

PÜRÜZSÜZ AÇIK KANAL AKIMINDA
HIZ DAĞILIMININ L.D.A. İLE İNCELENMESİ

Mehmet ARDIÇLIOĞLU ve M. Salih KIRKGÖZ

Ç. Ü., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana/Türkiye

ÖZET: Dikdörtgen kesitli, pürüzsüz üniform açık kanal akımının gelişmiş sınır tabakasındaki hız dağılımları laser doppler anemometresi ile incelenmiştir. Hız ölçümleri kesit oranının $1.5 \leq b/h \leq 12.0$ ve Reynolds sayısının $2.8 \times 10^4 \leq Re \leq 1.4 \times 10^5$ aralığında 24 farklı kritik altı akım durumunda yapılmıştır. Ölçülen hız profilleri türbülanslı iç bölgede "law of the wall" ve "üstel" dağılım formunda ifade edilmiştir. Mevcut deney şartlarına göre "law of the wall" dağılımındaki sabitler $A=2.46$ ($\kappa=0.41$) ve $B=5.43$ olarak elde edilmiştir. Aynı bölgede, Üstel dağılımındaki sabitler ise $C=8.41$ ve $n=6.8$ olarak bulunmuştur.

INVESTIGATION OF VELOCITY DISTRIBUTION
IN SMOOTH OPEN CHANNEL FLOW USING L.D.A.

ABSTRACT: Using laser doppler anemometer, velocity profiles of fully developed turbulent boundary layers in rectangular smooth uniform open channel flow are investigated. Velocity measurements are carried out for 24 different subcritical flow conditions with aspect ratio $1.5 \leq b/h \leq 12.0$ and Reynolds number $2.8 \times 10^4 \leq Re \leq 1.4 \times 10^5$. Measured velocity profiles are presented in the form of the "law of the wall" and "power law" distributions for the turbulent inner region. The constants in the law of the wall are found as $A=2.46$ ($\kappa=0.41$) and $B=5.43$. For the same region the constants of the power law are $C=8.41$ and $n=6.8$.

1. GİRİŞ

Açık kanalların tasarımında enerji kaybının belirlenmesi, sediment hareketi ve kirlilik problemlerinin incelenmesinde akımdaki hız dağılımının bilinmesi gerekmektedir. Geniş kanallarda ($b/h \geq 5-10$) kesit orta bölgesindeki hız dağılımı kanal yan duvarlarından etkilenmediği için akım genelde iki boyutlu olarak düşünülebilir. Bu nedenle bu tür kanallarda borular için kullanılan hız ifadelerinin açık kanallar için de kullanılabileceği, ancak serbest su yüzeyi etkilerinin göz önüne alınması amacı ile borular için verilen ifadelerdeki katsayıların açık kanallar için yeniden belirlenmesi gerektiği Rouse (1) ve Goncharov (2) tarafından belirtilmiştir.

Türbülanslı akımların hız dağılımı için verilen ifadelerin belirlenmesi Prandtl (3,4) ve von Karman (5) 'in boru akımları üzerindeki araştırmaları ile yoğunluk kazanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda katı sınır yakınlığında, yani viskoz alt tabakada, doğrusal hız dağılımının geçerli olduğu, katı sınırdan uzaklaştıkça akımda türbülans etkisi ile düşey hız profillerinin "velocity defect", "law of the wall" ve "üstel" dağılımlar ile temsil edilebileceği belirtilmiş ve bu dağılımlardaki deneysel sabitler için çeşitli değerler önerilmiştir (6,7).

Açık kanal akımlarında hız ölçümleri için değişik aletler ve yöntemler kullanılmıştır. Bunlardan bazıları hidrojen buble tekniği (8), pitot tüpü (9), hot film anemometresi (10) ve son yıllarda gelişmiş bir ölçüm aleti olan laser doppler anemometresi (11) sayılabilir. Bu çalışmada laser doppler anemometresi ile üniform akımın gelişmiş sınır tabakasındaki akım hızları ölçülmüş ve elde edilen hız profilleri law of the wall ve üstel dağılım ifadeleri ile tanımlanmaya çalışılmıştır.

