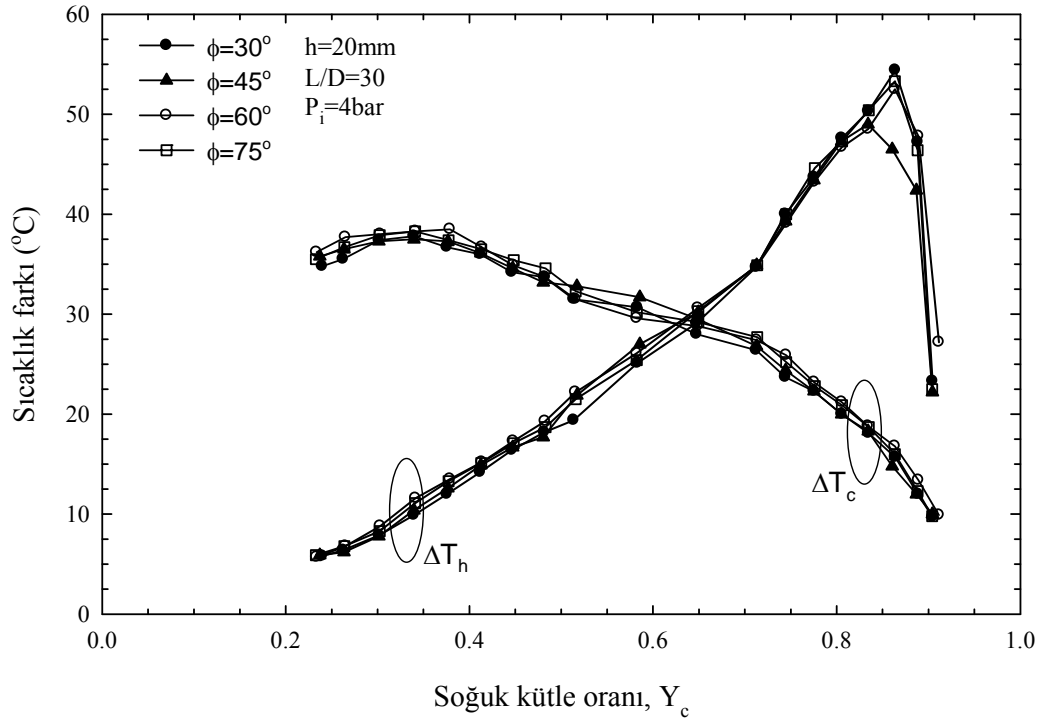
Şekil 163. $h=20\text{mm}$, $L/D=40$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



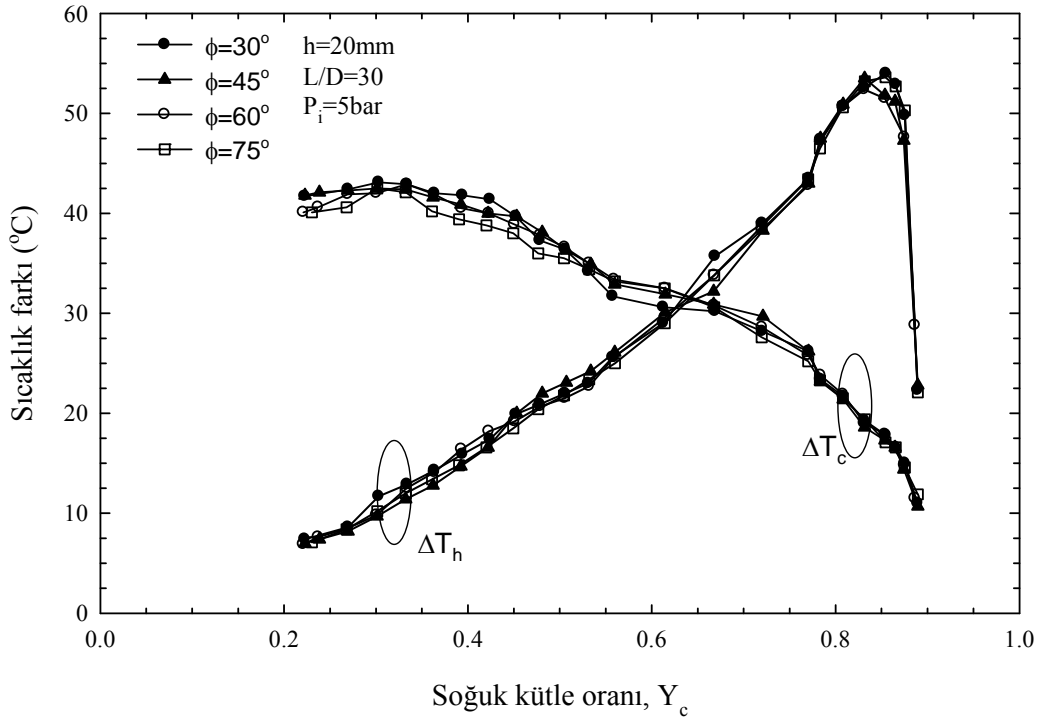
Şekil 164. $h=20\text{mm}$, $L/D=40$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



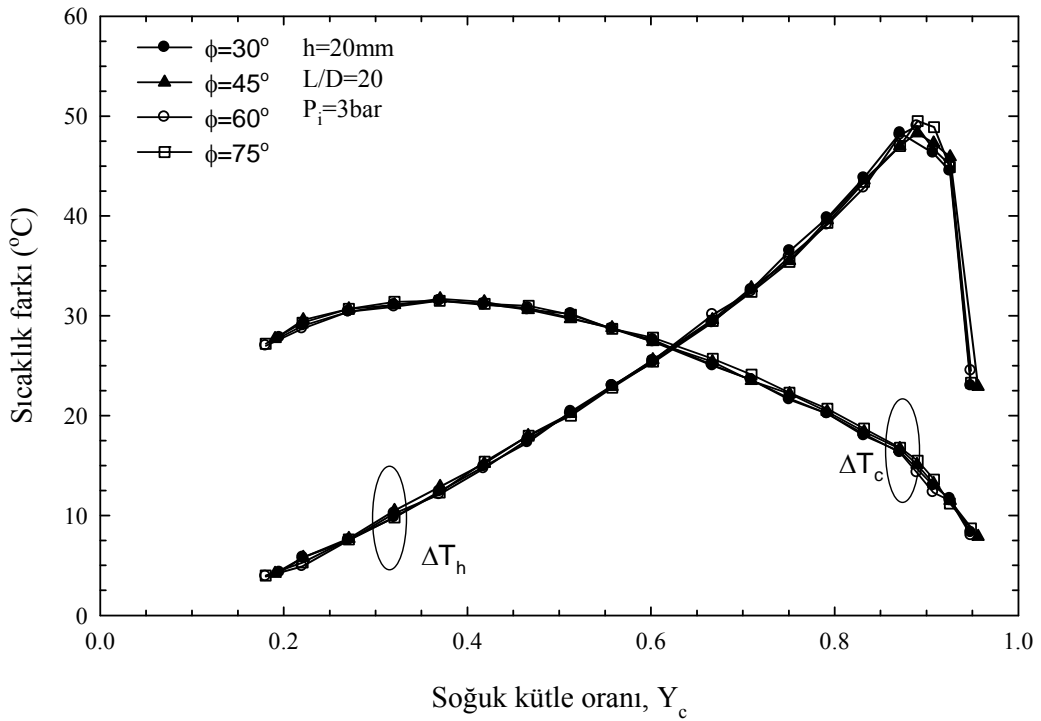
Şekil 165. $h=20\text{mm}$, $L/D=30$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



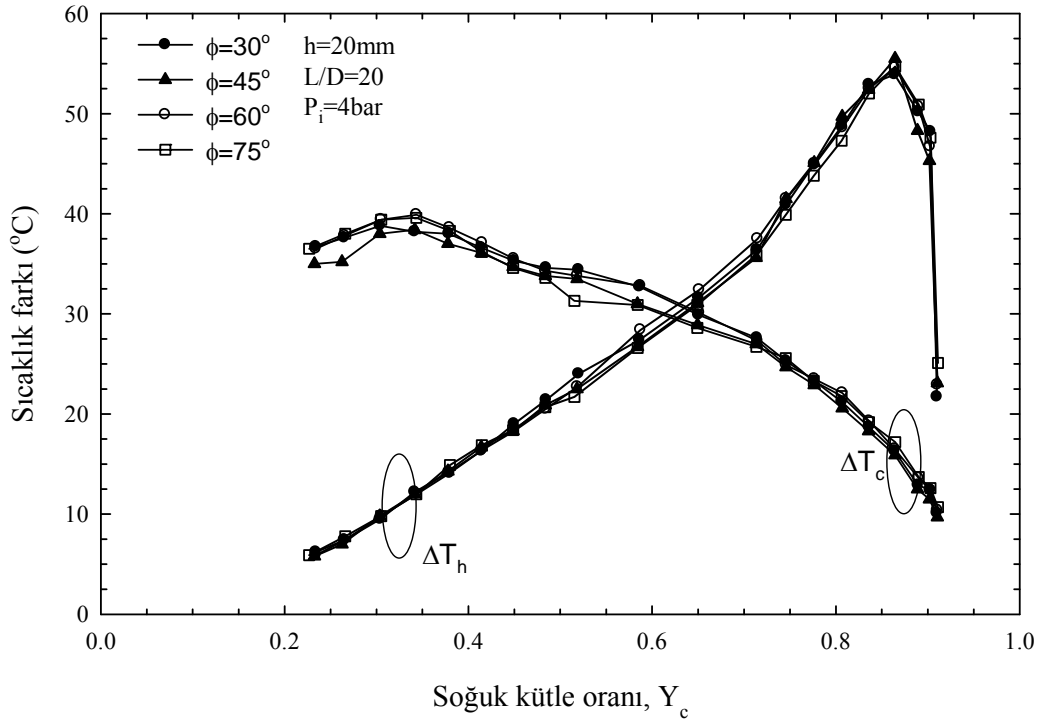
Şekil 166. $h=20\text{mm}$, $L/D=30$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



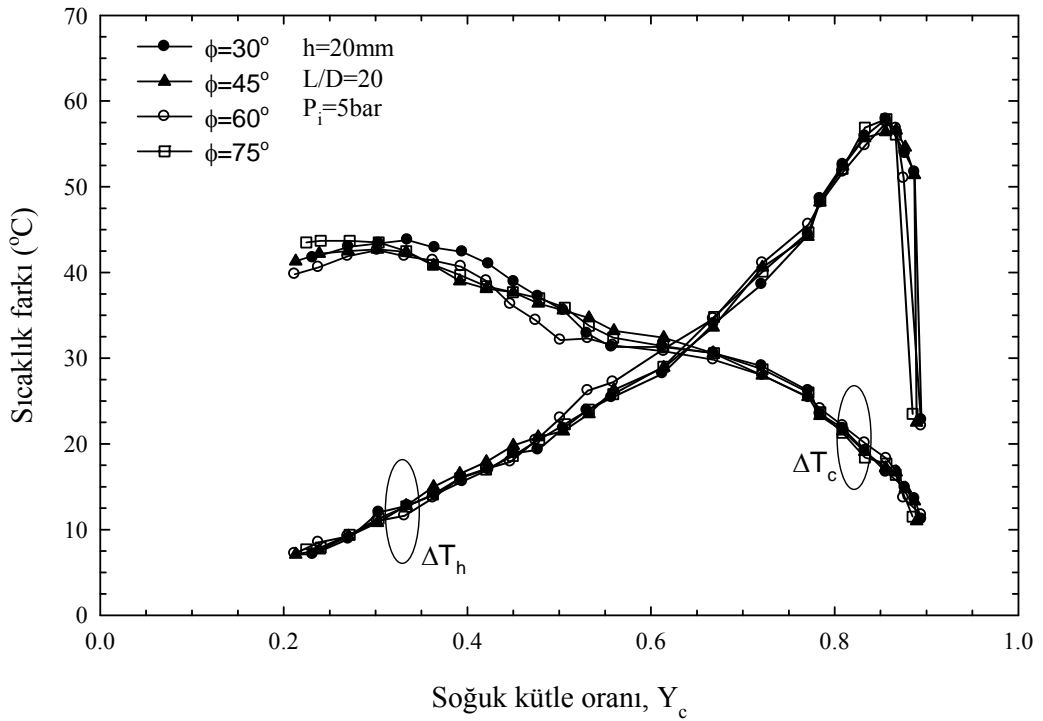
Şekil 167. $h=20\text{mm}$, $L/D=30$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



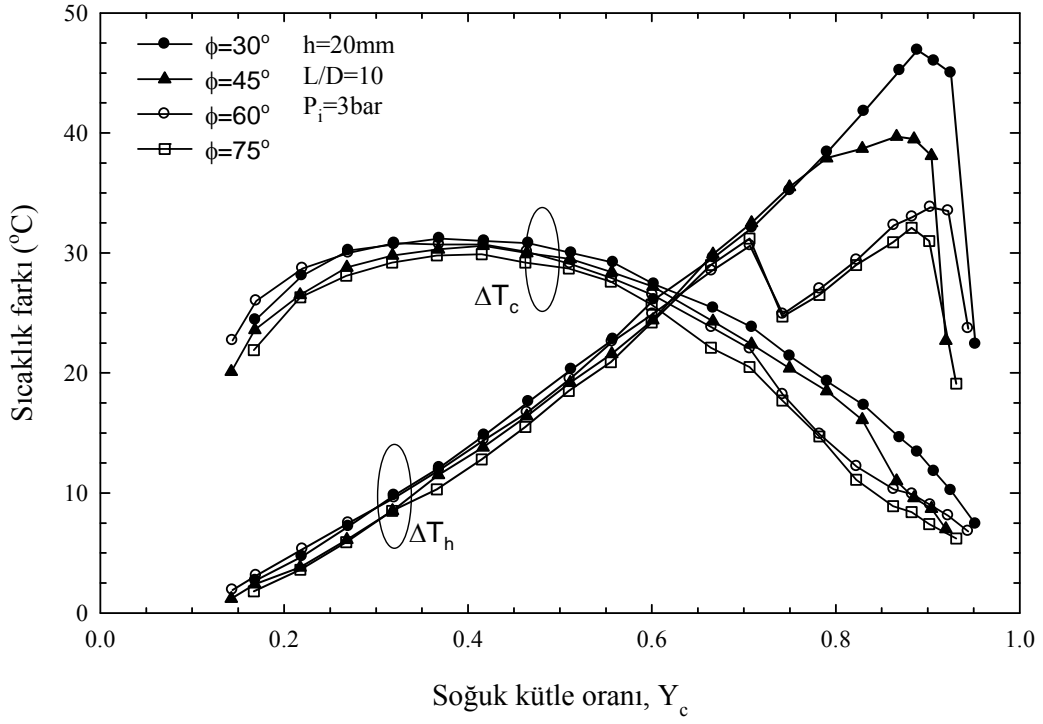
Şekil 168. $h=20\text{mm}$, $L/D=20$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



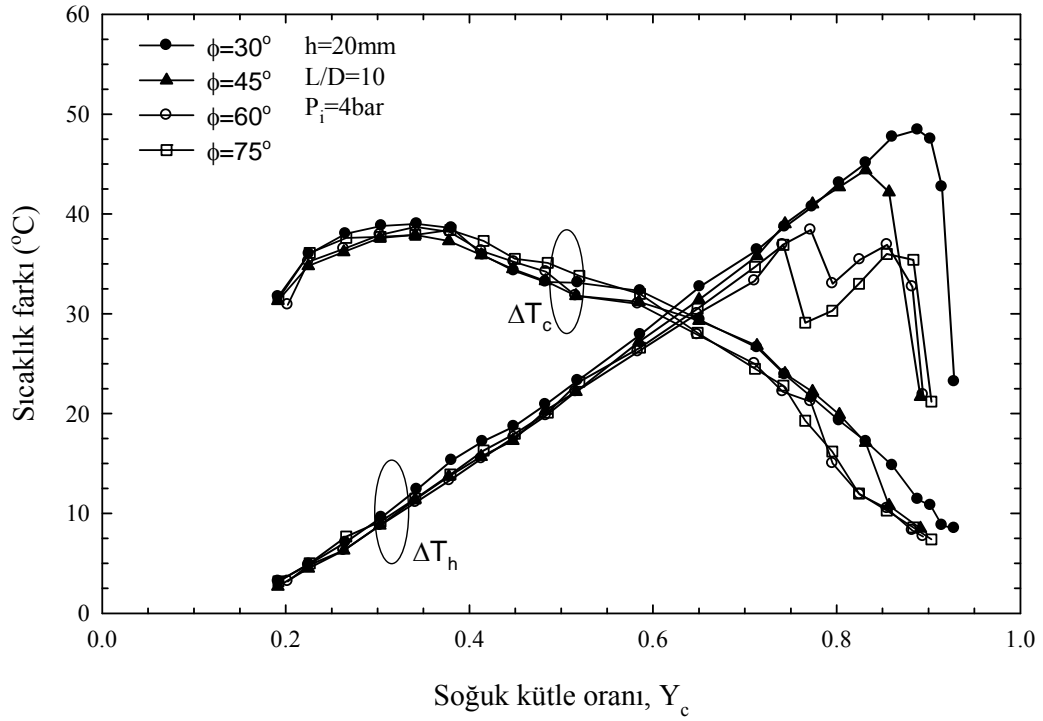
Şekil 169. $h=20\text{mm}$, $L/D=20$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



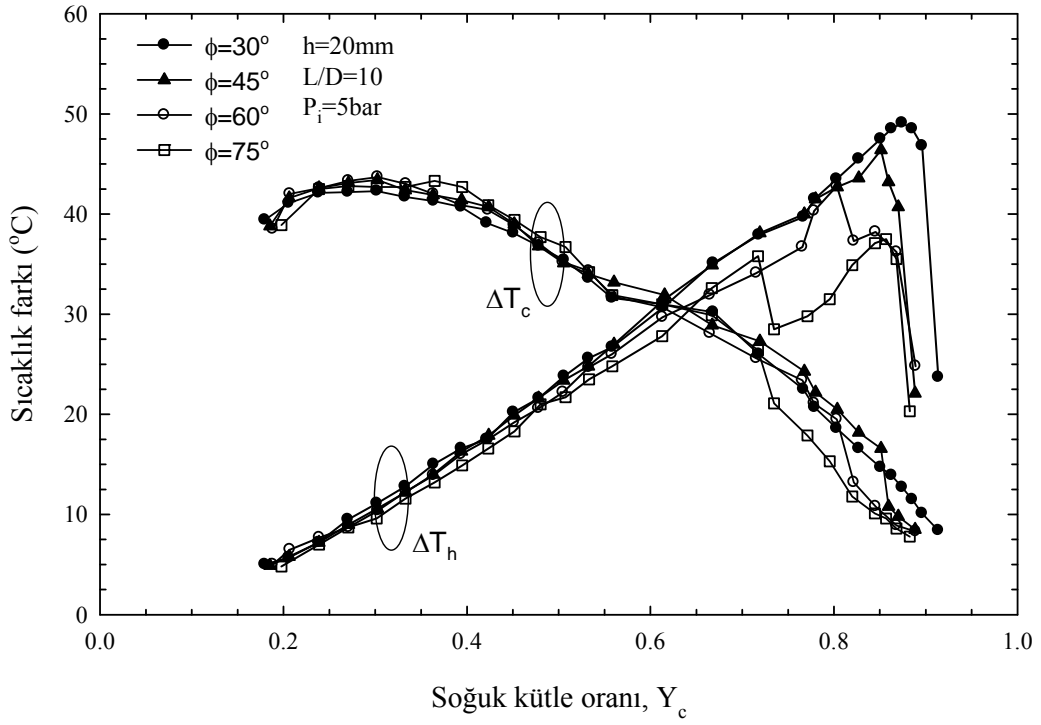
Şekil 170. $h=20\text{mm}$, $L/D=20$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



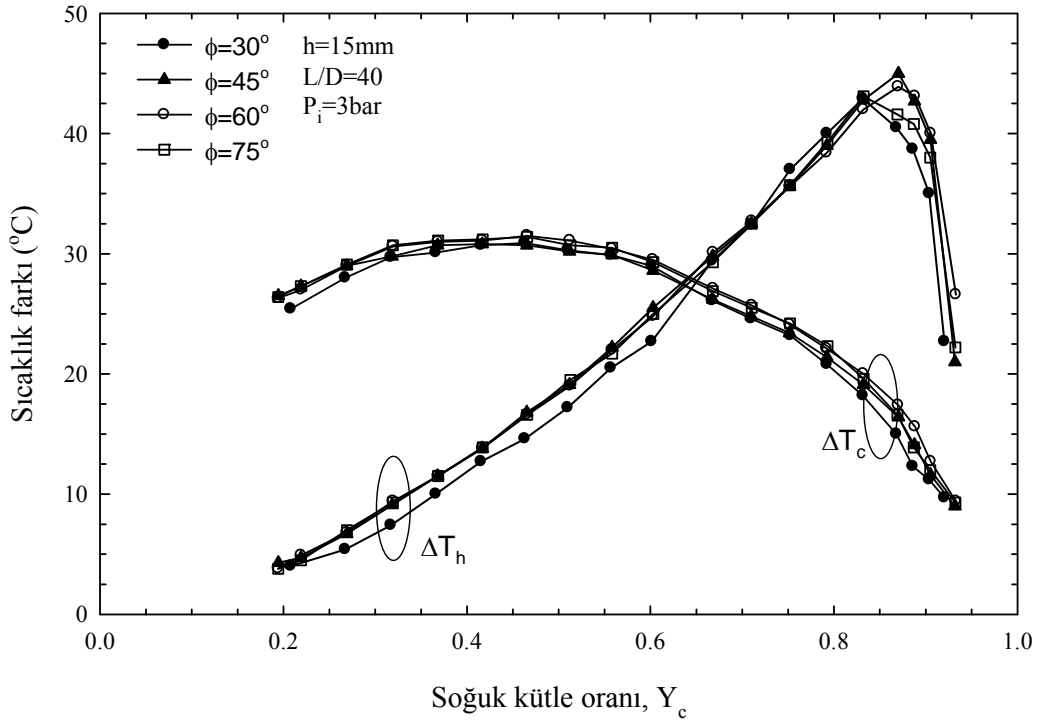
Şekil 171. $h=20\text{mm}$, $L/D=10$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



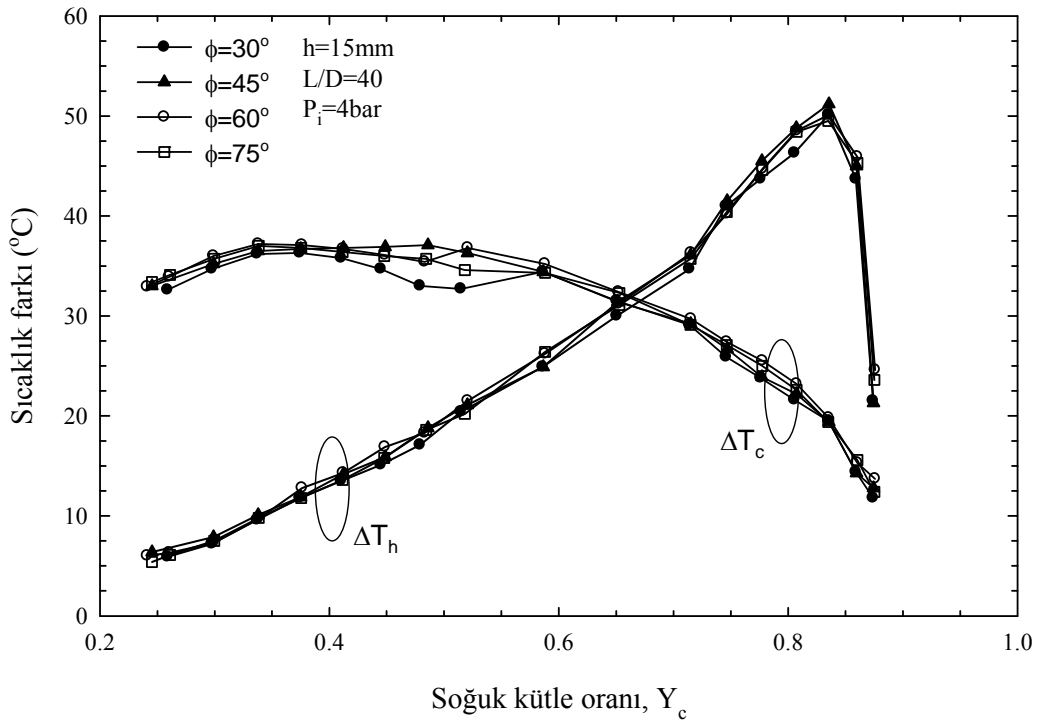
Şekil 172. $h=20\text{mm}$, $L/D=10$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



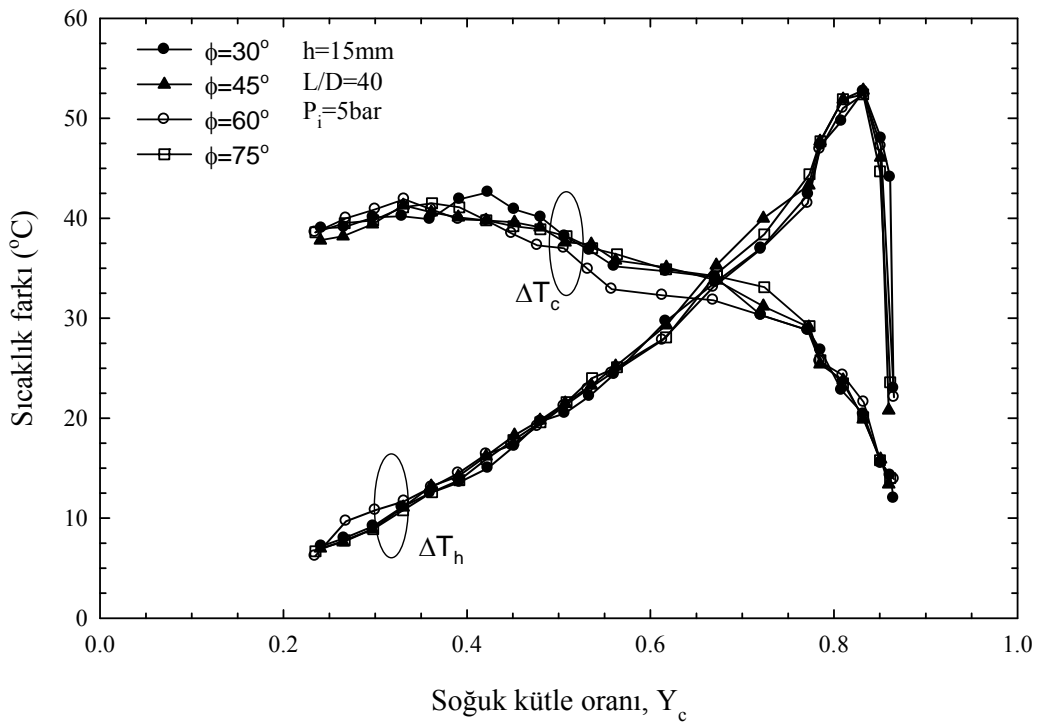
Şekil 173. $h=20\text{mm}$, $L/D=10$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



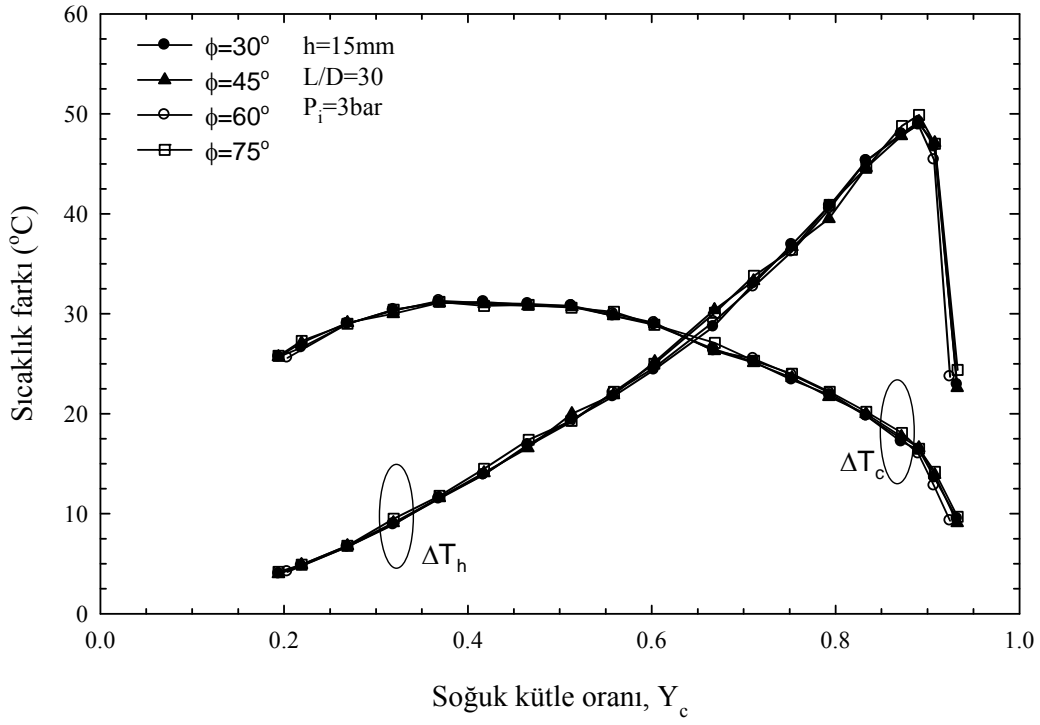
Şekil 174. $h=15\text{mm}$, $L/D=40$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



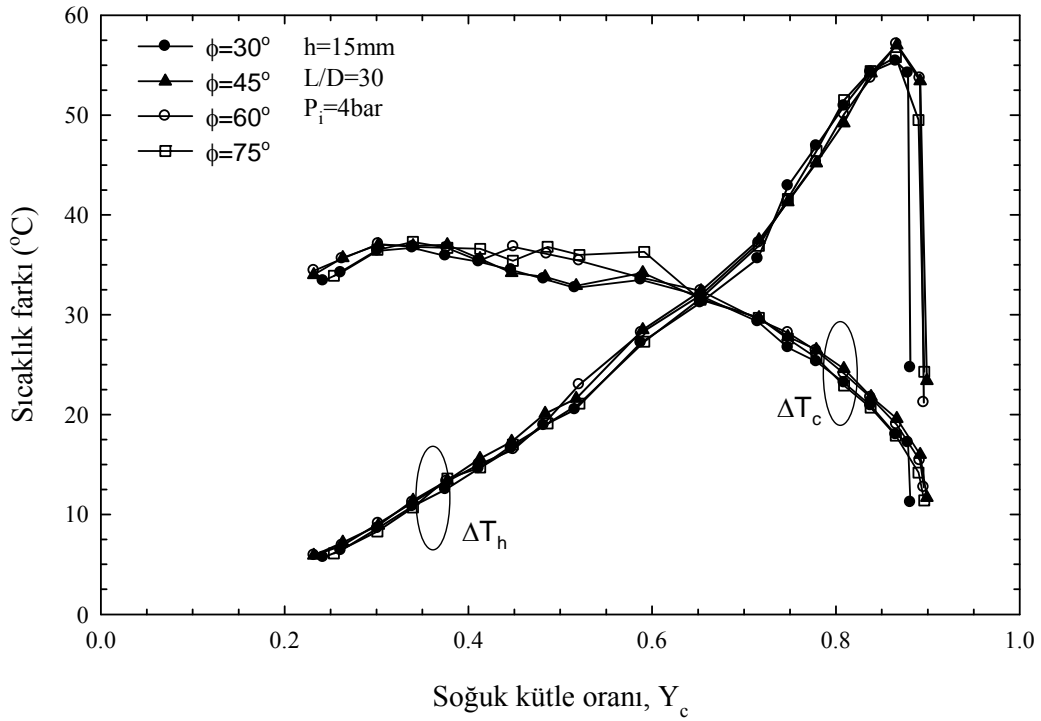
Şekil 175. $h=15\text{mm}$, $L/D=40$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



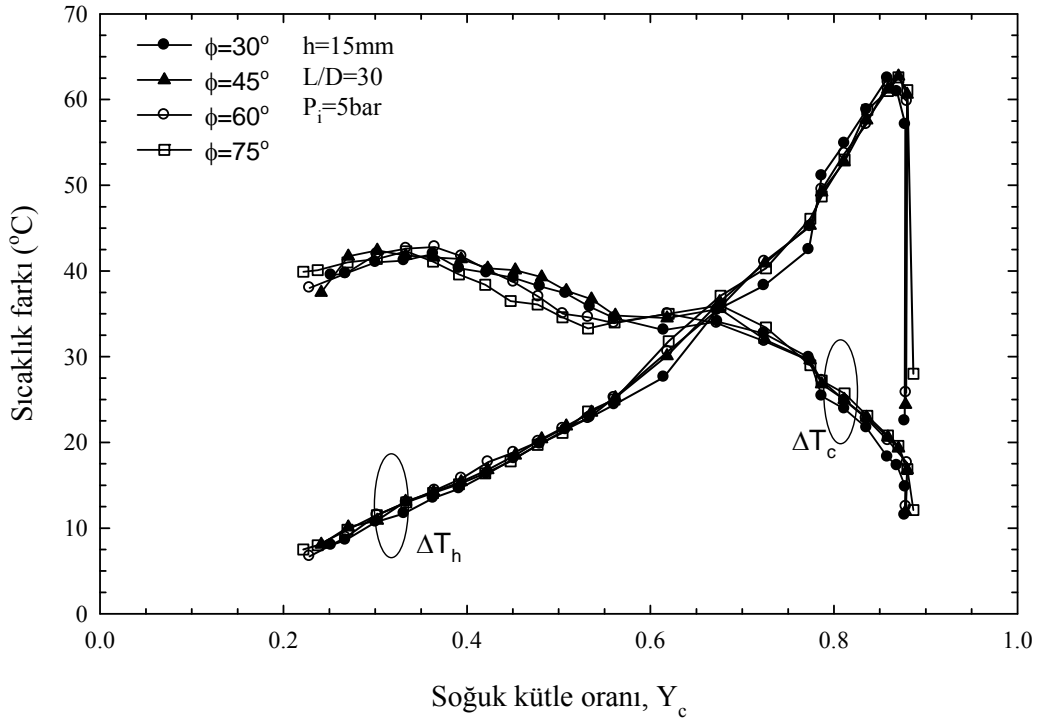
Şekil 176. $h=15\text{mm}$, $L/D=40$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



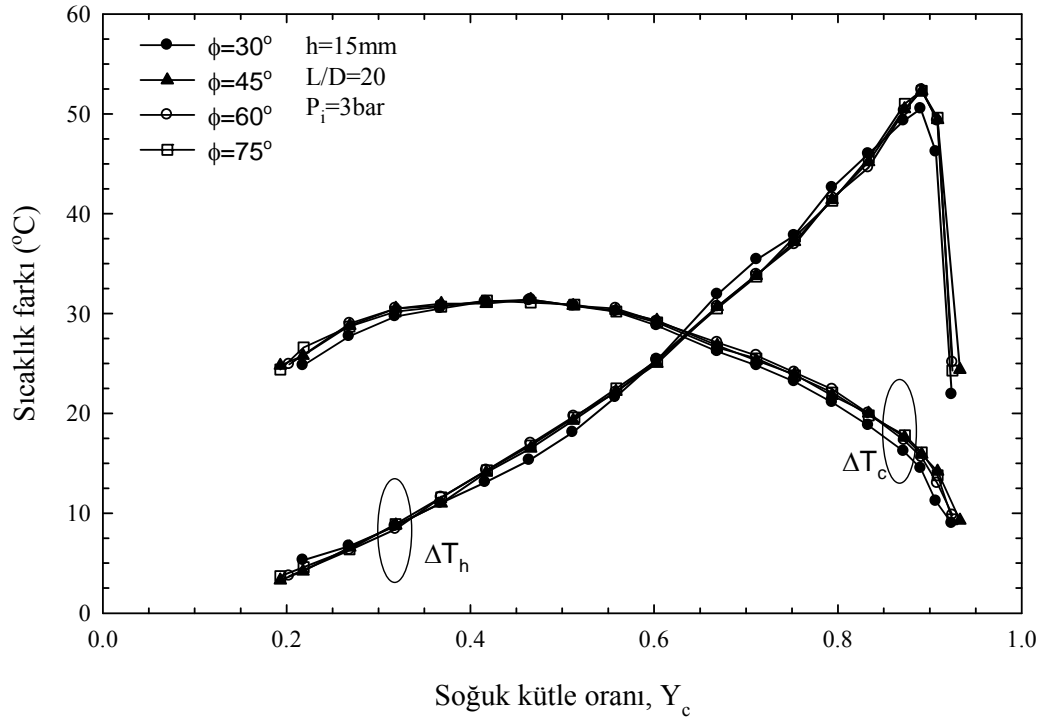
Şekil 177. $h=15\text{mm}$, $L/D=30$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



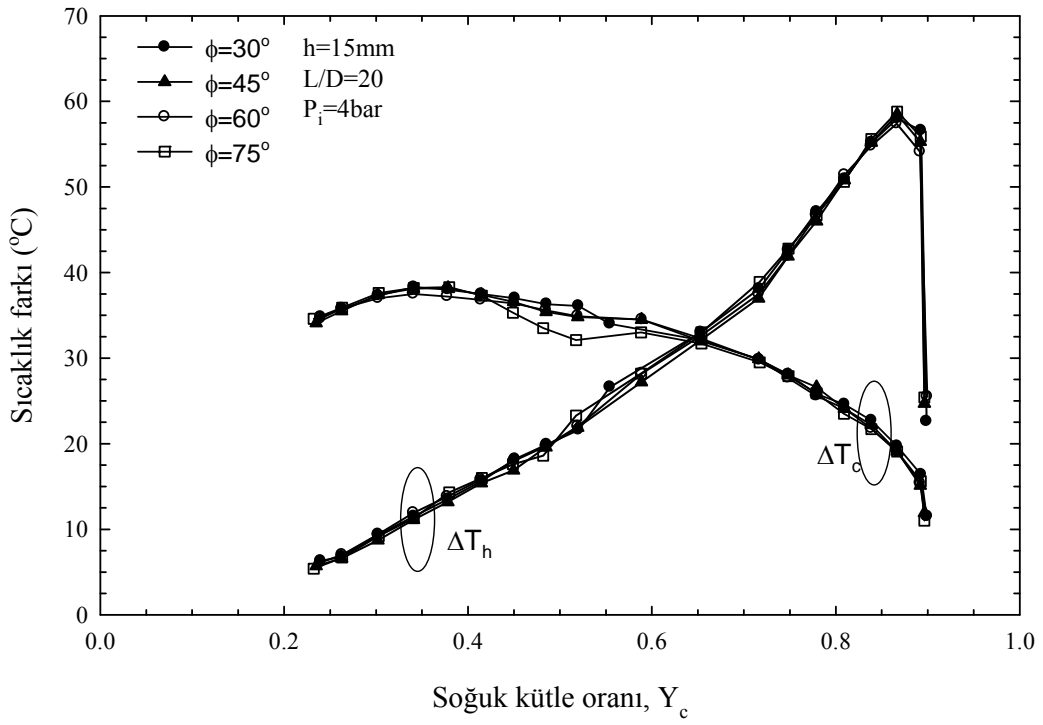
Şekil 178. $h=15\text{mm}$, $L/D=30$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



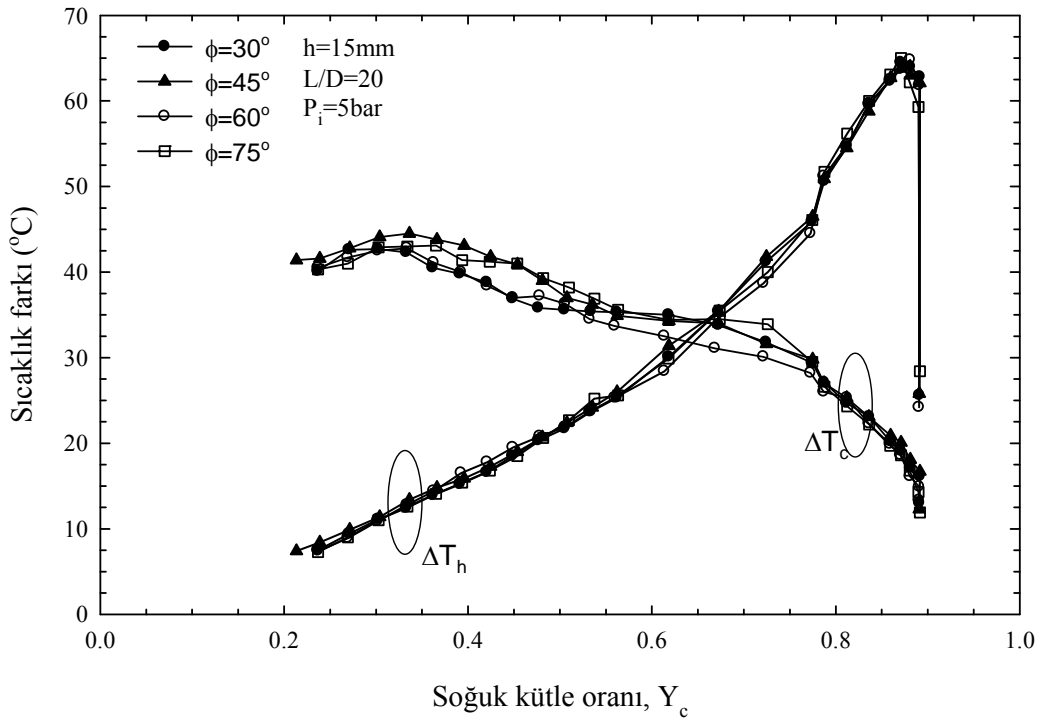
Şekil 179. $h=15\text{mm}$, $L/D=30$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



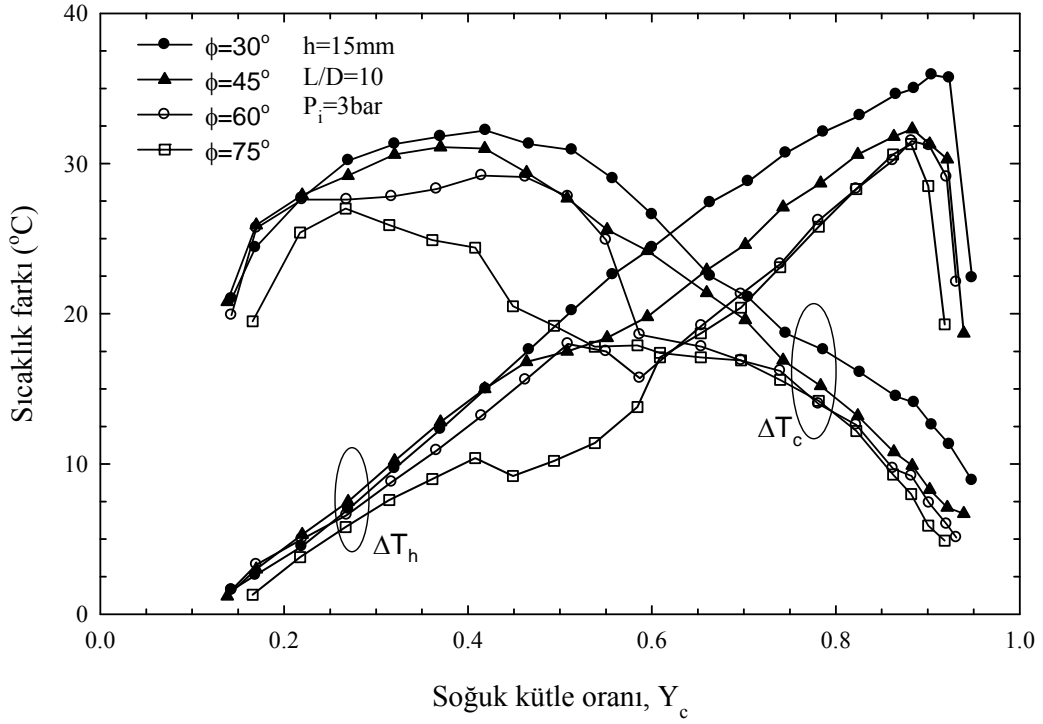
Şekil 180. $h=15\text{mm}$, $L/D=20$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



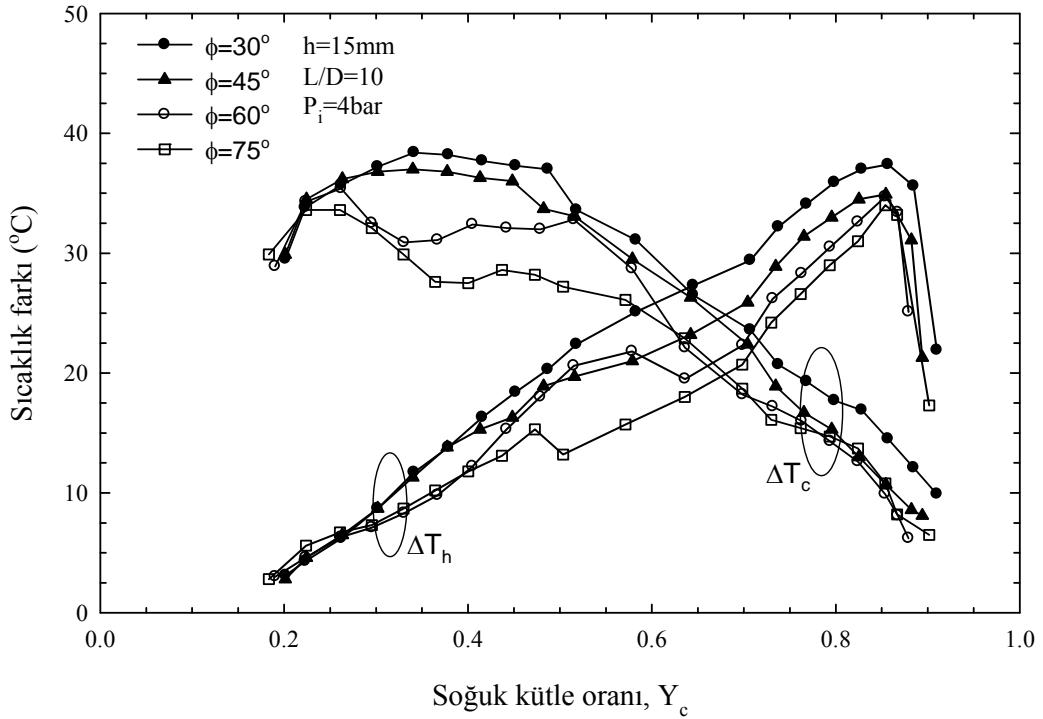
Şekil 181. $h=15\text{mm}$, $L/D=20$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



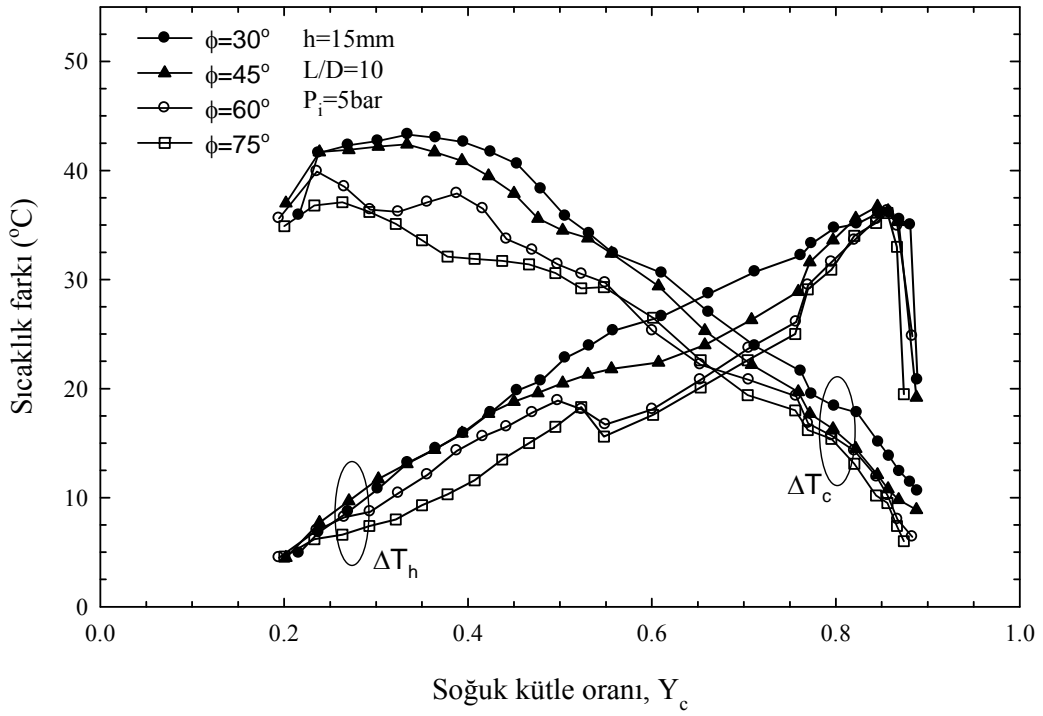
Şekil 182. $h=15\text{mm}$, $L/D=20$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



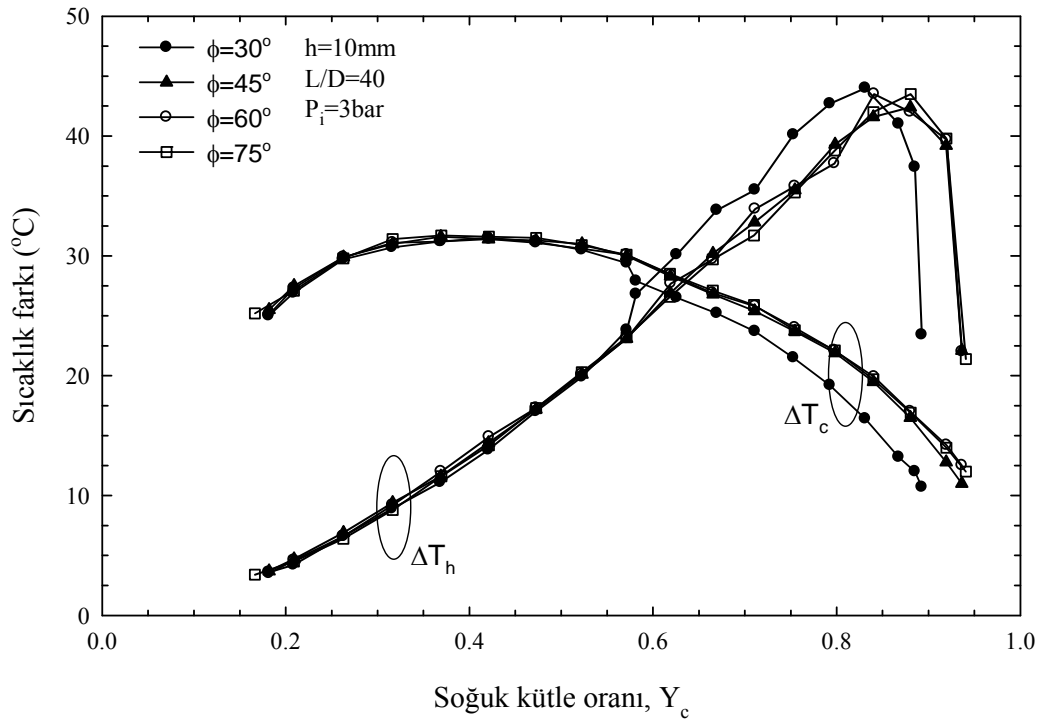
Şekil 183. $h=15\text{mm}$, $L/D=10$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



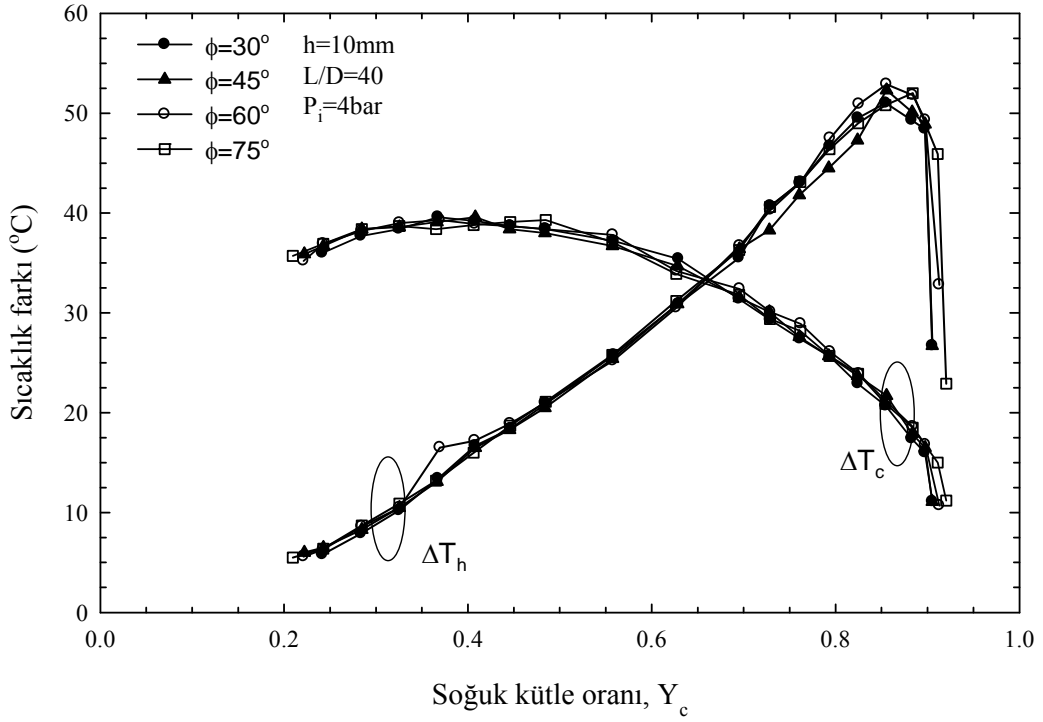
Şekil 184. $h=15\text{mm}$, $L/D=10$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



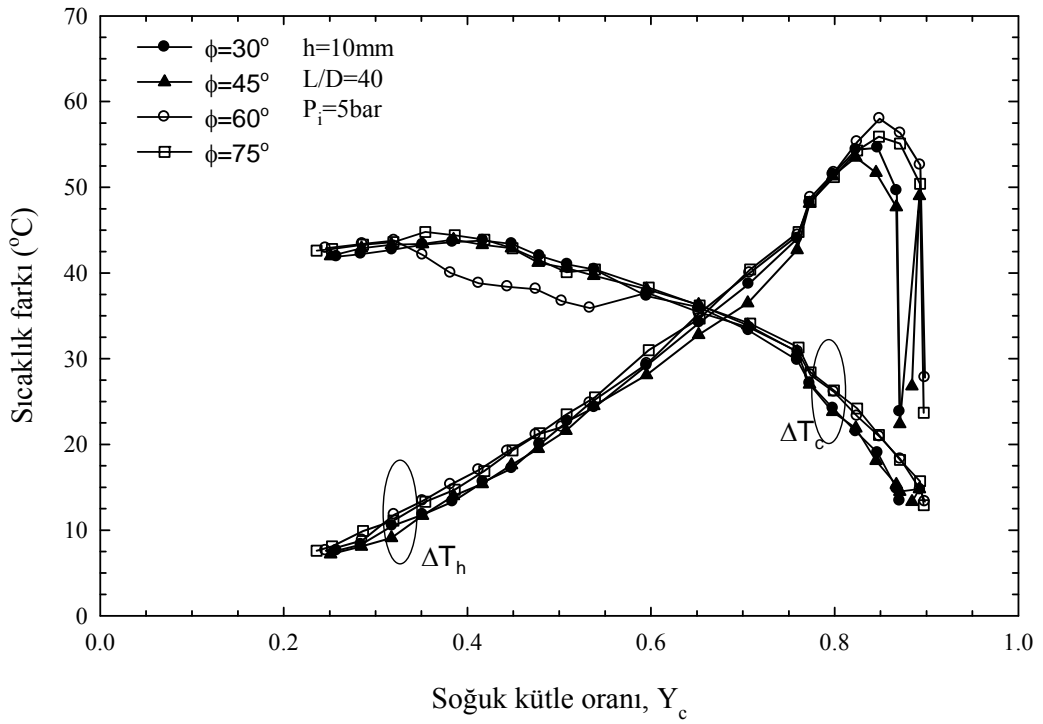
Şekil 185. $h=15\text{mm}$, $L/D=10$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



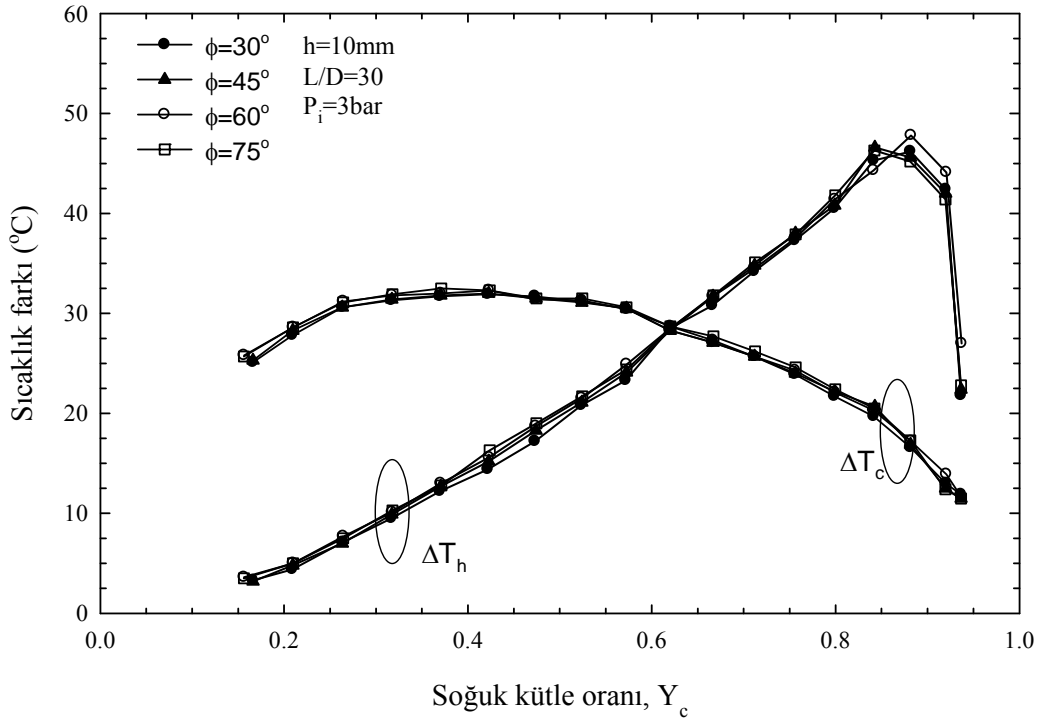
Şekil 186. $h=10\text{mm}$, $L/D=40$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



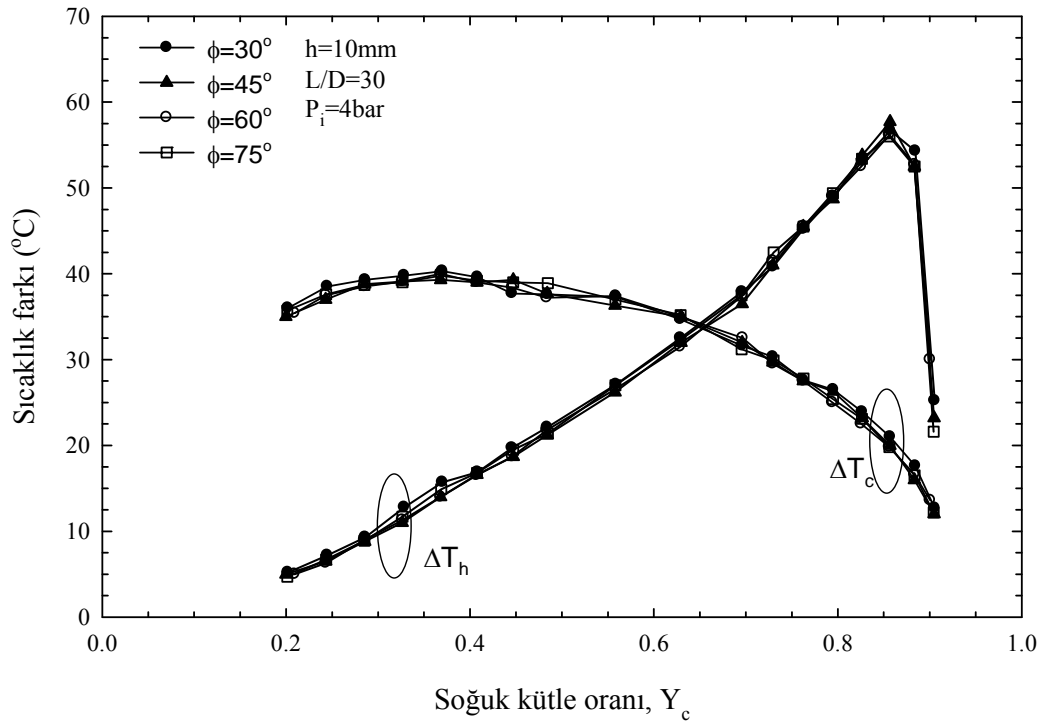
Şekil 187. $h=10\text{mm}$, $L/D=40$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



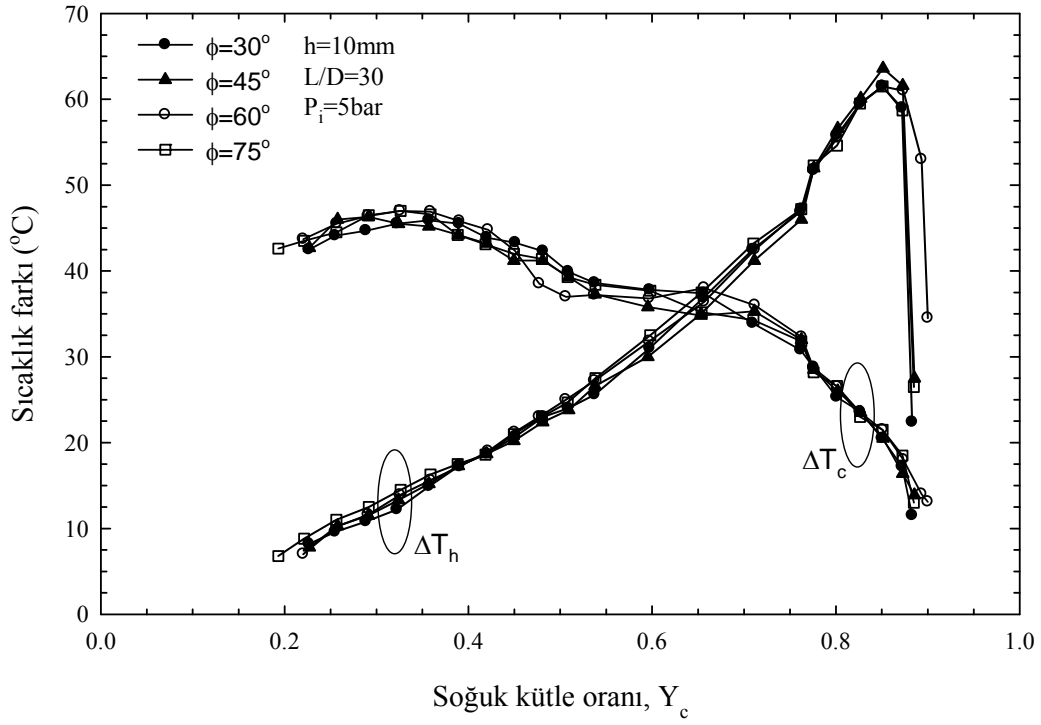
Şekil 188. $h=10\text{mm}$, $L/D=40$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



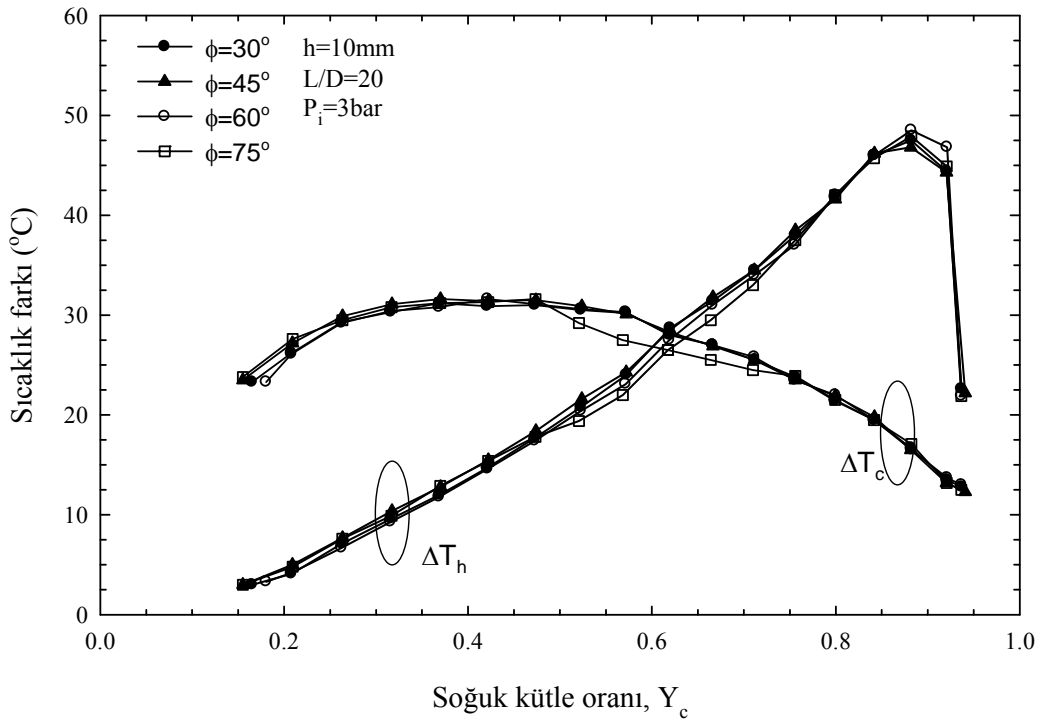
Şekil 189. $h=10\text{mm}$, $L/D=30$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



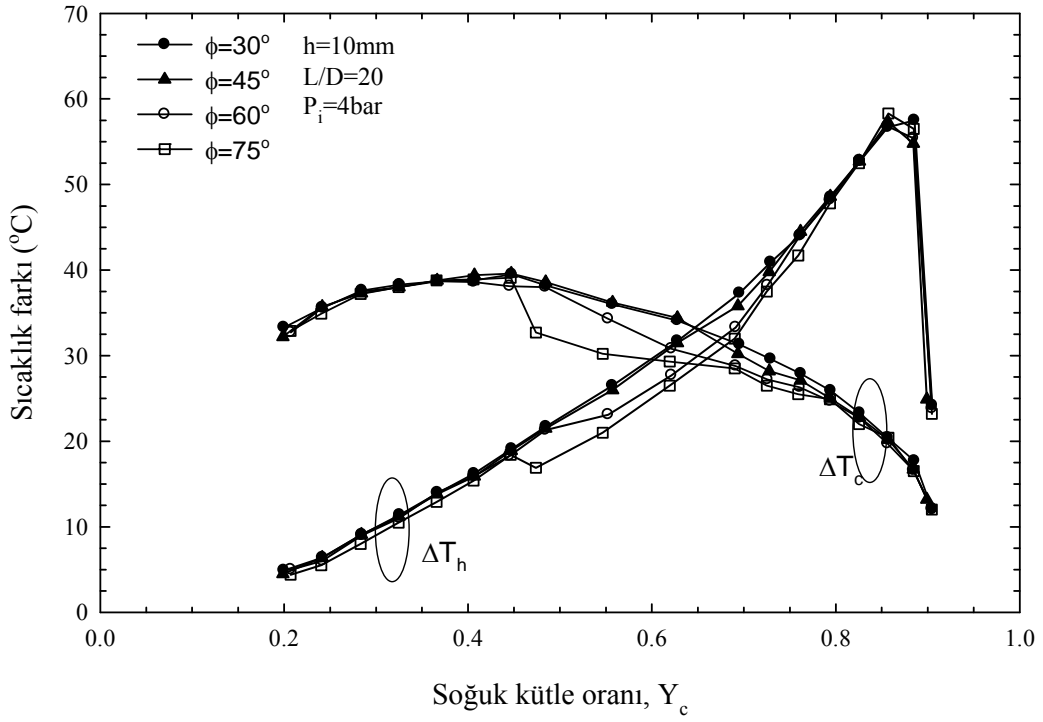
Şekil 190. $h=10\text{mm}$, $L/D=30$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



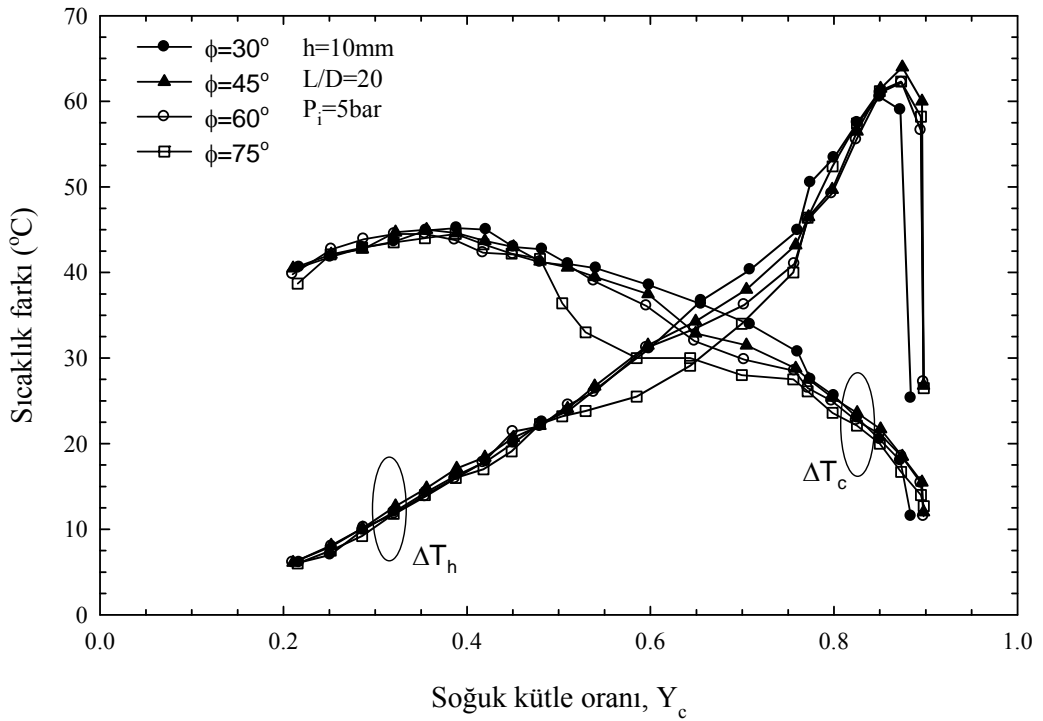
Şekil 191. $h=10\text{mm}$, $L/D=30$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



