

T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ
KOORDİNASYON BİRİMİ

**BİR KANAL İÇERİSİNE ZİKZAK OLARAK YERLEŞTİRİLEN ÜÇGEN
KESİTLİ KÜT CİSİMLERİN AKIŞ KARAKTERİSTİKLERİNİN
BELİRLENMESİ**

FBA-08-453

Normal Araştırma Projesi

SONUÇ RAPORU

Proje Yürütücüsü:

Yrd. Doç. Dr. Yusuf TEKİN
Mühendislik Fakültesi / Makina Mühendisliği Bölümü

Araştırmacıların Adı Soyadı
Yrd. Doç. Dr. Sibel GÜNEŞ
Mühendislik Fakültesi / Makina Mühendisliği Bölümü

Temmuz 2010

KAYSERİ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET	I
ABSTRACT	II
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgiler	1
1.3. Projenin Amacı ve Kapsamı	2
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1. Yapılan Çalışmalar	3
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	8
3.1 Giriş	8
3.2 Deney Düzeneginin Tanıtılması	8
3.3 Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PIV) Tekniği ile Akım Hızının Ölçülmesi	10
4. DENEYSEL SONUÇLAR	15
4.1 Giriş	15
4.2. Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi	24
4.3. Üçgen Cisimler Etrafındaki Girdap Oluşum Karakteristikleri	44
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	46
KAYNAKLAR	47

ÖZET

BİR KANAL İÇERİSİNE ZİKZAK OLARAK YERLEŞTİRİLEN ÜÇGEN KESİTLİ KÜT CİSİMLERİN AKIŞ KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Bu çalışmada, akış bölgesine zikzak pozisyonda yerleştirilen, eşkenar üçgen kesitli küt cisimlerin etrafındaki akış yapısı, parçacık görüntülemeli hız ölçme yöntemi (PIV) kullanılarak deneysel olarak incelenmiştir. B, üçgenin taban kenar uzunluğu olmak üzere blokaj oranı 0.13 alınmıştır. Bütün deneylerde, taban kenar uzunluğu $B=20$ mm olan iki adet üçgen kullanılmış olup, üçgenler arası boşluk zikzak düzenleme için $W/B=2, 3, 4, 5$ olmak üzere 4 farklı W/B oranında çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneyler Reynolds sayısının $8.0 \times 10^3 - 48.0 \times 10^3$ aralığında, kapalı çevrim çalışan bir su kanalında gerçekleştirilmiştir. PIV yöntemiyle model boyunca yatay ve düşey simetri düzlemlerinde; ortalama hız vektör alanları, akım çizgileri ve girdap dağılımları elde edilmiştir. Bu akış özellikleri 4 Hz frekansta, ortalama 200 anlık görüntü ile elde edilmiştir. Problem ayrıca sayısal olarak ta modellenerek elde edilmiş sonuçların deneysel verilerle iyi bir uyum gösterdiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: üçgen küt cisim, PIV (parçacık görüntülemeli hız ölçme yöntemi), vorteks kopması

ABSTRACT**THE DETERMINATION OF FLOW CHARACTERISTICS OF BLUFF BODIES
PLACED IN STAGGERED ARRANGEMENT IN A CHANNEL**

In this study, flow over the equilateral triangular bluff bodies in staggered arrangement was experimentally investigated using particle image velocimetry (PIV) technique. Triangle base edge length B impending blockage ratio of 0.13 was taken. In all experiments, two triangular prism having the base edge length of $B=20$ mm were used and the distance between prisms was changed between $W/B= 2, 3, 4, 5$ for staggered arrangement. The experiments were performed in a closed-circuit water channel in the range of Reynolds number 8.0×10^3 - 48.0×10^3 . The PIV technique provided velocity vector maps, vorticity contours, streamline topology along the model both in vertical and horizontal symmetry planes. This flow characteristics were obtained from averaging 200 images which were acquired at 4 Hz frequency. Problem is also solved numerically and the numerical and experimental result has good agreement.

Key Words: triangular bluff bodies, PIV (particle image velocimetry technique), vortex shedding

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bilgiler

Bir cisim etrafındaki akışta; akış çizgileri cismin yüzeyini takip etmiyor ve ayrıca akışın yüzeyden ayrılmasına ve cismin arkasında geniş bir iz bölgesi oluşmasına neden oluyorsa, bu cisim aerodinamik açıdan küt cisim olarak tanımlanır. Başka bir deyişle; hareket veya akış doğrultusuna göre oldukça büyük bir dik kesit alanı olan ve akışkan yüzeyden ayrılmaya zorlayan cisimler olarak da ifade edilebilir. Bir aerodinamik yapıli cisimde serbest akış yönündeki sürüklenme kuvvetini, esas olarak akışkanın viskoz veya sürtünme etkileri belirlerken, bir küt cisimde özellikle cismin arka kısmında yüzeydeki sınır tabakanın yüzeyden ayrılması ile ortaya çıkan basınç kuvvetleri belirler. Bir dairesel veya kare kesitli cisim bir küt cisim olarak sınıflandırılırken, aerodinamik yapıli cisim olarak adlandırılan ince düzlem plaka ve uçak kanadı profilleri de yüksek hücum açılarında bir küt cisim gibi davranmaktadır.

Bir küt cisim etrafındaki akışta önemli ölçüde cismin akışa direnç göstermesi ve akışın cismin yüzeyinden ayrılması nedeniyle cisim etrafında girdap oluşumu ve girdap kopmalarının meydana geldiği görülür. Akış hızının artmasıyla birlikte girdap kopma frekansı da buna bağıli olarak artar. Özellikle elastik cisimlerde girdap kopma frekansı, akış hızının artmasıyla birlikte cismin doğal frekansına kadar artar. Bundan sonra hızın belirli bir aralığa kadar artmasına rağmen, girdap kopma frekansı cismin doğal frekansında sabit kalır. Kilitleme-etkisi (lock-in effect) olarak ifade edilen bu durumda girdap kopmaları nedeniyle oluşan çalkantı kuvvetler; doğal frekanslarında yapılarda şiddetli titreşimlere sebep olabilmektedir. Akış ile cismin etkileşimi sonucu meydana gelen dinamik yükler ve gürültü bu sistemlerde önemli derecede hasarlar meydana getirebilirler.

Akış ortamındaki bir cisim üzerinde oluşan sınır tabaka, cismin arkasında bir iz bölgesi oluşturacak şekilde devam etmektedir. Aerodinamik yapıli cisimler üzerinde akış cismin bütün uzunluğu boyunca tutulu kalarak çok dar bir iz oluşturur. Küt cisimler üzerinde ise sınır tabaka cisim boyunca ilerleyemeden yüzeyden ayrılır. Bu ayrılma olayı girdapların oluşmasına neden olur ve geniş bir iz bölgesi içerisinde büyük enerji kayıpları oluşur. Girdapların belirli bir frekansta periyodik olarak cismin alt ve üst kısımlarından biri saat ibresi yönünde, diğeri ters yönde iki sıra halinde düzenli bir şekilde ayrılmaları durumunda “Karman girdap caddesi” olarak tanımlanan akış tipi meydana gelmektedir. Cismin alt ve üst

kisimlarından ayrılan sınır tabakalar cismin kalınlığının oluşturduğu bölge nedeniyle birbirinden uzaktadırlar. Cismin kenarlarından ayrılan akış cismin arkasındaki bölgede yuvarlanma eğilimi göstererek büyük girdaplar üretirler. Bu girdaplar belli bir büyüklüğe ulaştıkları zaman cisimden koparlar ve cismin arkasında ilerlerler. Bu girdaplar yüzeyden ayrılma noktasının sonrasında akış içerisinde büyük ölçekli, düşük frekanslı çalkantılar üretirler. Cismin bir tarafındaki sınır tabaka cismin arkasında iz bölgesinde geliştikten sonra diğer taraftaki sınır tabakadan gelen akışı çekmeye başlar. Bu birinci girdabın gelişmesini yavaşlatır ve cismin arkasında karşı taraftaki ikinci sınır tabakayı iter. Gelişimini tamamlayan girdap daha sonra sınır tabakadan ayrılır ve akış yönünde ilerler. Cismin arkasına geçen ikinci sınır tabaka ise başka bir girdap içerisinde gelişmeye başlar [1].

Birbirini takip eden girdapların frekansları birbirinden farklı değildir ve dar bir frekans aralığında bir değer etrafında yer alırlar. Bu değerlerin ortasındaki veya en etkili olan değerinin belirlenmesi genel olarak oldukça kolaydır ve bu frekans boyutsuz formda Strouhal sayısı olarak isimlendirilerek $St=fD/U$ şeklinde ifade edilir. Burada f cismin bir kenarından kopan girdapların kopma frekansını göstermektedir. Genel olarak St sayısı 0.1 ile 0.4 arasında olup cismin kesit şekline ve Reynolds sayısına bağlıdır. İki boyutlu dairesel bir silindirde St sayısı, alt-kritik Re sayılarında yaklaşık 0.2 değerindedir. Küt cismin her iki kenarından birbiri ardına girdapların kopması sürüklenme kuvvetine dik yan çalkantı kuvvetlerine neden olur. Bu ise cisim üzerindeki basınç dağılımlarında önemli değişime yol açar. Çalkantı kuvvetlerinin frekansı, Strouhal sayısı frekansı etrafında yer alan dar bir aralıkta yer alır. Bu zaman bağımlı yanal kuvvetlerin büyüklüğünün ortalama sürüklenme kuvveti kadar dikkate alınması gerekmektedir ve yapılarda çok önemli dinamik etkileri olabilmektedir [1].

1.2. Projenin Amacı ve Kapsamı

Enerji korunumun önemi nedeniyle, küt cisim akışları konusunun önemi giderek artmaktadır. Küt cisimler etrafındaki akış parametreleri son derece karmaşık olup, bu konuda bir çok çalışma yapılmasına rağmen, farklı geometri ve çalışma sahaları için araştırma konusu olmaya halen devam etmektedir. Akışkan ile cismin etkileşimi sonucu meydana gelen dinamik yükler ve gürültü, önemli derecede hasarlar meydana getirebilmektedir. Büyük yapılar rüzgar kaynaklı büyük genlikli titreşimlerin etkisi altındadırlar. Küt cisimler ve yapılar etrafındaki akışlar, bu cisimler etrafında bir basınç dağılımı meydana getirmektedir. Bu basınçlar cisme zarar verebilen veya rahatsız edici bir şekilde titreştirebilen kuvvetler üretecek şekilde cismin

yüzeyi boyunca rol oynamaktadır. Bu etkiler uzun süreden beri mühendislerin tasarımlarında dikkate alınmaktadır.

Literatürde kare ve dairesel kesitli zikzak küt cisimler ile ilgili pek çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmada literatürde mevcut çalışmalardan farklı olarak akış alanına zikzak olarak yerleştirilen üçgen geometriye sahip küt cisimlerin etrafındaki akışta hız profilleri, akım çizgileri ve girdap alanları PIV ölçüm tekniği ile deneysel olarak belirlenmiştir. Deneyler, üçgenler arası farklı mesafeler için Reynolds sayısının 8000-48000 aralığında gerçekleştirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Yapılan Çalışmalar

Literatürde yapılan çalışmalarda, genellikle dairesel ve kare kesitli küt cisimlerin akış ortamına zikzak olarak yerleştirildiği durumların incelendiği görülmektedir. Üçgen kesitli küt cisimlerin akış ortamına zikzak olarak yerleştirildiği çalışmalar mevcut değildir. Bu sebeple aşağıda daha çok dairesel ve kare kesitli küt cisimler ile ilgili çalışmalara yer verilmiştir.

Ardışık ve üst-üste düzenlemelerinin dışında kalan, iki cismin birbirlerine göre farklı yatay ve düşey konumlarda olduğu zikzak düzenlemede, aynı çaplı iki dairesel silindirin karşılıklı etkileşimlerinin incelendiği bir seri çalışma, Zdravkovich ve arkadaşları [2, 3] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmalarda, iki cismin karşılıklı etkileşimleri nedeniyle oluşan salınım ve titreşim hareketlerini ve bunların aerodinamik karakteristiklere etkilerini de belirleyerek sistematik bir sınıflandırma yapmışlardır [4-7]. Zdravkovich [8] yapmış olduğu diğer bir çalışmada da, sonlu yükseklikteki iki dairesel silindirin aerodinamik karakteristiklerini Reynolds sayının 2.0×10^5 değerinde mimari uygulamaları dikkate alarak incelemiştir. Bazı kritik düzenlemelerde, iki cisim arasındaki akışın karşılıklı etkileşiminin farklı aerodinamik kuvvetleri ürettiğini ve iki farklı akış tipinin birbirinin peşi sıra değişmesine yol açtığını ifade etmiştir. Bu şekilde üç kritik düzenlemenin bulunduğunu ve sonlu yükseklikteki serbest uçlu silindir yapılarının, akışta kuvvetli bir üç boyutlu akışı oluşturduğunu ortaya koymuştur. Her iki silindir üzerinde yerden itibaren çeşitli seviyelerdeki eş zamanlı basınç dağılımları ölçümleri yaparak üst-üste konumdaki iki-kararlı eğimli akış (bistable biased flow) tipinin sonlu yükseklikteki silindirler içinde hala baskın bir özellik olduğunu göstermiştir.

Sonlu uzunluktaki iki dairesel silindirin incelendiği diğer bir çalışmada, Taniguchi vd. [9] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, türbülanslı sınır tabakanın olduğu bir akışta, dikey olarak yerleştirilen, sonlu yükseklikteki ($H=3D$) iki dairesel silindirin birbirleri ile olan etkileşimlerini incelemişlerdir. İki silindir arası mesafenin çeşitli değerlerinde, silindir yüksekliği boyunca çeşitli konumlarda çevresel basınç dağılımlarını hücum açısına bağlı olarak elde etmişlerdir. Her iki cisme etki eden sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerini, 0° - 30° , 30° - 120° ve 120° - 180° hücum açısı aralıklarında olmak üzere üç bölgede sınıflandırmışlardır. $L/D \geq 4$ olduğu konumlarda öndeki silindirin iz bölgesindeki etkisi hariç, iki cismin karşılıklı etkileşimlerinin neredeyse ihmal edilebilir mertebede olduğunu ifade etmişlerdir.

Sumner ve Richards [10] iki adet eşit çaplı dairesel silindirin zikzak konumunda girdap kopma karakteristiklerini Reynolds sayısının 3.2×10^4 - 7.0×10^4 arasında incelemişlerdir. İki silindir arası mesafeyi $2.0D$ ve $2.5D$ değerlerinde sabit tutarak $0-90^\circ$ arası hücum açılarında her iki silindirin arkasında girdap kopma frekanslarını silindirlerin arkasına $x/D=3$ ve $y/D=1$ konumuna yerleştirdikleri kızgın-tel probunu kullanarak ölçmüşlerdir. Hücum açısının $2^\circ < \alpha < 15^\circ$ aralığında güç-spektrumlarının geniş bandlı bir dağılım göstermesi veya keskin değişimli spektral piklerin olmaması nedeniyle Strouhal sayılarının güvenilir bir şekilde elde edilemediğini ifade etmişlerdir. Hücum açısının bu aralığında Strouhal sayılarının belirgin bir şekilde elde edilememesi, akış yollarında ve girdap kopma faaliyetlerinde önemli değişimlerin olduğunu göstermekte ve arkadaki silindir üzerine, maksimum kaldırma kuvveti ve minimum sürüklenme kuvveti etki etmektedir. $\alpha < 15^\circ$ olduğu hücum açılarında akış yolları öndeki silindirden ayrılan iç taraftaki kayma tabakasının davranışı ile yakından alakalıdır. Bu kayma tabakası, önce arkadaki silindirin dış tarafında tutunmakta, hücum açısındaki artışa ve mesafeye bağlı olarak iki silindir arasındaki boşluktan geçerek arkadaki silindirin ön yüzeyinin iç tarafında yeniden tutunabilmektedir. Bu iki akış tipinde de öndeki silindirden periyodik girdap kopmaları bastırılmaktadır. Hücum açısı $\alpha > 15^\circ$ olduğu durumda öndeki silindirin iç tarafındaki kayma tabakası ile arkadaki silindirin karşılıklı etkileşimleri ortadan kalkmaktadır. Bu kayma tabakası artık öndeki silindirin arkasında birbirini takip eden girdap kopmalarının oluşmasında rol almaktadır.

Sumner vd. [11] yapmış olduğu diğer bir çalışmada, iki cisim arası mesafenin $2D$ olduğu durumda $0^\circ-90^\circ$ arasında değişen hücum açılarında iki dairesel silindire etki eden aerodinamik kuvvetleri ölçmüşlerdir. Öndeki silindire etki eden kuvvetlerde, hücum açısına bağlı olarak göze çarpan bir dağılımın olmadığını, ancak öndeki silindirden girdap kopmalarının oluşmasıyla şiddetli bir değişimin oluştuğunu ifade etmişlerdir. Arkadaki silindir üzerine etki eden sürüklenme kuvvetinin minimum değerlerinin kayma tabakasının bu silindir üzerinde yeniden tutunduğu şartlarda oluştuğunu ve 3.2×10^4 - 7.0×10^4 arasında Reynolds sayısının sonuçlara herhangi bir etkisinin bulunmadığını belirtmişlerdir.

Akosile ve Sumner [12] iki cisim arası mesafenin $1.125D$ ve $1.25D$ olduğu durumda, düzgün kayma tabakalı serbest akış şartları altındaki iki dairesel silindiri $0^\circ-90^\circ$ arası hücum açılarında test etmişlerdir. Reynolds sayısının 5.0×10^4 değerinde, iki dairesel silindire etki eden aerodinamik kuvvetler ve Strouhal sayısı oldukça karmaşık bir değişim sergilemektedir. Çeşitli kritik hücum açılarında, bu kuvvetlerde süresiz değişimler veya aşırı değerler oluştuğunu ifade etmişlerdir. Bunların, düşük hücum açılarında iki silindir arasındaki kayma

tabakası dinamiğiyle ve daha büyük hücum açılarındaki ise, iki cisim arasında bulunan boşluktaki akışın değişimi ve cisimlerin arasından geçen sızma akışı (base-bleed) ile ilişkili olduğunu açıklamışlardır.

Sumner vd. [13] iki dairesel silindiri $0-90^\circ$ arasındaki hücum açılarındaki ve iki cisim arası mesafenin $1D-5D$ aralığında Reynolds sayısının $850-1900$ arasındaki düşük değerlerinde PIV hız ölçüm yöntemini kullanarak test etmişlerdir. Bu çalışma aralığında, dokuz akış tipinin var olduğunu ve kayma tabakası tutunması (shear layer reattachment), baskılanmış yüzeyden ayrılma (induced separation), arka modelin alt ve ön modelin üst yüzeyinden kopan girdap çiftinin, ön modelin alt yüzeyinden kopan girdap tarafından kuşatılması (vortex pairing and enveloping) ve girdap çarpması (vortex impingement) gibi çeşitli tanımlamalarda bulunmuşlardır.

Gu [14] yapmış olduğu çalışmada, iki dairesel silindirin ardışık, üst-üste ve $0-90^\circ$ hücum açılı olarak düzenlemelerde karşılıklı etkileşimlerini, 4.5×10^5 değerindeki süper-kritik Reynolds sayısında incelemiştir. Yapmış olduğu basınç ölçümlerinden, ardışık düzenlemede, iki farklı akış rejiminde dört basınç yapısını, üst-üste düzenlemede iki farklı akış rejiminde üç basınç yapısını elde etmiştir. Hücum açılı düzenlemede, iki silindirin bazı özel durumlarındaki basınç dağılımlarında ani değişimler gözlemlemiştir. Genel olarak ardışık düzenleme ve onun yakın komşuluğu haricindeki bölgelerde, iki cisim arasındaki önemli etkileşimlerin $L/D=1.7$ 'den daha küçük aralıklarla sınırlı kaldığını ifade etmiştir. Bu çalışmanın devamı niteliğinde olan bir çalışmada Gu ve Sun [15] ise, Reynolds sayısının alt-kritik bölgesinin yüksek değerlerinde (2.2×10^5 ve 3.3×10^5) basınç dağılımlarını dikkate alarak akış yapısı tanımlamalarında bulunulmuştur. Özellikle bazı kritik açılarda, iki farklı basınç yapısı arasında değişimlerin olduğu ve bu değişimlerin silindirler üzerinde büyük fakat süreksiz kaldırma kuvvetlerine neden olduğuna işaret edilmiştir. Sun vd. [16] iki dairesel silindirin çeşitli L/D konumlarında ve hücum açılarındaki karşılıklı etkileşimlerinin çalkantı basınçları üzerine etkilerini, yüksek alt- kritik Reynolds sayısında (3.25×10^5) ve süper-kritik Reynolds sayısında (6.5×10^5) test etmişlerdir. Cisimlerin karşılıklı etkileşimlerinin çalkantı basınçları üzerine etkisinin süper-kritik Reynolds sayısında, alt-kritik Reynolds sayısındakine göre çok daha zayıf olduğunu ve bazı durumlarda iki Reynolds sayısı arasında çok farklı özelliklerin bulunduğunu ifade etmişlerdir.