2. GELİŞMİŞ SINIR TABAKASINDA HIZ İFADELERİ

Gelişmiş türbülanslı sınır tabakası akımı hız profili bakımından iç ve dış olmak üzere iki bölgeye ayrılabilir. İç bölgedeki hız dağılımı büyük ölçüde sınır kayma gerilmesi (τ_0), akışkanın yoğunluğu ve viskozitesi ile katı sınırdan uzaklığa bağlıdır. İç bölge viskoz alt tabaka, geçiş bölgesi ve türbülanslı bölge olmak üzere üç farklı tabakaya ayrılabilir. Viskoz gerilmelerin hakim olduğu viskoz alt tabaka kalınlığı sınır tabakası kalınlığının yaklaşık % 0.1-1 ini oluşturur. Newton'un viskozite kanunundan hareketle bu tabakadaki boyutsuz hız dağılımı aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{u_* z}{\nu} \quad (1)$$

Burada u_* ($= \sqrt{\tau_0/\rho}$) kayma hızı, ν kinematik viskozite ve z de katı sınırdan uzaklığı göstermektedir. İç bölgenin türbülanslı bölümünde, Prandtl (4) ve von Karman (5) hız dağılımının aşağıda verilen law of the wall dağılımı ile tanımlanabileceğini bildirmişlerdir:

$$\frac{u}{u_*} = A \ln \frac{u_* z}{\nu} + B \quad (2)$$

Burada $A=1/\kappa$ (κ von Karman sabiti) ve B de katı sınır özelliklerine bağlı sabittir. (2) ifadesindeki sabitlerin belirlenmesi amacıyla açık kanallarda birçok deneysel çalışma yapılmıştır. A ve B sabitleri için Klebanof (12):2.44,4.9, Pao (13):2.5,5.5, Nezu and Rodi (14):2.43,5.29 ve Kırkgöz (15):2.44,5.5 değerlerini elde etmişlerdir. Bu çalışmalardan görüleceği gibi A sabiti 2.43-2.5 ve B de 4.9-5.5 arasında değişmektedir.

Prandtl (3). cilalı borular için Blasius'un dairesel borulardaki sürtünme denklemini ($\lambda = 0.3164/Re^{0.25}$) kullanarak hız dağılımını üstel bir ifade ile tanımlamış daha sonra bu ifade Reynolds sayısını farklı değerleri için aşağıdaki gibi genelleştirilmiştir:

$$\frac{u}{u_*} = C \left(\frac{u_* z}{\nu} \right)^{1/n} \quad (3)$$

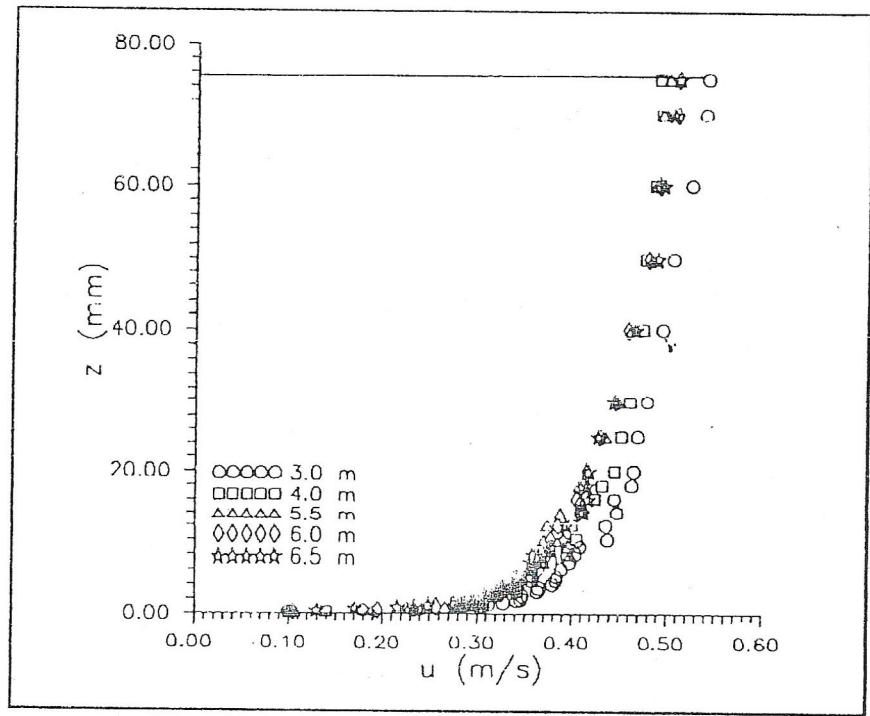
Kandula et al (16) açık kanallarda yaptıkları deneysel çalışmalarda (3) ifadesinin türbülanslı bölgedeki akım hızlarını ifade etmede başarılı bir şekilde kullanılabileceğini bildirmişlerdir.