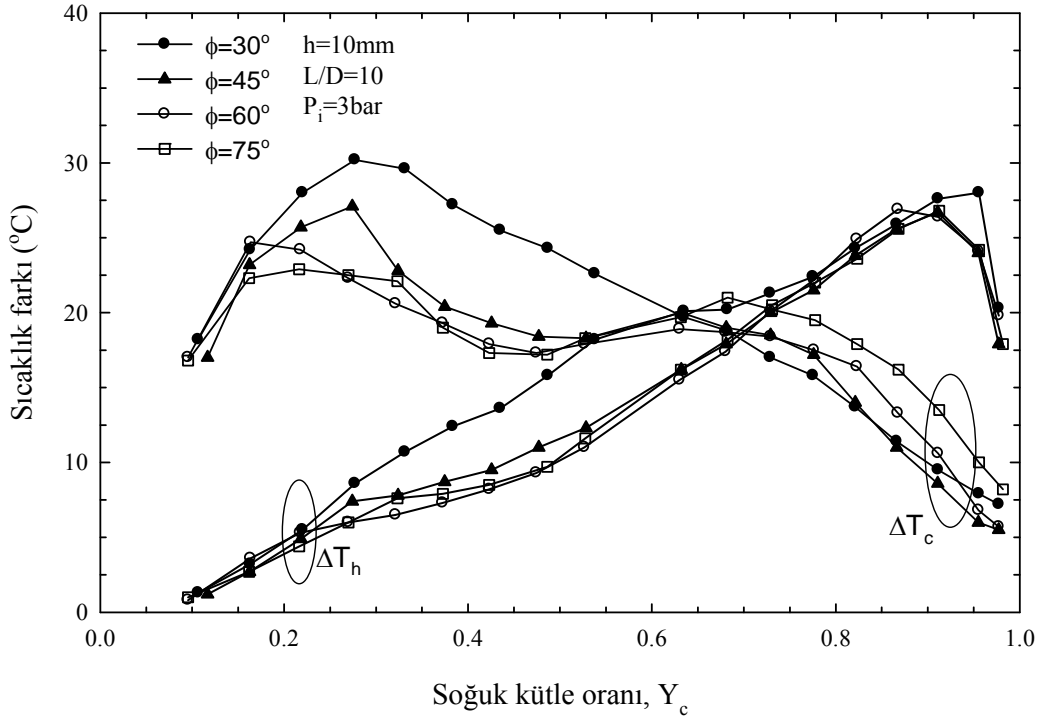
Şekil 192. $h=10\text{mm}$, $L/D=20$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



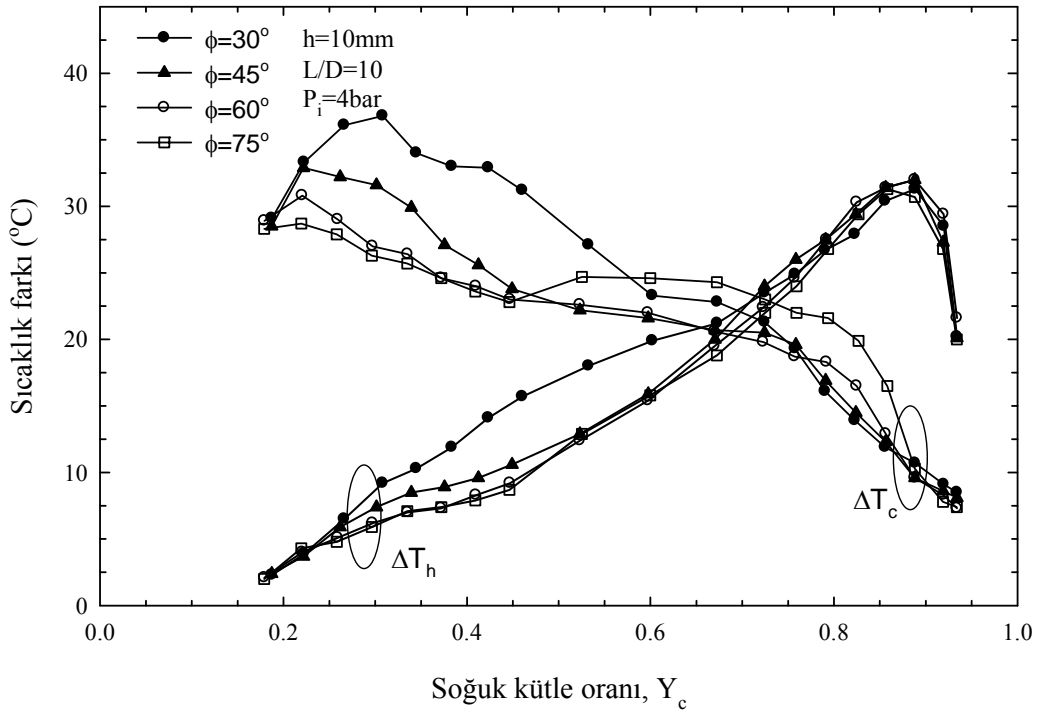
Şekil 193. $h=10\text{mm}$, $L/D=20$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



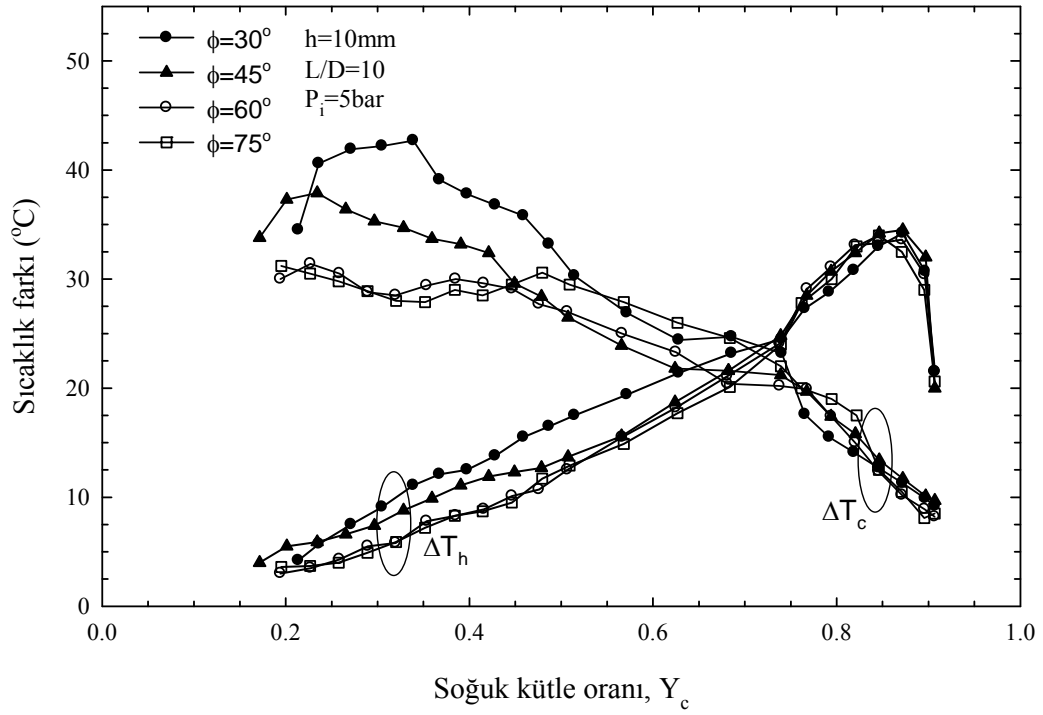
Şekil 194. $h=10\text{mm}$, $L/D=20$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



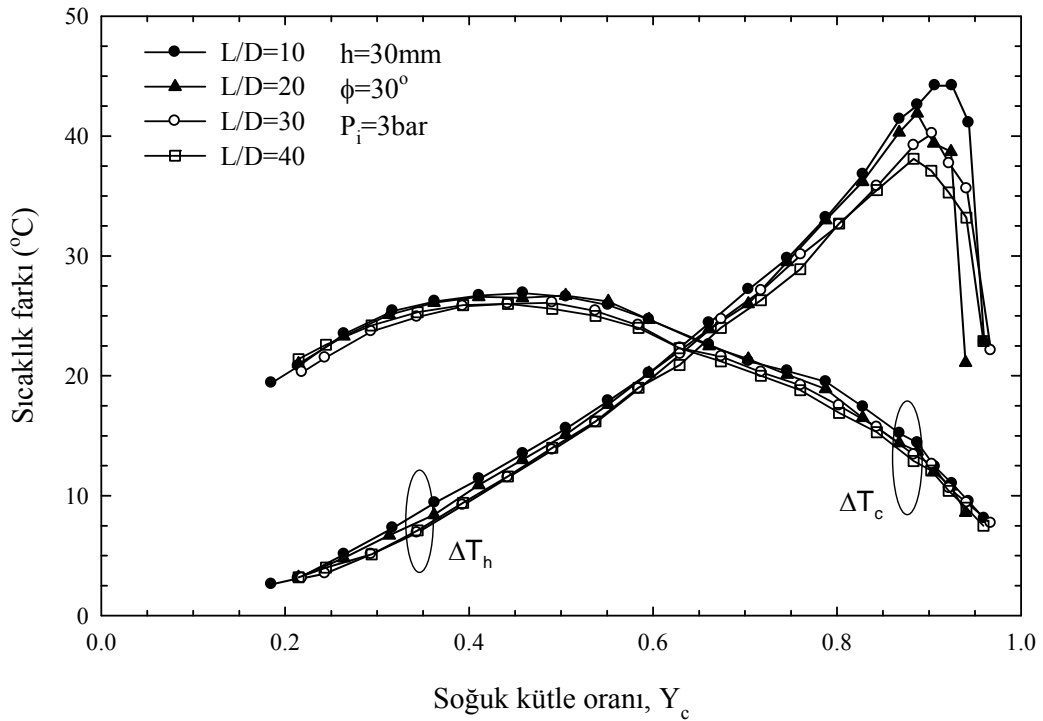
Şekil 195. $h=10\text{mm}$, $L/D=10$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



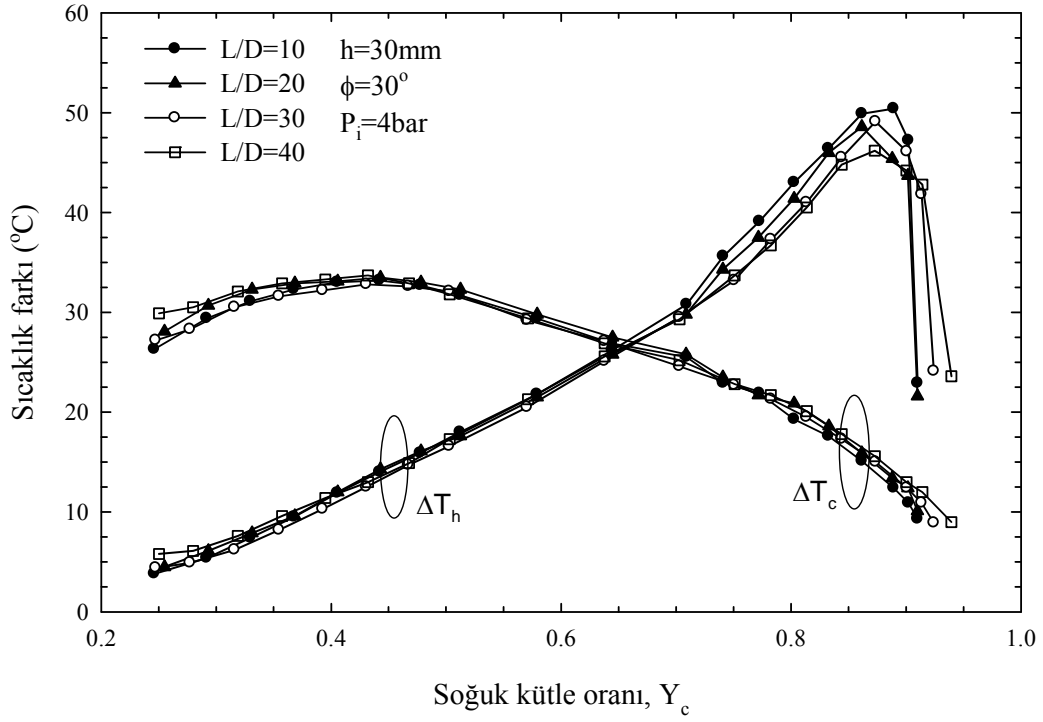
Şekil 196. $h=10\text{mm}$, $L/D=10$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



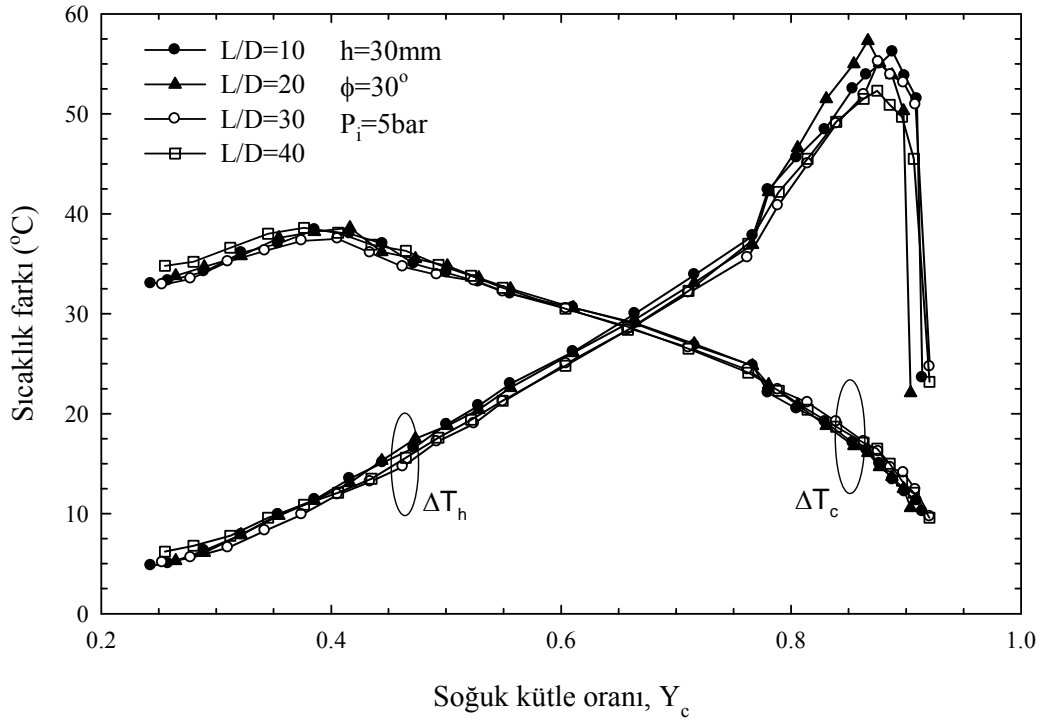
Şekil 197. $h=10\text{mm}$, $L/D=10$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı açılarda soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



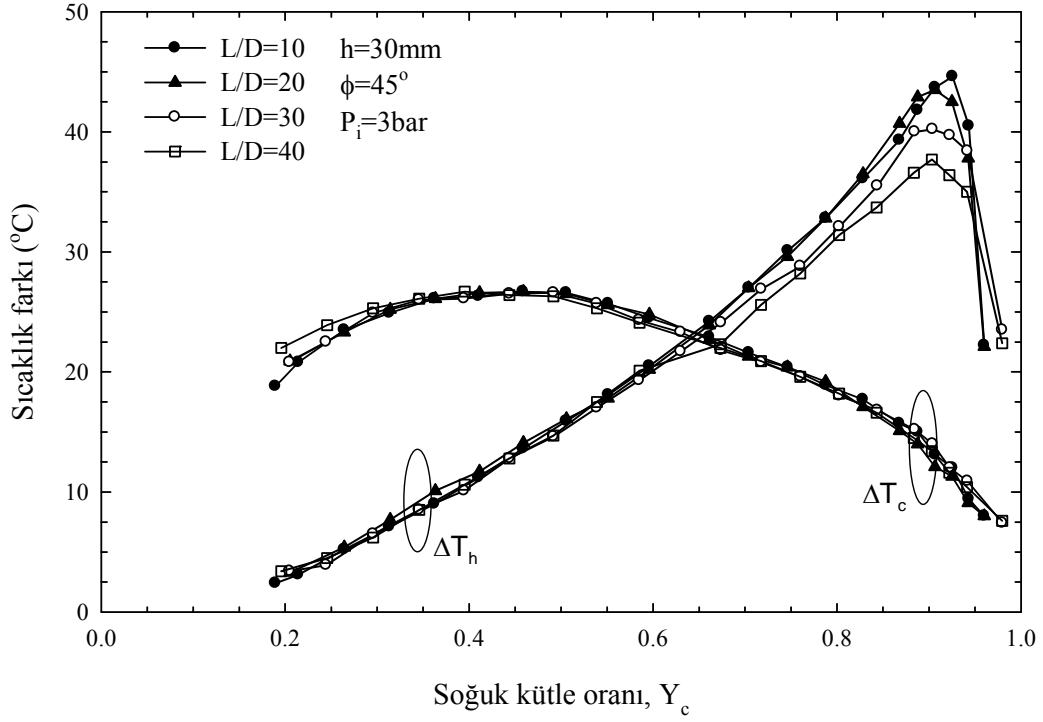
Şekil 198. $h=30\text{mm}$, $\phi=30^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



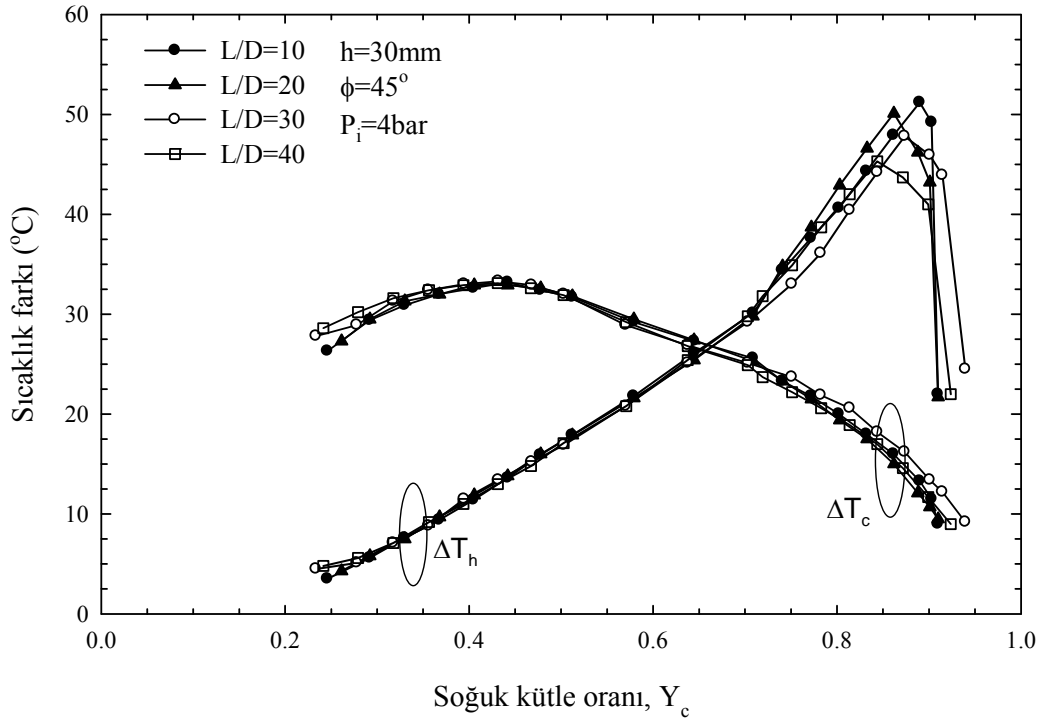
Şekil 199. $h=30\text{mm}$, $\phi=30^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



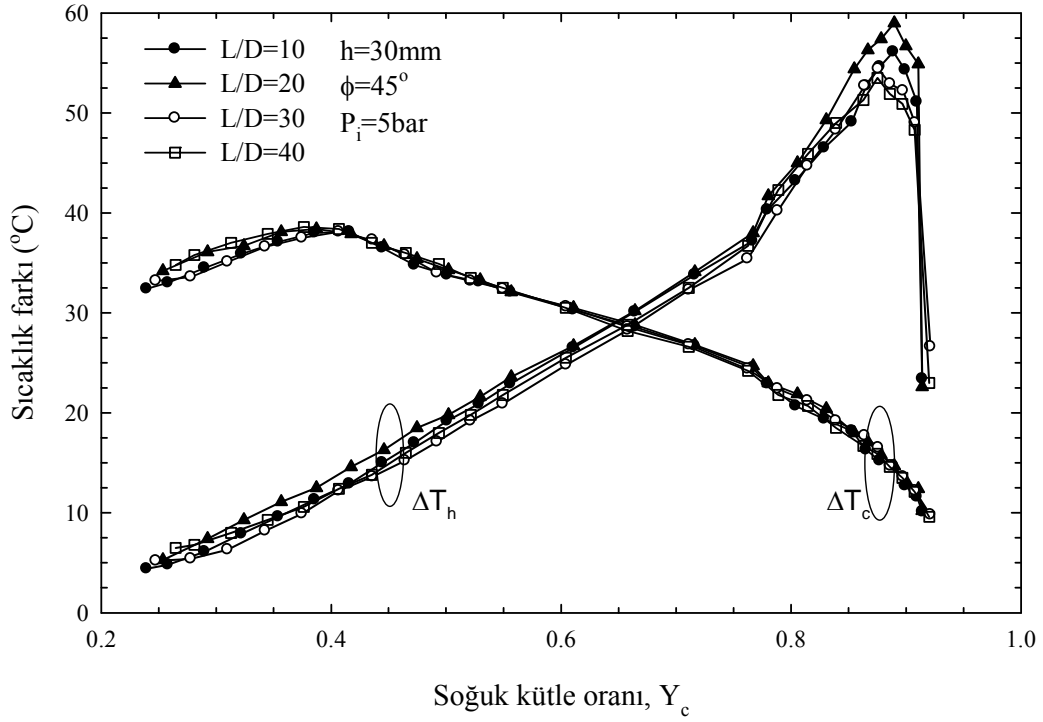
Şekil 200. $h=30\text{mm}$, $\phi=30^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



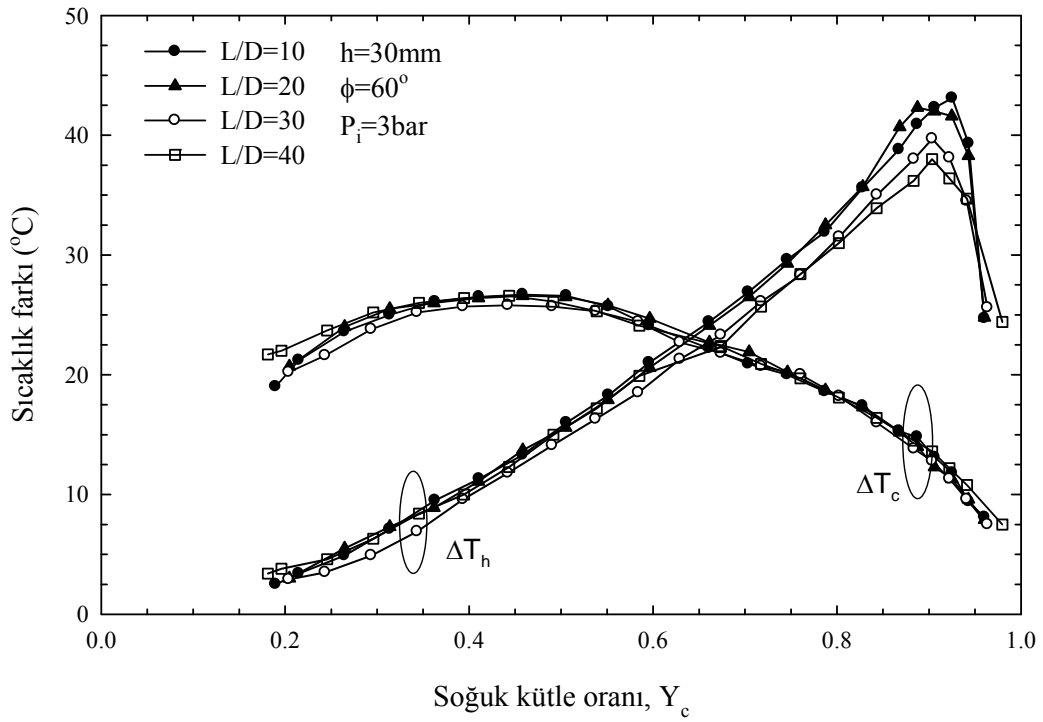
Şekil 201. $h=30\text{mm}$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



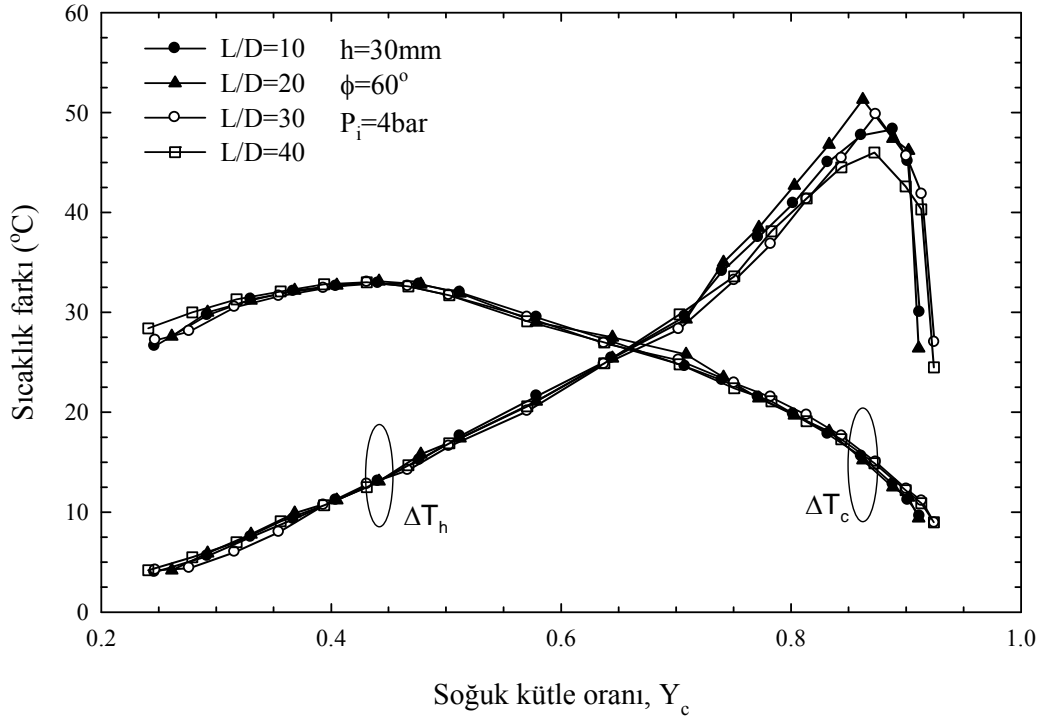
Şekil 202. $h=30\text{mm}$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



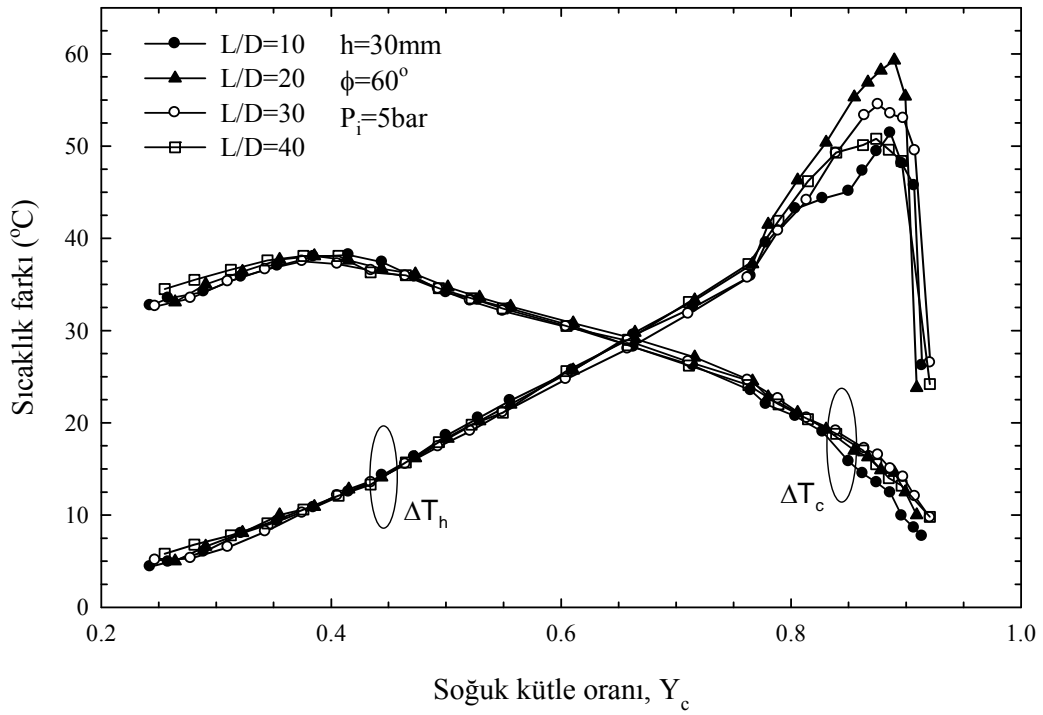
Şekil 203. $h=30\text{mm}$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



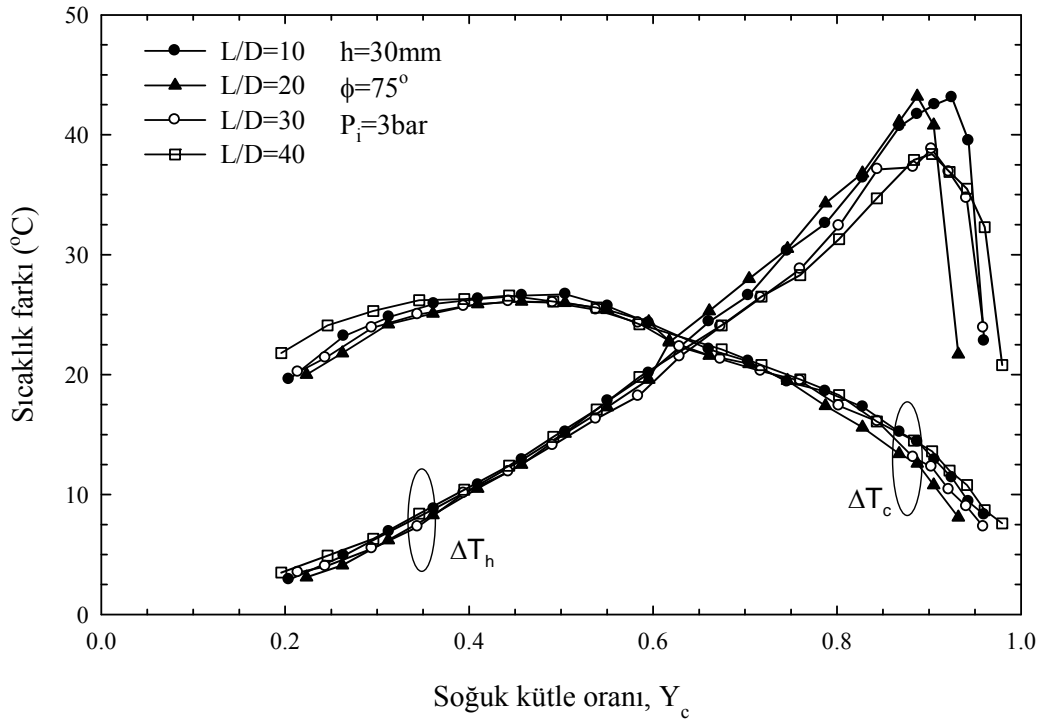
Şekil 204. $h=30\text{mm}$, $\phi=60^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



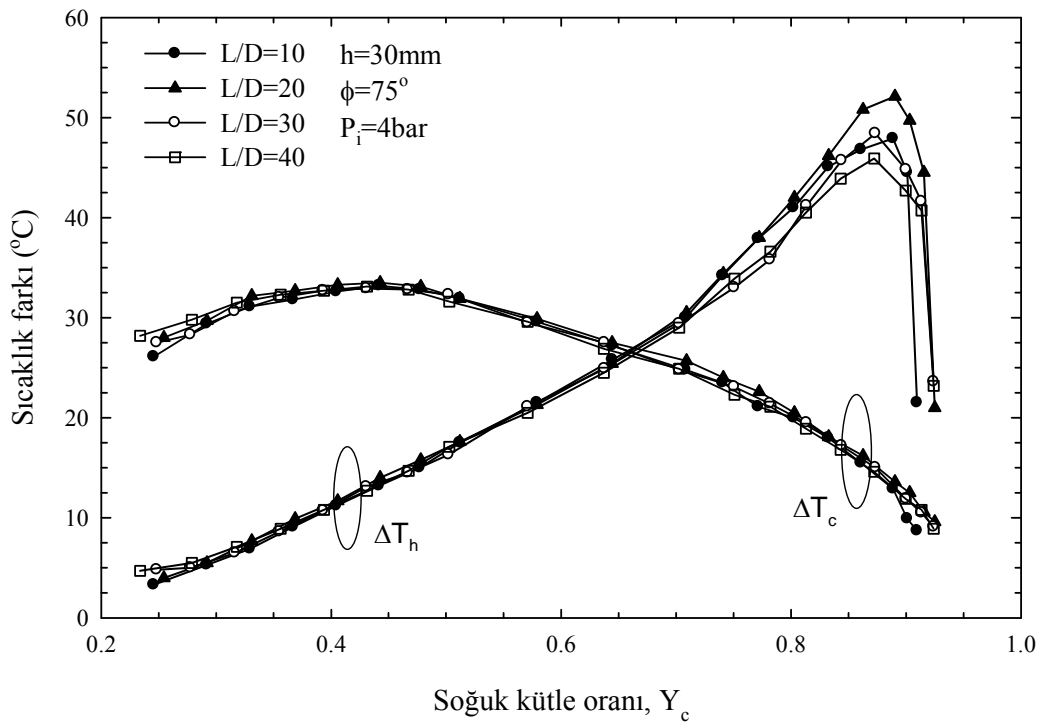
Şekil 205. $h=30\text{mm}$, $\phi=60^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



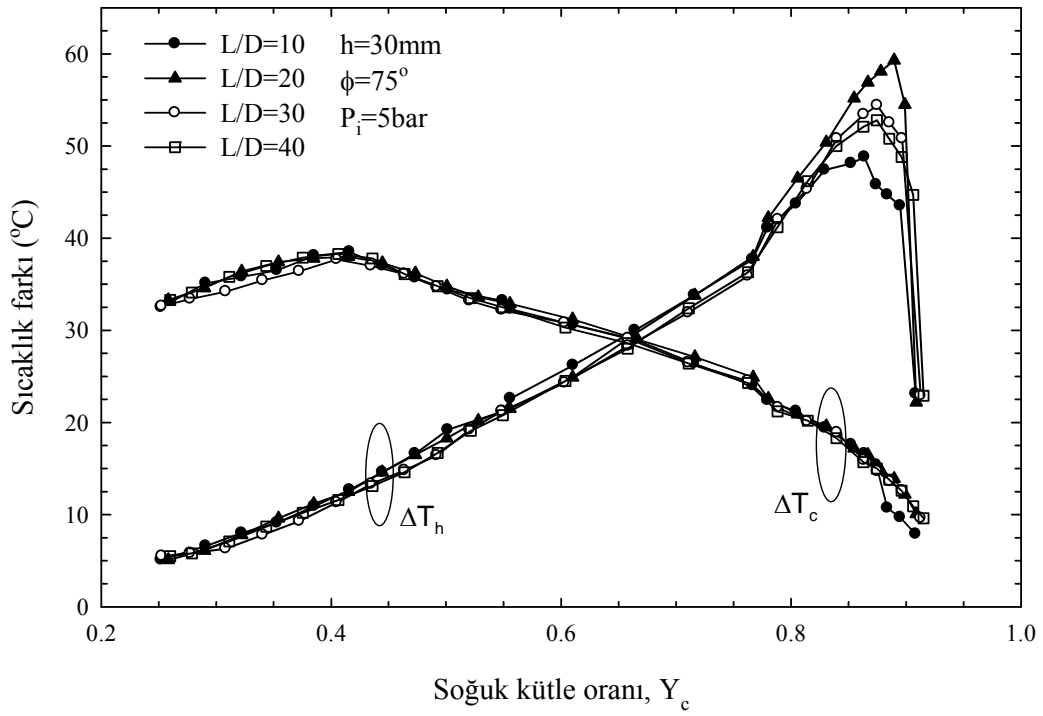
Şekil 206. $h=30\text{mm}$, $\phi=60^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



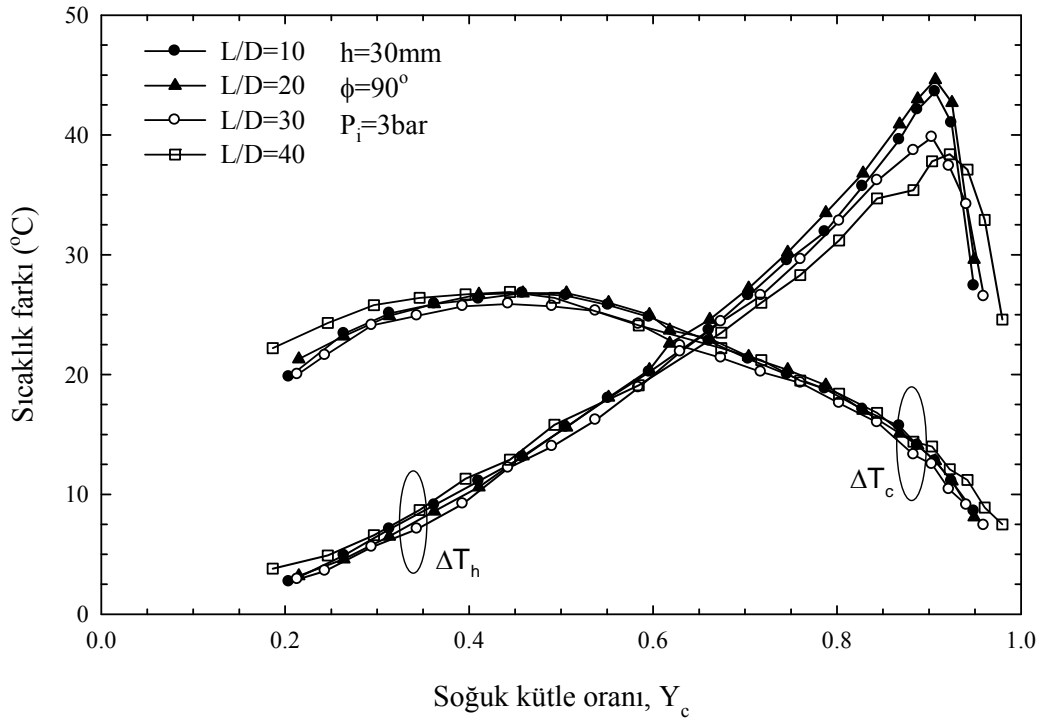
Şekil 207. $h=30\text{mm}$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



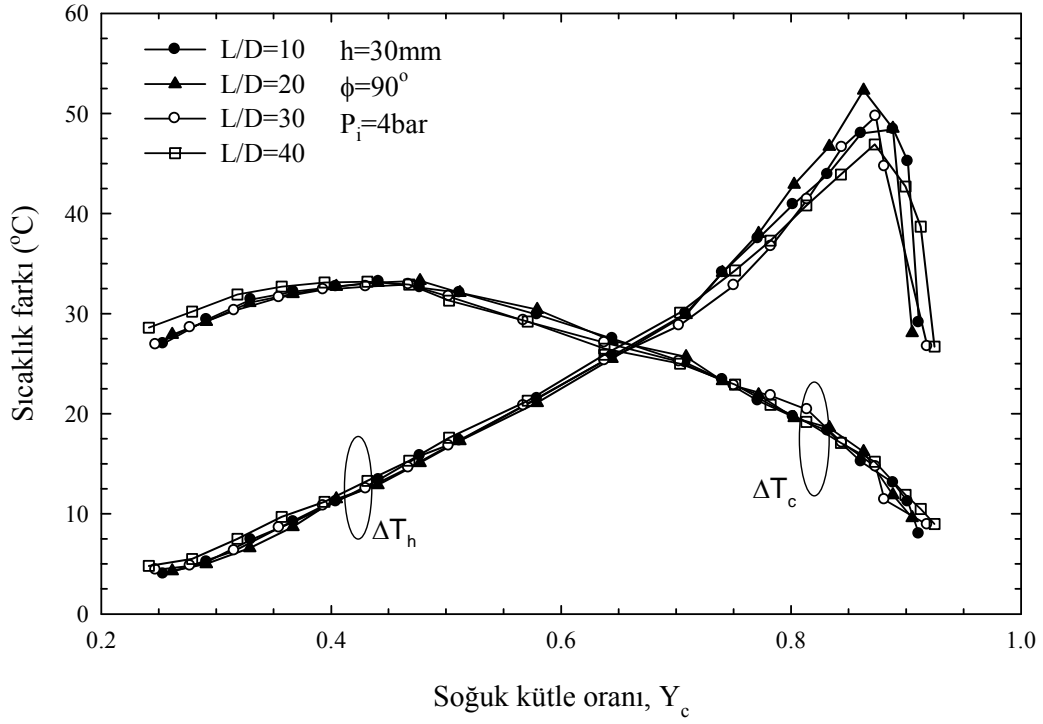
Şekil 208. $h=30\text{mm}$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



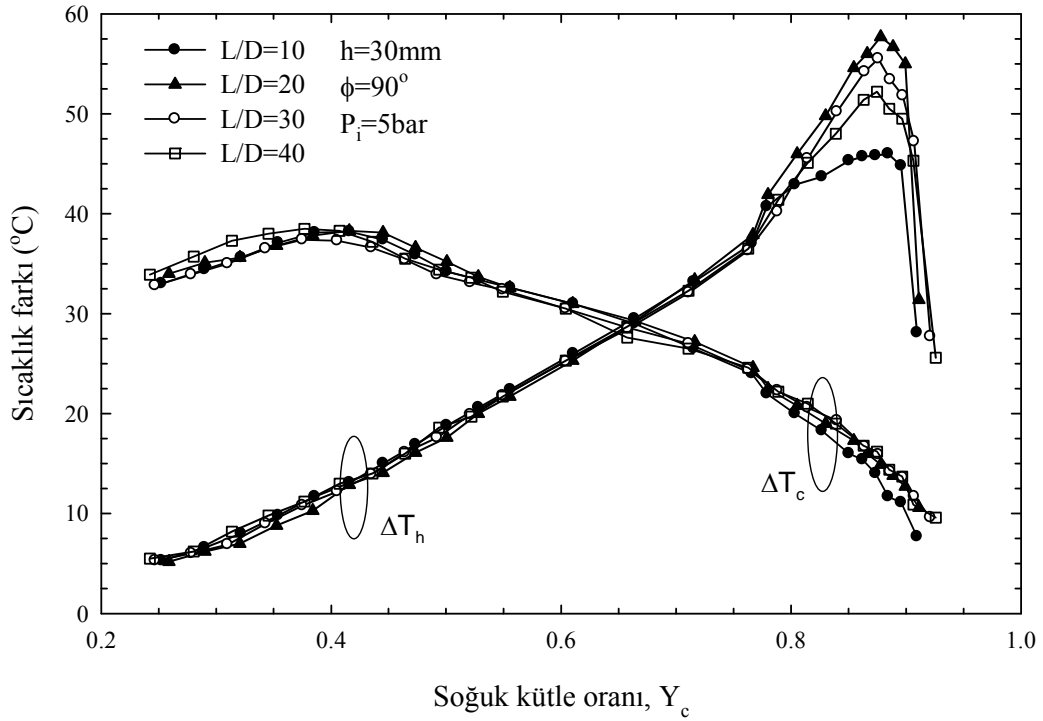
Şekil 209. $h=30\text{mm}$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



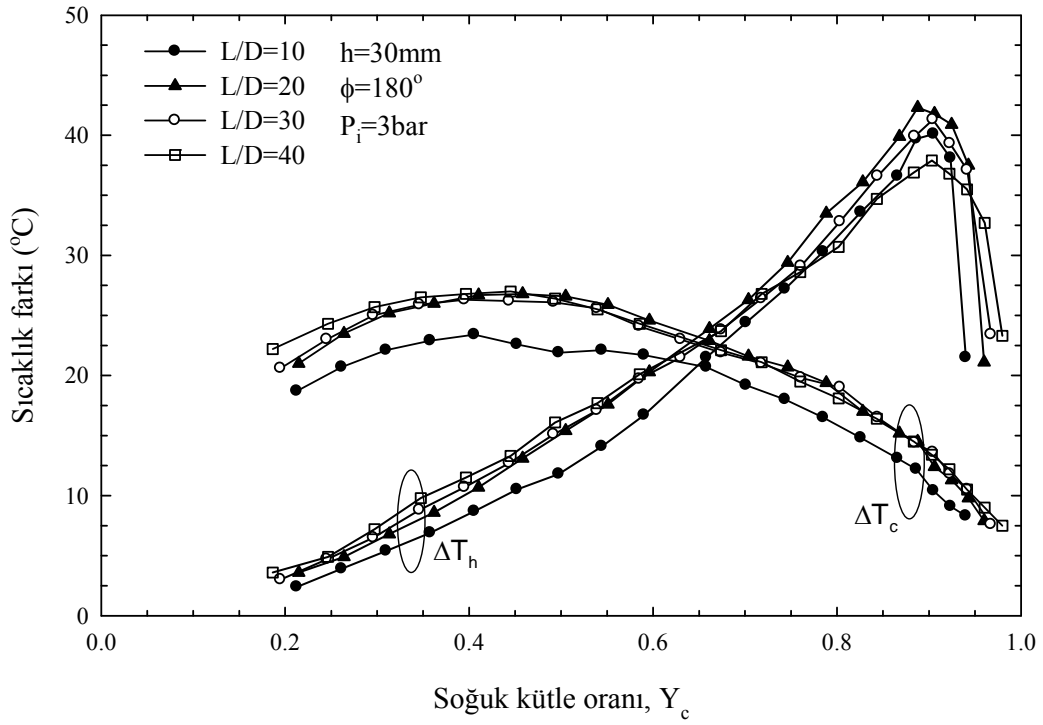
Şekil 210. $h=30\text{mm}$, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



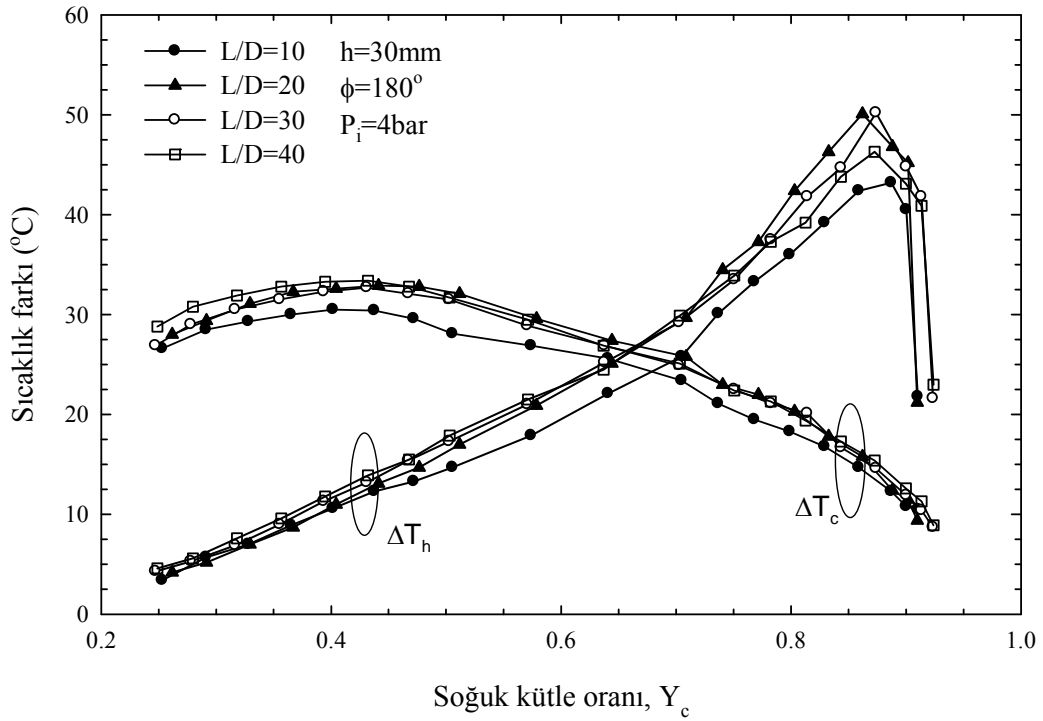
Şekil 211. $h=30\text{mm}$, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



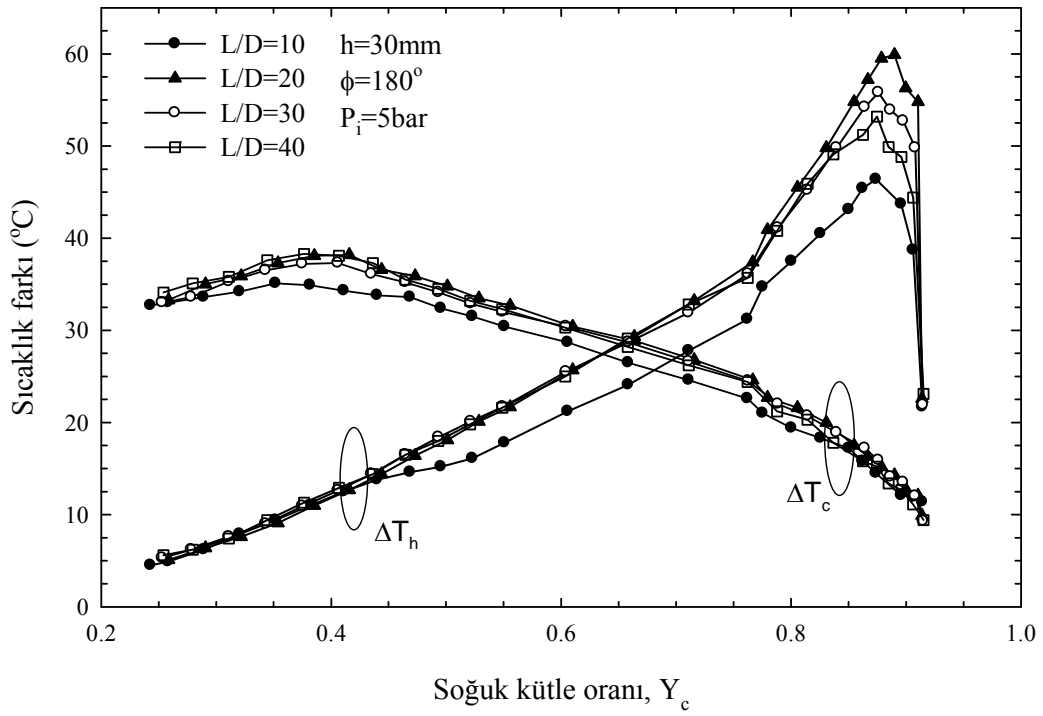
Şekil 212. $h=30\text{mm}$, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



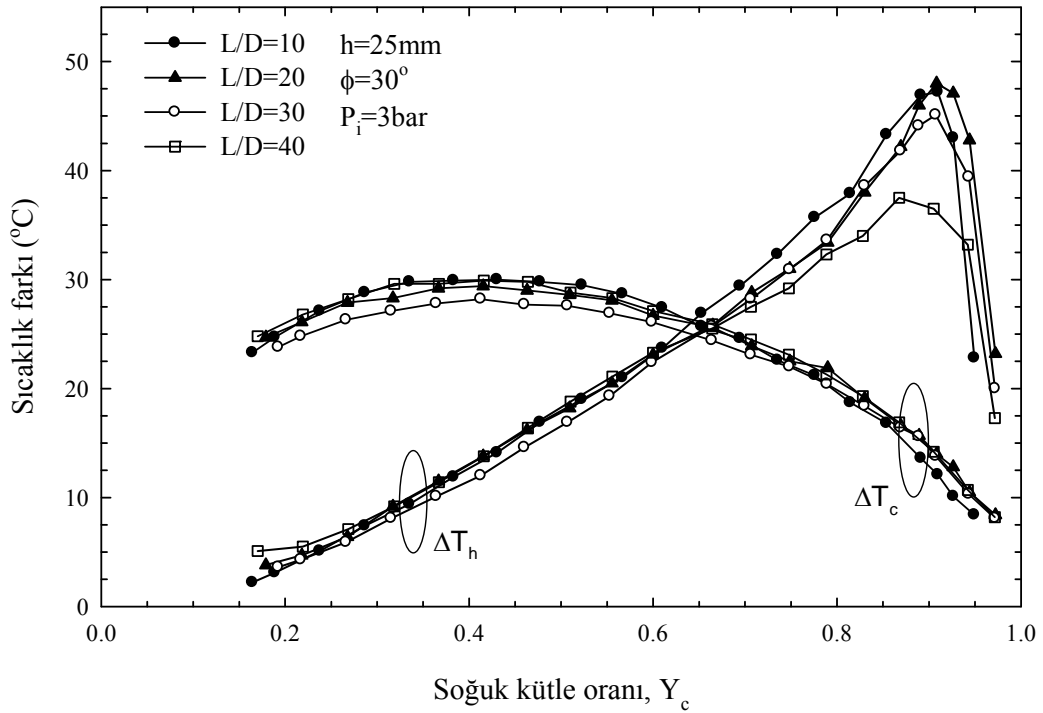
Şekil 213. $h=30\text{mm}$, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



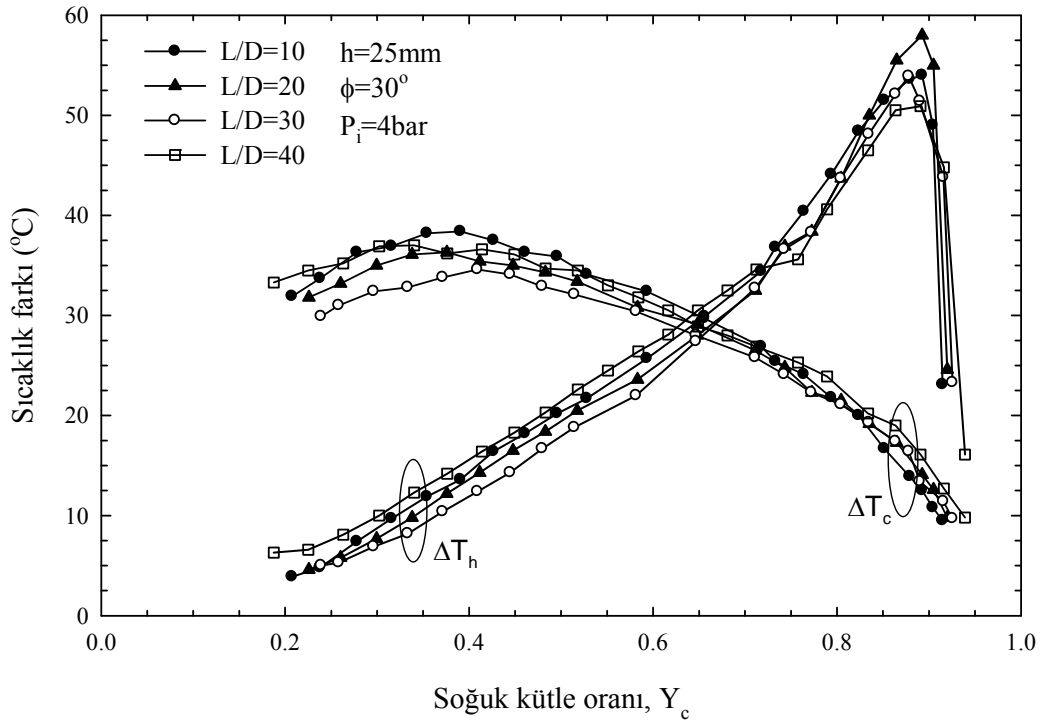
Şekil 214. $h=30\text{mm}$, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



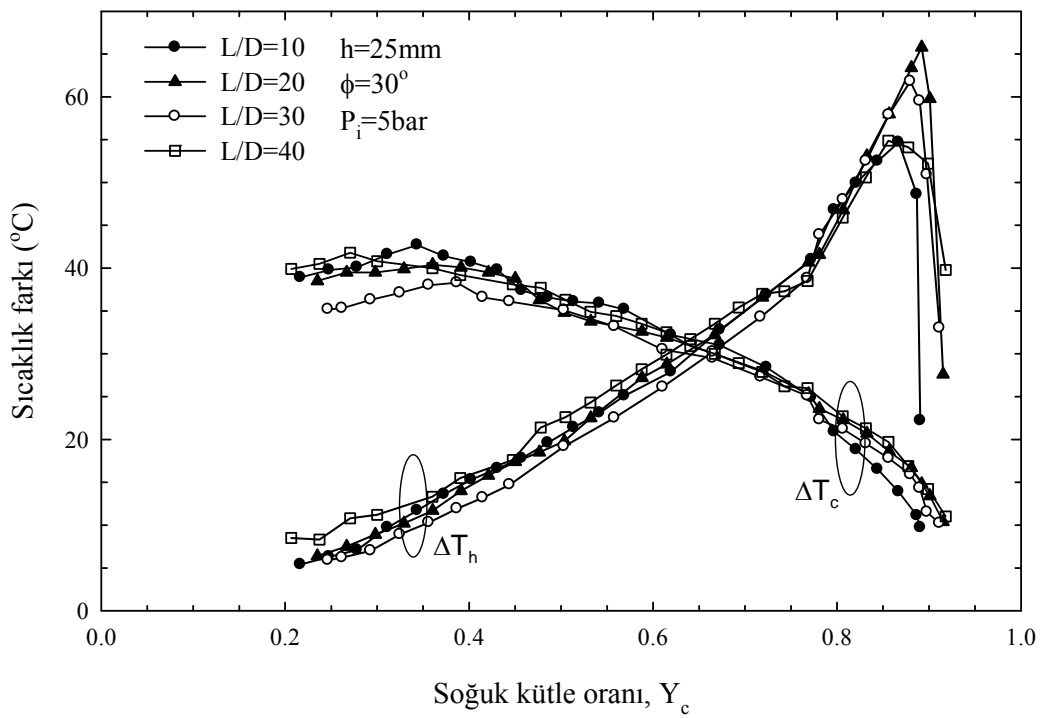
Şekil 215. $h=30\text{mm}$, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



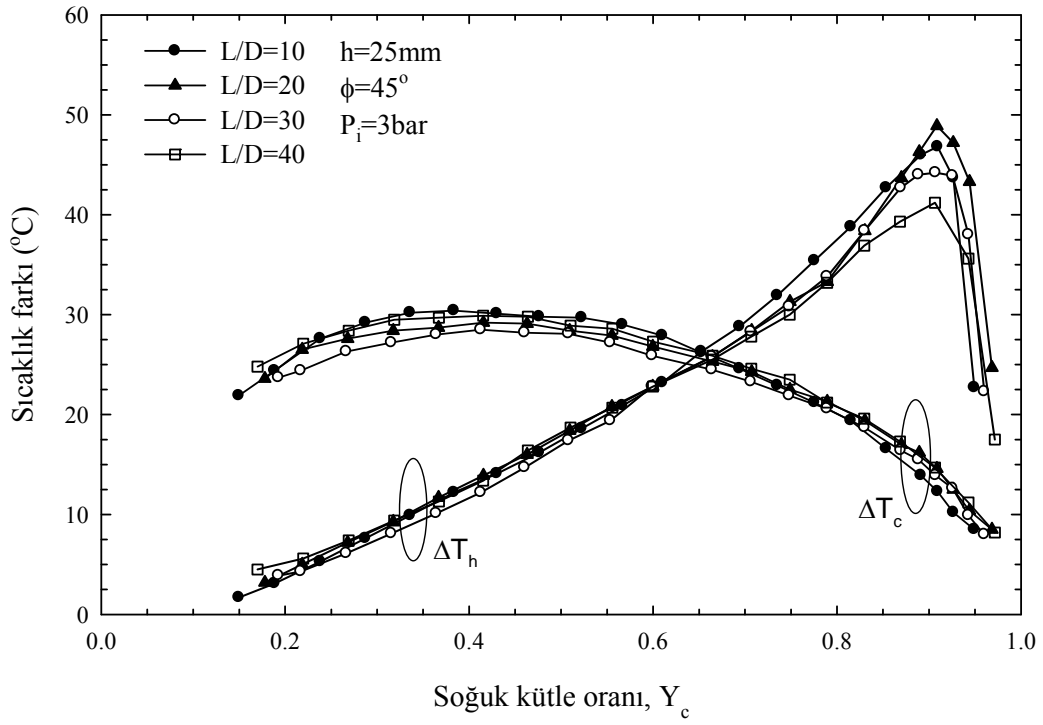
Şekil 216. $h=25\text{mm}$, $\phi=30^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



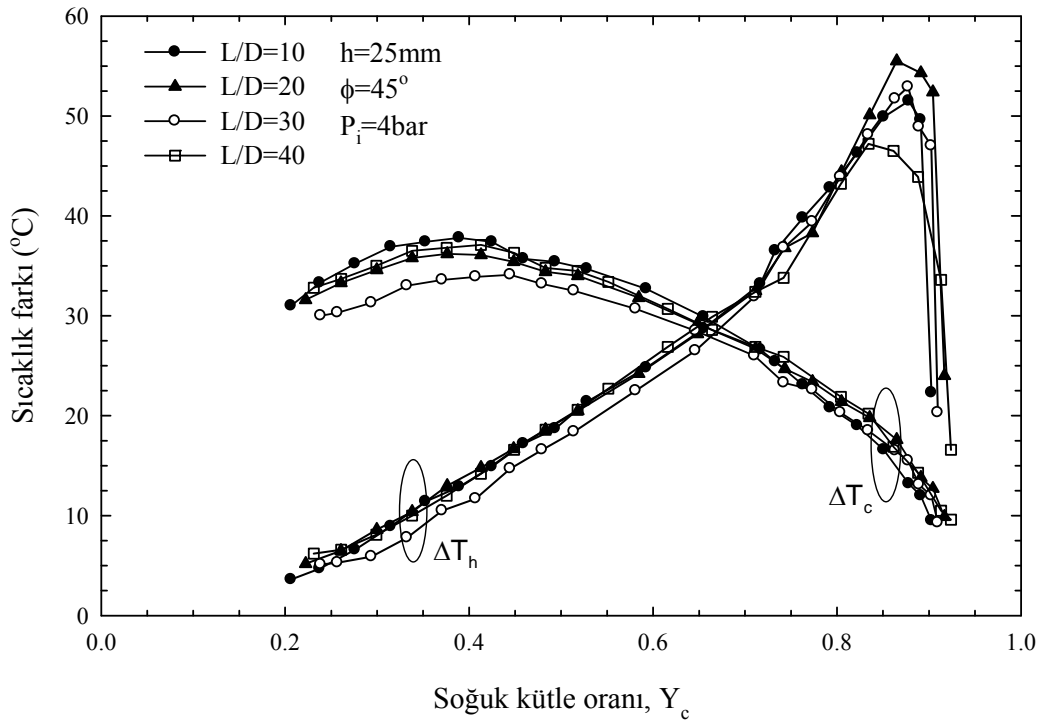
Şekil 217. $h=25\text{mm}$, $\phi=30^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



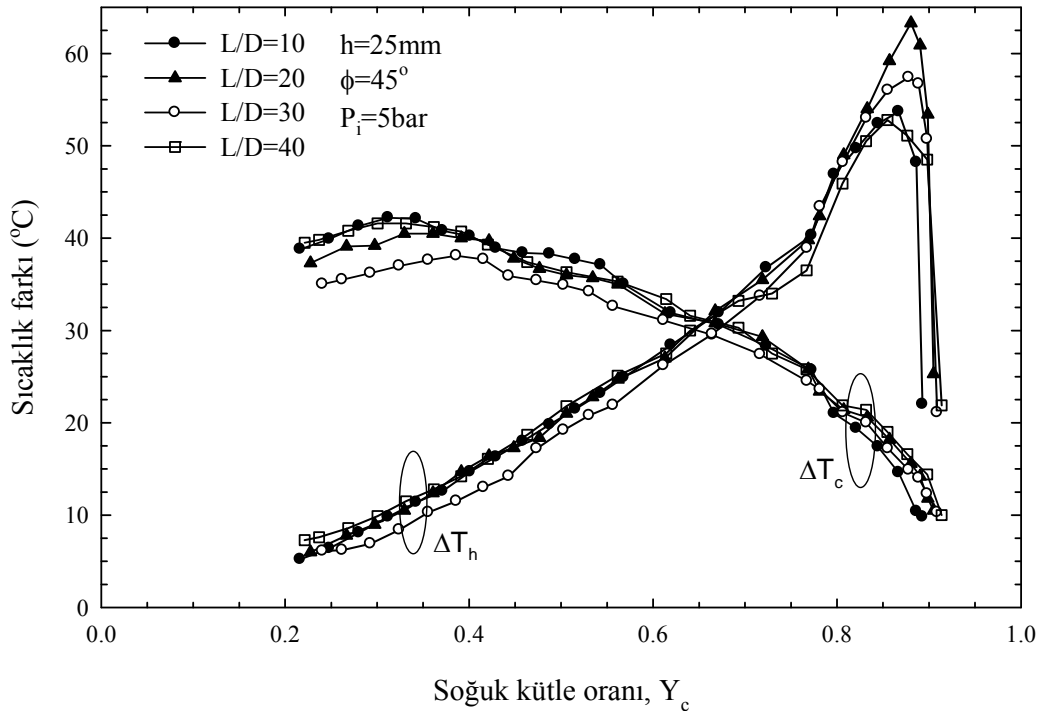
Şekil 218. $h=25\text{mm}$, $\phi=30^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



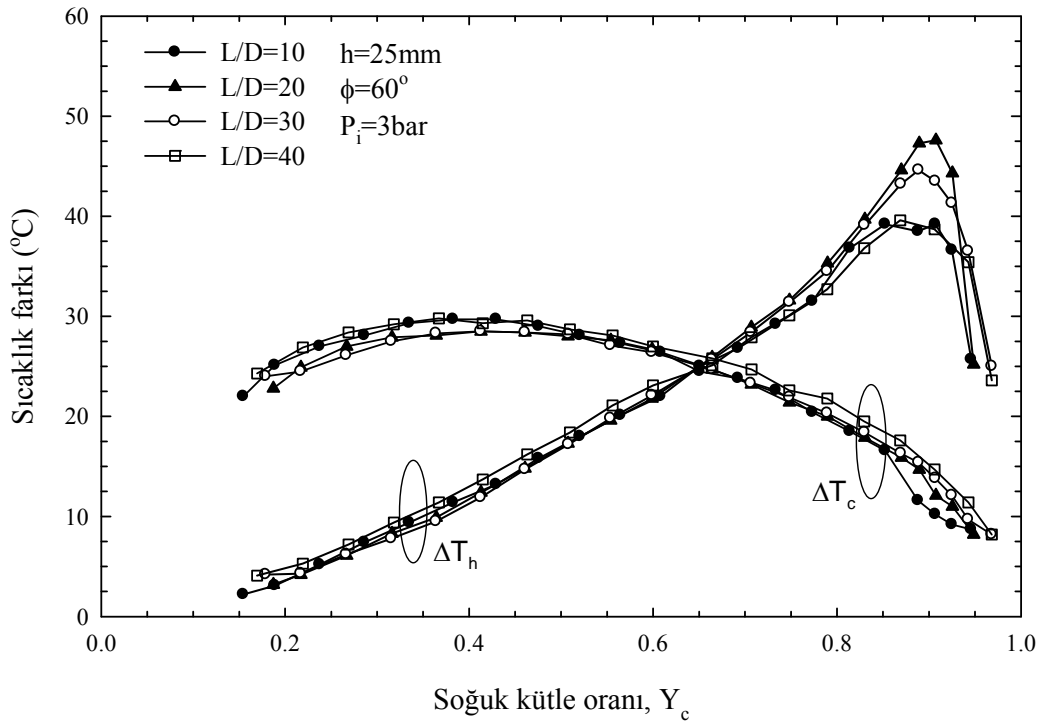
Şekil 219. $h=25\text{mm}$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



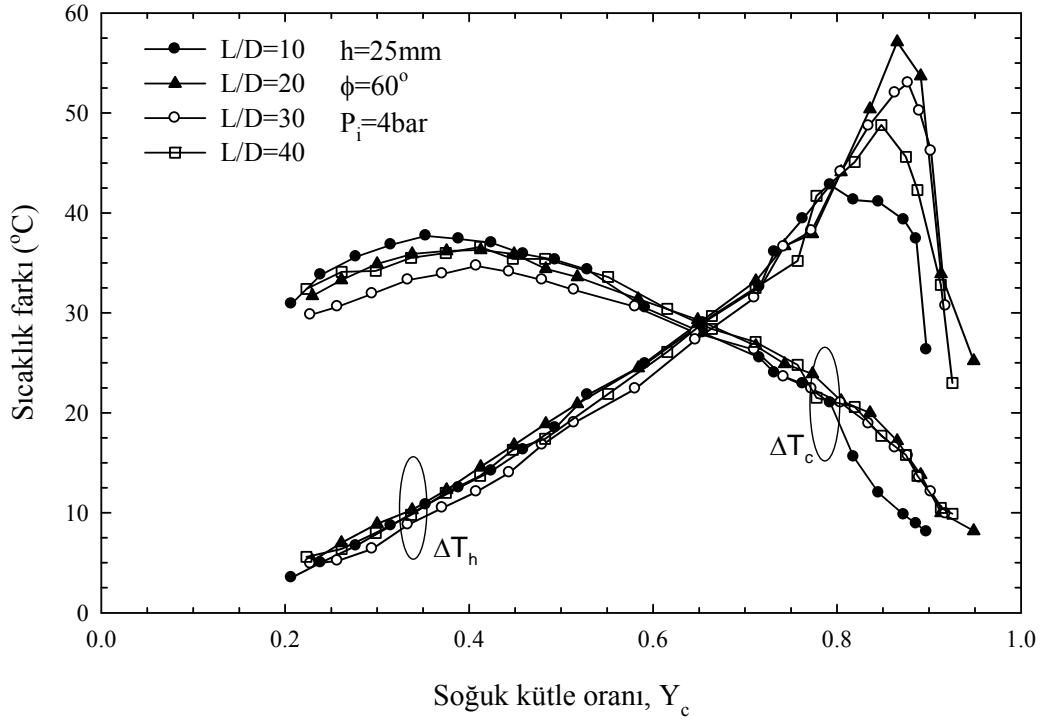
Şekil 220. $h=25\text{mm}$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



