

**TABAKALI AKIMLARIN HİDRODİNAMİĞİ,
AKIM VE KARIŞIM PARAMETRELERİNİN MATEMATİK MODELİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Selahattin BAYRAM

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2022

**TABAKALI AKIMLARIN HİDRODİNAMİĞİ,
AKIM VE KARIŞIM PARAMETRELERİNİN MATEMATİK MODELİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Selahattin BAYRAM
(501181513)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Veysel Şadan Özgür KIRCA

TEMMUZ 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501181513 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Selahattin BAYRAM, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “TABAKALI AKIMLARIN HİDRODİNAMİĞİ, AKIM VE KARIŞIM PARAMETRELERİNİN MATEMATİK MODELİ” başlıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Veysel Şadan Özgür KIRCA**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Şevket ÇOKGÖR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet ÖZTÜRK
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **01 Temmuz 2022**

Savunma Tarihi : **21 Temmuz 2022**





Aileme,



ÖNSÖZ

Su yapıları mühendisliği disiplini içerisinde önemli bir yeri olan boğazlar, insanlık tarihi boyunca çeşitli amaçlarla kullanılmış ve birçok kapsamlı çalışmaya konu edilmiştir. Bu yüksek lisans tez çalışmasında; tabakalı akımların hidrodinamiği incelenip akım ve karışım parametrelerinin matematiksel modeli ortaya konmaya çalışılmıştır. Kompleks bir yapıya sahip olan boğaz yapısının temel matematik denklemleri ile üst ve alt akım debileri ve buna ek olarak yükseklik ve yoğunluk farkından dolayı oluşan ters yönlü akımın karışım debilerinin hesaplanması amaçlanmıştır.

Bu yüksek lisans tez çalışmasının danışmanlığını yürüten ötesinde, İ.T.Ü. Lisansüstü Eğitim Fakültesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği programına ilk adım attığım günden itibaren bana gerek akademik hayatımda gerekse sosyal hayatımda desteklerini esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. V.Ş. Özgür KIRCA'ya saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Özellikle, hayalim olan bu disiplinde hem fiziki ölçümlerde hem de akademik anlamda çalışma fırsatı verip her zaman bana güvenen her türlü desteği sunan değerli hocama en içten duygularla müteşekkirim.

Yüksek lisans tezimi hayatım boyunca bana maddi manevi desteklerini esirgemeyen, karşılıksız sevgi ile bu günlere gelmemi sağlayan çok kıymetli aileme, annem Gülhanım Bayram ve babam Mehmet Bayram'a sunmaktan gurur duyuyorum. Sonsuz destekleri için minnettarım.

Son olarak tüm eğitim hayatım boyunca üzerimde emekleri olan 'Şanlı' Trabzon Lisesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, University of Liège HECE (Hydraulics in Environmental and Civil Engineering) ve İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Hidrolik ve Kıyı Mühendisliği bölümündeki tüm değerli hocalarım ve arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Temmuz 2022

Selahattin BAYRAM
İnşaat Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	1
2. TABAKALI AKIMLARIN HİDRODİNAMİĞİ VE KARIŞIM	3
2.1 İstanbul ve Çanakkale Boğazlarının Fiziki Yapısı.....	3
2.2 Fiziki Ölçüm ve Sayısal Modeller	4
2.3 Arayüzey Sürtünme Katsayısı	8
2.4 Richardson Sayısı ve Tabakalar Arası Karışım Mekanizmasındaki Yeri	8
3. SÜMER VE BAKİOĞLU [1] MATEMATİK MODELİ.....	11
3.1 Modelin İncelenmesi	11
3.2 Girdi Parametreleri	12
3.3 Enerji Denklemleri ve Sınır Koşulları	12
3.4 Yersel Yük Kaybı Katsayıları	14
3.5 Sürtünme Katsayısı.....	16
3.6 Matematik Model Sonuçları	17
4. MODELİN UYGULANMASI.....	19
4.1 Tabakalar Arası Karışım İhmal Edilerek İstanbul ve Çanakkale Boğazı İçin Çözüm	19
4.2 Tabakalar Arası Karışım İhmal Edilerek Farklı Tuzluluk Değerleri İçin İstanbul ve Çanakkale Boğazı Çözümü.....	20
4.3 Mevcut Model Sonuçlarının Sannino vd. [2] Çalışması ile Kıyaslanması.....	22
5. TABAKALAR ARASI KARIŞIMIN MODELLENMESİ.....	25
5.1 Tabakalar Arası Karışım Mekanizması	25
5.2 Boğaz Akımında Üst ve Alt Tabaka Tuz Kütlesi Korunumu	26
5.3 Tabakalar Arasındaki Karışımın Richardson Sayısı ile İlişkisi	27
5.4 Tabakalar Arası Karışımın Basitleştirilmiş Hesap Prosedürü	30
6. İKİ TABAKALI AKIM SİSTEMİNİN KARIŞIM DENKLEMLERİNİ DE İÇEREN MATEMATİK MODELİ	33
6.1 Karışım Mekanizması Dahil Edilen Matematik Model.....	33

6.2 Matematik Modelin Uygulanması ve Elde Edilen Sonuçlar	36
6.2.1 İstanbul Boğazı için matematik modelin uygulanması.....	36
6.2.2 Çanakkale Boğazı için matematik modelin uygulanması	39
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	43
KAYNAKLAR.....	49
EKLER	53
ÖZGEÇMİŞ	61



KISALTMALAR

ppt : 1000 gram su kütlesindeki tuz kütlesi oranı (parts per thousand)
TSS : Türk Boğazlar Sistemi(Turkish Straits System)





SEMBOLLER

Δh	: Su seviyesi farkı
$\Delta \rho$	: Yoğunluk farkı
Q	: Debi
Q_m	: Karışım debisi
q^*	: Birim genişlikteki boyutsuz debi
S	: Tuzluluk
Ri	: Richardson sayısı
Ri_0	: Genel Richardson sayısı
Ri_*	: Sürtünme Richardson sayısı
u_*	: Sürtünme hızı
D	: Derinlik
V	: Kesitsel ortalama hız
U	: Yüzey hızı
w_e	: Sürüklenme hızı
τ_0	: Taban kayma gerilmesi
τ_i	: Ara yüzey kayma gerilmesi
L	: Boğaz uzunluğu
L_*	: Boyutsuz boğaz uzunluğu
W	: Boğaz genişliği
g	: Yer çekimi ivmesi
f	: Sürtünme katsayısı
H	: Tabaka kalınlığı
F	: Froude sayısı
D	: Derinlik
a, b	: Richardson sayısı sabitleri



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 : İstanbul ve Çanakkale Boğazı için girdi parametreleri.	12
Çizelge 5.1 : Önerilen a ve b sabitleri değerleri, Christodoulou [3], Çizelge 1.	29
Çizelge 5.2 : Christodoulou [3] çalışmasında önerilen a ve b sabitleri değerleri...	29
Çizelge 5.3 : Strang vd. [4] çalışmasında önerilen a ve b sabitleri değerleri.	30
Çizelge 6.1 : Geliştirilen iki tabakalı akım ve karışım matematik modelinin girdi parametreleri, bilinmeyenleri, denklemleri.	36
Çizelge 6.2 : Farklı su seviyesi değerleri için model sonuçları.	39



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Avrupa kıtasındaki önemli boğazlar.....	1
Şekil 2.1 : Google Earth hava fotoğrafı üzerinde İstanbul ve Çanakkale Boğazları Gösterimi.	3
Şekil 2.2 : İki tabakalı akımlarda karışımın şematik gösterimi. [5]	5
Şekil 2.3 : Marmara Denizi ve boğazlardaki debi ve tuzluluk değerleri. Birimler $km^3/yıl$ olarak verilmiştir. [6]	6
Şekil 3.1 : İstanbul Boğazındaki iki tabakalı akımın matematiksel modellenmesi. [1]	11
Şekil 3.2 : Eğrilik yarıçapı, kanal genişliği ve dönüş açısına bağlı olarak yersel kayıp katsayıları. [7].....	15
Şekil 3.3 : (a)Tatlı su kamasının şematik gösterimi. (b)Tuzlu su kamasının şematik gösterimi.	18
Şekil 4.1 : İstanbul Boğazı için debi ve derinlik değerlerinin su seviyesi farkına göre değişimi. [1].....	19
Şekil 4.2 : Çanakkale Boğazı için debi ve derinlik değerlerinin yükseklik farkına göre değişimi.	20
Şekil 4.3 : İstanbul Boğazı için debi ve derinlik değerlerinin yükseklik farkına göre değişimi.....	21
Şekil 4.4 : Çanakkale Boğazı için debi ve derinlik değerlerinin yükseklik farkına göre değişimi.	21
Şekil 4.5 : (a) İstanbul Boğazı için farkı tuzluluk değerlerine göre üst ve alt akımın duracağı su seviyesi farkı (Δh) limit değerleri. (b) Çanakkale Boğazı için farkı tuzluluk değerlerine göre üst ve alt akımın duracağı su seviyesi farkı (Δh) limit değerleri.	22
Şekil 4.6 : Sannino [2] çalışmasında elde edilen üst ve alt akım debileri ve net debi farkı değerlerinin mevcut model sonuçları ile karşılaştırılması..	23
Şekil 5.1 : Boğaz boykesitinin şematik gösterimi. [8].....	25
Şekil 5.2 : İstanbul Boğazındaki akım yapısının tabakalar arası karşımı ile birlikte şematik gösterimi. [8].....	26
Şekil 5.3 : Debi ve tuzluluk değerlerinin şematik gösterimi. [8].....	27
Şekil 5.4 : Çanakkale Boğazı boyunca mesafeye göre derinlik değerleri($h_1(x)$ ve $h_2(x)$) ve hız değerleri ($V_1(x)$ ve $V_2(x)$).	31
Şekil 5.5 : Çanakkale Boğazı boyunca mesafeye göre Richardson sayıları ($Ri_{01}(x)$ ve $Ri_{02}(x)$) ve karışım debileri değerleri ($Q_{m12}(x)$ ve $Q_{m21}(x)$).	31

Şekil 6.1	: Boğazdaki iki tabakalı akım ve karışım mekanizmasının şematik gösterimi.	34
Şekil 6.2	: İstanbul Boğazı için ortalama akım şartlarında debi ve derinlik değerlerinin Δh 'nin bir fonksiyonu olarak değişimi ($a = 5 \times 10^{-4}$ ve $b = -1$); Sümer ve Bakioğlu [1] çalışmasındaki debi ve derinlik değerleri ile karşılaştırılması.	37
Şekil 6.3	: İstanbul Boğazı için ortalama akım şartlarında karışım debileri ve tuzluluk değerlerinin Δh 'nin bir fonksiyonu olarak değişimi ($a = 5 \times 10^{-4}$ ve $b = -1$)	38



TABAKALI AKIMLARIN HİDRODİNAMİĞİ, AKIM VE KARIŞIM PARAMETRELERİNİN MATEMATİK MODELİ

ÖZET

İnsanlık tarihi boyunca boğazlar önemli bir odak noktası olmuştur. Bu ilginin temel nedeni boğazların okyanuslara, denizlere, göllere kıyasla çok farklı bir yapıya sahip olmasıdır. Boğazlar kabaca iki denizi birbirine bağlayan dar kanallar olarak tanımlanabilir. Tüm bunlara ek olarak boğazların sahip olduğu iki tabakalı akım yapısı, boğazlara karşı olan merak ve ilgiyi daha da arttırmaktadır.

Boğaz yapılarındaki tabakalaşma birbirine zıt yönlü akımlardan oluşmaktadır. Boğazlardaki bu zıt yönlü akımı ise boğazın birbirine bağladığı iki büyük su kütlelerinin su seviyesi farkı ve yoğunluk farkı oluşturmaktadır. Su seviyesi farkının neden olduğu yüksek potansiyelden düşük potansiyele doğru oluşan, yoğunluk farkından kaynaklanan yüksek yoğunluğa sahip kısımdan düşük yoğunluğa sahip kısma doğru akan zıt yönlü ikinci bir akım mevcuttur. Aktarılan bu tabakalı sistemin hidrodinamiğinin ve akım koşullarının incelenmesi ve daha iyi anlaşılabilmesi için gerek saha ölçümleri gerekse matematiksel ve sayısal modeller uzun bir süredir kullanılmaktadır.

Öncelikle literatürde tabakalı akımların hidrodinamiği ve akım koşulları için yapılan çalışmalar incelenmiştir. Yapılan bu kapsamlı çalışmalar sayesinde tabakalı akımlar derinlemesine incelenmiş ve tabakalı akımların akım mekanizması bu tez kapsamında özetlenmiştir. Özellikle yapılan saha ölçümleri ve matematiksel modellerin birbiri ile kıyaslanması bu konunun ne kadar ilgi çekici ve bir o kadar önemli olduğunun en önemli göstergelerindendir.

Yapılan çalışmalar gösteriyor ki oluşan tabakalaşmanın stabilitesinin ölçütü olarak boyutsuz Richardson sayısı kullanılmaktadır. Tabakalar arası karışım Richardson sayısına bağlı bir fonksiyon olarak ifade edilebilmektedir. Farklı akım koşullarına göre, Richardson sayının değerine göre, bu fonksiyon için farklı kasayılar da tercih edilmekte olup bu durum akımın Reynolds sayısı ile ilişkilendirilmektedir. Özellikle Richardson sayısının çarpanı ve üssü olan sabitlerin belirlenebilmesi için birçok farklı yaklaşım söz konusudur. Bu yaklaşım için karışımın Richardson sayısı ile ters orantılı olacağı genellemesini yapmak yanlış olmayacaktır. Yani Richardson sayısı arttıkça ara yüzeydeki karışım miktarı azalırken Richardson sayısı azaldıkça ara yüzeydeki karışım miktarı artmaktadır. Bir diğer önemli nokta ise tabakalar arası hızların zıt yönlü olmasından dolayı hız değerlerinin toplamıyla işlem yapmak gerektiridir.