Price ve Paidoussis [17] yaptıkları çalışmada, iki ve üç dairesel silindir grupları üzerine etki eden aerodinamik kuvvetleri çeşitli geometrik modeller için araştırmışlardır. Üçlü grup içindeki bir silindire etki eden akışkan kuvvetlerinin, ikili grup içinde bulunan bir silindir üzerine etki eden kuvvetlerle birçok benzerlikleri olduğunu belirlemişlerdir.

Luo ve Shah [18] bir kare modelin arkasında çeşitli yatay ve düşey konumlara yerleştirilen diğer bir kare modelle olan etkileşimini incelemişlerdir. $L/D=2-16$ ve $T/D=0-3.5$ arasında modellere ait sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin ortalama ve çalkantı değerlerini elde etmişlerdir. Özellikle $L/D=3-4$ ve $T/D=2-3$ bölgesindeki değişimin özelliklerini ortaya koymuşlardır. Ayrıca, A salınım yüksekliği olmak üzere arkadaki modeli akışa dik yönde salınım yapacak şekilde, $A/D=0.5-1.5$ değerlerinde ve 1-7 Hz arasında sabit frekanslarda hareket ettirerek bunun aerodinamik kuvvetlere ve girdap kopma özelliklerine etkilerini araştırmışlardır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Giriş

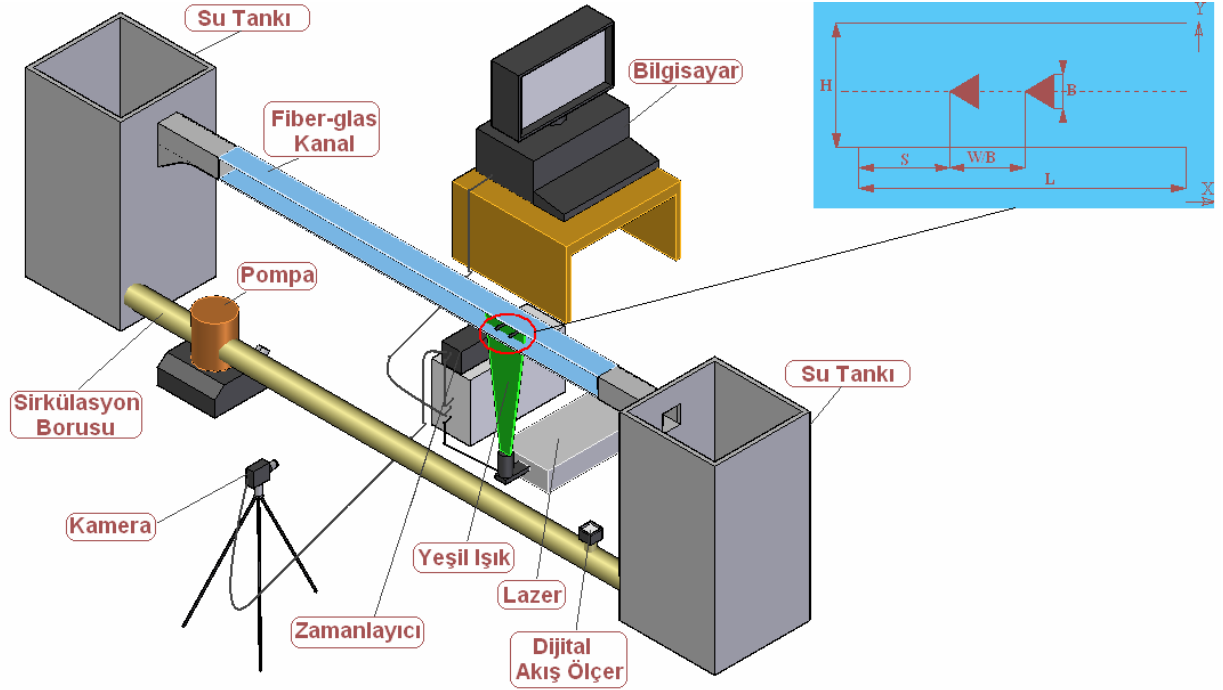
Bu bölümde zikzak düzenlemede yerleştirilen üçgen cisimlerin art iz bölgesinin incelenmesinde kullanılan deney düzeneğinden, deney modellerinden ve akış içindeki yapıların nicel görüntülerinin elde edilmesinde kullanılan deneysel yöntemden söz edilmiştir. İlk olarak deneylerin yapıldığı kanal ve deneyde kullanılan modeller anlatılmıştır. Akışın incelenmesinde kullanılan yöntem olan parçacık görüntülemeli akış ölçüm (PIV) sisteminden söz edildikten sonra verilerin işlenmesinde kullanılan yöntemlerden bahsedilmiştir.

3.2 Deney Düzeneğinin Tanıtılması

Deneyler Erciyes Üniversitesi, Termodinamik laboratuvarındaki kapalı çevrim olarak çalışan Şekil 3.1'deki kapalı kanal düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2'de şematik olarak da verilmiş olan kanal düzeneği, iki su haznesi ve bu iki hazneyi birleştiren, $10 \times 15 \text{ cm}^2$ kesit alana ve 4 m uzunluğa sahip su kanalından oluşmaktadır. Kanal tabanı ve yan duvarlar 15 mm kalınlığındaki saydam pleksiglas malzemeden yapılmış olup, böylece ölçümler için pürüzsüz ve saydam bir yüzey elde edilmiştir. Ayrıca test bölgesinden sonra, üst kısma akışı bozmayacak şekilde yerleştirilen kapak sayesinde cisimler rahatlıkla kanal içerisine yerleştirilmiştir.



Şekil 3.1 Su kanalının genel görüntüsü.



Şekil 3.2 Su kanalının şematik görünümü.



(a)



(b)



(c)

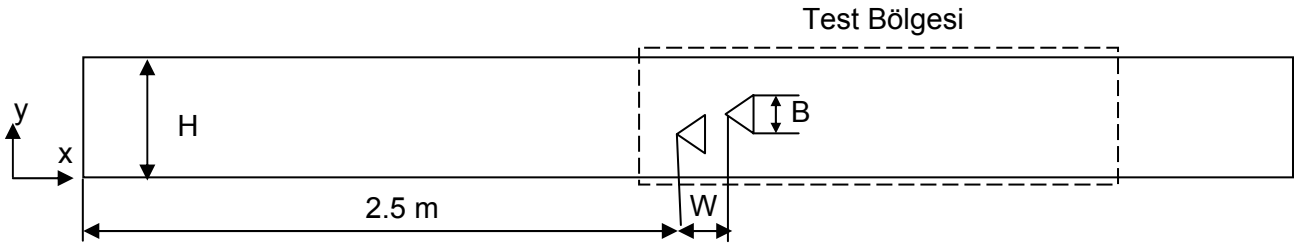
Şekil 3.3. (a)Deneylerde kullanılan türbin tipi debi ölçer, (b)Frekans kontrollü hız ayarlayıcı (c)Pompa.

Kanalda giriş ve çıkış hazneleri arasındaki su çevrimini sağlayan bir pompa kullanılmıştır. Çıkış haznesinden gelen akışkanın debisi, DOĞA firmasından temin edilen 0.95×10^{-3} - $14.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ aralığında debi ölçümü sağlayan türbin tipi debi ölçer ile ölçülmüştür. Buradan pompaya ulaştırılan suyun giriş haznesine pompalanmasıyla devirdaim sağlanmıştır. Farklı hızlarda ve debide deney yapabilmek için, pompa devri hız kontrol ünitesi yardımıyla

değiştirilmiştir. (Şekil 3.3) Deneylerde Re sayısının çalışma aralığı $8.0 \times 10^3 - 48.0 \times 10^3$ olarak alınmıştır

Yan duvarların akış karakteristikleri üzerindeki etkisini belirleyen, model boyutlarının test kesit boyutlarına oranını ifade eden **blokaj oranı** göz önüne alınarak, eşkenar üçgen modellerin bir kenarı 20 mm olarak imal edilmiştir. Üçgen cisimlerin yüzeylerinin pürüzlü olmaması ve akış alanını bozmaması için, cisimler derlin malzemedan, CNC tezgahda işlenerek, hassas bir şekilde üretilmiş ve yüzeyleri parlatılmıştır.

Kanal girişinden yaklaşık 2.5 m sonra, akışın üniform olarak geliştiği bölgede ölçümler alınmaya başlanmıştır. Üçgen cisimler akım alanına yerleştirildikten sonra, cisim arka iz bölgesinde 10B mesafelik bir bölge test bölgesi olarak incelenmiştir. Üçgen cisimler kanal içerisine 3 farklı düzenlemede yerleştirilmiştir. İlk üçgenin konumu sabit tutulup, ikinci üçgenin konumu değiştirilmek suretiyle deneyler gerçekleştirilmiştir. B üçgenin taban kenar uzunluğunu, W ise üçgenler arası mesafeyi göstermekte olup, deneyler $W/B=2, 3, 4$ ve 5 için Reynolds sayısının $8.0 \times 10^3 - 48.0 \times 10^3$ aralığında yapılmıştır. Zikzak düzenlemede (Şekil 3.4.), cisimler kanalın orta noktasına yerleştirilmiş olup, W/B oranının değiştirilmesi suretiyle ölçümler alınmıştır.



Şekil 3.4 Üçgen cisimlerin kanal içerisine zikzak olarak yerleştirilmesi

3.3 Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PIV) Tekniği ile Akım Hızının Ölçülmesi

PIV tekniği ile yapılan hız ölçümlerinde parçacıkların akışkan hareketini takip ettiği düşüncesinden hareketle, akışkan parçacıklar ile beslenir. Hassas bir ölçüm için parçacıkların akış içinde düzgün bir şekilde dağılmış ve akışı düzgün bir şekilde takip ediyor olmaları gerekmektedir. Parçacıklar seçilirken dikkat edilmesi gereken bir başka nokta da

parçacıkların ışığı yansıtma özellikleridir. PIV çözümlmeleri sırasında hız alanının doğru bir şekilde hesaplanması, kaydedilen akış alanı görüntülerinin net ve parçacıkların belirgin olmalarını gerektirmektedir. Bu nedenlerden dolayı da parçacıkların akışı takip edebilecek kadar küçük ve yeterince ışık yansıtabilecek kadar da büyük olmaları gerekmektedir. Bu yüzden deneylerde parçacık olarak $10\mu\text{m}$ çapında cam tozu kullanılmıştır.

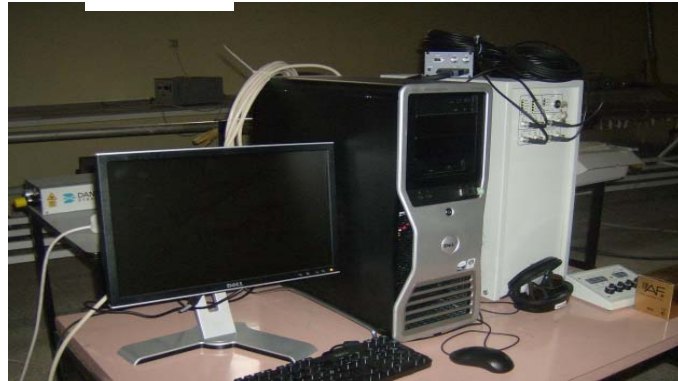
PIV sistemindeki ana parçalar; çift dalga boylu ve 135 mJ enerjiye sahip kızıl ötesi radyasyon dalgası gönderebilen çift darbeli Nd:Yag lazer, ölçüm alanında aydınlatılan parçacıkların hareketlerinin yakalanabilmesi için yüksek çözünürlüklü bir CCD (Charge Coupled Device) kamera, bilgisayar sistemi ve lazer kontrol ünitesinden oluşmaktadır.(Şekil 3.5)



(a)

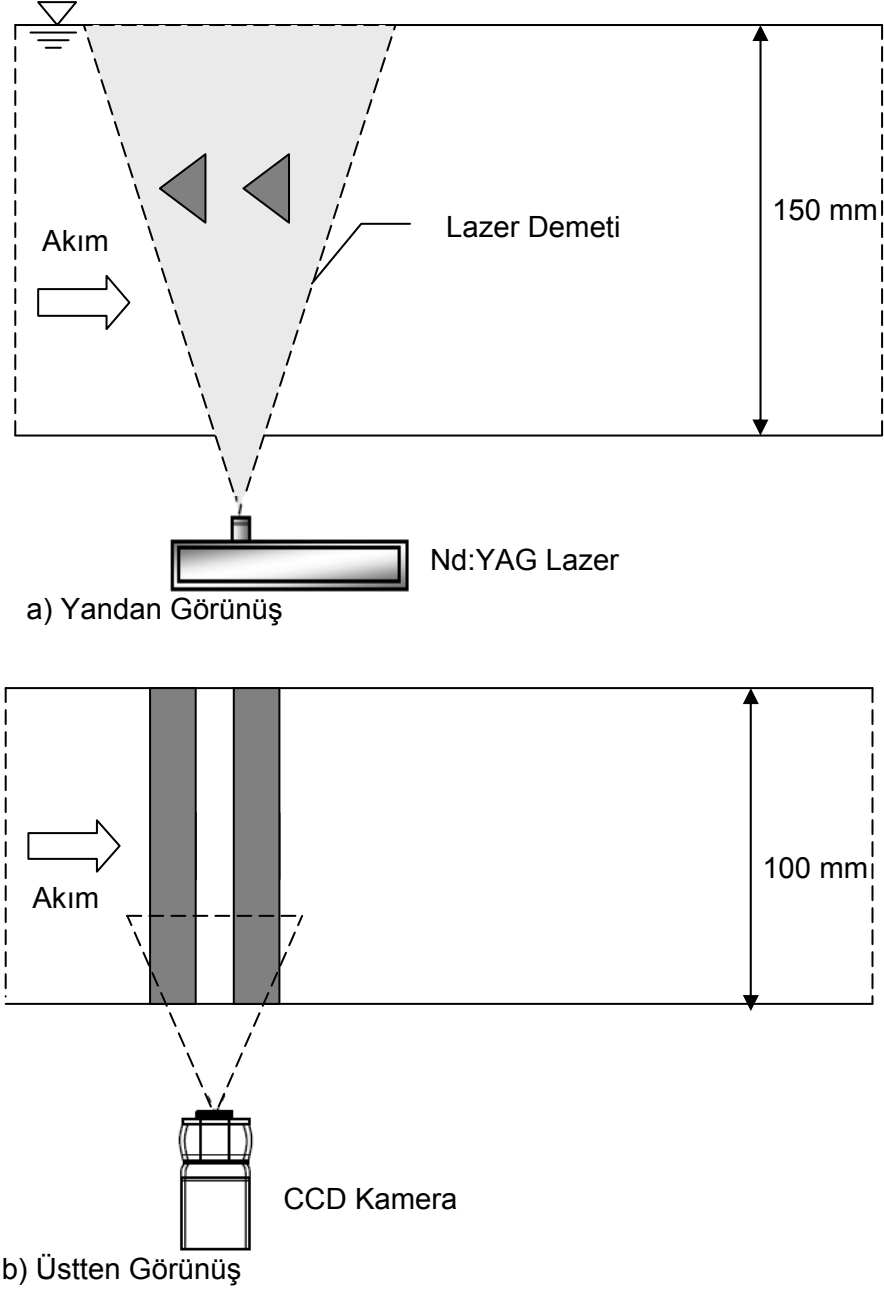


(b)



(c)

Şekil 3.5. PIV sistemini oluşturan ana parçalar (a) Nd Yag Lazer. (b) CCD kamera
(c) Bilgisayar sistemi ve Lazer kontrol ünitesi.



Şekil 3.6. PIV sisteminin deney düzeneği.

Bu çalışmada kullanılan PIV sisteminin deney düzeneği ise Şekil 3.6'da şematik olarak görülmektedir. Kanalın alt kısmına yerleştirilen lazerle, lazere dik bir konumda yerleştirilen kamera sayesinde görüntüler alınmıştır. Lazer demeti test bölgesinin tam orta noktasına getirilmek suretiyle, yan duvarlardan oluşabilecek yansımalar engellenmeye çalışılmıştır. Kamera üzerindeki objektif ise, maksimum ışık geçirgenliğinin sağlanabilmesi için f:2.8 diyafram açıklığına ayarlanarak lazerin aydınlatmakta olduğu düzleme netleştirilmiştir. Ayrıca lazer ışık demetinin yoğunluğu CCD kameranın kayıt etmesine yetecek miktarda yoğun olmalıdır. Işığın yansıması esnasında oluşan sapmalardan çekilen resimin

etkilenmemesi için ise, kameraya gelen ışığın yoğunluğu sistemde oluşan optik gürültü seviyesinin üzerinde alınmıştır.

Test alanının lazer demetiyle aydınlatılması sonucu, lazerin aydınlattığı bölgedeki akıma bırakılmış olan parçacıkların belli zaman aralıklarında resimlerinin çekilmesi ve belirli zaman aralığında çekilen iki resimdeki parçacıkların yer değiştirmesinden hız alanı elde edilmektedir. Çok küçük zaman aralıklarında, yüksek enerji ile parlayabilmesi, silindirik merceklerle ince bir demet haline getirilebilmesi sebebiyle test alanının aydınlatılmasında lazer kullanılması tercih edilen bir yöntemdir. Burada 532 nm'lik çift dalga boyuna sahip kızıl ötesi radyasyon dalgası gönderebilen, her parlamada 135 mJ enerjiye sahip, 1.5 mm kalınlığında lazer demeti gönderen, çift darbeli Nd:Yag lazeri kullanılmıştır. Ölçüm alanında aydınlatılan parçacıkların hareketlerinin yakalanabilmesi için yüksek çözünürlüklü bir CCD (Charge Coupled Device) kamera, lazer demetine dik bir pozisyonda yerleştirilmiştir. Lazer parlaması ve kamera senkronize bir şekilde çalışmakta böylece lazer demetinin birinci anlık parlaması kamerada birinci kareye, ikinci parlaması da ikinci kareye kaydedilmekte ve ikinci kayıttan sonra her iki kare de bilgisayara aktarılmaktadır. Lazerin her iki anlık parlaması arasında geçen süre Re sayısına göre değişmiştir. Çünkü yüksek Re sayılarında parçacıkların hareketi daha zor gözlenebilmekte ve dolayısıyla iki anlık parlama arasında geçen süre (time between pulses) daha düşük seçilmiştir. Re sayısının 48000 değerinde iki parlama arasındaki süre 2000 seçilirken, Re=40000 için 4000, Re=32000 için 6000, Re=24000 için 6700, Re=16000 için 10000 ve Re=8000 için de 20000 olarak alınmıştır. Her bir tetikleme hızı (trigger rate) ise 4Hz seçilmiştir. Kameradan aktarılan anlık resimler bilgisayar içerisindeki bir resim karesi yakalayıcı ile okunmuş ve dijital resim dosyası formatında (TIFF) hafızaya kaydedilmiştir. Bu dijital resimlerin işlenmesi ve analizi DANTEC PIV sistemi içerisinde yer alan yazılım ile gerçekleştirilmiştir. Her bir bölgede toplam 200 anlık görüntü kaydedilmiştir. DYNAMIC STUDIO yazılımından elde edilen ham vektör alanlarının işlenmesi, sorgulama alanı içerisindeki sınırların belirlenmesi, yansımadan ve gölgelenmeden oluşan kötü vektörlerin ayıklanmasından sonra, hız dağılımları, akım çizgileri ve girdap oluşumları elde edilmiştir. Ayrıca hareketin periyodik ve rastgele bileşenlerine efektif bir biçimde ayrıştırılmasını sağlamak için POD analizi yapılmıştır. POD yaklaşımı hareketin salınan kısmını enerji seviyelerine göre ayrıştırmaktadır. Bunun sonucunda, cisimler arkasında oluşan girdaplarla önem kazanan Strouhal sayısı incelenmiştir. Frekansların tespiti sonucu incelenecek olan Strouhal sayısı;

$$St = f_s \cdot B / U \quad (3.1)$$

olarak tanımlanır ve akımın kararsızlığından gelen yerel ivme kuvvetlerinin, akışkan kütlelerinin bir noktadan başka bir noktaya hareketi sırasında hızının değişmesinden gelen konvektif ivme kuvvetlerine oranını ölçer. Burada f_s cismin bir kenarından kopan girdapların kopma frekansını, B modelin taban kenarını ve U ise ortalama hızı göstermektedir.