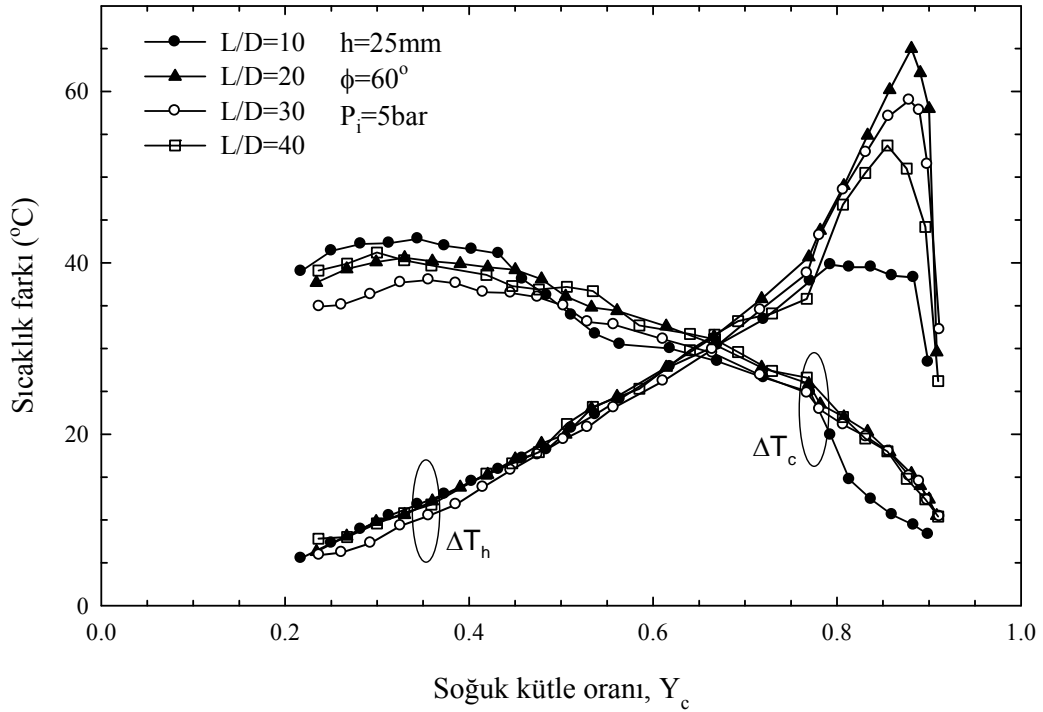
Şekil 221. $h=25\text{mm}$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



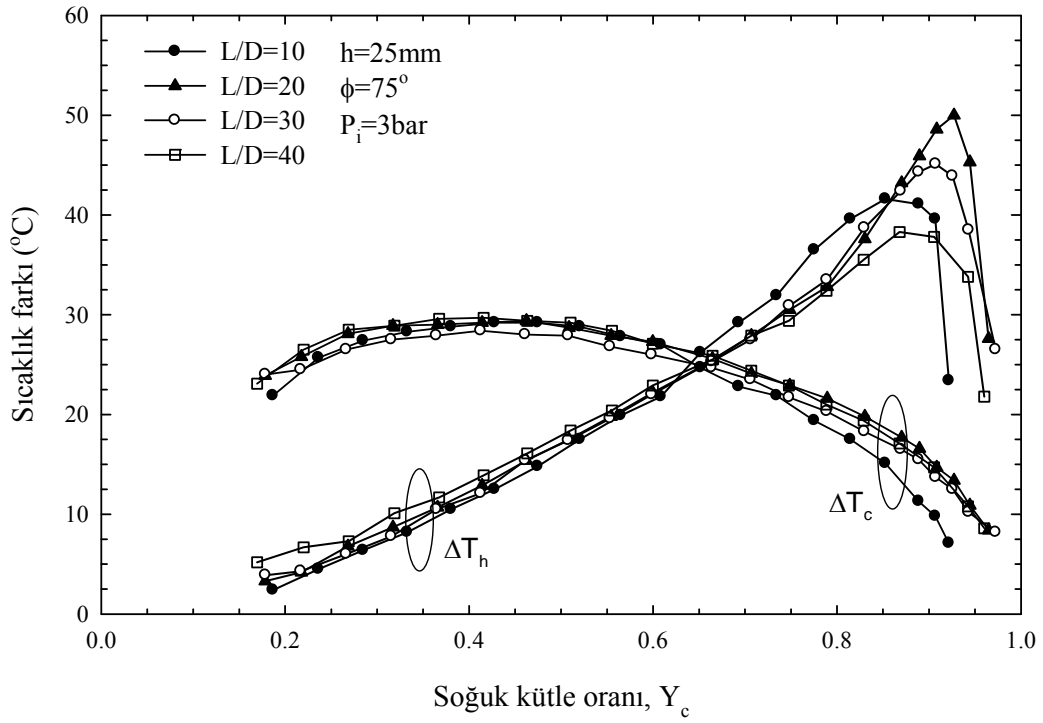
Şekil 222. $h=25\text{mm}$, $\phi=60^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



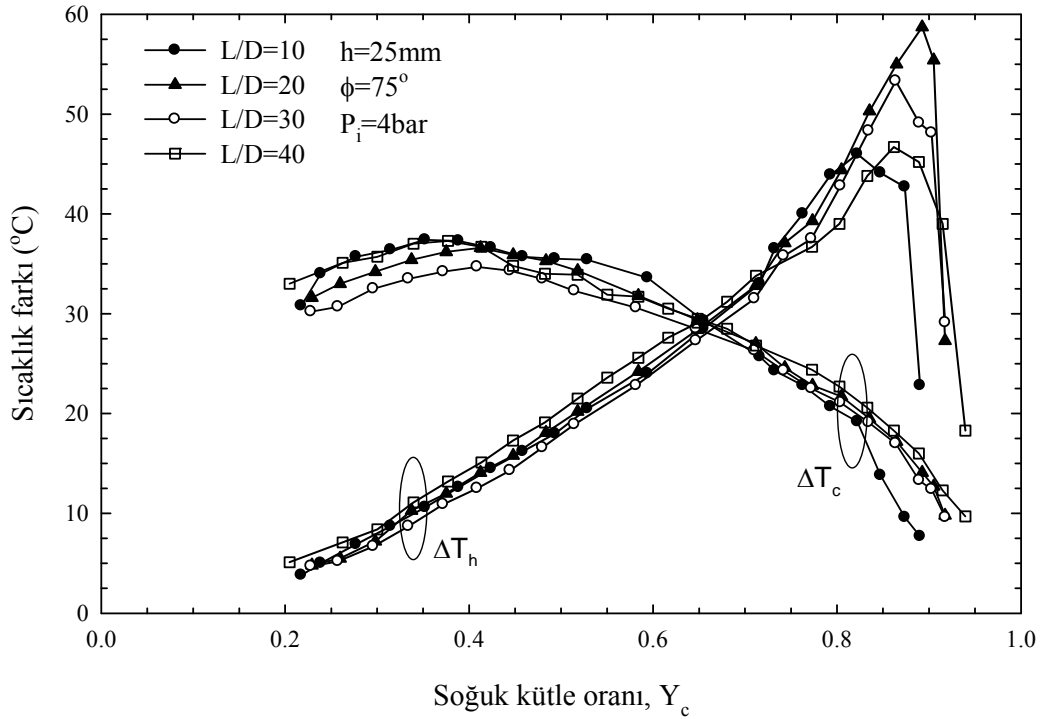
Şekil 223. $h=25\text{mm}$, $\phi=60^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



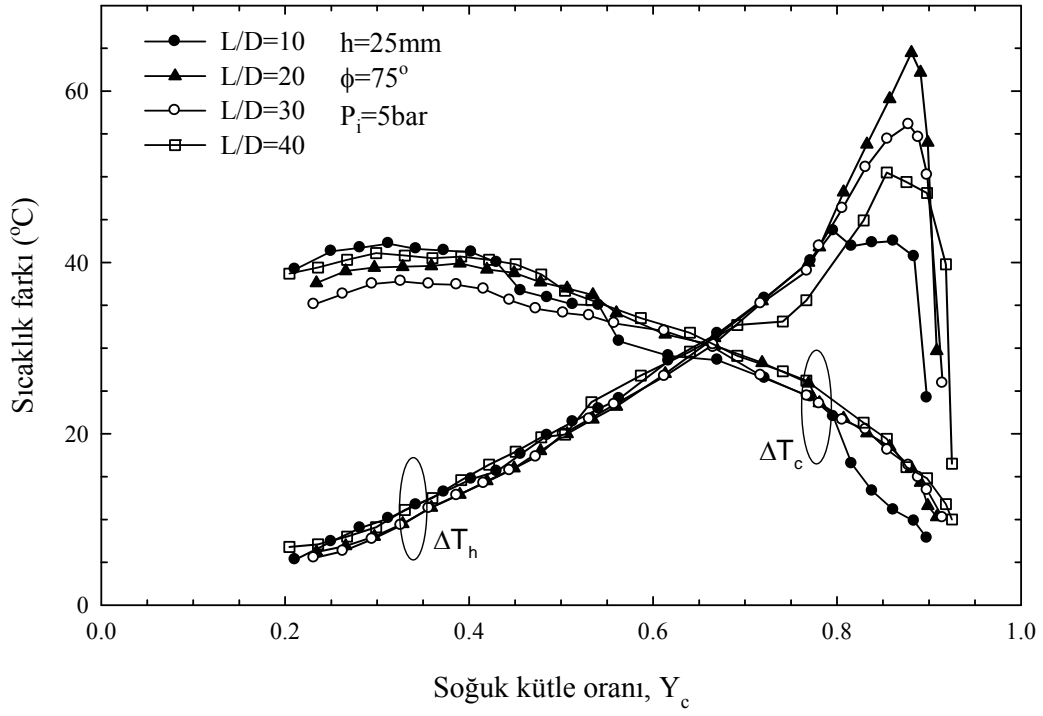
Şekil 224. $h=25\text{mm}$, $\phi=60^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



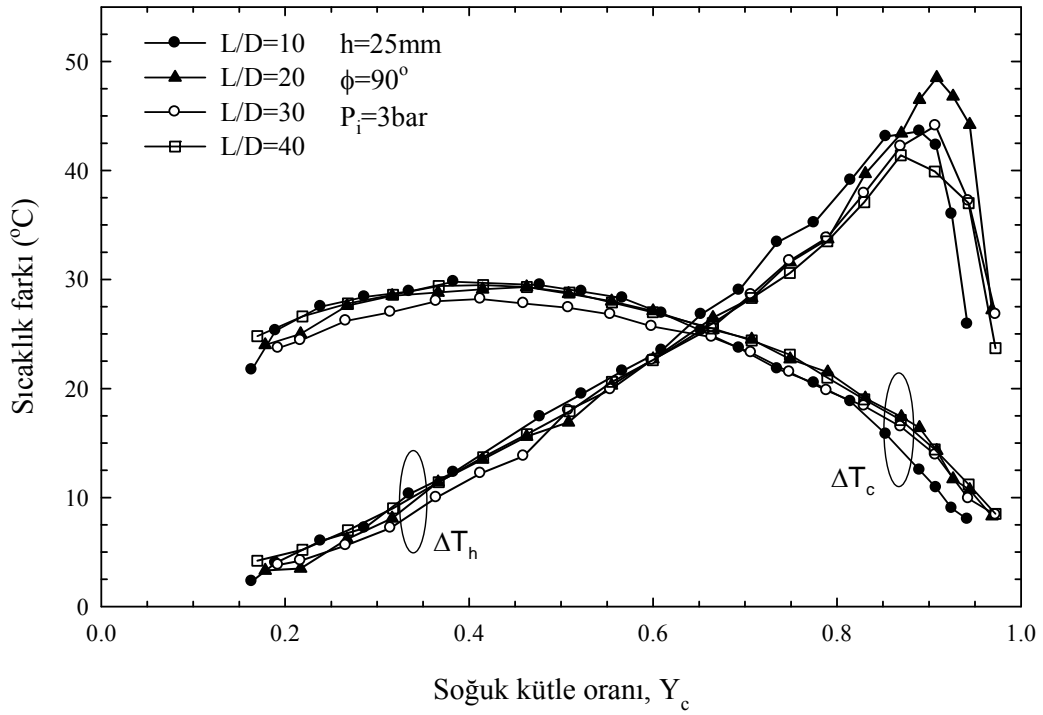
Şekil 225. $h=25\text{mm}$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



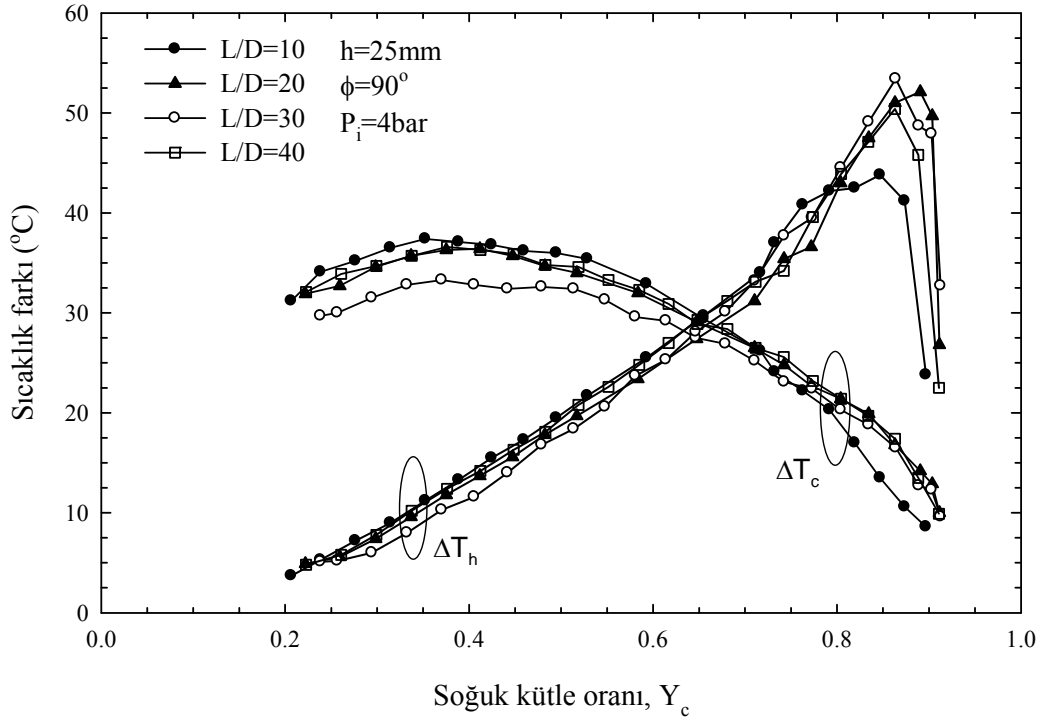
Şekil 226. $h=25\text{mm}$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



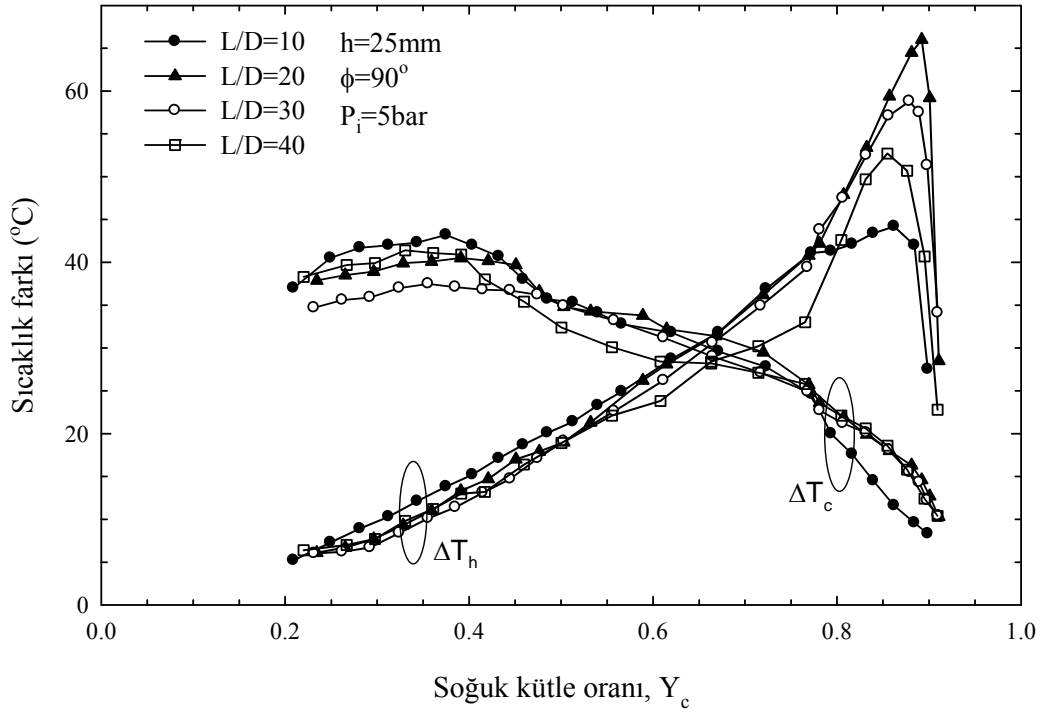
Şekil 227. $h=25\text{mm}$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



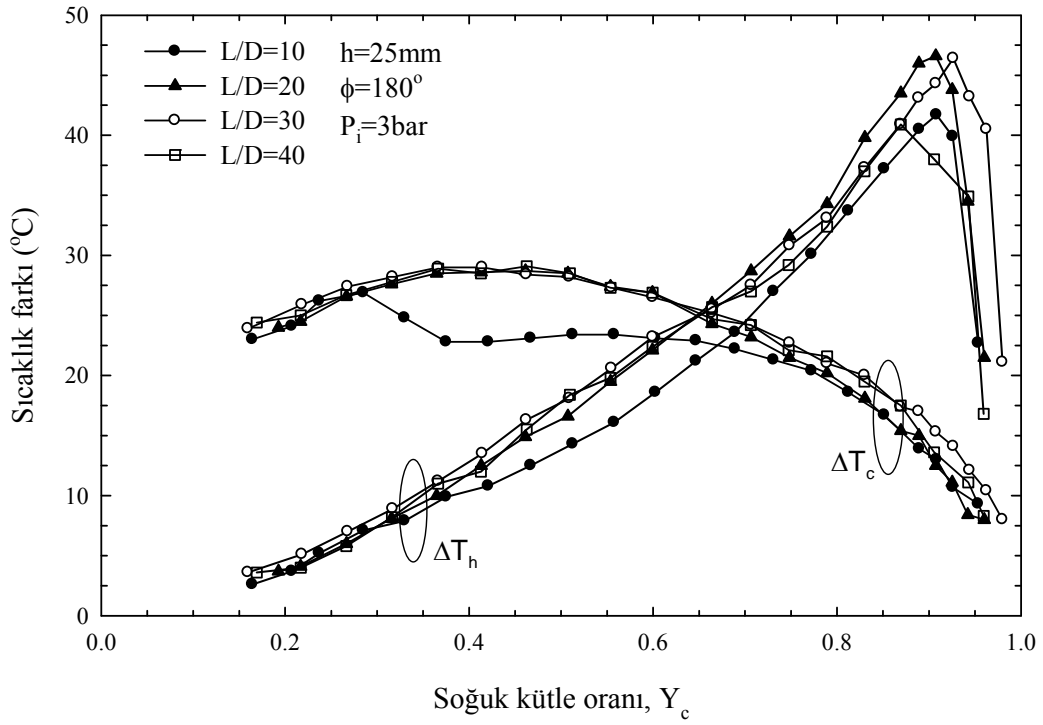
Şekil 228. $h=25\text{mm}$, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



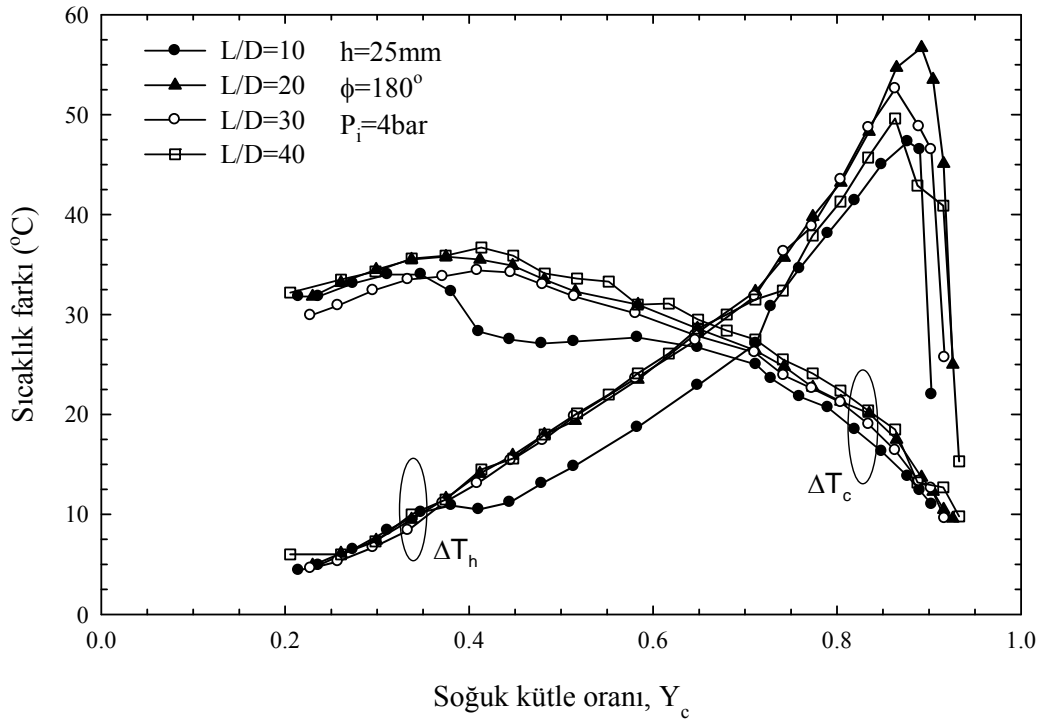
Şekil 229. $h=25\text{mm}$, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



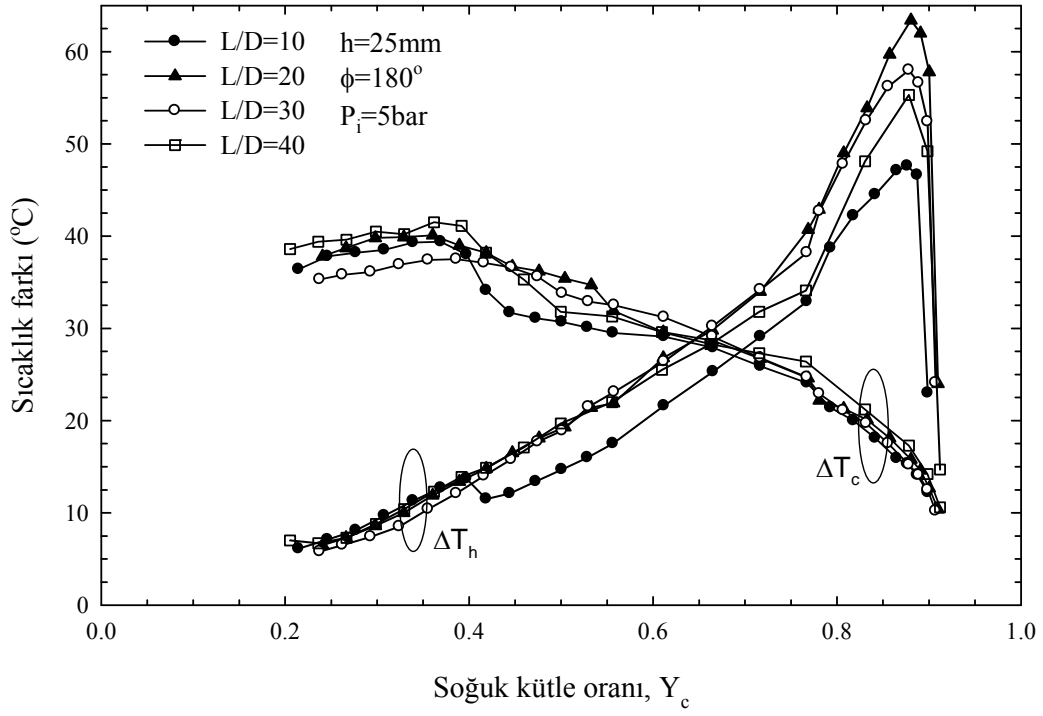
Şekil 230. $h=25\text{mm}$, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



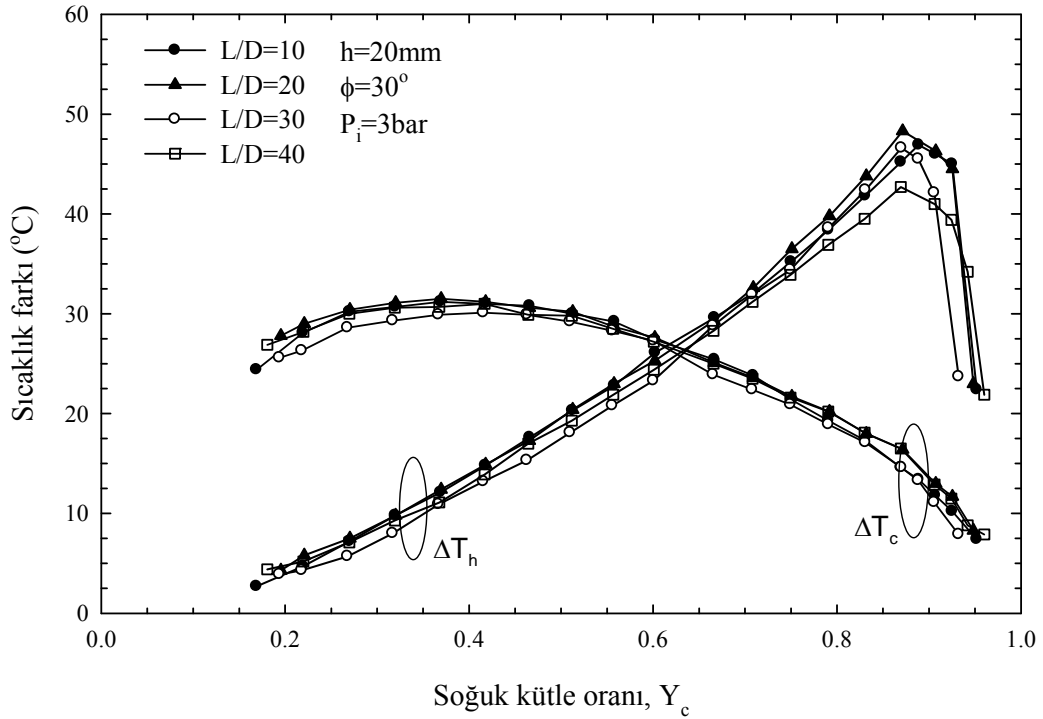
Şekil 231. $h=25\text{mm}$, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



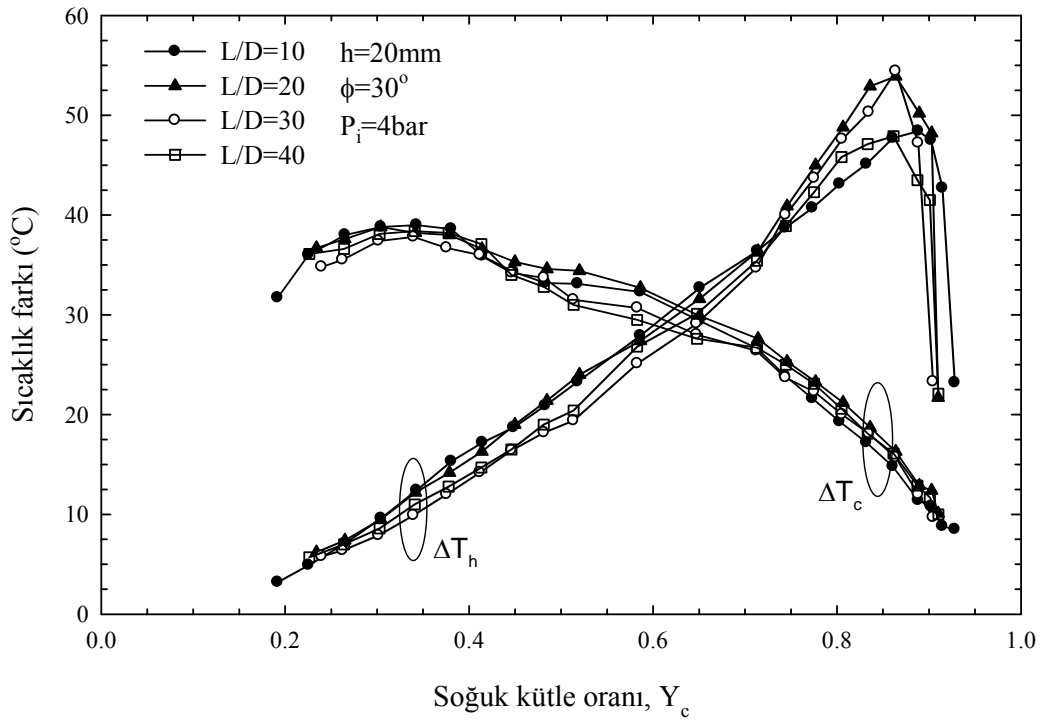
Şekil 232. $h=25\text{mm}$, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



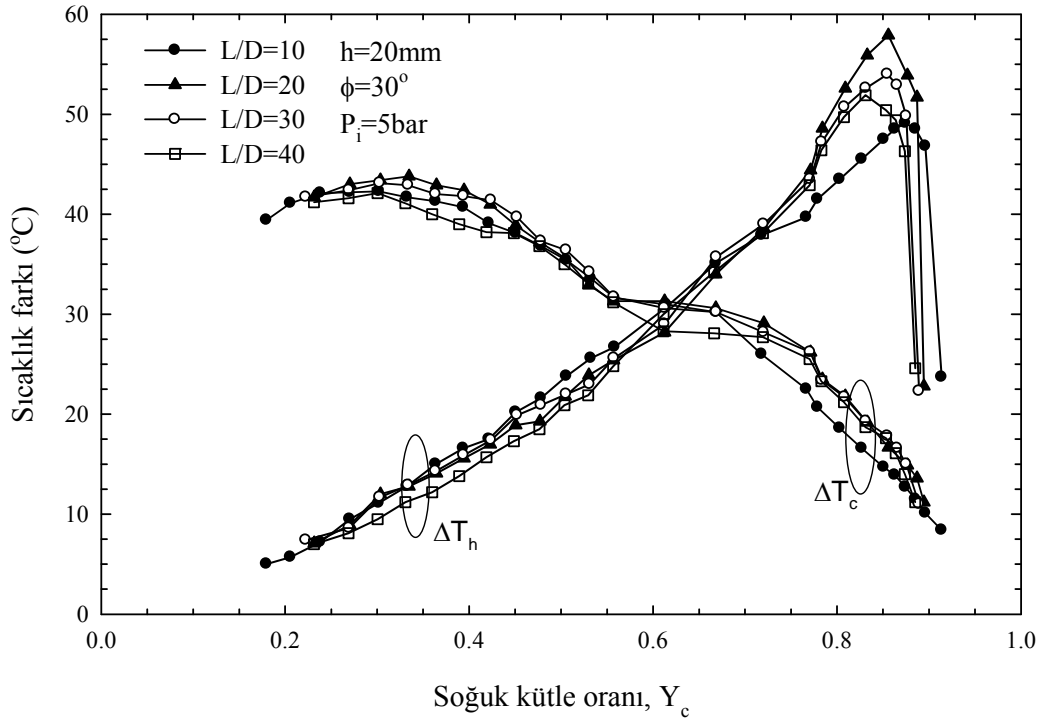
Şekil 233. $h=25\text{mm}$, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



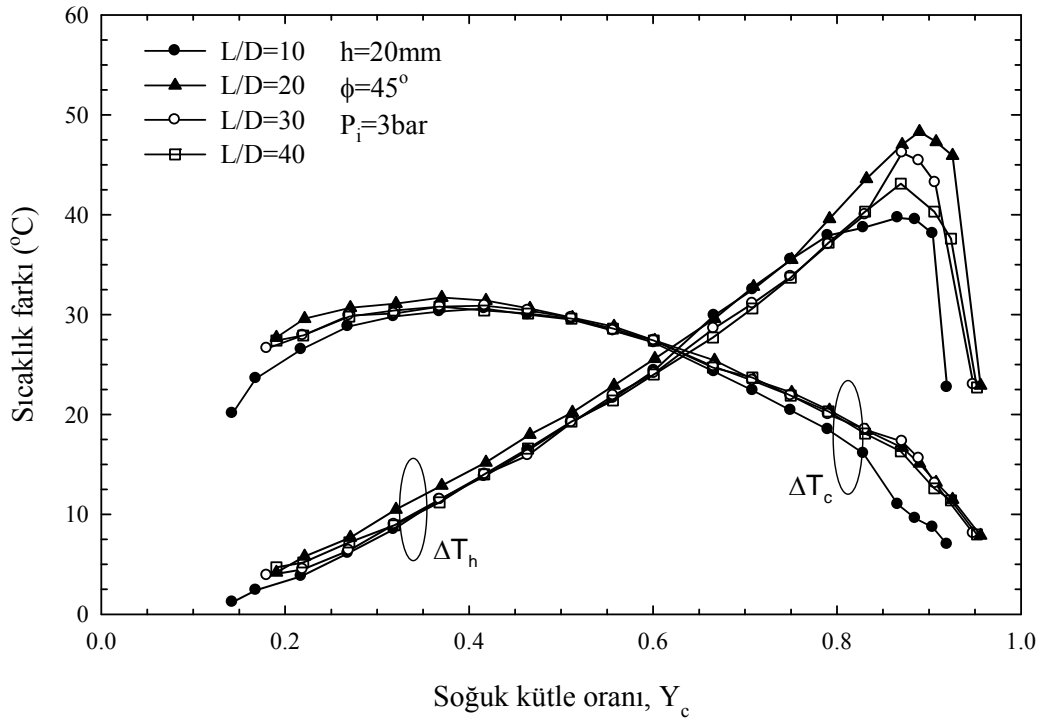
Şekil 234. $h=20\text{mm}$, $\phi=30^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



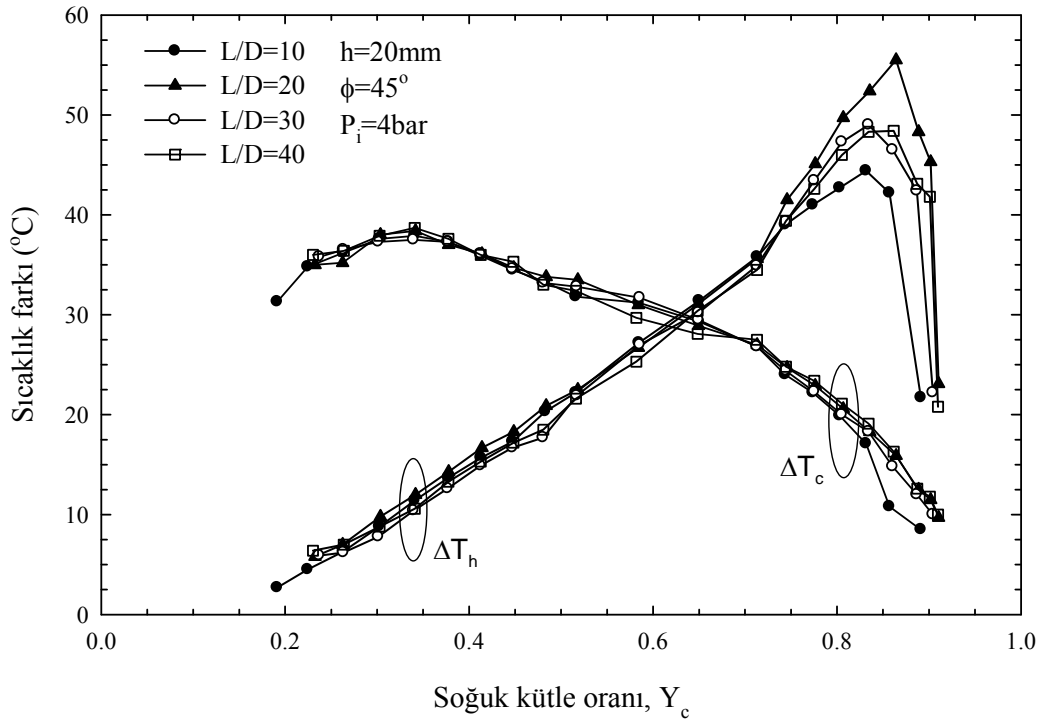
Şekil 235. $h=20\text{mm}$, $\phi=30^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



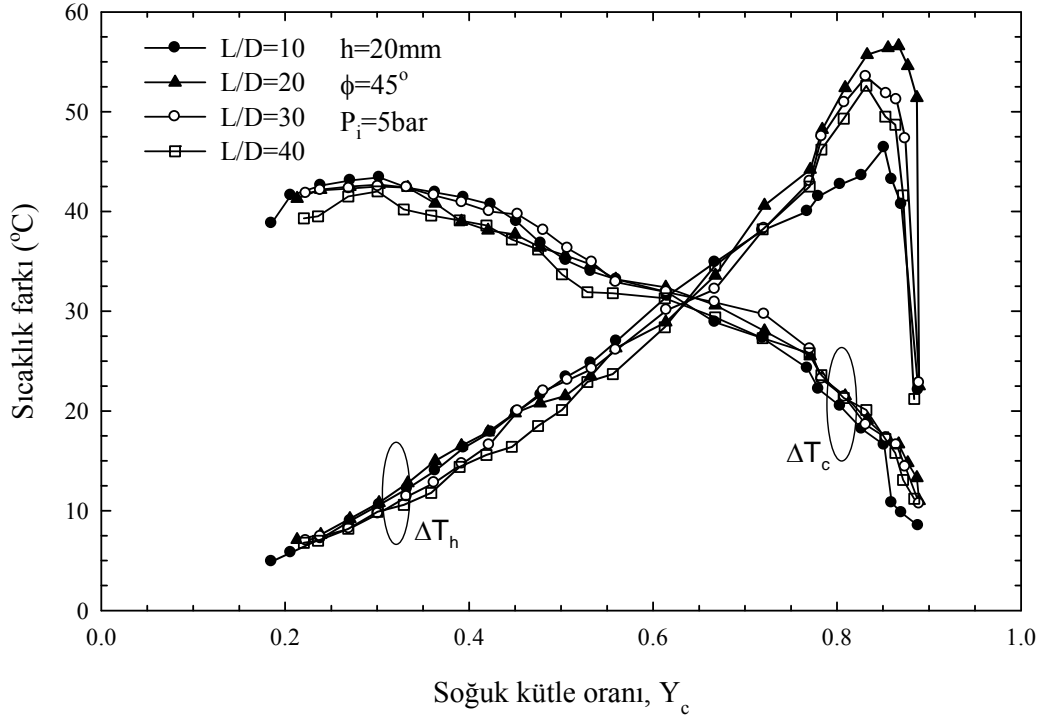
Şekil 236. $h=20\text{mm}$, $\phi=30^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



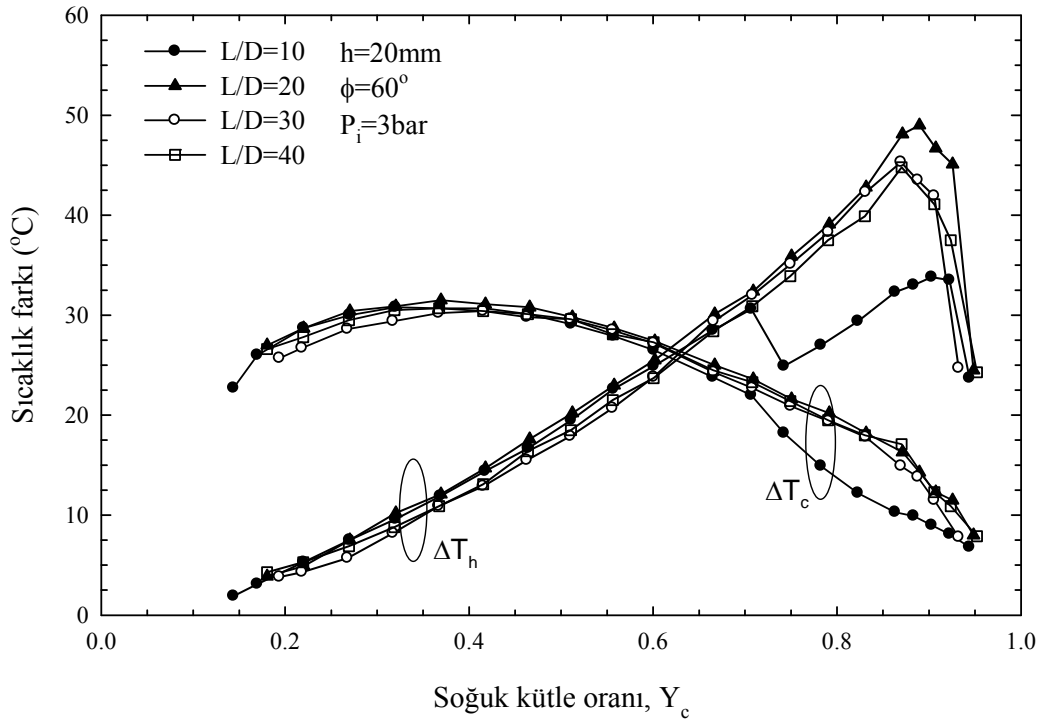
Şekil 237. $h=20\text{mm}$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



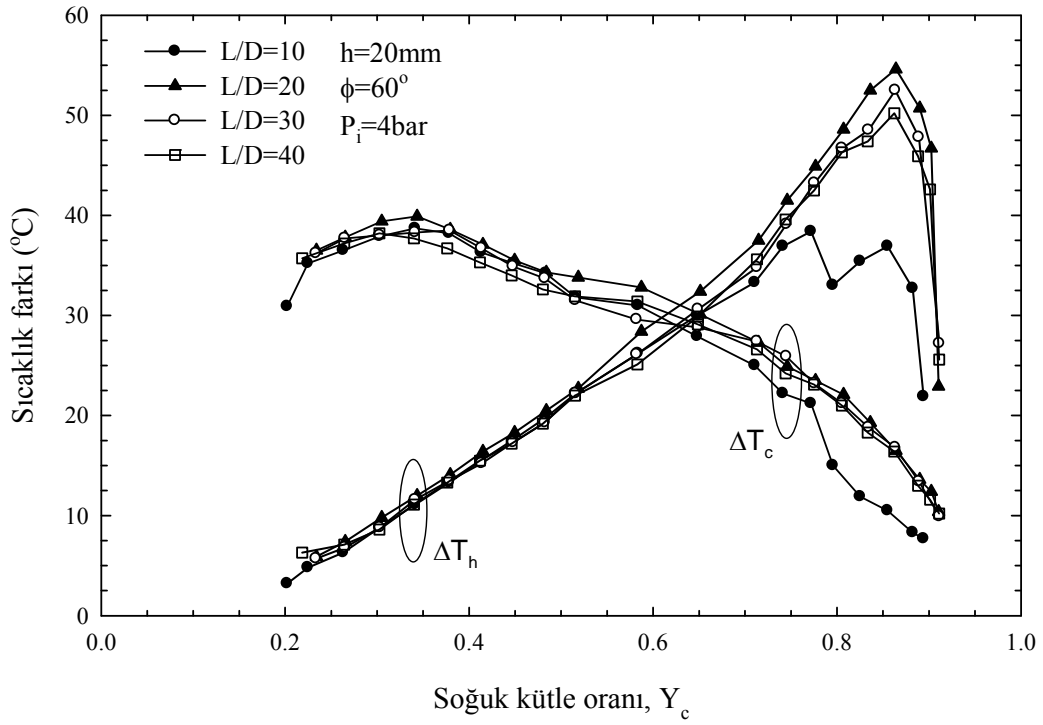
Şekil 238. $h=20\text{mm}$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



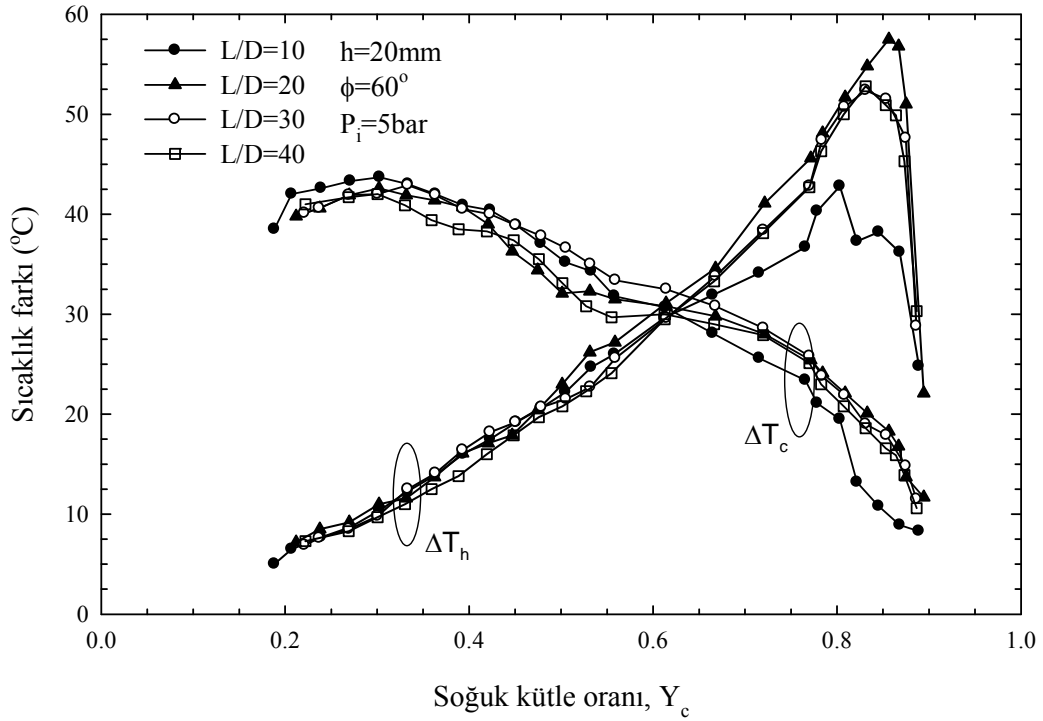
Şekil 239. $h=20\text{mm}$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



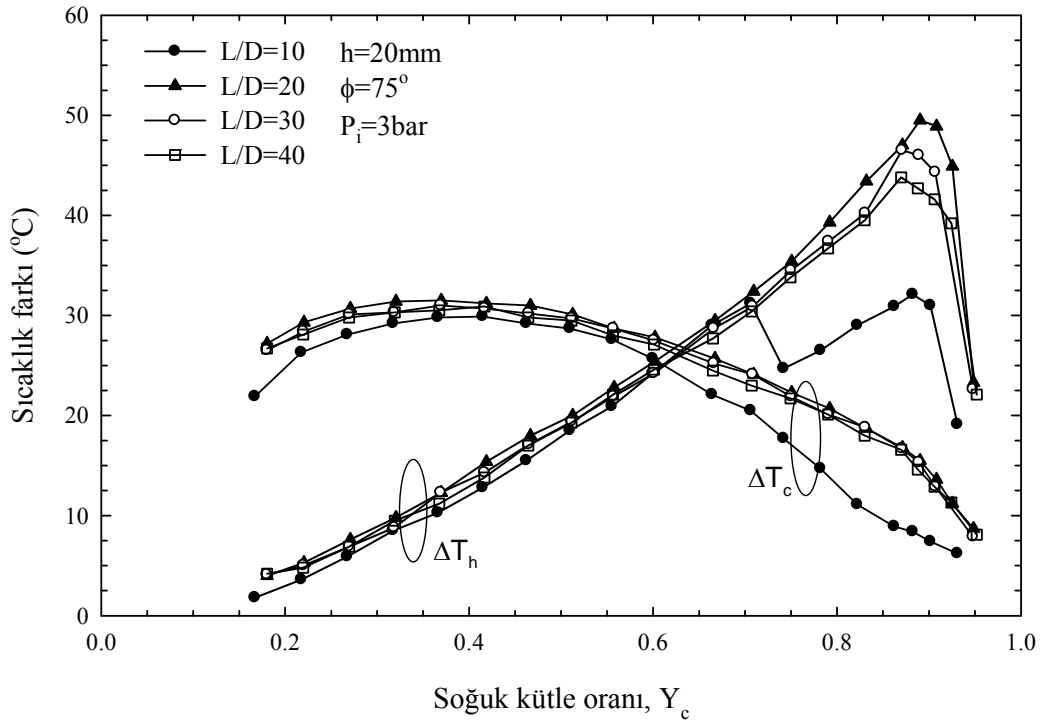
Şekil 240. $h=20\text{mm}$, $\phi=60^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



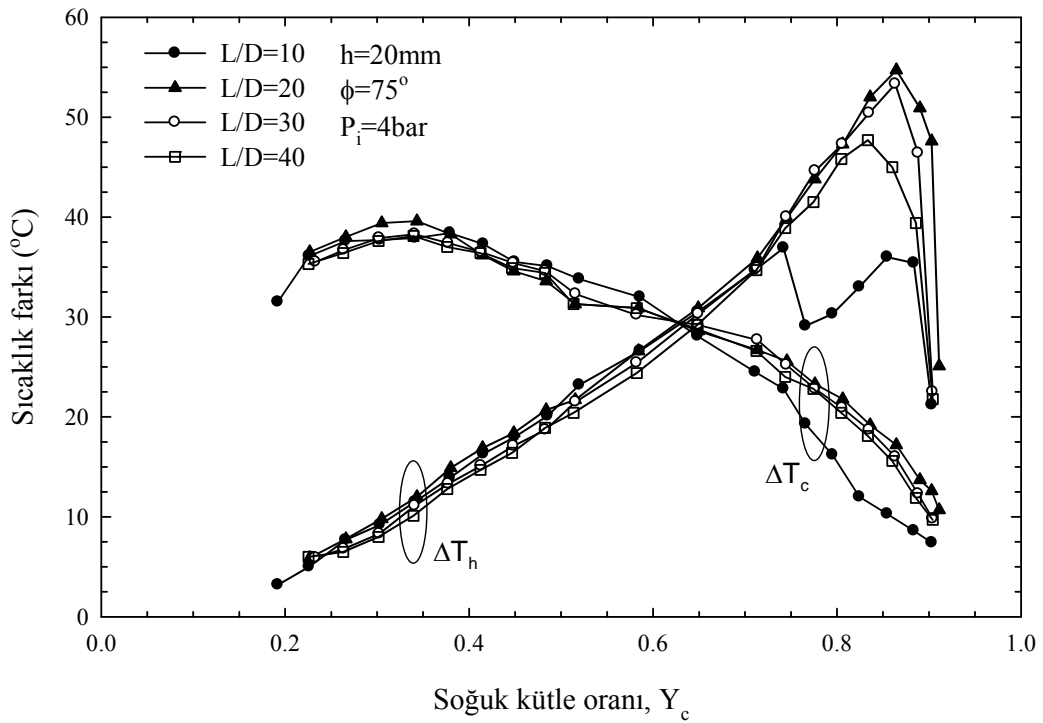
Şekil 241. h=20mm, φ=60° ve P_i=4bar için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



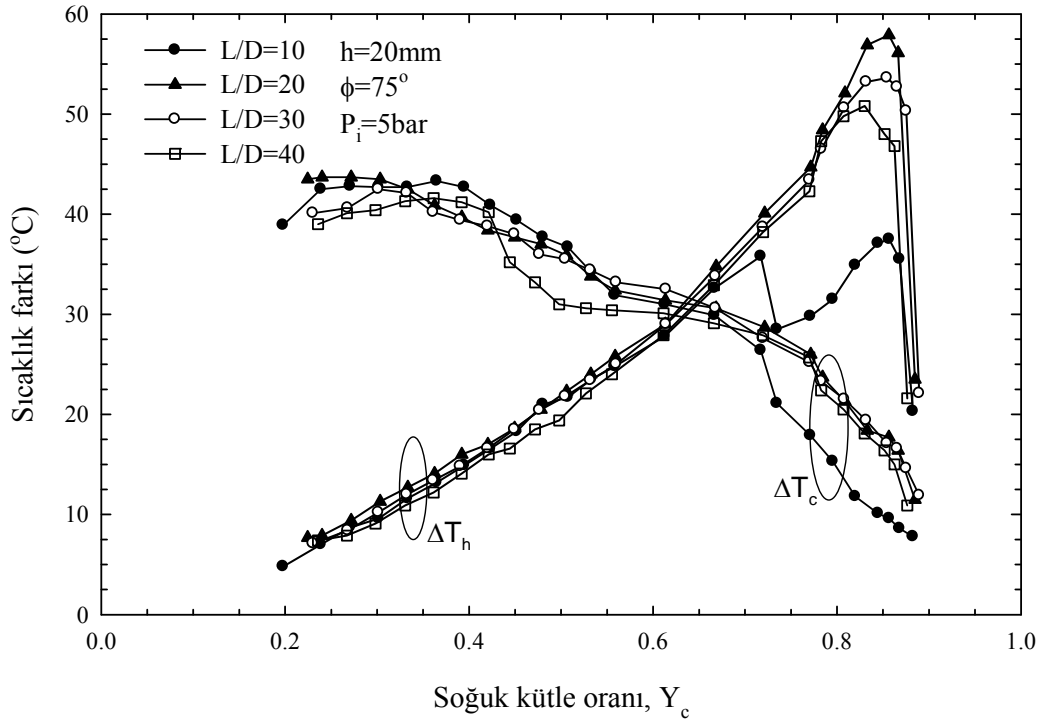
Şekil 242. h=20mm, φ=60° ve P_i=5bar için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



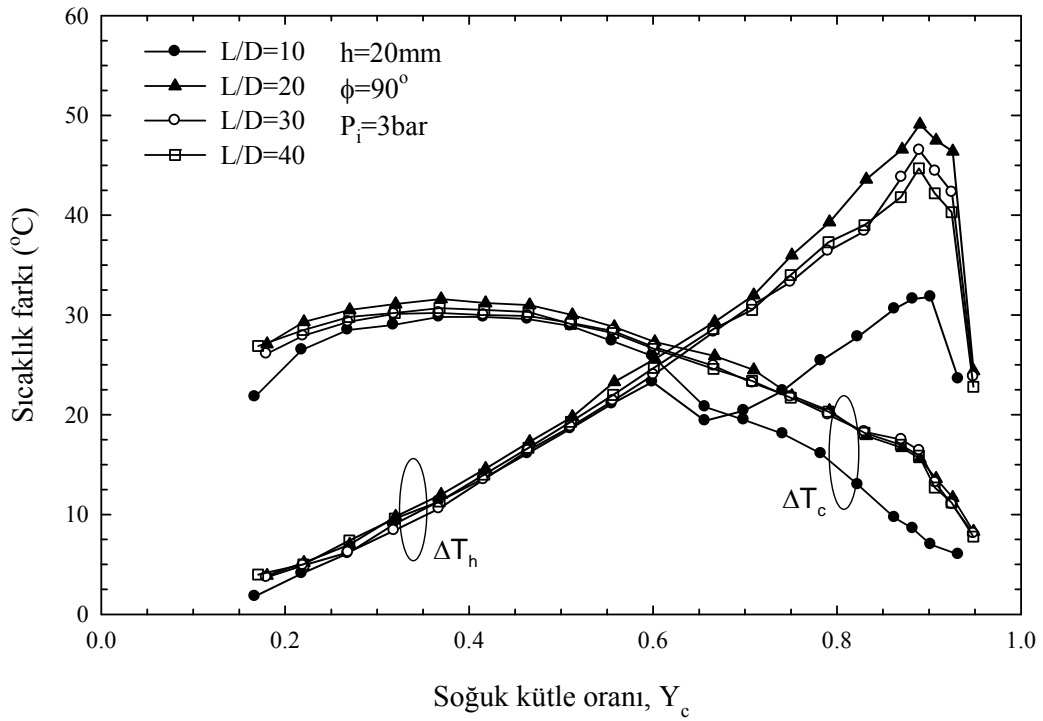
Şekil 243. $h=20\text{mm}$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



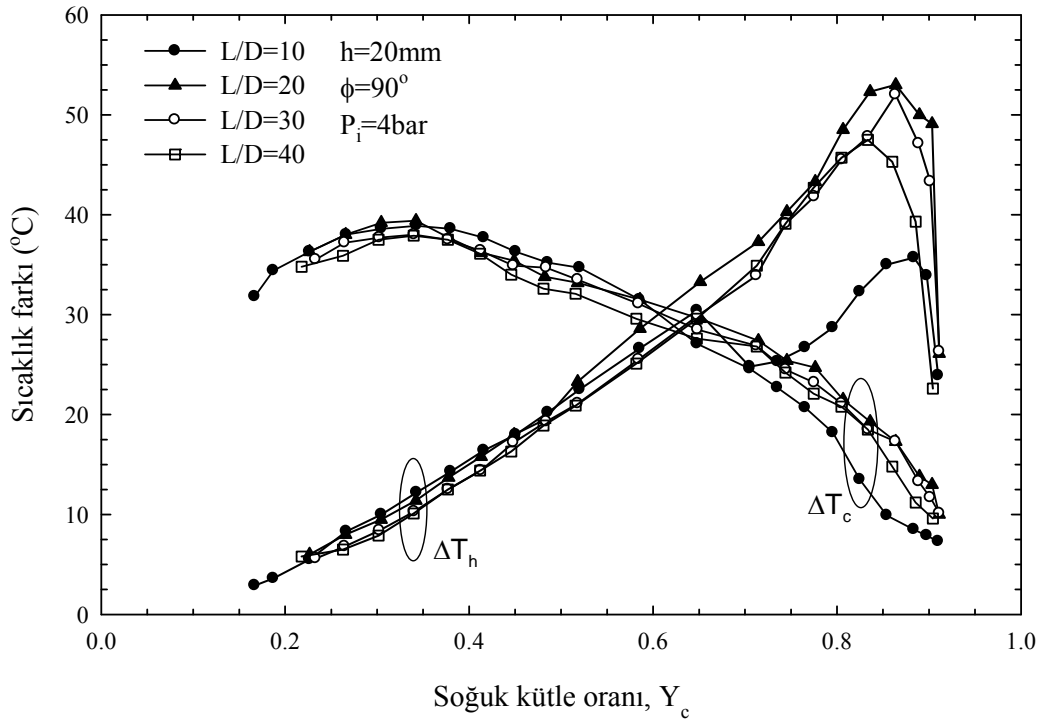
Şekil 244. $h=20\text{mm}$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



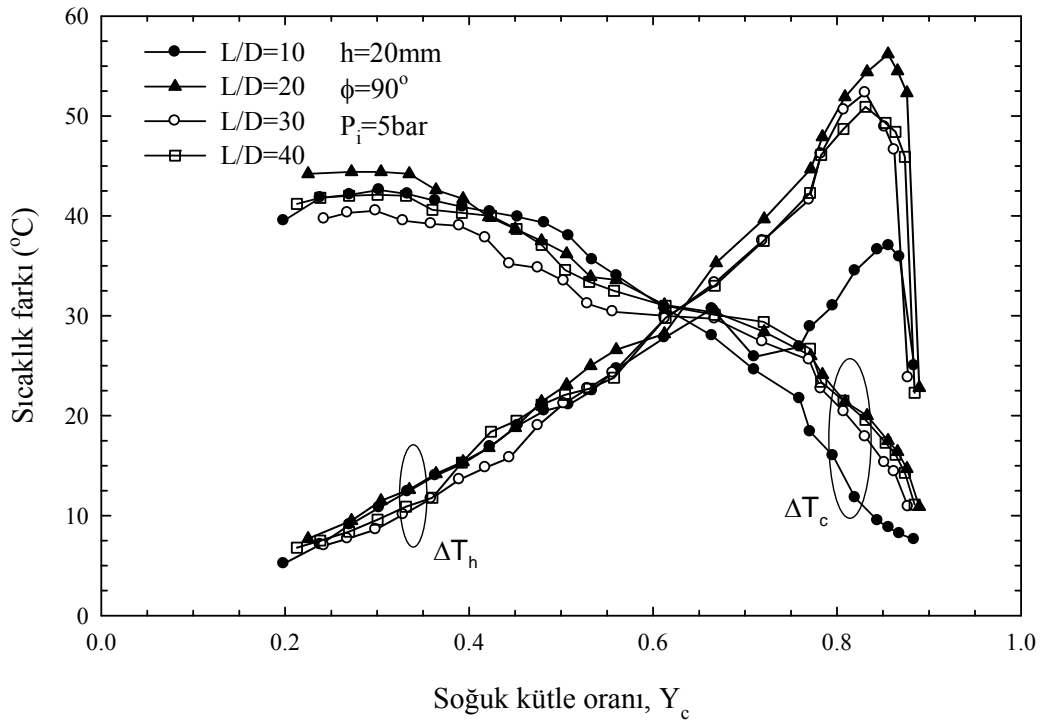
Şekil 245. $h=20\text{mm}$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



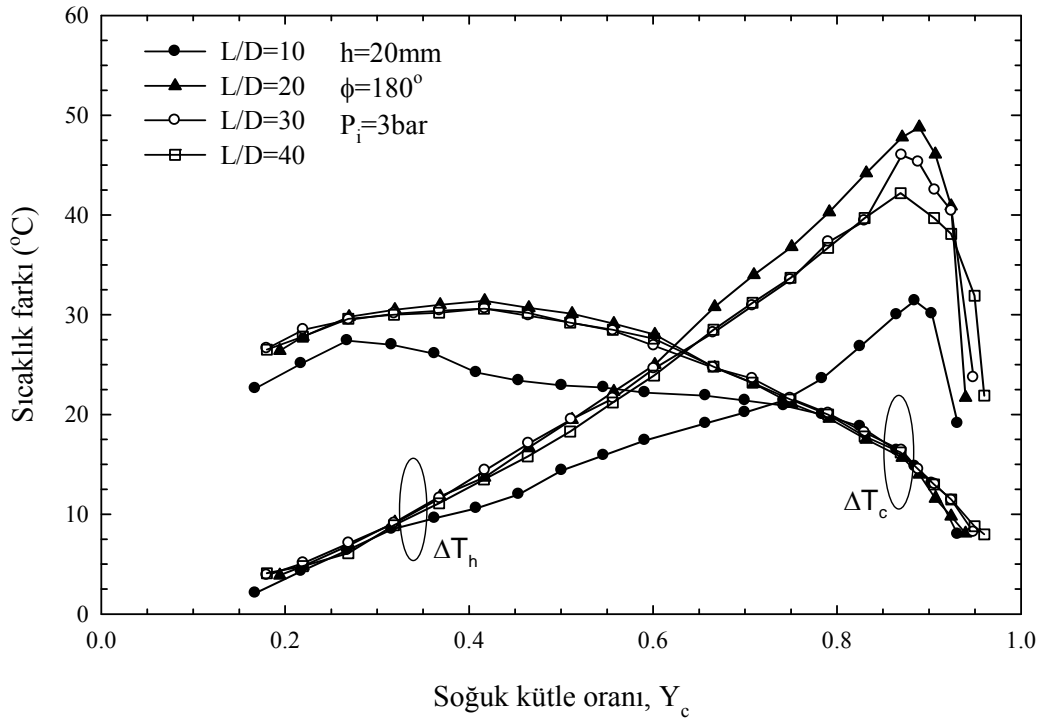
Şekil 246. $h=20\text{mm}$, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



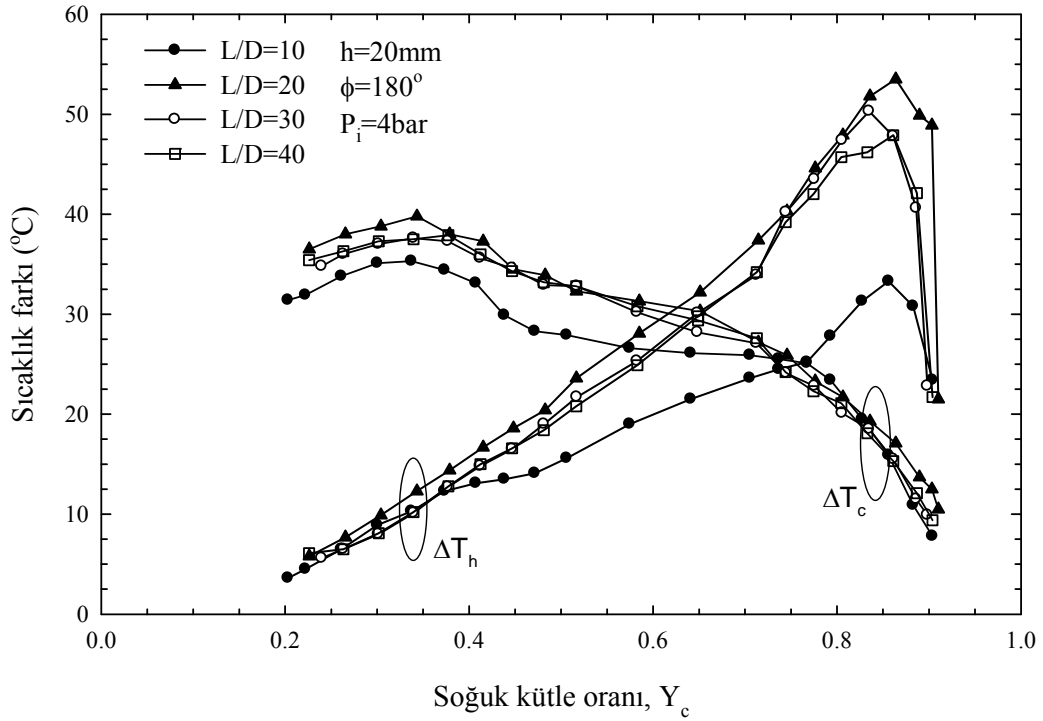
Şekil 247. $h=20\text{mm}$, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



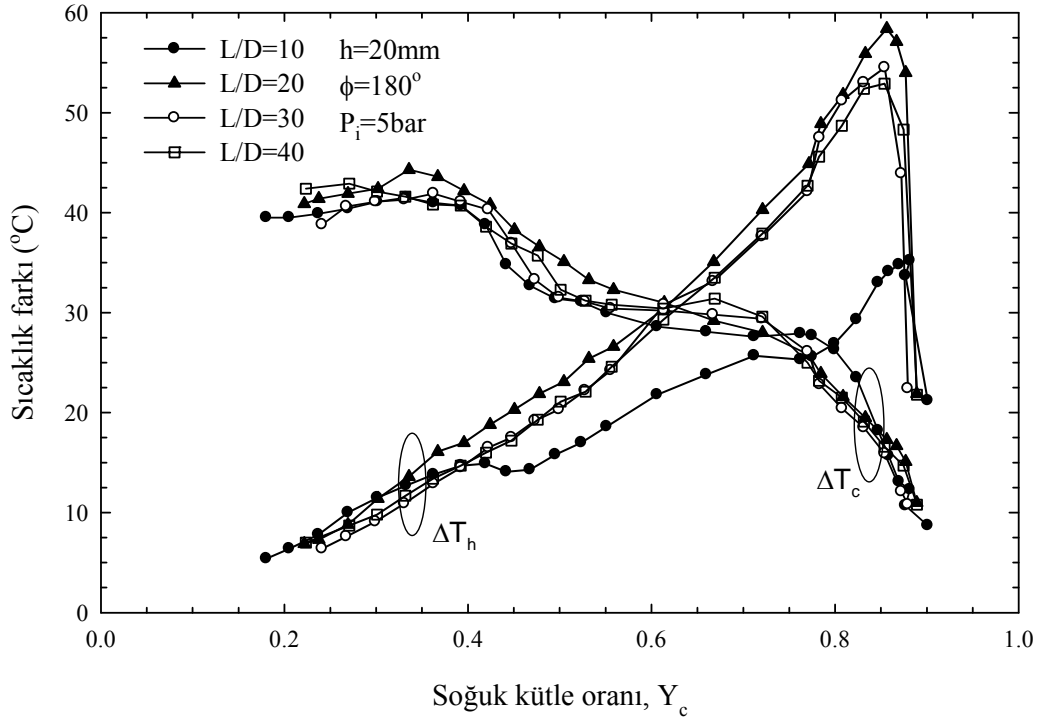
Şekil 248. $h=20\text{mm}$, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



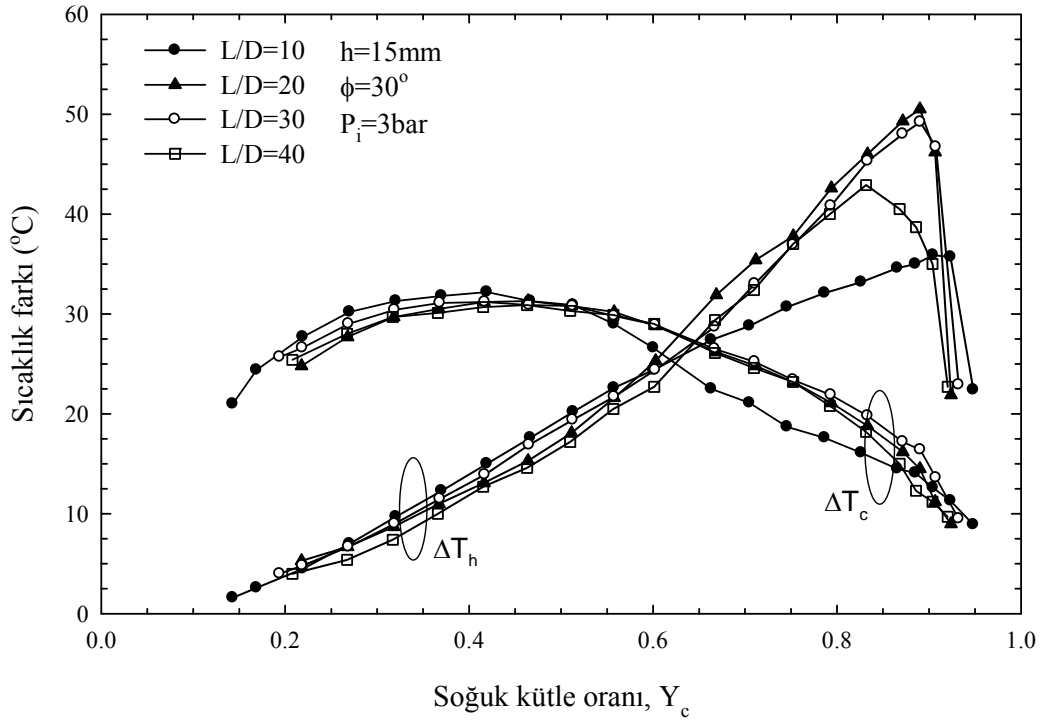
Şekil 249. $h=20\text{mm}$, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