Tabakalı akımların hidrodinamiği ve akım koşullarını inceleyen disiplinde yapılan birçok çalışmada genellikle tabakalar arası karışım ihmal edilip çözüm mekanizması geliştirilmiştir. Tabakalar arası karışımın ihmal edilmediği çalışmalarda ise çok daha karmaşık sistemlerin çözülmesi zorluğu ortaya çıkmaktadır. Bu tez kapsamında da tabakalar arası karışım göz ardı edilmeden ve boğazın hidrodinamik koşulları yansıtılarak daha etkin bir çözüme ulaşmak hedeflenmiştir. Bu etkin matematiksel çözümün girdi parametreleri değiştirilerek istenilen herhangi bir boğaz için çözüme

ulaşabilmek bu tezin ortaya çıkışında temel yapı taşı olmuştur.

Amaçlanan bu hedef doğrultusunda, modelin uygulanması için en uygun boğaz sisteminin ülkemizde bulunan ve Avrupanın da en önemli boğaz sistemlerinden biri olan İstanbul ve Çanakkale Boğazları (Türk Boğazlar Sistemi) olduğu su götürmez bir gerçektir. Gerek tarih boyunca taşıdıkları önem gerekse fiziki özelliklerinden dolayı bir çok kapsamlı çalışmaya konu olan bu boğaz sistemi bu tez kapsamında da incelenmiş ve karışım mekanizması ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Modelde amaçlanan bir diğer nokta ise girdi parametrelerinin değiştirilerek farklı akım koşulları için sonuçların elde edilebilmesidir. Alt ve üst tabakaların akım debileri ve tabaka derinlikleri daha önce yapılmış olan çalışmalar ışığında alınan ortalama girdi parametreleri değerleri ile hesaplanmıştır. Özellikle boğazlardaki yoğunluk farkına neden olan tuzluluk oranının farklı değerler alması halinde model sonuçlarının nasıl değişeceğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Daha sonra farklı tuzluluk değerlerinin alt ve üst akımın debi ve derinlik değerlerine etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için model tuzluluk farkına göre parametrik olarak çalıştırılmıştır. Bu aşamada üst ve alt tabaka akımlarının baskılanıp durma seviyesine geldikleri limit su seviyesi farkı değerleri de hem İstanbul Boğazı hem de Çanakkale Boğazı için tuzluluk farkı bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlardan açıkça görülmektedir ki, üst ve alt tabakadaki tuzluluk farkı arttıkça akımı durma noktasına getiren limit su seviyesi farkı da hem üst hem de alt tabaka için artmaktadır. Bu matematik model sonuçları, daha önce yapılan çalışmasında elde edilen üst ve alt akım debileri ve net debi farkı değerleri ile karşılaştırıldığında uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Bu yüksek lisans tezi kapsamında uygulanan matematik model ile daha önce ortaya konulmuş olan dört bilinmeyenli dört denklem takımı esas alınarak, bunlara ek olarak dört bilinmeyen ve dört denklem takımı daha eklenerek tabakalı akımların hidrodinamiği ve akım koşulları göz önünde bulundurularak karışım mekanizması çözülmeye çalışılmıştır. İlk denklem takımında bilinmeyenler alt ve üst tabaka debileri ve boğaz yapısının iki ucundaki su seviyesi yükseklikleridir. Bu bilinmeyenlerin çözümünde kullanılan denklem takımları ise iki adet enerji denklemi ve iki adet su kütlesi korunumu denklemi ve Froude Şartı denklemidir. Bu tez kapsamında karışım mekanizmasının da çözümlenebilmesi için eklenen dört bilinmeyen ise alt tabakadan üst tabakaya ve üst tabakadan alt tabakaya geçen karışım debileri ve boğaz yapısının giriş-çıkışındaki tuzluluk değerleridir. Çözüm için kullanılan ek denklemler ise iki adet karışım hızı denklemi ve iki adet tuz kütlesi sürekliliği denklemleridir. Hazırlanan bu denklem takımları neticesinde alt tabakadan üst tabakaya, üst tabakadan alt tabakaya geçen karışım debileri ve tuzluluk değişimleri ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Çanakkale Boğazı'nın ortalama su seviyesi için karışım içeren matematiksel modelden elde edilen matris incelendiğinde, üretilen bulguların literatürdeki değerlerle örtüşmediği ortaya çıkmaktadır. Bu farklılığın olası nedenini belirlemek için kullanılan denklem setlerinin sonuçları dikkatlice incelenmiştir. Modelde kullanılan Froude durum denklemlerinin Çanakkale Boğazı için istenen sonucu veremeyebileceği, çünkü Çanakkale Boğazı'nın geometrisinin neden olduğu su seviyesi ve akış rejimindeki kademeli değişimin durumu yansıtamayacağı sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak İstanbul Boğazı için elde edilen karışım debileri ve tuzluluk değerleri bu güne kadar yapılmış olan modellerle ve saha ölçümleri ile karşılaştırıldığında tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle oluşturulan modelin tüm tabakalı akımlar için girdi parametrelerini belirleyerek sonuç vermesi ve diğer matematiksel modellere kıyasla işlem yükünün daha az olması bu modelin avantajlarıdır. Unutulmamalıdır ki bu tür matematik model yaklaşımları hem saha ölçümlerine hem de laboratuvar deneylerine

ek olarak bu tarz mekanizmaların incelenmesinde ve anlaşılmasında çok önemli rol oynamaktadır.

Tüm bunlara ek olarak, modeldeki karışım mekanizmasının daha hassas temsil edilebilmesi için, karışım denklemleri Boğaz boyunca her 100 m aralık için çözülmüş ve matematik modele toplam karışım debisi olarak yansıtılmıştır. Ancak bu yaklaşımla da elde edilen sonuçlarda İstanbul ve Çanakkale Boğazı için aynı sonuçlar elde edilmiş ve işlem yükü çok daha üst seviyelere gelmiştir. Yani bu yüksek lisans tezinin çıkış noktası olan boğazdaki karışım debilerinin etkili ve pratik bir şekilde hesaplanabilmesi ilkesinin dışına çıkmış olmaktadır.





HYDRODYNAMICS OF STRATIFIED CURRENTS, MATHEMATICAL MODELING OF CURRENT AND MIXTURE PARAMETERS

SUMMARY

Throughout human history, straits have been a significant focal point. The main reason for this interest is that the straits have a very distinct structure compared to the oceans, seas, and lakes etc. Straits can be roughly defined as narrow channels connecting two seas. In addition to all these, the two-layer current system of the straits further increases the curiosity and interest in the phenomenon.

Stratification in the sea-strait flows consists of currents, following layers of opposite directions. The reason for the opposite direction of flow in the straits is the difference in sea level and density. There is a current from high energy to low energy caused by the sea level difference, and a second counter current flowing from the high density to the low density due to the density difference. Both field measurements and mathematical/numerical models have been used for a long time to define and examine the hydrodynamics and flow conditions of stratified fluids.

First of all, the studies on hydrodynamics and flow conditions of stratified flows in the literature were examined. In former comprehensive studies, stratified currents were examined profoundly and the flow mechanism of stratified flows was summarized within the scope of thesis. Especially, the comparison of field measurements and mathematical models with each other is one of the most significant signs of how interesting and remarkable subject is.

According to former research, the dimensionless Richardson number is used as a benchmark of the stability of the stratification. Different Richardson number ranges are also preferred to classificalt different flow conditions. Mixture between layers is defined as a function of Richardson numbers. Tis mechanism is associated with Reynolds number of currents. There are many different approaches, especially for the determination multiplayer and power of Richardson number in the function. It would not be wrong to generalize that the Richardson number is inversely proportional with the mixture. In other words, as the Richardson number increases, the amount of mixing at the interface decreases and vice versa. Another crucial point is that since the velocities between the layers are in opposite directions, it is necessary to operate with the sum of the velocity values.

Mixing in stratified flows is frequently ignored in many research in the subject of hydrodynamics and flow conditions of stratified flows, and a solution method has been examined without mixing conditions. In studies where the mixing between layers is not neglected, the difficulty of solving much more complex systems arrises. Within the scope of this thesis, it has been much more motivating to reach a more effective solution without ignoring the interfacial mixing and by put forward the hydrodynamic conditions of the strait. The fact that this effective mathematical solution can give accurate results when compared with field measurements and mathematical models with input parameters has been the starting point of this thesis.

The Bosphorus and Dardanelles (İstanbul and Çanakkale Straits, Turkish Straits System), which are located in our country and are also one of the most significant strait systems in Europe, without a doubt the most suitable strait system for implementation of this thesis's, This strait system, which has been the subject of many comprehensive studies throughout history due to its importance and its physical characteristics, has been examined within the scope of thesis and the mixing mechanism has been tried to be examined.

Another goal in the model is to obtain results for different flow conditions by changing the input parameters. Flow rates and layer depths of the lower and upper layers were calculated with the average input parameter values obtained in the light of former studies. In particular, it aims to determine how the model results will change if the salinity ratio, which causes the density difference in the straits, takes different values. Then, the model was run parametrically according to the salinity difference in order to better understand the effects of different salinity values on the flow and depth values of the upper and lower flow. At this stage, the limit water level difference values at which the upper and lower layer currents are suppressed and come to a stop were also obtained as a function of the salinity difference for both the Bosphorus and the Dardanelles. It is clear from these results that as the salinity difference in the upper and lower layers increases, the limit water level difference, which brings the flow to a standstill, also increases for both the upper and lower layers. Consistent results were obtained by comparing these mathematical model results with the upstream and downstream flow rates and net flow difference values obtained in the previous study.

With the mathematical model applied within the scope of this thesis, the mixing mechanism was tried to be solved by taking into account the hydrodynamics and flow conditions of the stratified flows, by adding four more unknowns and four equations, on the existing set of four equation based on the previous studies. The unknowns in the first set of equations were the bottom and upper layer flow rates and layer thicknesses the sea levels heights at both ends of the straits structure. The sets of equations used in the solution of these unknowns are two energy equations, conservation of mass of water and Froude Condition equations. In this thesis, the four unknowns added in order to analyze the mixing mechanism are the flow rate from the lower layer to the upper layer, that from the upper layer to the lower layer, and the salinity values of the layers at the entrance and exit of the strait structures. The equations used for the solution are two mixing rate equations and two salinity mass continuity equations. As a result of these prepared sets of equations, the mixture flow rates and salinity changes from the lower layer to the upper layer, from the upper layer to the lower layer were tried to be examined.

When the resulting matrix from the mixture-included mathematical model is studied for the average water level of the Dardanelles, it becomes clear that the findings produced do not correspond to the values in the literature. The outcomes of the used equation sets were carefully scrutinized in order to determine the potential reason of this discrepancy. The analysis has led to the conclusion that the Froude condition equations employed in the model may not produce the desired outcome for the Dardanelles Strait because the gradual change in the water level and flow regime caused by the geometry of the Dardanelles may violate the condition.

As a result, two-layer mixing flow rates and salinity values for the Bosphorus give consistent results when compared with existing models and field measurements. In particular, the fact that the develops can be used for all stratified straits and that the

computational load is less compared to other mathematical models are the advantages of this models. It should be noted that such mathematical model approaches will continue to play a crucial role in the further research and for understanding of such mechanisms, in addition to both field measurements and laboratory experiments. In addition to all of these, the mixing equations were solved for every 100 m interval along the Bosphorus and Dardanelles and reflected in the mathematical model as the overall mixing flow rate, in order to more accurately portray the mixing process in the model. The Bosphorus and the Dardanelles have shown the same results as the Dardanelles in the findings achieved with this technique, and the processing load has significantly increased. In other words, the master's thesis's guiding principle, which is the effective and practical estimation of the mixing flow rates in the straits, is broken.



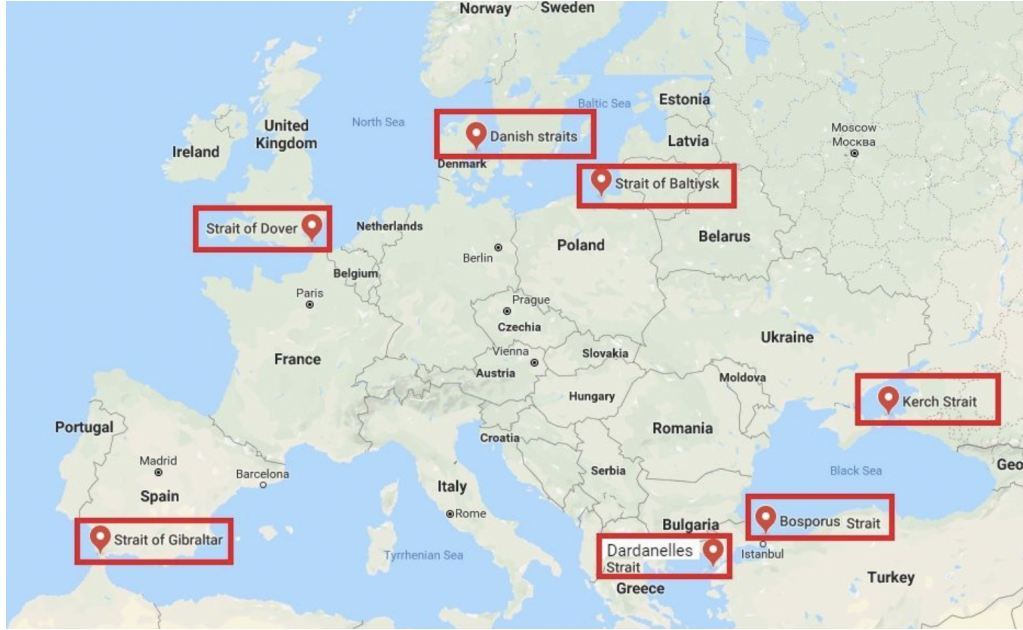


1. GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

Toplumlar insanlık tarihi boyunca en az yaşadıkları ana karaya gösterdikleri ilgiyi okyanuslara, denizlere, göllere, akarsulara ve boğazlara göstermişlerdir. Özellikle su yapıları disiplini içerisinde boğazlar, iki deniz alanını birleştiren doğal ve dar su yolu olduğu için coğrafik, hidrografik, meteorolojik ve jeolojik özellikleri her daim ilgi çekici ve bir o kadar önemli olmuştur.