3. DENEY DÜZENEGİ ve YÖNTEM

Deneyler Ç.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında bulunan tabanı ve yan duvarları camdan $0.3 \times 0.4 \times 10.0$ m boyutlu kanalda yapılmıştır. Kanaldaki akımın debisi kanala su veren sabit seviyeli haznenin çıkış borusuna yerleştirilen Altosonic UFM 600P tipi debi ölçer yardımı ile belirlenmiştir. Kanaldaki akım hızları üç boyutta hareketli çerçeveye oturtulmuş olan DISA 55 L tipi Laser Doppler Anemometresi ile ölçülmüştür.

Gelişmiş akımın olduğu kesiti tesbit amacı ile kanal başından itibaren belirli aralıklarla kesit orta düzeylerinde hız ölçümleri yapılmış ve hız profiline yaklaşık olarak sabitleştiği kesit ölçülen profillerin üstüste çizilmesinden elde edilmiştir. Bu tür bir karşılaştırma Şekil 1 de görülmektedir. Şekildeki hız profillerine göre kanal başından itibaren $x=5.5$ m den sonraki kesitlerde hız dağılımının değişmediği dolayısıyla bu kesitten sonra sınır tabakasının tam olarak gelişme gösterdiğini kabul etmek mümkün olmaktadır. Hız ölçümleri tüm akım şartları için $x=6.5$ m kesitinde yapılmıştır.

Boyutsuzlaştırma parametresi olarak kullanılan kayma hızları ölçülen hız

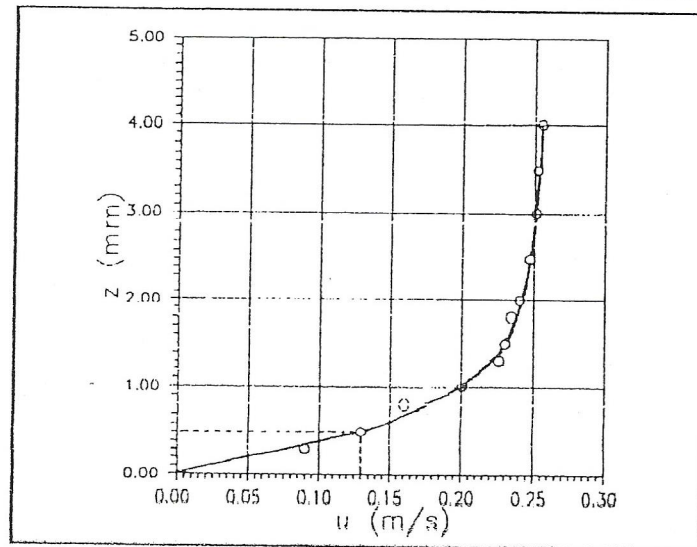


Şekil 1. Hız profillerinin gelişimi

profillerinden bulunmuştur. Şekil 2 de görüldüğü gibi hız profili viskoz alt tabaka bölgesinde yaklaşık olarak doğrusaldır. (1) ifadesinden kayma hızı için,

$$u_* = \sqrt{\nu \frac{u}{z}} \quad (4)$$

yazılabilir. (4) ifadesindeki u değeri viskoz alt tabakadaki doğrusal hız dağılım bölgesinde sınırdan z uzaklığındaki noktanın hızını temsil etmektedir.



Şekil 2. Katı sınıra yakın bölgede hız profili

Bu şekilde ölçülen herbir hız profilinden u_* değeri hesaplanmıştır. Örneğin Şekil 2 den $z=0.5$ mm için $u=130$ mm/s ve $v=1.14$ m /s alınırsa $u_* =17.2$ mm/s olarak elde edilir.

Bu çalışmada gelişmiş akım kesitinin orta düzeyinde 24 farklı akım durumu için hız ölçümü yapılmıştır. Bu akımlara ait çeşitli özellikler Tablo 1' de verilmiştir. Tabloda b kanal genişliğini ve h su derinliğini göstermektedir.