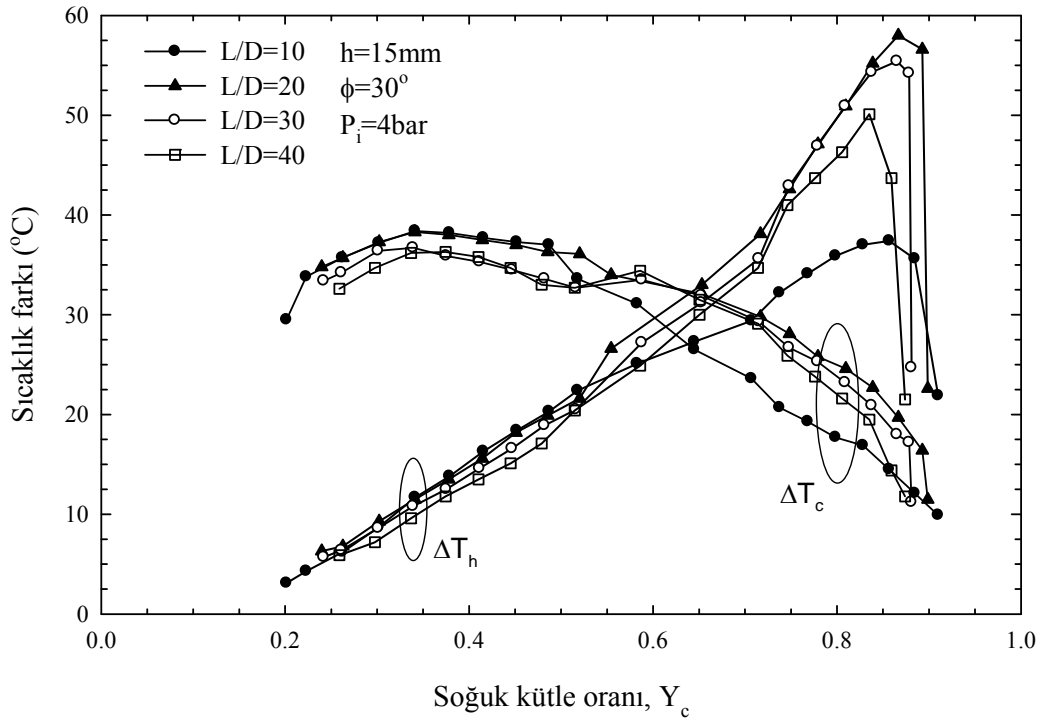
Şekil 250. $h=20\text{mm}$, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



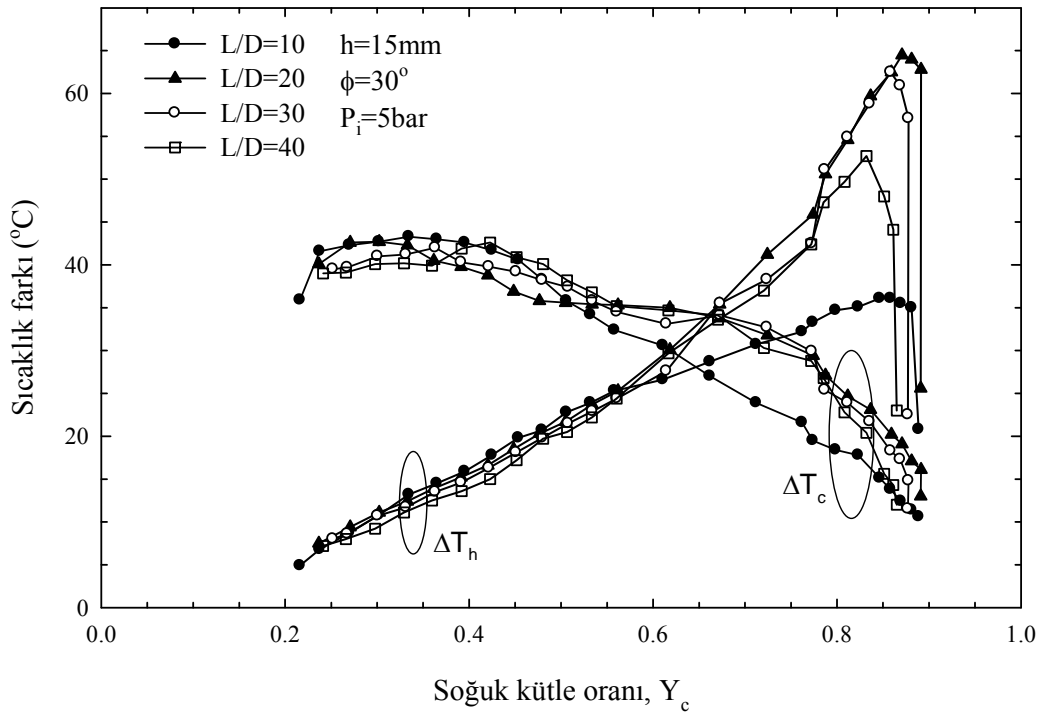
Şekil 251. $h=20\text{mm}$, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



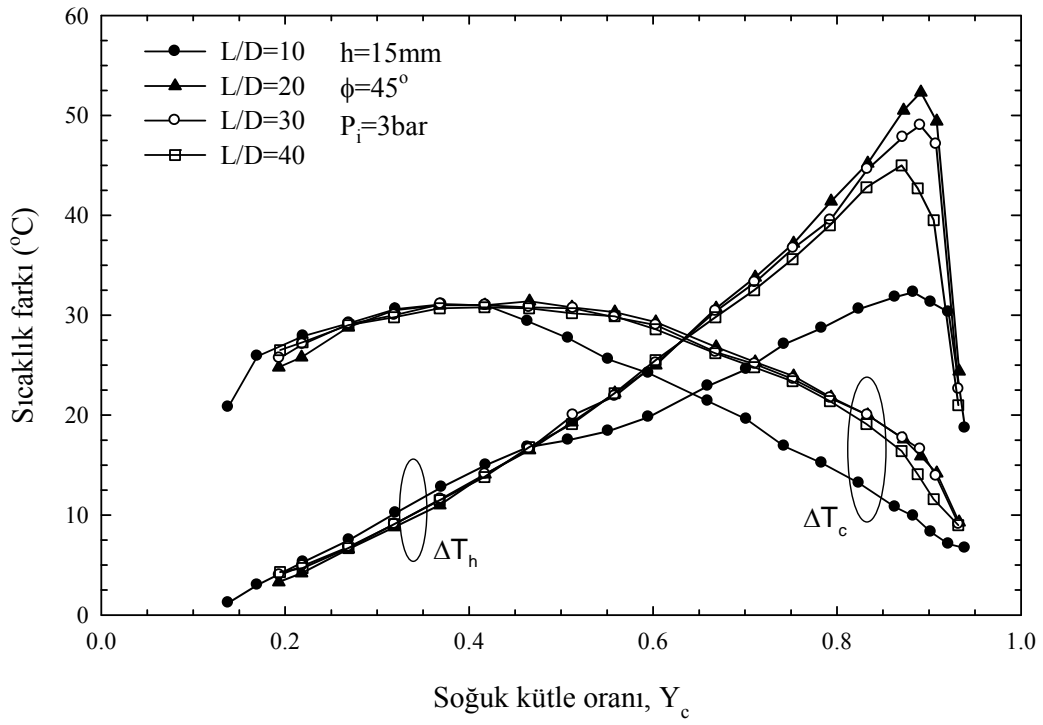
Şekil 252. $h=15\text{mm}$, $\phi=30^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



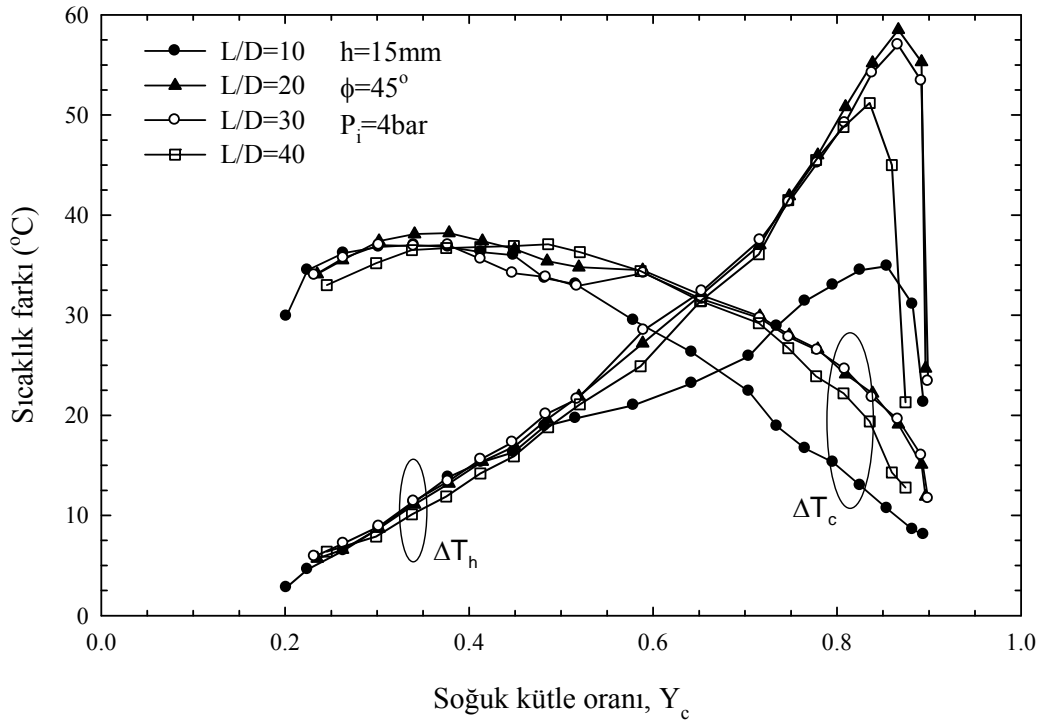
Şekil 253. $h=15\text{mm}$, $\phi=30^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



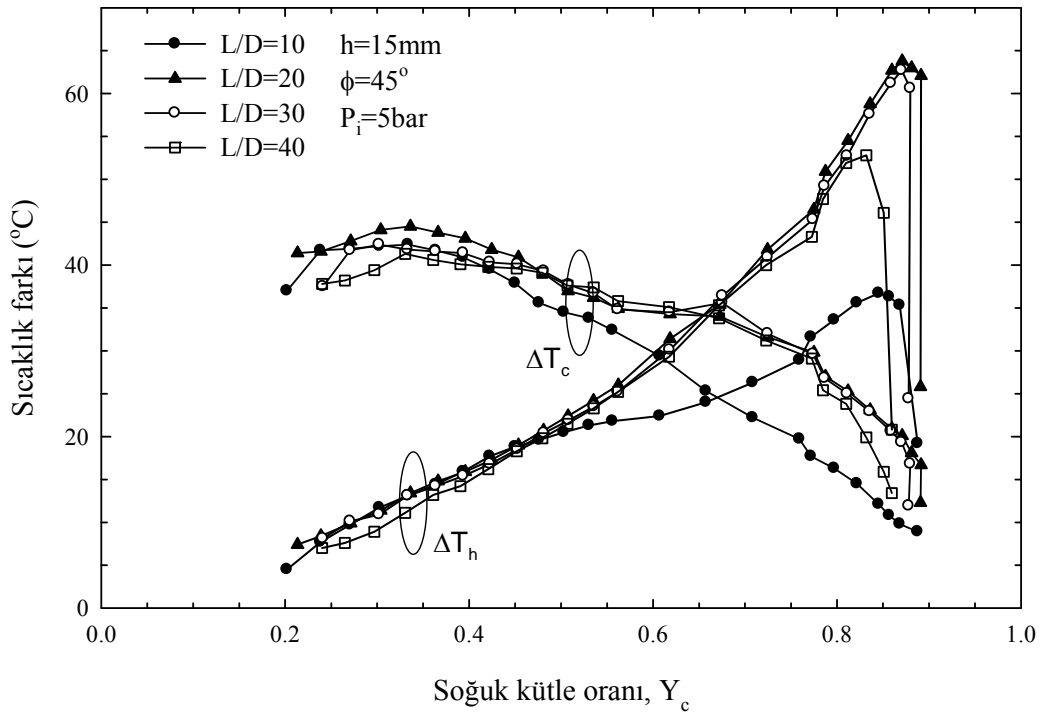
Şekil 254. $h=15\text{mm}$, $\phi=30^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



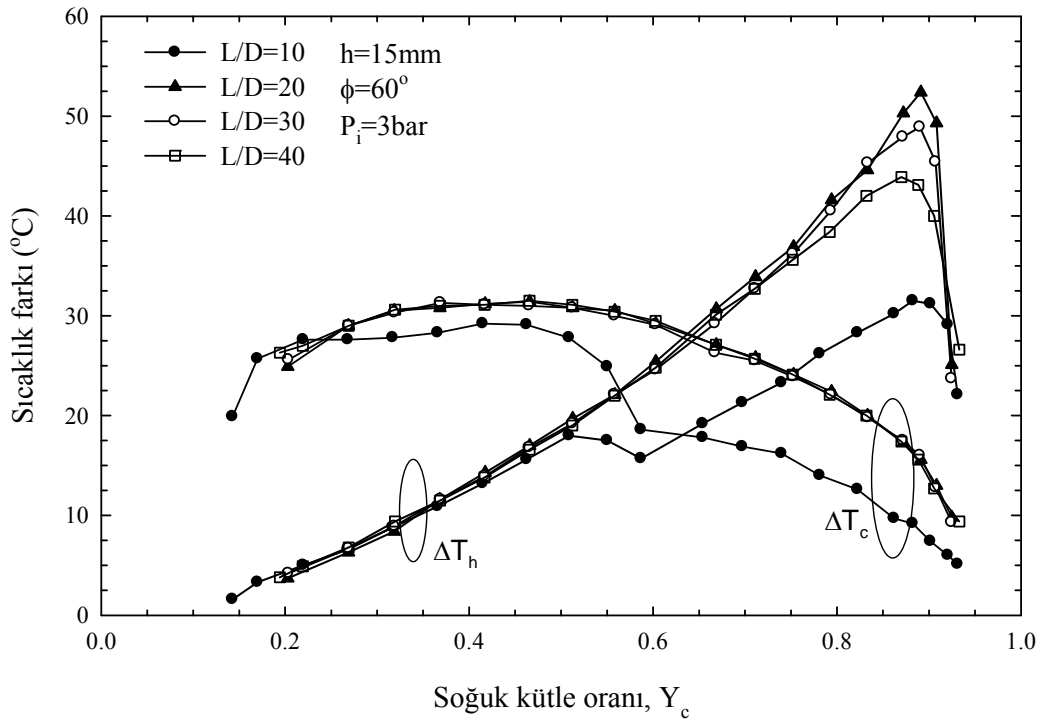
Şekil 255. $h=15\text{mm}$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



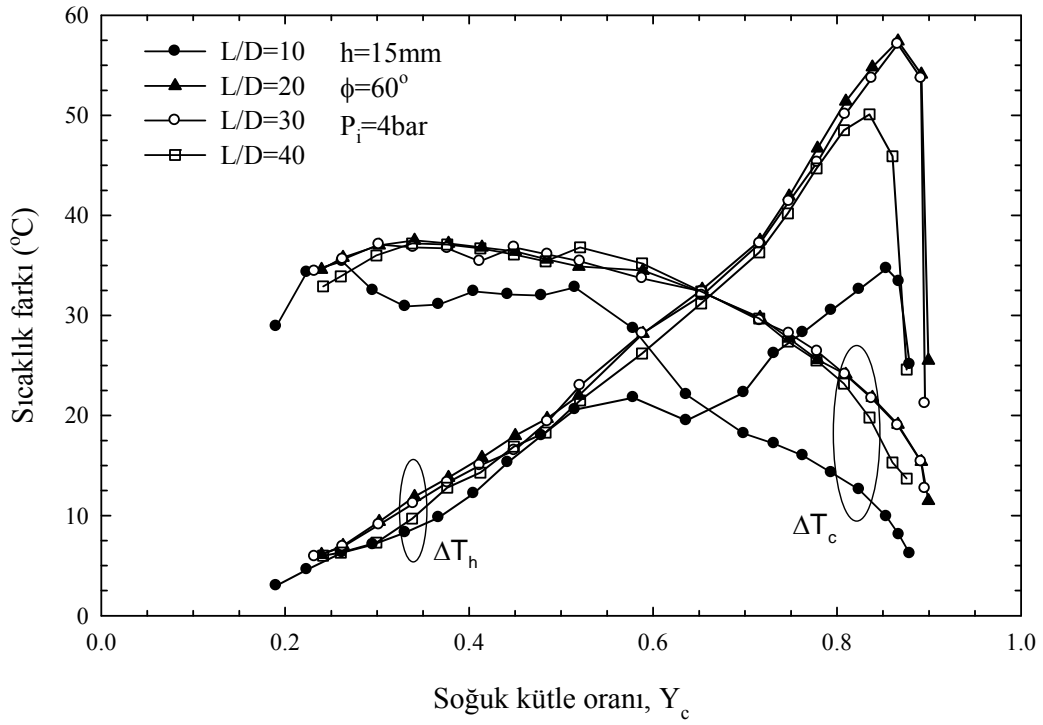
Şekil 256. $h=15\text{mm}$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



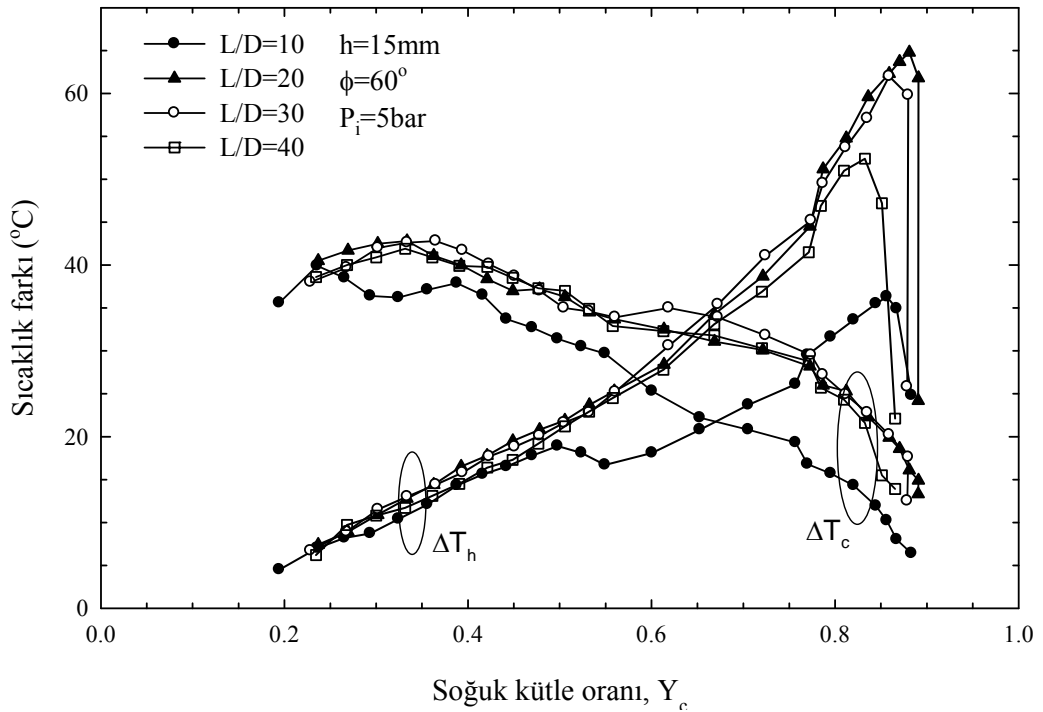
Şekil 257. $h=15\text{mm}$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



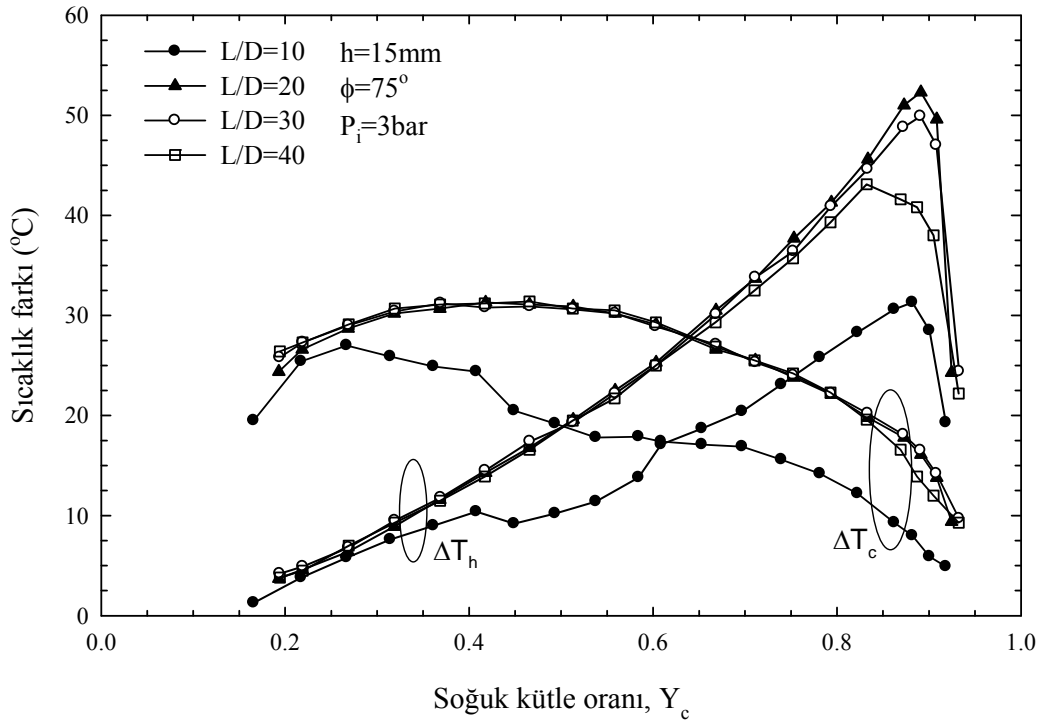
Şekil 258. $h=15\text{mm}$, $\phi=60^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



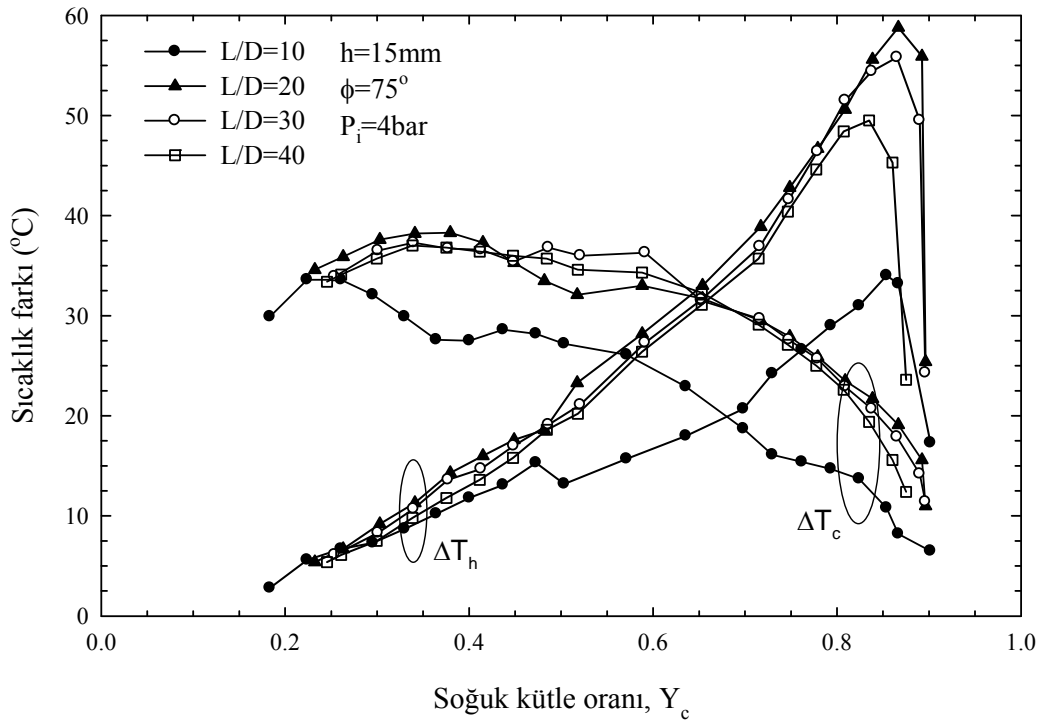
Şekil 259. $h=15\text{mm}$, $\phi=60^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



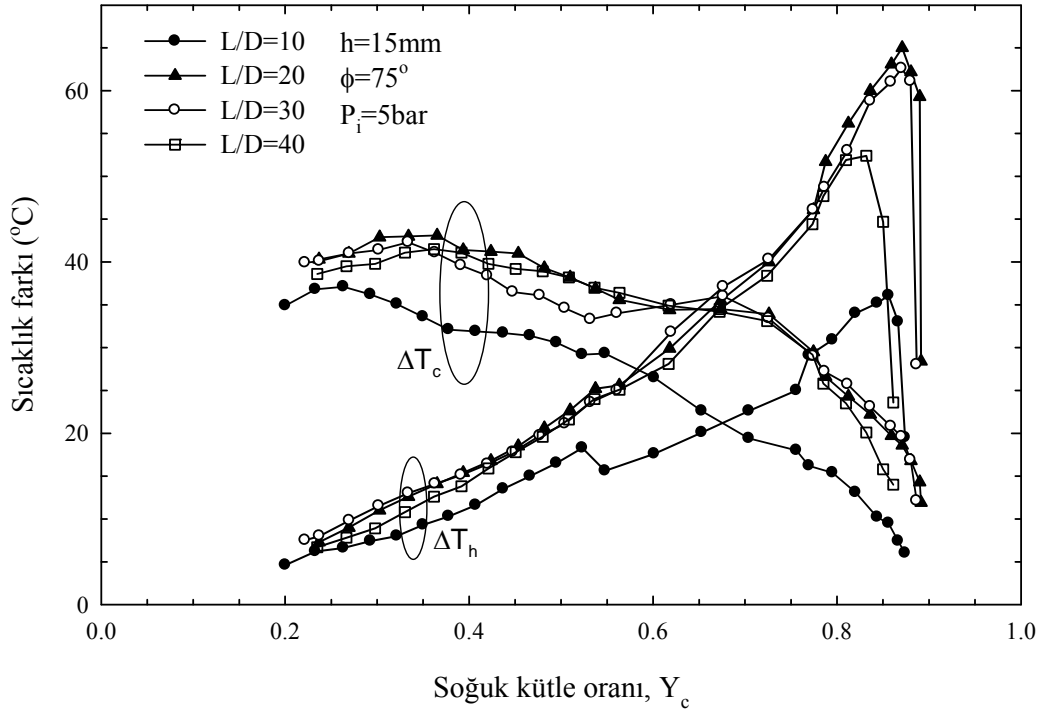
Şekil 260. $h=15\text{mm}$, $\phi=60^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



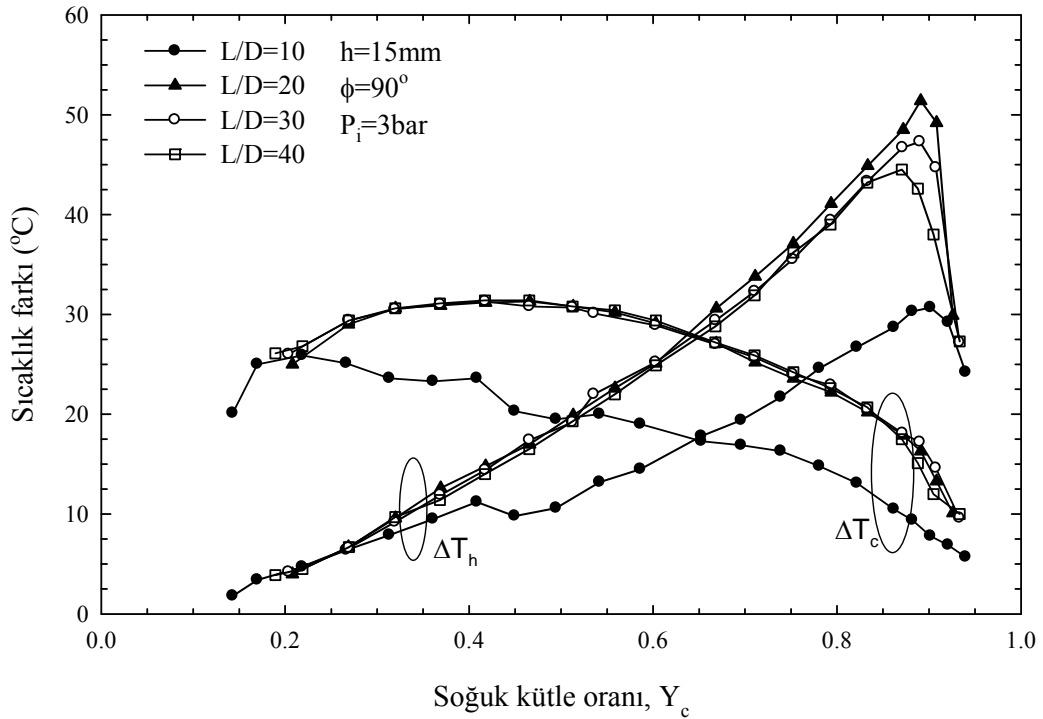
Şekil 261. $h=15\text{mm}$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



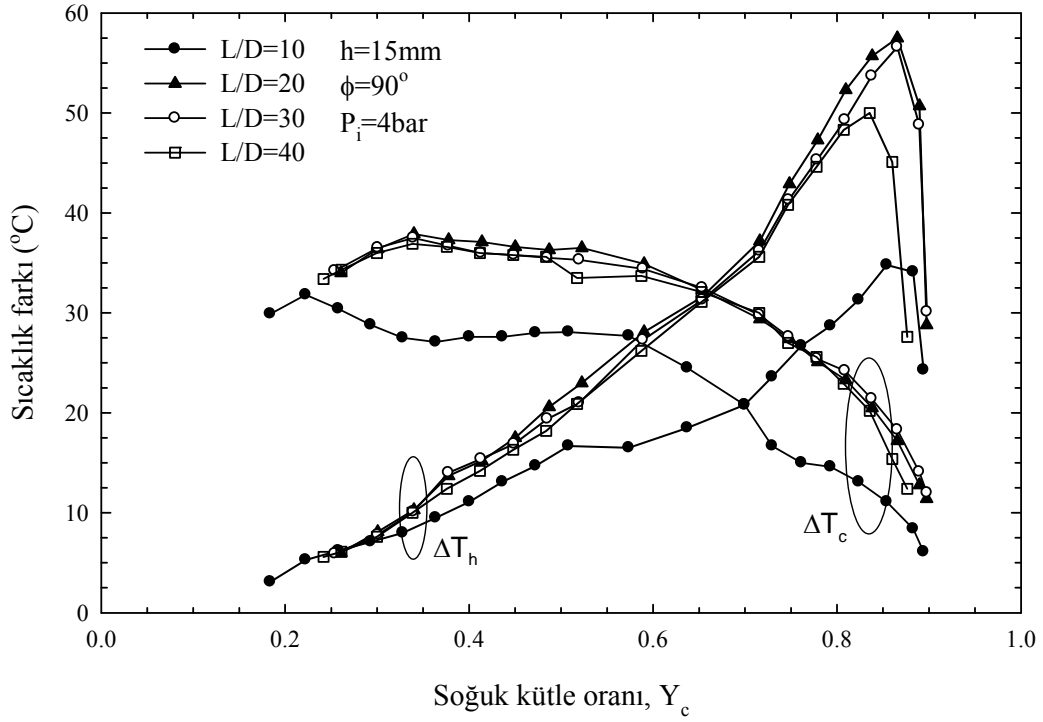
Şekil 262. $h=15\text{mm}$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



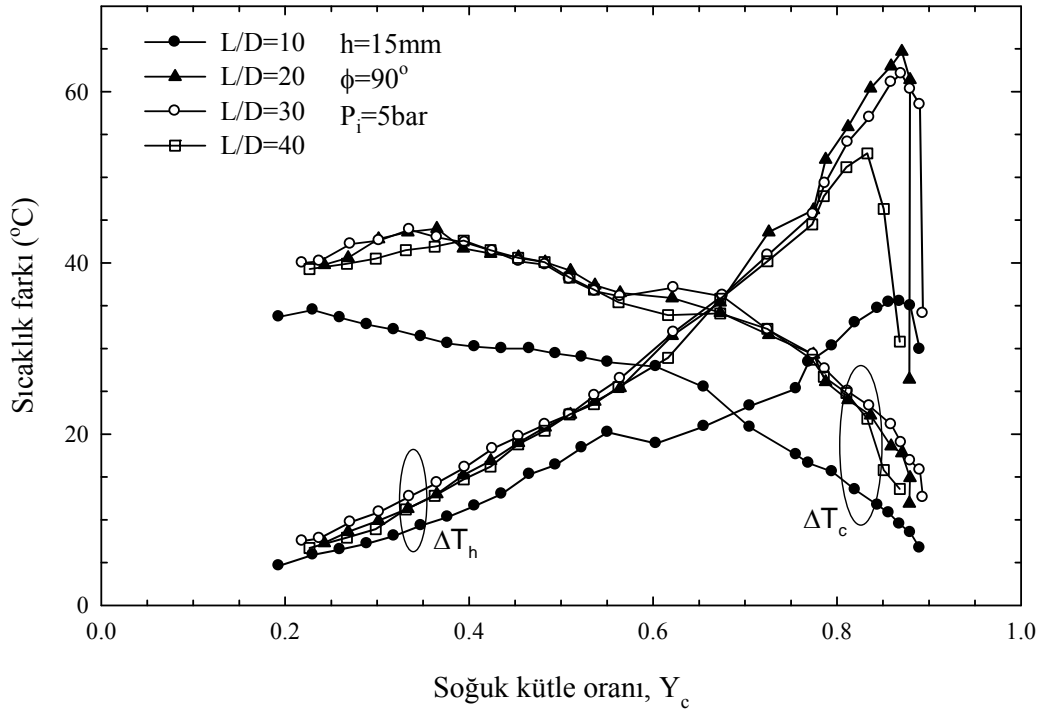
Şekil 263. $h=15\text{mm}$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



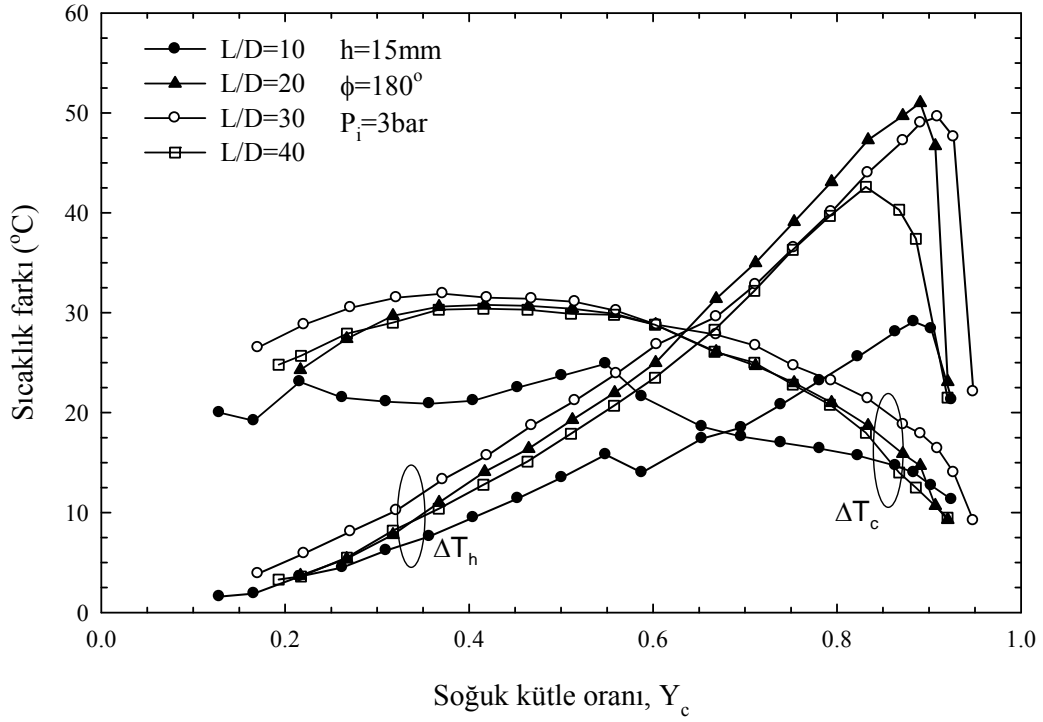
Şekil 264. $h=15\text{mm}$, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



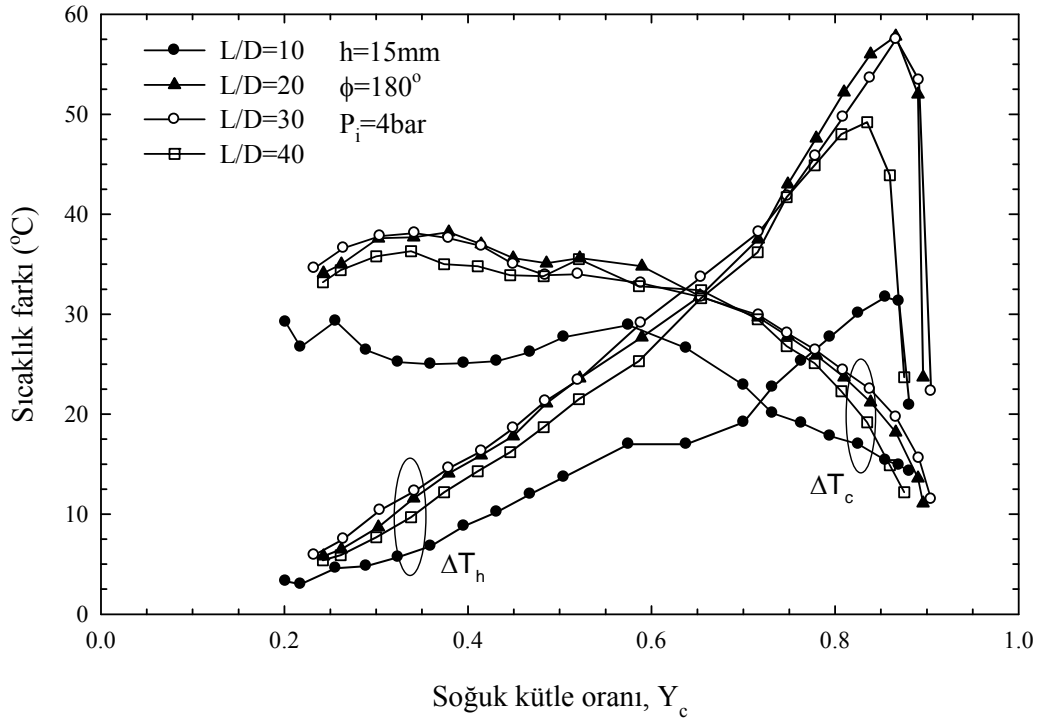
Şekil 265. $h=15\text{mm}$, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



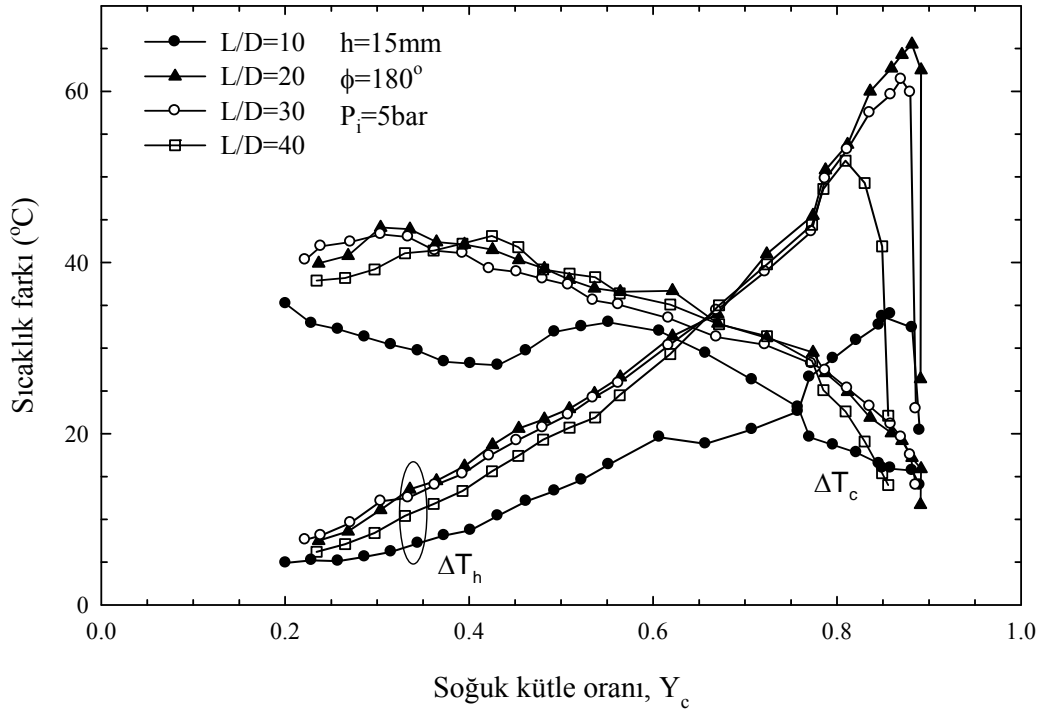
Şekil 266. $h=15\text{mm}$, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



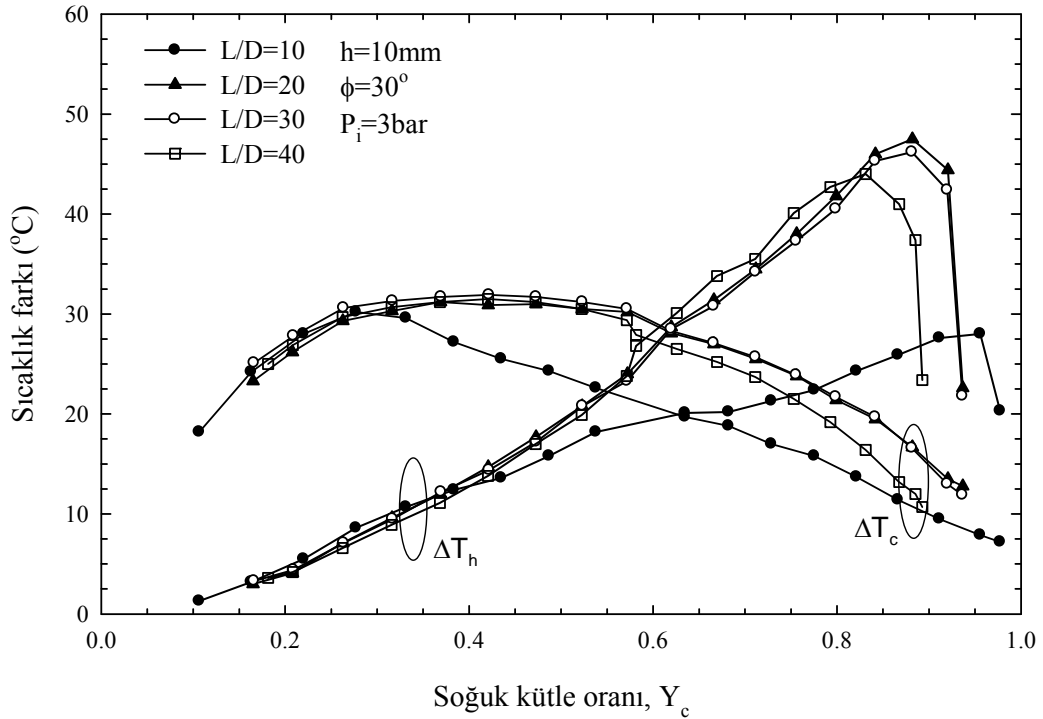
Şekil 267. $h=15\text{mm}$, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



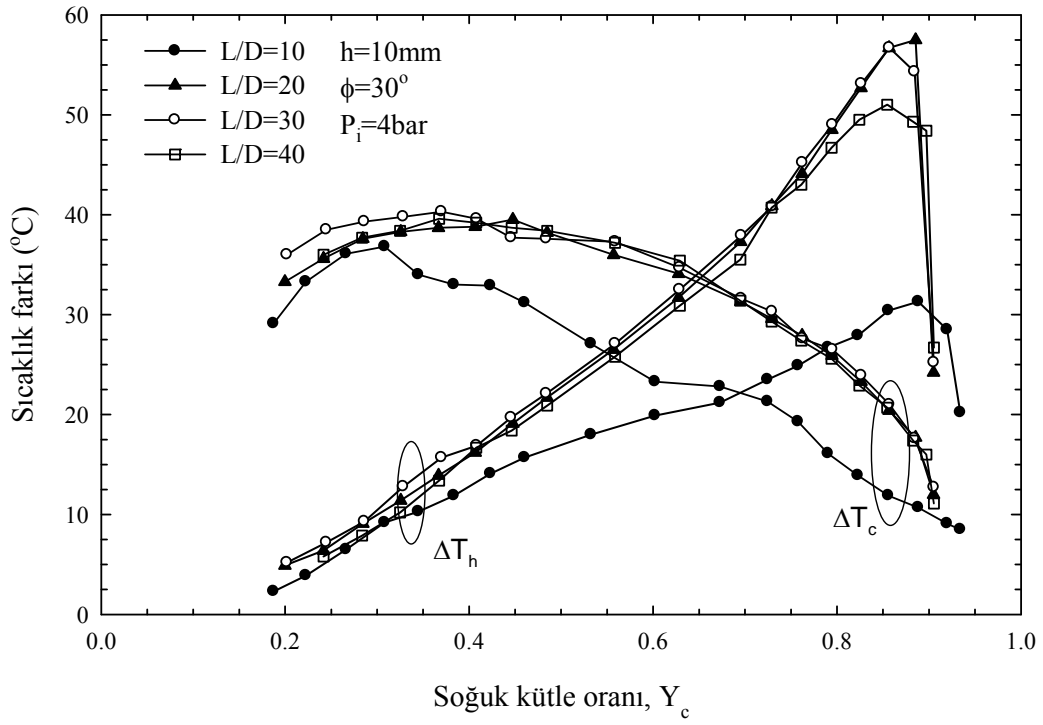
Şekil 268. $h=15\text{mm}$, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



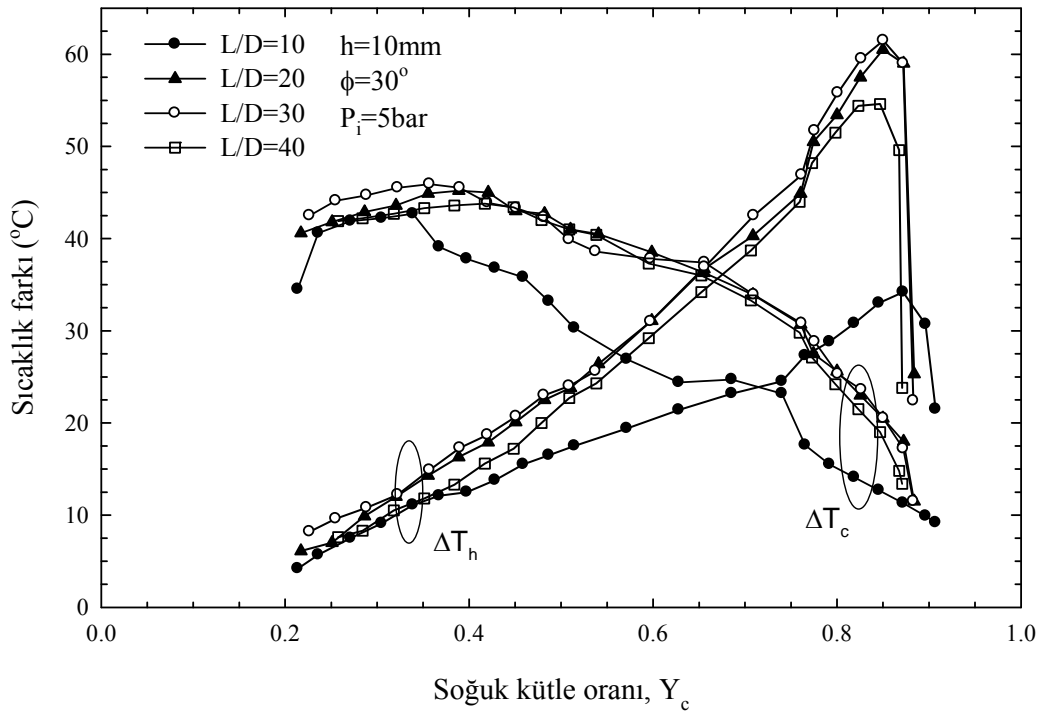
Şekil 269. $h=15\text{mm}$, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



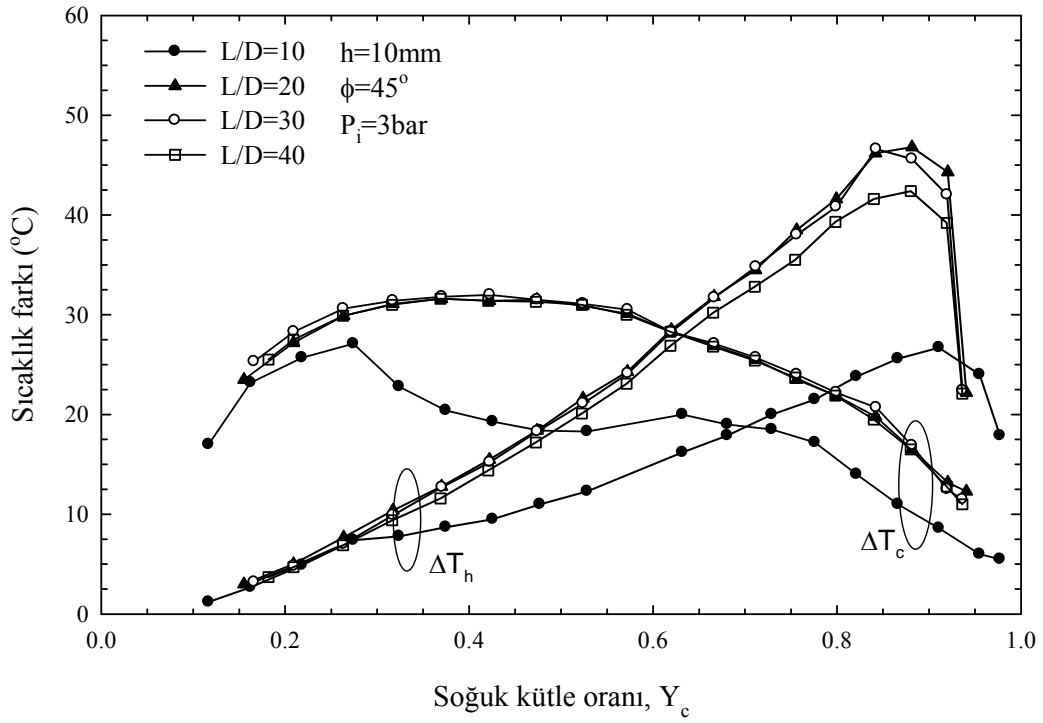
Şekil 270. $h=10\text{mm}$, $\phi=30^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



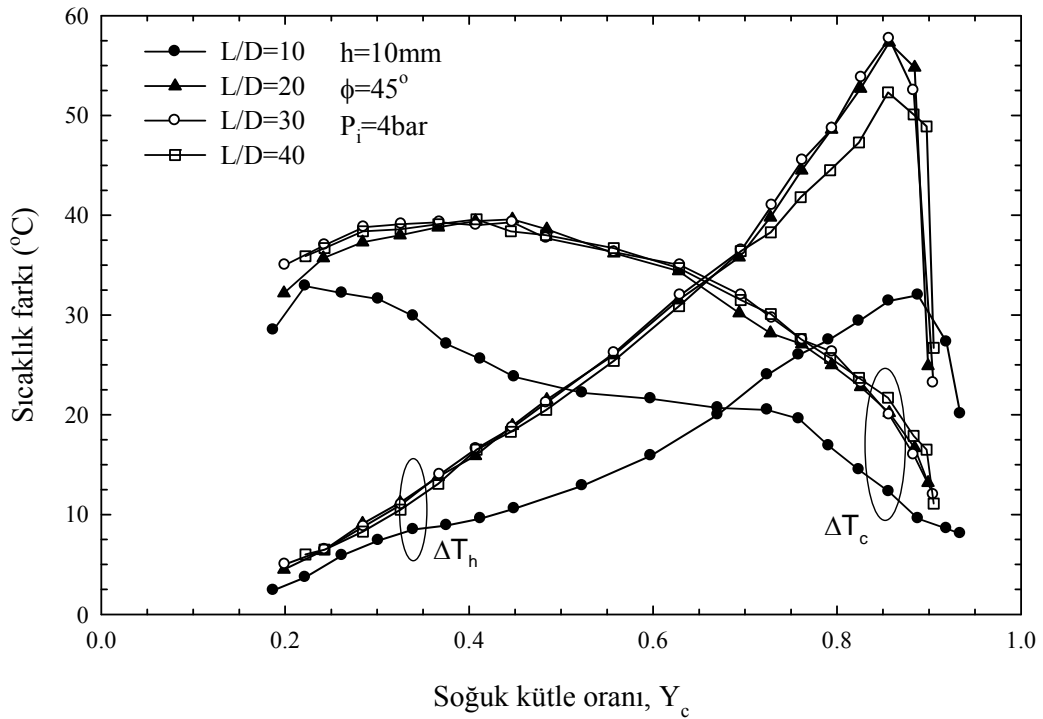
Şekil 271. $h=10\text{mm}$, $\phi=30^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



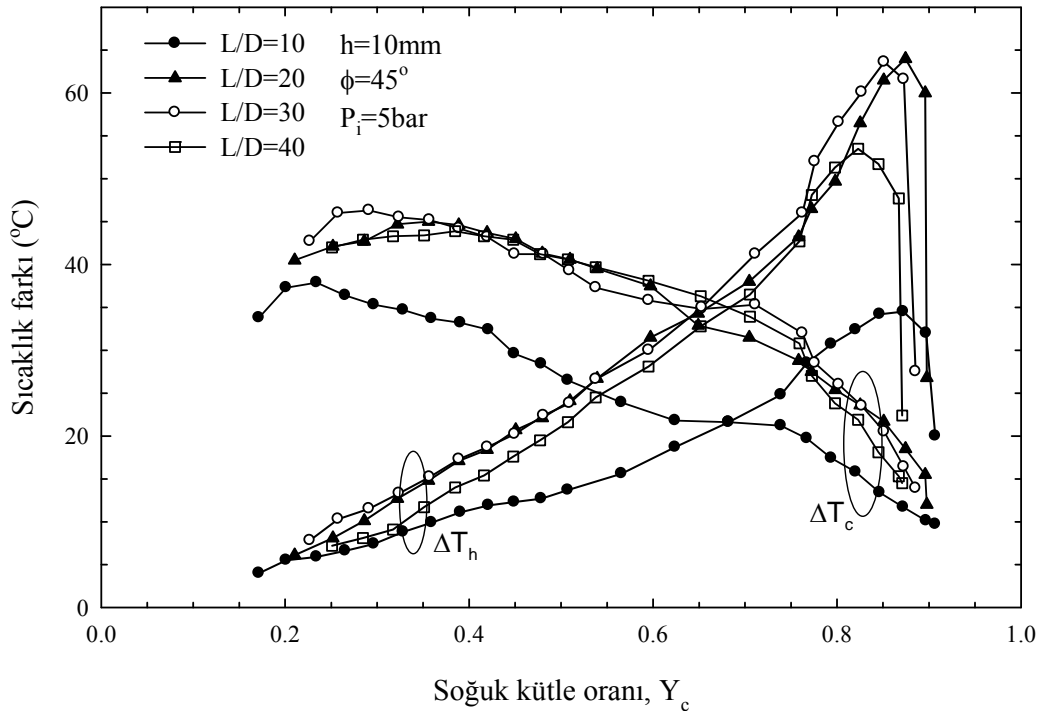
Şekil 272. $h=10\text{mm}$, $\phi=30^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



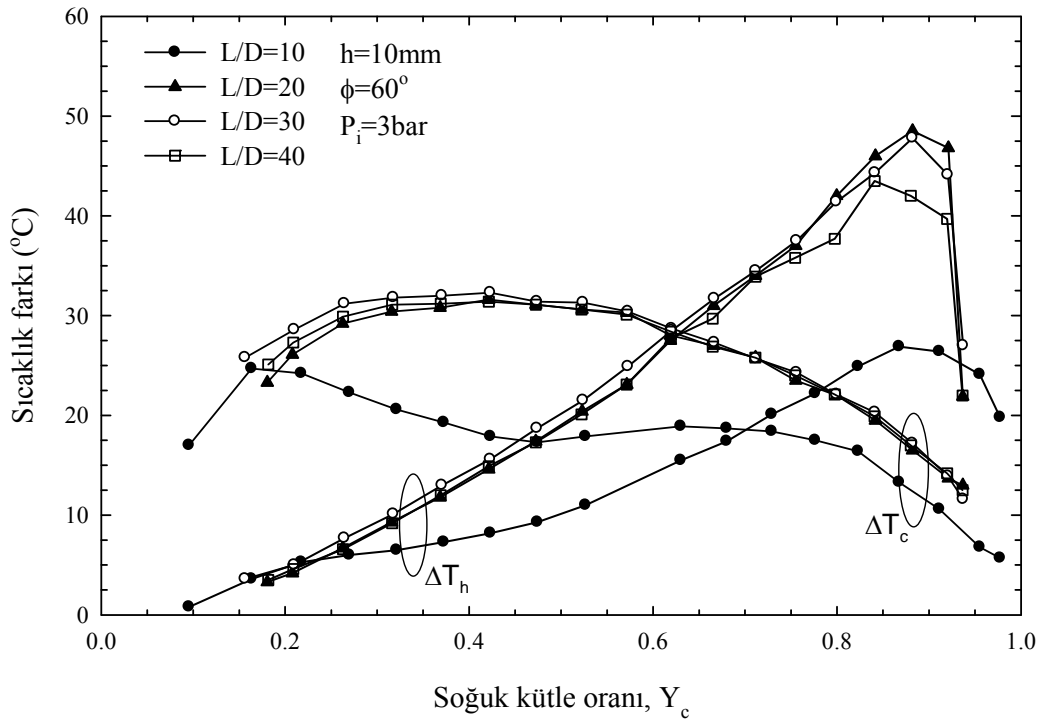
Şekil 273. $h=10\text{mm}$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



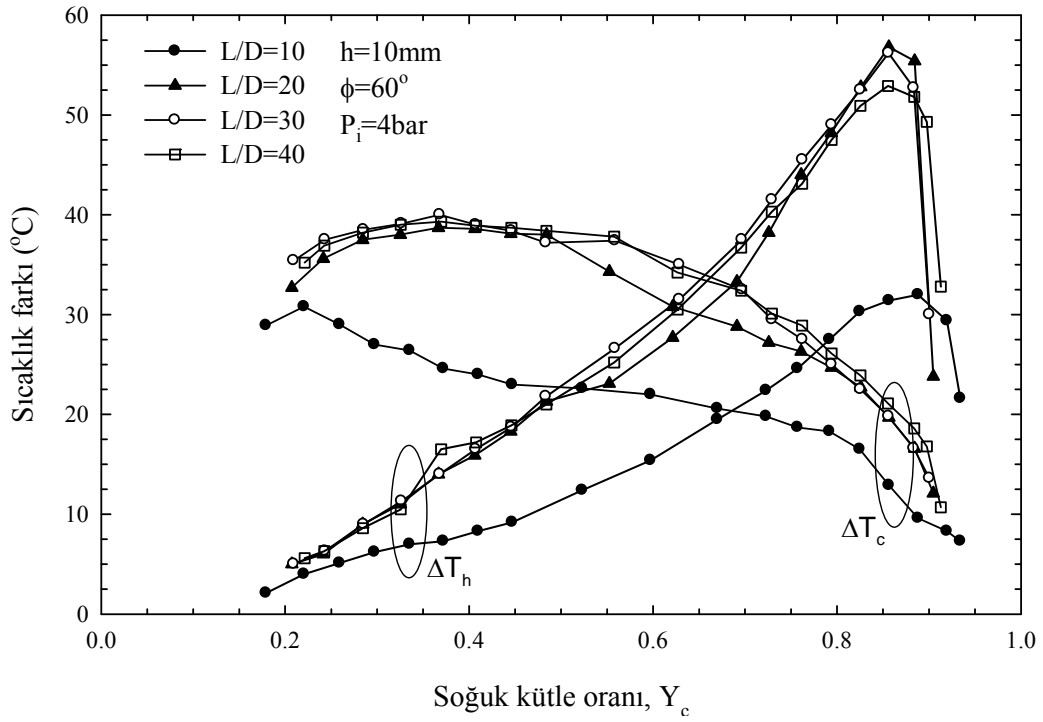
Şekil 274. $h=10\text{mm}$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



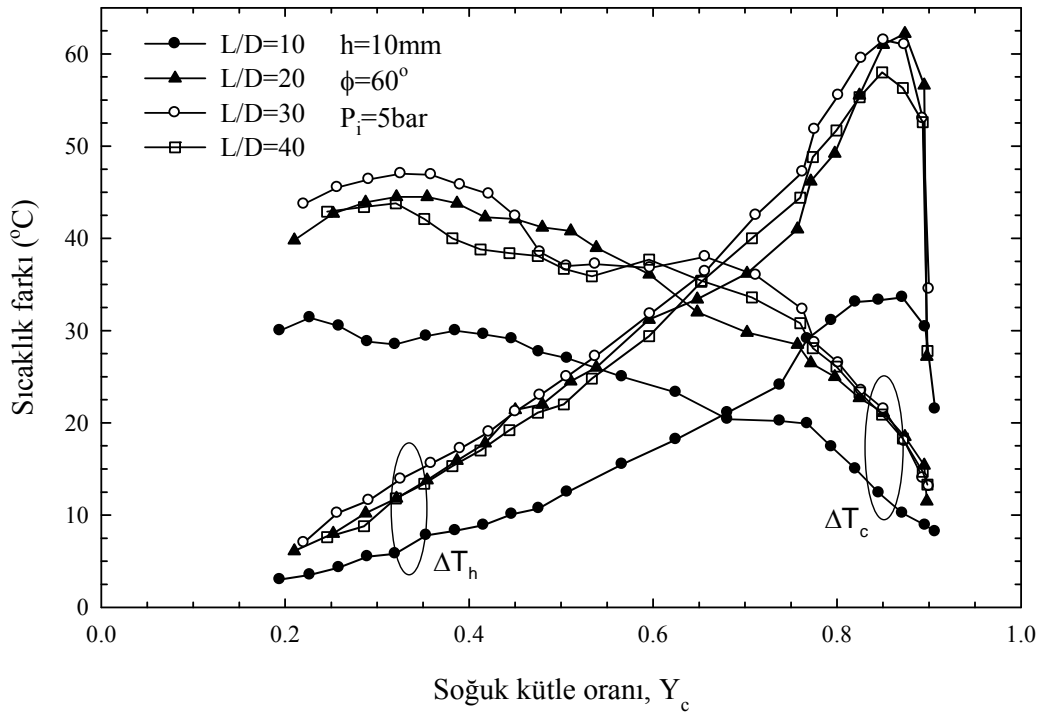
Şekil 275. $h=10\text{mm}$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



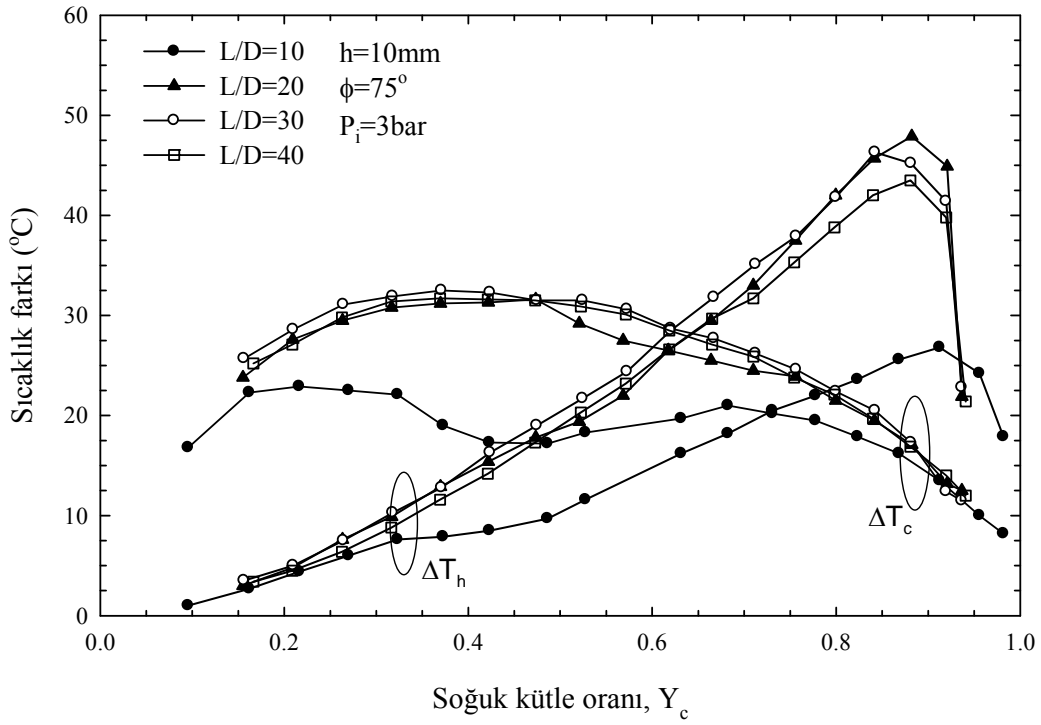
Şekil 276. $h=10\text{mm}$, $\phi=60^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



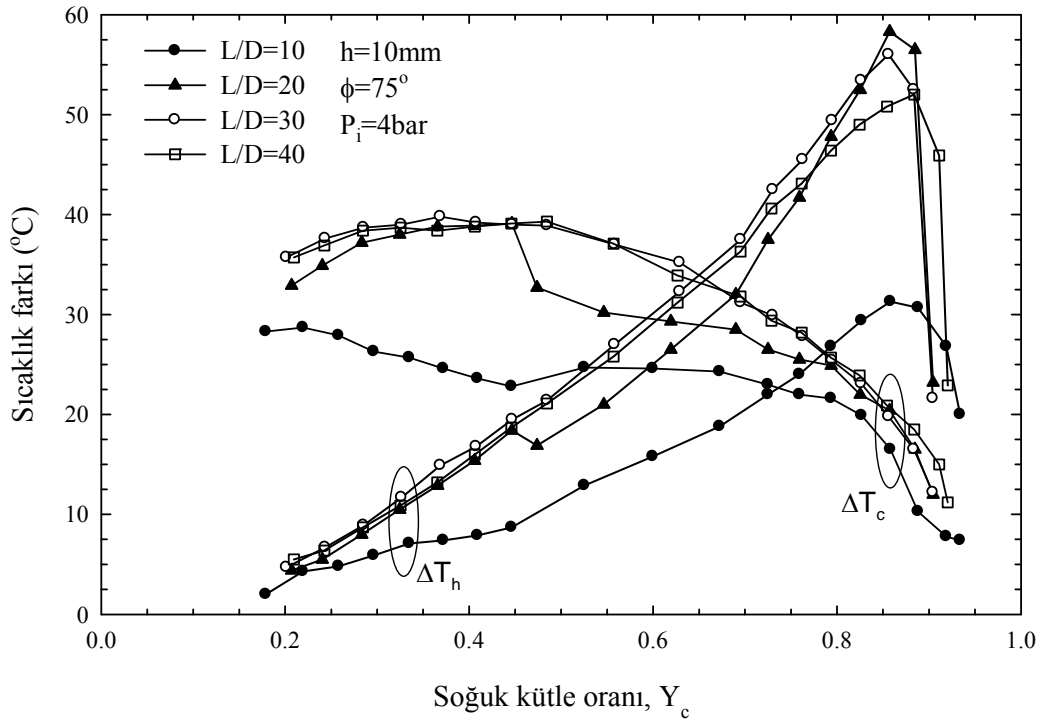
Şekil 277. $h=10\text{mm}$, $\phi=60^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



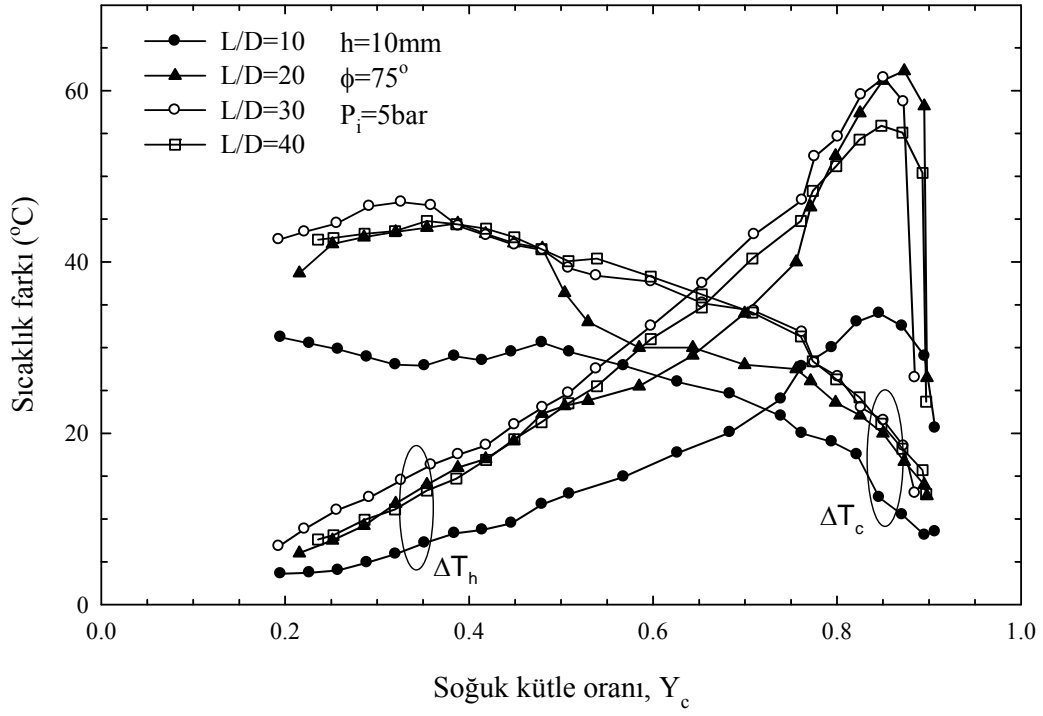
Şekil 278. $h=10\text{mm}$, $\phi=60^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