Yüzyıllardır dünyada ve ülkemizde boğazlar çok önemli bir rol teşkil etmektedir. Avrupa kıtası farklı fiziki ölçütlere sahip birçok boğaza sahiptir. Avrupa kıtasının önemli boğazları Şekil 1.1’de verilmiştir. Özellikle ülkemizde bulunan İstanbul ve Çanakkale Boğazı (Marmara Denizi ile birlikte Türk Boğazlar Sistemi) hem birbirine olan yakınlıklarından hem de Avrupa kıtasının en uzun boğazları olması nedeniyle çok önemli bir değere sahiptirler. [9]



Şekil 1.1 : Avrupa kıtasındaki önemli boğazlar.

Bu tez kapsamında karmaşık bir akım hidrodinamiğine sahip olan boğazların akım ve karışım parametrelerinin matematiksel modelinin ortaya konulması amaçlanmıştır. Özellikle bu kompleks yapısından ve hayatta üstlendiği önemden dolayı boğazlar birçok kapsamlı çalışmaya konu edilmiştir. Literatürde hem saha ölçümlerine dayalı hem de matematiksel modellere dayalı birçok çalışma bulunmaktadır. Geçmiş ve yakın geçmişte incelenen çalışmalar gösterdi ki boğaz yapısının, özellikle zıt ve iki yönlü akım şartlarından dolayı, tam olarak belirlenip bir matematik modelle ortaya konulması gerçekten çok zor olmaktadır.

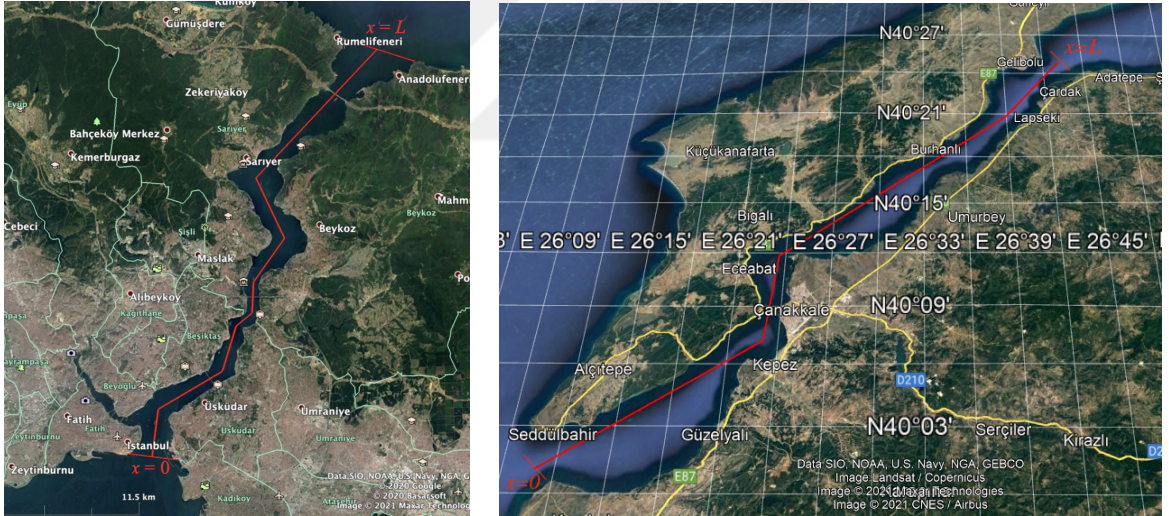
Sonraki bölümlerde ayrıntılı olarak irdeleneceği üzere, boğazlar birbirine zıt yönlü olmak kaydıyla iki tabakadan oluşmaktadır. Bu tabakalı yapıda akışın oluşmasında yoğunluk farkı ve su seviyesi farkı etkin rol oynamaktadır. Bu mekanizmanın anlaşılabilmesi için yapılan çalışmalarda üst ve alt tabaka arasındaki karışım debileri, akım debilerine göre küçük olmaları nedeniyle çözüme ulaşılabilmek için genellikle ihmal edilmiştir. Tabakalar arası karışımın ihmal edilmediği çalışmalarda ise çok daha karmaşık sistemlerin çözülmesi zorluluğu ortaya çıkmaktadır. Bu tez kapsamında ise tabakalar arası karışım göz ardı edilmeden ve boğazın hidrodinamik koşulları yansıtılarak daha etkin bir çözüme ulaşabilmek çok daha motive edici olmuştur. Bu etkin matematiksel çözümün girdi parametreleri ışığında istenilen her boğazda yapılan saha ölçümleri ve matematiksel modellerle karşılaştırıldığında doğru sonuç verebilmesi bu tezin ortaya çıkışında temel yapı taşı olmuştur.

2. TABAKALI AKIMLARIN HİDRODİNAMİĞİ VE KARIŞIM

Bu bölümde; konunun temel mekanizması açıklanarak literatürdeki geçmiş ve günümüz çalışmaları gözden geçirilerek olgunun kapsamı belirlenecektir.

2.1 İstanbul ve Çanakkale Boğazlarının Fiziki Yapısı

İstanbul ve Çanakkale Boğazları ülkemizin en batısında Marmara Bölgesi'nde bulunmaktadır. Uzunlukları ve birbirine olan yakınlıkları açısından büyük bir öneme sahiptirler. Bu iki boğaz Marmara Denizi ile birlikte Ege Denizi ve Karadeniz'i birbirine bağlayan Türk Boğazlar Sistemi'ni oluşturmaktadır.



Şekil 2.1 : Google Earth hava fotoğrafı üzerinde İstanbul ve Çanakkale Boğazları Gösterimi.

Karadeniz sularının tek çıkış yolu olan İstanbul Boğazı, Tuna, Dinyeper ve Don gibi üç büyük akarsu ve sayısız küçük su ile beslenmektedir. Uluslararası diğer sularla karşılaştırıldığında çok dar ve bir o kadar kıvrımlı bir yapıya sahiptir. Girintili-çıkıntılı yapısı hemen hemen kendini her bölgede göstermekte ve toplamda

12 kıvrımdan oluşmaktadır. Boğaz'ın en yakın iki yakası 698 m ile Anadoluhisarı ve Rumelihisarı'dır.

İstanbul Boğazı, Karadeniz ile Marmara Denizi'ni birbirine bağlayan, 30 km uzunluğunda, ortalama 60 m derinliğinde ve 700-3500 m genişliğindedir. En derin kesitte derinlik 100 m, en dar kesitte ise genişlik 700 m'dir. [8]

İstanbul Boğazı'nın yaklaşık olarak iki katı uzunluğunda olan Çanakkale Boğazı ise 75 km uzunluğunda ve minimum genişlik 1.3 km'dir. Marmara Denizinde en derin noktanın derinliği 1350 m'dir, fakat ortalama derinlik yaklaşık 600 m'dir. [10]

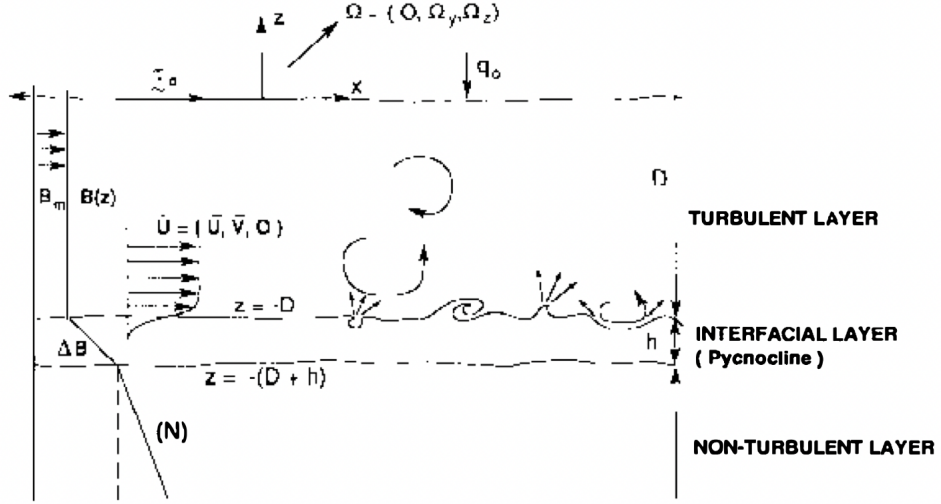
Çanakkale Boğazı'nda da tıpkı İstanbul Boğazı'nda olduğu gibi iki yönlü akım mevcuttur. İlki yükseklik farkından dolayı Karadeniz'den Ege Denizi'ne doğru akan yüzey akıntısı (üst tabaka), ikincisi ise ters istikamette yoğunluk farkından dolayı Ege Denizi'nden Karadeniz'e doğru akan dip akıntısıdır (alt tabaka). Boğazın batı yakasını Gelibolu Yarımadası, doğu yakasını ise Biga Yarımadası oluşturmaktadır.

2.2 Fiziki Ölçüm ve Sayısal Modeller

Marsigli [11], 17. yüzyılda yaptığı çalışmalarla İstanbul Boğazı'ndaki ilk bilimsel gözlemleri ve deneyleri yapan kişi olarak kabul edilebilir. Bu çalışmanın yanı sıra, Assaf ve Hecht [12], deniz boğazları için iki katmanlı dinamik bir model geliştiren ilk araştırmacılar olarak görülmektedir. Anati vd. [13], bir boğazdaki mevcut sistem hakkında iyi bir fikir veren deniz boğazlarının laboratuvar modellerini incelemiştir.

Marmara Denizi'nde bulunan İstanbul ve Çanakkale Boğazı'nda iki tabakalı akım söz konusudur: a) üst tabaka akımı su seviyesi farkından (Δh) kaynaklanırken, b) alt tabaka akımı tuzluluk farkının neden olduğu yoğunluk farkından ($\Delta \rho$) kaynaklanmaktadır. Üst tabaka akımı, İstanbul Boğazı'nda Karadeniz'den Marmara Denizi'ne doğru iken Çanakkale Boğazı'nda Marmara Denizi'nden Ege Denizi'ne doğrudur. Alt tabaka akımı ise İstanbul Boğazı'nda Marmara Denizi'nden Karadeniz'e doğru iken Çanakkale Boğazı'nda Ege Denizi'nden Marmara Denizi'ne doğrudur. [1]

Fernando [5] iki tabakalı akımların şematik gösterimini Şekil 2.2'deki gibi ortaya koymuştur. Bu yaklaşımda alt tabakanın durağan olduğu kabul edilmektedir. Üst tabakada türbülansın varlığını, alt tabakada ise türbülanssız bir yapının oluştuğunu ve bu iki tabaka arasında kalan kısmın ise geçiş bölgesi olduğunu ileri sürmüştür.



Şekil 2.2 : İki tabakalı akımlarda karışımın şematik gösterimi. [5]

Özsoy vd. [14], Karadeniz ve Akdeniz'den gelen ters akımın İstanbul Boğazı'ndan geçerken birbirine karıştıklarını ortaya koymuşlardır. İstanbul Boğazı'nın topoğrafik yapısı nedeniyle, akışın Boğaz'ın güney kısmındaki dar yapısından dolayı hızlandığını ve alt tabakadan üst tabakaya doğru karışım miktarının aniden arttığını vurgulamışlardır. Buna karşı, alt tabaka tuzluluğun önce boğaz boyunca kademeli olarak karıştığını, daha sonra ise geniş kıta sahanlığından dolayı kuzeye doğru azaldığını belirtmişlerdir.

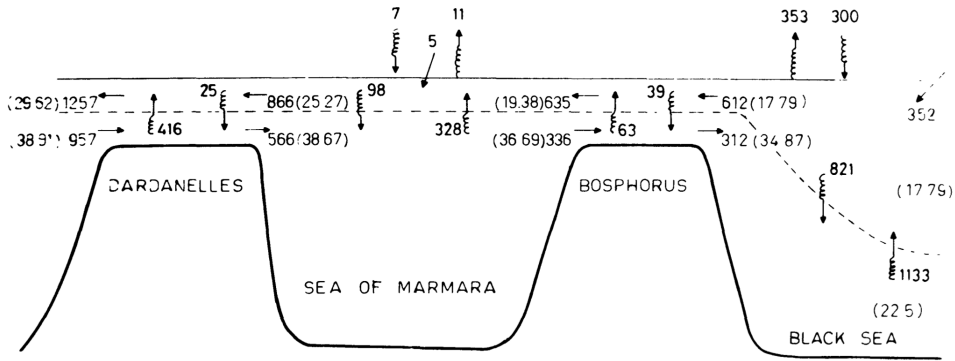
Yapılan çalışma ve ölçümlerde Karadeniz ve Marmara Denizi arasındaki ortalama su seviyesi farkı, Δh , 33 cm olarak belirlenmiştir (Ceçen vd. [15]; Sümer ve Bakioglu [1]; Gregg ve Özsoy [16]).