Yukarıda açıklandığı gibi, PIV'nin çalışma prensibini test alanı içerisinde aydınlatılan parçacıkların yer değiştirmesinin tespiti olarak özetlemek mümkündür. Bu yer değiştirmenin belirlenmesinde en çok kullanılan yöntemler parçacık izleme ve korelasyondur. Bu çalışmada, parçacıkların yer değiştirmesinin hesabı 64x64 sorgulama ekranı ile korelasyon tekniği kullanılarak yapılmıştır.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

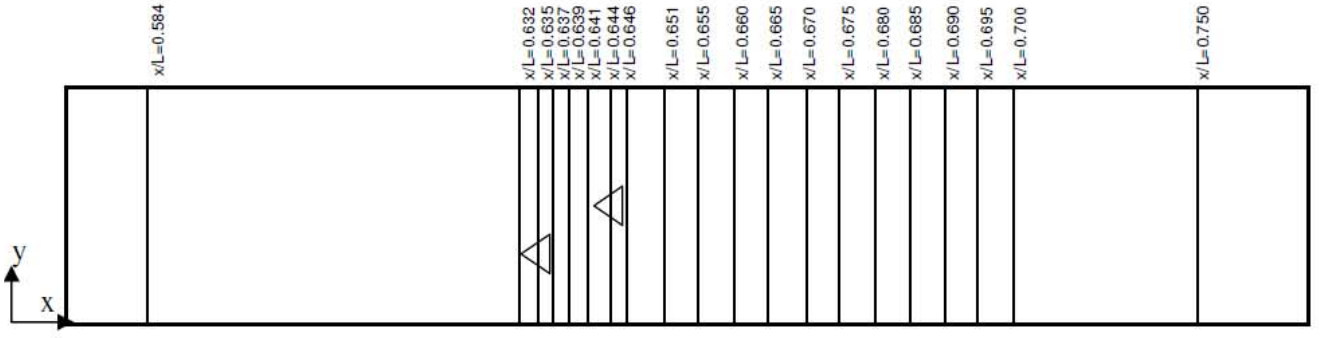
4.1. Giriş

Bu bölümde proje kapsamında PIV deneysel yöntemiyle gerçekleştirilmiş olan kanal içerisine zikzak konumda yerleştirilen üçgen küt cisimler etrafındaki akışta hız profilleri, akım çizgileri, girdap alanları ve ortalama Reynolds gerilmeleri sunulmuştur. Deneyler altı farklı Reynolds sayısı ve dört farklı üçgenler arası mesafe (W/B) için gerçekleştirilmiştir. Deneylerde ilk üçgenin konumu sabit tutulmuş ve ikinci üçgenin konumum değiştirilmiştir. Benzer şekilde üçgenler arası dikey mesafe de sabit tutulmuştur. Şekillerin yorumlanmasında kullanılacak olan x/L değerlerinin her bir W/B oranı için inceleme bölgesindeki konumları Şekil 4.1' de verilmiştir. Hem sayısal hem de deneysel çalışma sonucunda elde edilmiş olan farklı x/L ' ler için kanal kesitindeki zaman ortalama hız dağılımları $W/B=2$ için Şekil 4.2 - Şekil 4.7 arasında verilmiştir. Şekillerden de görülebileceği gibi deneysel sonuçlarla sayısal çalışmalar sonucunda elde edilmiş olan değişik x/L ' lerdeki kanal kesitindeki zaman ortalama hız dağılımları iyi bir uyum göstermiştir. Bu sonuç seçilen sayısal metodun ve ağ yapısının verdiği sonuçların doğruluğunu da göstermektedir.

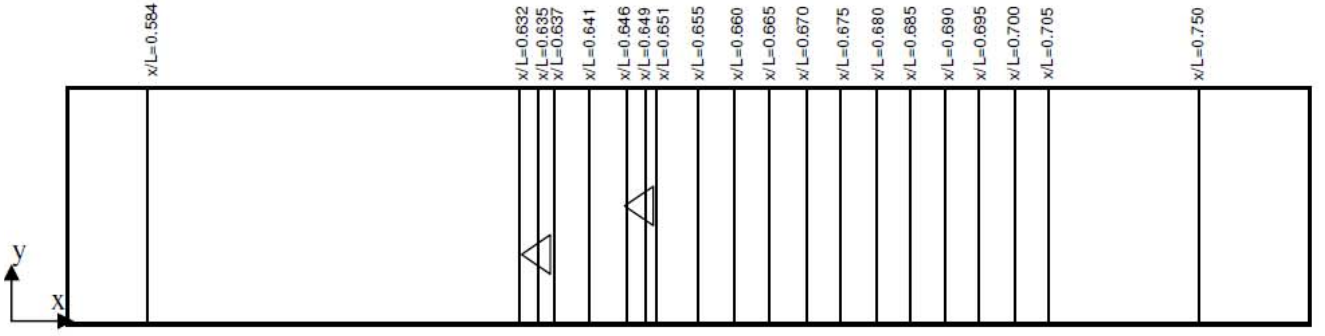
Şekil 4.2-4.7'de üçgen cisimlerin kanal içerisine zikzak olarak yerleştirilmesi durumunda, $W/B=2$ ve 6 farklı Reynolds sayısı için, 20 farklı x/L noktasında kanal kesiti boyunca zaman ortalama hız profili verilmiştir. Şekiller arasındaki değişken sadece Reynolds sayısıdır ve şekillere bakıldığında zaman ortalama hız profilleri aynı x/L ' lerde aynı karakteristiği göstermektedirler, Reynolds sayısı değiştiği için noktasal zaman ortalama hız değerleri değişmektedir. Şekil 4.2'ye bakıldığında inceleme bölgesi girişinde ($x/L=0.584$) akışın gelişmiş zaman ortalama hız profiline sahip olduğu görülmektedir. Zikzak düzenlemede de $W/B=2$ için öndeki ve arkadaki üçgenlerin kanal içerisindeki x mesafesindeki konumları ardışık düzenlemedeki $W/B=2$ ile aynı olduğundan aynı x/L mesafeleri zikzak düzenlemede de geçerlidir. Yani $x/L=0.635$ 'te akış öndeki üçgenin uç noktası ile temas etmektedir ve zaman ortalama hız değeri bu noktada ($y=0.0383$ m (öndeki üçgenin ucunun kanal alt cidarına olan uzaklığı)) sıfır değerini almaktadır. Öndeki üçgenin yaklaşık orta kısmına gelen kesitteki ($x/L= 0.635$) zaman ortalama hız profilini göstermektedir ve üçgenin bulunduğu kesitte Şekil 4.2-4.7'de görüldüğü gibi hız değerleri sıfırdır. $x/L= 0.637$ noktası öndeki üçgenin hemen arkasındaki bölgeyi göstermektedir ve üçgenin hemen arkasındaki bölgede oluşan negatif zaman ortalama hızlar bu bölgede görülmektedir. $x/L= 0.639$ ise iki üçgenin ortasındaki bir

noktayı göstermektedir ve öndeki üçgenin iz bölgesinin etkisi bu kesitte görülmektedir. Zaman ortalama hız değerleri üçgenin hemen arka noktasında negatif değerler alırken, üçgenin alt ve üst kısmında oluşan jet akımdan dolayı zaman ortalama hız değerleri aniden artmaktadır. $x/L = 0.641$ noktası ise arkadaki üçgenin uç noktasına yakın bir noktayı göstermektedir. $y=0.075$ m de yani arkadaki üçgenin uç kısmında zaman ortalama hız değerleri sıfır olmakta ve iki üçgen arasındaki mesafede ($y=0.0383-0.075$ m) jet akışından dolayı zaman ortalama hız değeri kesit boyunca hızla artmaktadır. $x/L = 0.644$ noktası arkadaki üçgenin orta noktasıdır dolayısıyla üçgenin bulunduğu bölgede zaman ortalama hız değerleri sıfırdır. $x/L = 0.646$ ise arkadaki üçgenin hemen arkasında iz bölgesinde bulunmaktadır ve üçgenin iz bölgesinde ters akıştan dolayı negatif hızlar görülmüştür. Daha büyük x/L değerleri ise her iki üçgenin de arka kısmında kalmakta ve akış gittikçe gelişerek $x/L = 0.75$ noktasında tam gelişmiş akış halini almaktadır.

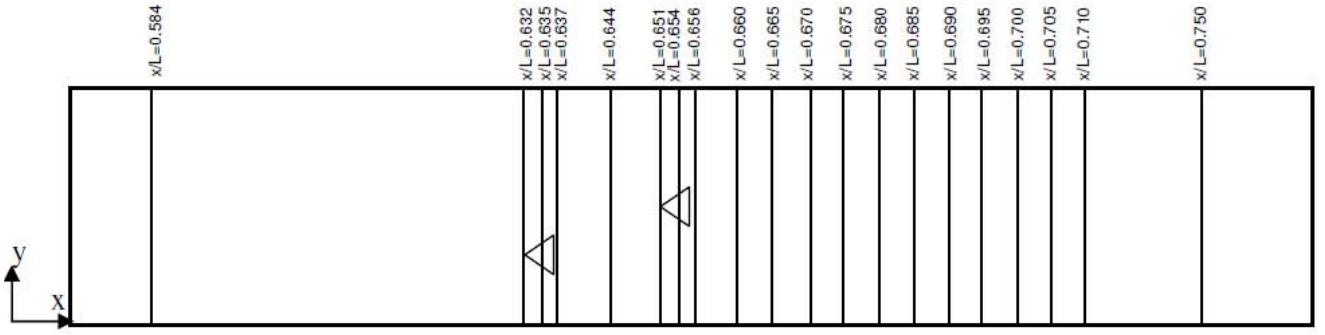
Genel olarak, şekillerden görülebileceği gibi akışkanın ilk üçgenle temas ettiği noktada zaman ortalama hız değerleri sıfır olmakta ve öndeki üçgenin hemen arkasındaki iz bölgesinde ve üçgenin tam orta ($y = 0.383$ m) zaman ortalama hız değerleri iz bölgesinin etkisiyle sıfıra yakın negatif değerler almaktadır. Öndeki üçgenle arkadaki üçgen arasında kalan bölgede, üçgenlerin iz bölgelerinde daha küçük olmakla birlikte, zaman ortalama hız değerleri pozitif değerler almaktadır. Arkadaki üçgenle akışın temas ettiği noktada yine zaman ortalama hız değerleri sıfır olmakta ve arkadaki üçgeni de geçince zaman ortalama hızlar gelişerek inceleme bölgesine girişteki zaman ortalama hız profilini yakalamaktadır ($x/L=0.75$).



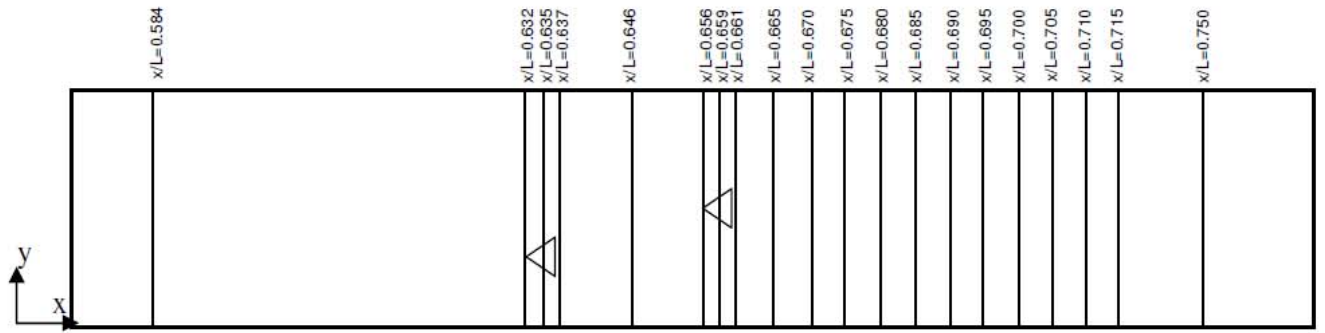
(a)



(b)

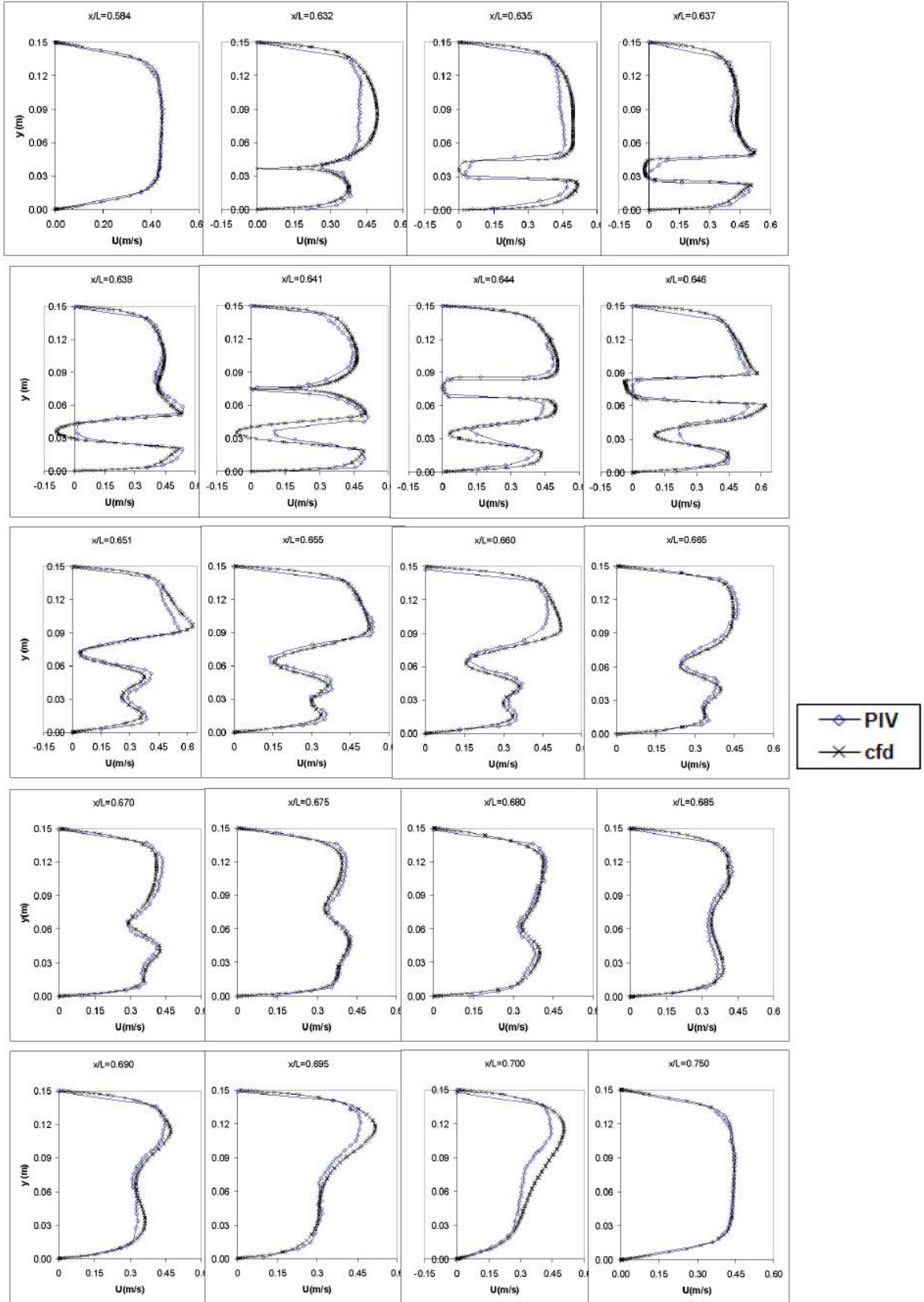


(c)

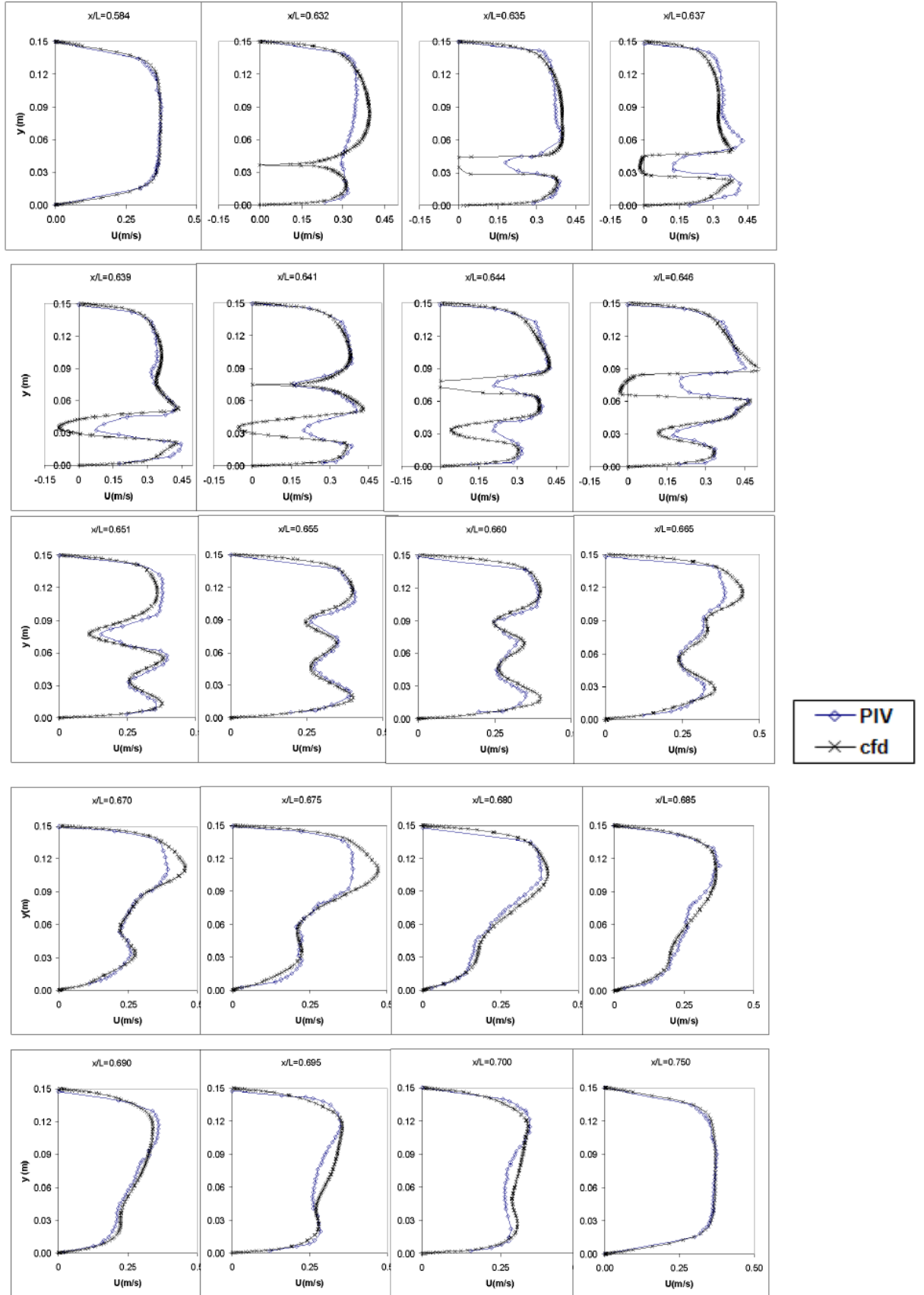


(d)

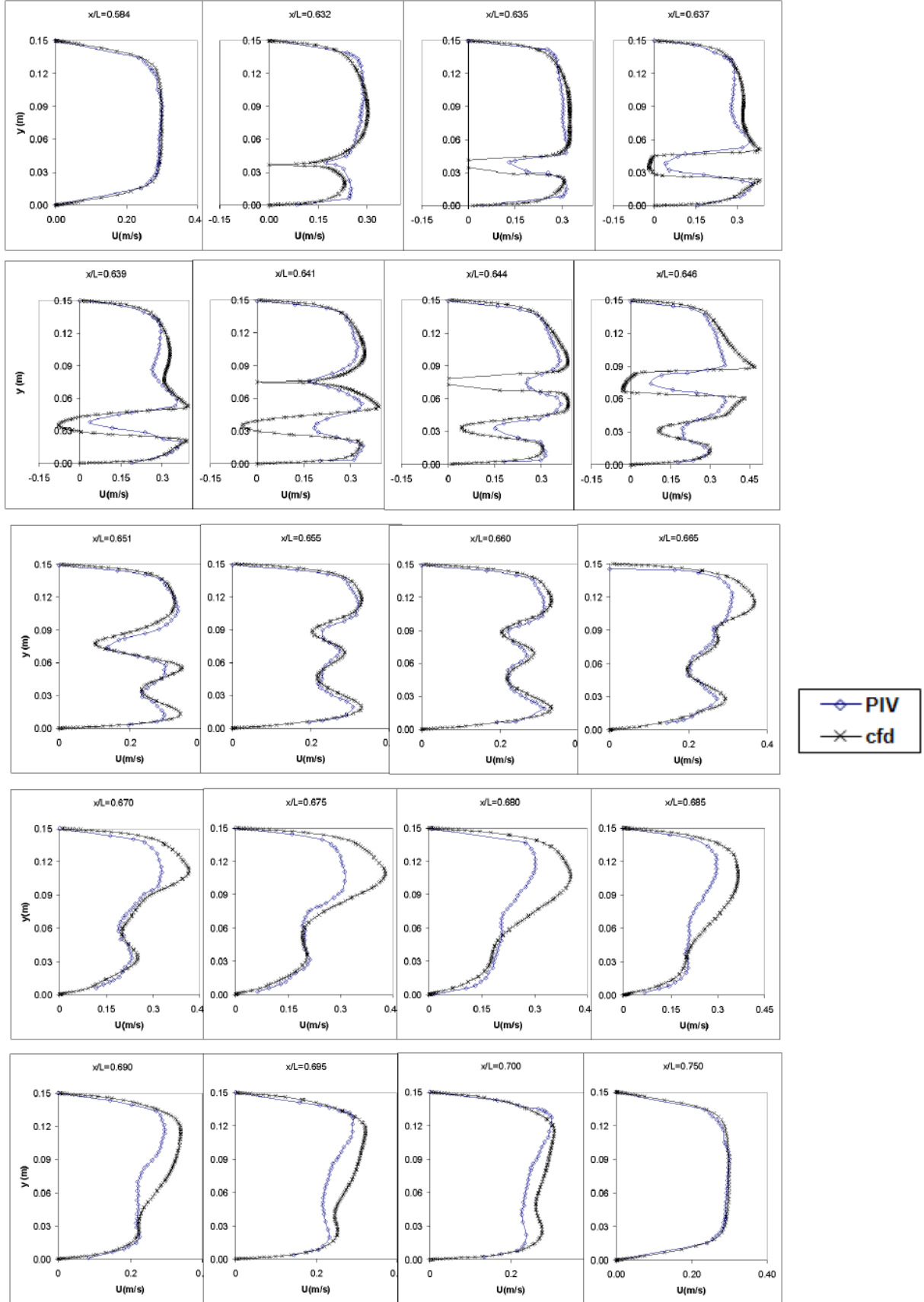
Şekil 4.1. Zikzak düzenleme için x/L değerlerinin inceleme bölgesindeki konumları
(a) $W/B=2$, (b) $W/B=3$, (c) $W/B=4$, (d) $W/B=5$.