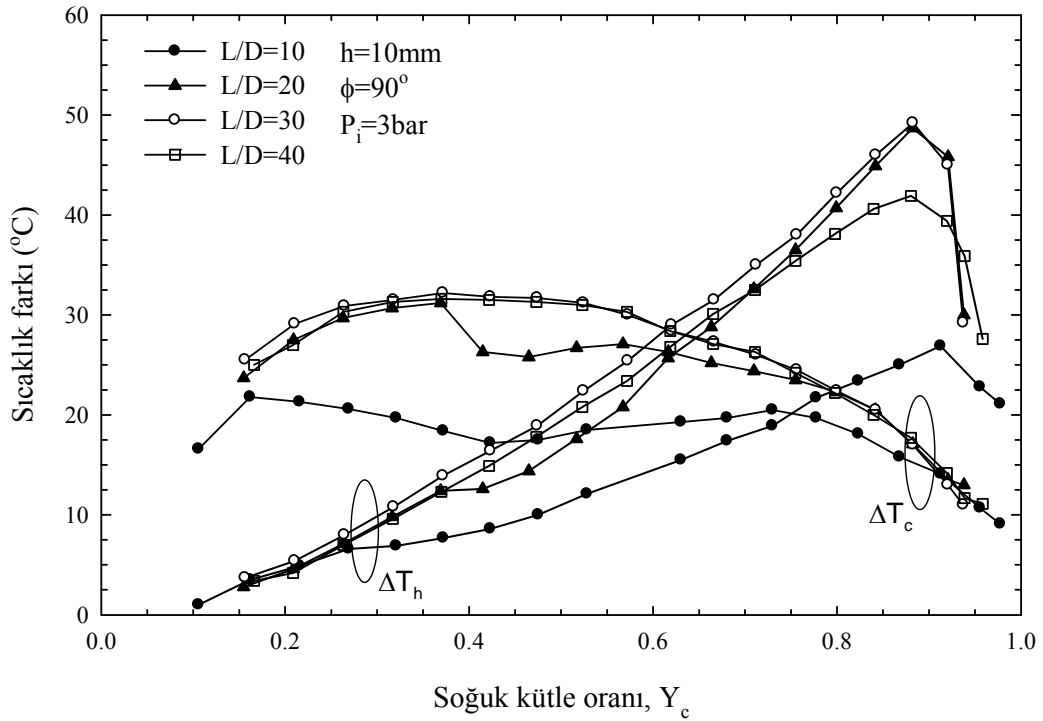
Şekil 279. $h=10\text{mm}$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



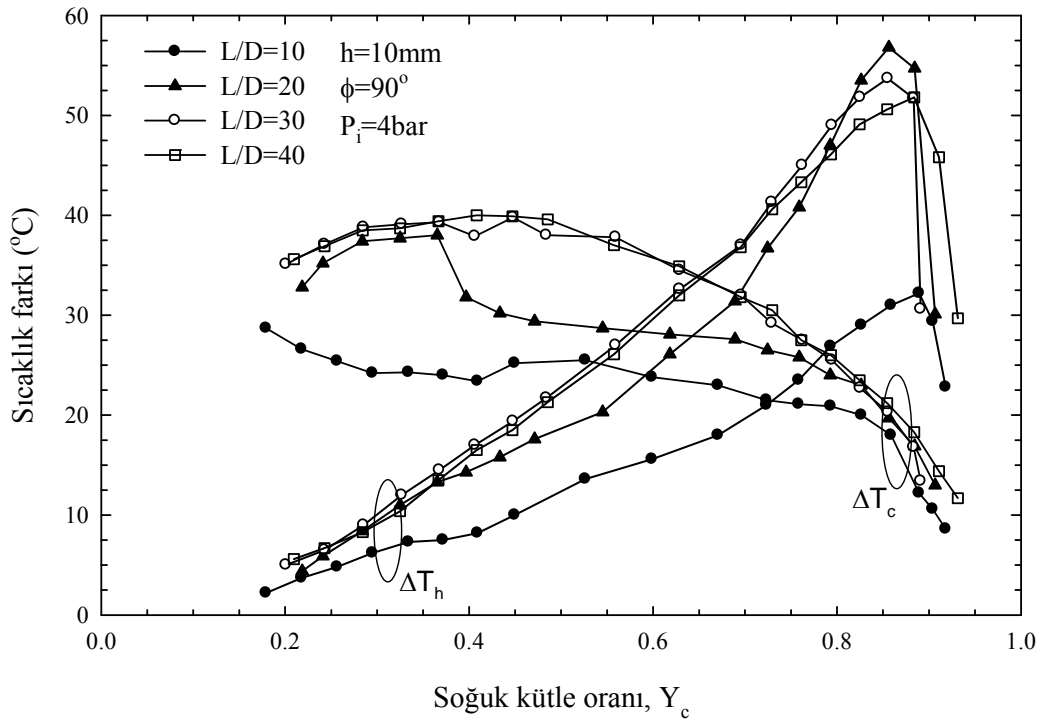
Şekil 280. $h=10\text{mm}$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



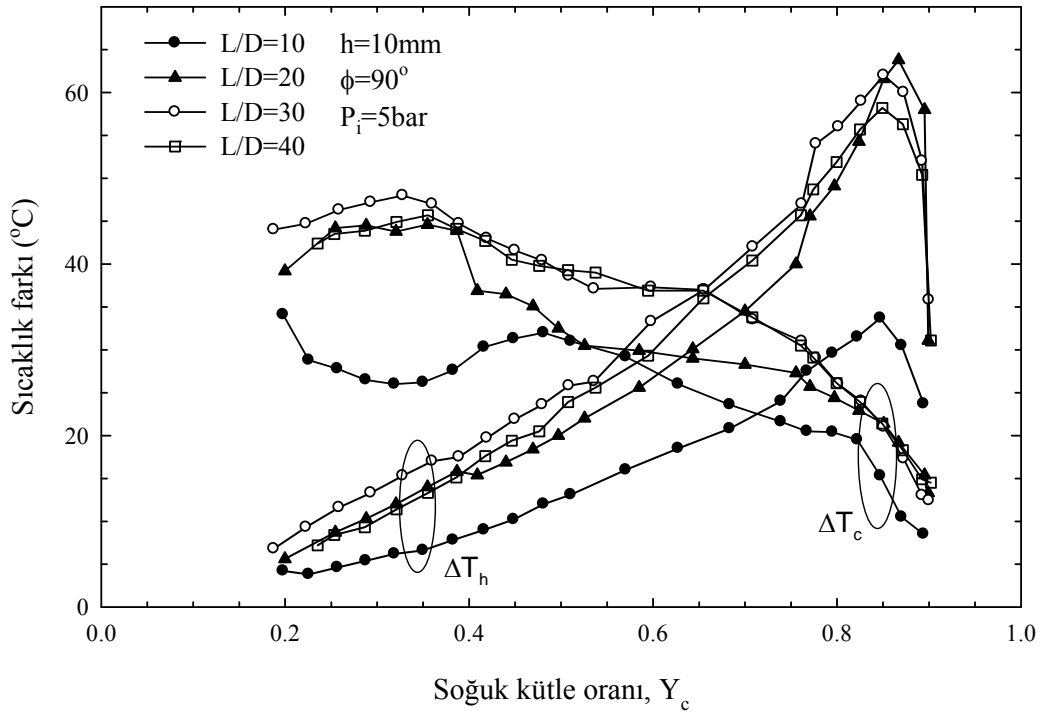
Şekil 281. $h=10\text{mm}$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



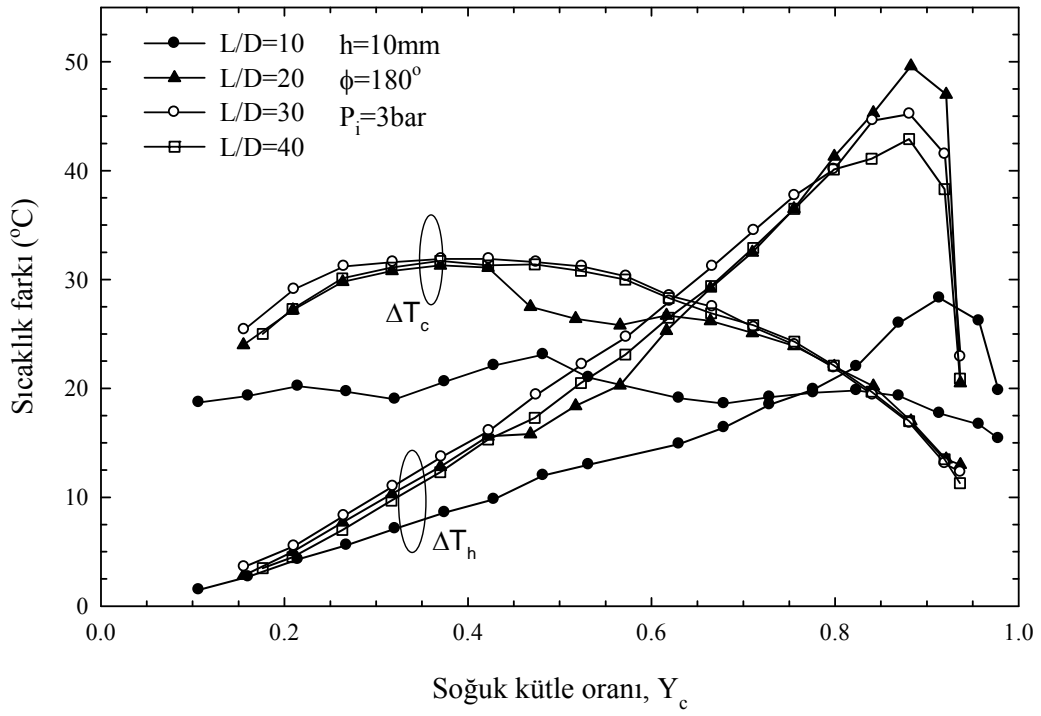
Şekil 282. $h=10\text{mm}$, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



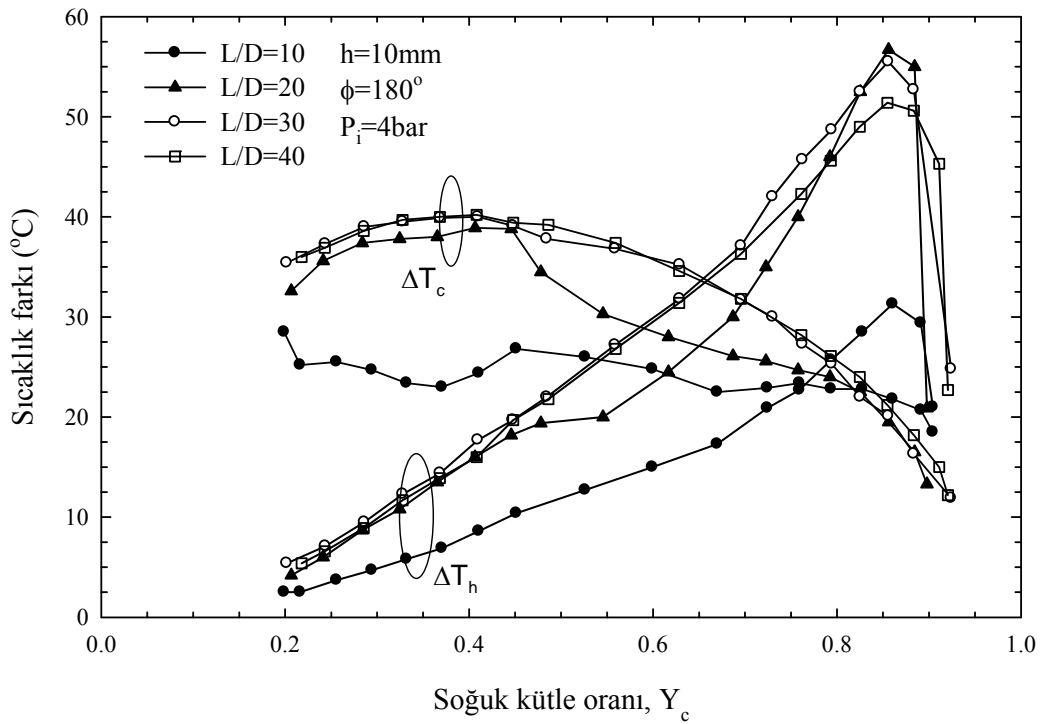
Şekil 283. $h=10\text{mm}$, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



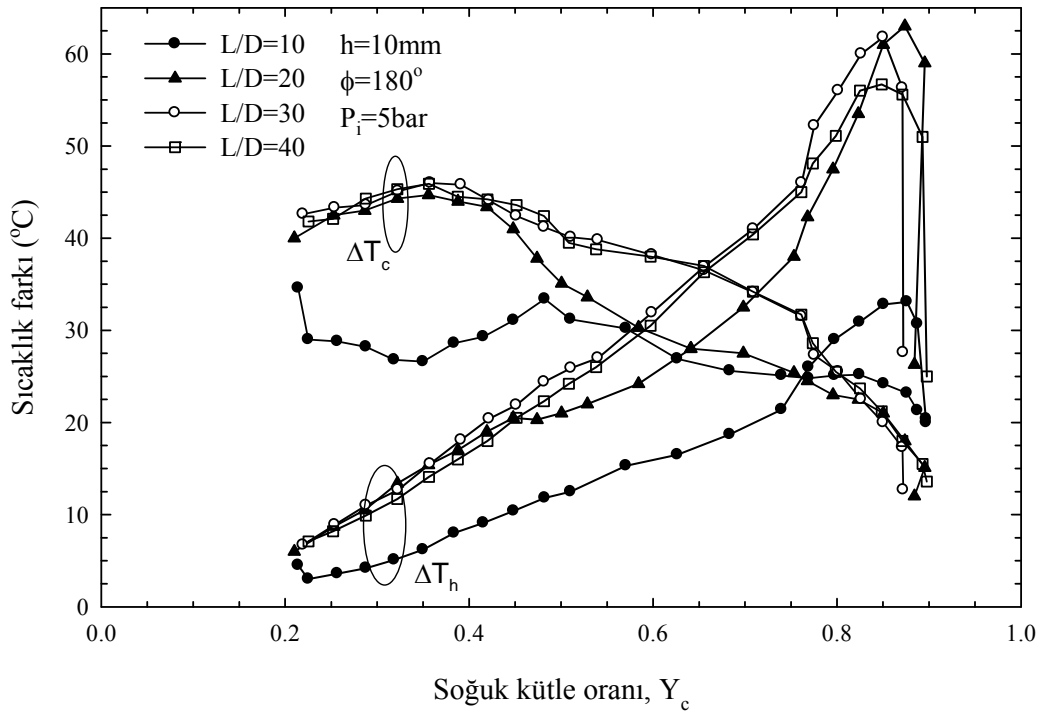
Şekil 284. $h=10\text{mm}$, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



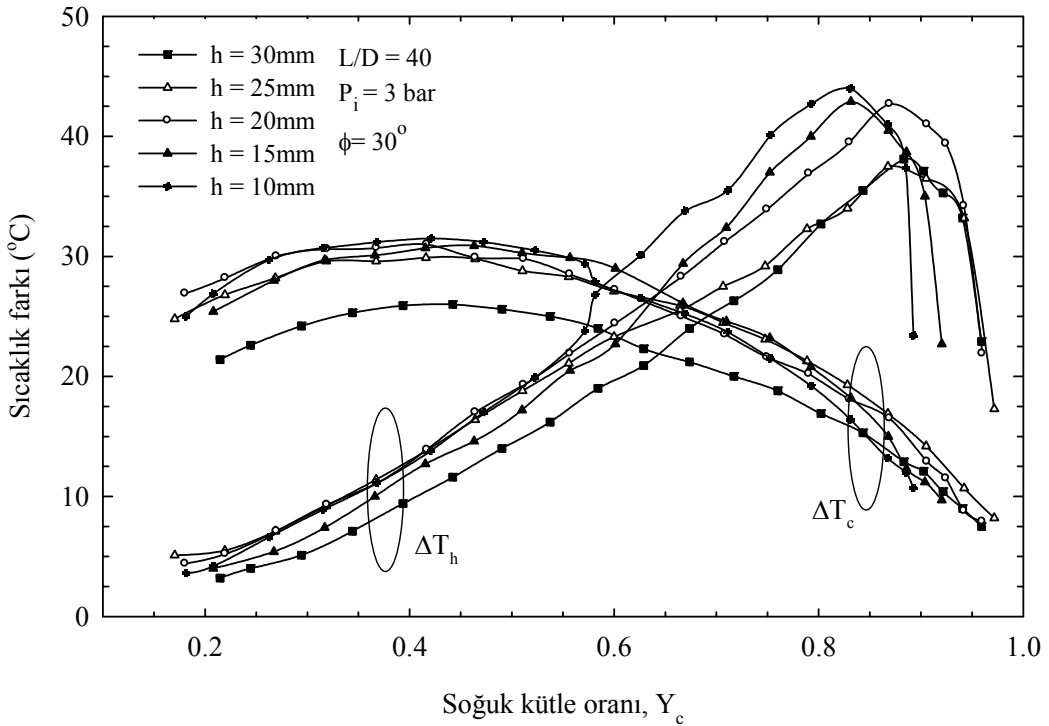
Şekil 285. $h=10\text{mm}$, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



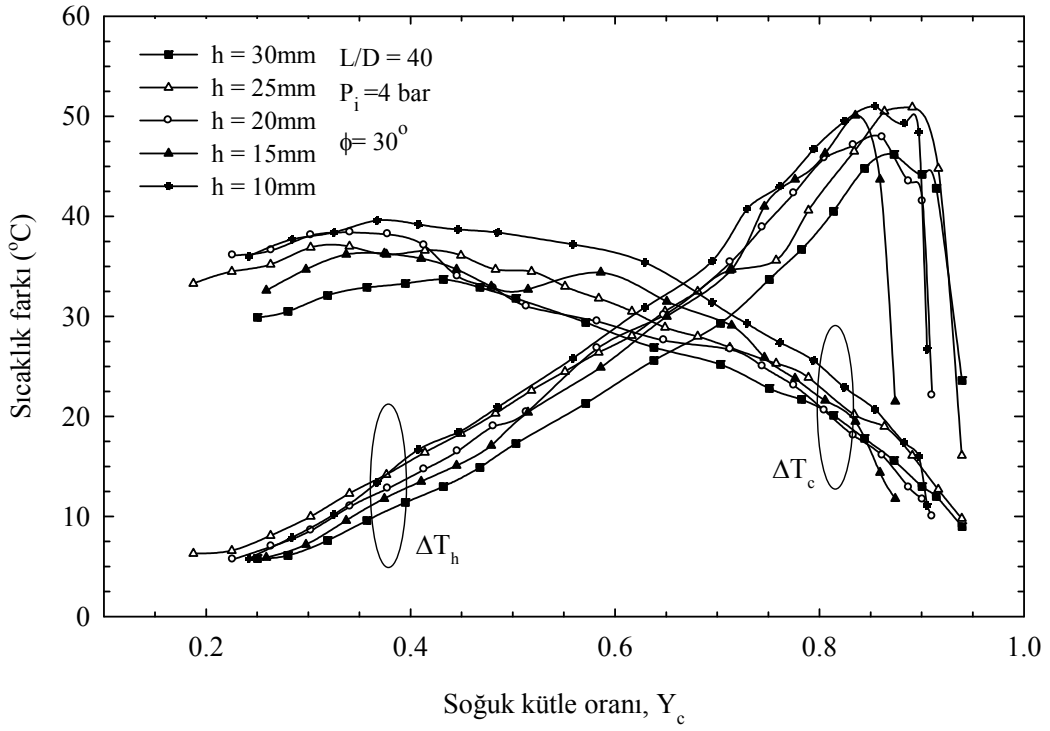
Şekil 286. $h=10\text{mm}$, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



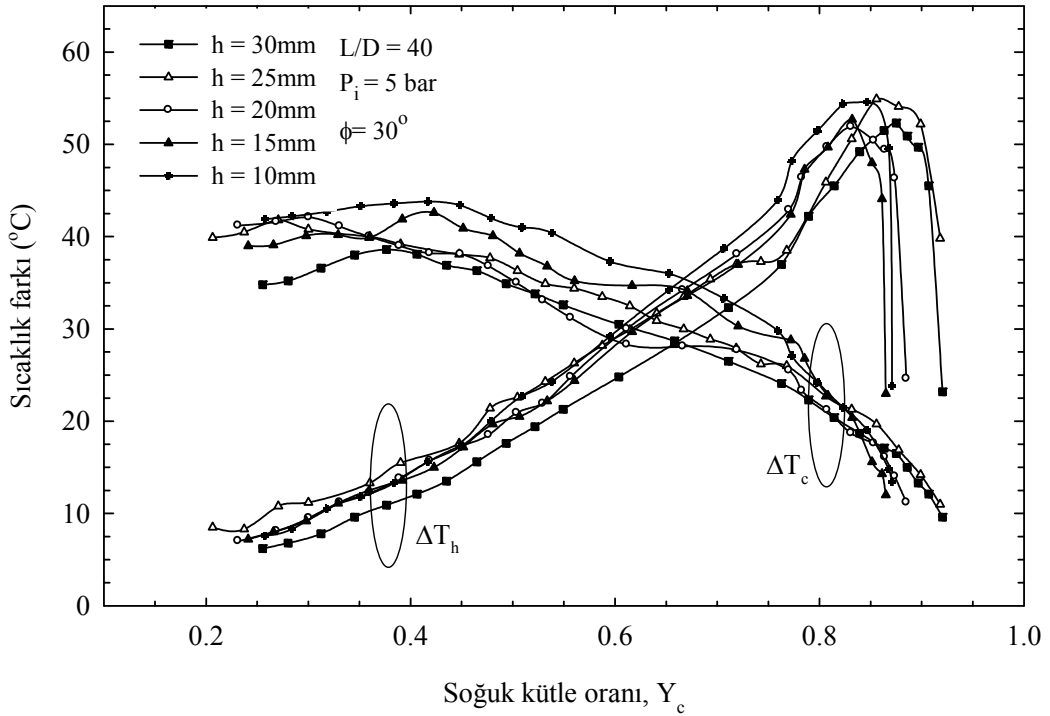
Şekil 287. $h=10\text{mm}$, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı L/D oranlarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



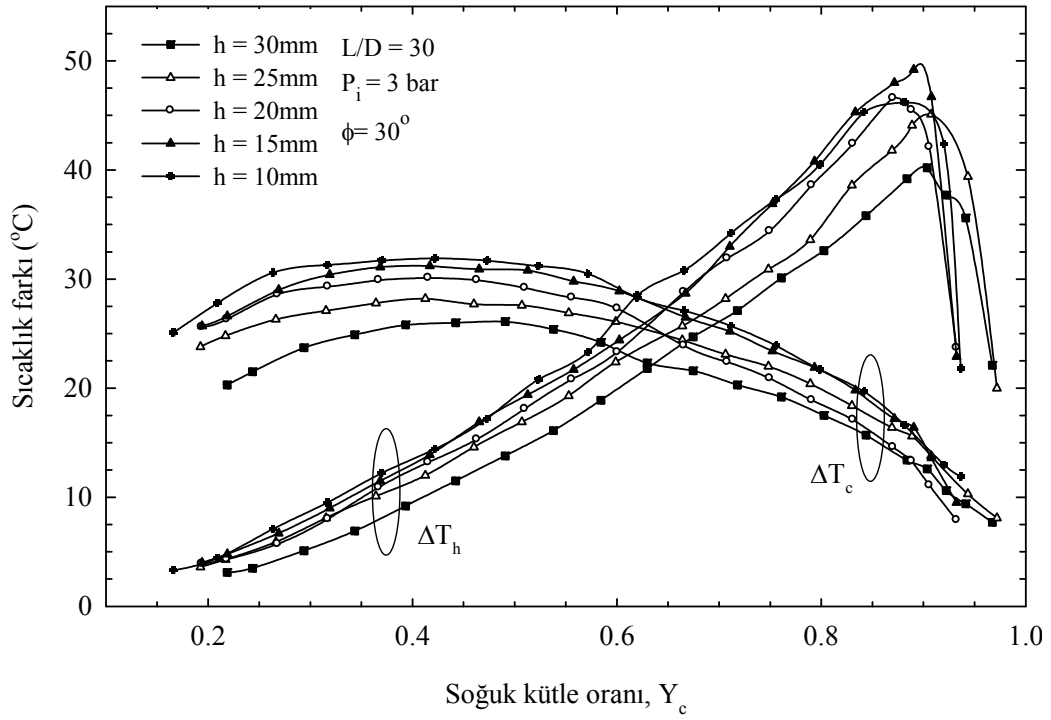
Şekil 288. $L/D=40$, $\phi=30^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



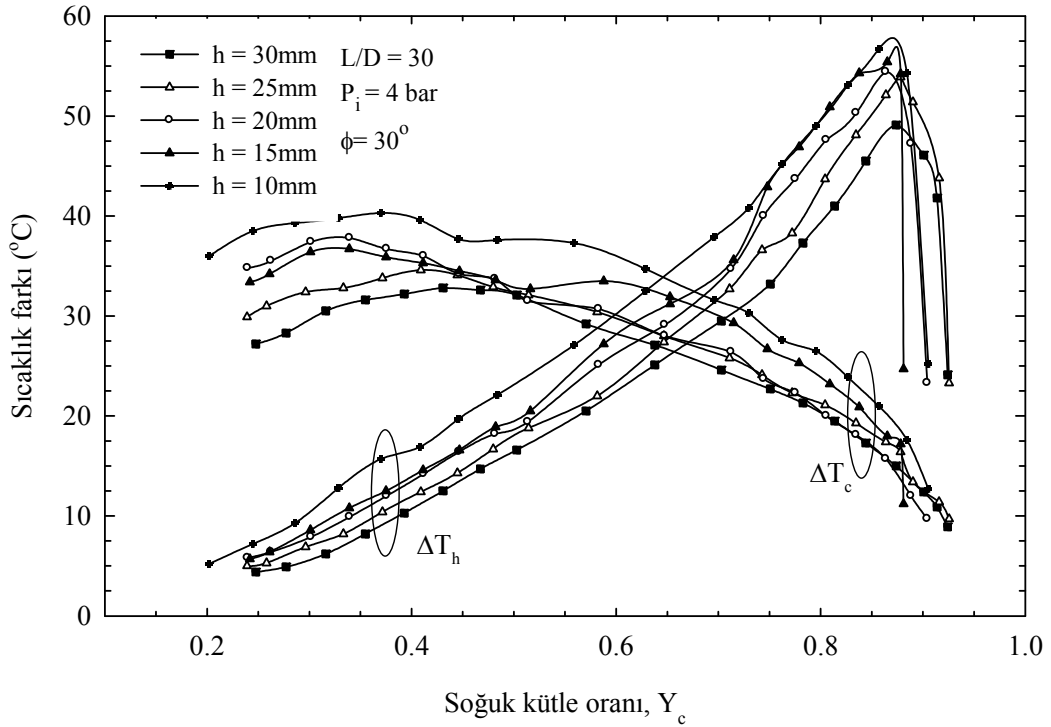
Şekil 289. $L/D=40$, $\phi=30^\circ$ ve $P_i=4$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



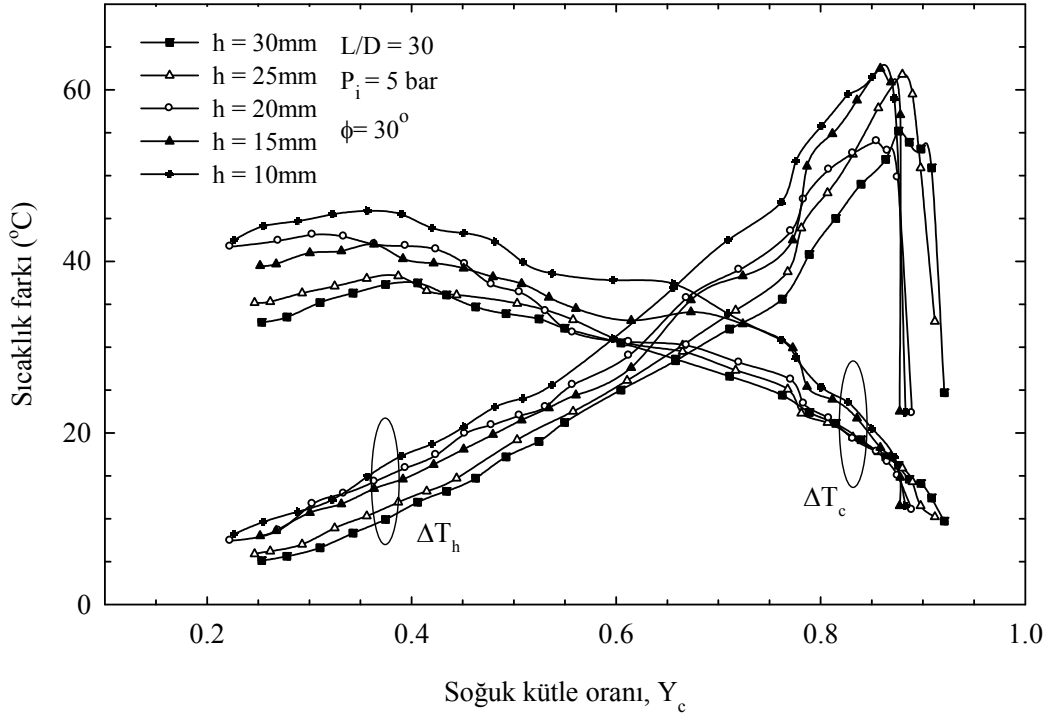
Şekil 290. $L/D=40$, $\phi=30^\circ$ ve $P_i=5$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



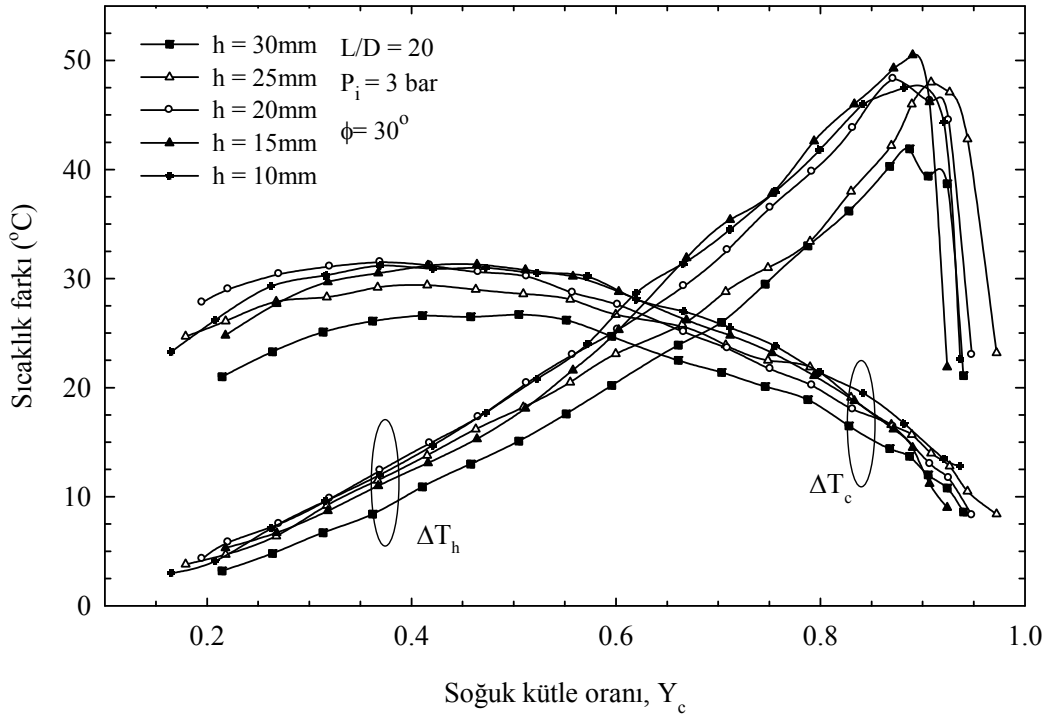
Şekil 291. $L/D=30$, $\phi=30^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



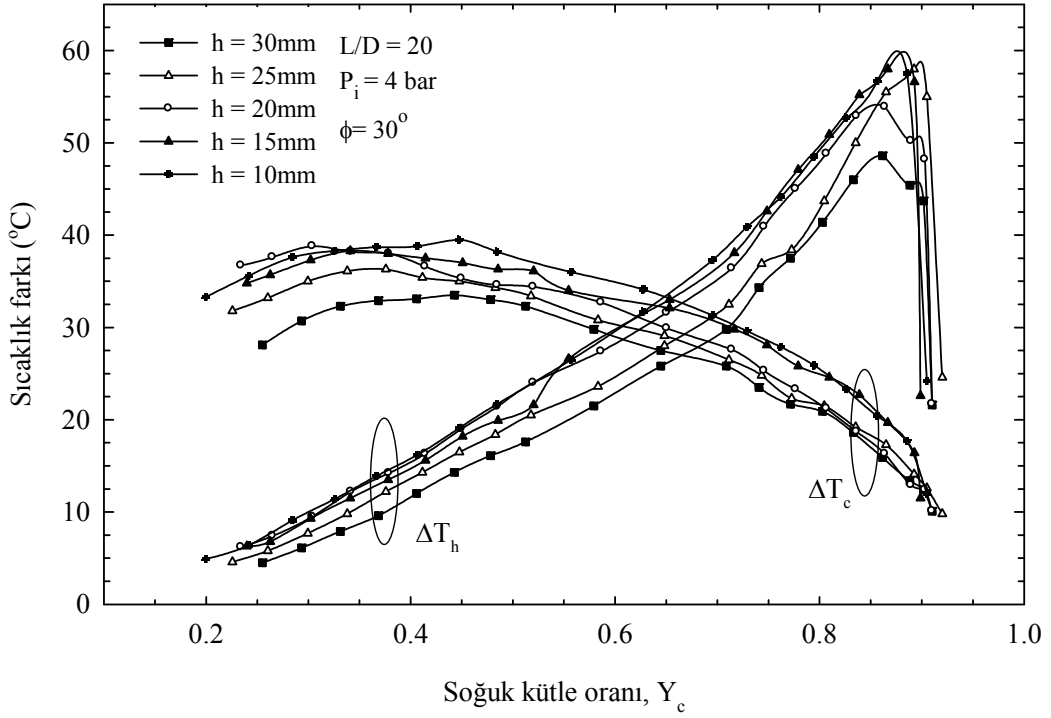
Şekil 292. $L/D=30$, $\phi=30^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



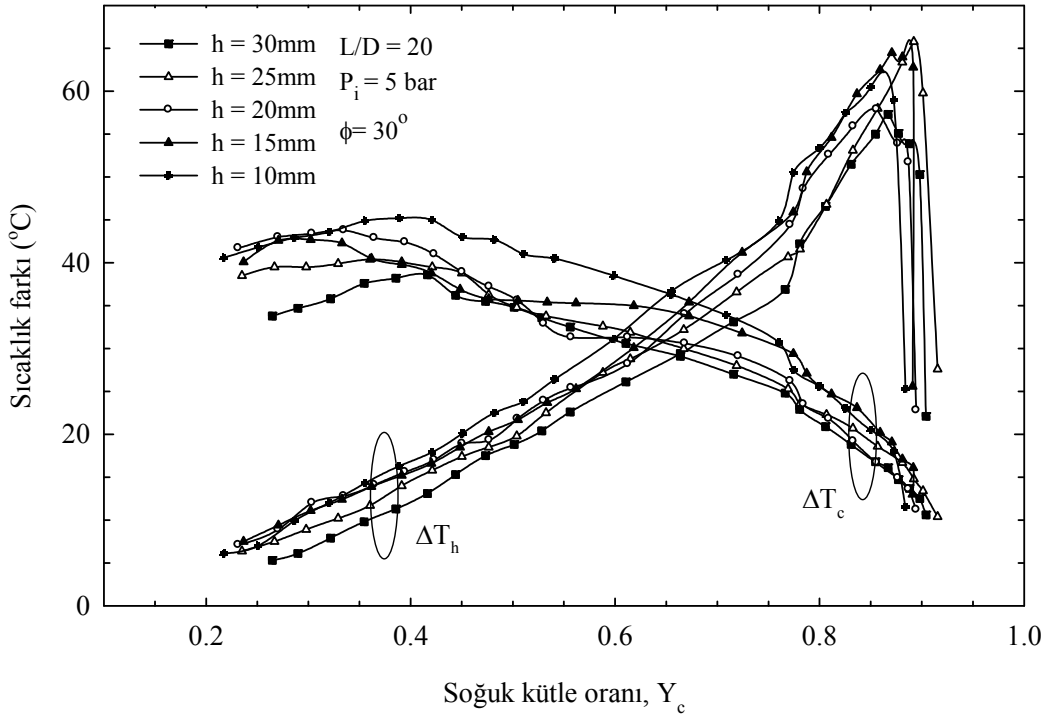
Şekil 293. $L/D=30$, $\phi=30^\circ$ ve $P_i=5$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



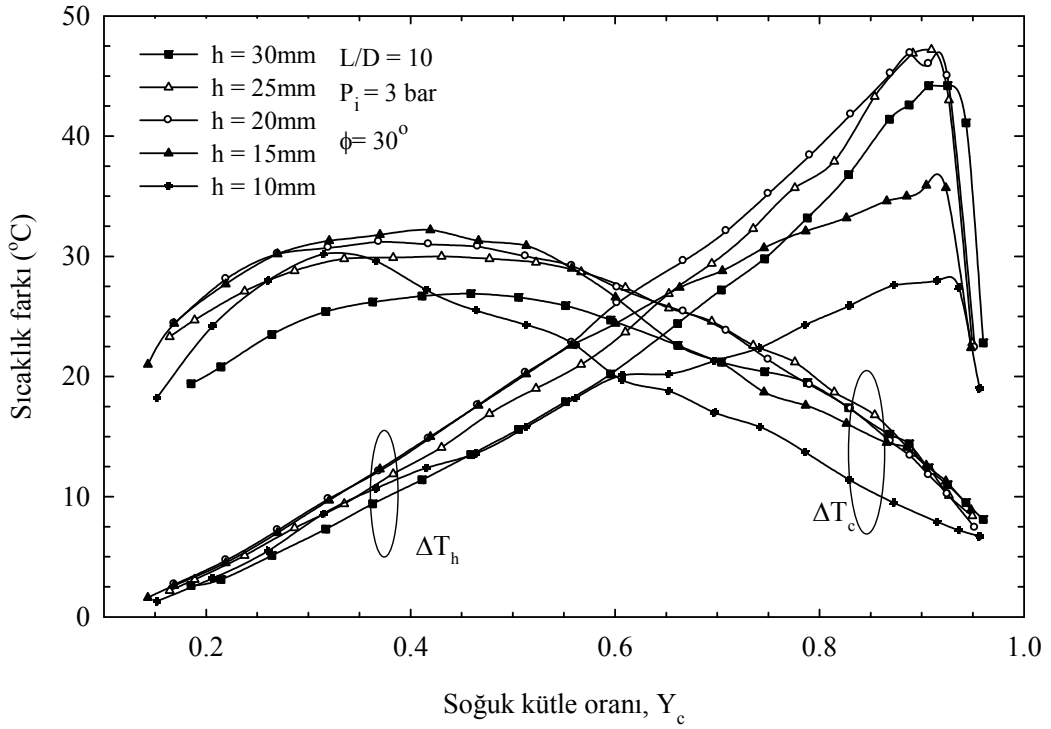
Şekil 294. $L/D=20$, $\phi=30^\circ$ ve $P_i=3$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



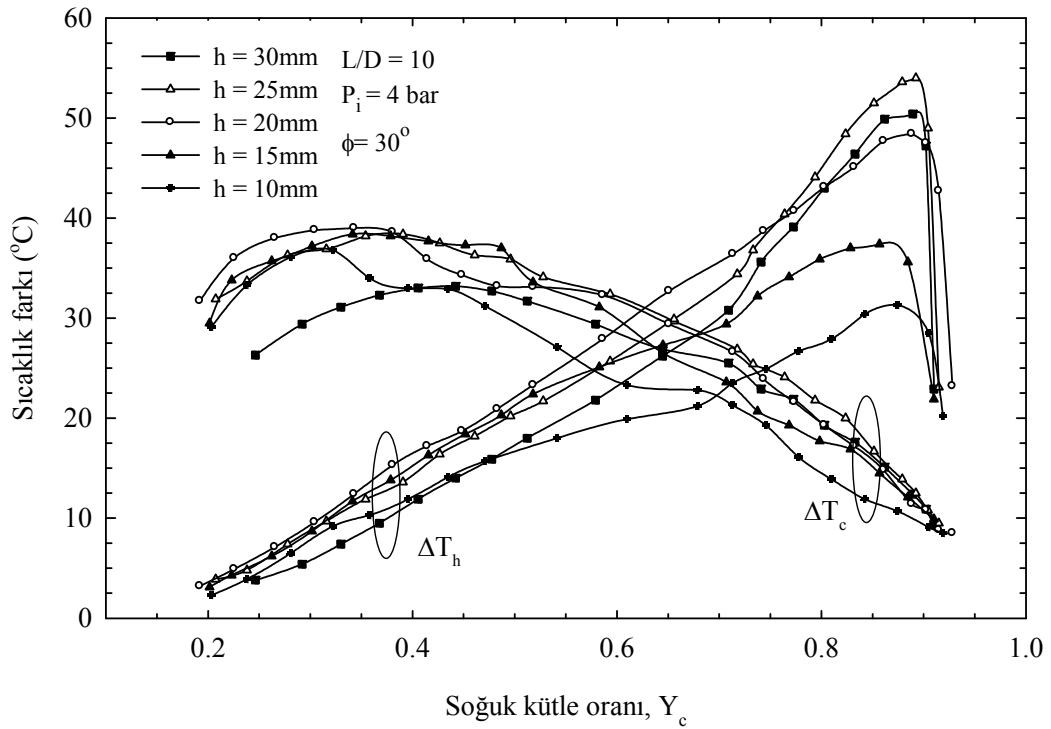
Şekil 295. $L/D=20$, $\phi=30^\circ$ ve $P_i=4$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



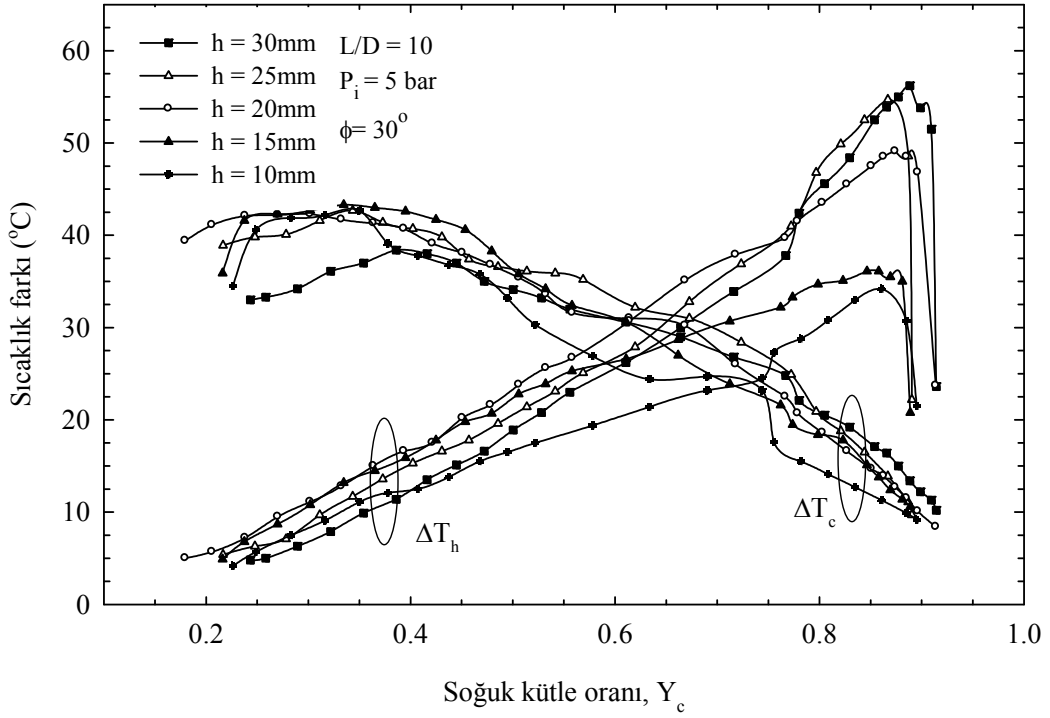
Şekil 296. $L/D=20$, $\phi=30^\circ$ ve $P_i=4$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



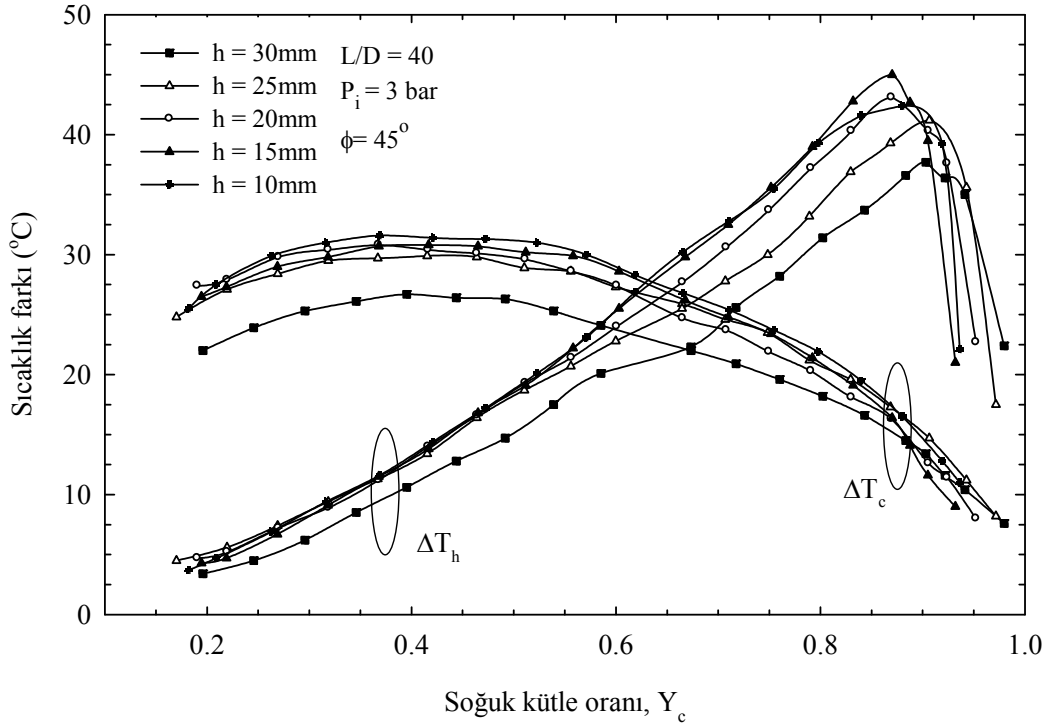
Şekil 297. $L/D=10$, $\phi=30^{\circ}$ ve $P_1=3$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



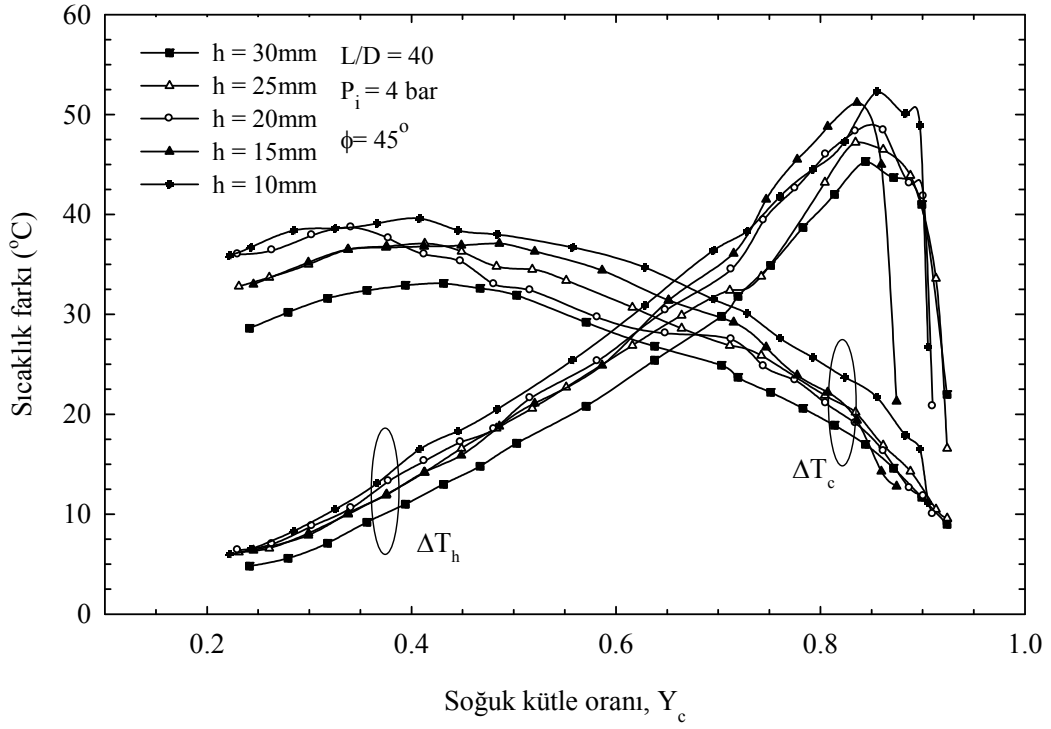
Şekil 298. $L/D=10$, $\phi=30^{\circ}$ ve $P_1=4$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



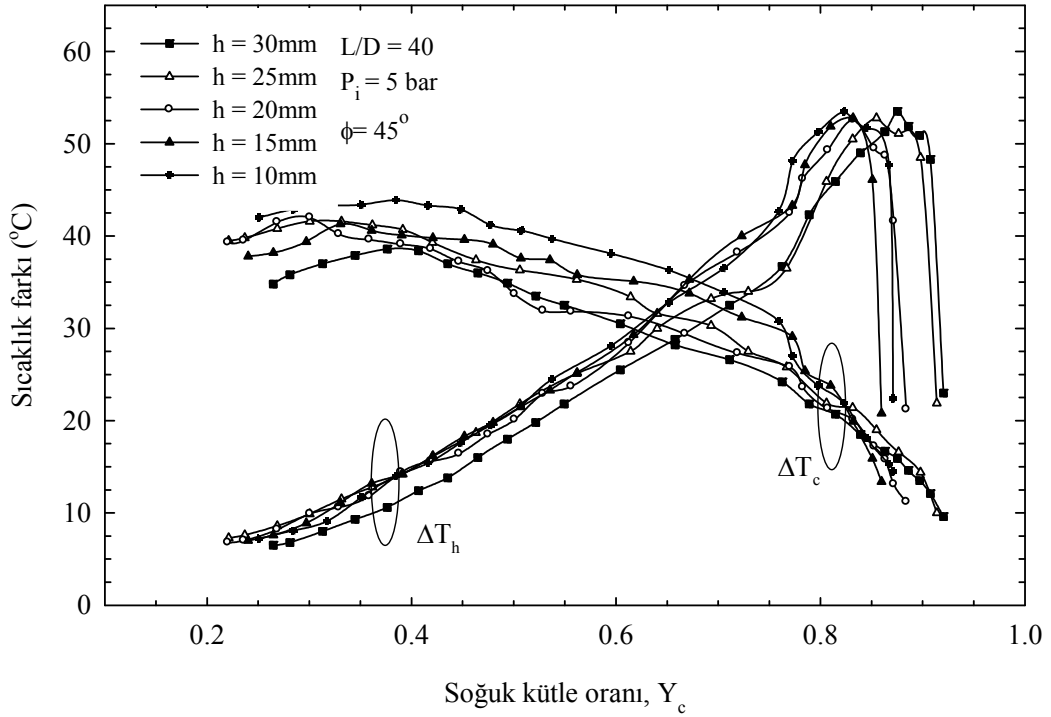
Şekil 299. $L/D=10$, $\phi=30^\circ$ ve $P_i=5\text{ bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



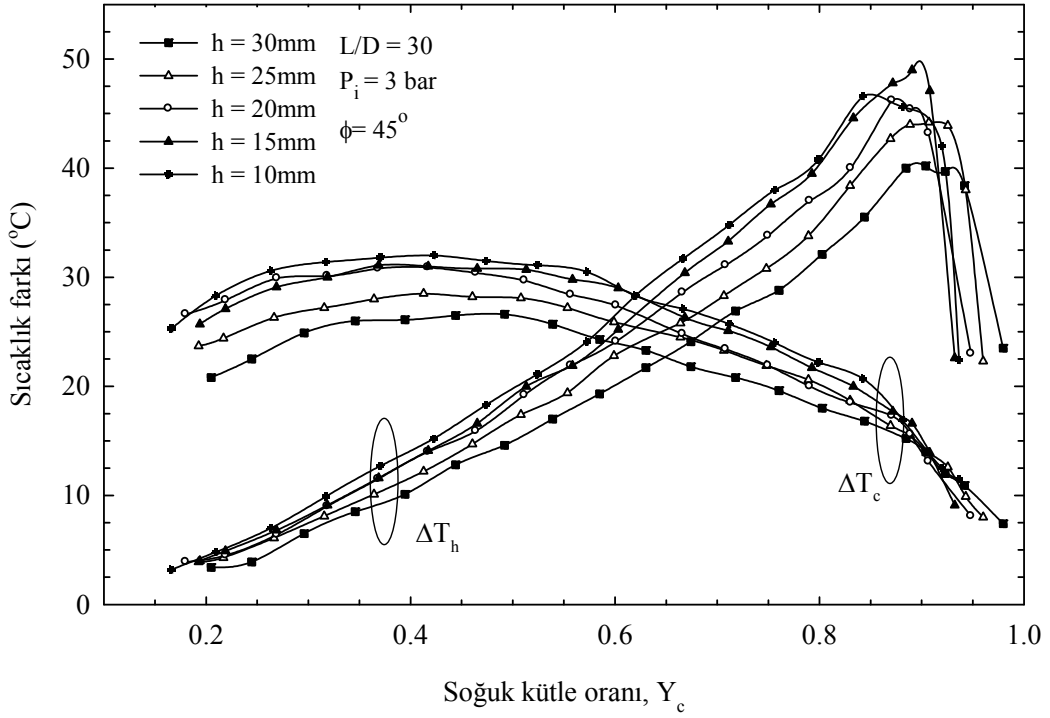
Şekil 300. $L/D=40$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=3\text{ bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



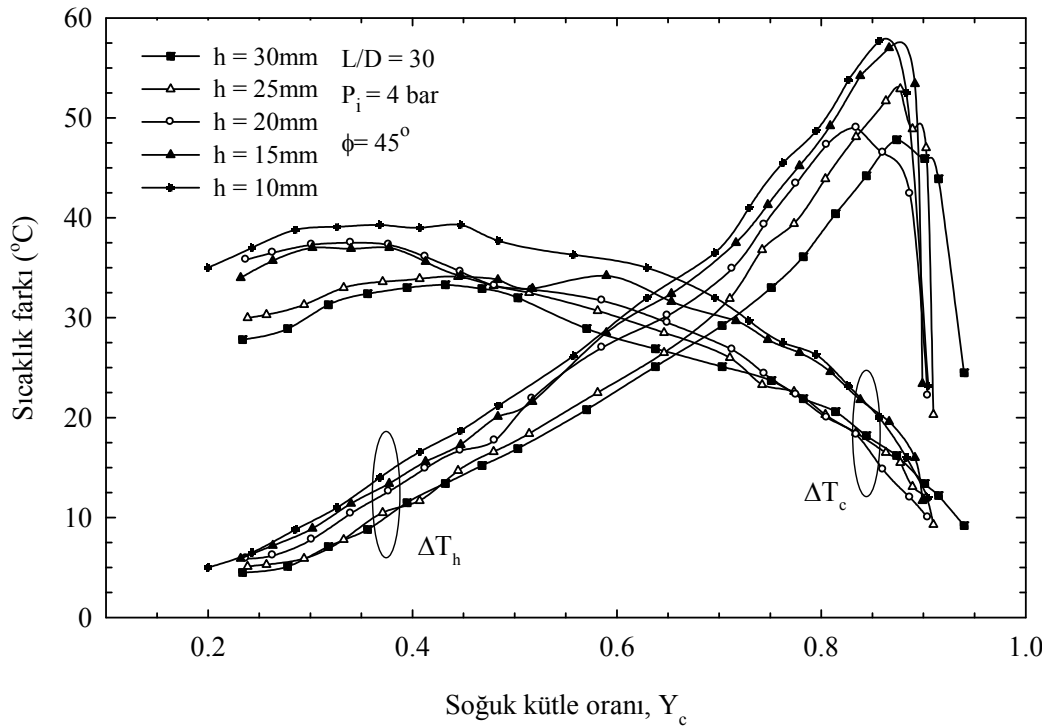
Şekil 301. L/D=40, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



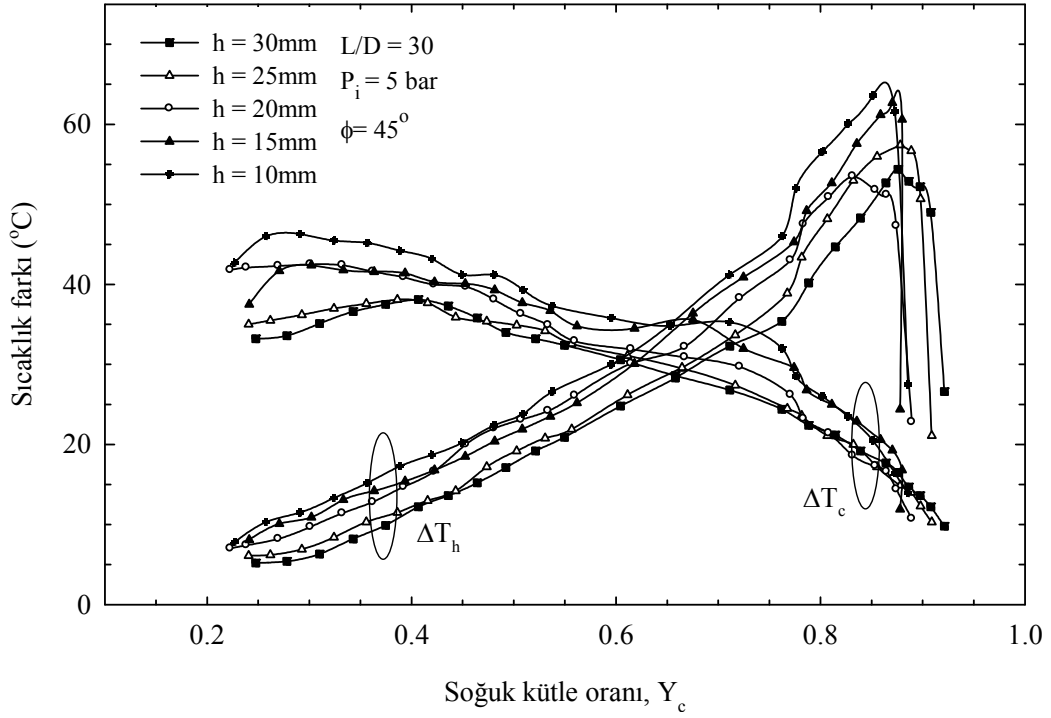
Şekil 302. L/D=40, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



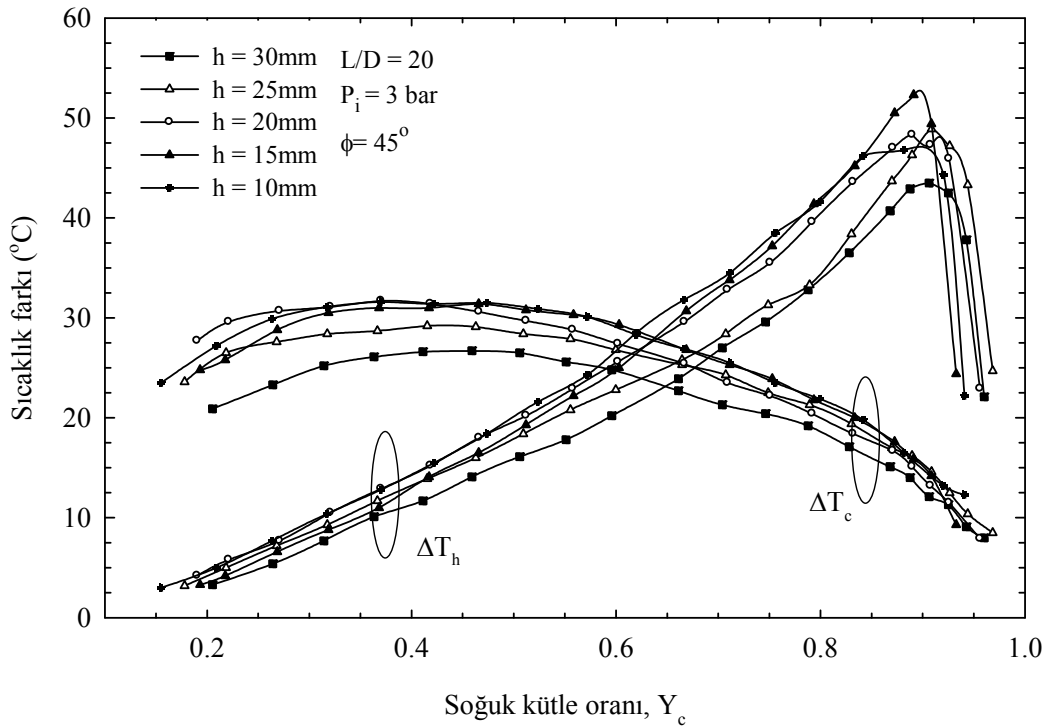
Şekil 303. L/D=30, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=3\text{ bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



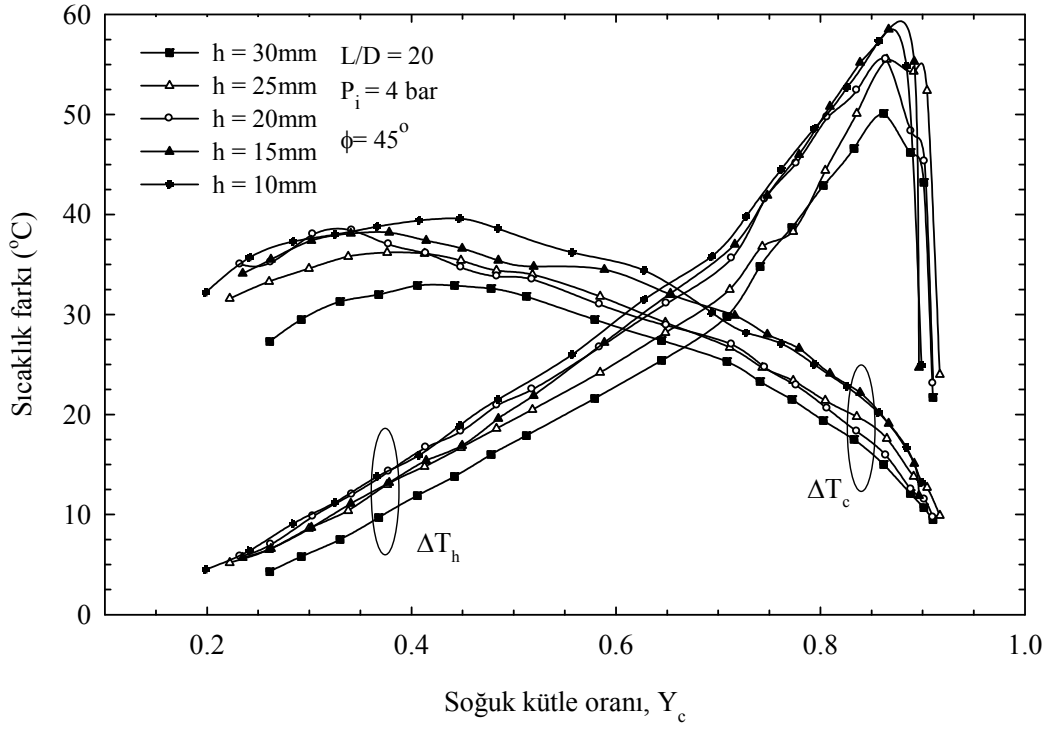
Şekil 304. L/D=30, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=4\text{ bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



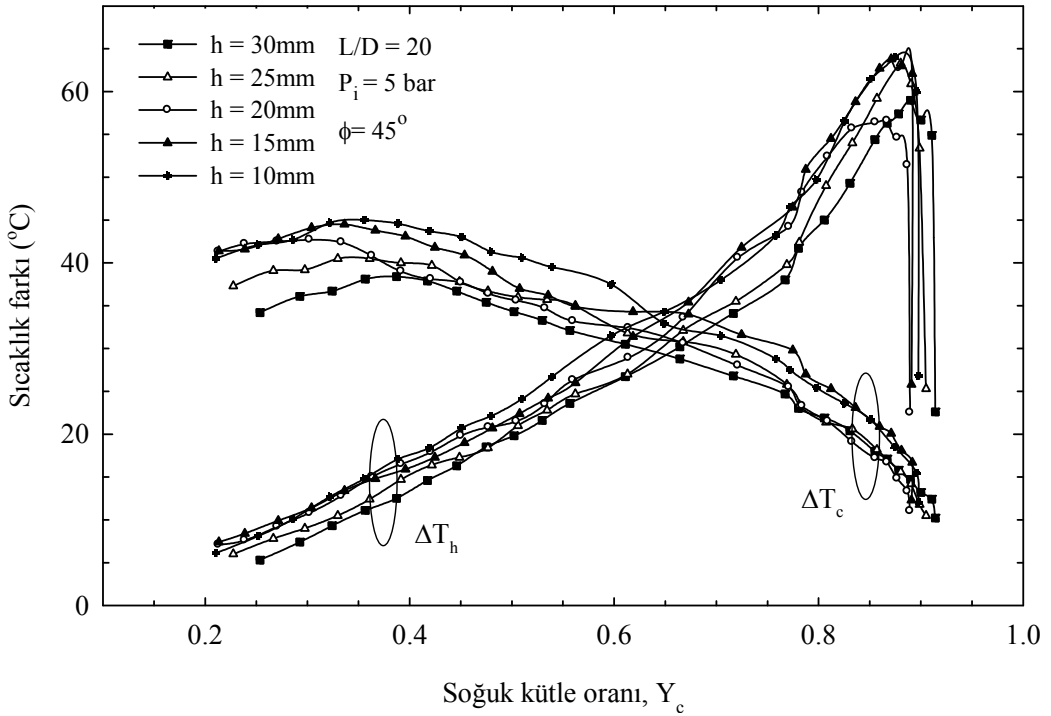
Şekil 305. $L/D=30$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=5\text{ bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



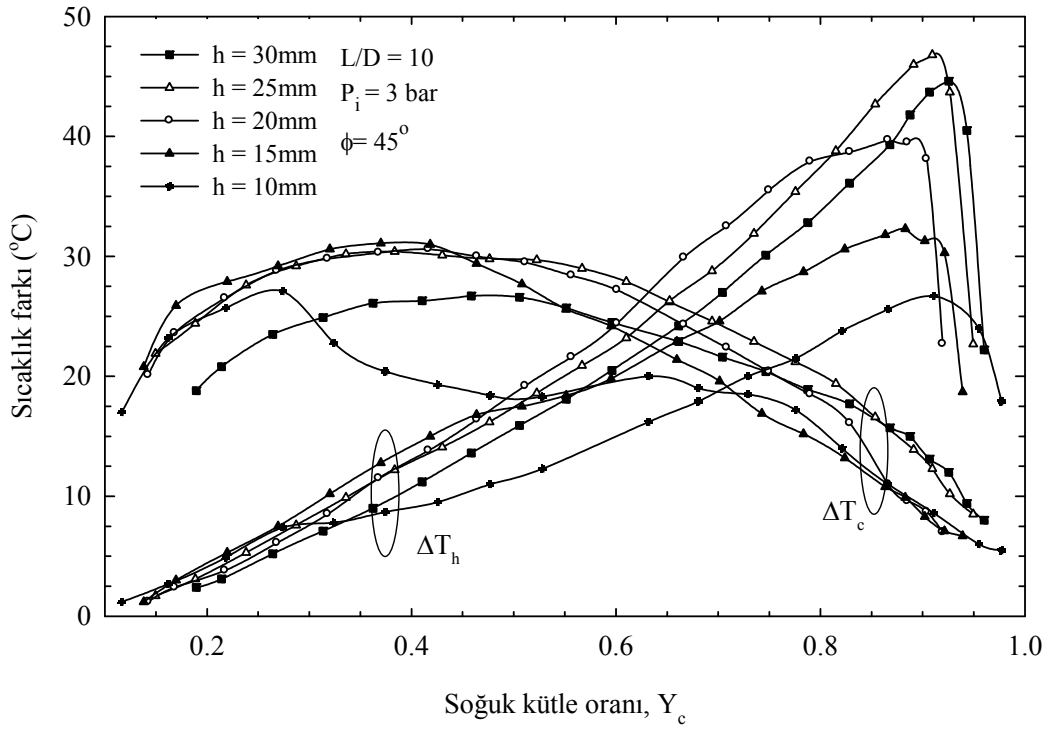
Şekil 306. $L/D=20$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=3\text{ bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



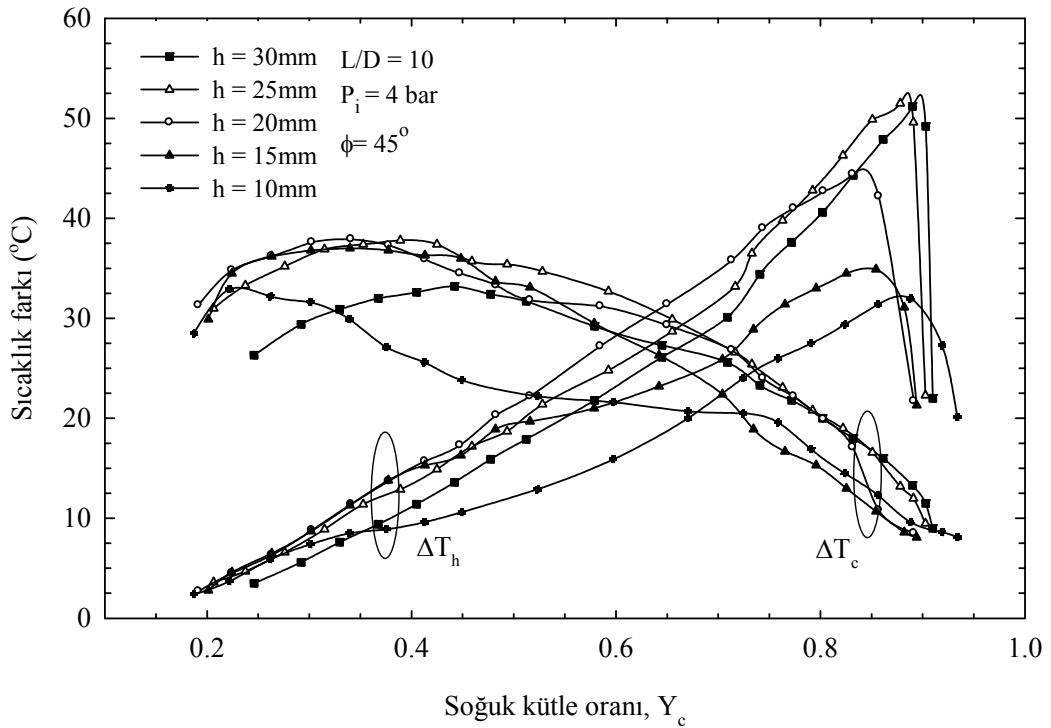
Şekil 307. $L/D=20$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=4$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