Tablo 1. Ölçüm Yapılan Akımların Özellikleri

Deney No	Q (lt/s)	h (mm)	b/h	Fr	Re	u_* (mm/s)
1	19.5	200	1.5	0.232	97740	17.2
2	19.5	150	2.0	0.357	114035	21.5
3	19.5	120	2.5	0.499	126705	26.0
4	19.5	100	3.0	0.656	136840	28.5
5	14.5	200	1.5	0.173	72680	13.0
6	14.5	150	2.0	0.266	84796	16.5
7	14.5	120	2.5	0.371	94217	18.5
8	14.5	100	3.0	0.488	101755	22.0
9	14.5	80	3.75	0.682	110600	31.5
10	10.0	200	1.5	0.119	50125	11.5
11	10.0	150	2.0	0.183	58480	14.0
12	10.0	120	2.5	0.256	64978	15.0
13	10.0	100	3.0	0.336	70175	16.0
14	10.0	75	4.0	0.518	77973	21.0
15	10.0	60	5.0	0.724	83542	29.0
16	6.0	120	2.5	0.154	38986	7.8
17	6.0	100	3.0	0.202	42106	9.5
18	6.0	75	4.0	0.311	46783	16.3
19	6.0	60	5.0	0.434	50125	21.2
20	6.0	45	6.7	0.669	53981	23.8
21	3.2	50	6.0	0.300	27632	9.6
22	3.2	40	7.5	0.419	29085	12.5
23	3.2	30	10.0	0.645	30702	17.5
24	3.2	25	12.0	0.848	31580	21.0

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Gelişmiş akım kesitinin orta düzeyinde 24 farklı deneyden ölçülen hızlar (2) ifadesi ile verilen law of the wall dağılımı ve (3) ifadesi ile verilen üstel dağılım için Tablo 1'deki kayma hızları ile boyutsuzlaştırılmıştır. (2) ve (3) ifadelerinde yer alan κ , B, C ve n sabitlerinin bulunması için 24 deneyden ölçülen hızlara regresyon analizi uygulanmış ve her bir deney için türbülanslı iç bölgenin geçerli aralığında elde edilen değerler Tablo 2'de verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi κ değeri 0.388 ile 0.421 arasında, B değeri 4.75 ile 5.84 arasında düzensiz biçimde değişmekte buna karşılık (3) ifadesindeki C ve n sabitleri artan Re sayısına bağlı olarak artmaktadır. Diğer taraftan türbülanslı iç bölge aralığının alt ve üst sınırları da Re sayısı ile birlikte artmaktadır.

24 farklı deney için ölçülen hızlar law of the wall dağılımını temsil etmek üzere Şekil 3'de görülmektedir. $20 \leq u_* z/\nu \leq 400$ aralığındaki tüm ölçüm noktaları için yapılan regresyon analizinden $A=2.46$ ($\kappa=0.41$) ve $B=5.43$ olarak bulunmuştur. Buna göre mevcut deney şartları için (2) ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{u}{u_*} = 2.46 \ln \frac{u_* z}{\nu} + 5.43 \quad (5)$$

Belirtilen aralıktaki hız dağılımları Şekil 4'de daha açık olarak verilmiştir. Şekil 4 üzerinde (5) ifadesi ile verilen law of the wall dağılımının literatürde yaygın olarak kullanılan dağılım ile yani $A=2.44$ ve $B=5.5$ değerleri kullanılarak elde edilen ifade ile büyük ölçüde uyum içinde olduğu görülmektedir.