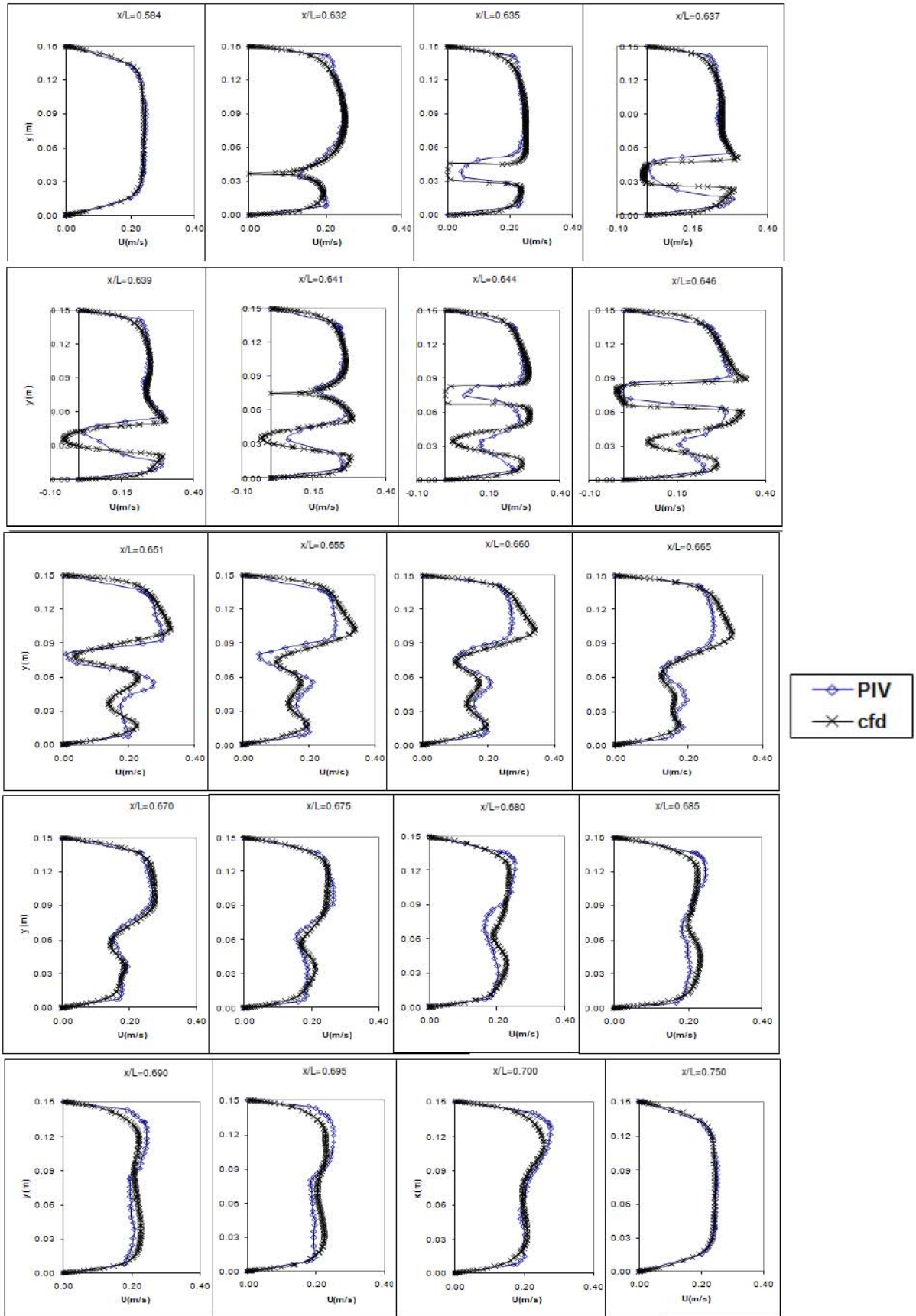
Şekil 4.2. Zızzak düzenlemede $Re=48000$ için, farklı x/L mesatelerine ait zaman ortalama hız profilleri ($W/B=2$).



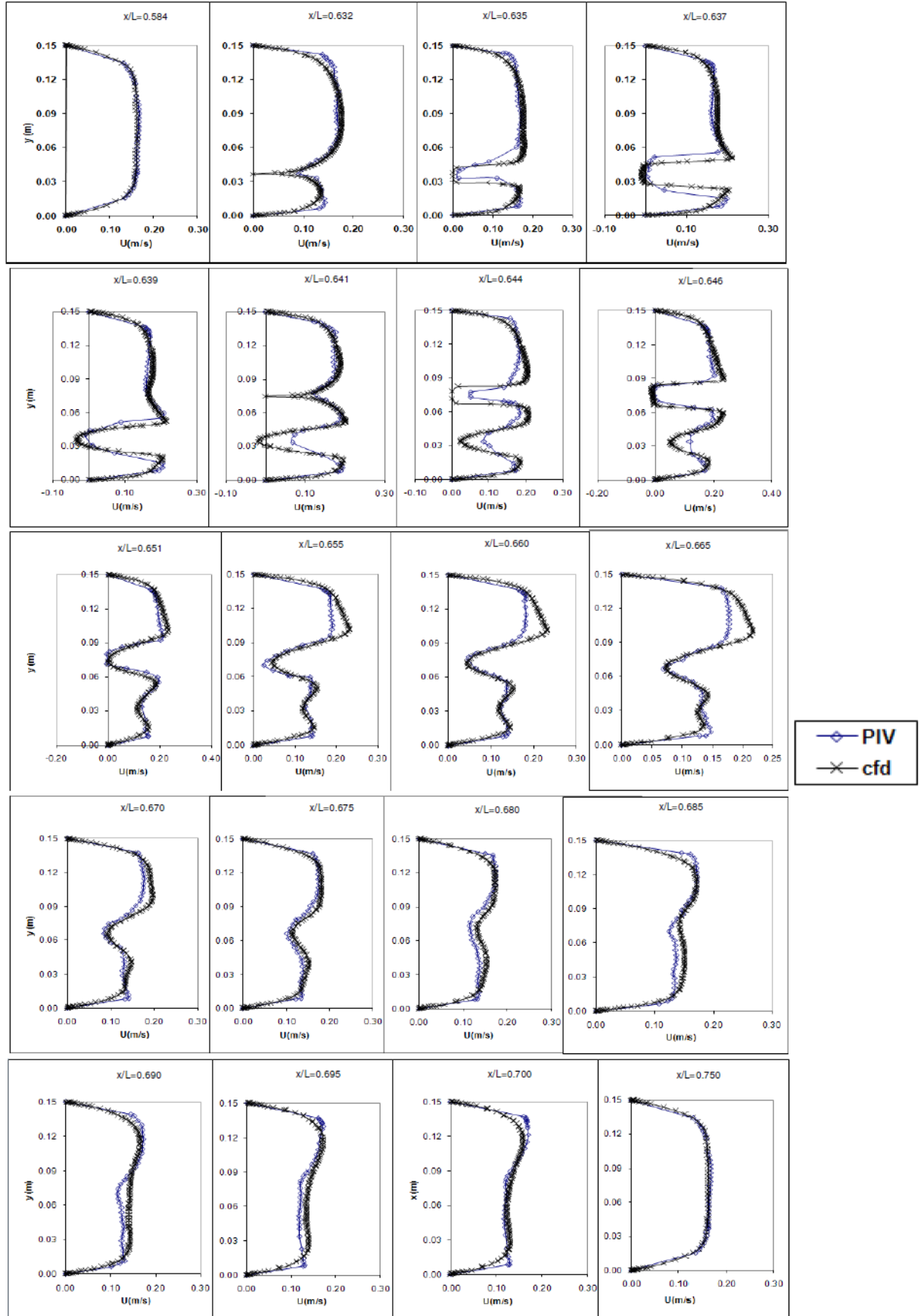
Şekil 4.3. Zıkkak düzenlemede $Re=40000$ için, farklı x/L mesafelerine ait zaman ortalama hız profilleri ($W/B=2$).



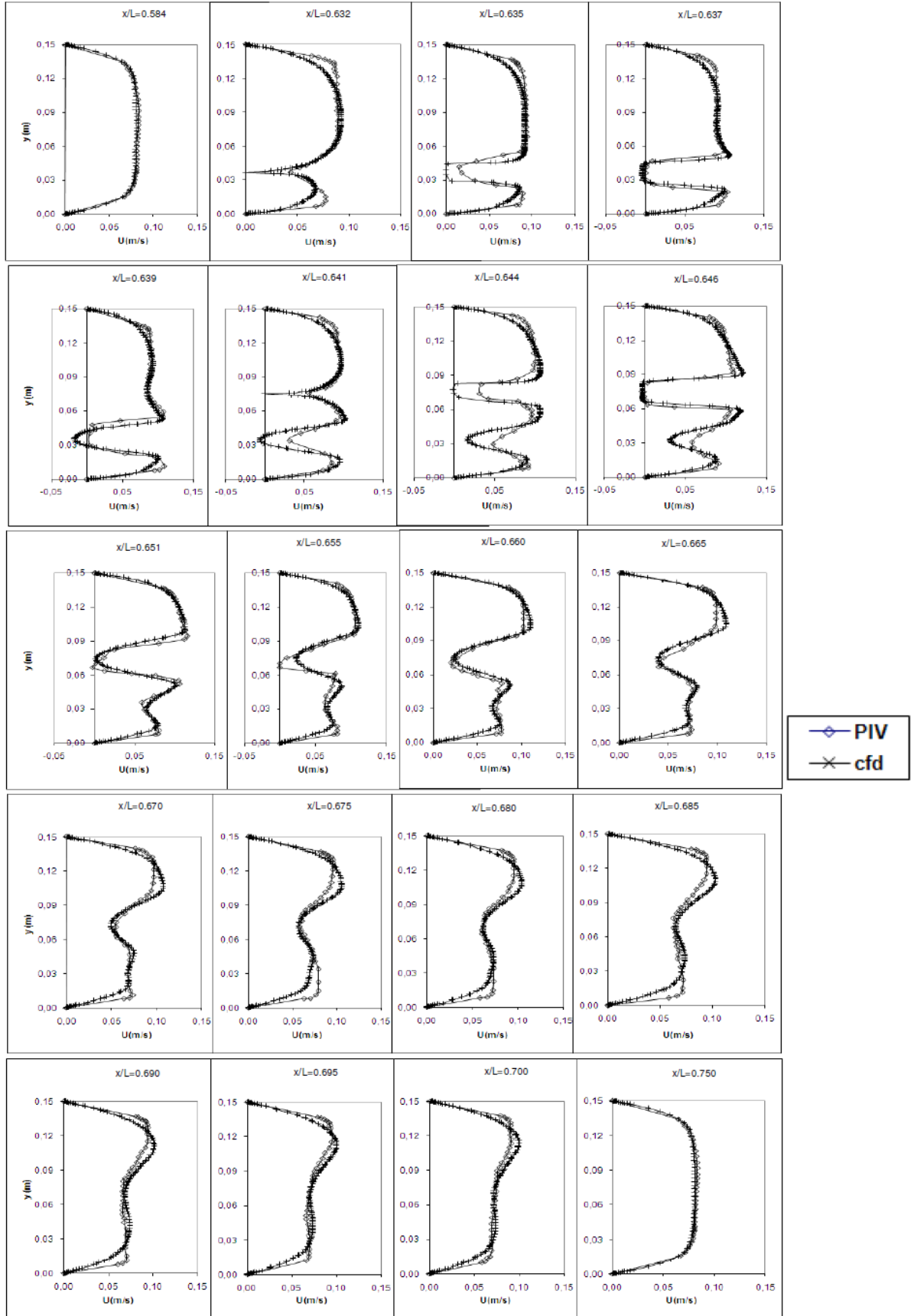
Şekil 4.4. Zikzak düzenlemede $Re=32000$ için, farklı x/L mesafelerine ait zaman ortalama hız profilleri ($W/B=2$).



Şekil 4.5. Zıkkaz düzenlemede $Re=24000$ için, farklı x/L mesafelerine ait zaman ortalama hız profilleri ($W/B=2$).



Şekil 4.6. Zızzak düzenlemede $Re=16000$ için, farklı x/L mesafelerine ait zaman ortalama hız profilleri ($W/B=2$).

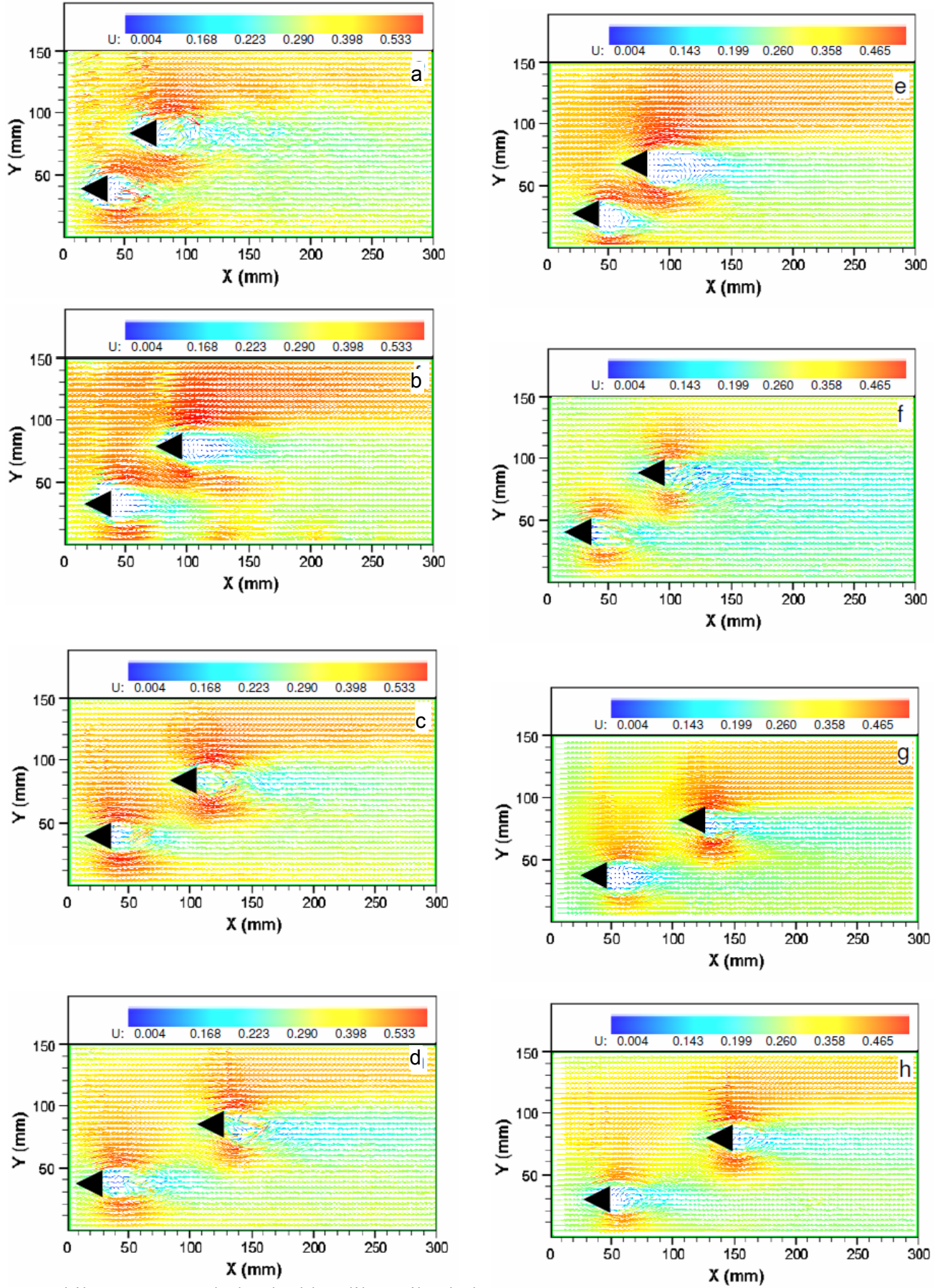


Şekil 4.7. Zikzak düzenlemede $Re=8000$ için, farklı x/L mesafelerine ait zaman ortalama hız profilleri ($W/B=2$).

4.2. Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi

Şekil 4.8-Şekil 4.10’da deneysel olarak elde edilmiş zaman ortalama hız vektörleri 6 farklı Reynolds sayısı ve araştırılan her bir W/B oranı için verilmiştir. Zikzak düzenlemede ise üçgenler akış yönünde aksel olarak farklı konumlarda bulunduklarından ve iki üçgen arasından gerçekleşen akışın da etkisiyle, iz bölgeleri üçgenin hemen arka kısmında birbirinden bağımsız olarak gerçekleşmiş kanal boyunca akış ilerledikçe ve geliştikçe birbirlerinden etkilenmiştir. Genellikle W/B oranı arttıkça etkileşmenin başladığı bölgenin üçgene olan uzaklığı da artmıştır.

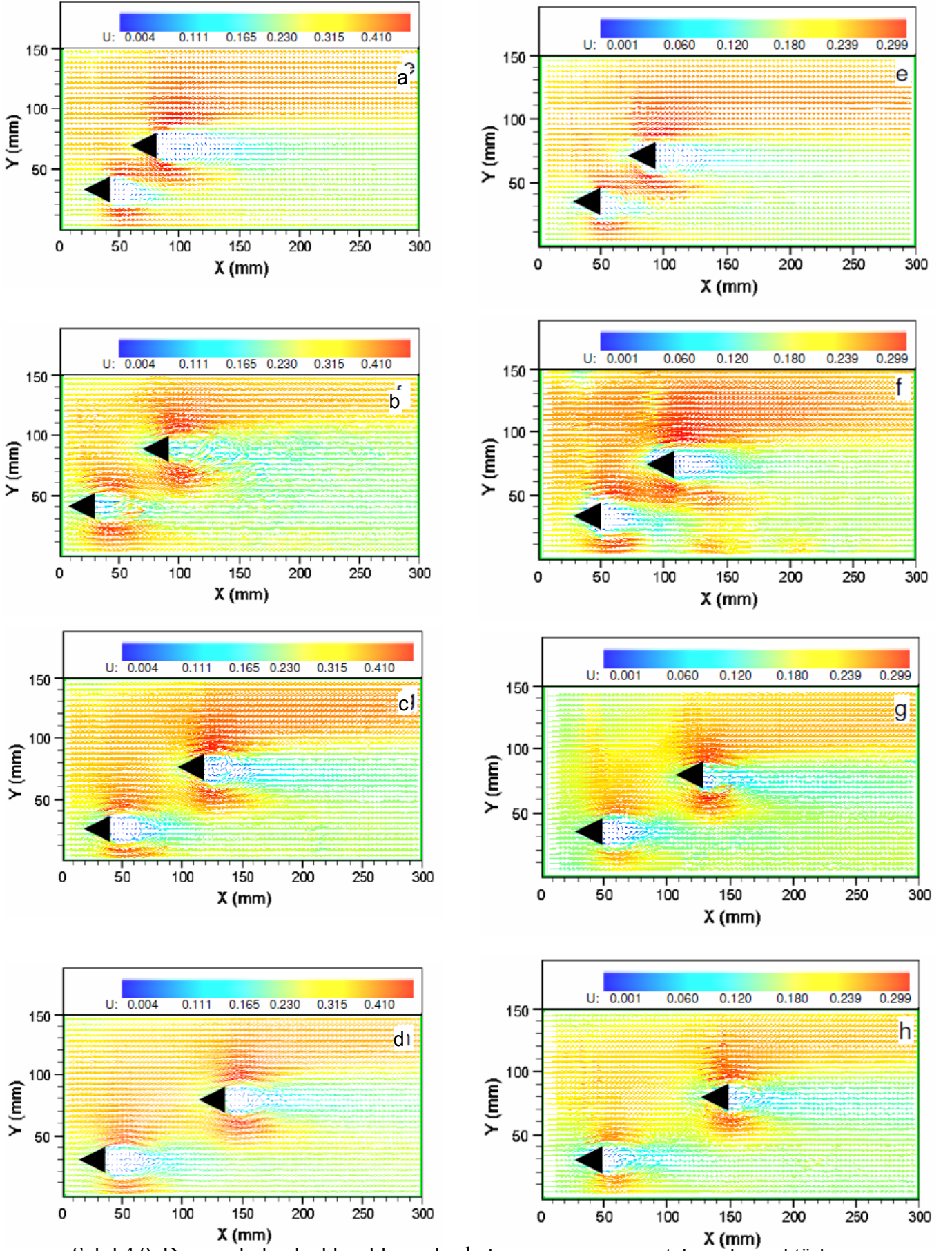
Şekil 4.11-Şekil 4.13’de farklı W/B ve Reynolds sayıları için deneysel olarak elde edilen zaman ortalama girdap alanları verilmiştir. Zikzak düzenlemede alttaki üçgen akış yönünde eksenden kaçık ve alt duvara yakın olarak yerleştirildiğinden alttaki üçgenin alt ucundaki akış duvardan etkilenmekte ve üstteki üçgenin alt ucundaki akış ise iki üçgen arasında gerçekleşen akış dolayısıyla etkilenmekte ve her iki üçgenin her iki ucunda da simetrik bir girdap yapısı görülmemektedir. Küçük Reynolds sayılarında (8000, 16000 ve 24000) her iki uçtaki girdap yapıları daha yüksek Reynolds sayılarına göre simetrik yapıya daha yakındır. Zikzak düzenlemede W/B=5 durumunda iki üçgen arasındaki x yönündeki mesafe diğer durumlara göre daha fazla olduğundan Reynolds sayısı 48000 için arkadaki üçgenin her iki ucunda da simetrik bir girdap yapısı görülmektedir.