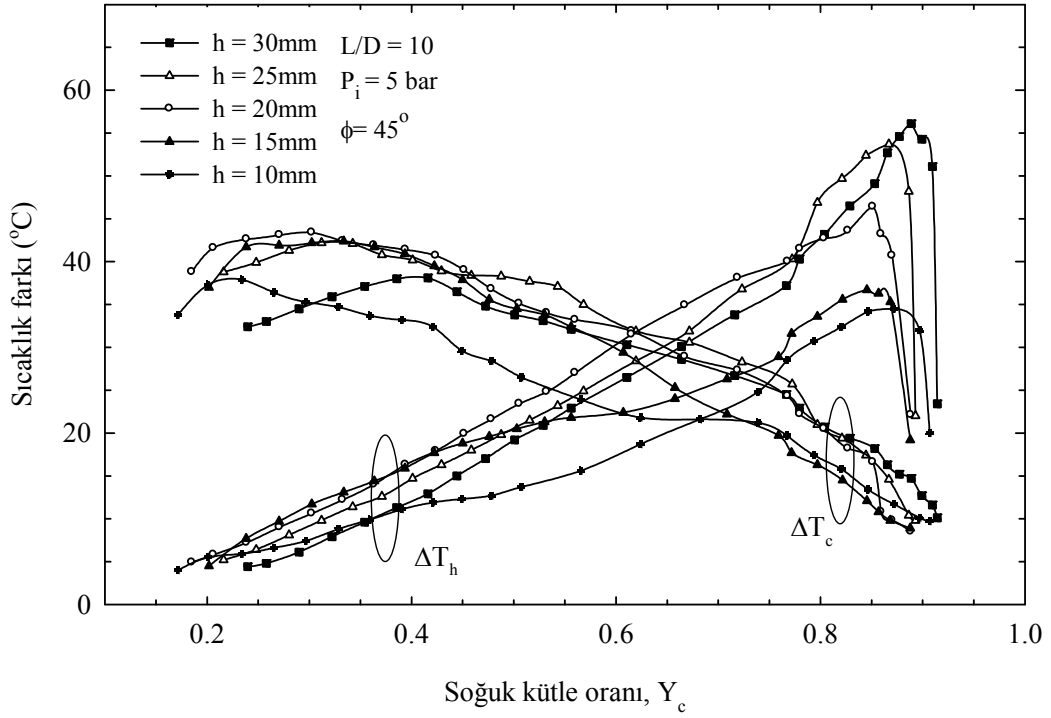
Şekil 308. $L/D=20$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=5$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



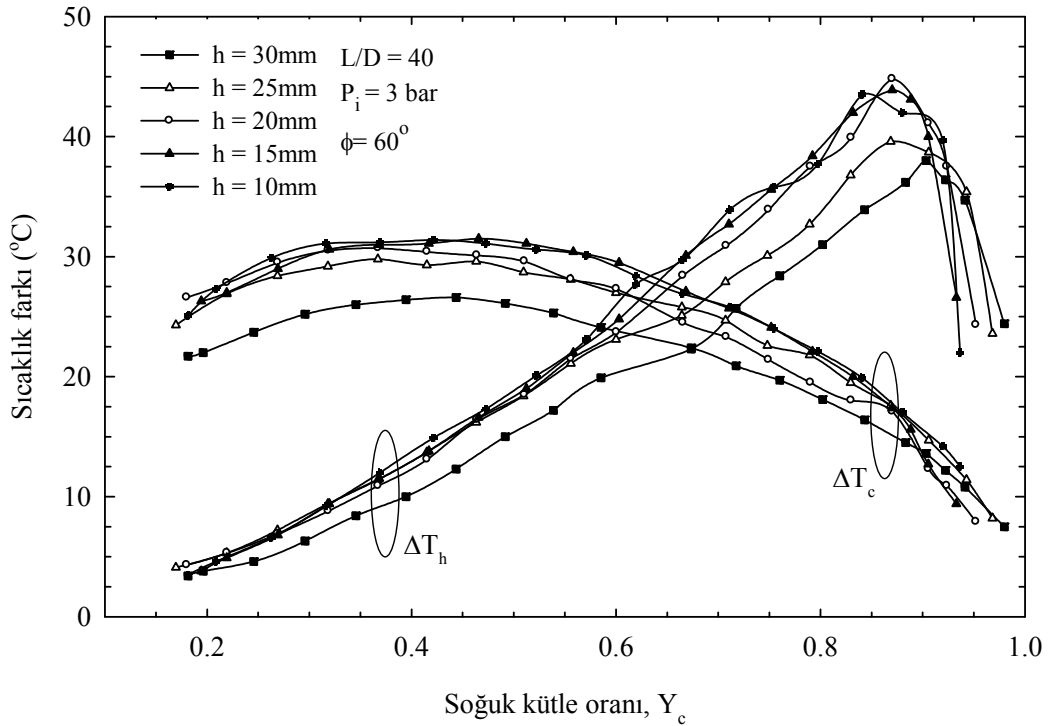
Şekil 309. $L/D=10$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=3$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



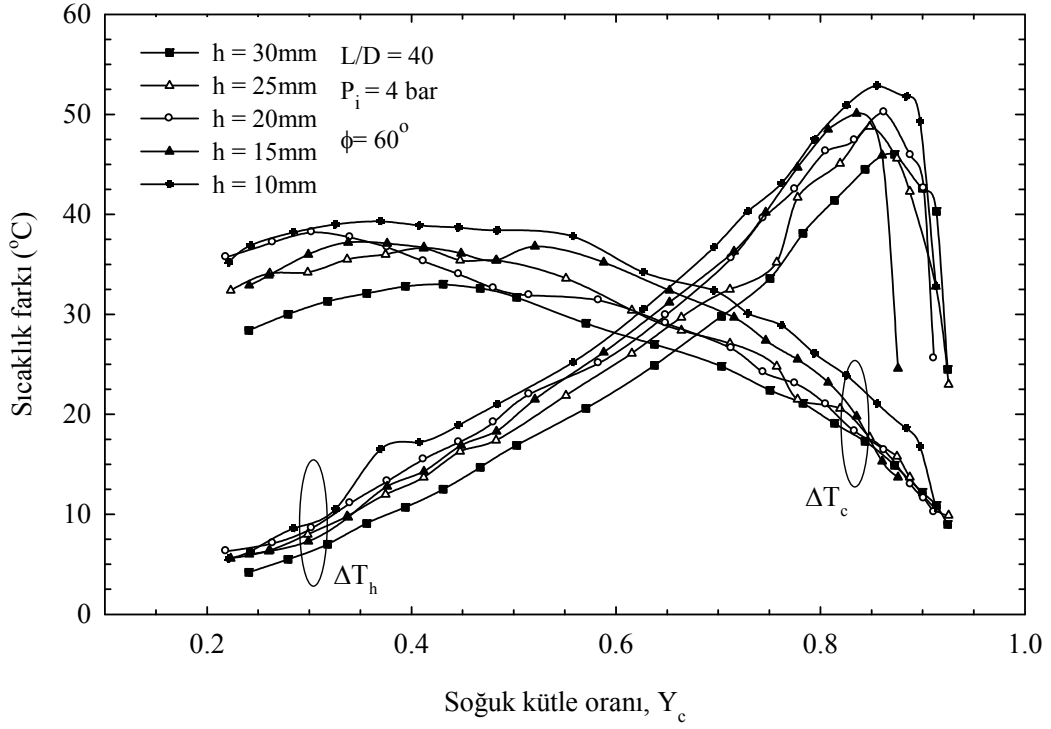
Şekil 310. $L/D=10$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=4$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



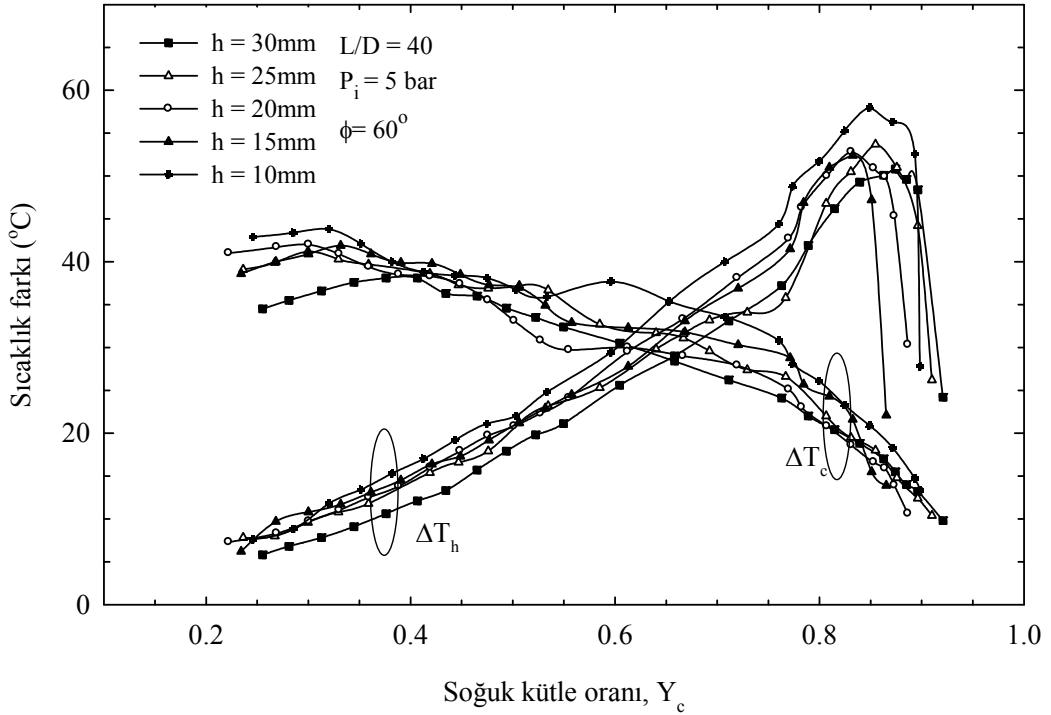
Şekil 311. L/D=10, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



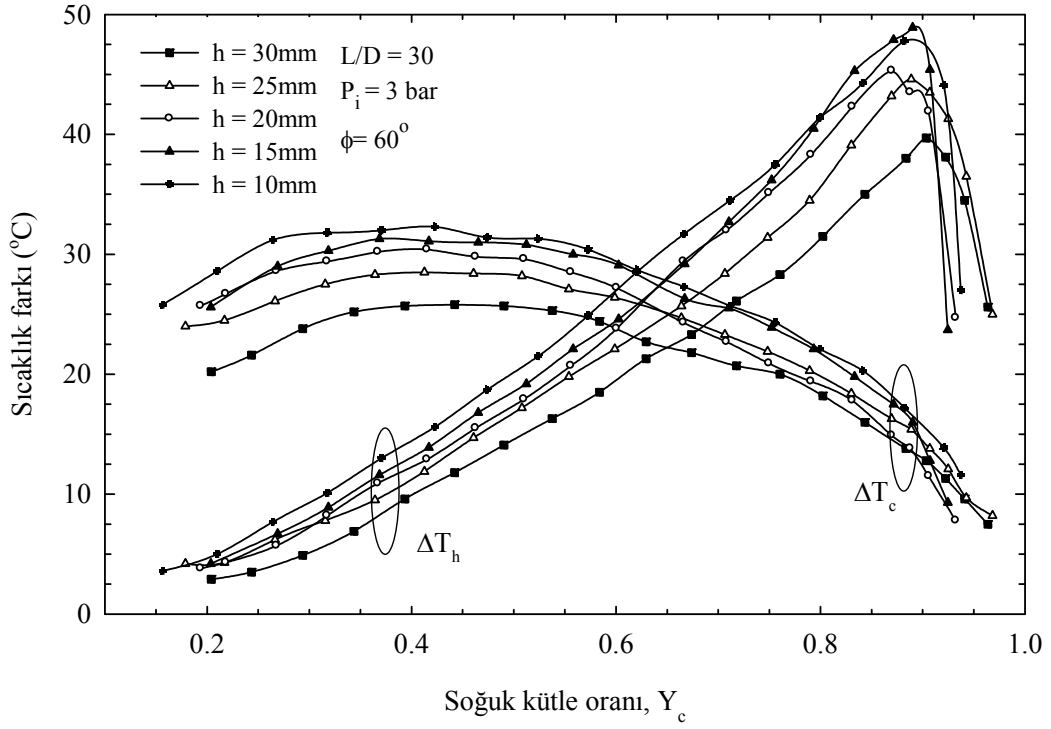
Şekil 312. L/D=40, $\phi=60^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



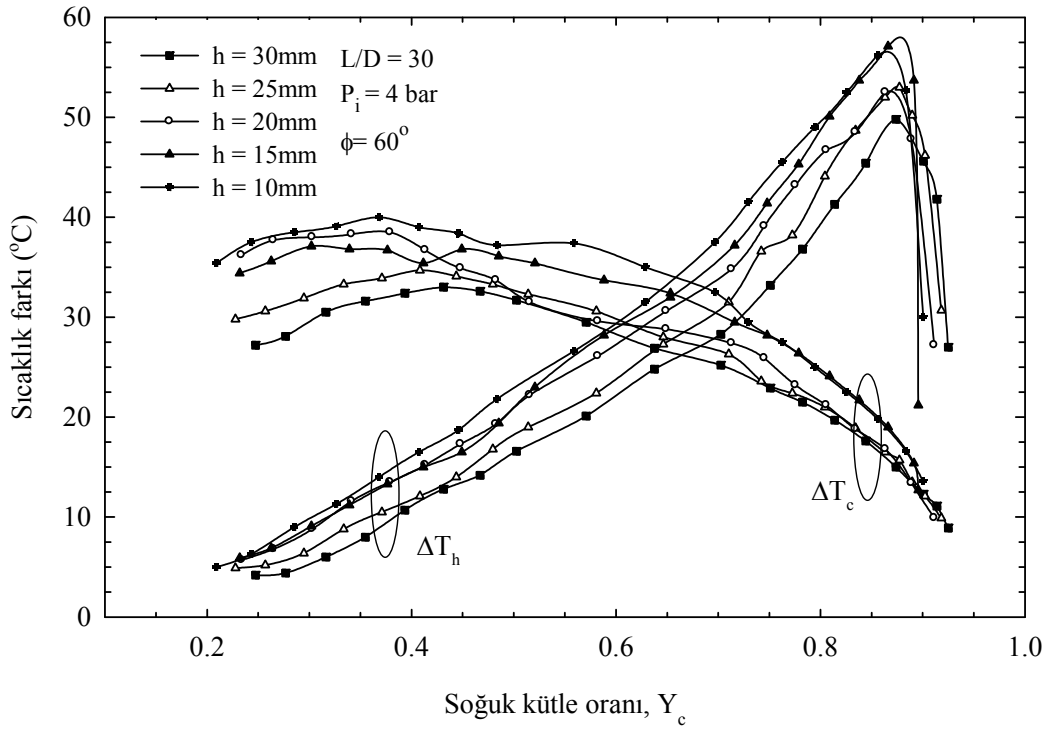
Şekil 313. $L/D=40$, $\phi=60^\circ$ ve $P_i=3$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



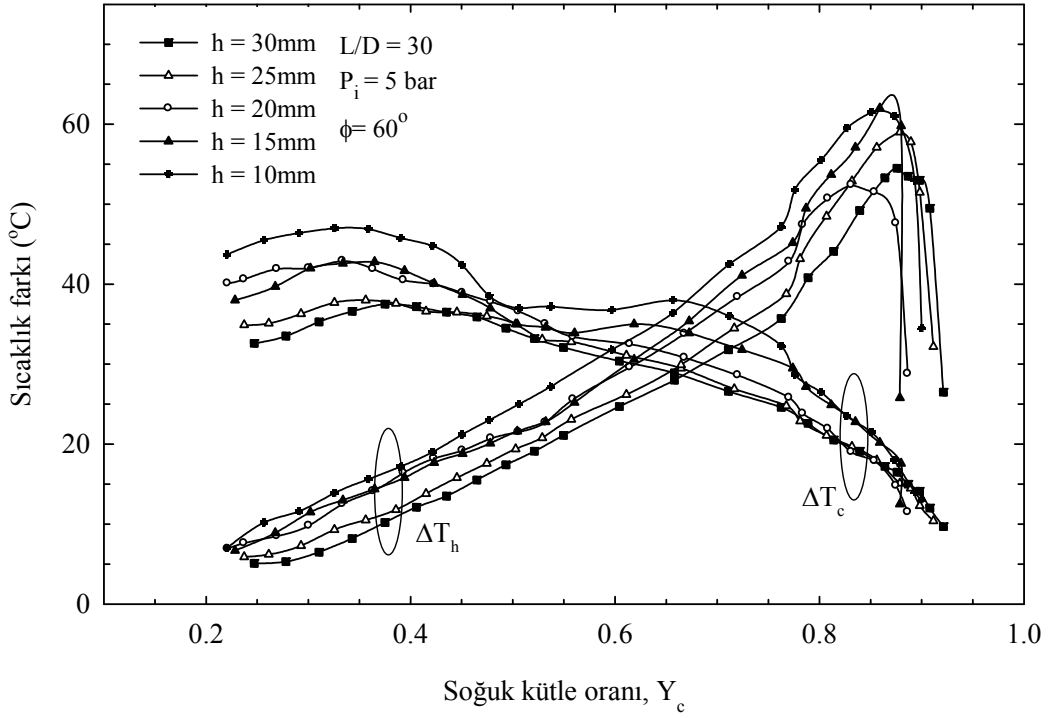
Şekil 314. $L/D=40$, $\phi=60^\circ$ ve $P_i=5$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



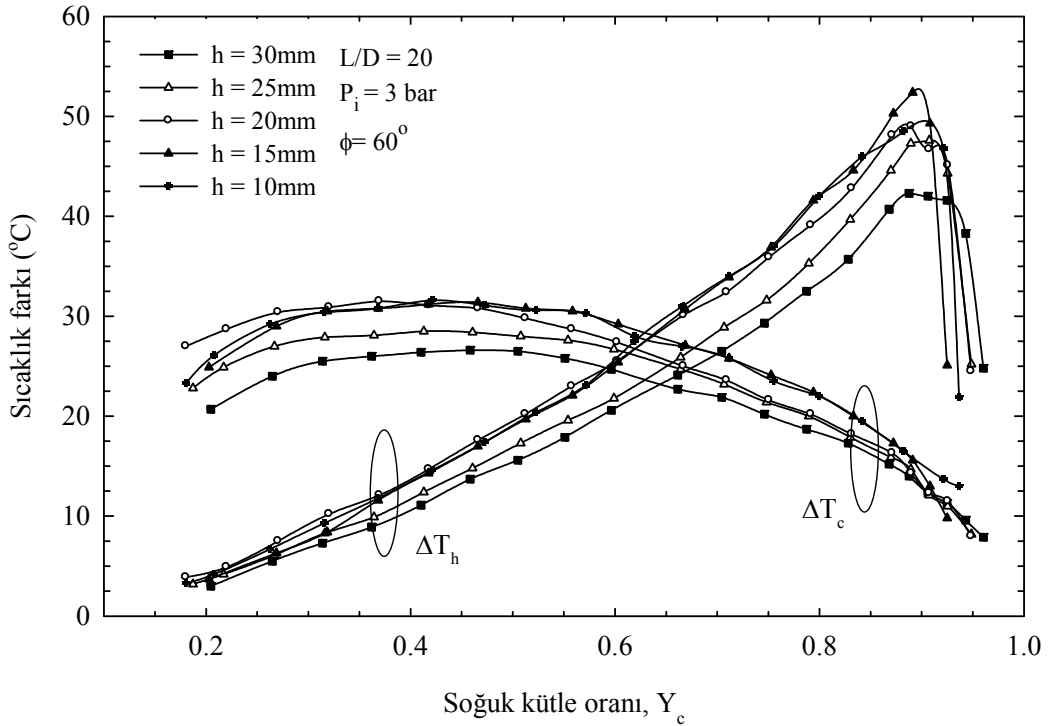
Şekil 315. $L/D=30$, $\phi=60^\circ$ ve $P_i=3$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



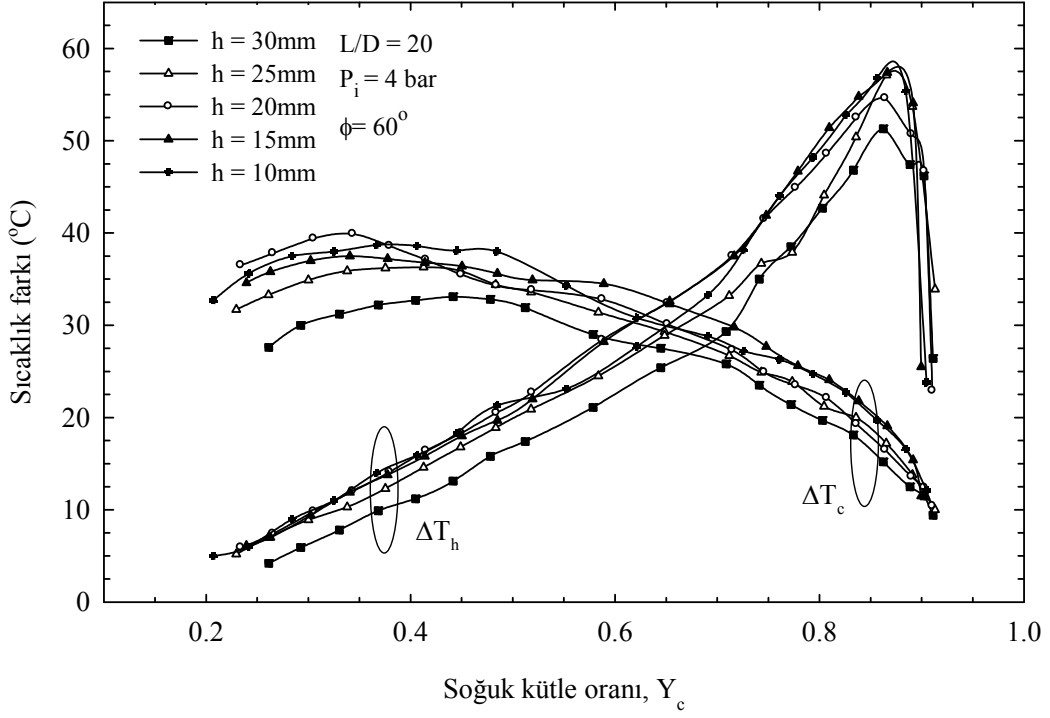
Şekil 316. $L/D=30$, $\phi=60^\circ$ ve $P_i=4$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



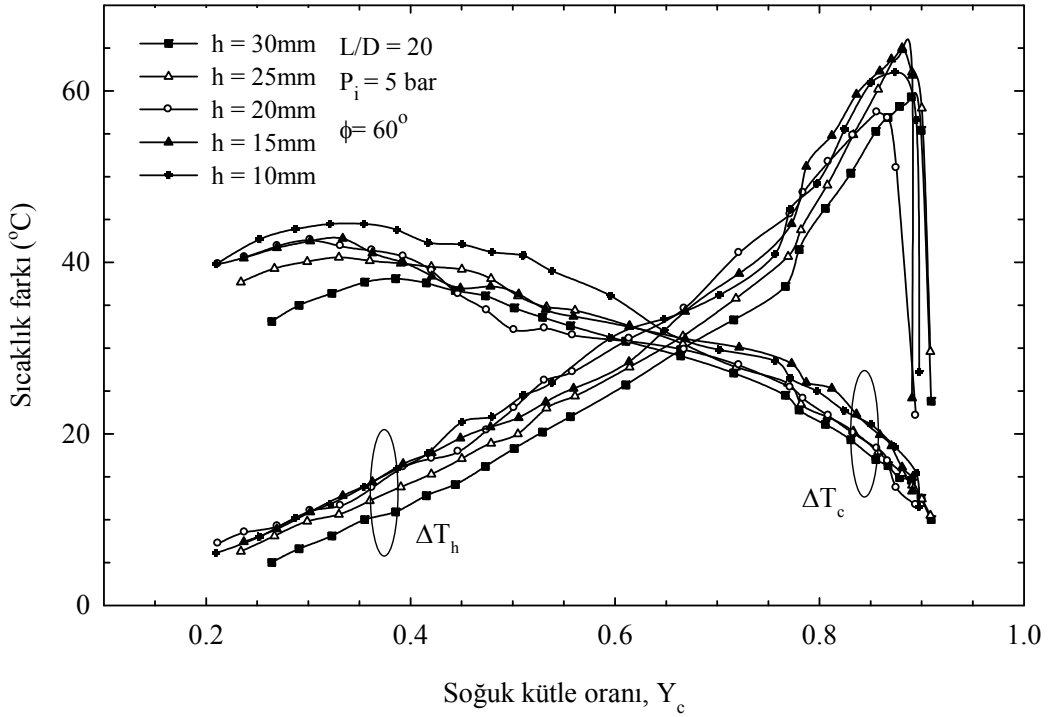
Şekil 317. $L/D=30$, $\phi=60^\circ$ ve $P_i=5\text{ bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



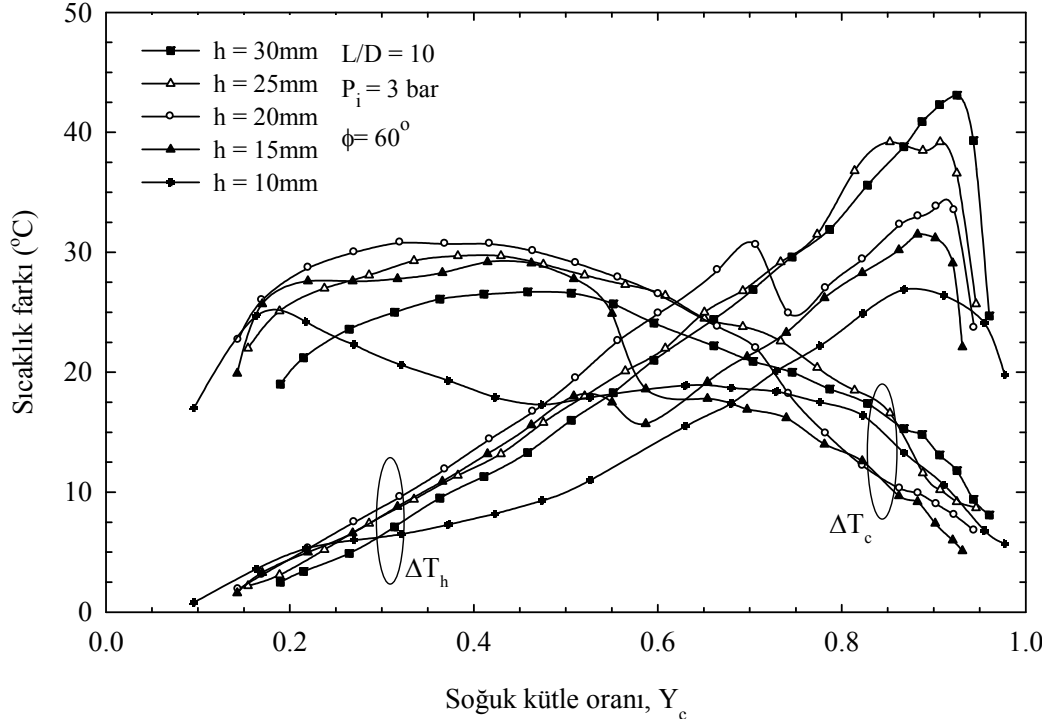
Şekil 318. $L/D=20$, $\phi=60^\circ$ ve $P_i=3\text{ bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



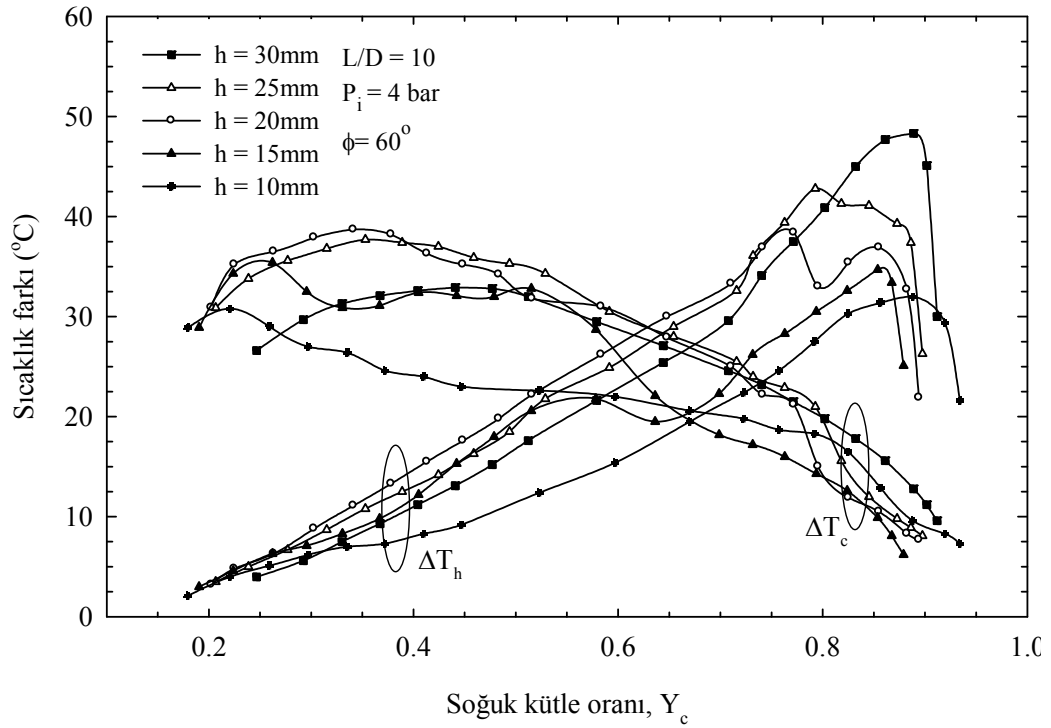
Şekil 319. $L/D=20$, $\phi=60^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



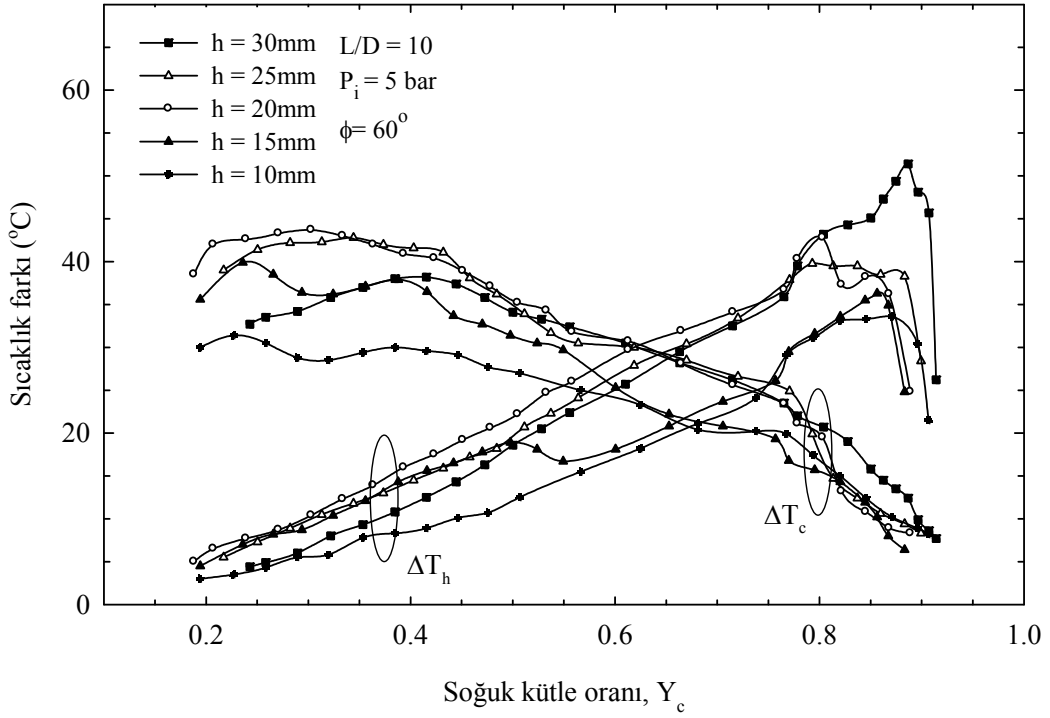
Şekil 320. $L/D=20$, $\phi=60^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



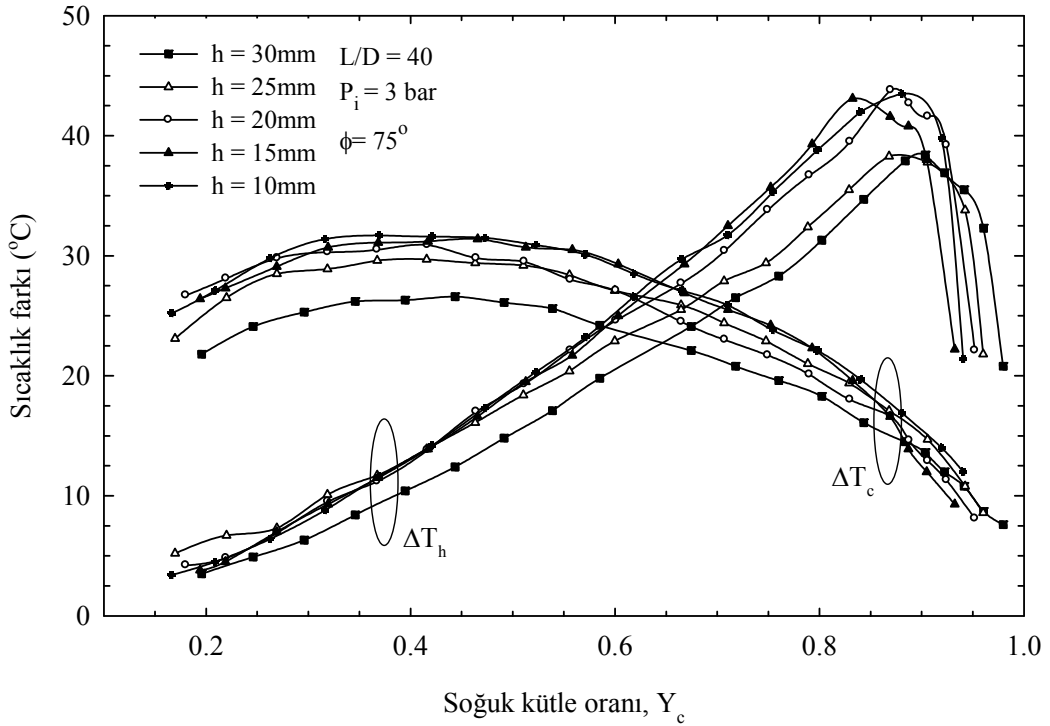
Şekil 321. $L/D=10$, $\phi=60^\circ$ ve $P_i=3$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



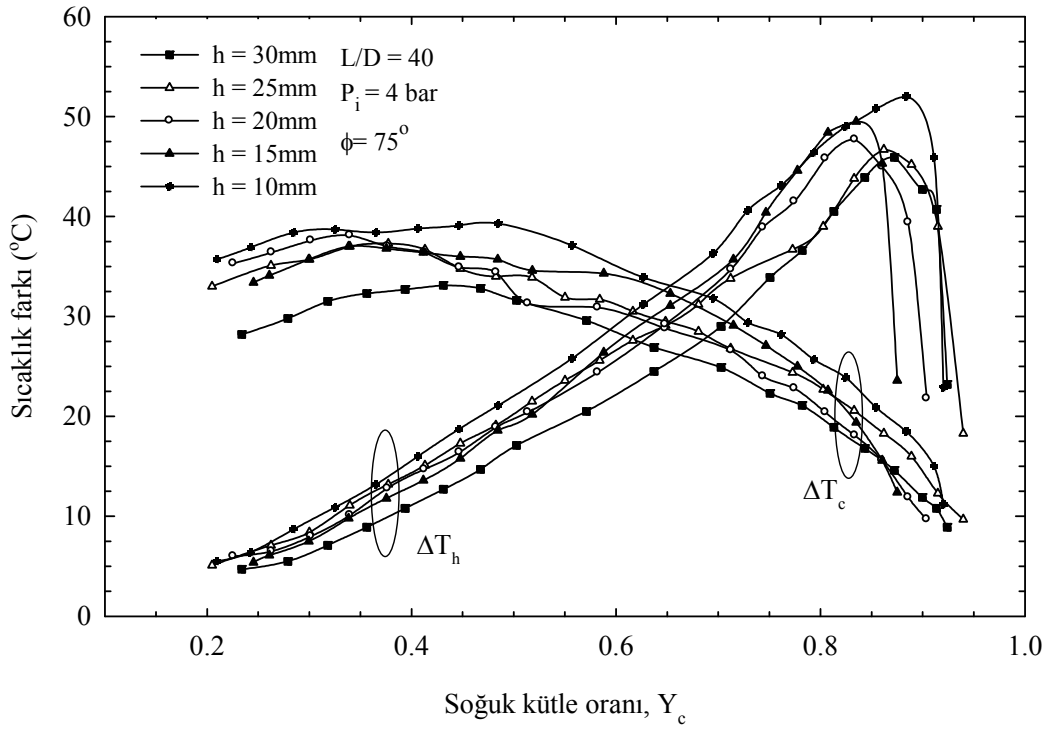
Şekil 322. $L/D=10$, $\phi=60^\circ$ ve $P_i=4$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



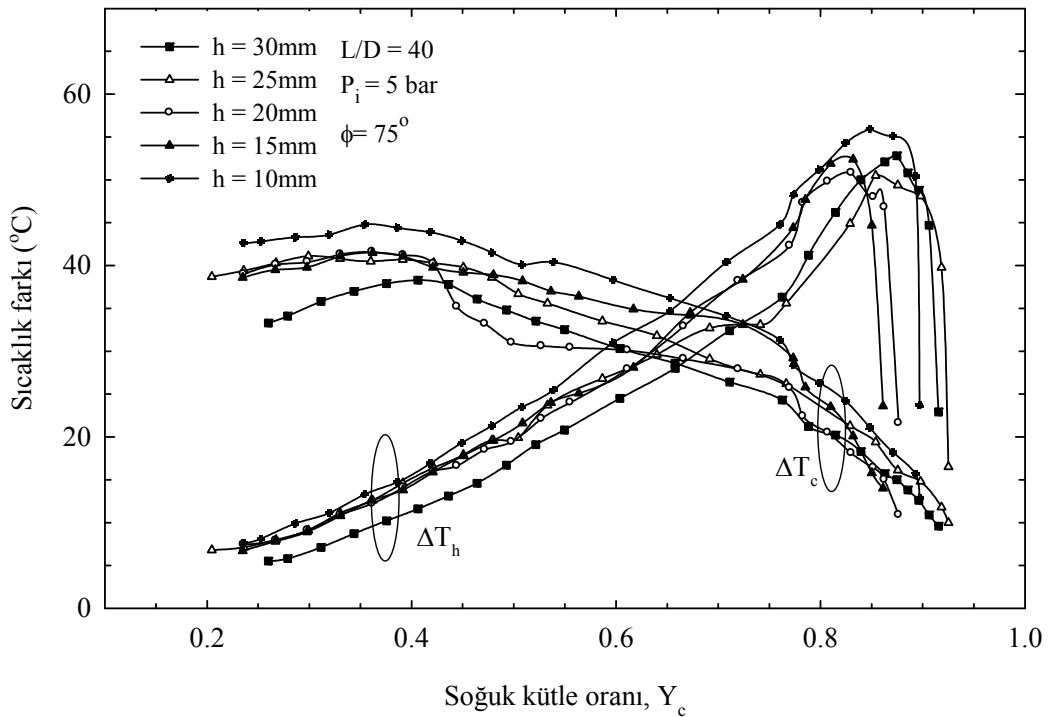
Şekil 323. $L/D=10$, $\phi=60^\circ$ ve $P_1=5\text{ bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



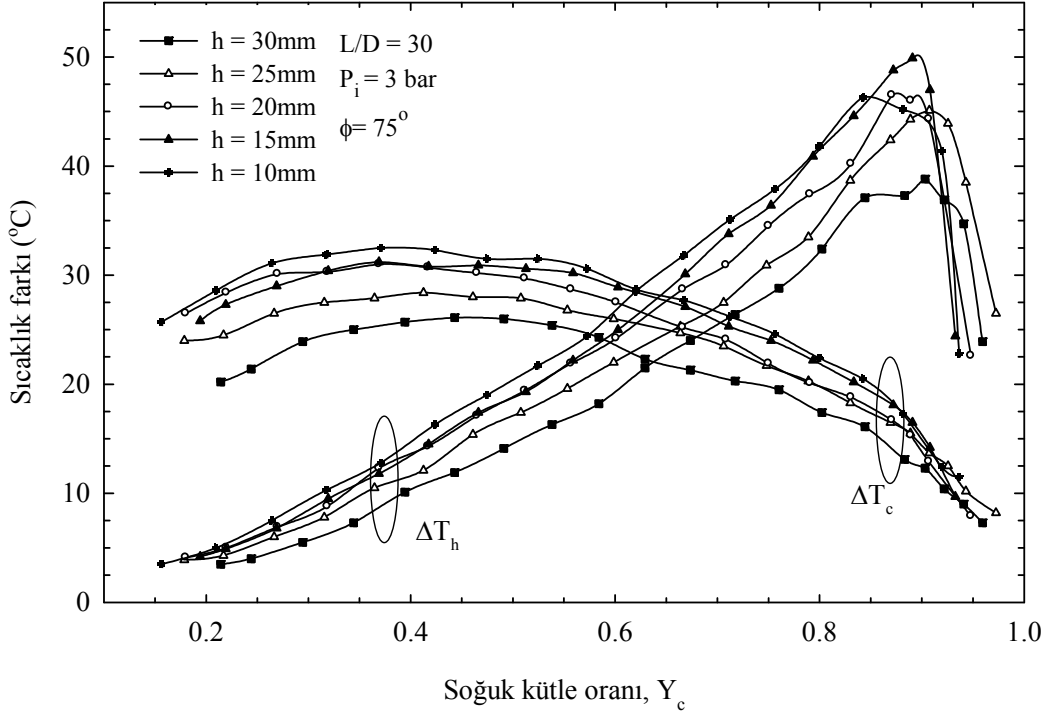
Şekil 324. $L/D=40$, $\phi=75^\circ$ ve $P_1=3\text{ bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



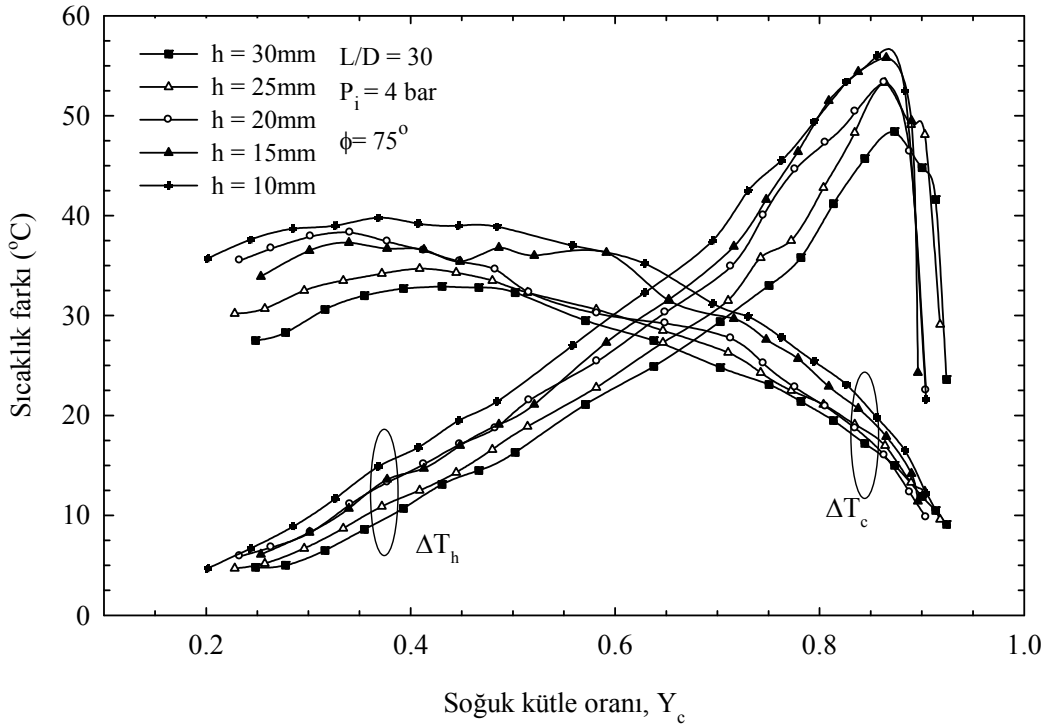
Şekil 325. $L/D=40$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=4$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



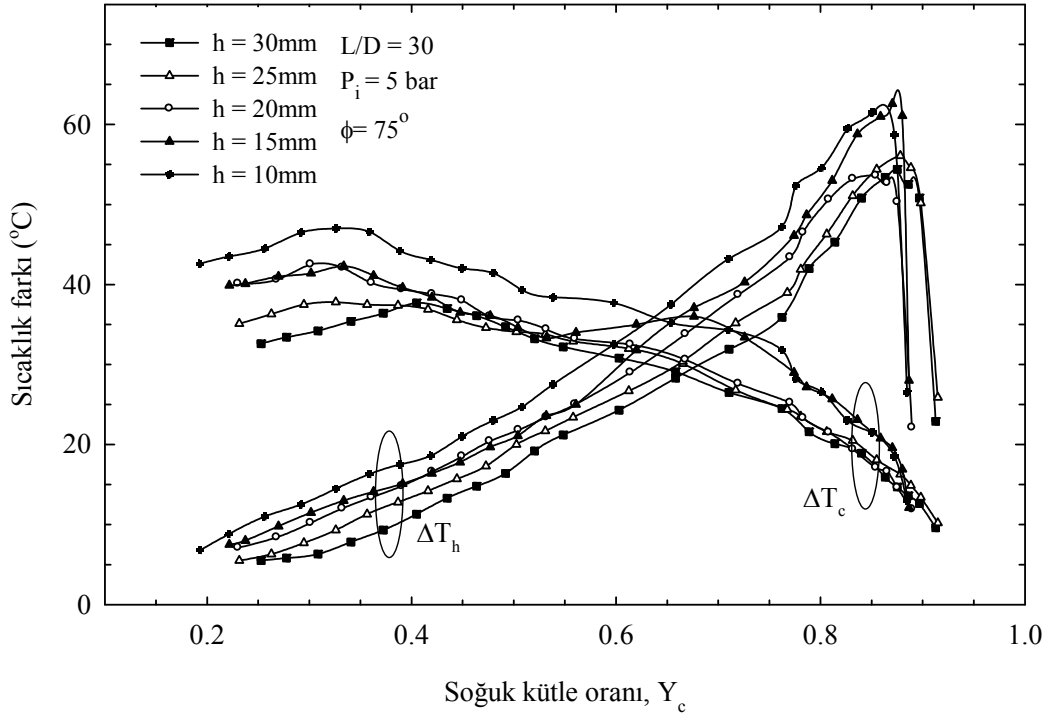
Şekil 326. $L/D=40$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=5$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



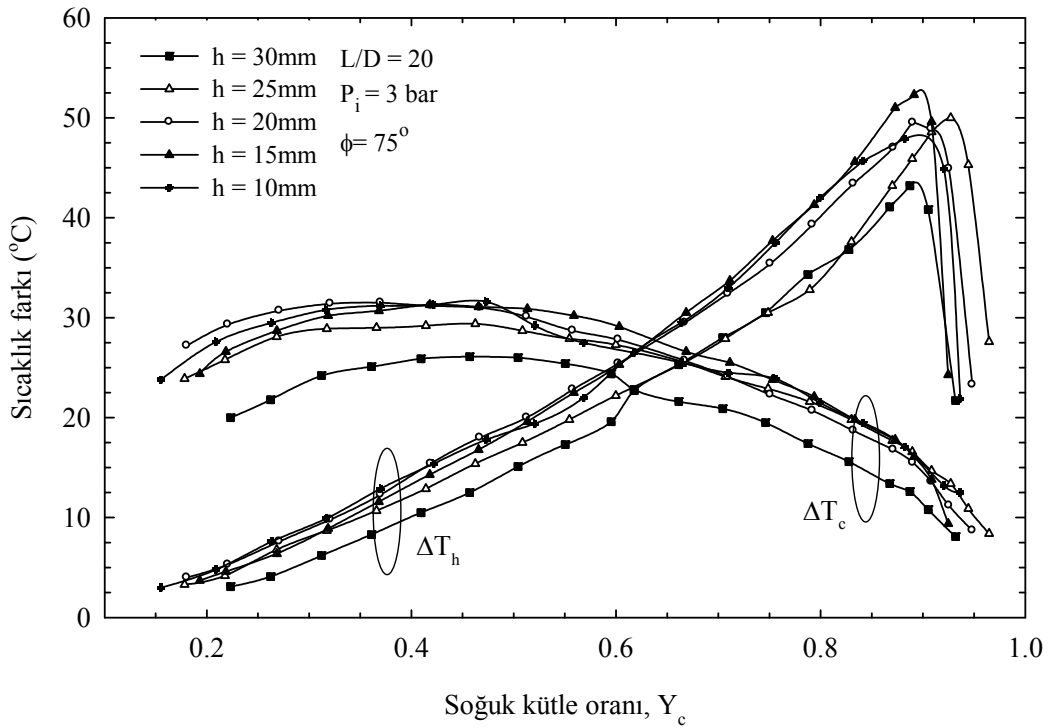
Şekil 327. $L/D=30$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=3\text{ bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



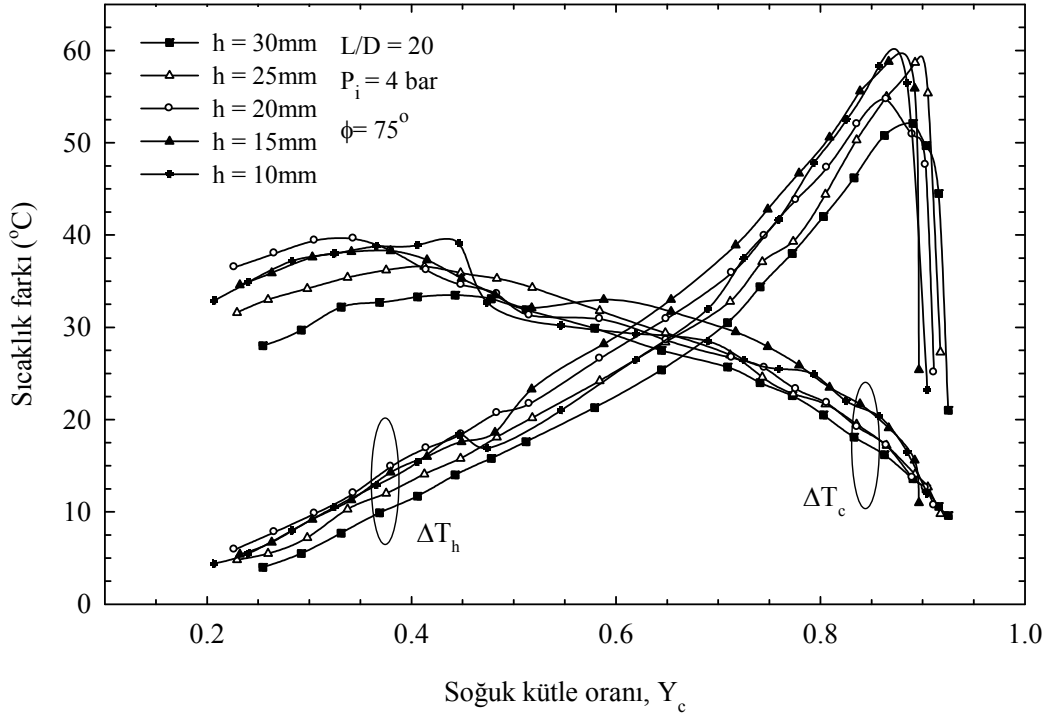
Şekil 328. $L/D=30$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=4\text{ bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



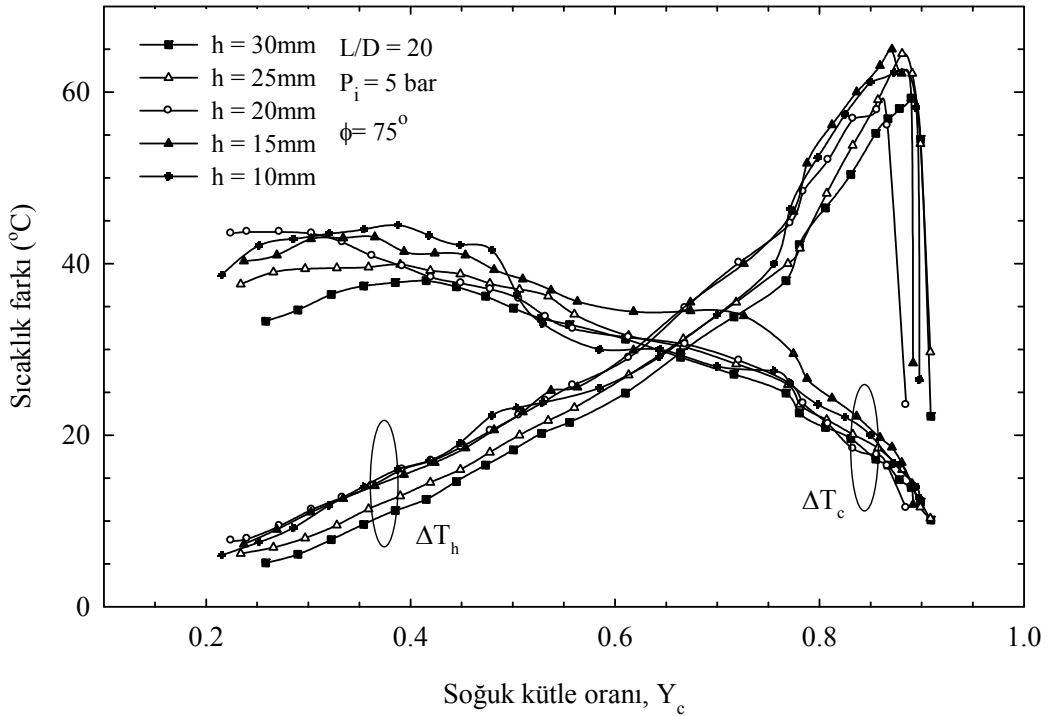
Şekil 329. $L/D=30$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



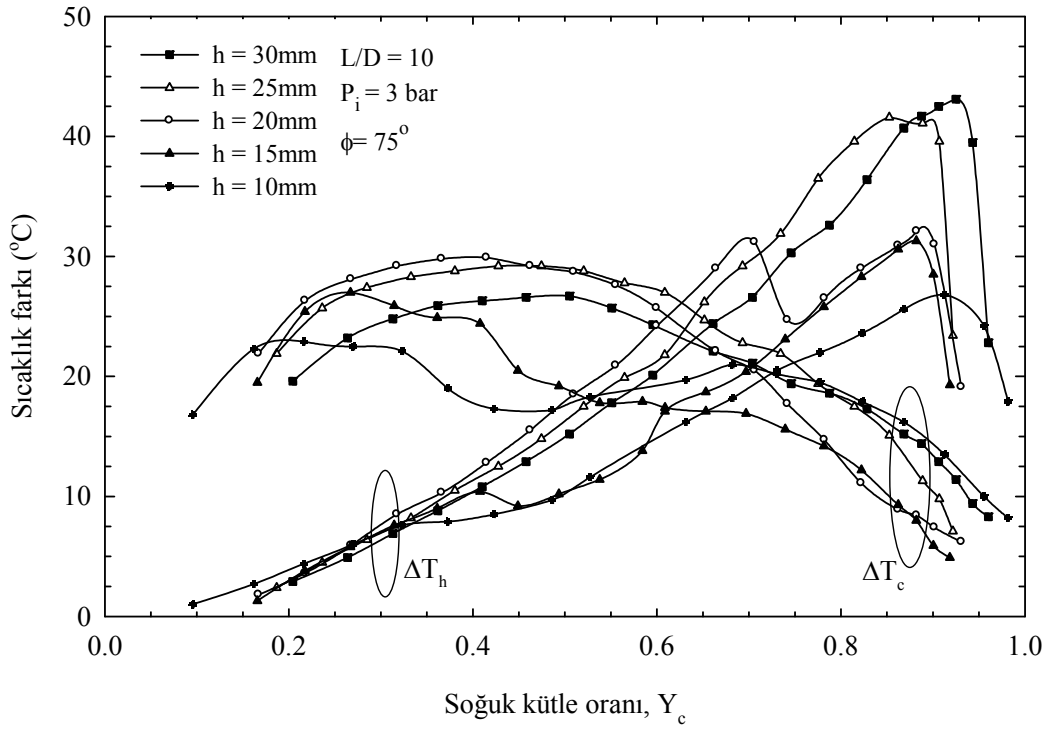
Şekil 330. $L/D=20$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



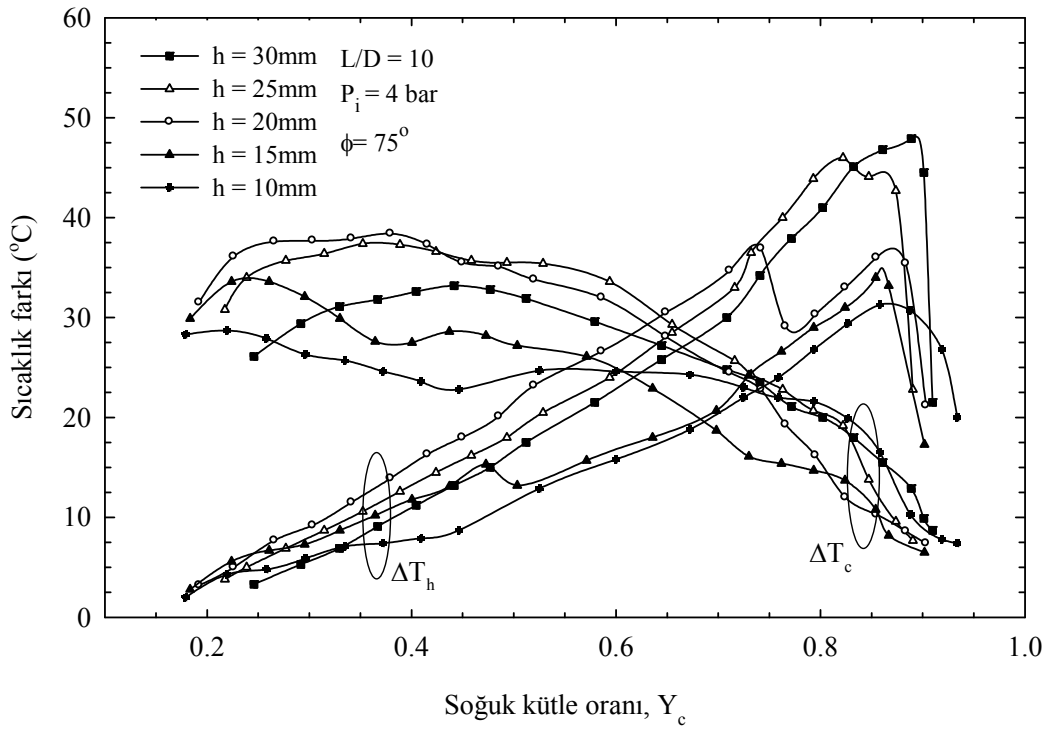
Şekil 331. $L/D=20$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



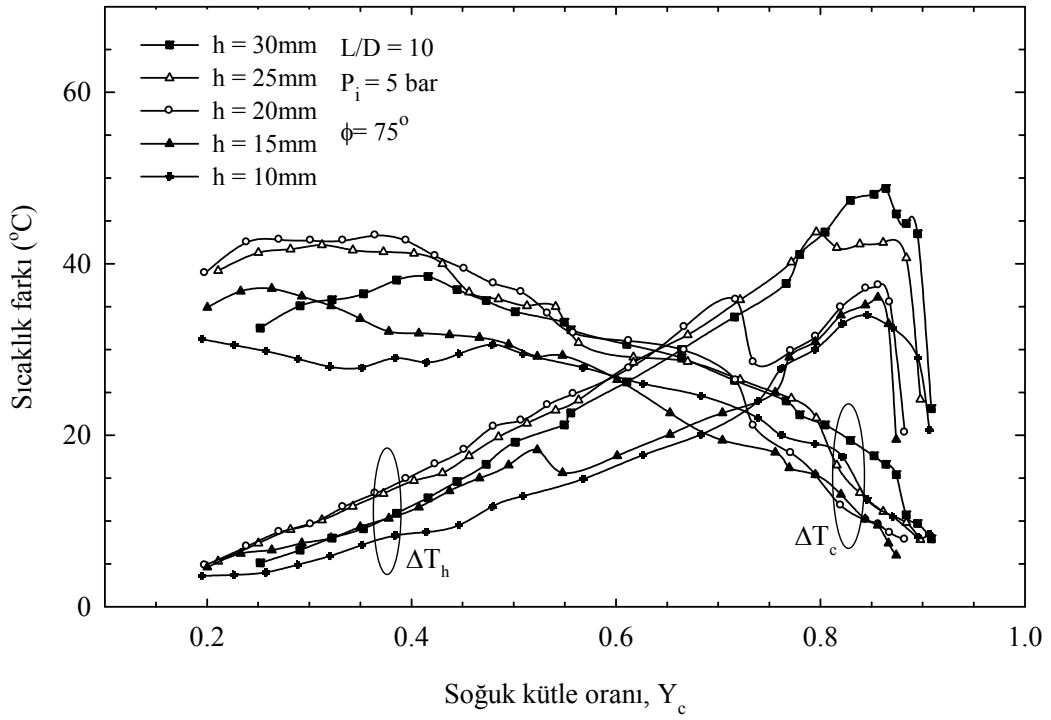
Şekil 332. $L/D=20$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



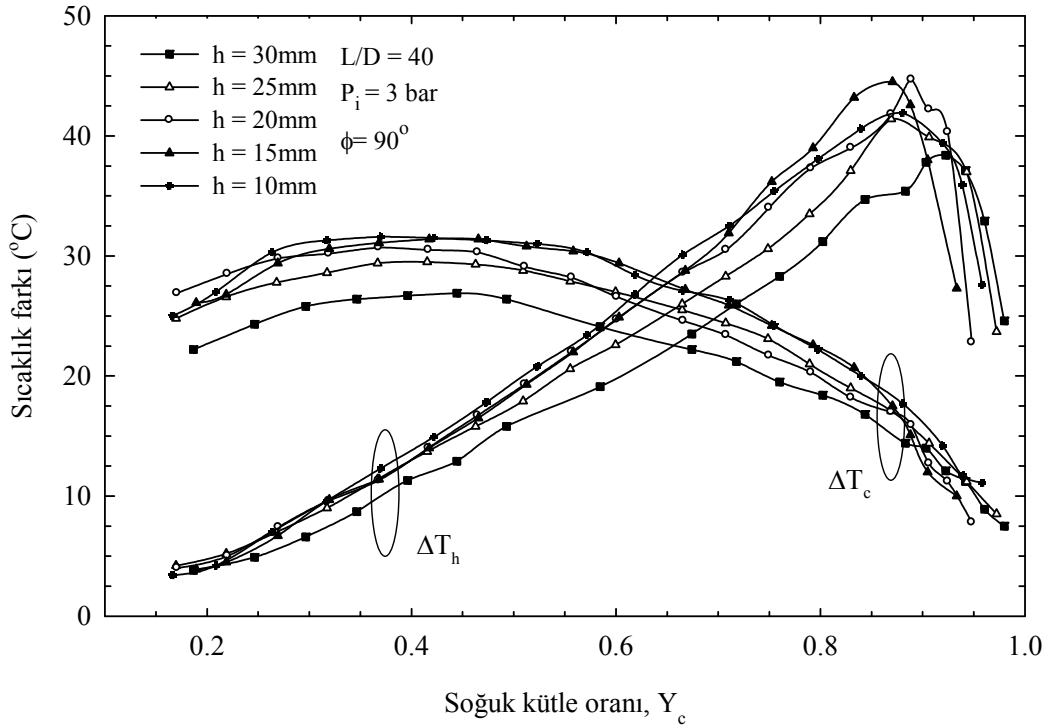
Şekil 333. $L/D=10$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=3$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



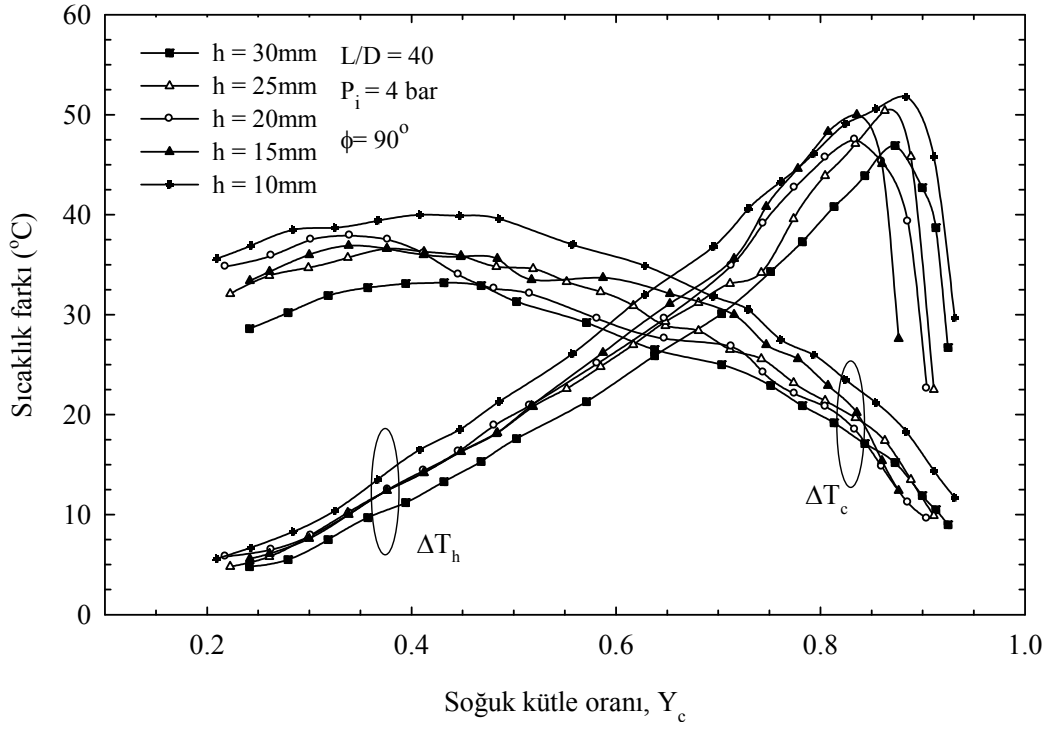
Şekil 334. $L/D=10$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=4$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



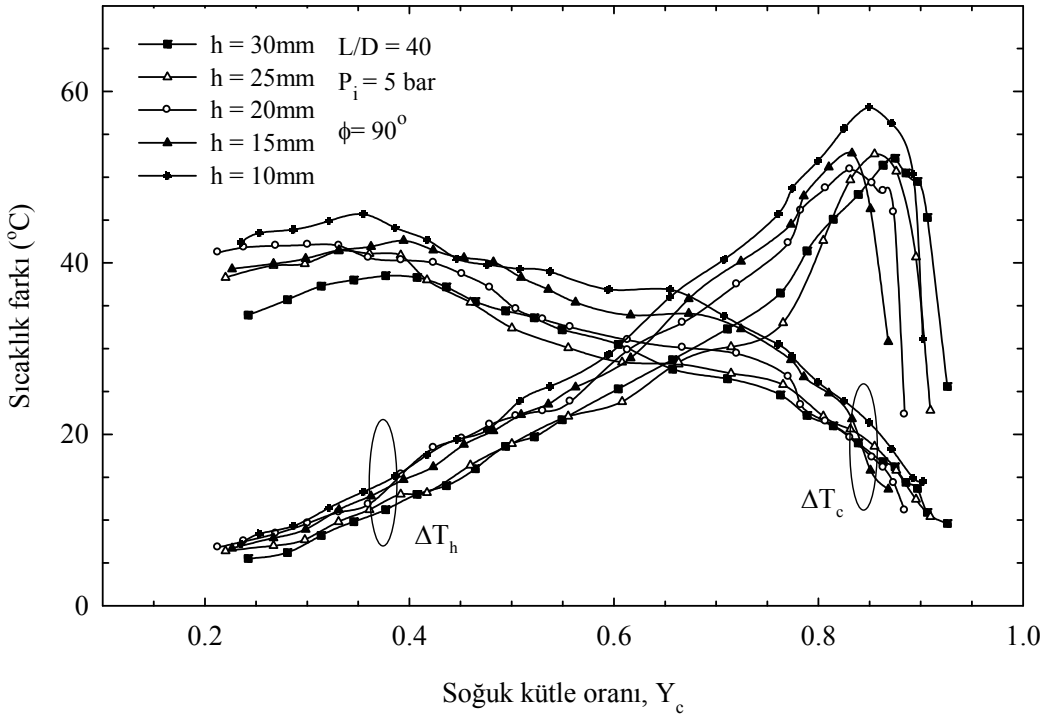
Şekil 335. $L/D=10$, $\phi=75^\circ$ ve $P_i=5$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