Su seviyesi farkı $\Delta h = 33 \text{ cm}$ için, İstanbul Boğazı'nda herhangi bir katı madde taşınımı gözlenmemektedir. Çünkü bu akım koşulunda ortaya çıkan Shields parametresi, tabanda hareketin başlangıç eşik değerinin altında kalmaktadır. Fakat Δh değeri düştükçe alt tabaka akımı güçleneceği için Shields parametresi katı madde hareketinin başlayabileceği değerler alabileceğinden, bu akım koşullarında zayıf da olsa bir katı madde taşınımı oluşabilecektir. [1]

İki tabakalı boğaz akımlarında genellikle yoğunluk Froude sayısının 1'den küçük olması sebebiyle bu ara tabakada net bir yoğunluk gradyanı bulunmamakta, böylece bu tabaka ayrı bir tabakadan ziyade arayüzey olarak tanımlanmaktadır. [1]

Yapılan bir diğer kapsamlı çalışmada da boğazlarda basınç, tuzluluk, sıcaklık ve rüzgar gibi değişken parametrelerin önemi vurgulanmıştır. Özsoy vd. [9] Marmara Denizi'nde tuzluluk değerleri için yaptığı karşılaştırmalı çalışmada bu değerlerin İstanbul Boğazı'nda alt tabaka için 38.5 ppt ve üst tabaka için 17 ppt iken Çanakkale Boğazı'nda alt ve üst tabaka için sırasıyla 39 ppt ve 25 ppt alınabileceğini önermiştir. (Özsoy vd. [9]; DAMOC [17])

Ünlüata vd. [6] yaptıkları saha ölçümleri neticesinde Türk Boğazlar Sistemi için debi ve tuzluluk değerleri ile tabakalar arasındaki karışım miktarını Şekil 2.3'teki gibi önermiştir. Ortalama olarak, İstanbul Boğazı'ndan yüzeysel olarak akan 17.8 ppt tuzlulukta Karadeniz suyunun 19.4 ppt tuzlulukla Marmara Denizi'ne girdiği görülmektedir. Marmara Denizi'ni geçerken tuzluluk oranı yaklaşık 6 ppt kadar artar. 4 ppt daha artırdıktan sonra 29.62 ppt tuzluluk ile Çanakkale Boğazı'ndan çıkmaktadır. Öte yandan, Çanakkale Boğazı'na giren 38.9 ppt tuzlulukta Ege suyu, tuz içeriğinde çok az değişikliklerle boğazı geçmektedir. Marmara havzasında bu suyun tuzluluğunda yaklaşık 2 ppt'lik bir azalma gözlenmektedir. Akdeniz suları, İstanbul Boğazı'ndan geçerken 2 ppt daha seyreltikten sonra, yaklaşık 35 ppt ile Karadeniz'e girmektedir.



Şekil 2.3 : Marmara Denizi ve boğazlardaki debi ve tuzluluk değerleri. Birimler $km^3/yıl$ olarak verilmiştir. [6]

Karadeniz'den İstanbul Boğazı'na giren üst tabaka debisi $612 km^3/yıl$ iken, İstanbul Boğazı'ndan geçen ve Marmara Denizi'nden çıkan debi $636 km^3/yıl$ 'dır. Bu debi değerlerine bakıldığında üst tabaka debisinin çok fazla değişmediği görülmektedir. Çanakkale Boğazı'na Marmara Denizi ile birleştiği noktada giren üst akım debisi, İstanbul Boğazı'ndan çıkan debiden $230 km^3/yıl$ daha fazladır. Çanakkale Boğazı'nda ise $391 km^3/yıl$ daha artmaktadır. Çanakkale Boğazı'na $957 km^3/yıl$ debi ile giren

Akdeniz suları Marmara Denizi'ne sırasıyla $566 \text{ km}^3/\text{yıl}$ ve $336 \text{ km}^3/\text{yıl}$ debi ile İstanbul Boğazı'na girmektedir. [6]

Özsoy ve Altıok [9], İstanbul ve Çanakkale Boğazı için yaptıkları çalışmalarda tabakalar arası büyük debi geçişleri olduğunu vurgulamıştır. İstanbul Boğazı'nda, Akdeniz su akışının yaklaşık %25'i üst katmana, Karadeniz suyunun yaklaşık %7'si alt katman akışına sürüklenmektedir. Hesaplamalar, Ege Denizi'nden gelen akışın %45'inin Çanakkale Boğazı'ndaki üst katmana taşındığını göstermektedir; Marmara Denizi'ne ulaşan miktarın %45'i üst katmana taşınmaktadır. Öztürk ve Altaş [18], farklı meteorolojik, hidrolojik ve gel-gide bağlı parametrelerin İstanbul Boğazı akımına etkisini detaylı olarak ortaya koymuşlardır.

Boğazda meydana gelen mevsimsel değişkenlikleri de inceleyen birçok çalışma yapılmıştır. Örneğin, Peneva vd. [19], Karadeniz'in akış, yağış ve buharlaşma nedeniyle İstanbul Boğazı'nda oluşan etkilerini incelemişlerdir. Suyun maksimum taşınmasının Mart-Nisan aylarında ve minimumun, Ağustos ayında olduğunu belirtmişlerdir.

Yüksel vd. [20], Eylül 2004 ve Ocak 2006 arasında elde ettikleri su seviyesi, akım hızları, rüzgar hızları ve atmosfer parametreleri ölçümleri ile iki tabakalı akımların davranışlarını inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Jarosz vd. [21], 2008-2009 zaman aralığında İstanbul Boğazı'nda yaptıkları düşey akım hızı, tuzluluk ve sıcaklık profilleri fiziki ölçümleri ile üst ve alt tabaka debilerini elde etmişlerdir.

Beşiktepe vd. [22], 1986-1989 yılları arasında toplanan kapsamlı veri seti ile İstanbul Boğazı'nda akım hızı, tuzluluk ve sıcaklık profili ölçümlerini değerlendirmiştir. Üst ve alt akım debileri ile boğaz boyunca tabakalar arasındaki karışım debilerini hesaplamıştır.

Tüm bu yaklaşımların yanı sıra Marmara Denizi'nde çeşitli sayısal modeller de ortaya konmuştur. Örneğin, Sözer ve Özsoy [23], Sannino vd. [2], Ilıcak vd. [24], Koşucu vd. [25], yaptıkları matematik çalışma ile İstanbul Boğazı'ndaki iki tabakalı akımı modellemişlerdir. Öztürk vd. [26], ve Öztürk [27] İstanbul Boğazı akımının değişimini üç boyutlu sayısal modellerle modellemişlerdir ve tabakalı akımda kuvvetli bir karışım tabakasının oluştuğunu ortaya koymuşlardır. Oğuz vd. [28], İstanbul Boğazı'nın hidrodinamiğini matematiksel olarak incelemek için bir iki boyutlu sayısal

model kullanmış, taban sürtünmesinin üst ve alt tabaka debileri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Öztürk vd. [29], İstanbul Boğazı'ndaki akıntı enerjisi potansiyel enerjisini belirleyebilmek için bir çalışma yürütmüşlerdir.

2.3 Arayüzey Sürtünme Katsayısı

Taban sürtünme katsayısının belirlenmesinde olduğu gibi iki tabakalı akımların arayüzey sürtünme katsayısının belirlenmesi konusunda da birçok çalışma yapılmıştır. Örneğin, Abraham vd. [30], oluşan bu arayüzey ile üst tabaka ve alt tabaka arasında bir momentum geçişinin olduğunu ortaya koymuştur. Arayüzey sürtünme katsayısının ise Reynolds sayısı (Re), Richardson sayısı (Ri) ve akış rejiminin bir fonksiyonu olduğunu belirlemiştir.

Grubert [31], yapmış olduğu deneysel çalışmada arayüzey sürtünme katsayısını farklı durumlar için araştırmış ve kesitsel ortalama hız ile açıklamıştır. Bir diğer deneysel çalışmada ise Partheniades ve Dermisis [32], arayüzey sürtünme katsayısının en iyi ilişkilendirilebileceği kavramlar olarak Reynolds sayısı (Re), Froude sayısı (Fr) ve yoğunluk farkını ($\Delta\rho/\rho$) işaret etmiştir.

2.4 Richardson Sayısı ve Tabakalar Arası Karışım Mekanizmasındaki Yeri

Tabakalar arasındaki karışımı kontrol eden en önemli boyutsuz parametre Richardson sayısıdır.

$$Ri_0 = \frac{g\Delta\rho H}{\rho\Delta V^2} \quad (2.1)$$

Burada Ri_0 genel Richardson sayısı, g yerçekimi ivmesi, H karışımın girdiği tabakanın kalınlığı ve ΔV ise iki tabaka hızları arasındaki farktır. Tabakalar arası hızların yönlerinin zıt olması durumunda hızların toplamıdır. [8]

Tabakalar arası karışım hızlarının Richardson sayısının güçlü fonksiyonları olduğunu öne süren, iki tabakalı akımlar için karışım mekanizmalarını değerlendiren önemli çalışmalar yapılmıştır [33], [34], [35]. Bir tabakadan diğer tabakaya karışım hızı v olmak üzere boyutsuz karışım hızı (karışım oranı) Richardson sayısının bir fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde önerilmektedir:

$$\frac{v}{V} = \text{fonksiyon}(Ri_0) \quad (2.2)$$

Bu fonksiyonun belirlenmesi için yapılan birçok deneysel çalışmada genel olarak aşağıdaki şekilde Richardson sayısına bağlı bir üssel fonksiyon önerilmiştir.

$$\frac{v}{V} = a \times (Ri)^b \quad (2.3)$$

Bu çalışmanın sonraki bölümlerinde ayrıntılı olarak ele alınacağı üzere a ve b katsayıları için Richardson sayısının farklı mertebelerine göre değişik değerler önerilmiştir.

Çeşitli akım koşulları altında yapılan deneysel araştırmalar ışığında, yapılan gözlemler Richardson sayısına bağlı olarak karışım mekanizmasında önemli farklılaşmaları işaret etmektedir. Örneğin, Kantha vd. [36] kayma hızı ile boyutsuzlaştırdığı sürtünme Richardson sayısını (Ri_*) kullanır. Moore ve Long [37] çalışmasında da niteliksel olarak benzer gözlemler ve sürtünme Richardson sayısı (Ri_*) kullanılmış olmasına rağmen a ve b sabitleri için farklı değerler önerilmiştir. Pedersen [38] ise yapmış olduğu çalışmada tarabakalar arası karışımı genel Richardson sayısını kullanarak karışımı aynı biçimde ilişkilendirmiştir.

Göllerde, rezervuarlarda ve özellikle boğazlarda sıcaklık ve/veya tuzluluk tabakalaşmada önemli rol oynamaktadır. Oluşan bu tabakalaşmanın gerçeğe yakın en iyi şekilde modellenmesinde türbülans yapısı belirleyici rol oynamaktadır. Katmanlardan en az birinde akış olduğu takdirde türbülansın yanı sıra kayma gerilmeleri de meydana gelmektedir. Bu kayma gerilmeleri de genel olarak Richardson sayısına (Ri_0) bağlı bir fonksiyon ile ifade edilebilir. [3]

Yapılan çalışmalarda, katmanlardan en az birinde akış olması halinde, türbülansın yanı sıra arayüzün kayma gerilmesinin daha birincil bir öneme sahip olduğu görüldü. Richardson sayısı (Ri_0) tabakalaşma stabilitesinin bir ölçütüdür ve artması arayüzeydeki karışım miktarını azaltır. Linear Stability (Lineer Stabilité) teorisine göre kritik değeri yaklaşık $1/4$ 'tür, bunun üzerinde sonsuz küçük bozulmalar sönümlenir ve türbülans gelişmez [30]. Tabakalı sistemlerde genel Richardson sayısı, (Ri_0), en sık kullanılandır. Çeşitli akışlarda deneysel araştırmalar sırasında yapılan gözlemler, genel Richardson sayısına bağlı olarak arayüzeyde oluşan karışım

önemli bir farklılaşmaya işaret etmektedir. Örneğin, Kantha ve vd. [36] yüzey gerilimine bağlı sürüklenme çalışmalarında, kayma hızı cinsinden tanımlanan Ri_* 'nin üç bölgesini tanımladılar. Küçük değerler için, $Ri_* < 100$, arayüzeyde büyük karışımlar gözlemlendiler. Büyük değerler, $Ri_* > 300$ için, arayüzeyin, zaman zaman ayrılan hafif dalgalanmalar ve esasen düz olduğu görüldü. Ri_* 'in orta aralığında, arayüzün kıvrımları daha küçük ölçekteydi ve bunlara yerel kararsızlıklardan kaynaklanan girdap grupları eşlik ediyordu. Niteliksel olarak benzer gözlemler Moore ve Long [37] tarafından, genel Richardson sayısının katmanlar arasındaki hız farkı olarak tanımlandığı karşı akış deneylerinde rapor edilmiştir.

Strang vd. [4] yapmış oldukları çalışmada kütle Richardson sayısını Denklem 2.4'deki gibi tanımlamıştır.

$$Ri_b = \frac{\Delta b D}{\Delta U^2} \quad (2.4)$$

Burada Ri_b kütle Richardson sayısı (bulk Richardson number), $\Delta b = g\Delta\rho/\rho_0$ hidrostatik kaldırma kuvveti, ΔU arayüzeyin üst ve altındaki hızların farkı ve D karışım yüzeyinin derinliğidir.