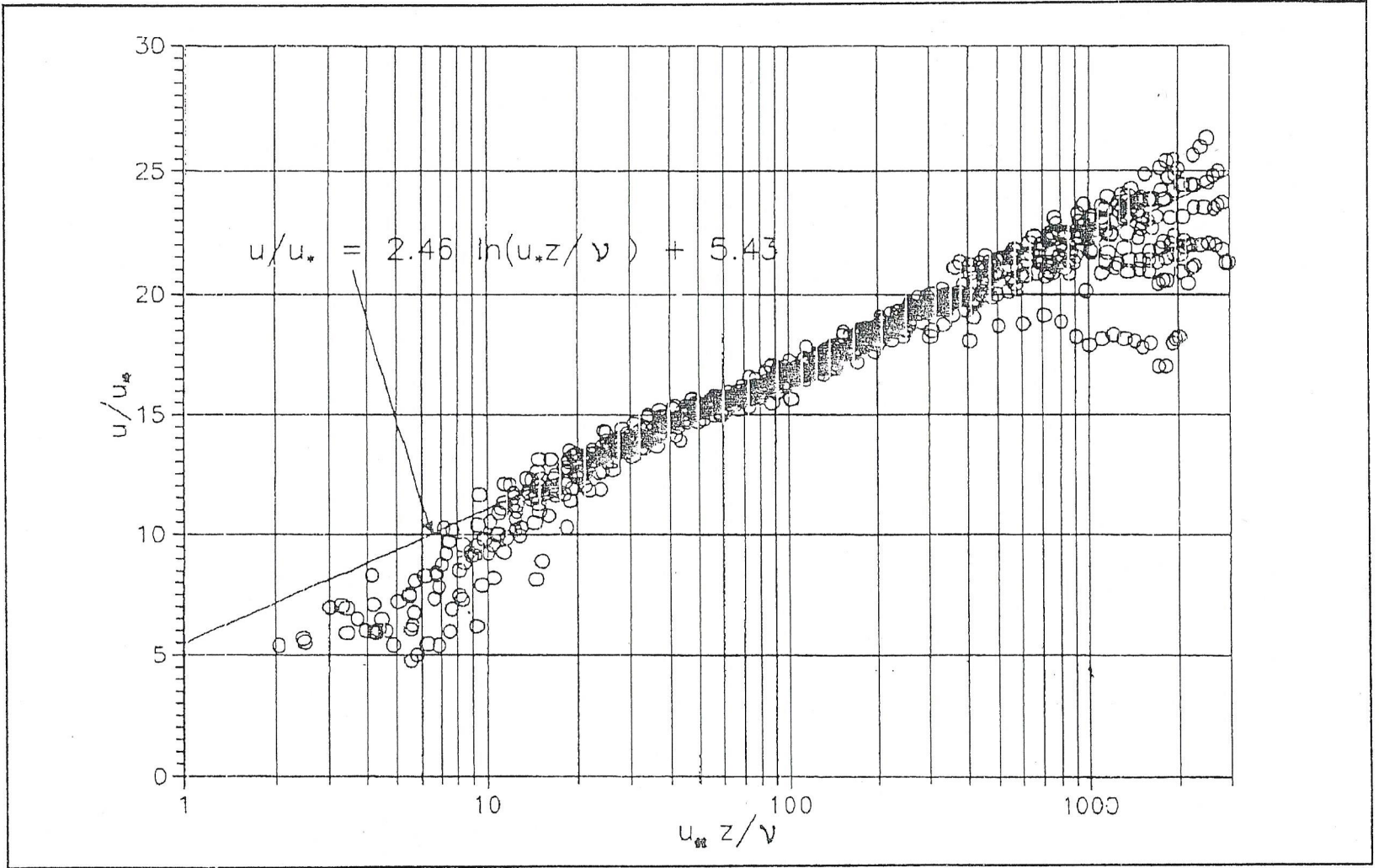
$20 \leq u_* z/\nu \leq 400$ aralığındaki ölçüm datası Şekil 5'de üstel dağılıma uygun olarak verilmiştir. Bu aralıkta üstel dağılım için yapılan regresyon analizinden $C=8.41$ ve $n=6.8$ değerleri bulunmuştur. Buna göre mevcut deney şartları itibarıyla elde edilen üstel hız dağılım ifadesi aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\frac{u}{u_*} = 8.41 \left(\frac{u_* z}{\nu} \right)^{1/6.8} \quad (6)$$