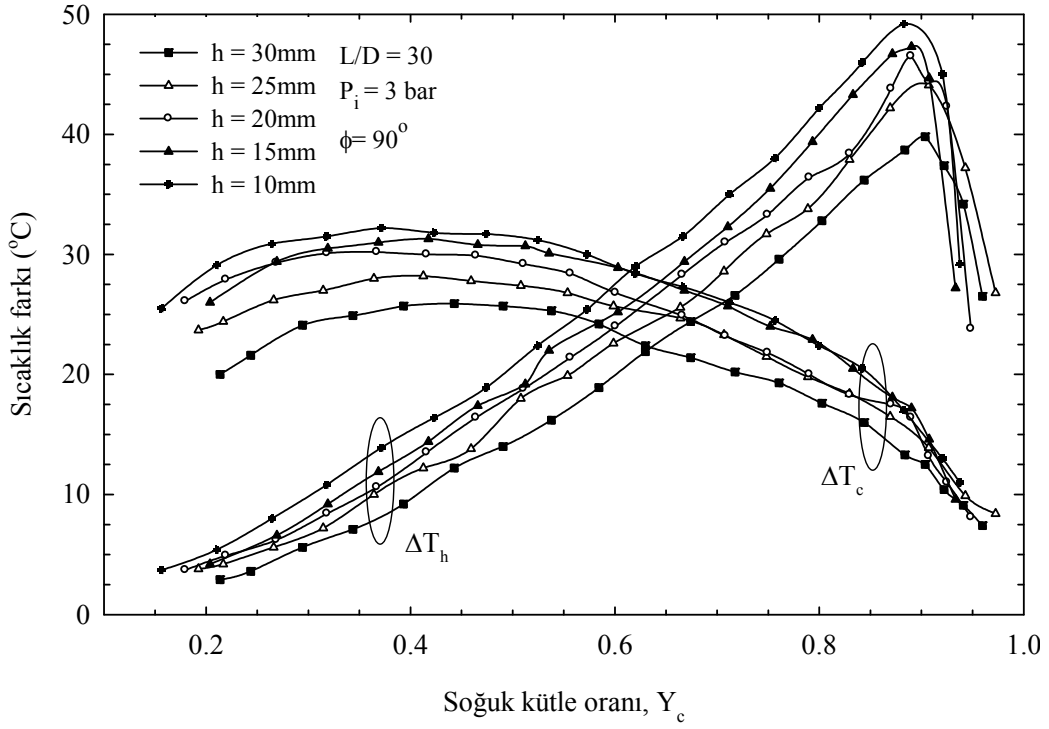
Şekil 336. $L/D=40$, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=3$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



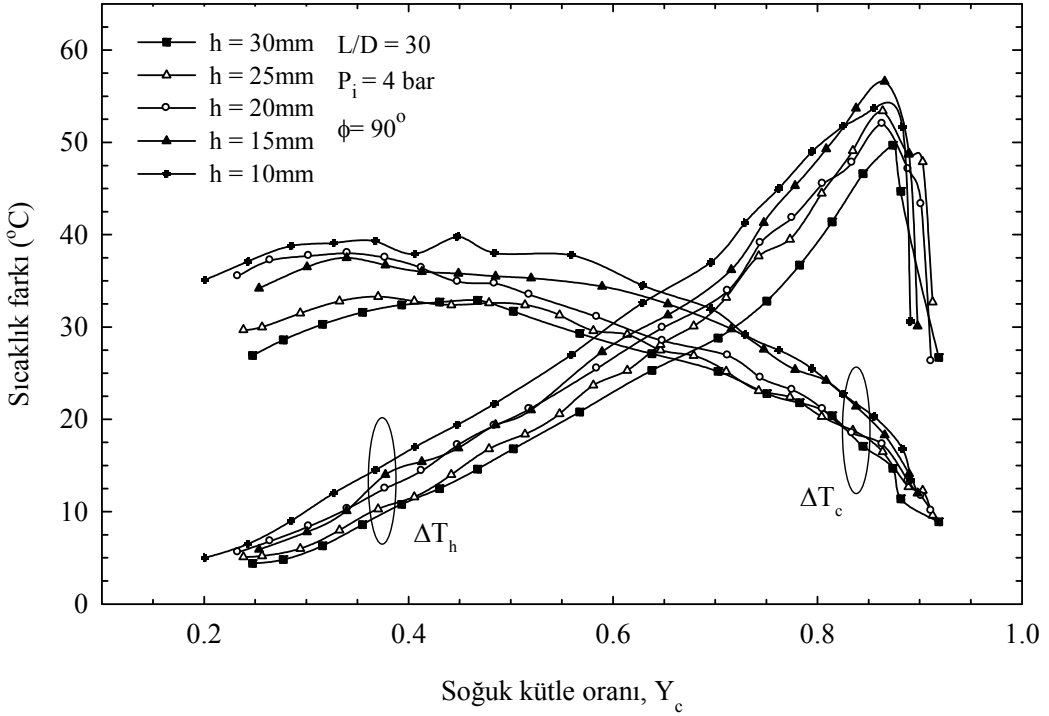
Şekil 337. $L/D=40$, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=4$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



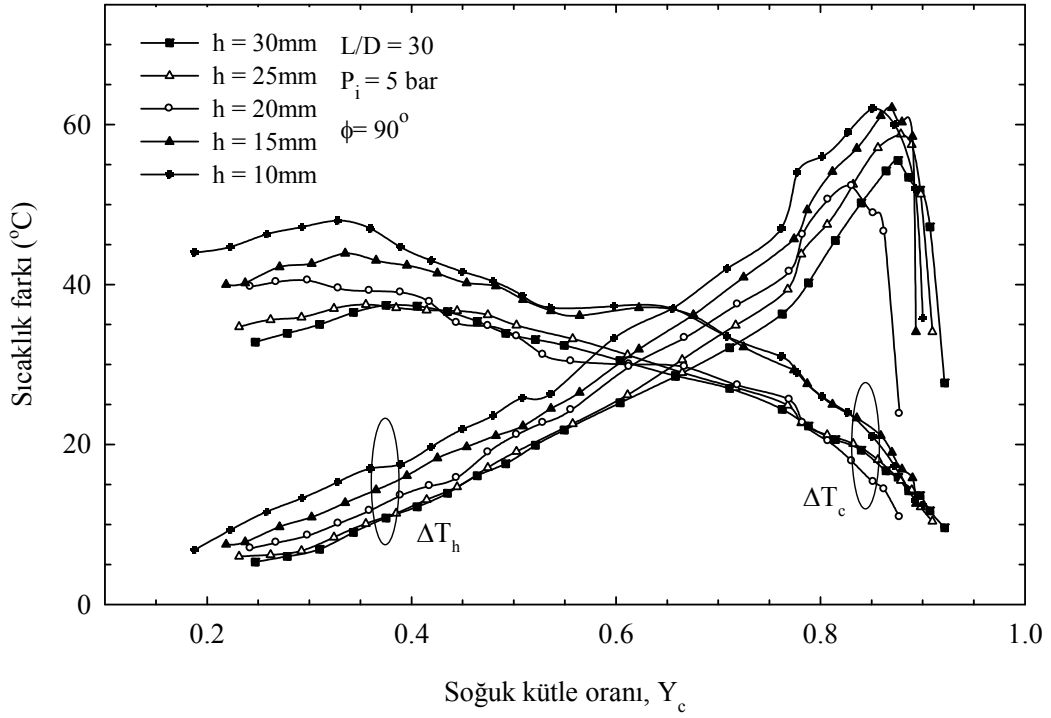
Şekil 338. $L/D=40$, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=5$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



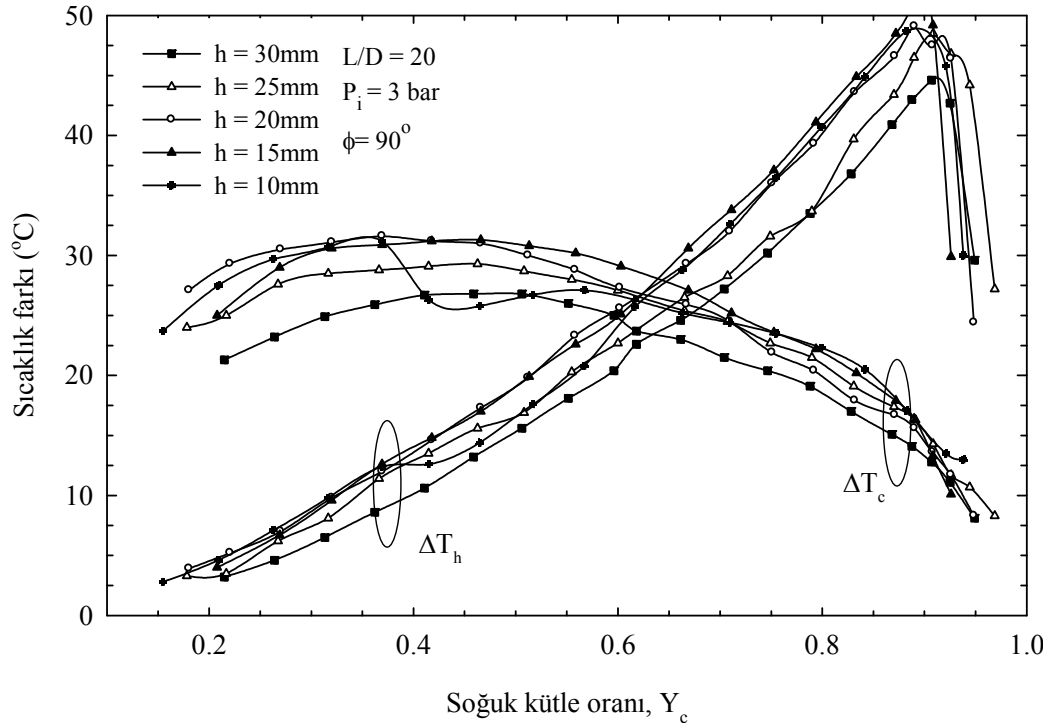
Şekil 339. $L/D=30$, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=3$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



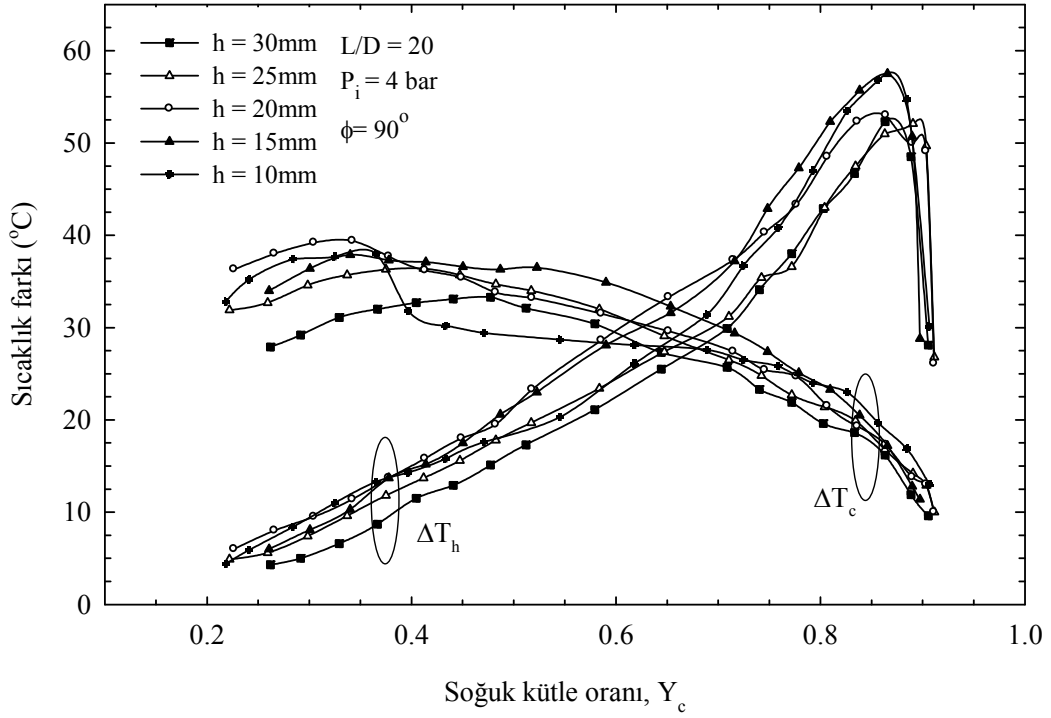
Şekil 340. $L/D=30$, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=4$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



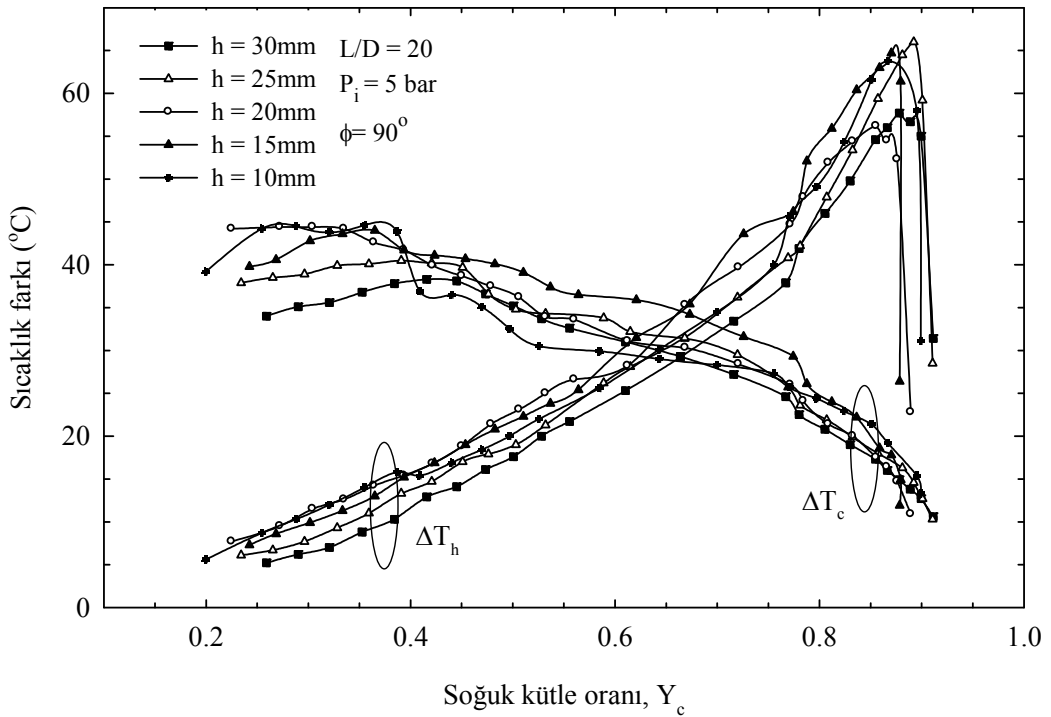
Şekil 341. $L/D=30$, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



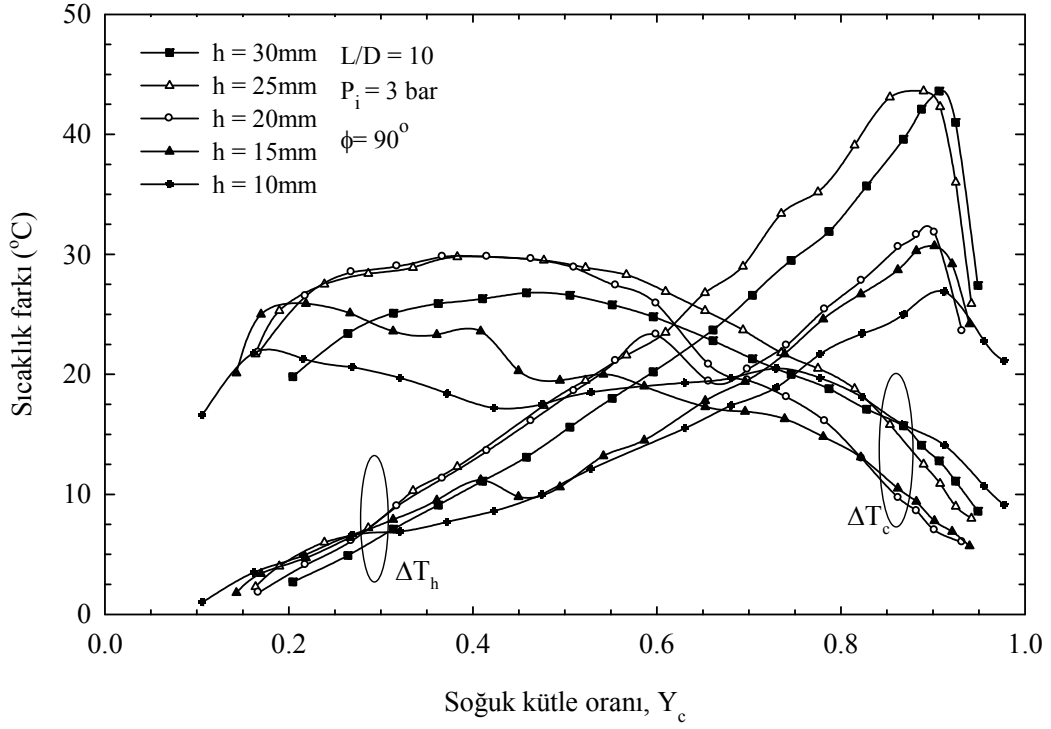
Şekil 342. $L/D=20$, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



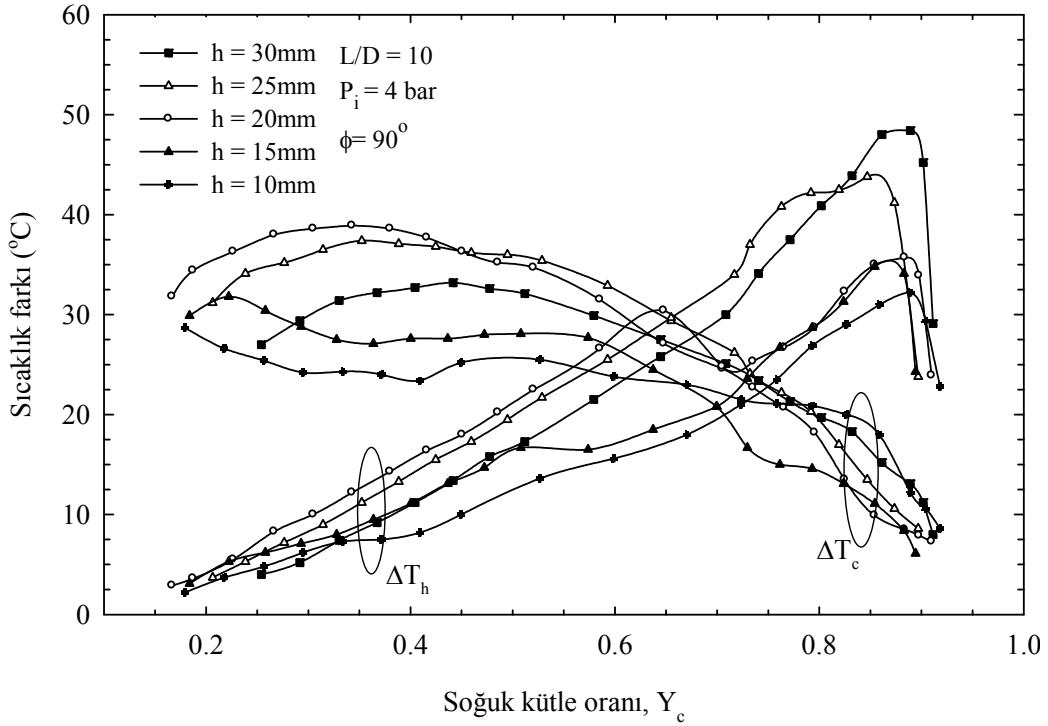
Şekil 343. $L/D=20$, $\phi=90^{\circ}$ ve $P_1=4$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



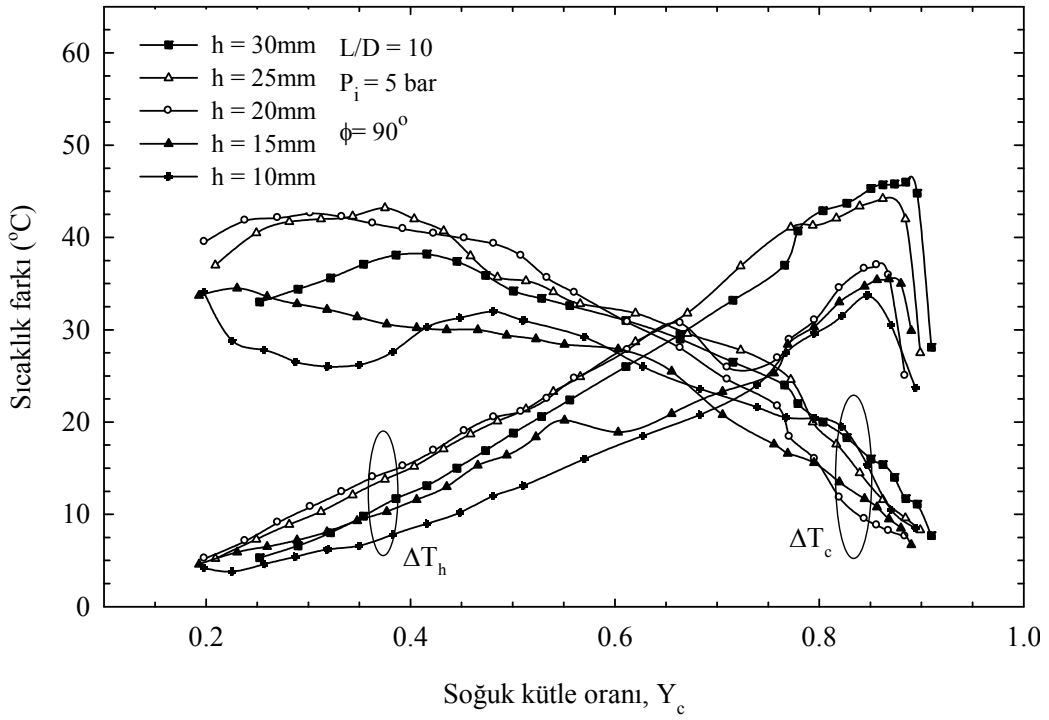
Şekil 344. $L/D=20$, $\phi=90^{\circ}$ ve $P_1=5$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



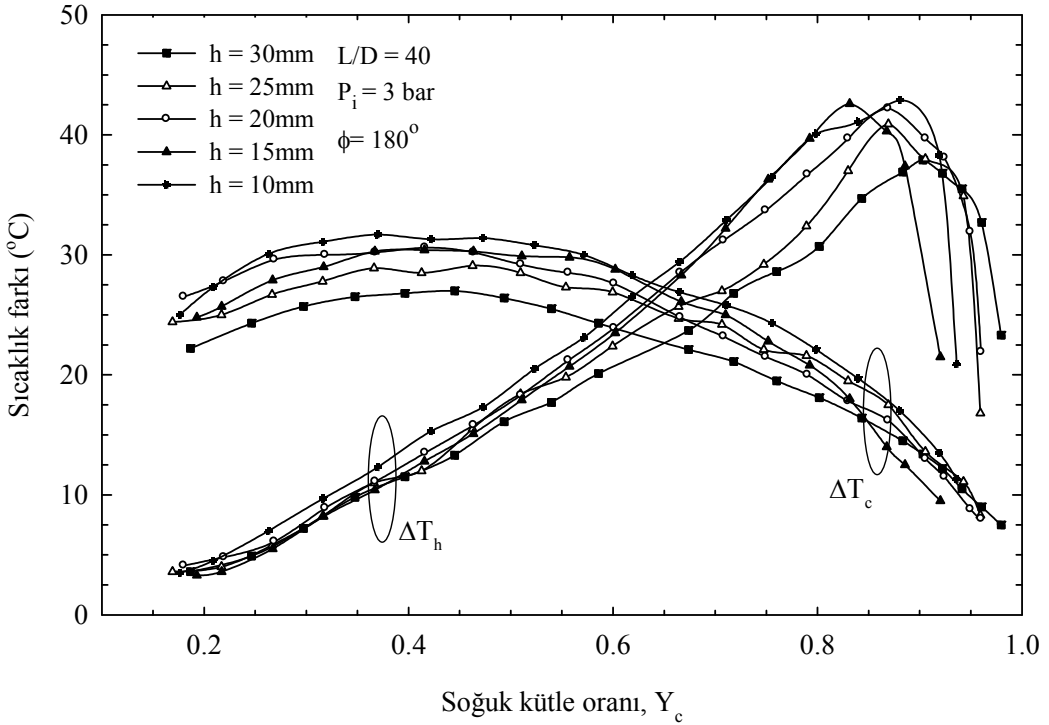
Şekil 345. $L/D=10$, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=3$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



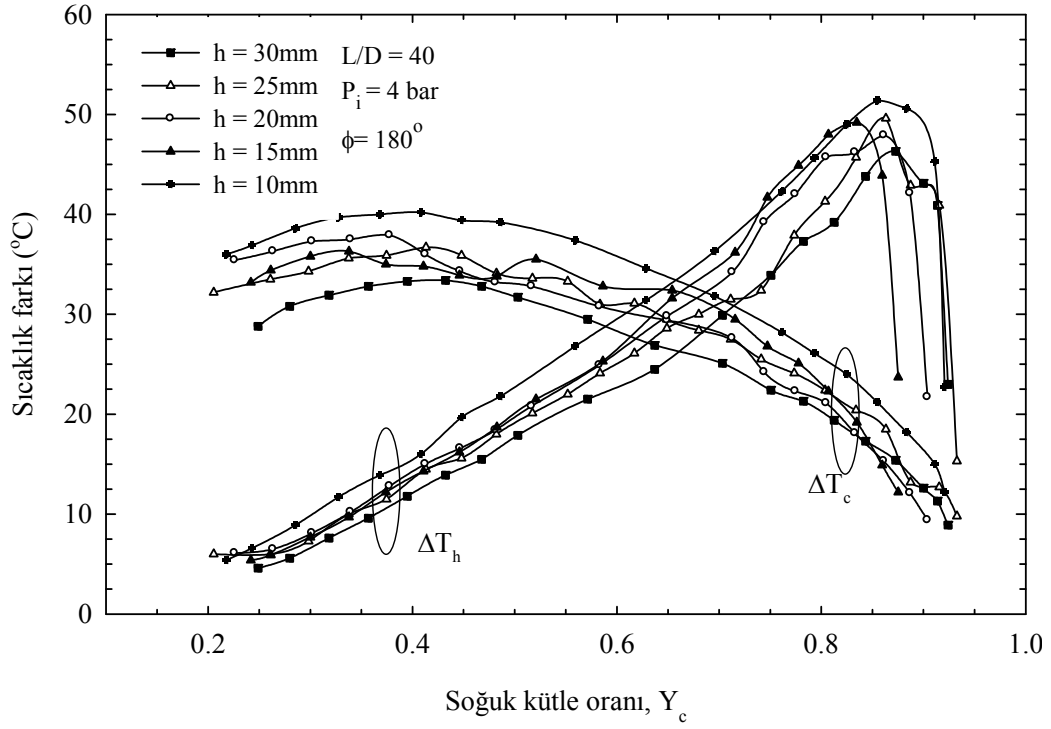
Şekil 346. $L/D=10$, $\phi=90^\circ$ ve $P_i=4$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



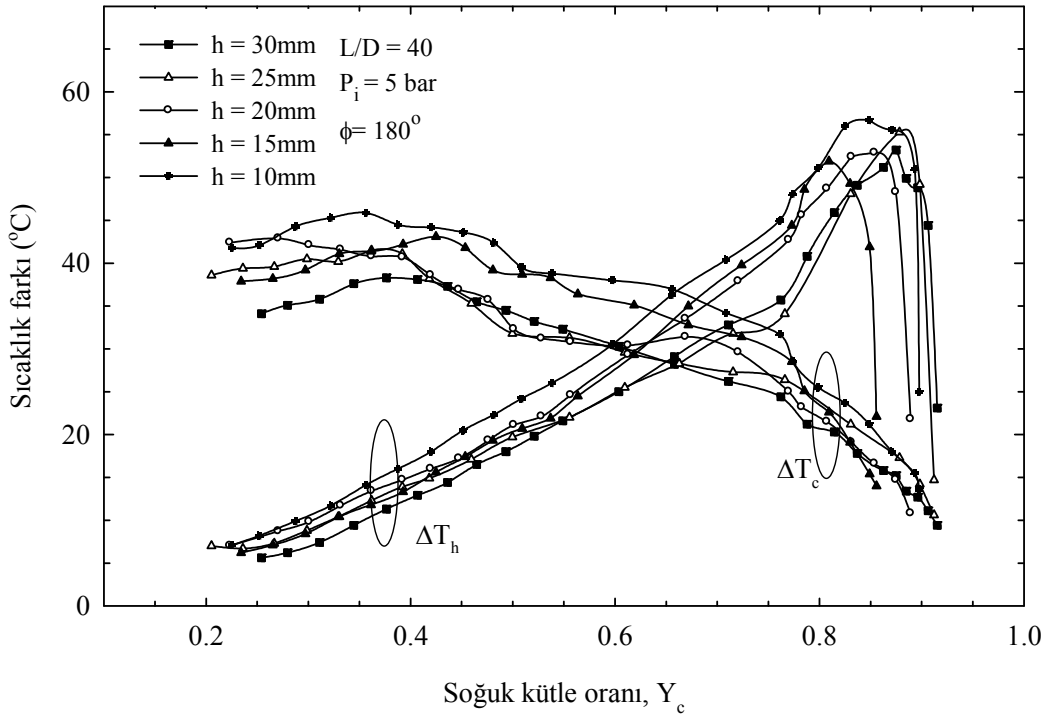
Şekil 347. $L/D=10$, $\phi=90^\circ$ ve $P_1=5\text{ bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



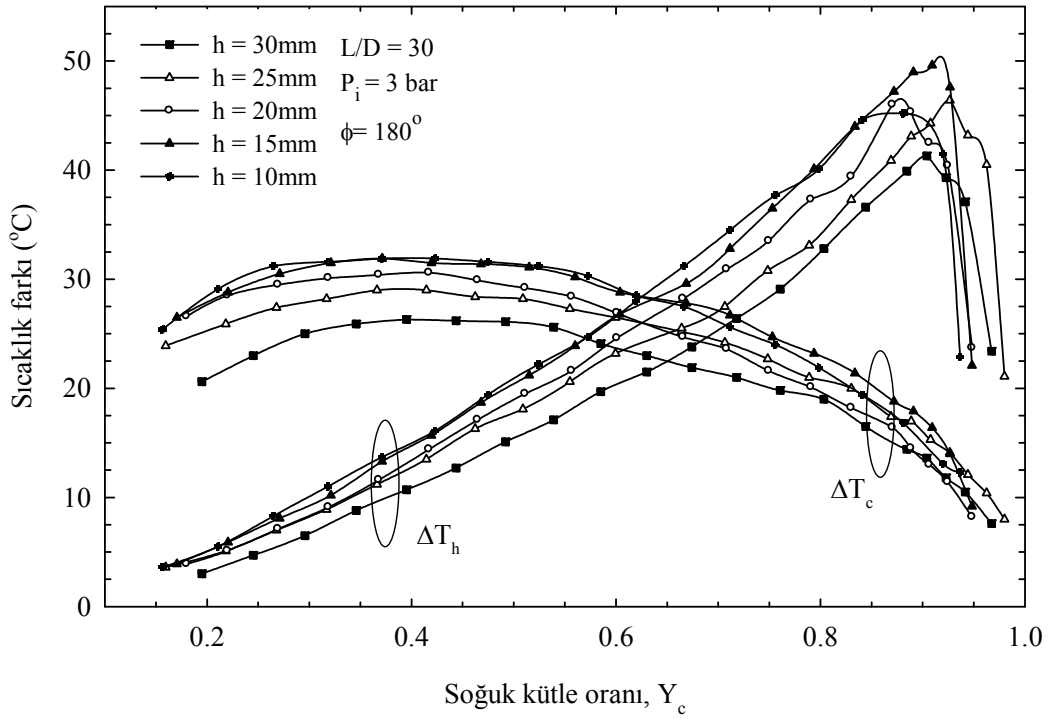
Şekil 348. $L/D=40$, $\phi=180^\circ$ ve $P_1=3\text{ bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



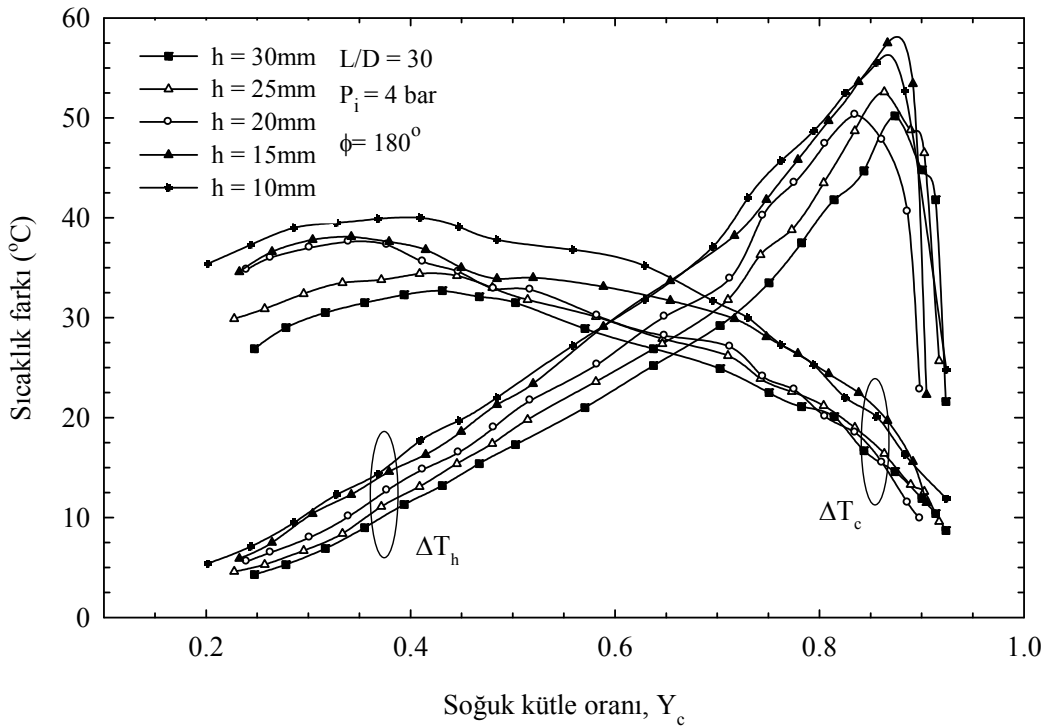
Şekil 349. $L/D=40$, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=4$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



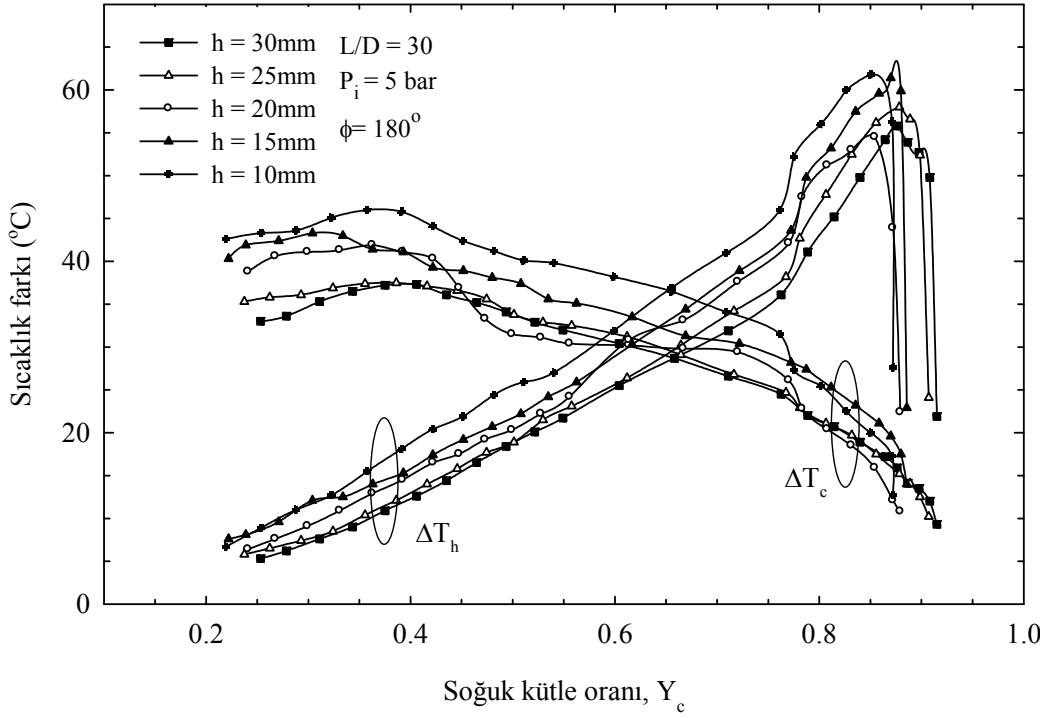
Şekil 350. $L/D=40$, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=5$ bar için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



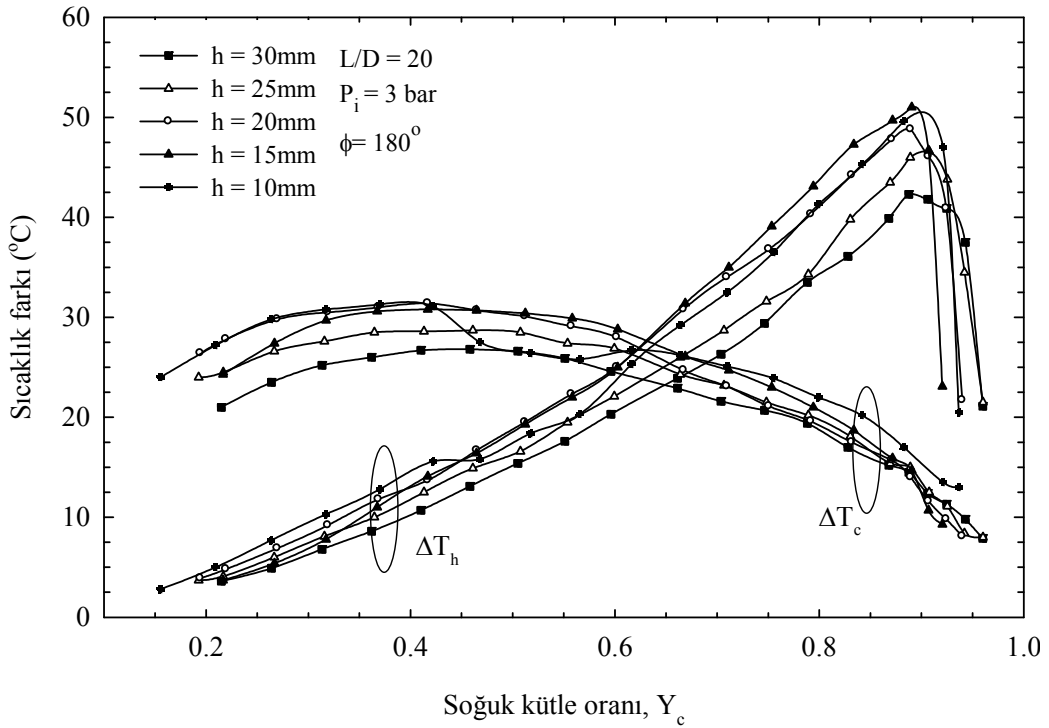
Şekil 351. $L/D=30$, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



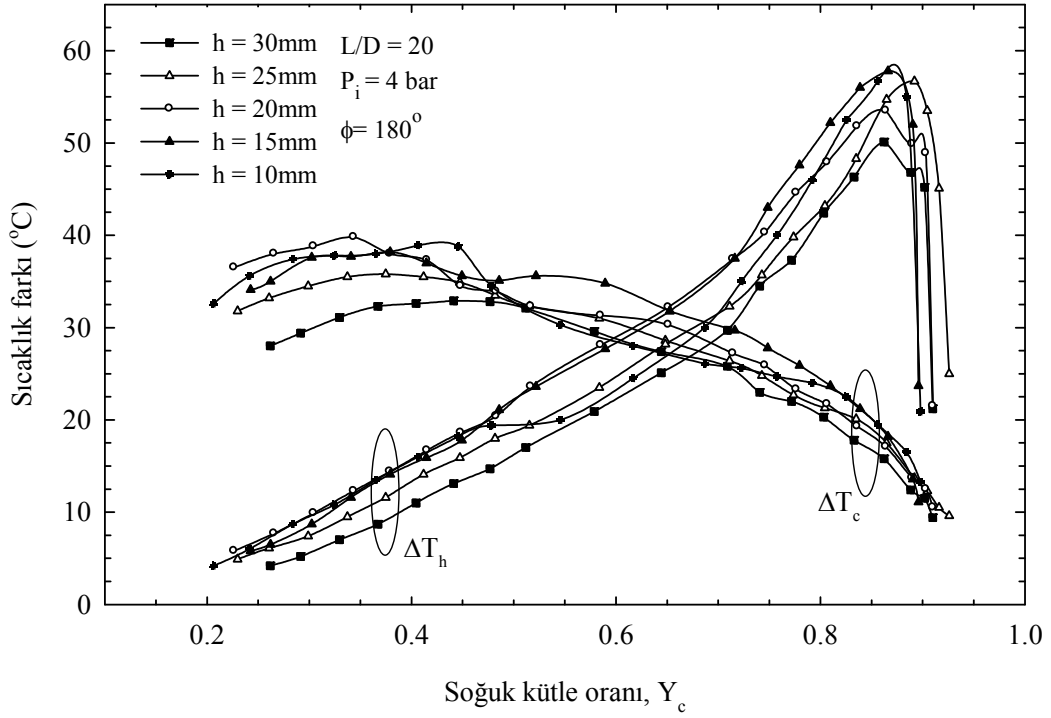
Şekil 352. $L/D=30$, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



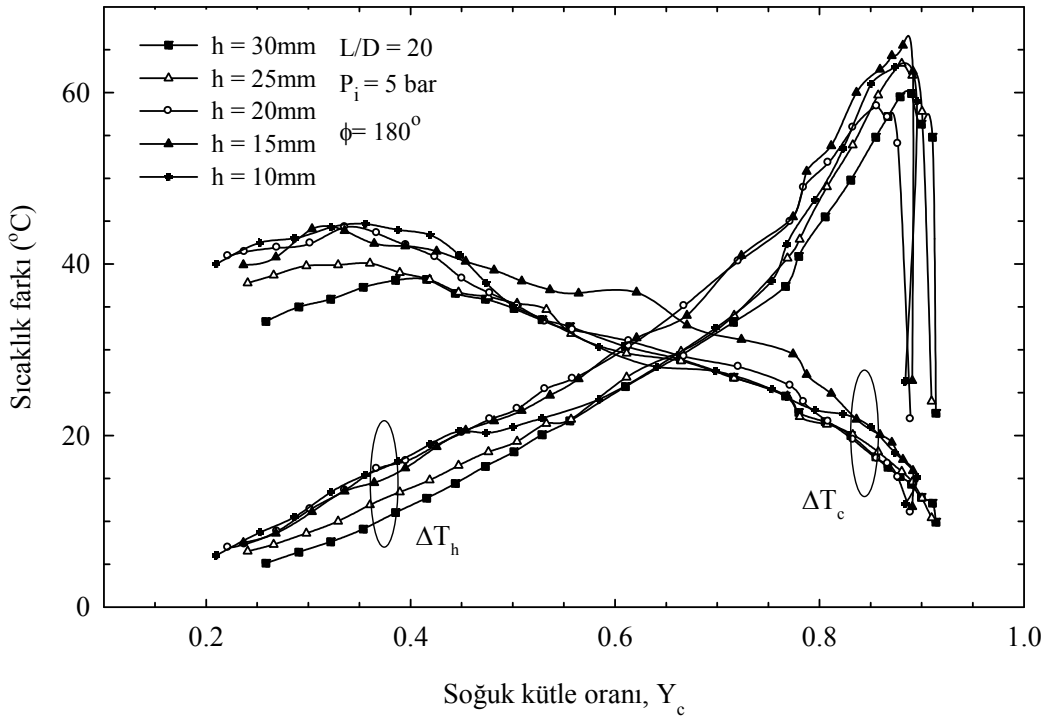
Şekil 353. $L/D=30$, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



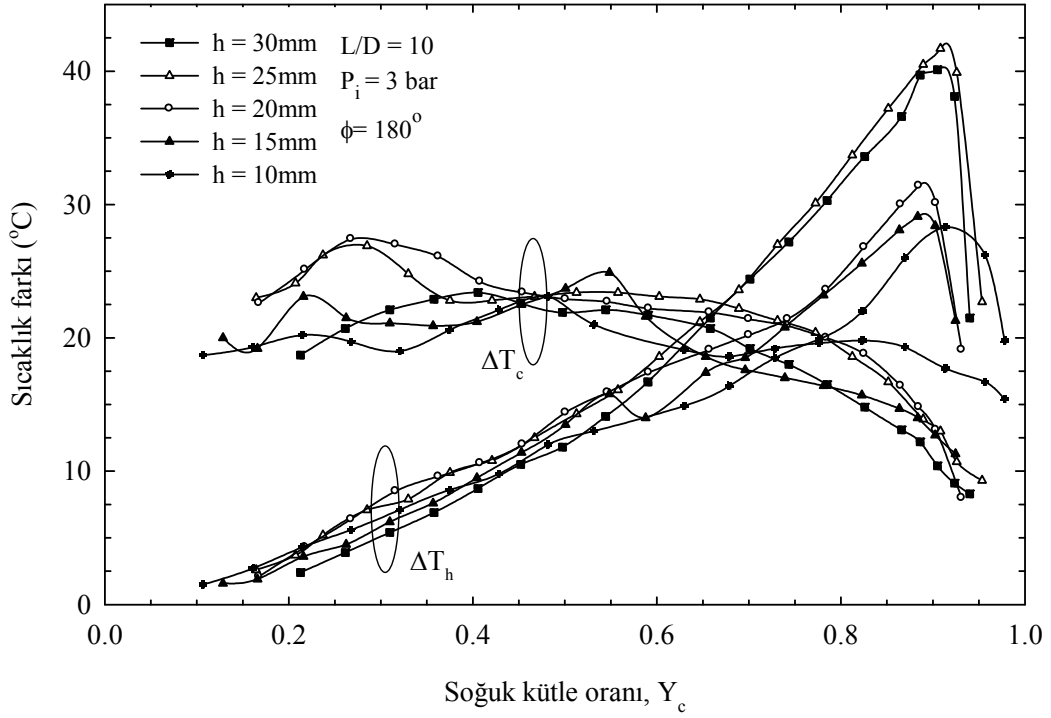
Şekil 354. $L/D=20$, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



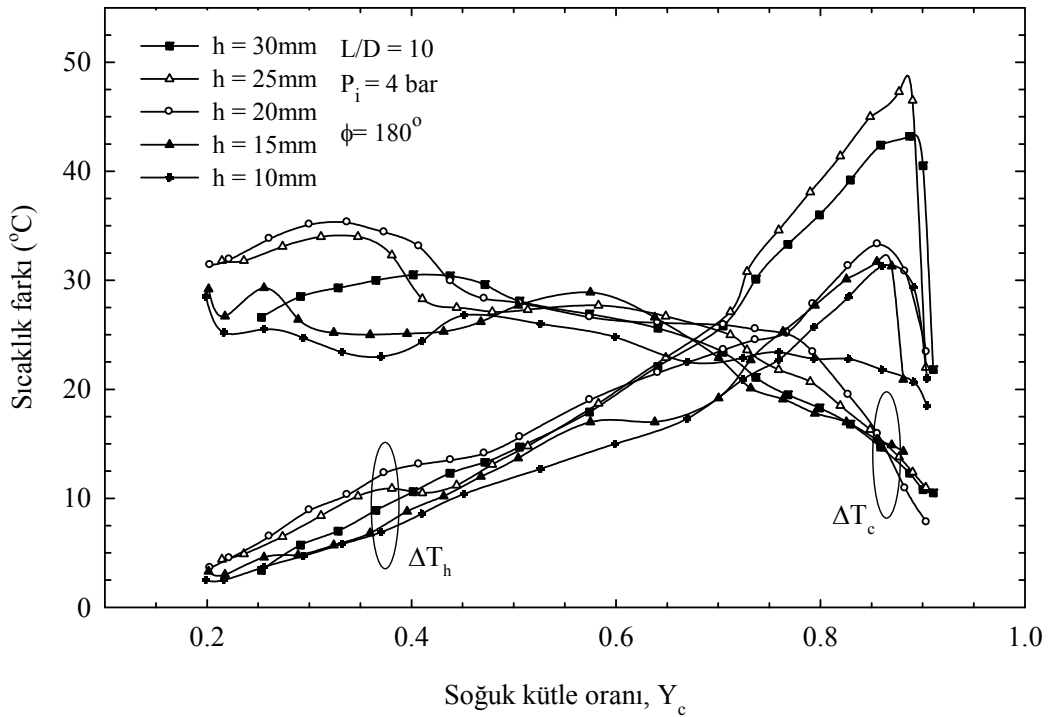
Şekil 355. $L/D=20$, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=4\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



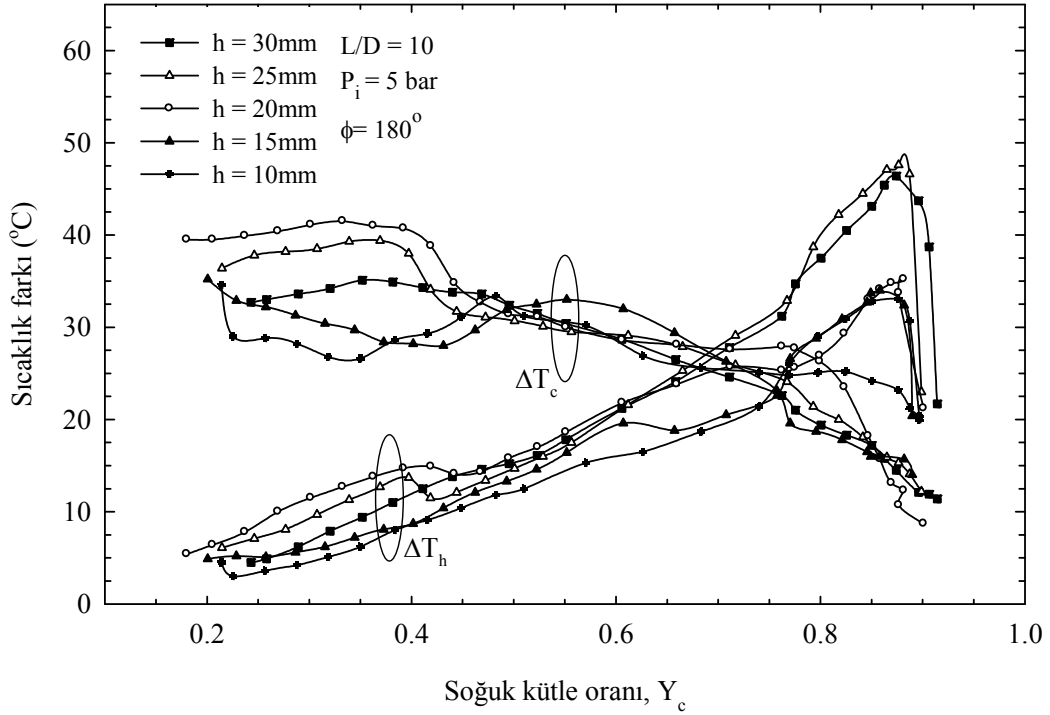
Şekil 356. $L/D=20$, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



Şekil 357. $L/D=10$, $\phi=180^\circ$ ve $P_1=4\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



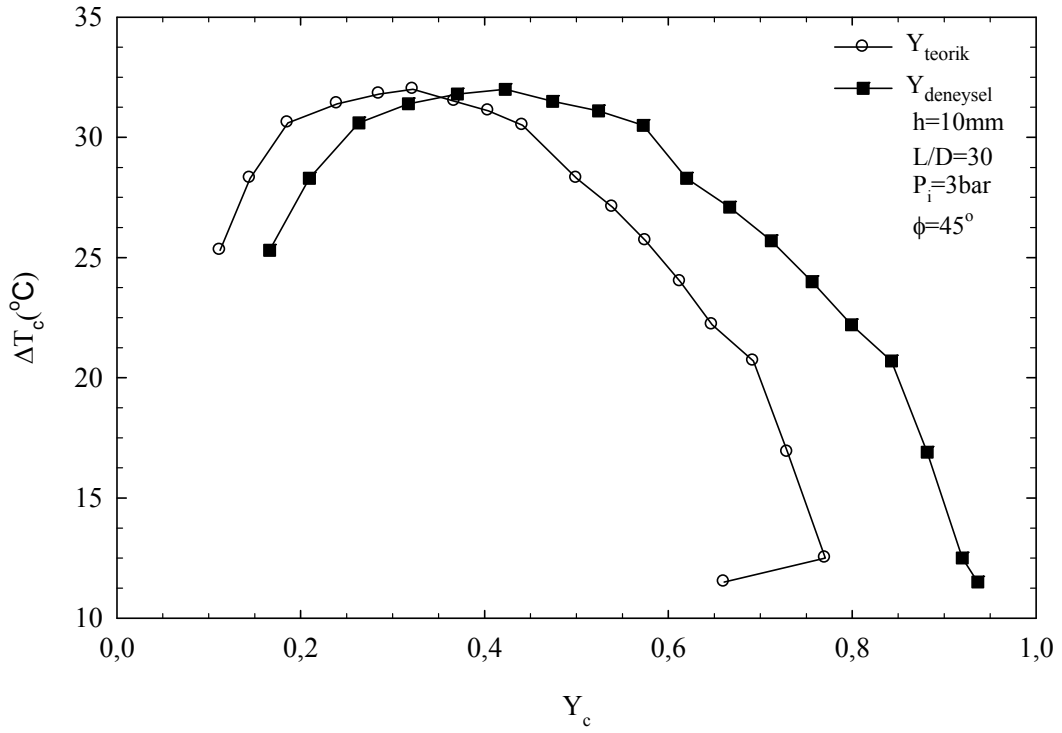
Şekil 358. $L/D=10$, $\phi=180^\circ$ ve $P_1=4\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi



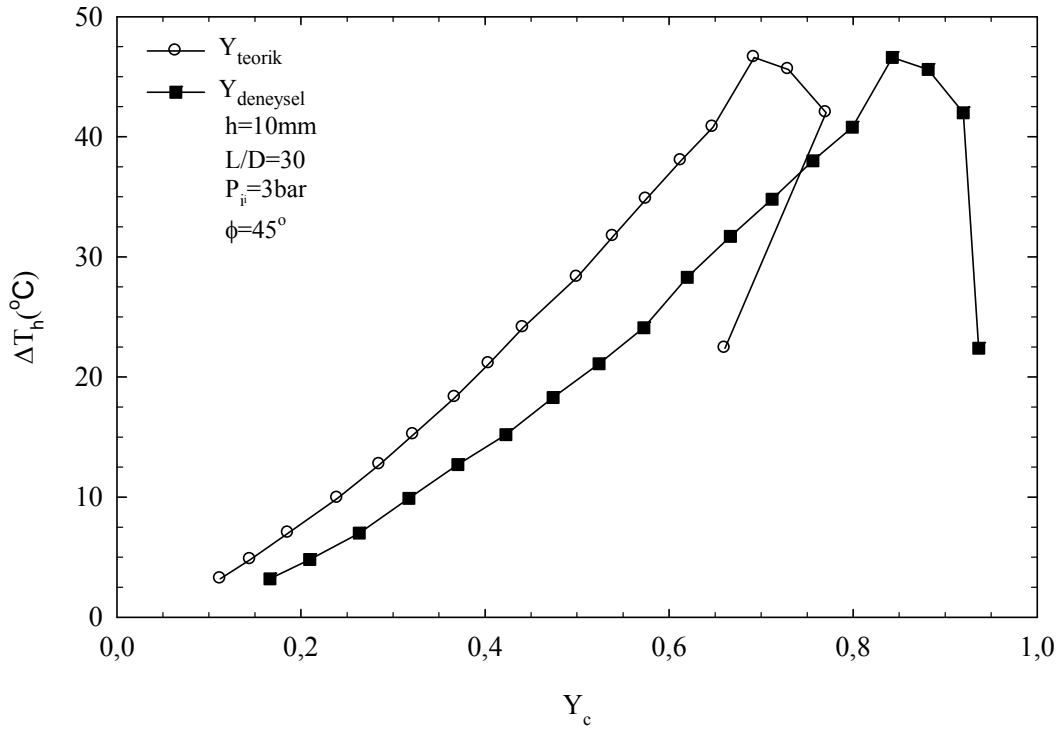
Şekil 359. $L/D=10$, $\phi=180^\circ$ ve $P_i=5\text{bar}$ için farklı helis uzunluklarında soğuk ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), Y_c ile değişimi

3.3. Optimum Geometriye Termodinamiğin Birinci ve İkinci Yasalarının Uygulanması Sonucunda Elde Edilen Bulgular

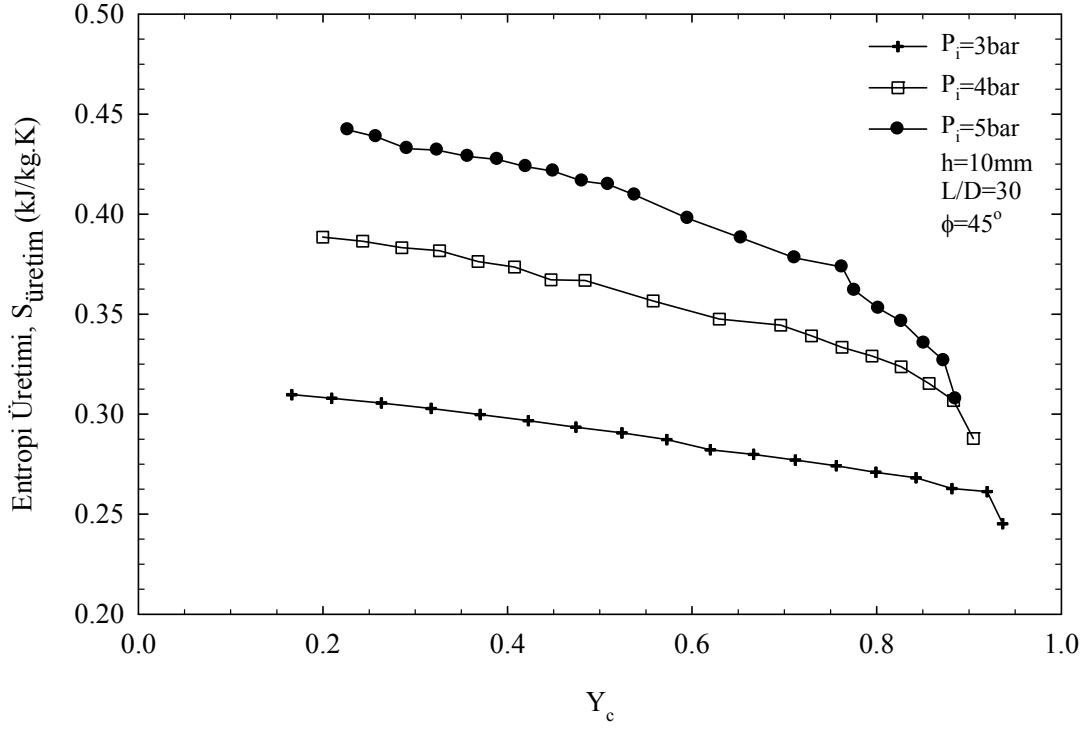
Bölüm 3.2’de farklı geometrik ve termofiziksel parametrelerin her bir kombinasyonu için, soğuk uç ve sıcak uç sıcaklık farklarının (ΔT_c ve ΔT_h), soğuk kütle oranı (Y_c) ile değişimleri verilmiştir (Şekil 18-359). Bu bulgulara dayanarak elde edilen optimum geometriye, Bölüm 2.5’te verilen termodinamiksel eşitlikler uygulanmış ve sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur (Şekil 360-366). Termodinamiğin Birinci Yasasına göre yapılan incelemede, bu yasanın vorteks tüplere uygulanması sonucu elde edilen soğuk kütle oranı ifadesinin deneysel verilere dayanılarak hesaplanan soğuk kütle ifadesi ile karşılaştırılması yapılmıştır. Bu bölümün sonunda ayrıca, optimum geometri için toplam sıcaklık farkının (ΔT), Y_c ile değişimi ve sıcak uç ile soğuk uçtan çıkan havanın sıcaklık değişimleri grafikler halinde verilmiştir.



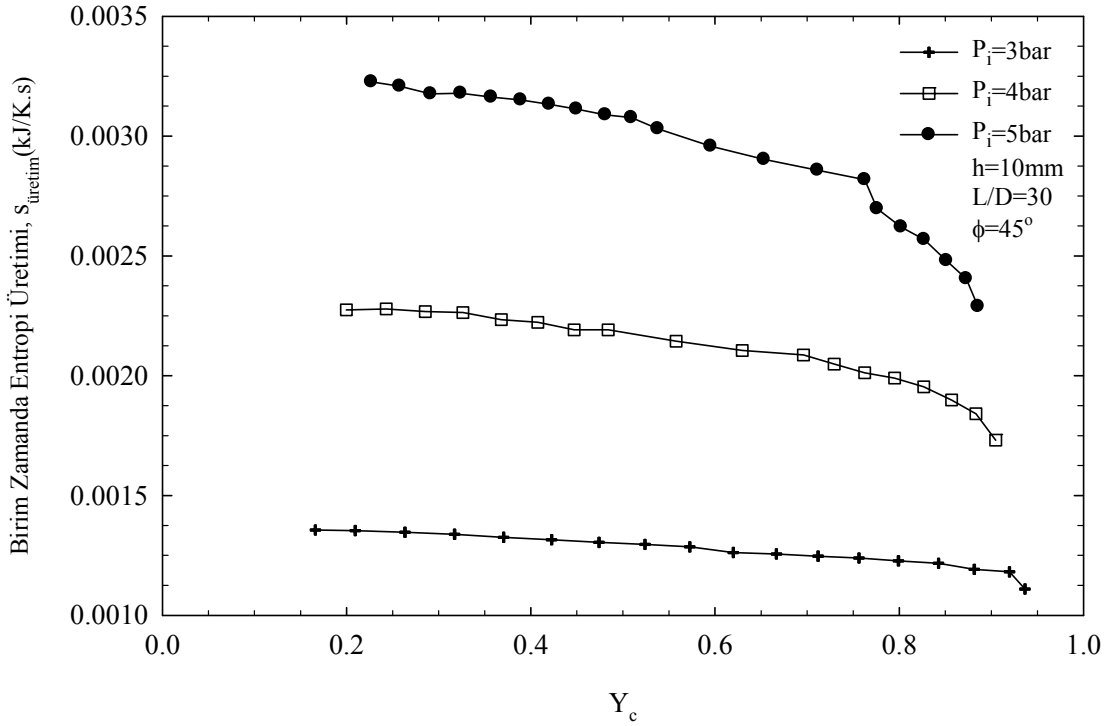
Şekil 360. Optimum geometride, soğuk uç sıcaklık farkı bakımından teorik ve deneysel Y_c ifadelerinin karşılaştırılması



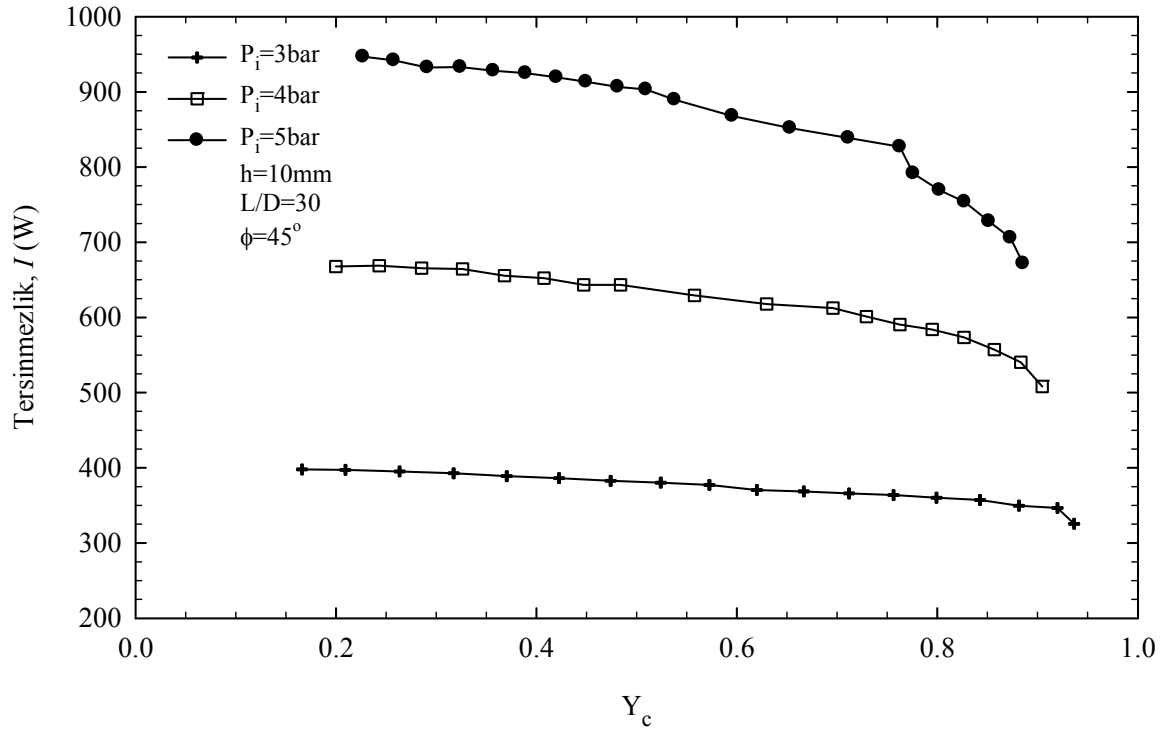
Şekil 361. Optimum geometride, sıcak uç sıcaklık farkı bakımından teorik ve deneysel Y_c ifadelerinin karşılaştırılması



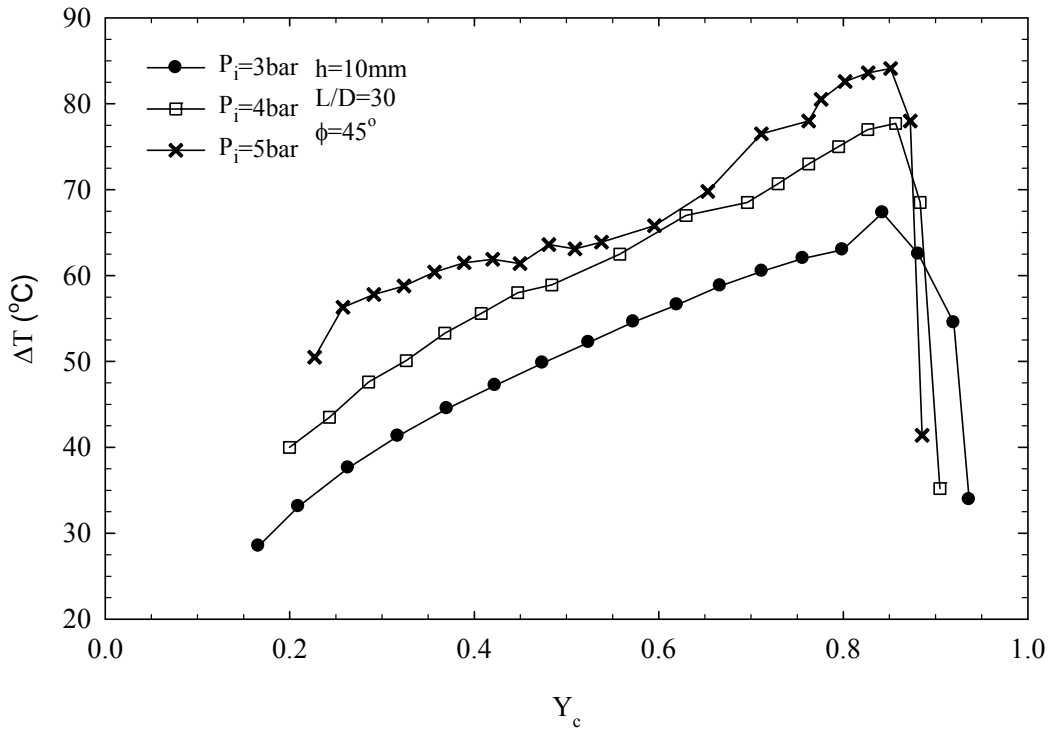
Şekil 362. Optimum geometri için, farklı basınç değerlerinde entropi üretiminin soğuk kütle oranı (Y_c) ile değişimi



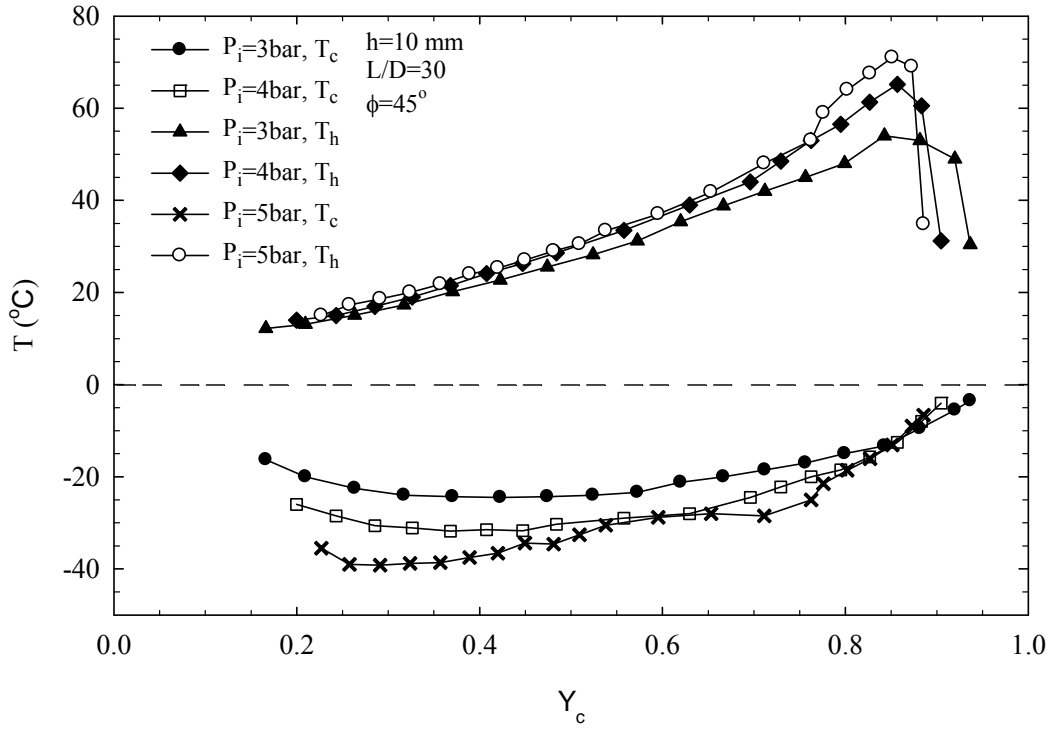
Şekil 363. Optimum geometri için, farklı basınç değerlerinde birim zamanda entropi üretiminin soğuk kütle oranı (Y_c) ile değişimi



Şekil 364. Optimum geometri için, farklı basınç değerlerinde tersinmezliğin soğuk kütle oranı (Y_c) ile değişimi



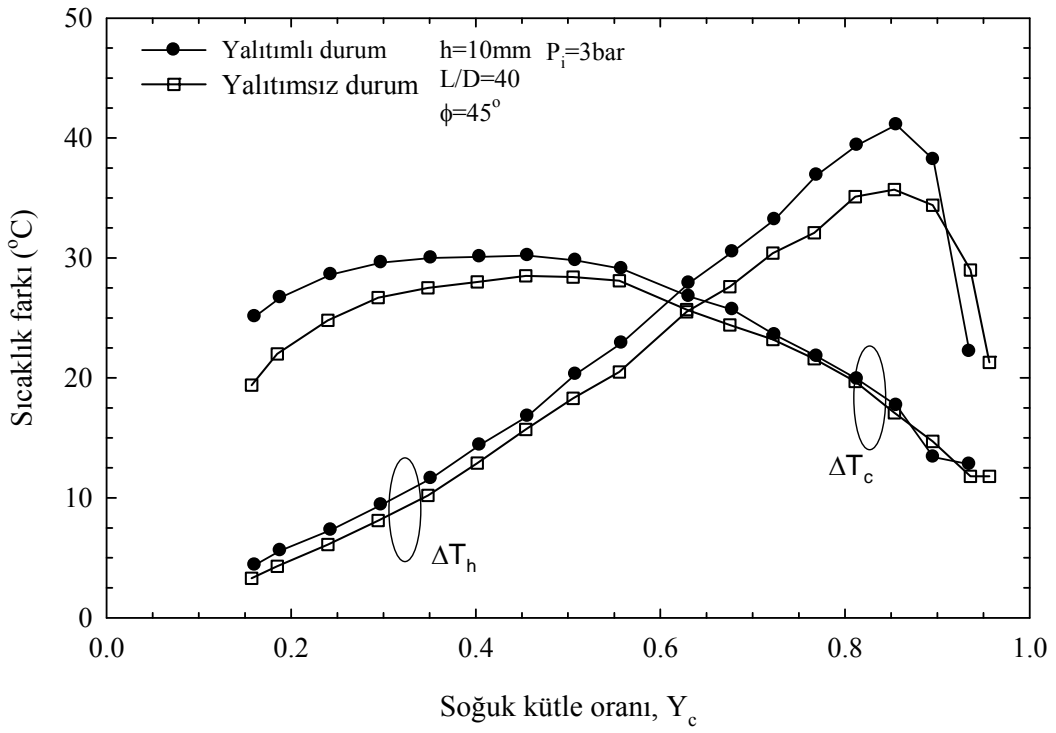
Şekil 365. Optimum geometri için, farklı basınç değerlerinde toplam sıcaklık farkının (ΔT), soğuk kütle oranı (Y_c) ile değişimi



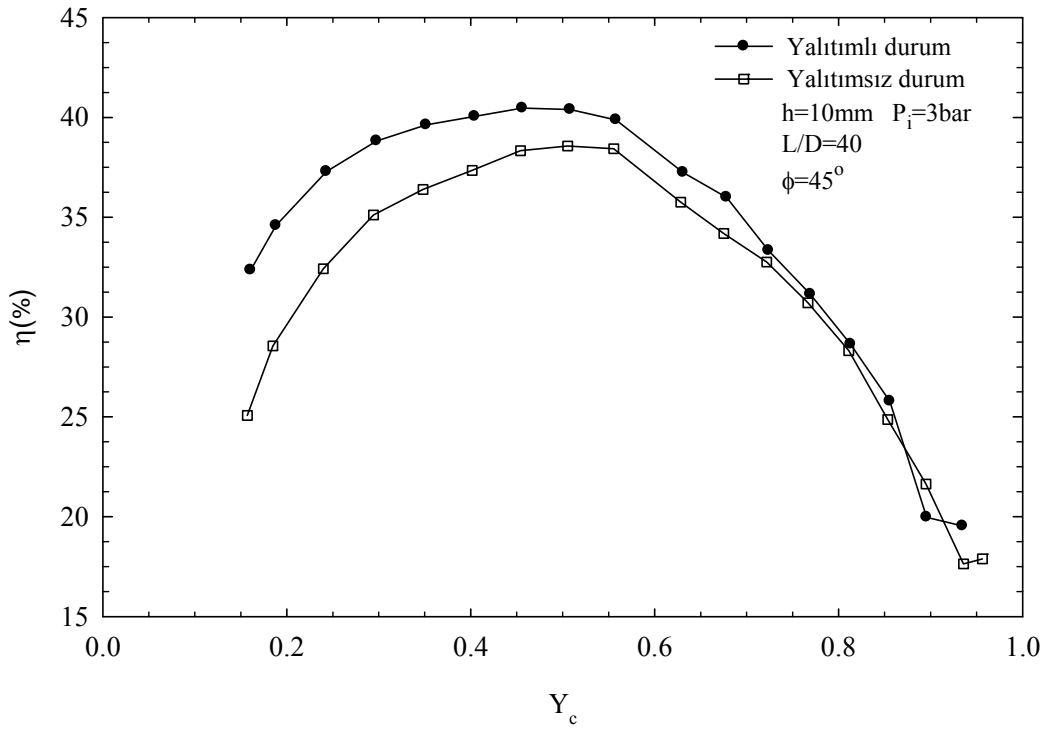
Şekil 366. Optimum geometri için, farklı basınç değerlerinde sıcaklık değerlerinin, soğuk kütle oranı (Y_c) ile değişimi

3.4. Yalıtım Etkisinin İncelenmesi Amacıyla Yapılan Deneylerden Elde Edilen Bulgular

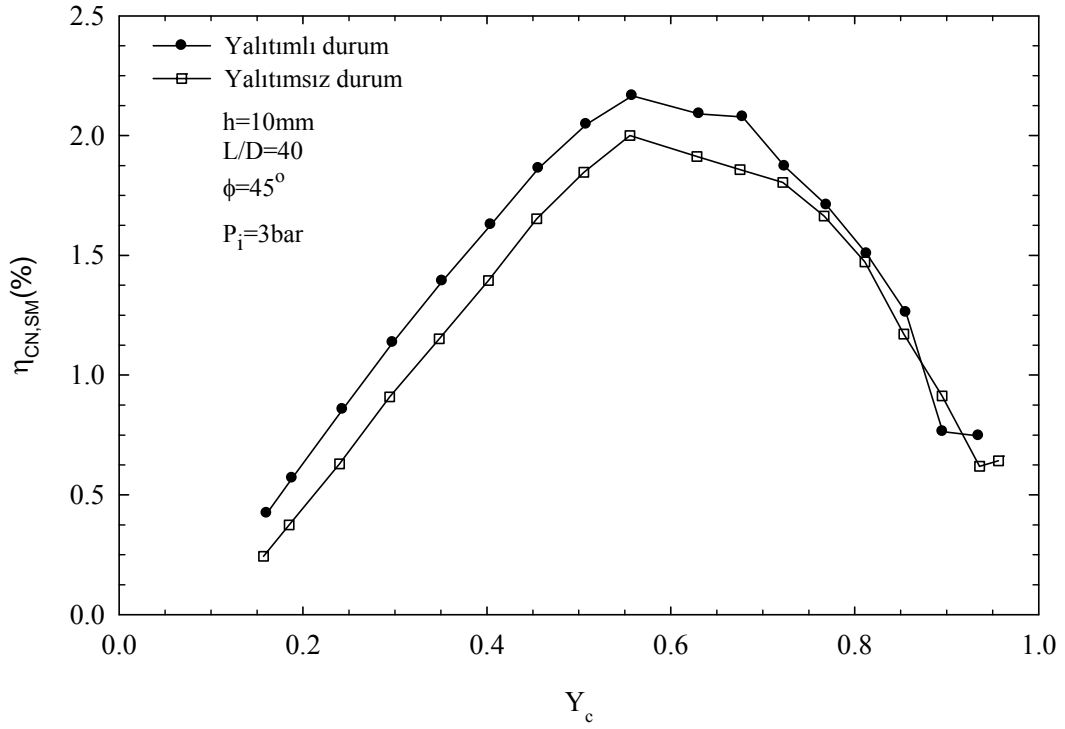
Bu bölümde, yalıtım etkisini incelemek amacıyla aynı geometrik ve termofiziksel özelliklere sahip vorteks tüpü için iki ayrı deney yapılmıştır. Bu deneylerden birinde vorteks tüpünün dışı thermafleksi malzeme ile yalıtım amaçlı kaplanmıştır. Diğer deneyde ise tüp, direkt olarak dış ortamla temas halinde tutulmuştur. Her iki durum için de ΔT_c ve ΔT_h değerlerinin Y_c ile değişimleri Şekil 367’de verilmiştir. Ayrıca, her iki durum için Bölüm 2.6’da sunulan verim ifadeleri kullanılarak izantropik verimleri ile vorteks tüpünün soğutma makinesi ve ısı pompası olarak ayrı ayrı düşünüldüğü durumlar için soğutma ve ısıtma verimleri bakımından karşılaştırmaları yapılmıştır (Şekil 368-370).