Şekil 4.8. Deneysel olarak elde edilen, zikzak durum için zaman ortalama hız vektörleri.

a) $W/B=2$ b) $W/B=3$ c) $W/B=4$ d) $W/B=5$ ($Re=48000$)

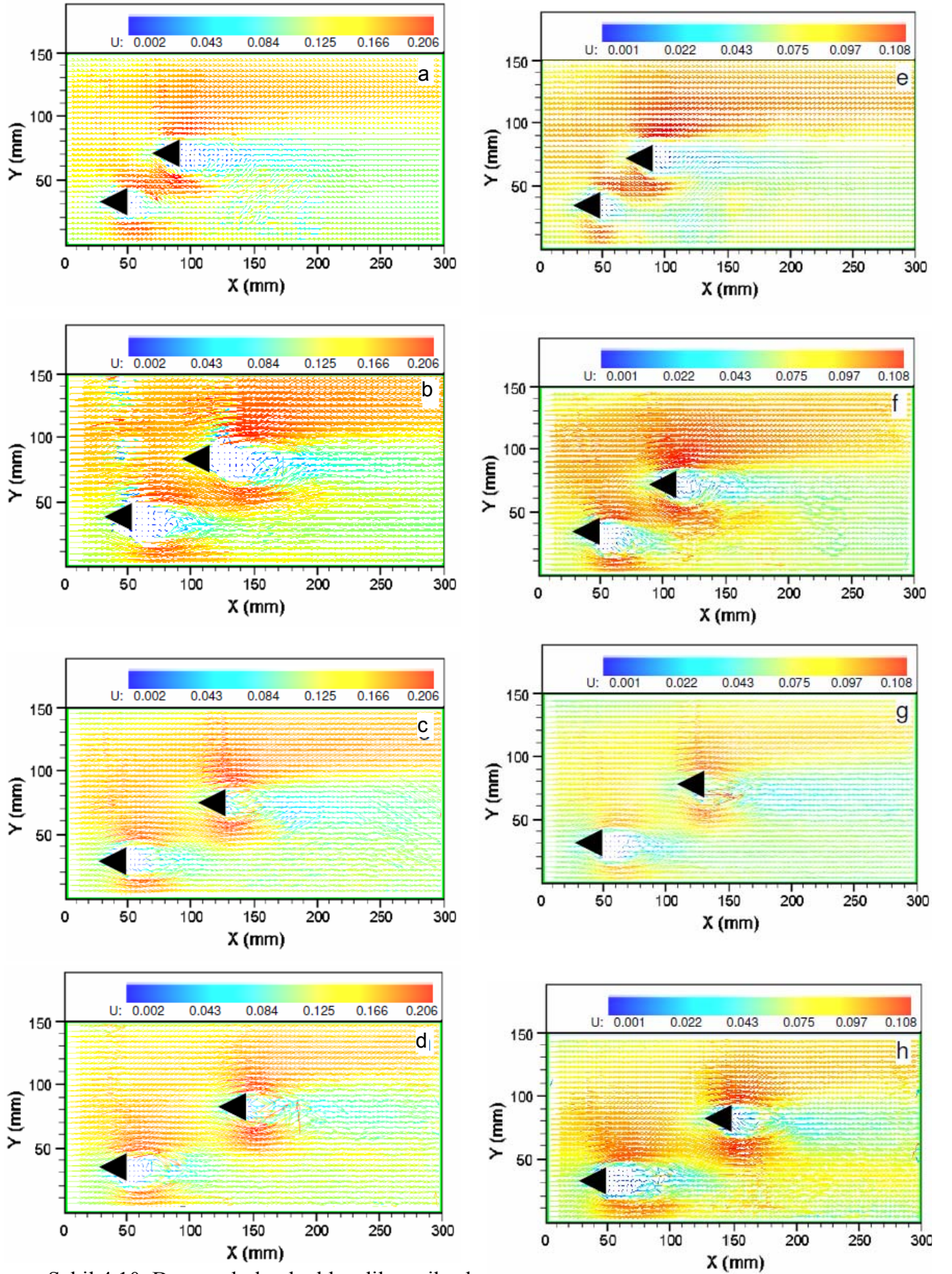
e) $W/B=2$ f) $W/B=3$ g) $W/B=4$ h) $W/B=5$ ($Re=40000$)



Şekil 4.9. Deneysel olarak elde edilen, zızzak durum için zaman ortalama hız vektörleri.

a) $W/B=2$ b) $W/B=3$ c) $W/B=4$ d) $W/B=5$ ($Re=32000$)

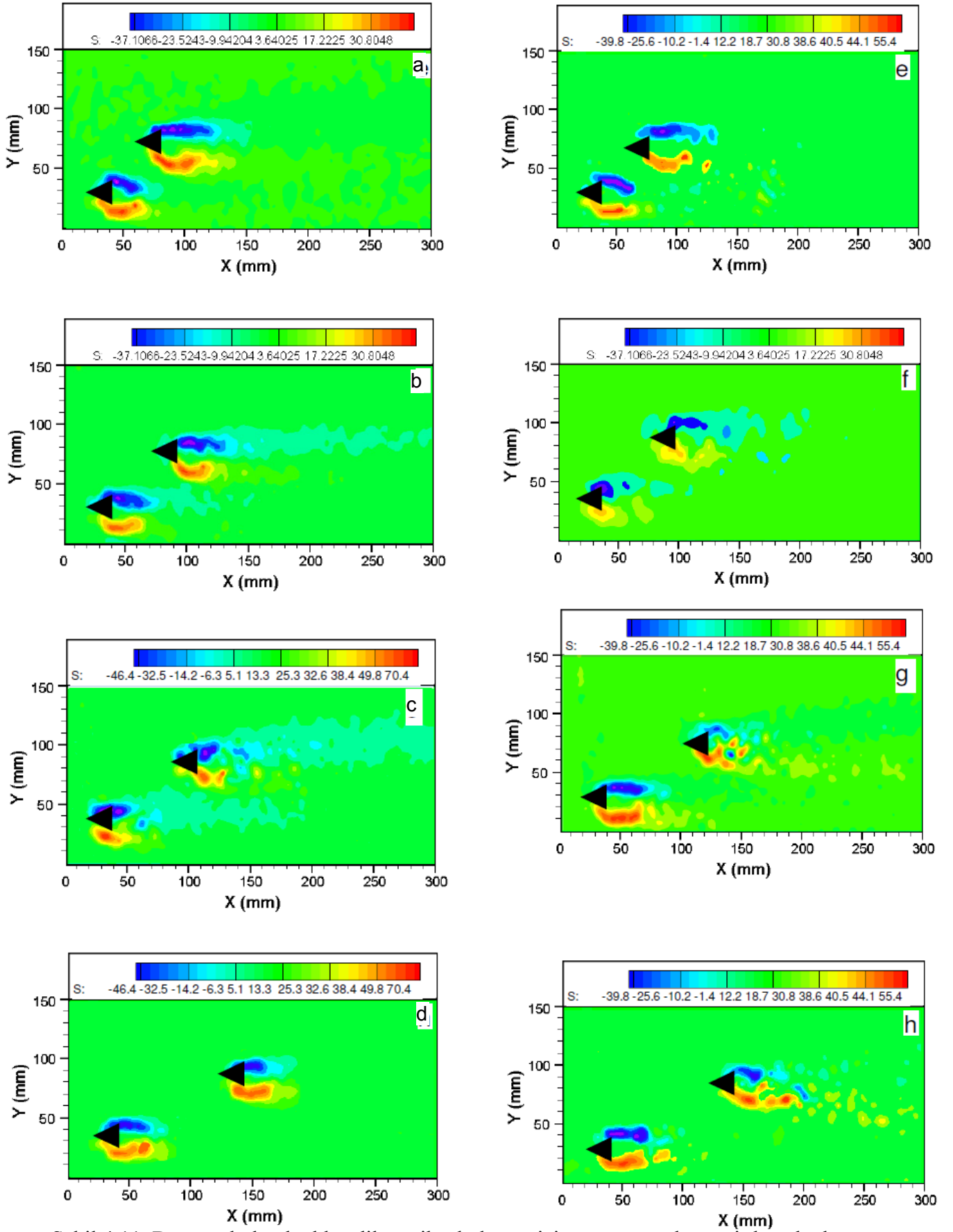
e) $W/B=2$ f) $W/B=3$ g) $W/B=4$ h) $W/B=5$ ($Re=24000$)



Şekil 4.10. Deneysel olarak elde edilen, zikzak durum için zaman ortalama hız vektörleri.

a) $W/B=2$ b) $W/B=3$ c) $W/B=4$ d) $W/B=5$ ($Re=16000$)

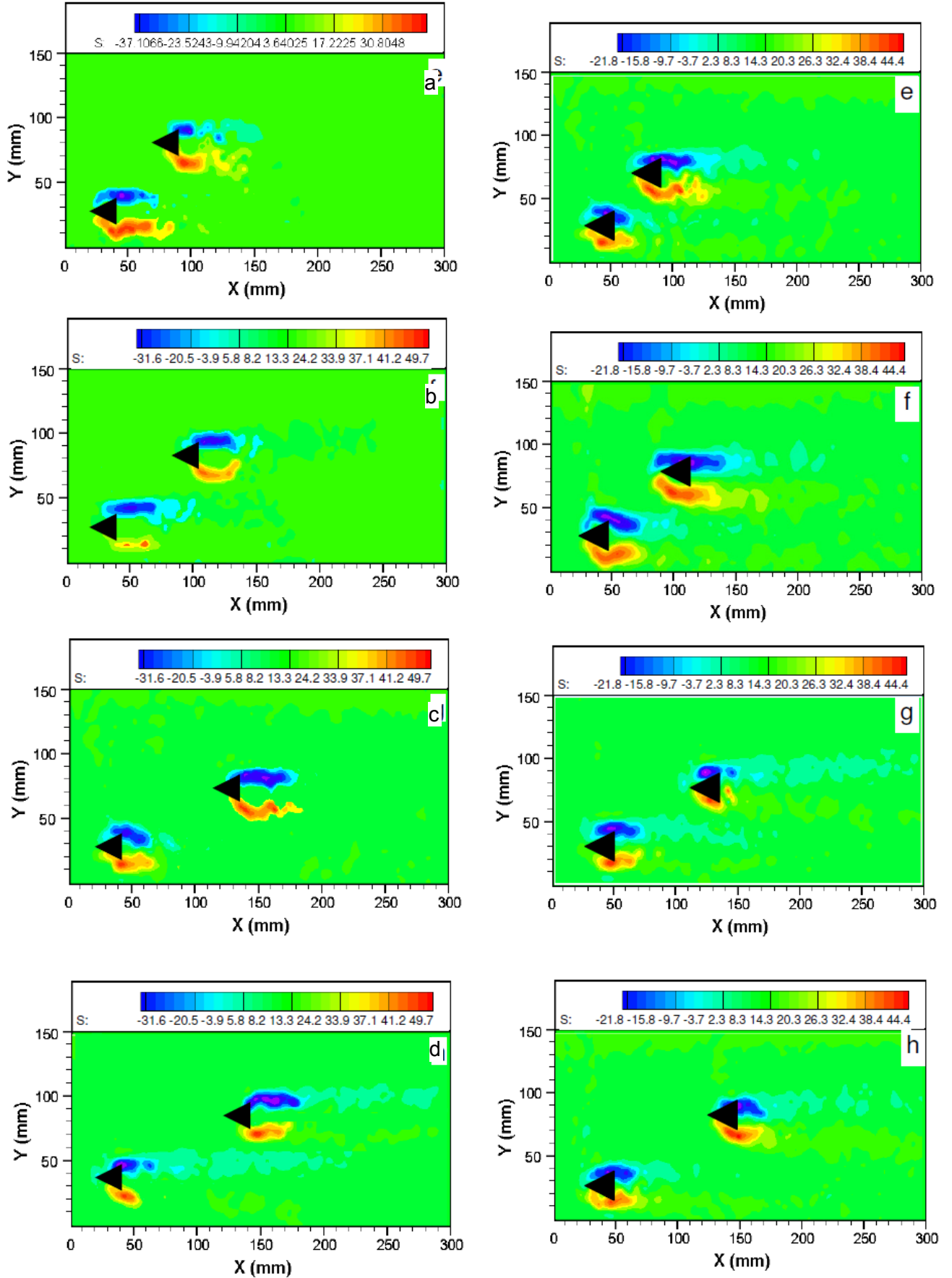
e) $W/B=2$ f) $W/B=3$ g) $W/B=4$ h) $W/B=5$ ($Re=8000$)



Şekil 4.11. Deneyssel olarak elde edilen, zikzak durum için zaman ortalama girdap alanları.

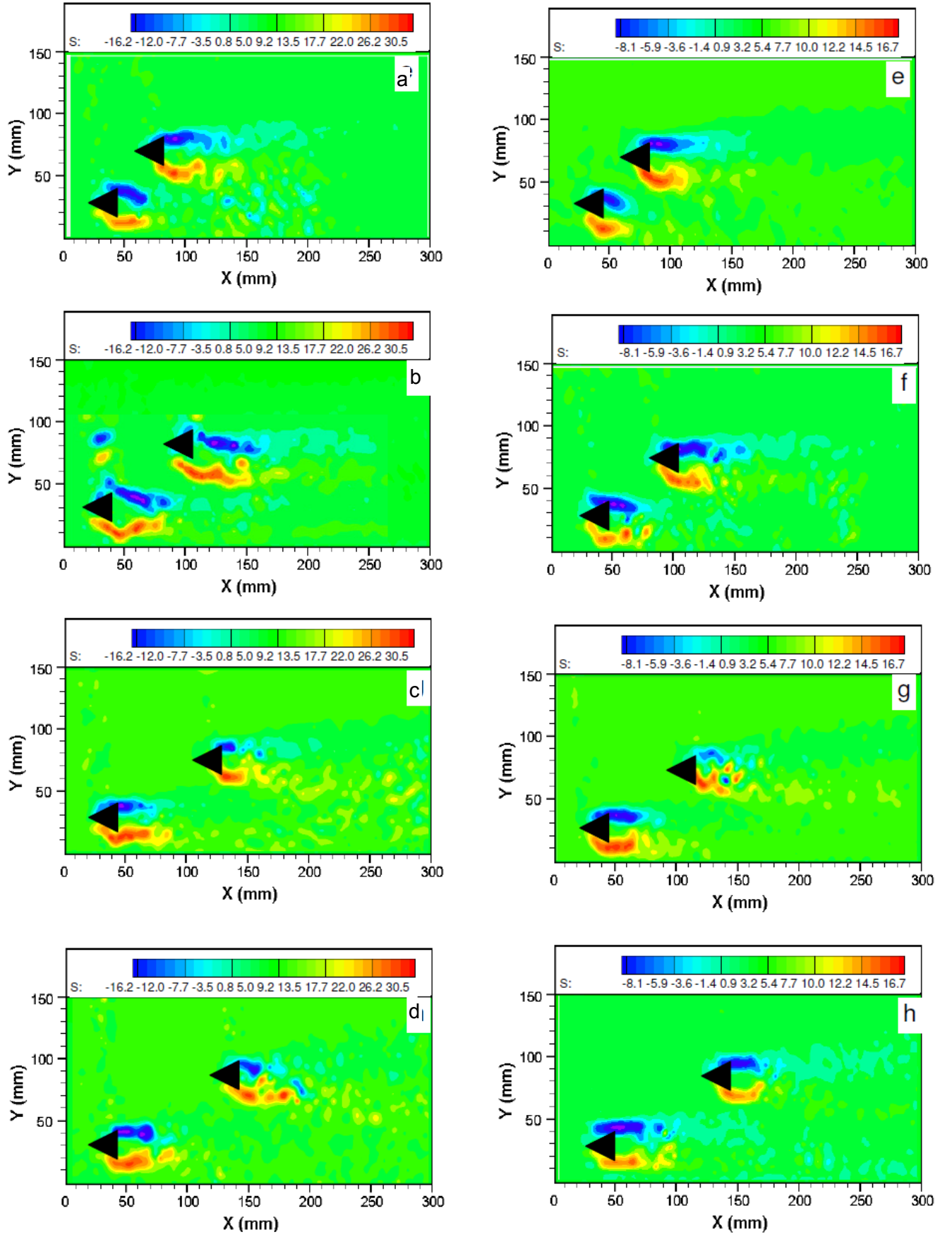
a) $W/B=2$ b) $W/B=3$ c) $W/B=4$ d) $W/B=5$ ($Re=48000$)

e) $W/B=2$ f) $W/B=3$ g) $W/B=4$ h) $W/B=5$ ($Re=40000$)



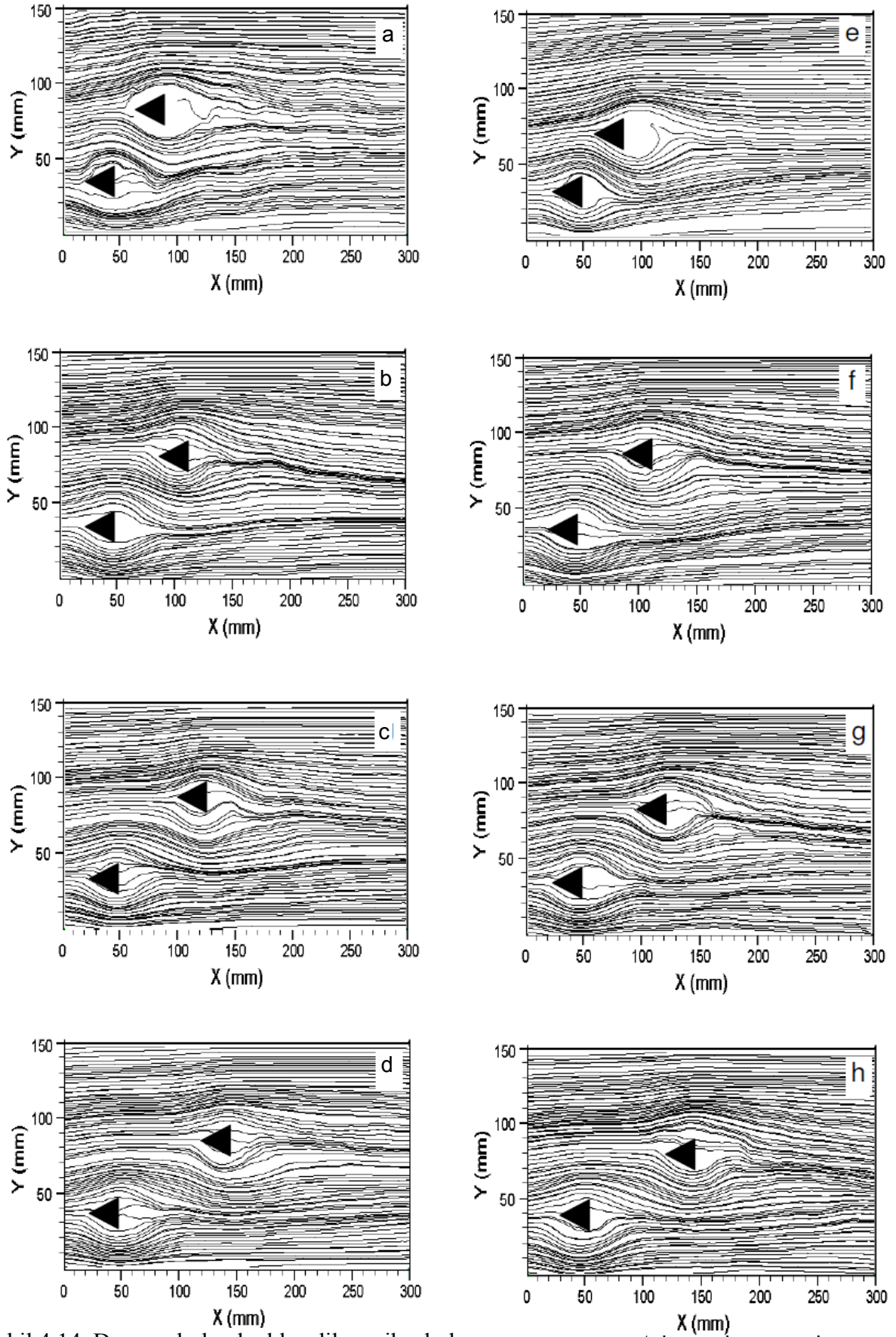
Şekil 4.12. Deneyisel olarak elde edilen, zikzak durum için zaman ortalama girdap alanları.