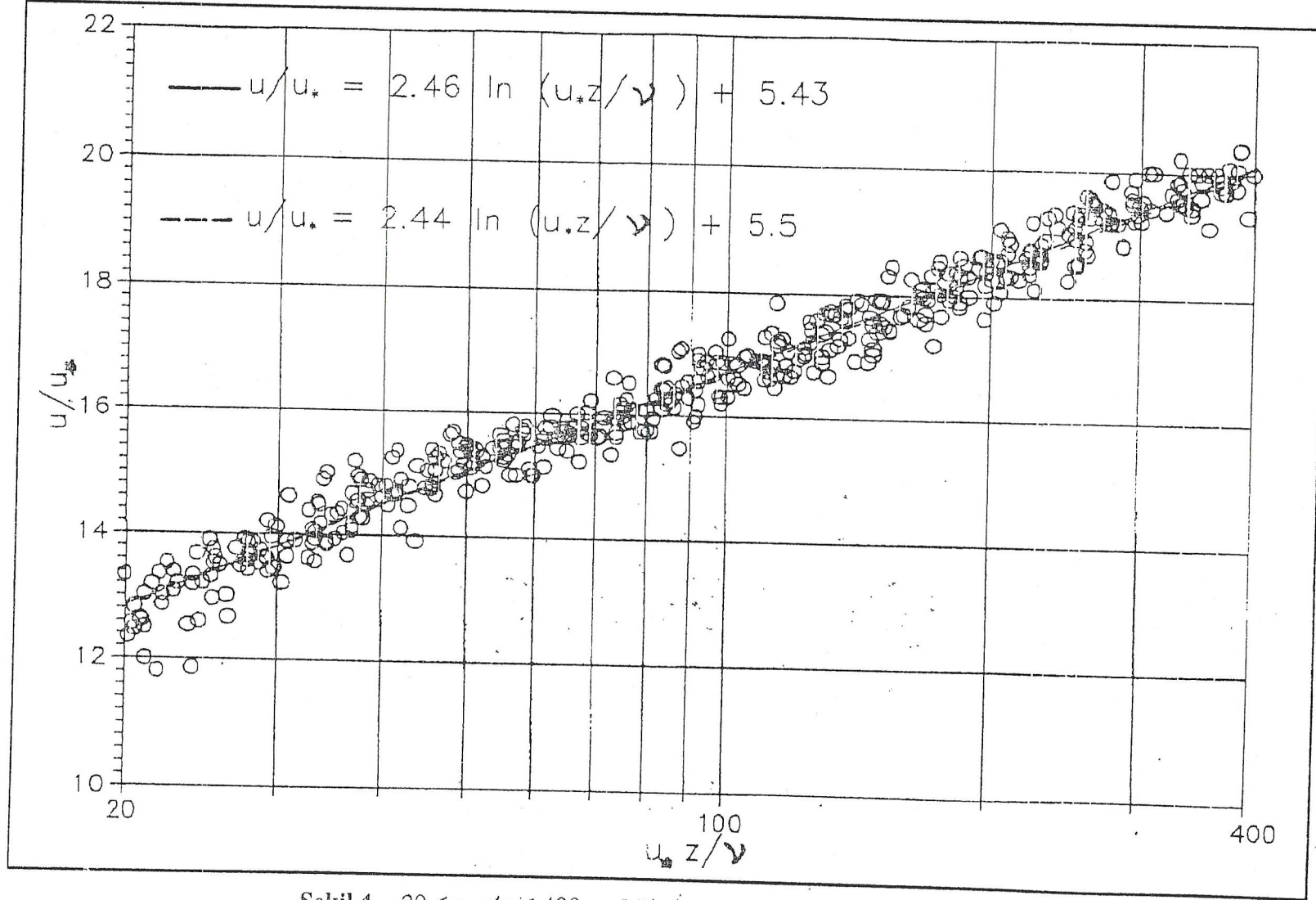
Bu ifadedeki sabitler benzer Reynolds sayıları için bulunmuş olan değerler ile uyum göstermektedir. Örneğin Kandula et al (16) bu sabitleri Reynolds sayısının $10^4 - 7 \times 10^4$ aralığında $C=8.3$ ve $n=7$ olarak elde etmiştir.