Atkinson [39] yapmış olduğu çalışmada farklı Reynolds sayısı aralıkları için elde ettiği sonuçları Christodoulou [3] sonuçları ile karşılaştırmış ve benzer sonuçlar orta koymuştur.

Grubert [31] yapmış olduğu deneysel çalışmalarda arayüzey karışım miktarını belirlemek için farklı Richardson sayıları kullanmıştır. Elde ettiği sonuçları öncesinde yapılan sonuçlarla karşılaştırmış ve Richardson sayısı sabitleri için çeşitli yaklaşımlarda bulunmuştur.

3. SÜMER VE BAKIOĞLU [1] MATEMATİK MODELİ

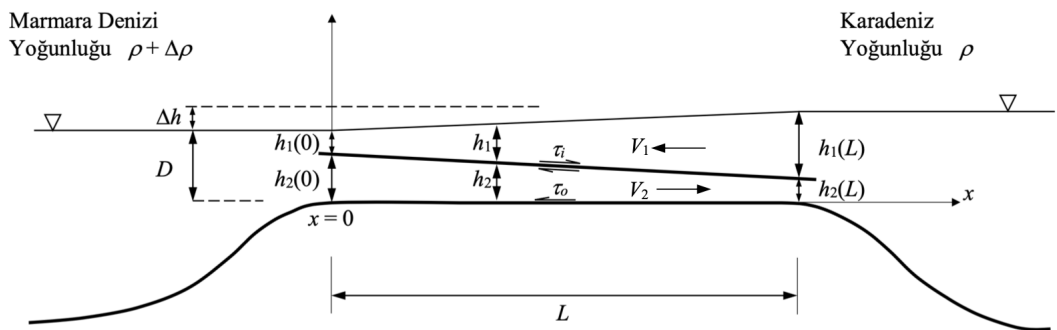
Yukarıda detaylı olarak açıklandığı üzere, boğazlar iki havzayı (denizi) birbirine bağlayan bir kanal olarak tanımlanabilir ve tabakalar zıt yönde akar. İstanbul Boğazı, Çanakkale Boğazı ve diğer birçok boğazda olduğu gibi boğazlarda genellikle iki katmanlı akım sistemi söz konusudur.

Deniz-boğaz akışının dinamiklerinin doğru bir şekilde anlaşılması; navigasyon, çevre kirliliği, atık su deşarjı ve balıkçılık gibi sorunlar ile bağlantılı olarak büyük önem taşımaktadır [1].

Sümer ve Bakioğlu [1] çalışmasındaki matematik model, özel olarak İstanbul Boğazı için kurulmuş olmasına rağmen, girdi parametreleri değiştirilerek tüm boğazlar için kullanılabilir özelliktedir. Bu çalışmada Sümer ve Bakioğlu [1] tarafından önerilen matematik model öncelikle olduğu haliyle Matlab ortamında kodlanacak, daha sonra aşağıda ayrıntılı olarak ele alındığı üzere tabakalar arasındaki karışımı da hesaplayabilecek şekilde geliştirilecektir.

3.1 Modelin İncelenmesi

Sümer ve Bakioğlu [1] çalışmasında yapılmış olan matematiksel modelle yükseklik farkı (Δh) ve yoğunluk farkı ($\Delta \rho$) değerlerine bağlı olarak dinamik denklemlerle her iki tabakanın akım debileri ve tabaka derinliklerini belirlemiştir.



Şekil 3.1 : İstanbul Boğazındaki iki tabakalı akımın matematiksel modellenmesi. [1]

3.2 Girdi Parametreleri

Sümer ve Bakioğlu [1] modelinde kullanılan girdi parametreleri, ve bu parametrelerin İstanbul Boğazı için verilen değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Benzer şekilde, girdi parametreleri ile ilgili çeşitli değerler ortaya konulmuş olmasına rağmen, bu çalışmada uygulanmak üzere Çanakkale Boğazı için de bu parametreler tespit edilmiş, yine Çizelge 3.1’de sunulmuştur. Yoğunluk farkı, uzunluk, derinlik, genişlik ve su seviyesi farkı parametreleri her iki boğaz için farklı değerlerdedir. Kullanılan bu parametreler hem alt hem de üst tabakanın debileri ve oluşan karışım debilerinin belirlenebilmesi için elzemdir.

Çizelge 3.1 : İstanbul ve Çanakkale Boğazı için girdi parametreleri.

	Yoğunluk farkı, $\Delta\rho/\rho$	Uzunluk, $L, [km]$	Ortalama Derinlik, $D, [m]$	Ortalama Genişlik, $W, [m]$	İki Deniz Arası Seviye Farkı, $\Delta h, [cm]$
İstanbul Boğazı (Sümer ve Bakioğlu [1] tarafından tespit edilen değerler)	0.014	31.25	64.5	907	33
Çanakkale Boğazı (Bu çalışma kapsamında tespit edilen değerler)	0.0085	65.5	55	4500	13.5 (Bkz. [6])

3.3 Enerji Denklemleri ve Sınır Koşulları

Sümer ve Bakioğlu [1] çalışmasında yapılan matematiksel çözümle dört bilinmeyenli dört denklem şeklinde bu problemi detaylı olarak çözümlenmiştir. Bu çözümde bilinmeyenler alt ve üst akım debileri Q_1 ve Q_2 , üst tabakanın başlangıç kalınlığı (h_{10}) ve üst tabakanın L boyundaki kalınlığıdır (h_{1L}). Bu bilinmeyenlerin çözümü için kullanılan dört denklem ise iki enerji denklemi ve iki su kütlesi sürekliliği diğer bir değişle daralma bölgelerinde (Kontrol kesitlerde) toplam Froude sayılarının toplamının 1’e eşit olması şartını sağlayan denklemlerdir.

Üst tabaka ve alt tabaka için enerji denklemleri Denklem 3.1 ve 3.2’de verilmiştir.

$$\frac{dh_1}{dx} + \frac{dh_2}{dx} + \frac{d(V_1^2/2g)}{dx} - \frac{f_i}{8gh_1}(V_1 + V_2)^2 - \sum_j k_j \frac{V_1^2}{2g} \delta(x - x_j) = 0 \quad (3.1)$$

$$(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{dh_1}{dx}) + \frac{dh_2}{dx} + \frac{d(V_2^2/2g)}{dx} + \frac{f_0}{8gh_2} V_2^2 + \frac{f_i}{8gh_2} (V_1 + V_2)^2 + \sum_j k_j \frac{V_2^2}{2g} \delta(x - x_j) = 0 \quad (3.2)$$

Burada h_1 ve h_2 üst ve alt tabaka derinlikleri, V_1 ve V_2 ise üst ve alt tabakanın kesitsel ortalama hızlarıdır. f_0 ve f_i ise sürtünme katsayılarıdır ve Denlem 3.3 ve 3.4’teki gibi alınmıştır.

$$\tau_0 = \rho \frac{f_0}{8} V_2^2 \quad (3.3)$$

$$\tau_i = \rho \frac{f_i}{8} (V_1 + V_2)^2 \quad (3.4)$$

Burada τ_0 ve τ_i taban ve ara yüzey kayma gerilmeleridir ve Şekil 3.1’de gösterildiği gibi vektörel büyüklüklerdir.

Hazırlanan bu tez çalışmasında, Sümer ve Bakioğlu [1] çalışmasında ortaya konulan Denklem 3.5,3.6,3.7 ve 3.8 temel alınarak problem deşifre edildi.

$$\begin{aligned} h_{1L} - h_{10} + h_{2L} - h_{20} + \frac{q_1^{*2}}{2} \left(\frac{1}{h_{1L}^2} - \frac{1}{h_{10}^2} \right) - \frac{f_i L^*}{8} \left[\frac{q_1^{*2} (h_{10} + h_{1L})}{2h_{10}^2 h_{1L}^2} + \frac{2q_1^* q_2^*}{h_{10} h_{1L}} \left(\frac{h_{10} - h_{1L}}{h_{10} h_{1L}} + \right. \right. \\ \left. \left. \frac{h_{2L} - h_{20}}{h_{10} h_{2L} - h_{20} h_{1L}} \ln \left(\frac{h_{10} h_{2L}}{h_{20} h_{1L}} \right) \right) + \frac{q_2^{*2}}{h_{10} h_{2L} - h_{20} h_{1L}} \left(\frac{h_{2L} - h_{20}}{h_{2L} h_{1L}} + \frac{h_{1L} h_{20}}{h_{10} h_{2L} - h_{20} h_{1L}} \ln \left(\frac{h_{20} h_{2L}}{h_{10} h_{2L}} \right) \right) \right] \\ \left. - \frac{k_1}{2} \frac{q_1^{*2}}{(h_{1L} h_{10})^2} \left(\ln \left(\frac{h_{1L}}{h_{10}} \right) \right)^2 \right] = 0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned}
& (1 - \frac{\Delta\rho}{\rho})(h_{1L} - h_{10}) + h_{2L} - h_{20} + \frac{q_2^{*2}}{2}(\frac{1}{h_{2L}^2} - \frac{1}{h_{20}^2}) + \frac{f_i L^*}{8}[(1 + \frac{f_0}{f_i})\frac{q_2^{*2}(h_{20} + h_{2L})}{2h_{20}^2 h_{2L}^2} + \\
& \frac{2q_1^* q_2^*}{h_{20} h_{1L} - h_{10} h_{2L}}(\frac{h_{20} - h_{2L}}{h_{20} h_{2L}} + \frac{h_{1L} - h_{10}}{h_{20} h_{1L} - h_{10} h_{2L}} \ln(\frac{h_{20} h_{1L}}{h_{10} h_{2L}})) + \\
& \frac{q_1^{*2}}{h_{20} h_{1L} - h_{10} h_{2L}}(\frac{h_{1L} - h_{10}}{h_{1L} h_{20}} + \frac{h_{2L} - h_{20}}{h_{20} h_{1L} - h_{10} h_{2L}} \ln(\frac{h_{10} h_{2L}}{h_{20} h_{1L}}))] + \\
& \frac{k_2}{2} \frac{q_2^{*2}}{(h_{2L} h_{20})^2} (\ln(\frac{h_{2L}}{h_{20}}))^2 = 0
\end{aligned} \tag{3.6}$$

$$\frac{q_1^{*2}}{h_{10}^3} + \frac{q_2^{*2}}{h_{20}^3} = (\frac{\Delta\rho}{\rho})_0 \tag{3.7}$$

$$\frac{q_1^{*2}}{h_{1L}^3} + \frac{q_2^{*2}}{h_{2L}^3} = (\frac{\Delta\rho}{\rho})_L \tag{3.8}$$

Burada h_{10} boğazın Marmara Denizi ucundaki üst tabaka yüksekliği, h_{1L} boğazın Karadeniz ucundaki üst tabaka yüksekliği, h_{20} boğazın Marmara Denizi ucundaki alt tabaka yüksekliği, h_{2L} boğazın Karadeniz ucundaki alt tabaka yüksekliği, q_1^* üst tabaka boyutsuz debisi, q_2^* alt tabaka boyutsuz debisi, L ise boğazın boyutsuz uzunluğudur. Bu boyutsuzlaştırma işlemi Denklem 3.9'da verilmiştir.

$$\begin{aligned}
h_{10} &= \frac{h_1(0)}{D}, \quad h_{1L} = \frac{h_1(L)}{D}, \quad h_{20} = \frac{h_2(0)}{D}, \quad h_{2L} = \frac{h_2(L)}{D}, \\
q_1^{*2} &= \frac{q_1^2}{gD^3}, \quad q_2^{*2} = \frac{q_2^2}{gD^3}, \quad L^* = \frac{L}{D}
\end{aligned} \tag{3.9}$$

Burada g yer çekimi ivmesi, D ise boğazın ortalama derinliğidir. ($D = h_1 + h_2$)

3.4 Yersel Yük Kaybı Katsayıları

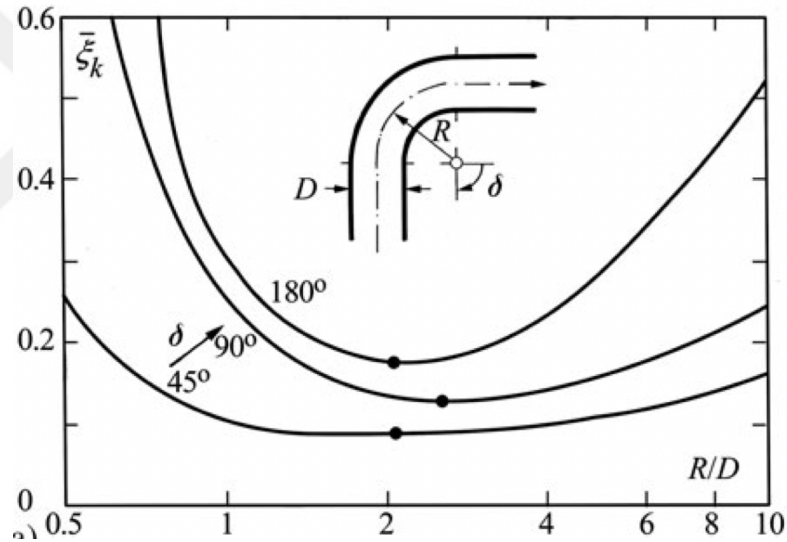
Boru akımı veya açık kanal akımındaki hidrolik hesaplamalarda enerji kayıpları akışkan ile cidar arasındaki sürtünmeden kaynaklanan sürekli kayıplar ve akım en kesitindeki değişimler, hareketin yön veya hızının değişmesi nedeniyle meydana gelen yersel kayıplar olarak iki ana başlıkta toplanabilir.