a) $W/B=2$ b) $W/B=3$ c) $W/B=4$ d) $W/B=5$ ($Re=32000$)
 e) $W/B=2$ f) $W/B=3$ g) $W/B=4$ h) $W/B=5$ ($Re=24000$)



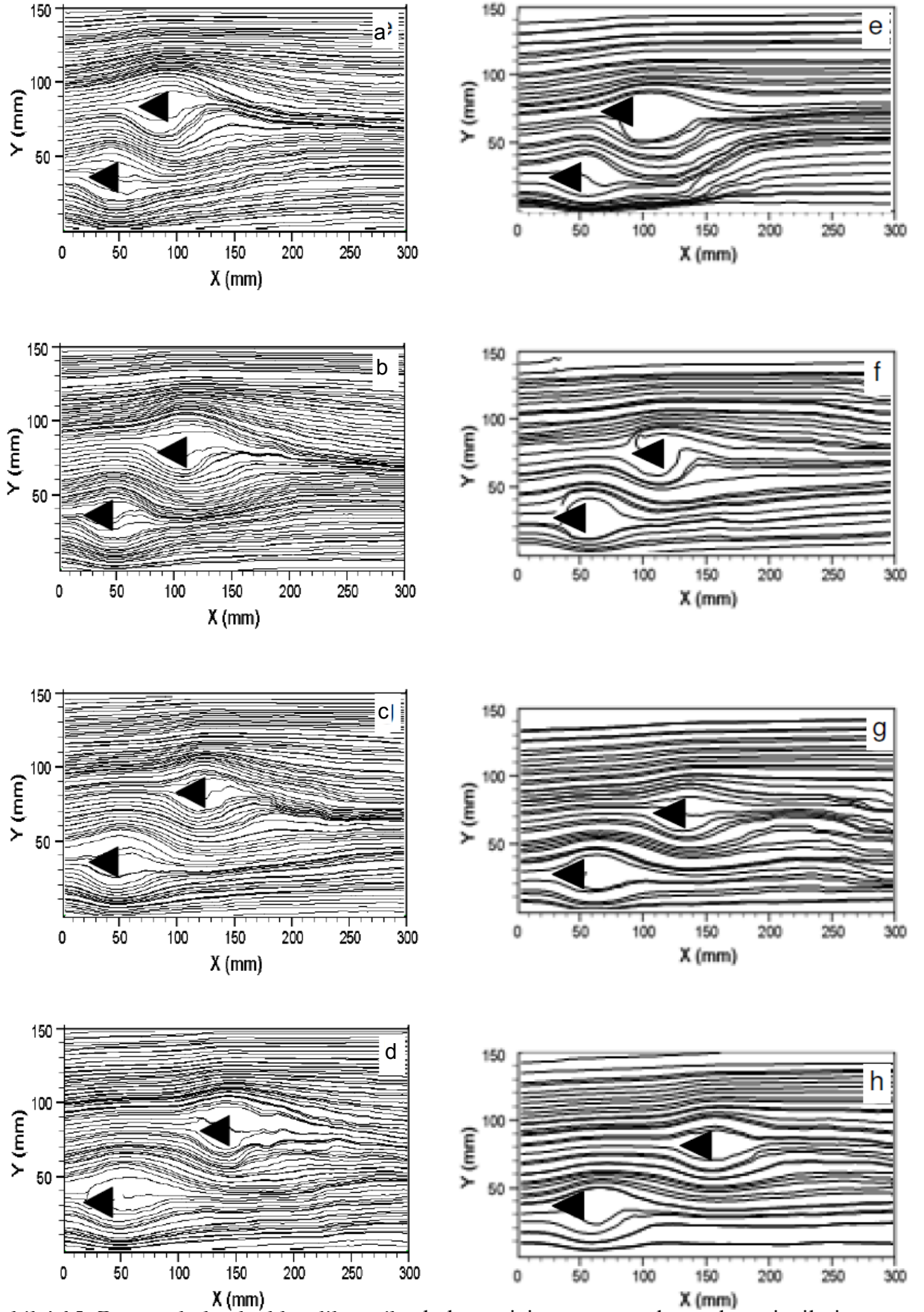
Şekil 4.13. Deneyisel olarak elde edilen, zikzak durum için zaman ortalama girdap alanları.

a) $W/B=2$ b) $W/B=3$ c) $W/B=4$ d) $W/B=5$ ($Re=16000$)
 e) $W/B=2$ f) $W/B=3$ g) $W/B=4$ h) $W/B=5$ ($Re=8000$)



Şekil 4.14. Deneysel olarak elde edilen, zikzak durum için zaman ortalama akım çizgileri.

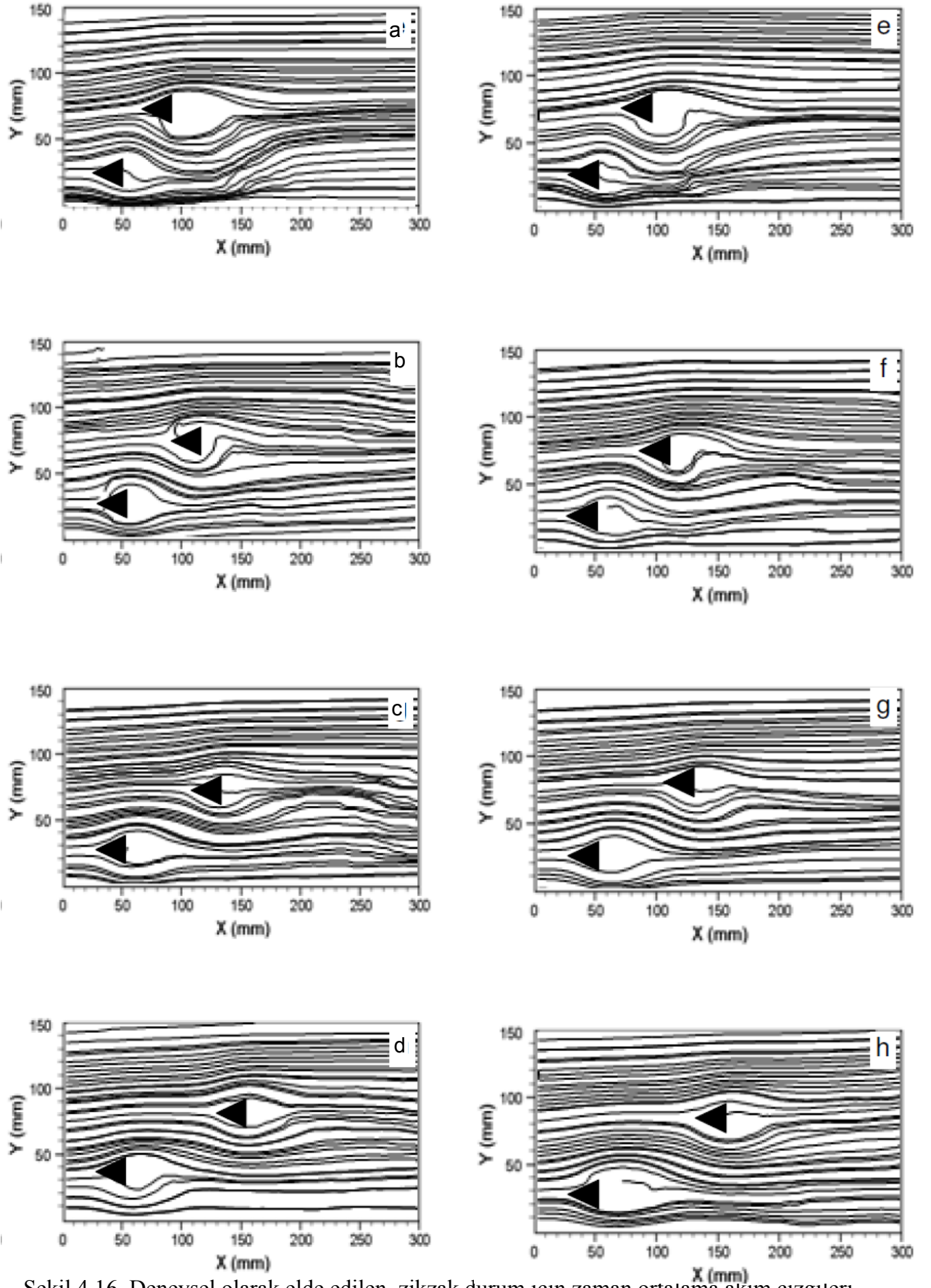
a) $W/B=2$ b) $W/B=3$ c) $W/B=4$ d) $W/B=5$ ($Re=48000$)
 e) $W/B=2$ f) $W/B=3$ g) $W/B=4$ h) $W/B=5$ ($Re=40000$)



Şekil 4.15. Deneysel olarak elde edilen, zızzak durum için zaman ortalama akım çizgileri.

a) $W/B=2$ b) $W/B=3$ c) $W/B=4$ d) $W/B=5$ ($Re=32000$)

e) $W/B=2$ f) $W/B=3$ g) $W/B=4$ h) $W/B=5$ ($Re=24000$)



Şekil 4.16. Deneysel olarak elde edilen, zikzak durum için zaman ortalama akım çizgileri.

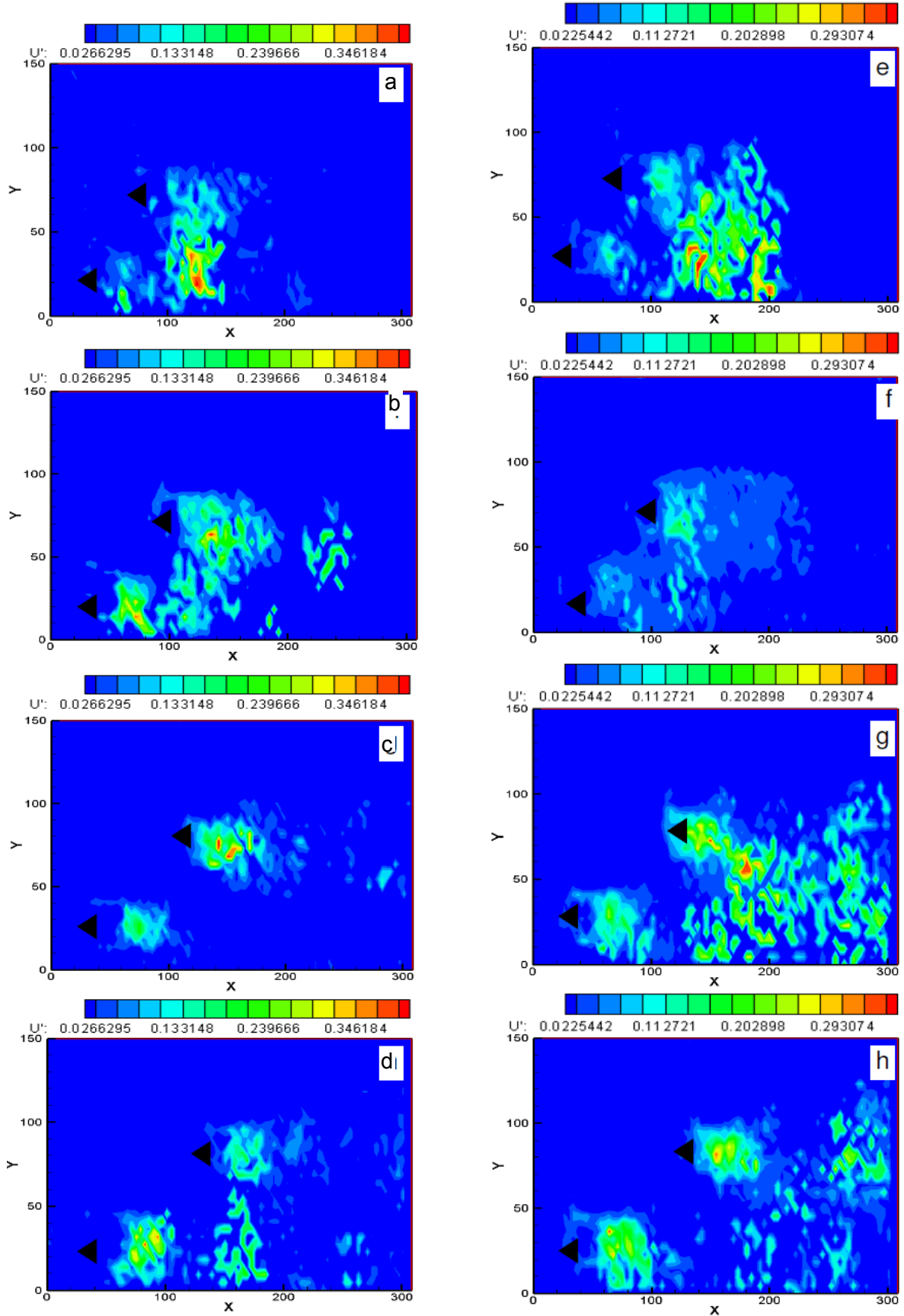
a) $W/B=2$ b) $W/B=3$ c) $W/B=4$ d) $W/B=5$ ($Re=16000$)

e) $W/B=2$ f) $W/B=3$ g) $W/B=4$ h) $W/B=5$ ($Re=8000$)

Şekil 4.14-4.16'da farklı W/B oranları ve Reynolds sayıları için deneysel olarak elde edilen zaman ortalama akım çizgileri verilmiştir. Zikzak yerleşim düzenlemede ise üçgenlerin konumları akış doğrultusunda farklı olduğu için her iki üçgen de serbest akışa maruz kalmakta bununla birlikte arkadaki üçgen alt ucu öndeki üçgenin üst ucundan ayrılan akıştan etkilenmektedir. Dolayısıyla iki üçgenin iz bölgesi uzunluklarında bariz olmamakla birlikte fark vardır ($Re=16000$ $W/B=5$). Reynolds sayısı azaldıkça özellikle yüksek W/B oranlarında örneğin $W/B=5$ için iz bölgesi uzunlukları artmıştır. Zikzak düzenleme için iki üçgen arasından gerçekleşen akış ise akım çizgilerinden görülmektedir.

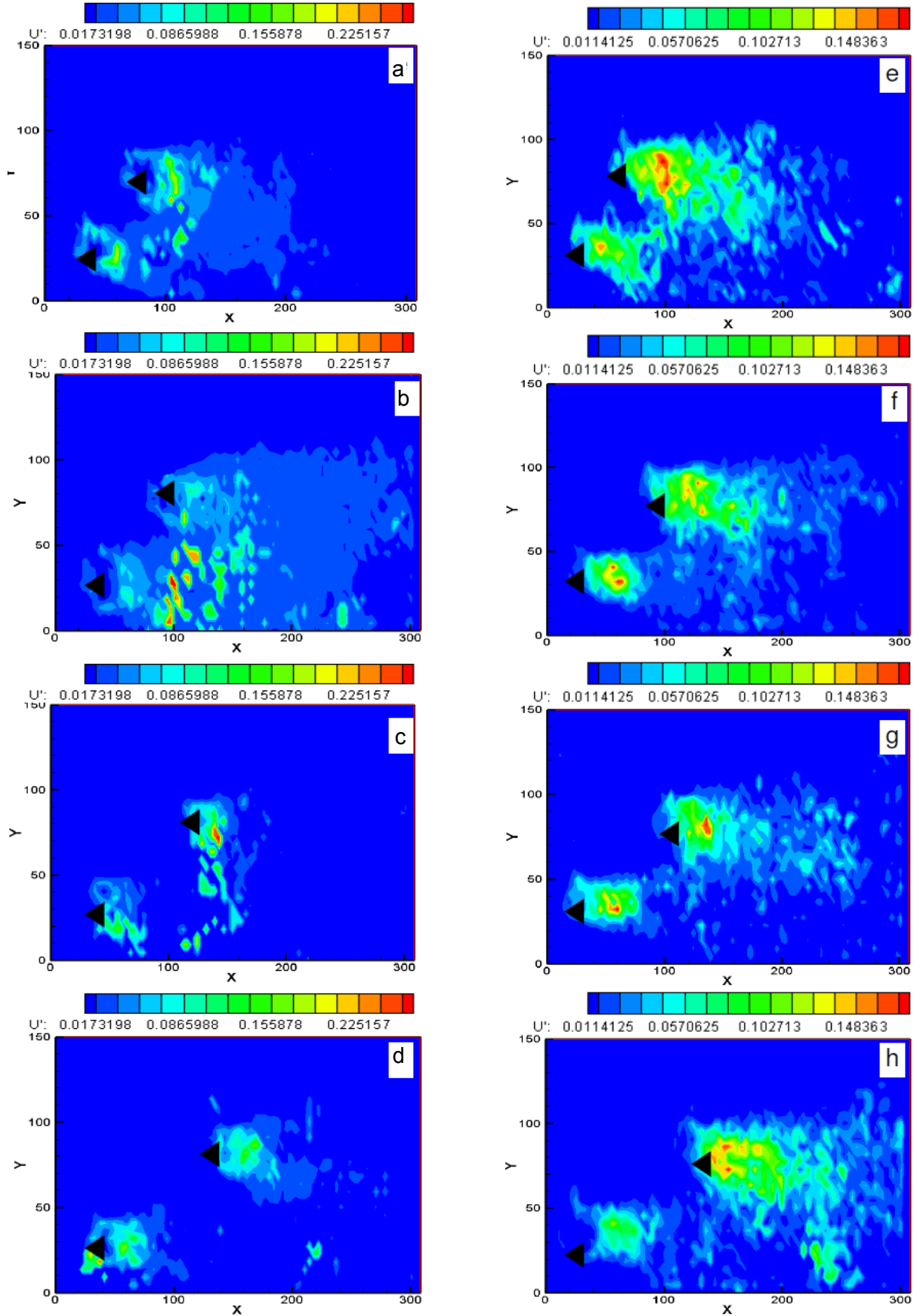
Şekil 4.17-4.19'da deneysel olarak elde edilen x yönündeki zaman ortalama hız çalkantı (u') kontürleri farklı W/B oranları ve Reynolds sayıları için gösterilmiştir. Şekil 4.20-4.22'de ise deneysel olarak elde edilen y yönündeki zaman ortalama hız çalkantı (v') kontürleri farklı W/B oranları ve Reynolds sayıları için verilmiştir. Zikzak düzenlemede ise üçgenlerin akış yönündeki konum farklılıklarından ve öndeki üçgenin üst kısmından ayrılan akışın arkadaki üçgenin alt kısmına gelen akışa etki etmesinden dolayı en yüksek zaman ortalama v' değerleri attaki üçgenin arka tarafında ve üstteki üçgen ile alttaki üçgen arasındaki bir bölgede gerçekleşmiştir. Zikzak düzenlemede üçgenlerin arkasındaki iz bölgelerinin karışımının üçgenlerin arka tarafından daha uzak bir noktada gerçekleştiği durumlarda (Şekil 5.107 g,h) her iki üçgeninde arkasında en yüksek v' değerleri görülmüştür. Zikzak düzenlemede $W/B=5$ olduğu durumda iki üçgen arası mesafe diğer durumlara göre daha büyük olduğundan iki üçgen arkasında akış birleşmesi ayrı ayrı gerçekleşmiş ve en büyük zaman ortalama v' derleri buralarda gerçekleşmiştir.

Şekil 4.23-4.25'de ise deneysel olarak elde edilen zaman ortalama Reynolds gerilme kontürleri farklı W/B oranları ve Reynolds sayıları için verilmiştir. Zikzak düzenleme için $W/B=5$ durumunda iki üçgenin iz bölgesi ayrı ayrı olduğundan iki üçgenin de arka tarafında iz bölgesi bitişinde en yüksek zaman ortalama Reynolds gerilmeleri değerleri elde edilmiştir. Zikzak düzenlemede $W/B=2$ durumu için en yüksek zaman ortalama Reynolds gerilmesi iki üçgenin iz bölgelerinin birleştiği yerde gerçekleşmiştir üçgenlerin iz bölgelerinin kesiştiği noktada (akışın yöneldiği yerdeki üçgenin arkasında) gerçekleşmiştir.