Tablo 2. Hesaplanan Sabitler

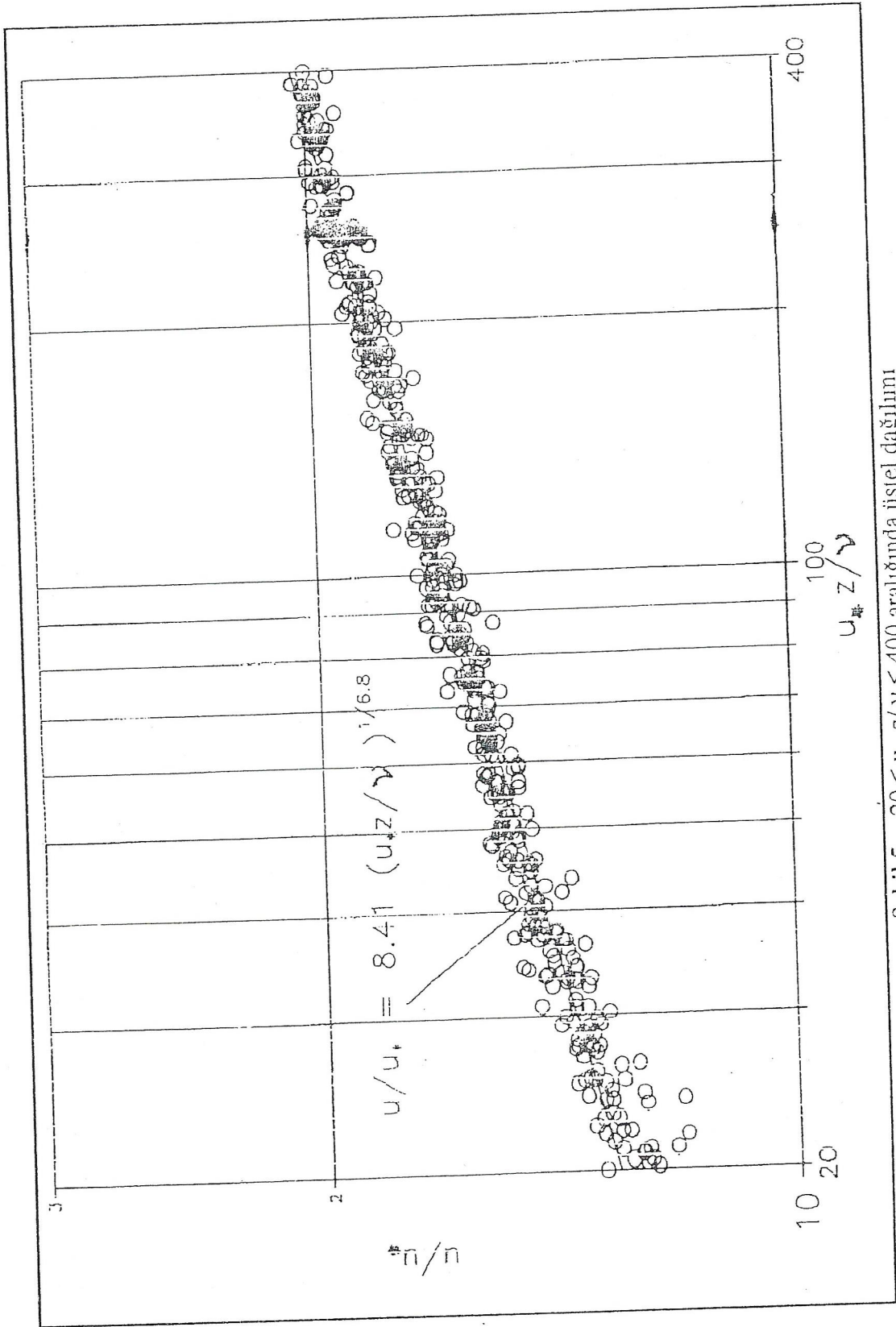
Dency No	Re	κ	B	C	n	Geçerli aralık
21	27632	0.414	5.67	8.16	6.45	$20 \leq u_* z/v \leq 200$
22	29085	0.405	5.53	8.24	6.45	$20 \leq u_* z/v \leq 200$
23	30702	0.418	5.65	8.21	6.54	$20 \leq u_* z/v \leq 200$
24	31580	0.419	5.58	8.16	6.55	$20 \leq u_* z/v \leq 200$
16	38986	0.400	5.56	8.28	6.67	$20 \leq u_* z/v \leq 300$
17	42106	0.405	5.59	8.26	6.67	$20 \leq u_* z/v \leq 300$
18	46783	0.408	5.36	8.12	6.67	$20 \leq u_* z/v \leq 300$
10	50125	0.414	5.34	8.23	6.69	$30 \leq u_* z/v \leq 300$
19	50125	0.402	5.32	8.48	6.80	$30 \leq u_* z/v \leq 400$
20	53981	0.400	5.36	8.51	6.76	$30 \leq u_* z/v \leq 400$
11	58480	0.408	5.08	8.15	6.67	$30 \leq u_* z/v \leq 400$
12	64978	0.398	5.23	8.48	6.80	$30 \leq u_* z/v \leq 400$
13	70175	0.404	5.05	8.23	6.72	$30 \leq u_* z/v \leq 400$
5	72680	0.398	5.24	8.39	6.69	$30 \leq u_* z/v \leq 400$
14	77973	0.388	4.91	8.28	6.67	$30 \leq u_* z/v \leq 400$
15	83542	0.404	5.45	8.53	6.80	$30 \leq u_* z/v \leq 400$
6	84796	0.391	4.75	8.19	6.66	$30 \leq u_* z/v \leq 400$
7	94217	0.399	5.13	8.43	6.80	$40 \leq u_* z/v \leq 400$
1	97740	0.399	5.09	8.46	4.86	$40 \leq u_* z/v \leq 400$
8	101755	0.411	5.84	9.05	7.14	$40 \leq u_* z/v \leq 400$
9	110600	0.405	5.69	8.90	7.14	$40 \leq u_* z/v \leq 400$
2	114035	0.421	5.91	8.92	7.14	$40 \leq u_* z/v \leq 400$
3	126705	0.412	5.45	8.65	7.09	$40 \leq u_* z/v \leq 400$
4	136840	0.417	5.84	9.05	7.14	$40 \leq u_* z/v \leq 500$