Yersel kayıpların hesaba katılabilmesi için genişleme-daralma, giriş-çıkış ve kıvrımlardan kaynaklanan kayıpların ayrı ayrı katsayılarının belirlenmesi gerekmektedir. Zira kullanılan model tek boyutlu bir model olduğu için bu yersel yük kayıplarını

hidrodinamik olarak hesaplamamakta, ancak enerji denklemlerinde toplam olarak dikkate almaktadır.

Sümer ve Bakioğlu [1], İstanbul Boğazı üst tabakası için yersel yük kayıplarını; boğaz boyunca yer alan kıvrımlardan kaynaklanan yük kayıpları katsayısı ($= 2.2$), genişleme ve daralmadan kaynaklanan toplam yük kayıpları katsayısı ($= 2.1$), Boğaz'a giriş ve çıkıştan kaynaklanan yük kayıpları katsayısı (sırasıyla $= 0.5$ ve 1.0) olarak uygulamıştır. Dolayısıyla toplam yük kaybı katsayısını $k_1 \approx 6$ olarak hesaplamışlardır. Bu katsayı benzer özellikler gösteren Boğaz alt tabakası ($k_2 \approx 6$) için de aynı değer alınmıştır.

Dönüşlerdeki yersel yük kaybı katsayısı ise her bir dönüşün açısına ve dönüş yarıçapının kanal genişliğine oranına bağlıdır. Hager [7] çalışmasında bu ilişkiyi bir abak haline getirmiştir. Bahsi geçen abak Şekil 3.2'de verilmektedir.



Şekil 3.2 : Eğrilik yarıçapı, kanal genişliği ve dönüş açısına bağlı olarak yersel kayıp katsayıları. [7]

Şekil 3.2'de verilen abak ışığında Çanakkale Boğazı için kıvrımlardan kaynaklanan toplam yük kayıpları katsayısı ($= 2.5$) hesaplanmıştır. Ani genişleme ve daralmadan kaynaklı yük kayıpları katsayısı 3 alınabilir.

Boğaz boyunca yersel yük kayıpları kıvrımlardan kaynaklanan yük kayıpları katsayısı ($= 2.5$), genişleme ve daralmadan kaynaklanan toplam yük kayıpları katsayısı ($= 3$), boğaza giriş ve çıkıştan kaynaklanan yük kayıpları katsayısı (sırasıyla $= 0.5$ ve 1.0) olarak uygulamıştır. Dolayısıyla toplam yük kaybı katsayısını $k_1 \approx 7$ olarak

hesaplamıştır. Bu katsayı, tıpkı İstanbul Boğazı'nda olduğu gibi, benzer özellikler gösteren boğaz alt tabakası ($k_2 \approx 7$) için de aynı değer alınmıştır.

Sonuç olarak bu tez kapsamında uygulanan matematiksel modelde yukarıda esas alınan hesaplamalar ışığında toplam yersel yük kaybı katsayısı İstanbul Boğazı için 6 iken, Çanakkale Boğazı için 7 alınmıştır.

3.5 Sürtünme Katsayısı

Sümer ve Bakioğlu [1], tabandaki sürtünme katsayısı f_0 'ı belirlemek için farklı pürüzlülük sınıflarına ait bağıntılardan yararlanılmıştır. Bu bağıntılar Denklem 3.10, 3.11 ve 3.12'de verilmiştir.

1. Hidrolik cilalı cidar için;

$$\frac{1}{\sqrt{f_0}} = 2 \log_{10} \left(\frac{Re \sqrt{f_0}}{2.51} \right), \quad \frac{k_s u_*}{\nu} < 5 \quad (3.10)$$

2. Geçiş bölgesi cidarı için;

$$\frac{1}{\sqrt{f_0}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k_s}{12R} + \frac{2.5}{Re \sqrt{f_0}} \right), \quad 5 < \frac{k_s u_*}{\nu} < 70 \quad (3.11)$$

3. Tam pürüzlü cidar için;

$$\frac{1}{\sqrt{f_0}} = 2 \log_{10} \left(\frac{12R}{k_s} \right), \quad \frac{k_s u_*}{\nu} > 50 \quad (3.12)$$

Burada u_* tabandaki kayma hızı, k_s tabandaki Nikuradze eşdeğer kum pürüzlülüğüdür. Eşdeğer kum pürüzlülüğü (k_s) taban malzemesinin d_{65} değerine eşit olarak alınmıştır [1]. Re parametresi Reynolds sayısı olup Denklem 3.13'te tanımlanmaktadır.

$$Re = \frac{4VR}{\nu} \quad (3.13)$$

Burada V alt tabaka akımının boğaz boyunca alınan ortalama hızı ($V = V_2$), ve $R = h_2/2$ olup, h_2 boğaz boyunca alınan ortalama alt tabaka derinliğidir. Yukarı verilen denklemlere göre hesaplanan f_0 değerinin 0.009 ilâ 0.011 aralığında değiştiği gözlenmiştir [1]. Ara yüzeydeki sürtünme katsayısı f_i 'nin hesabı için Abraham vd. [30] çalışmasında kullanılan ve aşağıda Denklem 3.14 ve 3.15 olarak verilen denklemler kullanılmıştır.

$$f_i = \frac{0.5}{Re^{0.45}}, \quad 10^2 < Re < 2 \times 10^4 \quad (3.14)$$

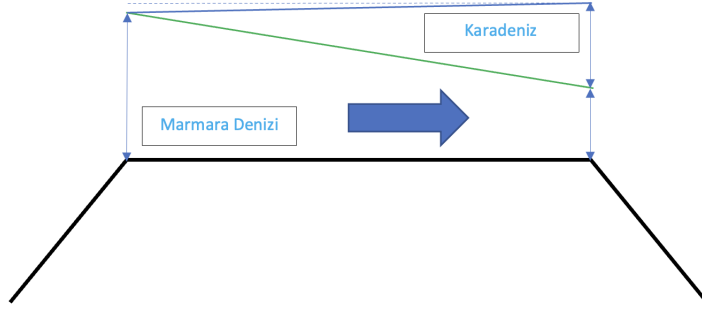
$$f_i = 0.0056, \quad Re \geq 2 \times 10^4 \quad (3.15)$$

Bu şekilde yapılan hesaplamalarda arayüzey sürtünme katsayısının, $f_i = 0.0056$ değerine (asimptotik değer) eşit çıktığı görülmüştür. Zira boğaz boyunca $Re \geq 2 \times 10^4$ şartı sağlanmaktadır. [1]

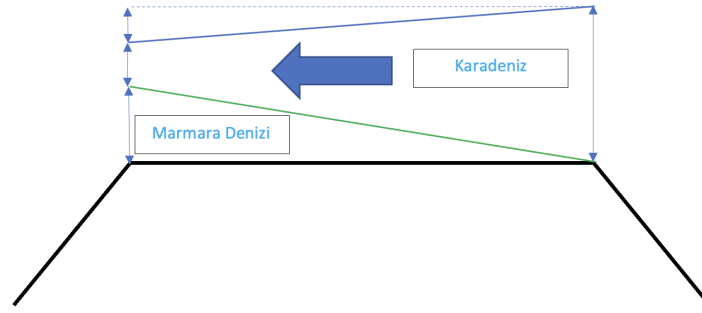
3.6 Matematik Model Sonuçları

Sümer ve Bakioğlu [1] yaptıkları matematiksel çözümünden İstanbul Boğazı'nın iki ucu arasındaki seviye farkının ortalama değeri olan $\Delta h = 33 \text{ cm}$ için elde ettikleri üst ve alt tabaka debileri sırasıyla $Q_1 = 19700 \text{ m}^3/\text{s}$ ve $Q_2 = 7300 \text{ m}^3/\text{s}$ olarak elde edilmiştir. Yapılan matematik modelde tuzluluk, sıcaklık, yanal sürtünme ve karışım debisinin çözüm kolaylığı açısından ihmal edilmesine karşın elde edilen sonuçlar önceki çalışmalar ve saha ölçümleriyle uyushmaktadır.

Sümer ve Bakioğlu [1] çalışmasından elde edilen bir diğer sonuç da su seviyesi farkı (Δh) 12 cm olduğunda, üst tabaka akımının tamamen baskılandığı adeta bir tatlı su kamasına dönüştüğüdür. Tatlı su kaması koşulunun oluşması için Karadeniz'in su seviyesi düşmekte ve böylece üst akım durmaktadır. Su seviyesi farkı (Δh) 45 cm olduğunda ise alt akım tamamen baskılanır ve alt tabaka akımı durma noktasına ulaşır. Böylece adeta bir tuzlu su kaması oluşur. Tatlı su ve tuzlu su kamasının durumlarının şematik gösterimi ise Şekil 3.3'te verilmiştir.



(a)



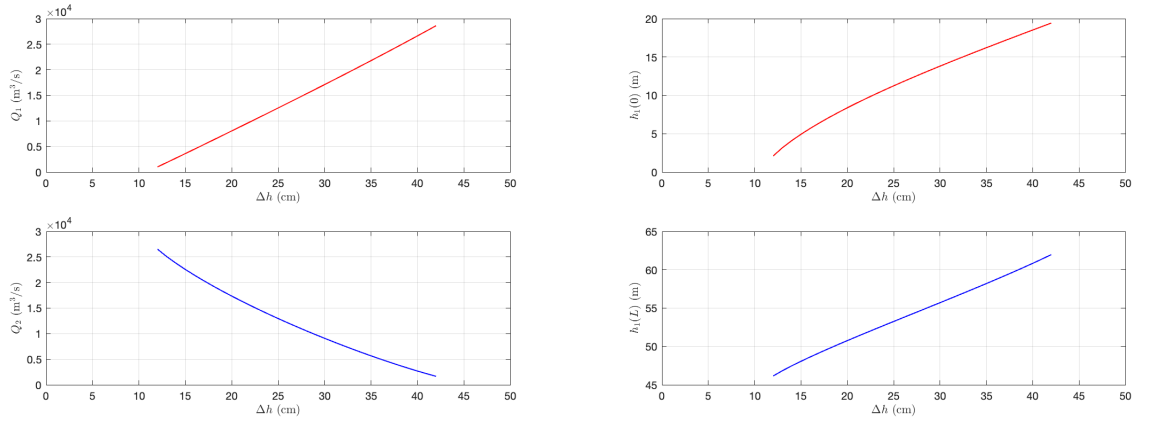
(b)

Şekil 3.3 : (a)Tatlı su kamasının şematik gösterimi. (b)Tuzlu su kamasının şematik gösterimi.

4. MODELİN UYGULANMASI

4.1 Tabakalar Arası Karışım İhmal Edilerek İstanbul ve Çanakkale Boğazı İçin Çözüm

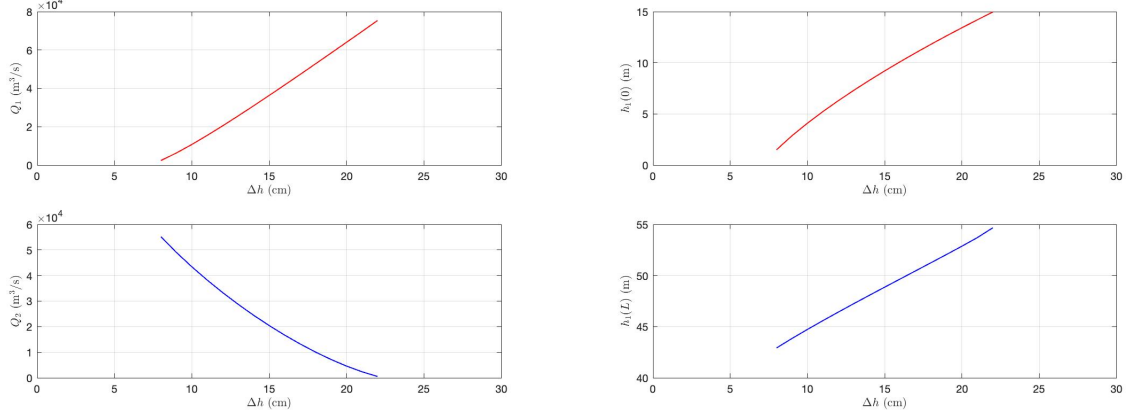
Sümer ve Bakioğlu [1] tarafından geliştirilen tek boyutlu İstanbul Boğazı akımı matematik modeli, Matlab ortamında kodlanmıştır. Bu çözüme göre alt ve üst akım debileri Q_1 ve Q_2 , üst tabakanın Boğaz'ın Marmara Denizi ucundaki kalınlığı (h_{10}) ve üst tabakanın Boğaz'ın Karadeniz ucundaki L boyundaki kalınlığının (h_{1L}) elde edilmiştir. Model çözümünün Δh 'ye göre parametrik sonuçları Şekil 4.1'de verilmiştir. Buradan görülebileceği üzere elde edilen debiler seviye farkının ortalama değeri olan $\Delta h = 33 \text{ cm}$ için Sümer ve Bakioğlu [1]'nin sonuçları olan $Q_1 = 19700 \text{ m}^3/\text{s}$ ve $Q_2 = 7300 \text{ m}^3/\text{s}$ değerleri elde edilmiştir. Bunun yanında, Şekil 4.1 ile verilen parametrik çözümler Sümer ve Bakioğlu [1]'nin parametrik çözümleri ile de bire bir örtüşmektedir.