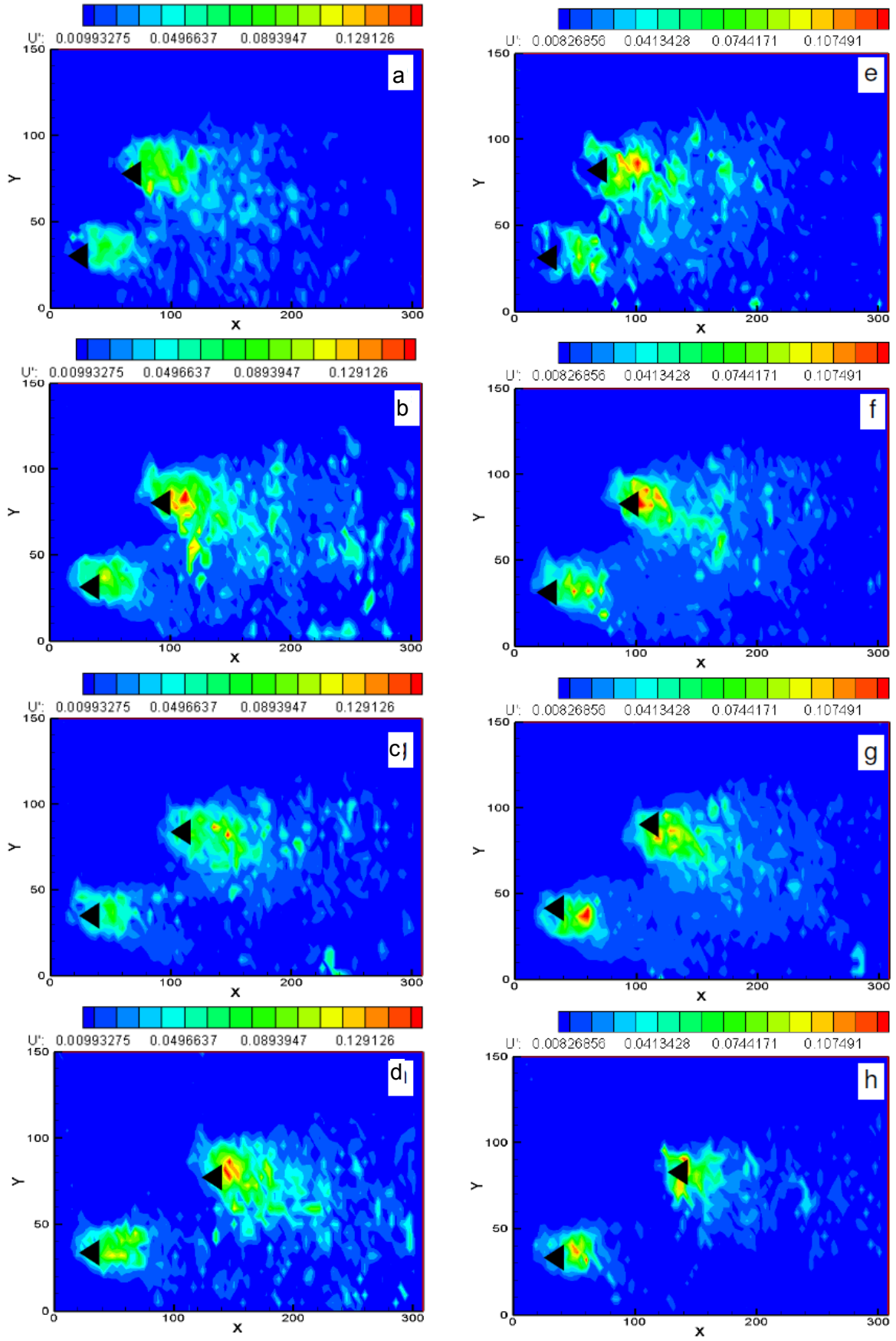
Şekil 4.17. Deneysel olarak elde edilen, zikzak durum için x yönündeki zaman ortalama hız çalkantı (u') kontürleri.

a) $W/B=2$ b) $W/B=3$ c) $W/B=4$ d) $W/B=5$ ($Re=48000$)
 e) $W/B=2$ f) $W/B=3$ g) $W/B=4$ h) $W/B=5$ ($Re=40000$)



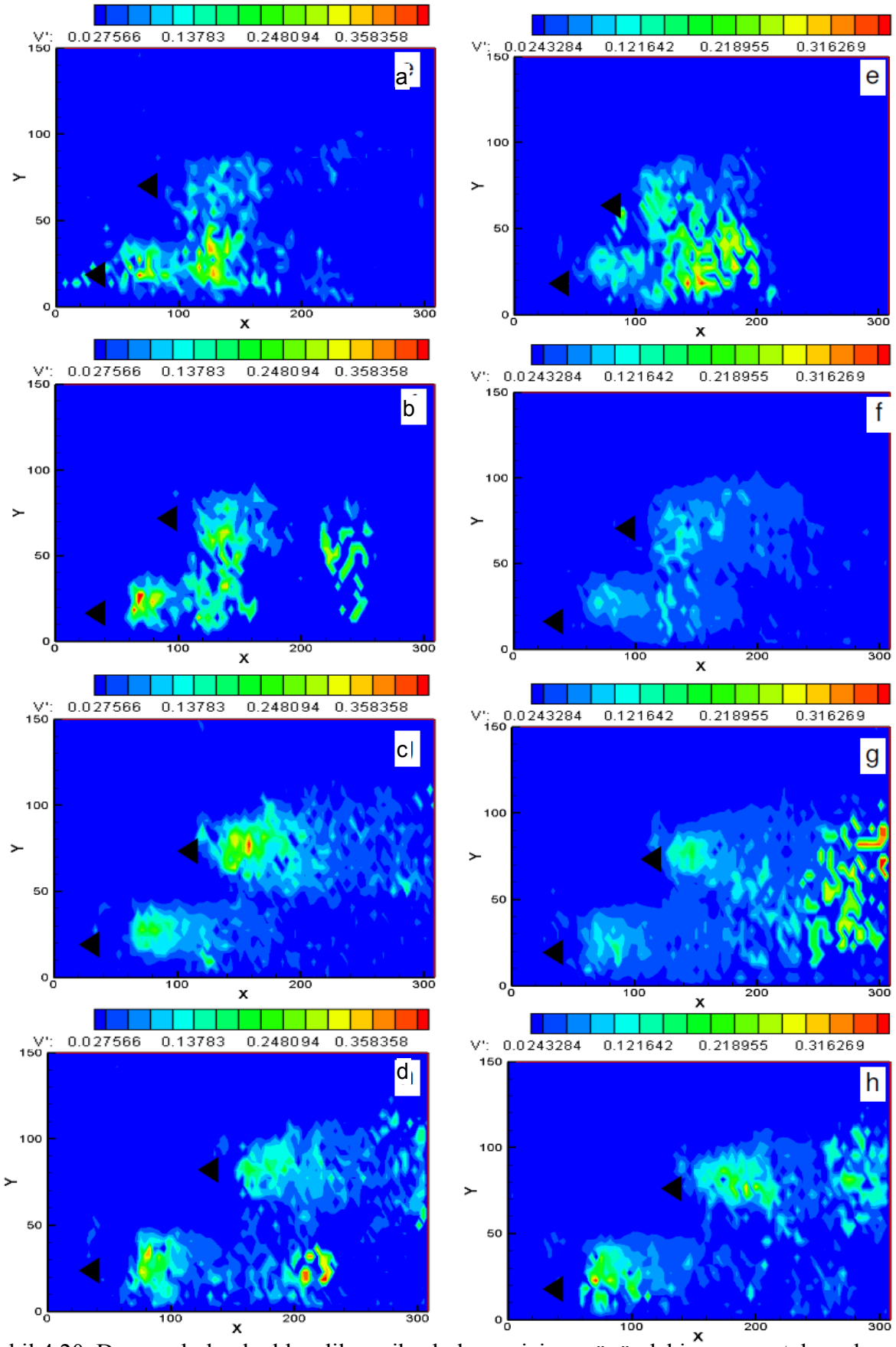
Şekil 4.18. Deneysel olarak elde edilen, zikzak durum için x yönündeki zaman ortalama hız çalkantı (u') kontürleri.

a) $W/B=2$ b) $W/B=3$ c) $W/B=4$ d) $W/B=5$ ($Re=32000$)
e) $W/B=2$ f) $W/B=3$ g) $W/B=4$ h) $W/B=5$ ($Re=24000$)



Şekil 4.19. Deneysel olarak elde edilen, zikzak durum için x yönündeki zaman ortalama hız çalkantı (u') kontürleri.

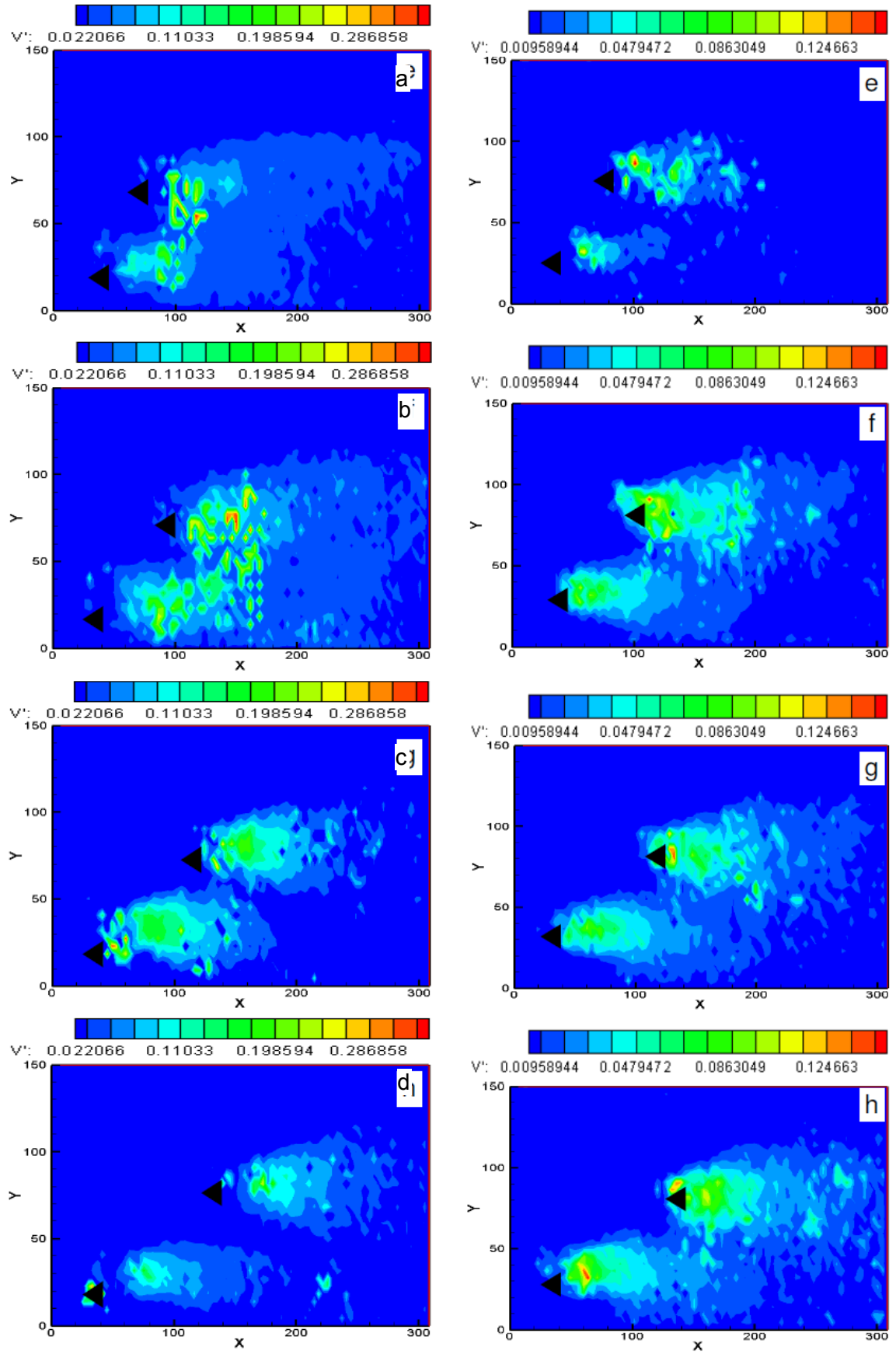
a) $W/B=2$ b) $W/B=3$ c) $W/B=4$ d) $W/B=5$ ($Re=16000$)
 e) $W/B=2$ f) $W/B=3$ g) $W/B=4$ h) $W/B=5$ ($Re=8000$)



Şekil 4.20. Deneysel olarak elde edilen, zikzak durum için y yönündeki zaman ortalama hız çalkantı (v') kontürleri.

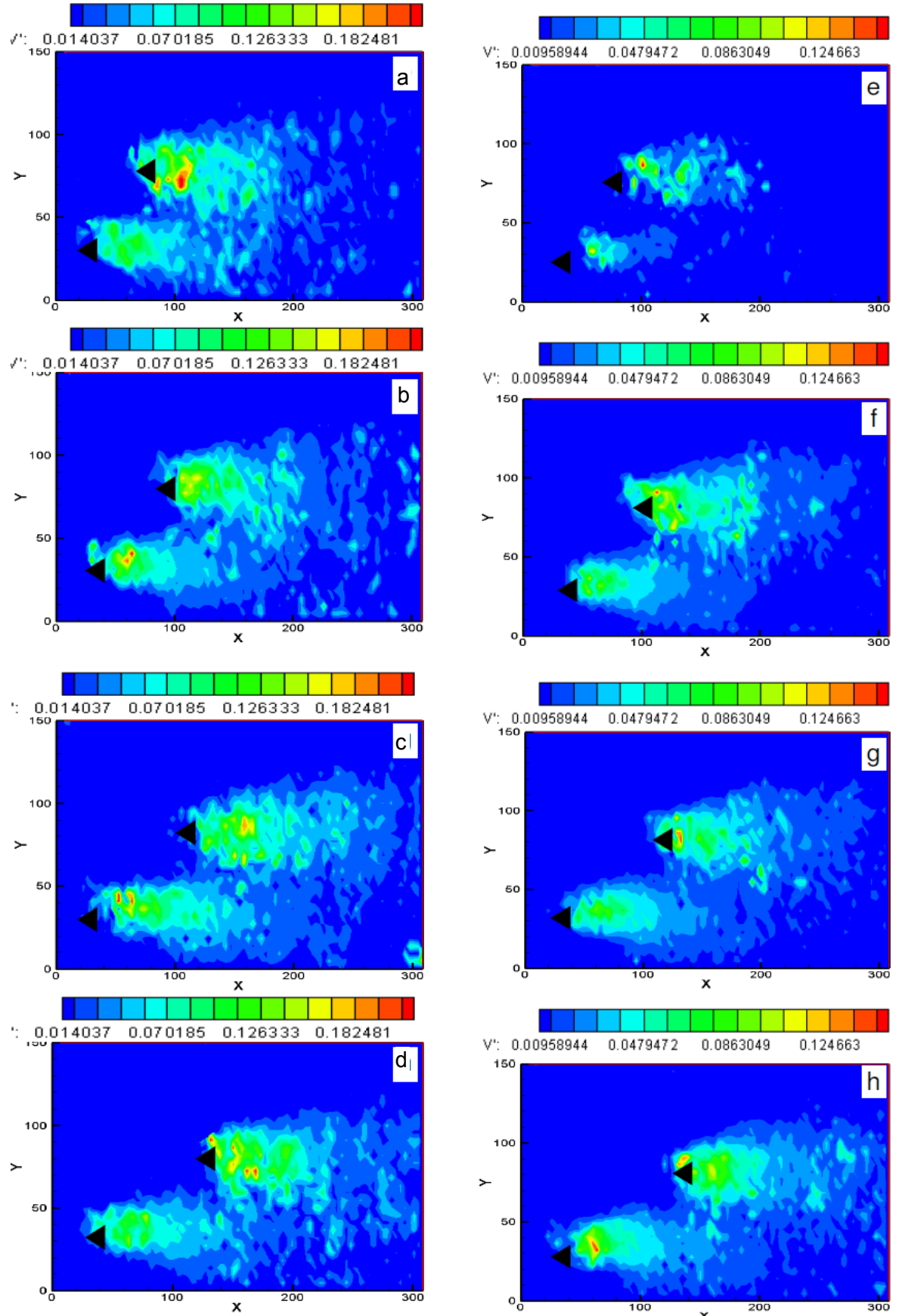
a) $W/B=2$ b) $W/B=3$ c) $W/B=4$ d) $W/B=5$ ($Re=48000$)

e) $W/B=2$ f) $W/B=3$ g) $W/B=4$ h) $W/B=5$ ($Re=40000$)



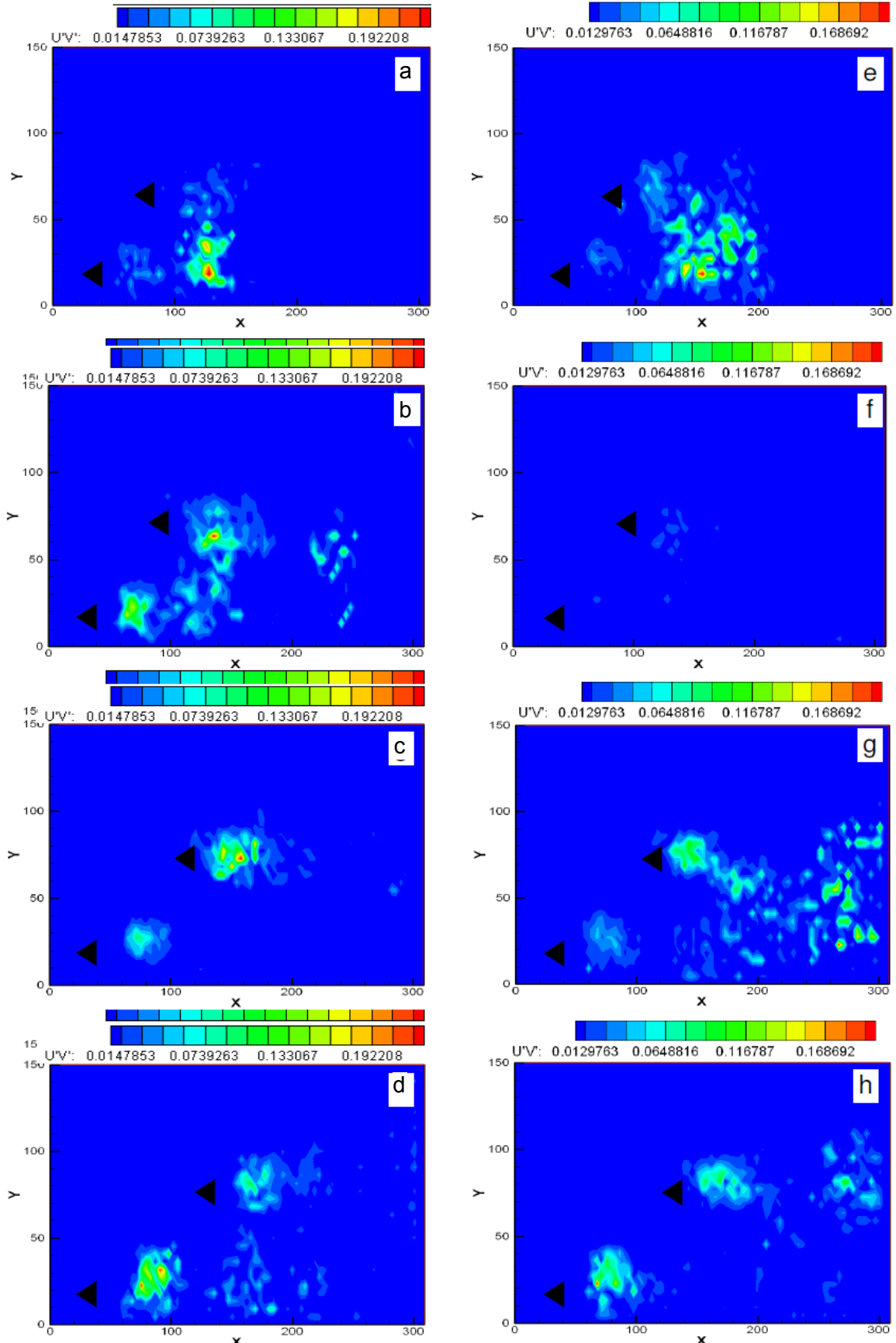
Şekil 4.21. Deneysel olarak elde edilen, zikzak durum için y yönündeki zaman ortalama hız çalkantı (v') kontürleri.

a) $W/B=2$ b) $W/B=3$ c) $W/B=4$ d) $W/B=5$ ($Re=32000$)
 e) $W/B=2$ f) $W/B=3$ g) $W/B=4$ h) $W/B=5$ ($Re=24000$)