Şekil 3. Law of the wall dağılımı



Şekil 4. $20 \leq u_* z / \nu \leq 400$ aralığında law of the wall dağılımı



Şekil 5. $20 \leq u_* z / \nu \leq 400$ aralığında üstel dağılımı

5. SONUÇ

Pürüzsüz açık kanal akımlarında sınır tabakasının tam geliştiği bölgede türbülanslı iç bölge için literatürde yaygın olarak kullanılan law of the wall ve üstel hız dağılımları geniş Reynolds sayısı aralığında kritik altı akımlar için incelenmiştir. Gelişmiş sınır tabakası akımını temsil eden kesit orta düzeyinde logaritmik dağılımın geçerli olduğu aralık deney şartlarına göre $20-40 \leq u_* z/v \leq 200-500$ olarak tesbit edilmiştir. $u_* z/v$ değerinin alt ve üst sınırları artan Re sayısı ile birlikte artma göstermektedir. Tüm ölçümler için elde edilen boyutsuz hızlar üst üste çizildiğinde logaritmik dağılımın geçerli olduğu $20 \leq u_* z/v \leq 400$ aralığında law of the wall dağılımındaki sabitler $A=2.46$ ($\kappa=0.41$) ve $B=5.43$ olarak elde edilmiştir. Bu sabitlerin literatürde yaygın olarak kabul görmüş $A=2.44$ ve $B=5.5$ değerlerinden fazla farklı olmadığı bu itibarla mevcut deney bulgularının 2.44 ve 5.5 değerlerini bir ölçüde teyit eder nitelikte olduğu sonucuna varılmıştır.

Logaritmik dağılımın geçerli olduğu iç bölgede üstel hız dağılımının da ölçülen hız profillerini yüksek korelasyonla temsil ettiği görülmüştür. Tüm ölçümler için $20 \leq u_* z/v \leq 400$ aralığında üstel ifadedeki sabitler $C=8.41$ ve $n=6.8$ olarak hesaplanmıştır. Herbir ölçüm sonucu elde edilen bu sabitlerin artan Reynolds sayısı ile birlikte artma eğiliminde olduğu gözlenmiştir.

6. KAYNAKLAR

1. Rouse, H., *Elementary Mechanics of Fluids*, Wiley Eastern Reprint, Wiley Eastern Private Limited, New Delhi., 1970.
2. Goncharov, V.N., *Dynamics of Channel Flow*, 2nd. ed., Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem.,1970.
3. Prandtl, L., *Über die Ausgebildete Turbulenz*, Z. Angew Math. Mech., Bd. 5., 1925.
4. Prandtl, L., *Zür Turbulenten Strömung in Rohren und Längs Platten*, Ergebnisse der Aerodyn. Versuchsanstalt zu Göttingen,4, 1932.
5. Karman, T. von, *Mechanische Ähnlichkeit und Turbulenz*, Göttinger Nachrichten, Math. Phys. Klasse., 1930.
6. Nikuradse, J., *Strömungsgesetze in Rauhen Rohren*. Forsch. Geb. Ing. Wes., Heft 361., 1933.
7. Keulegan, G.H., *Laws of Turbulent Flow in Open Channels*, RP1151, J. Res.National Bureau of Standards, V.121,1938.
8. Grass, A.J., *Structural Features of Turbulent Flow over smooth and Rough Boundaries*, J. of Fluid Mech. Vol 50., 1971.
9. Coleman, N.L., *The Laminar Flow Velocity Profile over Close-Packed Spherical Roughness Elements*, La Houille Bl., N1, 1982.
10. Bayazit, M., *Free Surface Flow in a Channel of Large Relative Roughness*, J.

Hydr. Res., Vol. 14, No 2., 1976.

11. Tominaga, A. and Nezu, I., *Velocity Profiles in Steep Open Channel*, *J. Hydr. Res.*, Vol. 118, No 1., 1992.

12. Klebanoff, P. S., *Characteristics of Turbulence in a Boundary Layer with Zero Pressure Gradient*, *NACA Technical Notes*, No 3178, Washington D. C., 1954.

13. Pao, R. H. F., *Fluid Mechanics*, 1 st ed., John and Sons, Inc., New York., 1961.

14. Nezu, I. and Rodi, W., *Open Channel Flow Measurement with a Laser Doppler Anemometer*, *J.Hyd. Engrg.*, ASCE, vol. 112, No 5., 1986.

15. Kirkgoz, M.S., *Turbulent Velocity Profiles for Smooth and Rough Open Channel Flow*, *J. Hydr. Eng.*, vol. 115, No 11., 1989.

16. Kandula, V.N.S., Lakshminarayana, P. and Lakshmana, Rao N.S., *Velocity Distribution in Smooth Rectangular Open Channel*, *J. Hydr. Eng.*, Vol. 109, No 2., 1983.