Şekil 4.1 : İstanbul Boğazı için debi ve derinlik değerlerinin su seviyesi farkına göre değişimi. [1]

Matlab ortamında kodlanmış olan tek boyutlu matematik model Çanakkale Boğazı'na uyarlandığında Şekil 4.2'de gösterilen parametrik çözümler elde edilmektedir. Bu

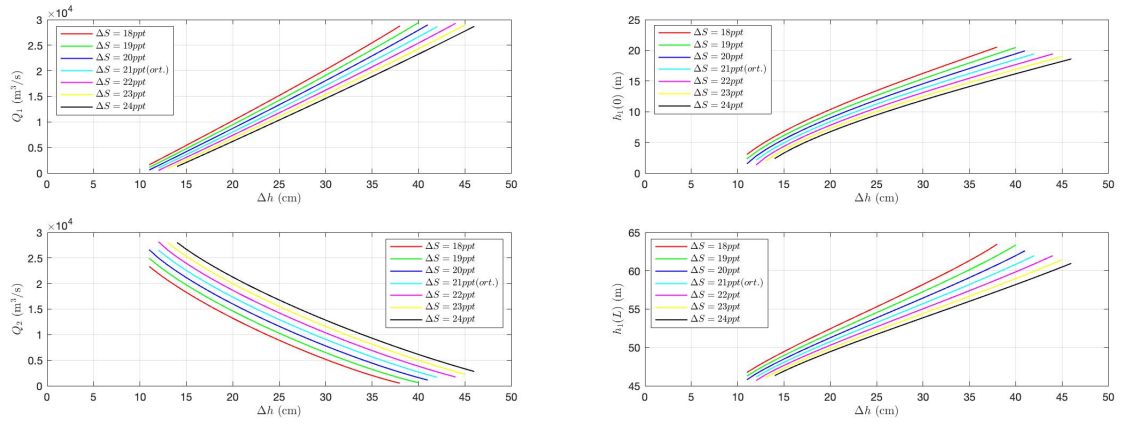
şekilden görülebileceği üzere Çanakkale Boğazı'nda $\Delta h < 8 \text{ cm}$ durumunda tatlı su kaması oluşmakta, $\Delta h > 22 \text{ cm}$ için de tuzlu su kaması oluştuğu görülmektedir.



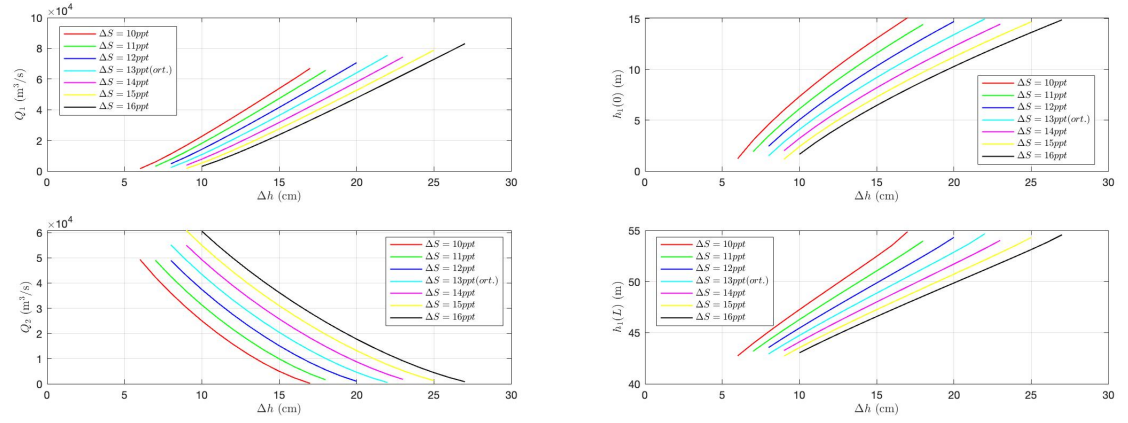
Şekil 4.2 : Çanakkale Boğazı için debi ve derinlik değerlerinin yükseklik farkına göre değişimi.

4.2 Tabakalar Arası Karışım İhmal Edilerek Farklı Tuzluluk Değerleri İçin İstanbul ve Çanakkale Boğazı Çözümü

İstanbul Boğazı'nda ortalama akım şartları göz önüne alındığında alt tabaka tuzluluğu 38.5 ppt iken üst tabaka tuzluluğu 17.5 ppt'dir. Çanakkale Boğazı'nda ise ortalama akım şartlarında literatürde net tuzluluk değerleri verilmemiş olmakla birlikte, genel olarak tuzluluk değerleri alt tabaka için 38 ppt civarında ve üst tabaka için de 24 ~ 26 ppt arasında oluşmaktadır. Boğazlardaki tuzluluk değeri farkı (ΔS) parametresinin farklı değerleri için, Matlab'da kodlanan matematik model kullanılarak debi ve derinlik değerlerinin iki deniz arasındaki seviye farkına (Δh) göre değişimi parametrik olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar İstanbul Boğazı için Şekil 4.3'te, Çanakkale Boğazı için ise Şekil 4.4'te sunulmaktadır. Bu şekillerde ΔS parametresinin ortalama değere göre her bir ppt arttırılıp azaltılması için 7'şer adet eğri verilmiştir. Bekleneceği üzere, sabit bir Δh değeri için ΔS 'in artması ile alt tabaka akımı güçlenirken, üst tabaka akımı zayıflamaktadır.

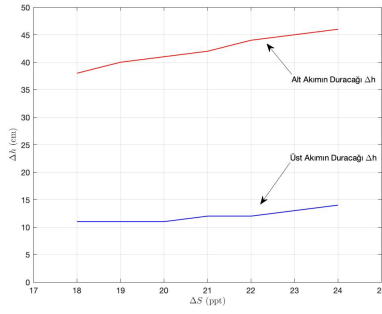


Şekil 4.3 : İstanbul Boğazı için debi ve derinlik değerlerinin yükseklik farkına göre değişimi.

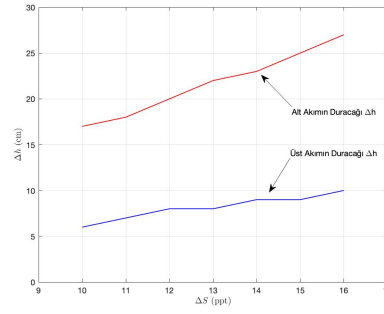


Şekil 4.4 : Çanakkale Boğazı için debi ve derinlik değerlerinin yükseklik farkına göre değişimi.

Bu çalışmadan elde edilen bir diğer sonuç olarak üst ve alt tabaka akımlarının baskılanıp durma seviyesine geldikleri su seviyesi farkı (Δh) limit değerleri derlenmiştir. Elde edilen bu değerler İstanbul ve Çanakkale Boğazları için sırasıyla Şekil 4.5'te verilmiştir.



(a)



(b)

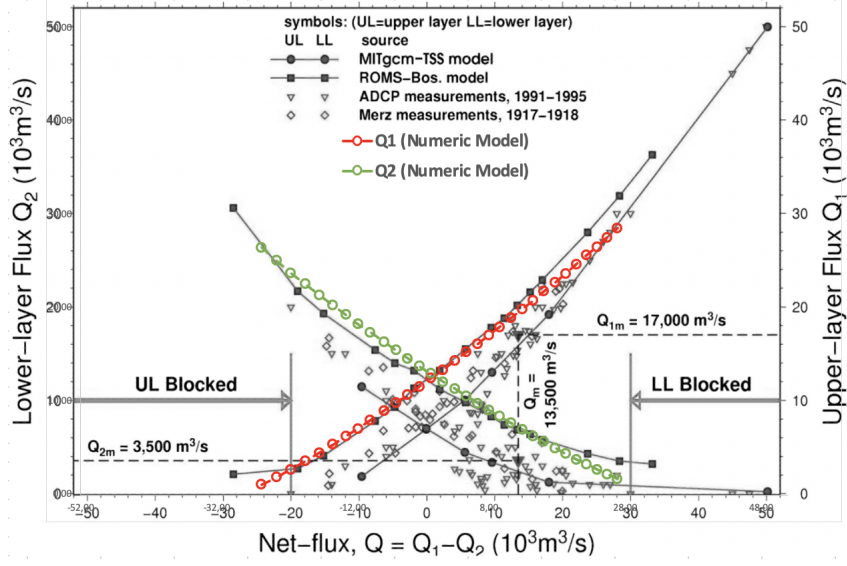
Şekil 4.5 : (a) İstanbul Boğazı için farkı tuzluluk değerlerine göre üst ve alt akımın duracağı su seviyesi farkı (Δh) limit değerleri. (b) Çanakkale Boğazı için farkı tuzluluk değerlerine göre üst ve alt akımın duracağı su seviyesi farkı (Δh) limit değerleri.

Şekil 4.5'ten görüleceği üzere tuzluluk farkı parametresi (ΔS) arttıkça hem alt hem de üst tabaka akımlarını durma noktasına getiren su seviyesi farkı (Δh) limit değeri de artmaktadır.

4.3 Mevcut Model Sonuçlarının Sannino vd. [2] Çalışması ile Kıyaslanması

Sannino vd. [2], Türk Boğazlar Sistemi(TSS) için yapmış oldukları yüksek çözünürlüklü modelde üst ve alt akım debilerini hesaplamış ve daha önce yapılmış çalışmalarla karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırmada MIT General Circulation Model (MITgcm) ile The regional Ocean Modeling System (ROMS) Boğaz modeli ve gözlem verileri [40]; 1991-1995 yılları arasında ODTÜ Bilim Gemisi tarafından ölçülmüş olan akım hızı verileri [41] ve Merz ve Möller (Maderich [42] çalışmasından elde edilmiştir) veri seti kullanılmıştır.

Yapılan bu çalışma ile Sümer ve Bakioğlu [1] matematiksel modeli referans alınarak bu tez kapsamında yapılan model çözüm neticesinde elde edilen sonuçlar ile Sannino vd. [2] tarafından bulunan sonuçlar ile karşılaştırılması Şekil 4.6'da verilmiştir. Bu kıyaslamada, özellikle ROMS İstanbul Boğazı modeli ile mevcut model sonuçları arasında yüksek oranda bir tutarlılık söz konusudur.



Şekil 4.6 : Sannino [2] çalışmasında elde edilen üst ve alt akım debileri ve net debi farkı değerlerinin mevcut model sonuçları ile karşılaştırılması.

Sannino vd. [2] çalışmasında yer alan Çanakkale Boğazı MITgcm-TSS çözümünün, bu tez kapsamında su seviyesi farkının $\Delta h = 15.5 \text{ cm}$ değeri için kıyaslandığında aynı sonucu verdiği ($Q_{Net} = 20 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$) görülmektedir. Ancak Sannino vd. [2] sonuçları daha düşük seviye farkı değerleri için mevcut model sonuçlarına göre genel olarak üst akımını belirgin mertebede daha güçlü olduğuna işaret etmektedir.

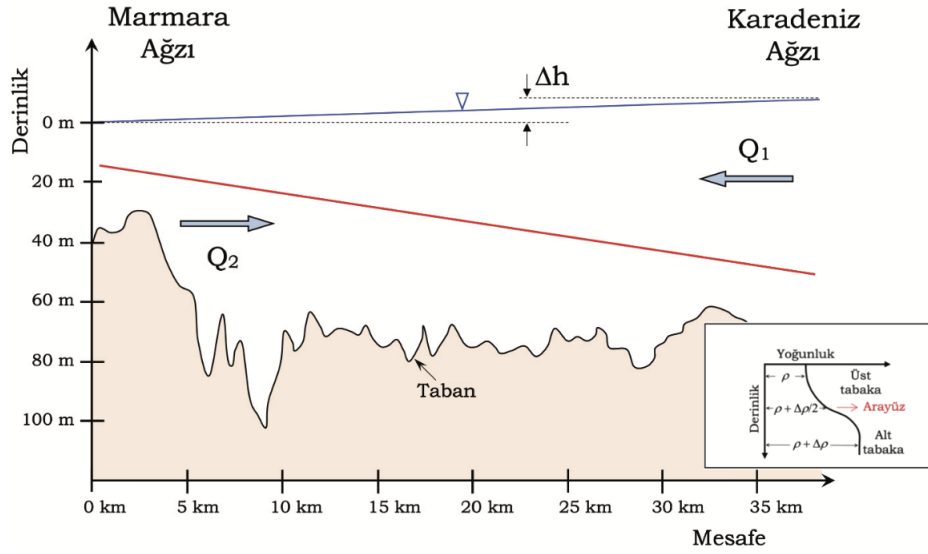
Sözer vd. [23], yapmış oldukları çalışmada ortalama akım koşulları için İstanbul Boğazı alt ve üst tabakası arasındaki debi farkını $Q_{Net} = 9.5 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ bulurken, bu tez kapsamında elde edilen matematik model sonuçlarında bu değer ile yakın mertebede $Q_{Net} = 12.4 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ bulunmuştur. Diğer bir çalışmada Gregg vd. [16] ise, alt akımın üst akıma göre daha güçlü olduğu 1994 Eylül ayı arazi ölçümlerinde bu değeri $Q_{Net} = 5.6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ olarak belirlemiştir.



5. TABAKALAR ARASI KARIŞIMIN MODELLENMESİ

5.1 Tabakalar Arası Karışım Mekanizması

İstanbul Boğazı'nda üst ve alt tabakalar arasında oluşan arayüzdeki karışım debisinin miktarı ile ilgili kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalara esas teşkil eden Boğaz boykesitinin şematik gösterimi Şekil 5.1'de ve karışım mekanizması da Şekil 5.2'de verilmiştir. Tabakalar arası oluşan karışım, sınır tabakası kaynaklı türbülans ve ara yüzdeki yoğunluk farkı kaynaklı instabilite sonucu meydana gelmektedir [8].