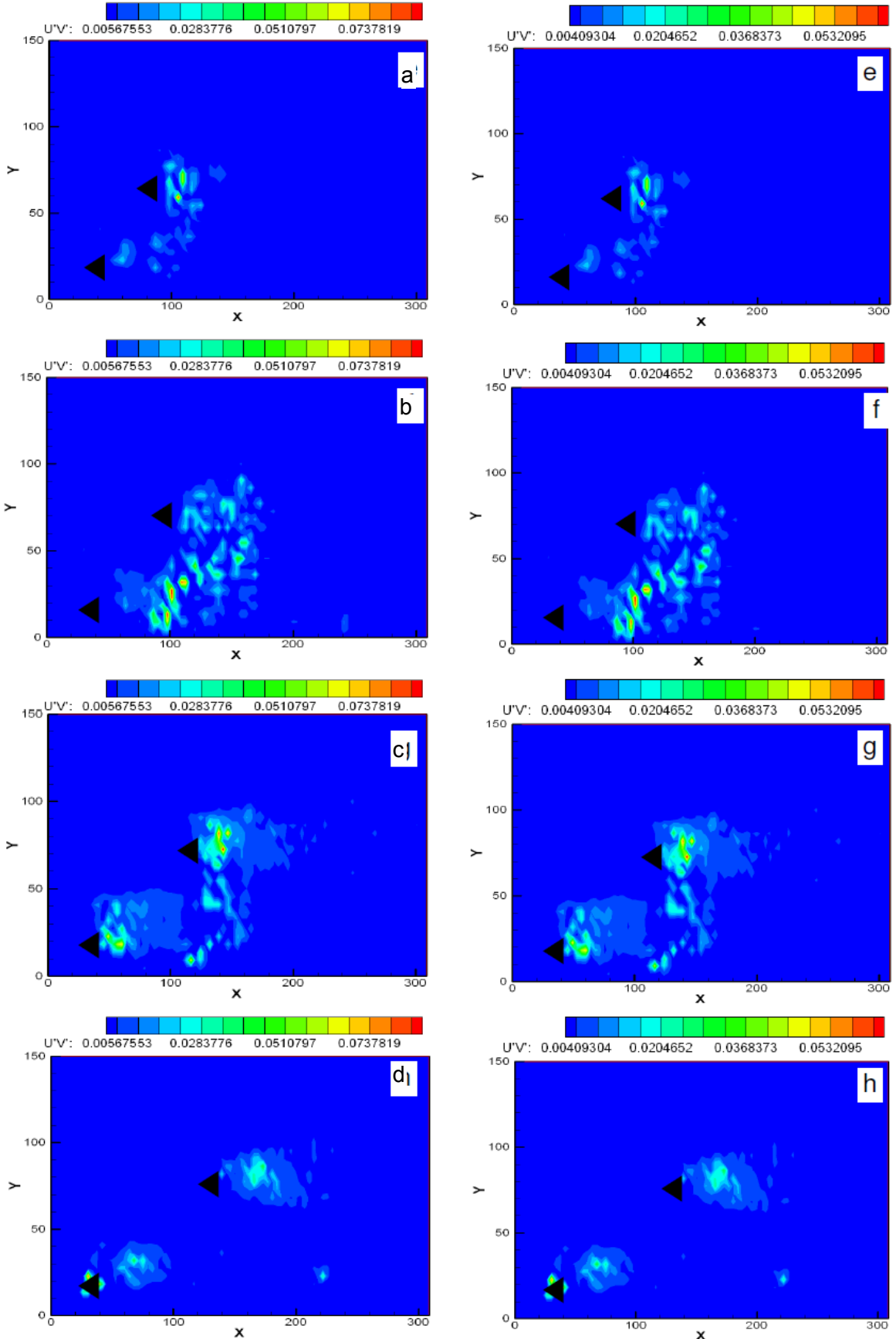
Şekil 4.22. Deneysel olarak elde edilen, zikzak durum için y yönündeki zaman ortalama hız çalkantı (v') kontürleri.

a) $W/B=2$ b) $W/B=3$ c) $W/B=4$ d) $W/B=5$ ($Re=16000$)
 e) $W/B=2$ f) $W/B=3$ g) $W/B=4$ h) $W/B=5$ ($Re=8000$)



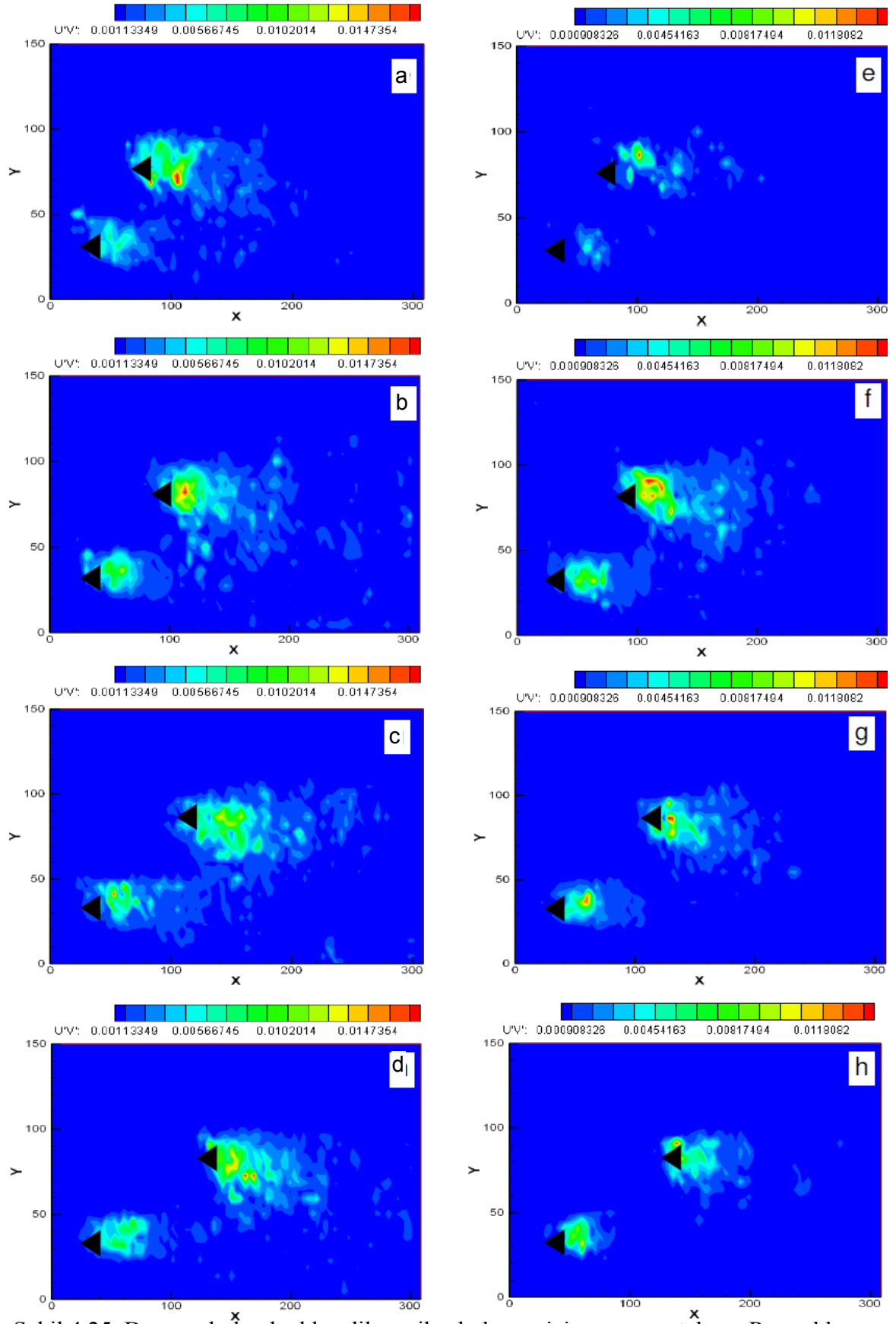
Şekil 4.23. Deneysel olarak elde edilen, zızzak durum için zaman ortalama Reynolds gerilmeleri ($u'v'$)

a) $W/B=2$ b) $W/B=3$ c) $W/B=4$ d) $W/B=5$ ($Re=48000$)
e) $W/B=2$ f) $W/B=3$ g) $W/B=4$ h) $W/B=5$ ($Re=40000$)



Şekil 4.24. Deneysel olarak elde edilen, zikzak durum için zaman ortalama Reynolds gerilmeleri ($u'v'$)

a) $W/B=2$ b) $W/B=3$ c) $W/B=4$ d) $W/B=5$ ($Re=32000$)
 e) $W/B=2$ f) $W/B=3$ g) $W/B=4$ h) $W/B=5$ ($Re=24000$)



Şekil 4.25. Deneysel olarak elde edilen, zikzak durum için zaman ortalama Reynolds gerilmeleri ($u'v'$)

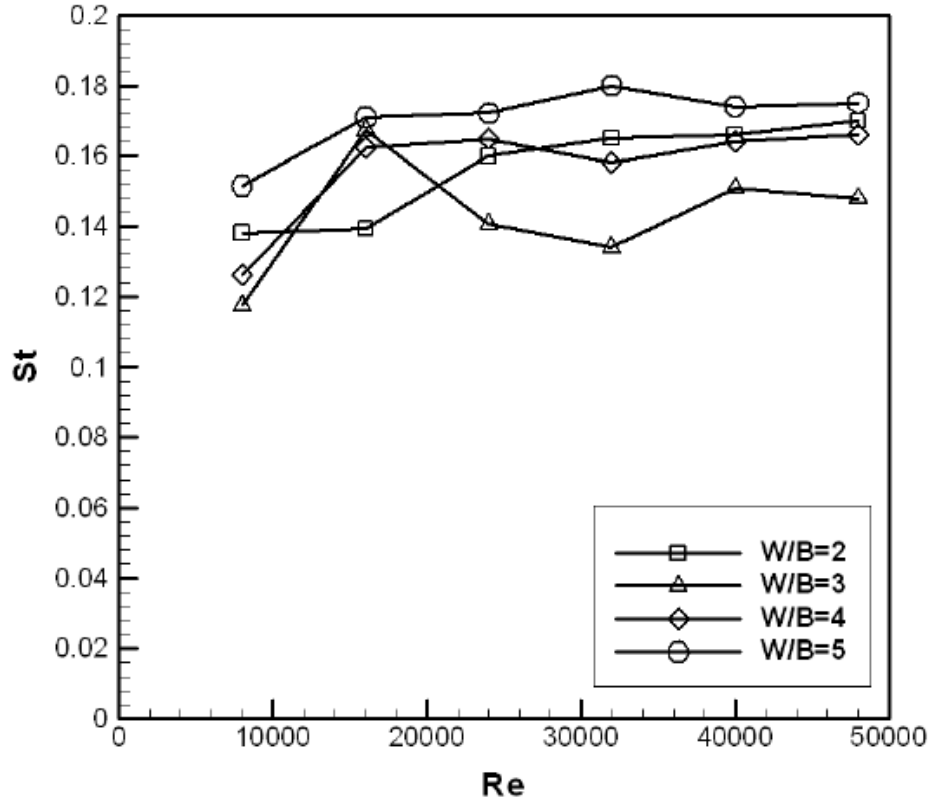
a) $W/B=2$ b) $W/B=3$ c) $W/B=4$ d) $W/B=5$ ($Re=16000$)
 e) $W/B=2$ f) $W/B=3$ g) $W/B=4$ h) $W/B=5$ ($Re=8000$)

4.3. Üçgen Cisimler Etrafındaki Girdap Oluşum Karakteristikleri

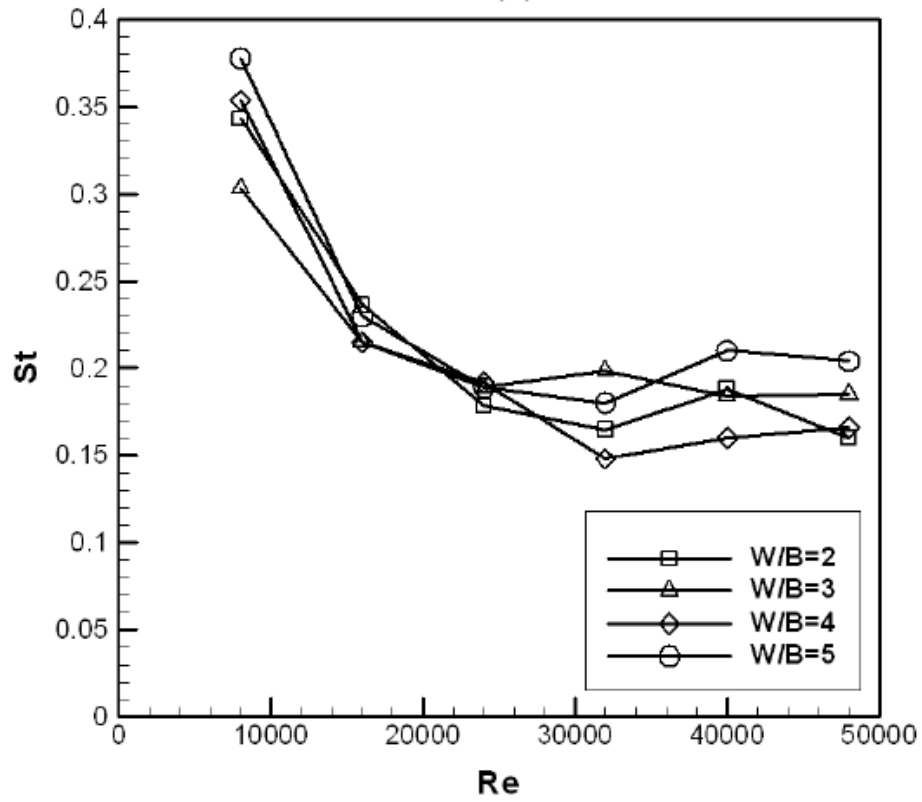
Küt cisimler üzerinde ayrılmanın olduğu noktanın yeri sınır tabaka içindeki akımın karakterine bağlıdır. Yüzeyin pürüzlülüğü yada yaklaşan akım içindeki türbülans, ayrılma noktasının yerini belirlemede etkilidir. Ayrıca ayrılma, akışkanın viskoz direncine de hemen hemen bağlıdır. Akışkanların viskoz davranışını karakterize eden ve viskoz dirençle de ters orantılı olarak değişen Re sayısı ayrılmanın başlamasında önemli rol oynar. Ayrılmanın başlamasıyla aynı zamanda cisimlerin arka iz bölgesinde oluşan, girdap oluşumları gözlenecektir.

Sınır tabaka akımında spektral metotların uygulanması, sınır tabaka akım karakteristikleri ile ilgili istatistiki değerler vermesi bakımından oldukça önemlidir. Son yıllarda küt cisim etrafında meydana gelen girdap kopmaları ile ilgili araştırmalarda, spektral analiz uygulanmak suretiyle iz bölgesi hakkında gerekli istatistiki bilgiler edinilmeye çalışılmaktadır. Girdap kopması olayı spektral grafiklerden belirlenmektedir. Kopmaların meydana geldiği frekanslarda, grafiklerde belirgin şekilde bir tepe oluşmaktadır.

Zikzak düzenlemede ise ilk üçgenin uçlarında oluşan girdap kopma frekansı Reynolds sayısının artması ile artarken (Şekil 4.26a) ikinci üçgende bu değer Reynolds sayısının artması ile azalmıştır(Şekil 4.26b). Zikzak olarak yerleştirilmiş üçgenlerde en yüksek Strouhal sayısı $W/B=5$ durumundaki düzenlemede ulaşılmıştır(Şekil 4.26 a,b). Cisimler arası mesafe arttığında her iki cisimde bağımsız birer cisim gibi davranacağından[19-20], bu durumlardaki St sayısının yüksek çıkması beklenen bir durumdur.



(a)



(b)

Şekil 4.26. Zikzak düzenleme için a) ilk üçgenin art iz bölgesindeki St sayısının Re sayısına göre değişimi b) ikinci üçgenin art iz bölgesindeki St sayısının Re sayısına göre değişimi

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada, akış bölgesine zikzak pozisyonda yerleştirilen, eşkenar üçgen kesitli küt cisimlerin etrafındaki akış yapısı, parçacık görüntülemeli hız ölçme yöntemi (PIV) kullanılarak deneysel olarak incelenmiştir. B, üçgenin taban kenar uzunluğu olmak üzere blokaj oranı 0.13 alınmıştır. Bütün deneylerde, taban kenar uzunluğu $B=20$ mm olan iki adet üçgen kullanılmış olup, üçgenler arası boşluk zikzak düzenleme için $W/B=2, 3, 4, 5$ olmak üzere 4 farklı W/B oranında çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneyler Reynolds sayısının $8.0 \times 10^3 - 48.0 \times 10^3$ aralığında, kapalı çevrim çalışan bir su kanalında gerçekleştirilmiştir. PIV yöntemiyle model boyunca yatay ve düşey simetri düzlemlerinde; ortalama hız vektör alanları, akım çizgileri ve girdap dağılımları elde edilmiştir. Bu akış özellikleri 4 Hz frekansta, ortalama 200 anlık görüntü ile elde edilmiştir. Problem ayrıca sayısal olarak ta modellenerek farklı istasyonlardaki (x/L) hız profilleri elde edilmiş ve sonuçların deneysel verilerle iyi bir uyum gösterdiği görülmüştür. $W/B=2$ durumunda her bir Reynolds sayısı için sayısal ve deneysel hız profilleri raporda sunulmuştur.

Projede taahhüt edilenler eksiksiz olarak tamamlanmış ve proje hedefine ulaşmıştır. Proje sonuçlarından elde edilen verilerden hazırlanan ulusal ve uluslararası bildiriler aşağıda verilmiştir;

1. V. Ozceyhan, S. Gunes, E. Akcadirci, Y. TEKİN, Bir kanal içerisinde zikzak olarak yerleştirilen üçgen kesitli elemanların ısı transferi ve akış karakteristikleri üzerine etkisinin incelenmesi, ULIBTK09, Sivas, TÜRKİYE.
2. E. Manay, S. Gunes, V.Ozceyhan, O. Comakli and E. Akcadirci, A Numerical Study of Heat Transfer and Pressure Drop in a Channel Flow Past Two Triangular Bodies: Comparison of Tandem, Staggered and Side By Side Arrangement, 2010 International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (HEFAT), 19-21 July, Antalya, Turkey.
3. E.Manay, S. Gunes, E. Akcadirci, V.Ozceyhan and O. Comakli, An Experimental Study of Fluid Behaviour in a Channel Flow Past Two Triangular Blockages: Comparison of Tandem and Staggered Arrangement, 2010 The Conference on Thermal and Environmental Issues in Energy Systems (ASME-ATI-UIT), 16-19 May, Sorrento, Italy. (SCI-Expanded).

KAYNAKLAR

1. Akansu, Y.E., Ardişık Olarak Yerleştirilen Farklı Geometrilere Sahip Küt Cisimlerin Aerodinamik Karakteristiklerinin İncelenmesi, (Doktora Tezi), Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2004.
2. Zdravkovich, M. M., Review of Flow Interference Between Two Circular Cylinders in Various Arrangements, Journal of Fluids Engineering, Transactions of ASME, 99, 618-633, 1977.
3. Zdravkovich, M. M. ve Pridden, D.L., Interference Between Two Circular Cylinders; Series of Unexpending Discontinuities, Journal of Industrial Aerodynamics, 2, 255-270. 1977.
4. Zdravkovich, M. M., Flow Induced Oscillations of Two Interfering Circular-Cylinders, Journal of Sound and Vibration, 101, 4, 511-521, 1985.
5. Zdravkovich, M. M., Effect of Vibrating Upstream Cylinder of Two Circular Cylinders in Tandem Arrangement, Journal of Fluids Engineering, 108, 383-385. 1986.
6. Zdravkovich, M. M., Review of Interference-Induced Oscillations in Flow Past 2 Parallel Circular-Cylinders in Various Arrangements, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 28, 183-200, 1988.
7. Zdravkovich, M.M. ve Medeiros, E.B., Effect of Damping on Interference Induced Oscillations of Two Identical Circular Cylinders, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 38, 197-211, 1991.
8. Zdravkovich, M. M., Aerodynamics of Two Parallel Circular Cylinders of Finite Height at Simulated High Reynolds Numbers, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 6, 59-71, 1980.
9. Taniguchi, S., Sakamoto, H. ve Arie, M., Interference Between two Circular Cylinders of Finite Height Vertically Immersed in a Turbulent Boundary Layer, Journal of Fluid Engineering, 104, 529-536, 1982.
10. Sumner, D., ve Richards, M.D., 2003. Some Vortex-Shedding Characteristics of Staggered Configuration of Circular Cylinders, Journal of Fluids and Structures, 17, 345-350, 2003.

11. Sumner D., Richards, M.D., ve Heseltine, J.L., Mean Aerodynamic Forces Acting on a Pair of Circular Cylinders, AIAA paper, 2850, 1-11, 2001.
12. Akosile, O.O. ve Sumner, D., Staggered Circular Cylinders Immersed in a Uniform Planar Shear Flow, *Journal of Fluid and Structures*, 18, 613-633, 2003.
13. Sumner,D., Price,S.J., ve Paidoussis,M.P., Flow-Pattern Identification for Two Staggered Circular Cylinders in Cross Flow, *Journal of Fluid Mechanics*,411, 263-303, 2000.
14. Gu,Z., On Interference Between Two Circular Cylinders at Supercritical Reynolds Number, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 62, 175-190, 1996.
15. Gu, Z. ve Sun, T., On Interference Between Two Circular Cylinders in Staggered Arrangement at High Subcritical Reynolds Numbers, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 80, 287-309, 1999.
16. Sun, T.F., Gu, Z.F., He, D.X. ve Zhang, L.L., Fluctuating Pressure on two Circular Cylinders at High Reynolds Numbers, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*,41-44,577-588, 1992.
17. Price, S.J. ve Paidoussis, M.P., The Aerodynamic Forces Acting on Groups of Two and Three Circular Cylinders When Subject to a Cross Flow, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 17, 329-347, 1984.
18. Luo, S.C., Li, L.L. ve Shah, D.A., Aerodynamic Stability of The Downstreamof Two Tandem Square-Section Cylinders, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 79, 79-103, 1999.
19. Akilli, H., Akar, A., Karakus, C., Flow Characteristics of Circular Cylinders Arranged Side-by-Side in Shallow Water, 15, 187-197, 2004.
20. Meneghini J. R., Saltara, F., Siqueira, C. L. R. ve Ferrari, J. A. Numerical Simulation of Flow Interference Between Two Circular Cylinders in Tandem and Side-by-Side Arrangments, *Journal of Fluids and Structures*, 15, 327-350, 2001.