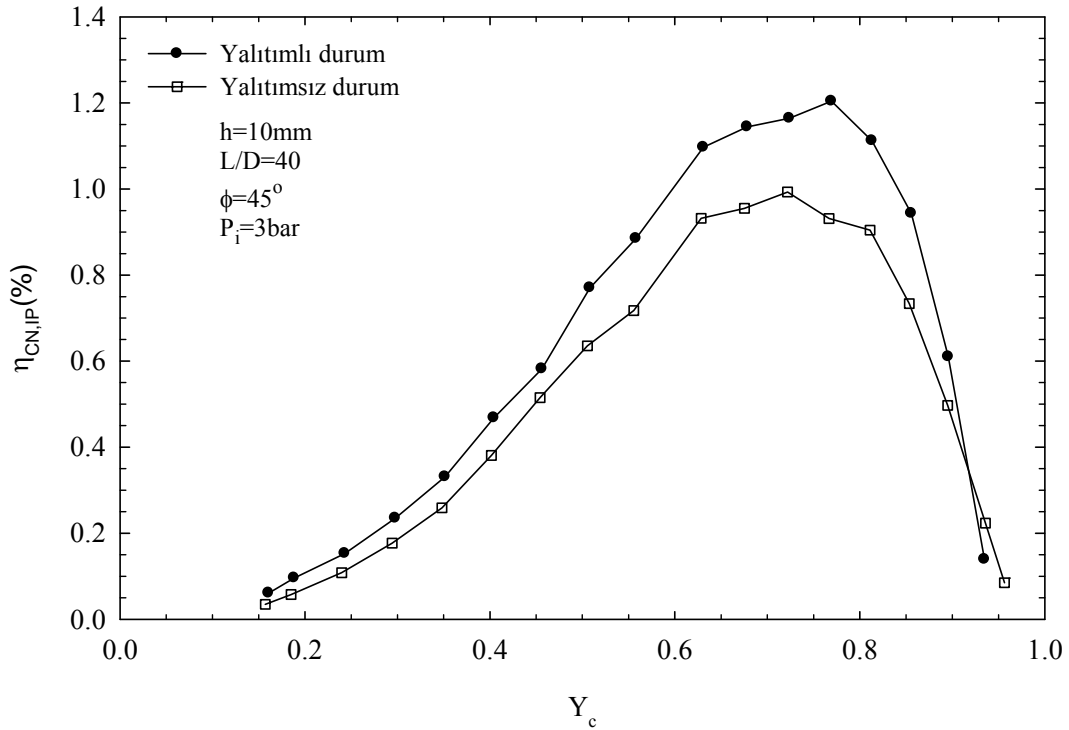
Şekil 367. $h=10\text{mm}$, $L/D=40$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ için sıcaklık farkları açısından yalıtım etkisini



Şekil 368. $h=10\text{mm}$, $L/D=40$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ da yalıtımlı ve yalıtımsız durumlar için izantropik verim



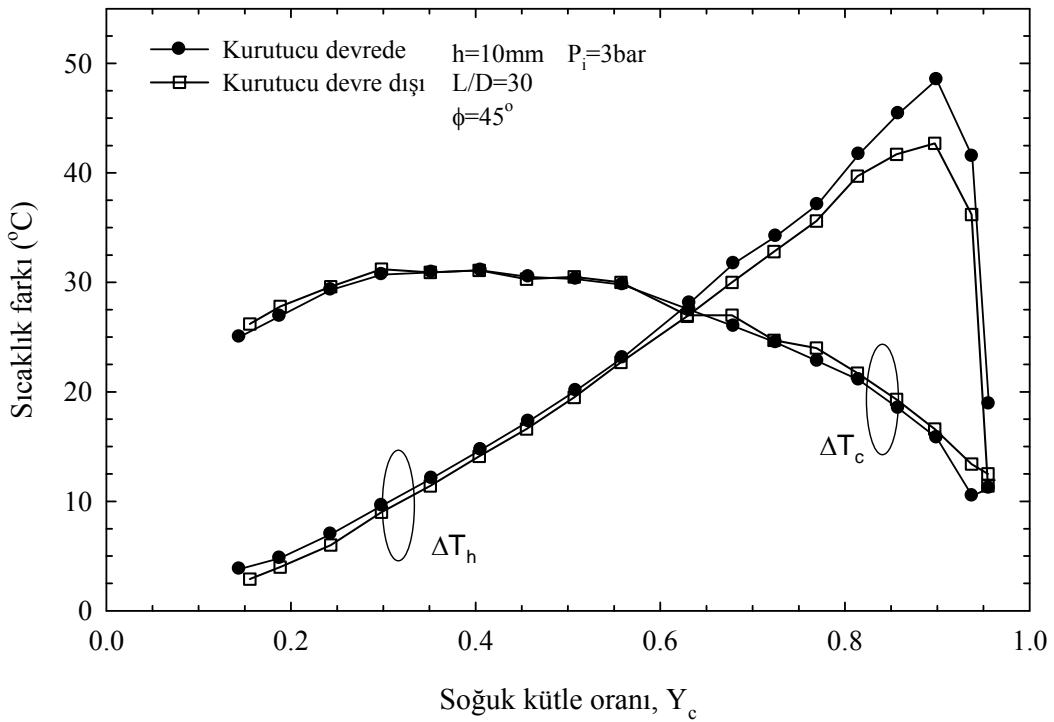
Şekil 369. $h=10\text{mm}$, $L/D=40$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ da yalıtımlı ve yalıtımsız durumlar için soğutma makinesi olarak vorteks tüp verimlerinin karşılaştırılması



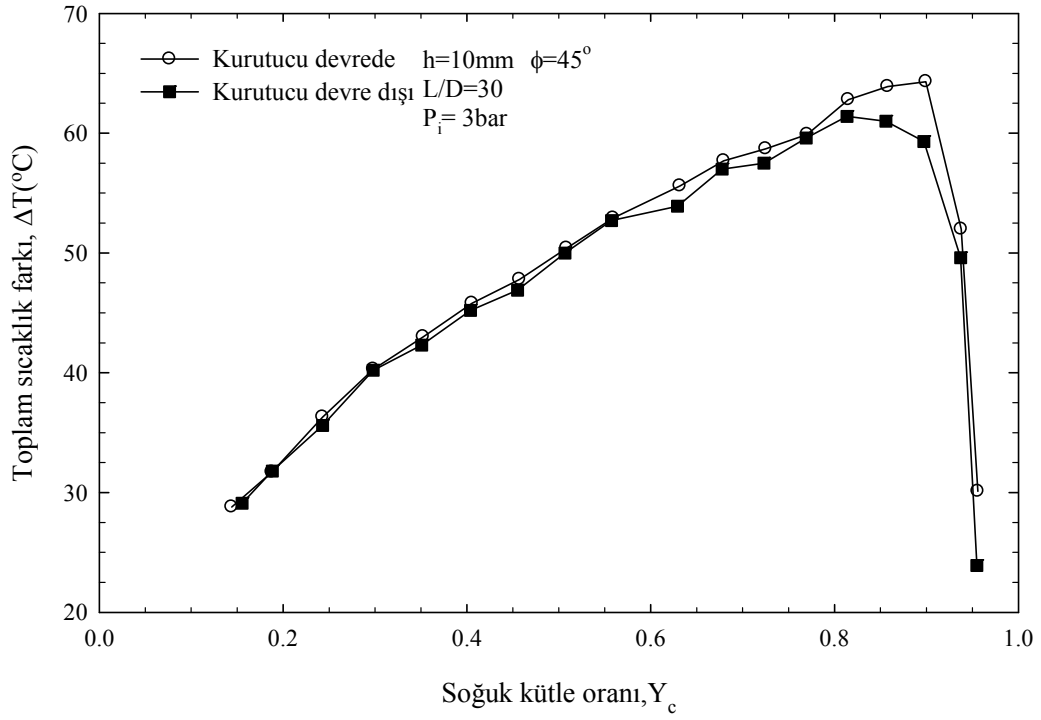
Şekil 370. $h=10\text{mm}$, $L/D=40$, $\phi=45^\circ$ ve $P_i=3\text{bar}$ da yalıtımlı ve yalıtımsız durumlar için ısı pompası olarak vorteks tüp verimlerinin karşılaştırılması

3.5. Nem Etkisinin İncelenmesi Amacıyla Yapılan Deneylerden Elde Edilen Bulgular

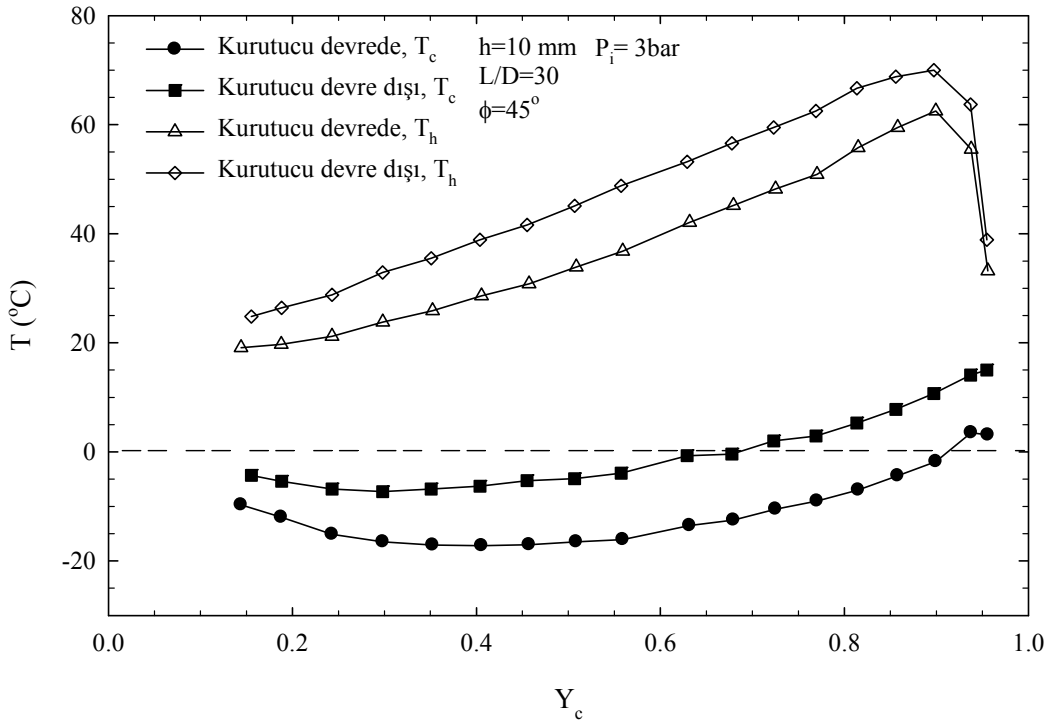
Deney düzeneğinde girişteki havanın nemini alması amacıyla bir kurutucu kullanılmaktadır. Bu bölümde aynı geometrik özelliklere sahip vorteks tüpü için, bağıl nem (ϕ) etkisini incelemek amacıyla yapılan iki farklı deneye ait karşılaştırmalar grafikler halinde verilmiştir (Şekil 371-376). İlk deneyde sistemdeki kurutucu devreye alınmış, ikincisinde ise devre dışı bırakılmıştır. Nem etkisini belirlemek için yapılan bu karşılaştırmada, her iki durum için ΔT_c ve ΔT_h değerlerinin Y_c ile değişimleri, verim ifadeleri ve sıcaklık değişimleri sunulmuştur.



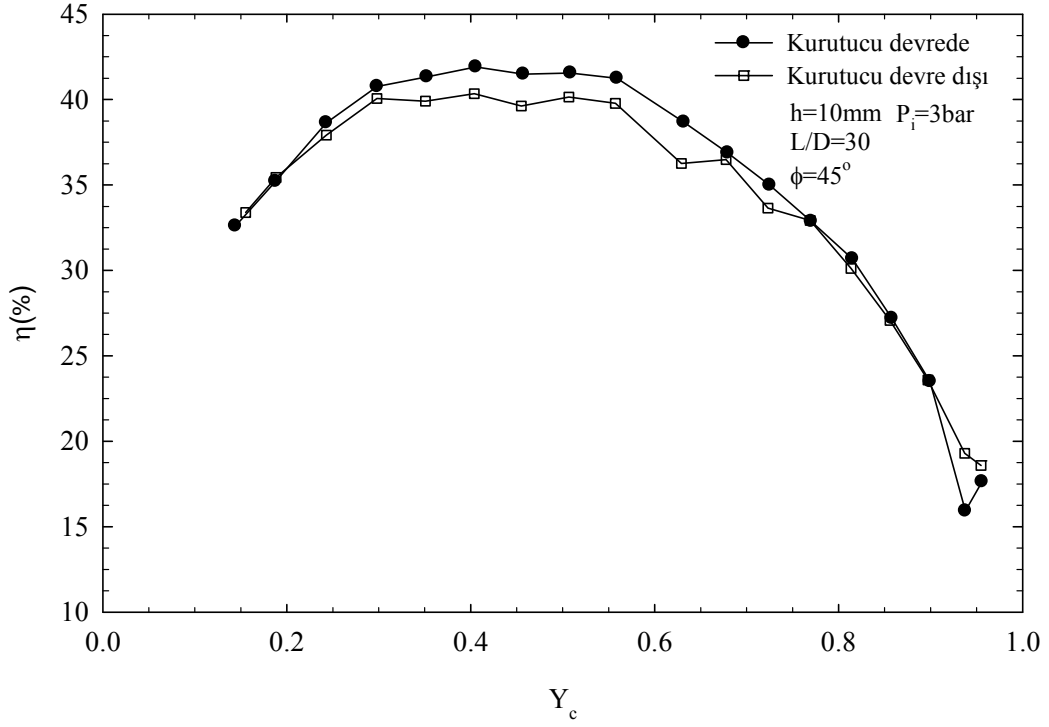
Şekil 371. Kurutucunun devrede ($\phi=12.2\%$) ve devre dışı ($\phi=19.6\%$) olması durumları için nem etkisinin incelenmesi (ΔT_c ve ΔT_h açısından)



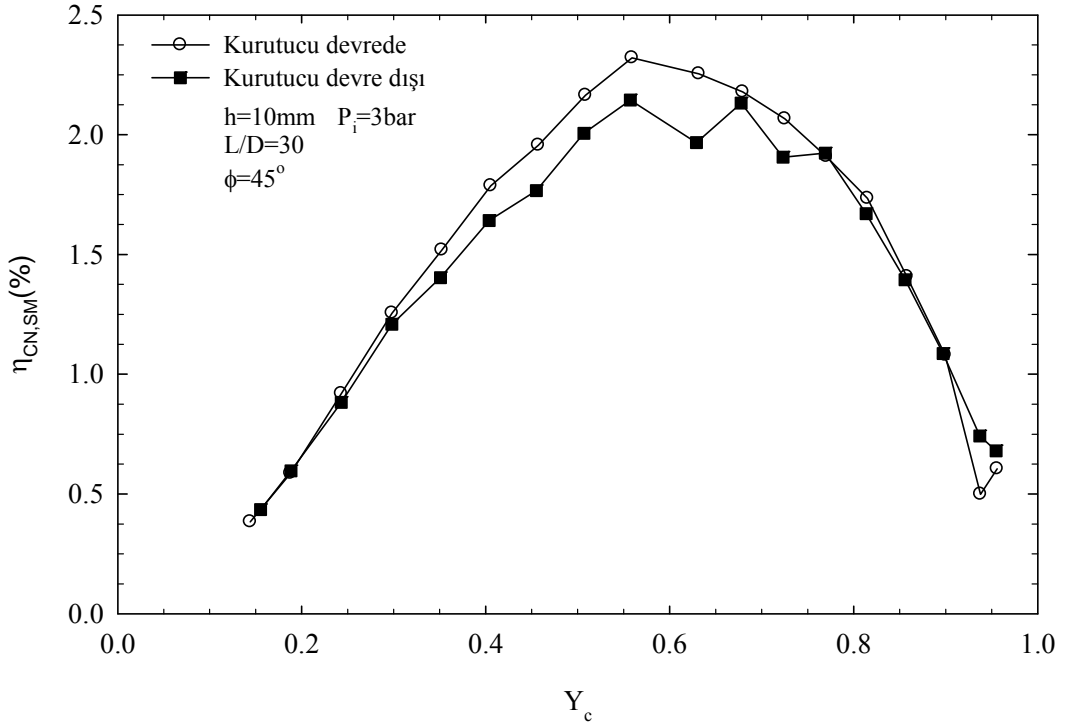
Şekil 372. Kurutucunun devrede ($\phi=12.2\%$) ve devre dışı ($\phi=19.6\%$) olması durumları için nem etkisinin incelenmesi (ΔT açısından)



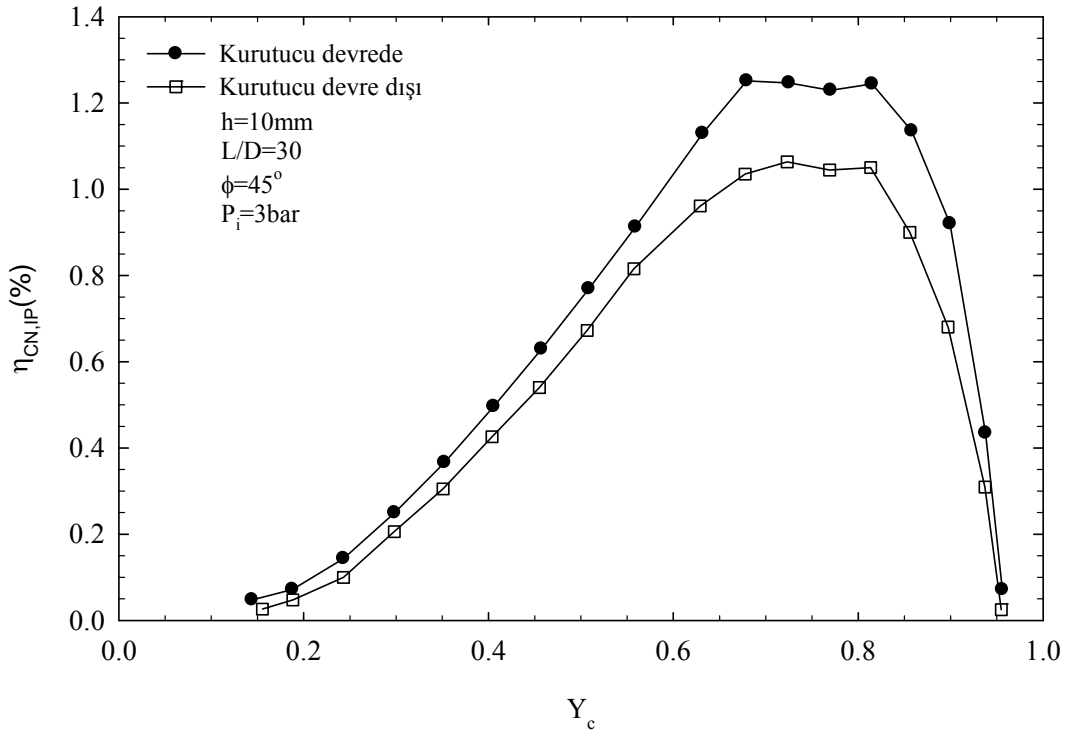
Şekil 373. Kurutucunun devrede ($\phi=12.2\%$) ve devre dışı ($\phi=19.6\%$) olması durumları için nem etkisinin incelenmesi (T_c ve T_h açısından)



Şekil 374. Kurutucunun devrede ($\varphi=12.2\%$) ve devre dışı ($\varphi=19.6\%$) olması durumları için nem etkisinin incelenmesi (η açısından)



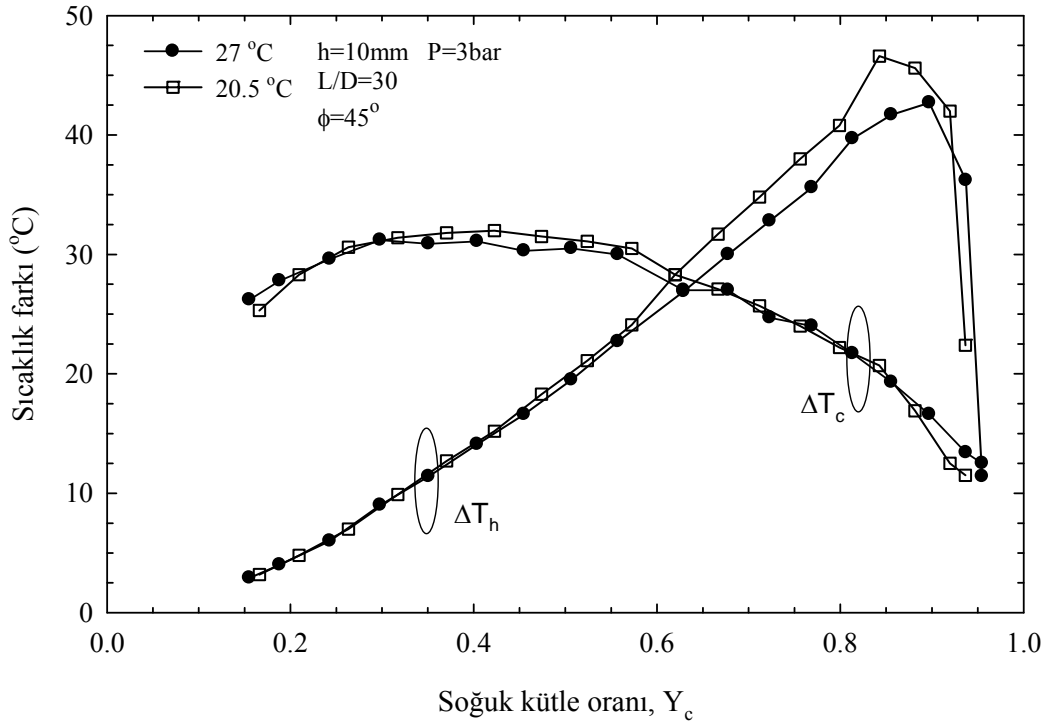
Şekil 375. Kurutucunun devrede ($\varphi=12.2\%$) ve devre dışı ($\varphi=19.6\%$) olması durumları için nem etkisinin incelenmesi ($\eta_{CN,SM}$ açısından)



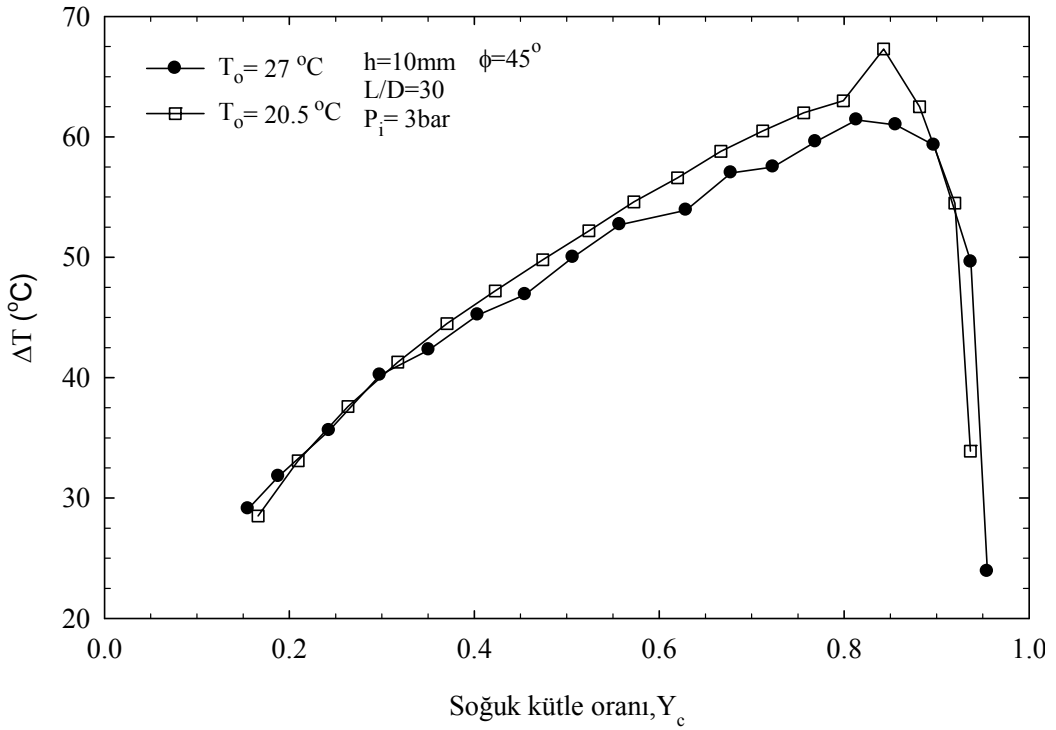
Şekil 376. Kurutucunun devrede ($\phi=12.2\%$) ve devre dışı ($\phi=19.6\%$) olması durumları için nem etkisinin incelenmesi ($\eta_{CN,IP}$ açısından)

3.6. Ortam Sıcaklığı Etkisinin İncelenmesi Amacıyla Yapılan Deneylerden Elde Edilen Bulgular

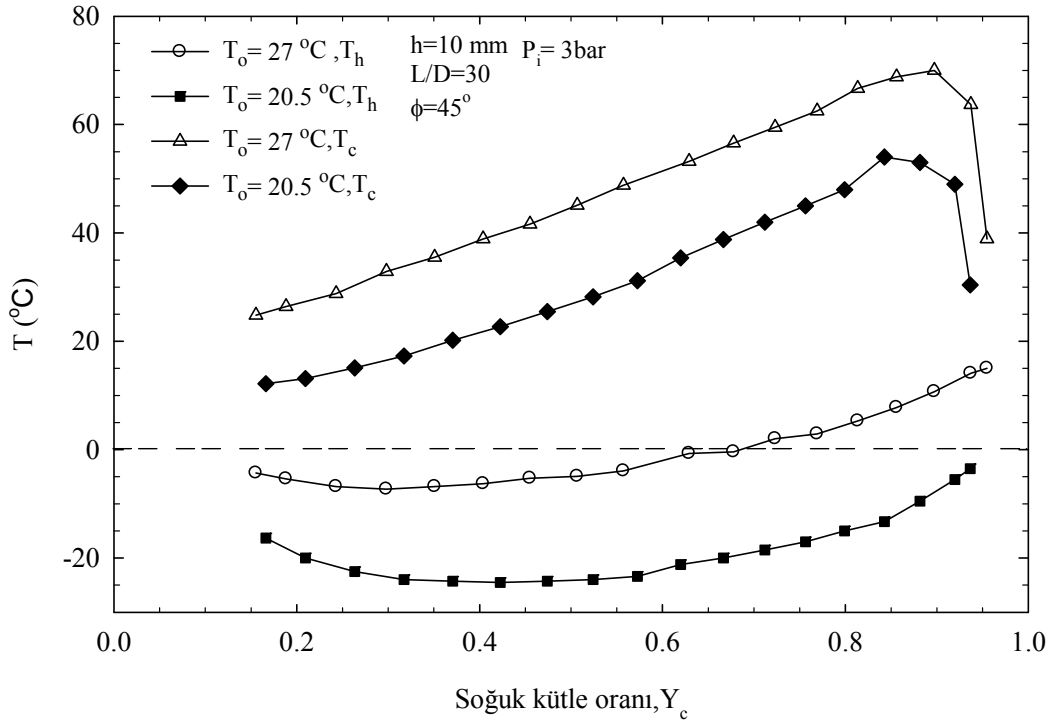
Ortam sıcaklığı etkisini incelemek amacıyla aynı geometrik özelliklere sahip vorteks sistemi, ortam sıcaklıklarının sırasıyla 20.5 °C ve 27 °C olduğu durumlar için deneye tabi tutulmuştur. Bu kapsamda, farklı ortam sıcaklıklarında soğuk uç, sıcak uç, toplam sıcaklık farkları ve soğuk-sıcak uç çıkış sıcaklıklarının soğuk kütle oranı ile değişimleri grafikler halinde sunulmuştur (Şekil 377-379).



Şekil 377. $h=10\text{mm}$, $L/D=30$, $P_i=3\text{bar}$ ve $\phi=45^\circ$ için farklı ortam sıcaklıklarında sıcaklık farklarının Y_c ile değişimi



Şekil 378. $h=10\text{mm}$, $L/D=30$, $P_i=3\text{bar}$ ve $\phi=45^\circ$ için farklı ortam sıcaklıklarında toplam sıcaklık farkının (ΔT), Y_c ile değişimi



Şekil 379. $h=10$ mm, $L/D=30$, $P_i=3$ bar ve $\phi=45^\circ$ için farklı ortam sıcaklıklarında sıcaklık değerlerinin (T_c ve T_h), Y_c ile değişimi

3.7. Belirsizlik Analizinden Elde Edilen Bulgular

Deney araçlarının hassasiyetinden ve ölçüm hatalarından kaynaklanabilecek hatalar Bölüm 2.4'te belirtilen eşitliklerle hesaplanmıştır. Elde edilen belirsizlik değerleri Tablo 4'de gösterilmiştir.

Tablo 4. Belirsizlik analizi sonuçları

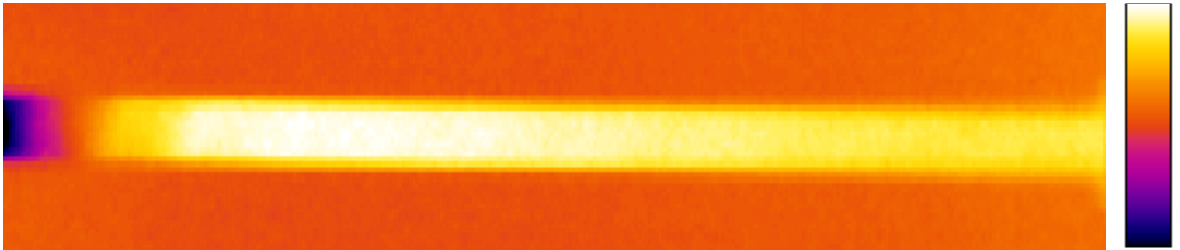
Belirsizlik tipleri	Belirsizlik değerleri [%]
σ_{T_i} , σ_{T_c} , σ_{T_h}	0.51
σ_{Y_c}	3.6
σ_{V_i}	4.7
σ_{P_c}	0.52
σ_{P_i}	1.13
σ_{Y_c}	6
$\sigma_{\Delta T_c}$, $\sigma_{\Delta T_h}$, $\sigma_{\Delta T}$	0.72

3.8. Termal Kamera Görüntülerinden Elde Edilen Bulgular

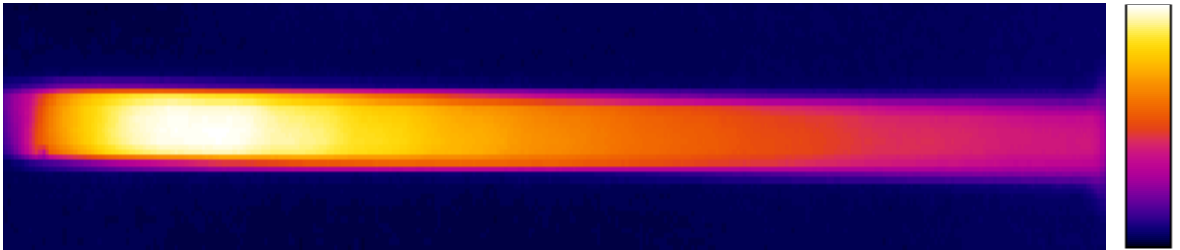
Vorteks tüpünde akışkan hareketinin gözlenebilmesi ve enerji ayrışması olayında kritik nokta olan durma noktasının (stagnation point) incelenebilmesi amacıyla sistem; termal kamera ile 4 bar (mutlak) giriş basıncında, farklı soğuk kütle oranları için görüntülenmiştir. Termal kamera kullanılarak elde edilen görüntüler aşağıda verilmiştir Şekil (380-382).



Şekil 380. $Y_c=0.2$, $P_1=4\text{bar}$ için termal kamera görüntüsü



Şekil 381. $Y_c=0.67$, $P_1=4\text{bar}$ için termal kamera görüntüsü



Şekil 382. $Y_c=0.87$, $P_1=4\text{bar}$ için termal kamera görüntüsü

4. İRDELEME

Deneysel çalışma sürecinde öncelikle, sistemin ne kadar sürede kararlı hale geldiği belirlenmiştir. Bu amaçla toplam sıcaklık farkının zamanla değişim grafiği çizdirilmiş olup, Şekil 16'da sunulmuştur. Sistemin yaklaşık olarak üçüncü dakikanın sonunda kararlı hale geldiği görülmektedir. Bu bağlamda, herhangi bir yanlışlığa fırsat vermemek amacıyla, sistem çalıştırıldıktan sonra yaklaşık olarak beş dakika beklenilmiştir. Bu süre zarfında, eş zamanlı olarak çıkışlardaki sıcaklık değişimlerinin sabitlenip sabitlenmediği de kontrol edilmiştir ve ölçümler alınmaya başlanılmıştır.

Şekil 17'de soğuk uç sıcaklık farkının giriş basıncı ile değişimi görülmektedir. Soğuk uç sıcaklık farkı ve sıcak uç sıcaklık farkı ifadeleri (ΔT_c ve ΔT_h), genellikle vorteks tüpünün performans ifadesi olarak verilmektedir (Wu vd., 2007). Şekil 17 incelendiğinde vorteks tüpünün performansının basınç arttıkça arttığı, fakat bu artışın giderek azalan bir eğilim gösterdiği görülmektedir. Şekil 18-137'de farklı geometrik özelliklere sahip vorteks tüpleri üzerinde farklı basınç değerleri için sıcaklık farklarının soğuk kütle oranı (Y_c) ile değişimleri görülmektedir. Bu grafikler incelendiğinde, hangi geometrik özelliklere sahip olursa olsun tüm vorteks tüpü sistemlerinde sıcaklık farklarının dolayısıyla performansın basınçla belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Bu sonuç Şekil 17'de elde edilen sonucu da desteklemektedir. Fakat basınç arttıkça sıcaklık farkı eğrileri arasındaki mesafe azalmaktadır. Bu da basınçtan kaynaklanan artışın basınç arttıkça azalacağını göstermektedir. Bu durum '*Choked flow*' (boğulma) olayı ile açıklanabilir. Giriş lülesinin çapı, akışkanı sisteme ileten kanalın çapından oldukça azdır. Bu durum da venturi etkisi oluşturmaktadır. Giriş basıncı arttıkça giriş lülesi çıkışındaki akış hızı da artmaktadır. Bu artış, boğulma olayına kadar sürmektedir. Boğulma meydana geldikten sonra, basınç artsa bile hız ve kütleli debi artmamaktadır. Bu nedenle, belli bir değerden sonra basıncın artması sistem performansı için önem taşımayacaktır. Saidi ve Valipour (2003) yaptıkları çalışmada aynı sonucu elde etmişlerdir. Basınç artışının bir noktadan sonra ΔT_c 'yi arttırmadığını, izantropik verimin ise belli bir basınç değerine kadar artıp, o noktadan sonra azaldığını göstermişlerdir.

Şekil 138-197'de her bir L/D, basınç ve helis uzunluğu kombinasyonu için, farklı konik uç açılarında, sıcaklık farklarının Y_c ile değişimini gösteren grafikler sunulmuştur. Bu grafikler incelendiği zaman, genel olarak açı etkisinin belirgin olmadığı görülmektedir.

Özellikle, ΔT_c için açı etkisi ΔT_h 'a göre daha azdır. Boru boyu uzadıkça açı etkisinin azaldığı görülmektedir. Boru boyu ve helis uzunluğu kısaltıldıkça açı etkisi daha belirgin olmaktadır. Bu durum, $L/D=10$ ve $h=10\text{mm}$ için yapılan deneyler sonucunda elde edilen grafiklerde (Şekil 195-197) belirgin bir şekilde görülmektedir. Helis uzunluğu kısaltıldıkça sürtünme azalacağı için akışkan daha yüksek bir çevresel hızla tüpün içine giriş yapacaktır. Fakat boru uzunluğu az ise tüp içerisinde sıcak ve soğuk akışlar karışacak ve akış daha türbülanslı olacaktır. Bunun sonucu olarak akış daha hızlı ve kararsız halde sıcak uç tarafından çıkmaya çalışacaktır. Bu durumda akışkan ile konik ucun etkileşimi artacak ve açı etkisi belirgin hale gelecektir. Elde edilen bu sonuç literatür ile de uyum içindedir. Wu vd. (2007), yaptıkları çalışmada, sıcak uç tarafına akışkanın çevresel hızını azaltıcı bir aparat yerleştirerek daha düşük L/D oranlarının kullanılmasını sağlamaya çalışmışlardır. Şekil 195-197 incelendiğinde, açı etkisinin diğer geometrik parametrelere bağlı olduğu görülmekle birlikte, küçük açı değerleri enerji ayrışmasını arttırmaktadır. Tüm geometrik parametreler göz önüne alındığında en iyi açı değeri 45° olarak belirlenmiştir. Ancak genel sıralamanın da $30^\circ > 45^\circ > 60^\circ > 75^\circ$ olduğu görülmektedir.

Şekil 198-287'de, her bir açı, helis uzunluğu ve basınç değeri kombinasyonu için farklı L/D oranlarında, sıcaklık farklarının Y_c ile değişimini gösteren grafikler sunulmuştur. L/D oranının etkisi diğer geometrik özelliklere göre farklılık göstermektedir. Bu nedenle elde edilen grafiklere bakarak, kesin olarak L/D azaldıkça veya arttıkça enerji ayrışması iyileşmekte veya kötüleşmekte gibi bir sonuç çıkarılamamaktadır. Grafikler incelendiği zaman yüksek helis uzunluklarında, örneğin $h=30\text{ mm}$ gibi, düşük L/D oranlarının enerji ayrışmasını arttırıcı yönde etki yaptığı, düşük helis uzunluklarında ise L/D oranının azalmasının enerji ayrışması açısından bir dezavantaj oluşturduğu görülmektedir. $H=30\text{mm}$ için genel sıralama iyiden kötüye doğru; $L/D: 10 > 20 > 30 > 40$ şeklindedir. Düşük helis uzunluğu değerlerinde ise genel olarak ΔT_c için $L/D=30$ 'un, ΔT_h için ise $L/D=20$ 'nin sistem performansı üzerinde olumlu etki yaptığı görülmektedir. L/D oranı, ΔT_h üzerinde ΔT_c 'ye göre daha belirgin bir etkiye sahiptir. Tüm parametreler göz önüne alındığında enerji ayrışması bakımından en iyi L/D oranının $L/D=30$ olduğu belirlenmiştir.

Helis uzunluğu etkisini gösteren grafikler ise Şekil 288-359'da verilmektedir. Bu grafiklerde, her bir farklı konik uç açısı, L/D oranı ve basınç değeri kombinasyonu için farklı helis uzunluklarında sıcaklık farklarının Y_c ile değişimi görülmektedir. Helis uzunluğu enerji ayrışması üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir.

Fakat helis uzunluğunun etkisi L/D oranına göre değişmektedir. Grafikler incelendiğinde yüksek L/D oranlarında helis uzunluğu azaldıkça sıcaklık farklarının arttığı görülmektedir. Örneğin Şekil 305'e bakıldığı zaman düşük helis uzunluklarında sıcaklık farklarının daha yüksek olduğu görülmektedir ($h=10>15>20>25>30$). Fakat boru boyu azaldıkça helis uzunluğunun kısalması bir dezavantaj oluşturmuştur. Şekil 322 incelendiği zaman $h=10$ ve 15 mm için sıcaklık farklarında ani bir düşüş yaşandığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlar; yüksek L/D oranlarında düşük helis uzunlukları kullanılması gerektiğini göstermektedir. Standart bir vorteks tüpünde akışkan yüksek hızlarda giriş lülesinden vorteks tüpüne girer ve ani bir şekilde yönü değişir. Bu ani değişim, enerji kaybına neden olan girdap oluşumuna neden olur. Bu nedenle bu çalışmada giriş lülesi tarafına farklı uzunluklarda helisel vorteks üreteçleri yerleştirilmiştir. Bu sayede, akışın direkt olarak yön değiştirmesi engellenmiş ve enerji kaybı azaltılmıştır. Literatürde, giriş kısmında akışın direkt olarak tüp cidarına çarpmasını önleyici aparatlar kullanılmıştır. Fakat bu çalışmada literatürden farklı olarak, değişik uzunluklardaki helisel parçalar kullanılmıştır. Bu helislerin her biri tam bir vida adımıdır, fakat farklı uzunluktadır. Bu sayede hem akışın direkt yön değiştirmesi engellenmiş hem de akışkanın farklı uzunluklardaki helislerden geçirilerek ortama tanıtılması sağlanmıştır.

Xue ve Arjomandi (2008) yapmış oldukları çalışmada akışkanın tüpe girdiği kısma farklı açılara sahip aparatlar yerleştirmişlerdir. Bu açıları vorteks açısı olarak tanımlamışlardır. Yapmış oldukları çalışma sonucunda vorteks açısının azalmasının soğuk ve sıcak akışların ayrılması üzerinde pozitif etki yaptığını belirtmişleridir. Helis uzunluklarının kısalması helis açısının da kısalması anlamına gelmektedir. Dolayısıyla elde ettikleri bu sonuç tez kapsamında elde edilen bulguları desteklemektedir.

Tüm sonuçlar incelendiği zaman optimum geometri için en uygun geometrik kombinasyonun $h=10$ mm, $L/D=30$ ve $\Phi=45^\circ$ olduğu görülmektedir (Şekil 303-305). Bu kombinasyon sonucunda en yüksek basınç değeri için ($P_i=5$ bar) maksimum sıcaklık farkları sırasıyla $\Delta T=84.1^\circ\text{C}$, $\Delta T_c=46.3^\circ\text{C}$, $\Delta T_h=63.6^\circ\text{C}$ olarak belirlenmiştir. Soğuk ve sıcak uç sıcaklıkları da sırasıyla $T_c=-39.2^\circ\text{C}$ ve $T_h=71^\circ\text{C}$ olarak elde edilmiştir (Şekil 366).

Termodinamik analiz sonucunda elde edilen bulgular ise Şekil 360-366'da verilmiştir. Bu grafikler optimum geometri için elde edilmiştir. Şekil 360 ve 361'de termodinamiğin birinci yasasının vorteks tüplerine uygulanması sonucunda elde edilen ve sıcaklık değerlerine bağlı olarak belirlenen Y_c ifadesi ile deneysel hesaplama prosedürü sonucunda belirlenen Y_c değerleri karşılaştırılmıştır. ΔT_c ve ΔT_h için aynı eğilim elde

edilmiştir. Y_{teorik} eğrisinin son noktasında bir sapma meydana gelmiştir. Bunun nedeni ise soğuk kütle oranı ifadesinin 1'e yaklaşması durumunda sıcaklık değerinin aniden düşmesidir. Çünkü Y_{teorik} ifadesi sıcaklık farkları üzerinden hesaplanmaktadır.

Şekil 362-364'de ise optimum geometri için entropi üretimi ve tersinmezliği gösteren grafiklere yer verilmiştir. Basıncın artması tersinmezliklerin bir ölçüsü olan entropi üretimini arttırmaktadır. Akışkan tabakaları, vorteks tüpü içerisinde farklı hızlarda hareket ederler. Bu nedenle tabakalar arasında sürtünme meydana gelir. Basınç arttıkça tabakalar arasındaki hız dolayısıyla sürtünme de artacaktır. Bunun sonucu olarak da tersinmezlik artacaktır. Y_c değeri arttıkça, entropi üretiminin azaldığı görülmektedir.

Şekil 367-370'de yalıtımlı ve yalıtımsız durum için elde edilen grafikler görülmektedir. Yalıtımlı durumda çevreye olan ısı kaybı önleneceği için sıcaklık farkları artmaktadır. Yalıtım kullanılması sonucunda ısıtma, soğutma ve izantropik verimlerde iyileşme görülmektedir. İkinci yasa verimlerinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Vorteks tüpü içerisinde sanki dengeli olmayan sıkıştırma ve genişleme olayları meydana gelmektedir. Zaten sistemin çalışma prensibi de budur. Bu nedenle ikinci yasa verimleri düşüktür.

Şekil 371-377'de nem etkisini gösteren grafiklere yer verilmiştir. Akışkanın nem miktarını değiştirmek için sistemde bulunan kurutucudan yararlanılmıştır. Kurutucunun devreye alınıp çıkarılmasıyla nem miktarı değiştirilip etkisi incelenmiştir. Şekil 373'e bakıldığında, kurutucu devrede iken T_c ve T_h 'ın, kurutucu devre dışı olduğu duruma göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum T_h yönünden bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bunun nedeni kurutucu devrede iken akışkanın daha düşük sıcaklıkta test bölgesine girmesidir. Bunun sonucu olarak kurutucunun devrede olduğu durumda sıcak uç çıkış sıcaklığı daha düşük olmaktadır. Bu bir dezavantaj olarak görülebilir. Fakat sıcaklık farklarına bakıldığı zaman kurutucunun devrede olmasının avantaj sağladığı görülmektedir (Şekil 371 ve 372). Bu etki ΔT_h üzerinde daha belirgin olarak görülmektedir.

Ortam sıcaklığının vorteks tüp performansı üzerindeki etkisini gösteren grafikler ise Şekil 377-379'da gösterilmiştir. Ortam sıcaklığının düşük olması sıcaklık farklarını arttırmaktadır. Ortam sıcaklığının azalması özellikle T_c üzerinde belirgin bir düşüşe neden olmaktadır. Fakat T_h üzerinde olumsuz etki yapmaktadır. Bunun nedeni de ortam sıcaklığının azaldıkça, havanın sisteme girişteki sıcaklığında meydana gelen düşmedir. Tablo 4'de ise belirsizlik değerleri verilmiştir. En fazla belirsizlik, debi değerlerinde ortaya çıkmaktadır. Bunun nedeni, sistemdeki rotametrelerin belirsizliklerinin yüksek olmasıdır.

Termal kamera kullanılarak elde edilen görüntüler Şekil 380-382’de sunulmuştur. Bu fotoğraflara bakıldığında, sabit basınç ve farklı Y_c değerleri için sistemde meydana gelen sıcaklık dağılımı görülmektedir. Fulton’a (1950) göre, enerji ayrışması olayı boyunca vorteks tüpünün ekseni üzerinde bir durma noktası, ‘*stagnation point*’, meydana gelir ve bu bölgedeki duvar sıcaklığı diğer bölgelerdekinden daha yüksektir. Ayrıca düşük Y_c değerlerinde en yüksek duvar sıcaklığı sıcak hava çıkış tarafına doğrudur (Stephan vd., 1983). Stephan (1983), yapmış olduğu deneysel çalışmada tüp cidarına eşit aralıklarla 10 adet termoeleman yerleştirerek, Y_c ile maksimum sıcaklık değişimi ilişkisini belirlemeye çalışmıştır. Yaptığı deneyler sonucunda Y_c ’nin değişiminin maksimum sıcaklığın meydana geldiği yeri değiştirdiğini ve Y_c değerinin artmasının durma noktasını soğuk uç tarafına kaydırıldığını tespit etmiştir. Şekil 380-382’ye bakıldığında sonuçların bu ifadelerle uyum içinde olduğu görülmektedir. Şekil 380’de $Y_c=0.2$ ’dir ve sıcak uç tarafı diğer bölgelere oranla daha sıcaktır fakat sıcaklık değerleri çok yüksek değildir. Y_c arttıkça maksimum sıcaklığın meydana geldiği bölge soğuk uç tarafına doğru kaymaktadır. Şekil 381’de $Y_c=0.67$, Şekil 382’de ise $Y_c=0.87$ ’dir. Maksimum sıcaklığın soğuk uç tarafına doğru kaymasının yanı sıra $Y_c=0.67-0.87$ için elde edilen görüntülerden, $Y_c=0.87$ için sıcaklık değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu sonuç, Şekil 365’te verilen toplam sıcaklık farkı ve Şekil 366’da verilen sıcaklık değeri grafiklerinden elde edilen bulguları da desteklemektedir. Bu grafiklere bakıldığında, Y_c ’nin (yaklaşık olarak) 0.8-0.9 değerleri için sıcaklığın maksimum değerler aldığı görülmektedir. Termal kamera kullanılarak elde edilen bu sonuçlar ilk kez bu tez çalışması kapsamında elde edilmiştir.

Genel olarak, L/D ve açı etkisinin belirgin bir şekilde sonuçları etkilemediği görülmektedir. Basınç ve helis uzunluğunun etkisi ise oldukça belirgindir. Pınar vd., (2009) vorteks tüplerinin optimizasyonu üzerine yapmış oldukları çalışmada, Taguchi metodunu kullanmışlar ve basıncın etkisini % 89.89, lüle sayısı etkisini % 2.47 ve gaz cinsi etkisini % 0.54 olarak tespit etmişlerdir. Bu sonuç da basıncın diğer etkilere oranla belirgin bir üstünlüğü olduğunu göstermektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

1. Basıncın artması sıcaklık farklarını arttırmaktadır. Fakat artan basınçla sıcaklık farkı artış miktarı azalmaktadır.
2. ΔT_c yaklaşık olarak $Y_c=0.4$ 'de, ΔT_h ise yaklaşık olarak $Y_c=0.88$ 'de maksimum değerine ulaşmaktadır.
3. Düşük h değerlerinde L/D oranı azaldıkça akış daha türbülanslı olmaktadır ve okunan sıcaklık farklarında ani sapmalar meydana gelmektedir.
4. L/D oranı ve helis uzunluğu azaldıkça, konik uç açısının sıcaklık farkları üzerindeki etkisi artmaktadır.
5. Helis uzunluğunun yüksek değerlerinde, düşük L/D oranları, düşük helis uzunluğu değerlerinde ise yüksek L/D oranları sistem performansını arttırmaktadır.
6. Helis uzunluğunun etkisi L/D oranına bağlıdır. Yüksek L/D oranlarında helis uzunluğunun azalması enerji ayrışmasını arttırmaktadır.
7. Geometrik parametrelerden herbirinin enerji ayrışması üzerindeki etkisi, bir diğer parametrenin değişimine göre değişmektedir.
8. Bu çalışma sonucunda elde edilen en uygun geometrik kombinasyon, basınç $P_1=5$ bar (mutlak) iken; $h=10$ mm, $L/D=30$ ve $\Phi=45^\circ$ 'dir.
9. Vorteks tüpün çalışma prensibi olan, ani sıkıştırma ve genişleme proseslerinden dolayı ikinci yasa verimleri oldukça düşüktür.
10. Yalıtım malzemesi kullanılması sistem performansını arttırmaktadır.
11. Nemin azalması, toplam sıcaklık farkını arttırmaktadır.
12. Ortam sıcaklığının azalması özellikle ΔT_h olmak üzere sıcaklık farklarını arttırmaktadır.
13. Yapılan belirsizlik analizinde, en yüksek belirsizlik düzeyi debi ölçümleri için tespit edilmiştir. Bunun nedeni $\pm\%3$ belirsizliğe sahip rotametrelerdir.
14. Y_c arttıkça maksimum sıcaklığın meydana geldiği bölge soğuk uç tarafına doğru kaymaktadır.
15. Termofiziksel parametrelerden basınç, geometrik parametrelerden ise helis uzunluğu sistem performansı üzerinde en fazla etkiye sahiptir.

6. ÖNERİLER

Konu üzerine çalışmayı düşünen araştırmacılar için tavsiyeler aşağıda sıralanmıştır:

1. Soğuk havanın tüpü terk ederken geçtiği kanalın giriş kısmı konik forma getirilip, söz konusu kısım için koniklik açısının etkisi incelenebilir.
2. Giriş lülesinde geometrik değişiklikler yapılarak sistem performansı üzerindeki etkisi incelenebilir.
3. Deneysel çalışmalar oldukça zaman almaktadır. Bu nedenle sistem üç boyutlu olarak modellenip, daha fazla parametre çok kısa bir zamanda paket programlar vasıtasıyla incelenebilir.
4. İç akış hakkında daha fazla bilgi sahibi olmak için, enerji ayrışmasının meydana geldiği yerde farklı doğrultulara yönelen akışlara parçacık enjekte edilerek enerji ayrışması olayı gözlemlenebilir.

7. KAYNAKLAR

- Ahlborn, B., Keller, J., U., Staudt, R., Treitz, G. ve Rebhan, E., 1994. Limits of Temperature Separation in a Vortex Tube, J. Phys. D. Appl., 27, 480-488.
- Ahlborn, B., Camire, J. ve Keller, J., U., 1996. Low-Pressure Vortex Tubes, J. Phys. D. Appl., 29, 1469-1472.
- Ahlborn, B. ve Groves, B., 1997. Secondary Flow in a Vortex Tube, Fluid Dynamics Research, 21, 73-86.
- Aljuwayhel, N., F., Nellis, G., F. ve Klein, S., A., 2005. Parametric and Internal Study of the Vortex Tube Using a CFD Model, International Journal of Refrigeration, 28, 442-450.
- Avcı, M., 2003. İç Kanal Yüzeyi Yapay Olarak Pürüzlendirilen Eş Merkezli Karesel Halka Kanalda Akış ve Isı Transferinin Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Aydın, O. ve Baki, M., 2006. An Experimental Study on the Design Parameters of a Counterflow Vortex Tube, Energy, 31, 2763-2772.
- Balmer, R., T., 1988. Pressure Driven Ranque-Hilch Temperature Separation in Liquids, Journal of Fluids Engineering, 110, 161-164.
- Behera, U., Paul, P., J., Kasthuriengan, S., Karuranithi, R., Ram, S., N., Dinesh, K. ve Jacob S., 2005. CFD Analysis and Experimental Investigations Towards Optimising the Parameters of Ranque-Hilch Vortex Tube, Int. Jour. of Heat and Mass Trans., 48, 1961-1973.
- Çengel, Y., A. ve Boles, M., A., 1996. Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, Birinci Basım, McGraw-Hill-Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- Deissler, R., G. ve Perlmutter, M., 1960. Analysis of the Flow and Energy Separation in a Turbulent Vortex, Int. J. Heat and Mass Transfer, 1, 173-191.
- Dinçer, K., Başkaya, S., Uysal, B., Z. ve Uçgöl, I., 2008. Experimental Investigation of the Performance of a Ranque-Hilch Vortex Tube With Regard to a Plug Located at the Hot Outlet, Refrigeration, 32, 87-94.
- Eiamsa, S. ve Promvonge, P., 2006. Numerical Prediction of Vortex Flow and Thermal Separation in a Subsonic Vortex Tube, J. Zhejlang Univ. Science A, 7, 8, 1406-1415.
- Eiamsa, S. ve Promvonge, P., 2008. Review of Ranque-Hilch Effects in a Vortex Tubes, Ren. & Sustainable Energy Rev., 12, 1822-1842.

- Eiamsa, S. ve Promvongse, P., 2008. Numerical Simulation of Flow Field and Temperature Separation in a Vortex Tube, Int. Com. Heat and Mass Trans., 35, 937-947.
- Farouk, T. ve Farouk, B., 2007. Large Eddy Simulations of the Flow Field and Temperature Separation in the Ranque-Hilch Vortex Tube, Int. Jour. of Heat and Mass Trans., 50, 4724-4735.
- Fröhligsdorf, W. ve Unger, H., 1999. Numerical Investigations of the Compressible Flow and the Energy Separation in the Ranque-Hilsch Vortex Tube, Int. Jour. of Heat and Mass Trans., 42, 415-422.
- Gao, C., M., Bosschaart, K., J., Zeegers, J. ve Waele, A.T.A.M , 2005. Experimental Study on a Simple Ranque-Hilsch Vortex Tube, Cryogenics, 45, 173-183.
- Gulyaev, A., J., 1966. Vortex Tubes and the Vortex Effect, Soviet Physics, 10, 10, 1869-1881.
- Hamoudi, F., A., 2006. An Investigation of a Micro-Scale Ranque-Hilsch Vortex Tube, A thesis, University of Windsor, Canada.
- Khodorkov, I., L., Poshernev, N., V. ve Zhidkov M., A., 2003. The Vortex Tube-Universal Device for Heating, Cooling, Cleaning and Drying Gases and Separating Gas Mixtures, Chemical and Petroleum Eng., 39, 7, 24-27.
- Kırmacı, V., Usta, H. ve Menlik T., 2006. Vortex Tüpünde Akışkan Olarak Hava, Oksijen, Karbondioksit, Azot ve Argon Kullanılarak Isıtma-Soğutma Sıcaklık Performanslarının Deneysel Olarak Karşılaştırılması, SAÜ, Fen Bilimleri Ens. Dergisi, 10, 2, 39-44.
- Kırmacı, V., 2006. Akışkan Olarak Hava Oksijen Karbondioksit Azot Kullanılan Vorteks Tüpünde Enerji ve Ekserji Analizi, C.Ü. Fen Edebiyat Fakültesi, Fen Bilimleri Dergisi, 27, 1.
- Kurosaka, M., 1982. Acoustic Streaming in Swirling Flow and the Rangué-Hilsch (Vortex-Tube) Effect, J. Fluid Mech., 124, 139-172.
- Lewins, J. ve Bejan, A., 1999. Vortex Tube Optimization Theory, Energy, 24, 931-943.
- Linderstrom-Lang, C., U., 1964. Gas Separation in the Ranque-Hilsch Vortex Tube, Int. J. Heat and Mass Transfer, 7, 1195-1206.
- Linderstrom-Lang, C., U., 1971. The Three-Dimensional Distributions of Tangential Velocity and Total Temperature in Vortex Tubes, J. Fluid Mech., 45, 161-168.
- Marshall, J., 1977. Effect of Operating Conditions, Physical Size and Fluid Characteristics on the Gas Separation Performance of a Linderstrom-Lang Vortex Tube, Int. J. Heat and Mass Transfer, 20, 227-231.

- Nimbalkar, S., U. ve Muller, M., R., 2008. An Experimental Investigation of the Optimum Geometry for the Cold End Orifice of a Vortex Tube, App. Thermal Eng., 29, 509-514.
- Pınar, A., M., Uluer, A. ve Kırmacı, V., 2009. Optimization of Counter-Flow Ranque-Hilsh Vortex Tube Performance Using Taguchi Method, Int. J. Refrigeration, 32, 1487-1494.
- Poshernev, N., V. ve Khodorkov, I., L., 2003. Experience From The Operation of a Conical Vortex Tube with Natural Gas, Chemical and Petroleum Eng., 39, 9, 24-27.
- Saidi, M., H. ve Yazdi, M., R., 1999. Exergy Model of a Vortex Tube System with Experimental Results, Energy, 24, 625-632.
- Saidi, M., H. ve Valipour, M., S., 2003. Experimental Modeling of Vortex Tube Refrigerator, Applied Thermal Engineering, 23, 1971-1980.
- Shannak, B., A., 2004. Temperature Separation and Friction Losses in Vortex Tube, Heat and Mass Transfer, 40, 779-785.
- Skye, H., M., Nellis, G., F. ve Klein, S., A., 2006. Comparison of Analysis to Empirical Data in a Commercial Vortex Tube, Int. J. of Refrigeration, 29, 71-80.
- Stephan, K., Lin, S., Durst, M., Huang, F. ve Seher, D., 1983. An Investigation of Energy Separation in a Vortex Tube, Int. J. Heat Mass Transfer, 26, 3, 341-348.
- Stephan, K., Lin, S., Durst, M., Huang, F. ve Seher, D., 1984. A Similarity Relation for Energy Separation in a Vortex Tube, Int. Journal of Heat Mass Transfer, 27, 6, 911-920.
- Takahama, H. ve Kawamura, H., 1979. Performance Characteristics of Energy Separation in a Steam-Operated Vortex Tube, Int. J. Engng. Sci., 17, 735-744.
- Takahama, H. ve Yokosawa, H., 1981. Energy Separation in Vortex Tubes with a Divergent Chamber, Journal of Heat Transfer, 103.
- Tarunin, E., L. ve Alikina, O., N., 2005. Calculation of Heat Transfer in Ranque-Hilsh's Vortex Tube, Int. J. for Numerical Methods in Fluids, 48, 107-113.
- Ting-Quan, M., Zhao, Q., Yu, J., Ye, F. ve Ma, C., Experimental Investigation on Energy Separation by Vortex Tubes. http://www.bjpu.edu.cn/sci/hn/client_c /lunwen /f_0990.pdf 28 Mayıs 2008.
- Wu, Y., T., Ding, Y., Ji, Y., B., Ma, C., F. ve Ge, M., C., 2007. Modification and Experimental Research on Vortex Tube, Refrigeration, 30, 1042-1049.
- Xue, Y. ve Arjomandi, M., 2008. The Effect of Vortex Angle on the Efficiency of the Ranque-Hilsh Vortex Tube, Exp. Thermal and Fluid Science, 33, 54-57.

Yılmaz, M., Çomaklı, Ö., Kaya, M. ve Karşlı, S., 2005, Vortex Tüpleri: 1- Teknolojik Gelişim, Mühendis ve Makine, 47, 553.

URL-1, www.exair.com, Vortex Tubes and Spot Cooling Products. 10 Aralık 2008.

URL-2, www.siberg.com/vortex.htm Vorteks Tüplerin Soğutma Tekniğinde Kullanılması, 12 Aralık 2008.

ÖZGEÇMİŞ

1985'te Trabzon'da doğdu. 2003 yılında Tefvik Serdar Anadolu Lisesi'nden mezun olup aynı yıl KTÜ Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2007 yılında bölüm ikincisi ve fakülte üçüncüsü olarak KTÜ Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2007 yılında KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans eğitime başladı ve aynı yıl içinde enstitüye araştırma görevlisi olarak atandı. Yaklaşık iki yıl kadar araştırma görevlisi olarak çalıştıktan sonra, Kültür ve Turizm Bakanlığı Trabzon Rölöve ve Anıtlar Müdürlüğü'ne Makine Mühendisi olarak atandı. Halen bu görevini sürdürmekte olup, iyi derecede İngilizce bilmektedir.