Şekil 5.1 : Boğaz boykesitinin şematik gösterimi. [8]

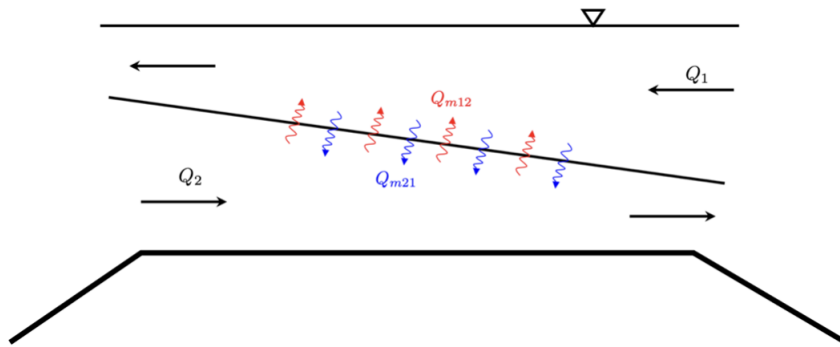
Karadeniz ve Marmara Denizi arasındaki su seviyesi farkı (Δh) zamanın bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Bunun sonucu olarak, Boğaz'daki Q_1 ve Q_2 üst ve alt tabaka debileri de zamanın bir fonksiyonu olmaktadır. Örneğin, Δh arttığında, üst tabaka debisi Q_1 artacak, buna karşın alt tabaka debisi Q_2 azalacaktır. Özellikle ilkbahar sonu ve yaz başlangıcında Δh , Karadeniz'e deşarj olan nehir debilerinin artmasının bir sonucu olarak iki veya üç aylık bir süre boyunca 40-50 cm'ye kadar artabilmektedir. Bu durum Q_1 'de önemli bir artışa ve Q_2 'de ise önemli bir düşüşe yol açar; alt tabaka

debisi (Q_2) bazen tamamen ortadan kalkar. Öte yandan $\Delta h \simeq 12\text{ cm}$ olduğunda ise, üst tabakanın durması ve tatlı su kaması durumunun ortaya çıkması beklenir. Yılın bu zamanında yapılan arazi ölçümleri (Bayazıt ve Sümer [43]), gerçekten de Boğaz'ın Karadeniz ucunda Marmara suyunun bulunmadığını ortaya çıkarmış ve bu da alt tabaka akışının tamamen kaybolduğu şeklinde yorumlanmıştır. Ayrıca, rüzgar hızı ve yönü gibi atmosferik faktörlerin yanı sıra barometrik (hava basıncı) farklılıklarının da, iki deniz arasındaki su seviyesi farkı, Δh 'yi etkileyen diğer önemli parametreler olduğu belirlenmiştir. [18]

5.2 Boğaz Akımında Üst ve Alt Tabaka Tuz Kütlesi Korunumu

Az tuzlu suyun üst akımla ve daha tuzlu suyun alt akımla taşınması sırasında, Şekil 5.2'de gösterildiği üzere arayüzeye dik olarak alt akımdan üst akıma ve üst akımdan alt akıma karışım ortaya çıkmaktadır. Alt tabakadan üst tabakaya çıkmakta olan karışım debisi Q_{m12} olarak, üst tabakadan alt tabakaya meydana gelen karışım debisi ise Q_{m21} olarak ifade edilmektedir. Tabakalar arasında ortaya çıkan bu karışımdan dolayı Q_1 debisi ile taşınan üst tabaka akımı Boğaz çıkışında daha tuzlu hale gelmekte, Q_2 debisi ile taşınan alt tabaka akımı ise Boğaz'ın diğer çıkışında daha az tuzlu hale gelmektedir.

Boğaz boyunca ortaya çıkan bu karışım sonucunda hem üst hem de alt tabakanın tuz kütlesi korunacağı için karışım debileri ve tabaka tuzlulukları kullanılarak Şekil 5.3'te şematik olarak gösterilen ve Denklem 5.1 ve Denklem 5.2'de ifade edilen kütle korunum eşitlikleri yazılabilir.

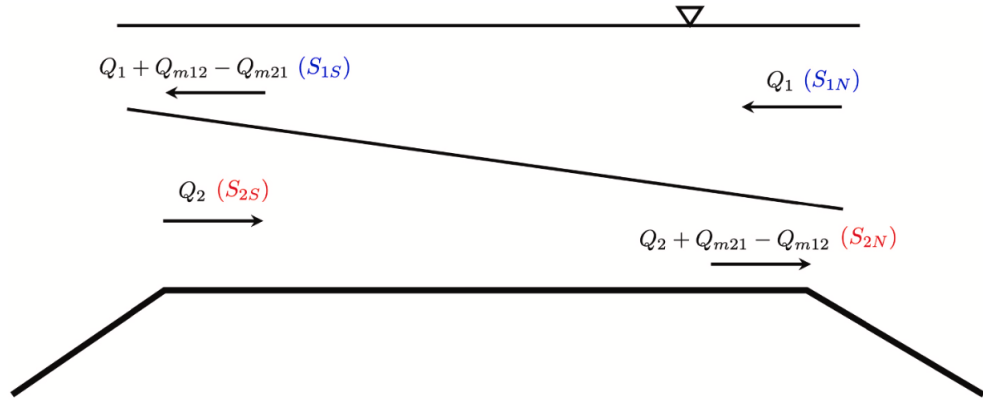


Şekil 5.2 : İstanbul Boğazındaki akım yapısının tabakalar arası karışımı ile birlikte şematik gösterimi. [8]

$$Q_1 S_{1N} - Q_{m21} \frac{(S_{1S} + S_{1N})}{2} + Q_{m12} \frac{(S_{2S} + S_{2N})}{2} = (Q_1 - Q_{m21} + Q_{m12}) S_{1S} \quad (5.1)$$

$$Q_2 S_{2S} - Q_{m12} \frac{(S_{2S} + S_{2N})}{2} + Q_{m21} \frac{(S_{1S} + S_{1N})}{2} = (Q_2 - Q_{m12} + Q_{m21}) S_{2N} \quad (5.2)$$

Burada Denklem 5.1 ve Denklem 5.2’de verilen S_{1N} ve S_{1S} üst tabaka akımının sırasıyla Boğaz’ın Karadeniz ve Marmara Denizi girişlerinde ölçülen üst tabakanın tuzluluk değerlerini, aynı biçimde S_{2N} ve S_{2S} alt tabakanın Boğaz’ın Karadeniz ve Marmara Denizi girişlerinde ölçülen alt tabakanın tuzluluk değerlerini göstermektedir (Şekil 5.3). N ve S indisleri kuzey ve güney değerlerini ifade etmek için kullanılmaktadır.



Şekil 5.3 : Debi ve tuzluluk değerlerinin şematik gösterimi. [8]

Denklem 5.1 ve Denklem 5.2 sırasıyla üst ve alt tabakalar için, Boğaz’a giren ve Boğaz’dan çıkan tuz kütlelerinin farkının, karışım sonucu tabakalar arasında nakledilen tuz kütlelerine eşit olduğunu ifade etmektedir. Bu iki denklem geliştirilen matematik modelde bilinmeyen olan Q_{m21} , Q_{m12} , S_{1S} ve S_{2N} parametrelerinin hesaplanması için kullanılacak dört denklemden ikisi olmaktadır.

5.3 Tabakalar Arasındaki Karışımın Richardson Sayısı ile İlişkisi

Tabakalar arası karışım hesabında, tabakalaşmanın stabilitesinin bir ölçütü olan boyutsuz Richardson sayısı (Ri_0) kullanılabilir.

$$Ri_0 = \frac{g \Delta \rho H}{\rho \Delta V^2} \quad (5.3)$$

Burada g yerçekimi ivmesi, H karışımın girdiği tabakanın kalınlığı ve ΔV ise iki tabaka hızları arasındaki farktır. Tabakalar arası hızların yönlerinin zıt olması durumunda hızların toplamıdır. [8]

Tabakalar arasındaki karışım miktarının Richardson sayısının bir fonksiyonu olarak ifade edilebileceğine yukarıdaki Bölüm 2’de belirtilmişti. Christodoulou [3] tabakalar arası karışım hesabı için kapsamlı bir çalışma yapmış olup, çalışmasında bu ilişki için literatürde verilen tüm ampirik formülleri derlemiştir. Bu çalışmanın genel bir sonucu olarak görülmektedir ki Richardson sayısı (Ri_0) arttıkça arayüzeyde oluşan karışım miktarı azalmaktadır. Karışımın hızı ve Richardson sayısı (Ri_0) arasındaki ilişki, genel hali Denklem 2.3’te sunulduğu üzere, üst ve alt tabakalar için sırasıyla Denklem 5.4’te ve Denklem 5.5’te verilmektedir.

$$\frac{v_{m21}}{V_1} = a Ri_{01}^b \quad (5.4)$$

$$\frac{v_{m12}}{V_2} = a Ri_{02}^b \quad (5.5)$$

Burada v_{m21} alt tabakadan üst tabakaya, v_{m12} üst tabakadan alt tabakaya geçen karışımın hızıdır. Karışım debileri, karışım hızlarının arayüzey alanının çarpımı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir:

$$Q_{m21} = v_{m21} \times L \times W \quad (5.6)$$

$$Q_{m12} = v_{m12} \times L \times W \quad (5.7)$$

Christodoulou [3], Denklem 5.4’te ve Denklem 5.5’te yer alan a ve b model sabitleri için yapılan çalışmaları derlemiş ve çalışmasında sunmuştur. (Christodoulou, 1986, Tablo 1) Bu değerleri Çizelge 5.2’de verilmektedir.

Çizelge 5.1 : Önerilen a ve b sabitleri değerleri, Christodoulou [3], Çizelge 1.

Yapılan Çalışma	Önerilen Değerler	Ri sayısı aralığı
Kato ve Phillips(1969) [44]	$w_e/u_* = 2.5Ri_*^{-1}$	$20 < Ri_* < 300$
Kantha vd.(1977) [36]	$w_e/u_* = f(Ri_*)$	$30 < Ri_* < 1100$
Wu(1973) [45]	$w_e/u_* = 0.234Ri_*^{-1}$	$20 < Ri_* < 210$
Kit vd.(1980) [46]	$w_e/u_* = 1.5Ri_*^{-3/2}$	$20 < Ri_* < 500$
Kit vd.(1980) [46]	$w_e/u_* = 0.13Ri_*^{-3/2}$	$8 < Ri_* < 75$
Kit vd.(1980) [46]	$w_e/u_r = 4.7 \times 10^{-3} Ri_r^{-3/2}$	$0.8 < Ri_* < 50$
Ellison ve Turner(1959) [33]	$w_e/V = f(Ri_*)$	$Ri_0 < 0.8$
Chu ve Vanvari(1976) [47]	$w_e/U = f(Ri_*)$	$Ri_0 < 0.15$
Pedersen(1980) [38]	$w_e/V = 1.5 \times 10^{-3} Ri_0^{-2}$	$1 < Ri_0 < 10$
Buch(1980) [48]	$w_e/V = 5.2 \times 10^{-4} Ri_0^{-2}$	$50 < Ri_0 < 300$
Ellison ve Turner(1959) [33]	$w_e/V = f(Ri_0)$	$Ri_0 < 0.4$
Lofquist(1960) [49]	$w_e/V = f(Ri_0)$	$7 < Ri_0 < 110$
Moore ve Long(1971) [37]	$v/V = 8 \times 10^{-4} Ri_0^{-1}$	$0.5 < Ri_* < 20$
Macagno ve Rouse(1961) [50]	$v/V = f(Ri_0, Re)$	$0.2 < Ri_* < 5$

Burada V , kesitsel ortalama hız, U yüzey hızı, v karışım hızı, w_e iki tabakanın karışım hızları farkı, Ri_0 genel Richardson sayısı ve Ri_* kayma gerilmesinden kaynaklı sürtünme Richardson sayısıdır.

$$Ri_* = \frac{g\Delta\rho H}{\rho\Delta U_*^2} \quad (5.8)$$

Burada, U_* tabakalar arası kayma hızıdır($U_* = \sqrt{\tau_i/\rho}$).

Christodoulou [3] çalışmasında a ve b sabitlerinin farklı Richardson sayı aralıkları için derlenen değerleri dikkate alınarak, bu sabitlerin önerilen değerleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2 : Christodoulou [3] çalışmasında önerilen a ve b sabitleri değerleri.

Önerilen Değerler	Ri sayısı aralığı
$w_e/V = 0.07$	$0.01 < Ri_0$
$w_e/V = 0.007Ri_0^{-1/2}$	$0.01 < Ri_0 < 0.1$
$w_e/V = 0.002Ri_0^{-1}$	$0.1 < Ri_0 < 10$
$w_e/V = 0.007Ri_0^{-3/2}$	$Ri_0 > 10$

Bu çalışmalara ek olarak Strang vd. [4] yapmış oldukları deneysel çalışmada karışım hızının hesabı için farklı Richardson sayısı aralıklarında Çizelge 5.3'te gösterilen bağıntıları önermişlerdir.

Çizelge 5.3 : Strang vd. [4] çalışmasında önerilen a ve b sabitleri değerleri.

Önerilen Değerler	Ri sayısı aralığı
$v/\Delta U = 0.02 \sim 0.04$	$1.5 > Ri_b$
$v/\Delta U = 0.22 \pm 0.11 Ri^{2.63 \pm 0.45}$	$1.5 < Ri_b < 5$
$v/\Delta U = 0.02 \pm 0.01 Ri^{1.30 \pm 0.15}$	$5 < Ri_b < 20$

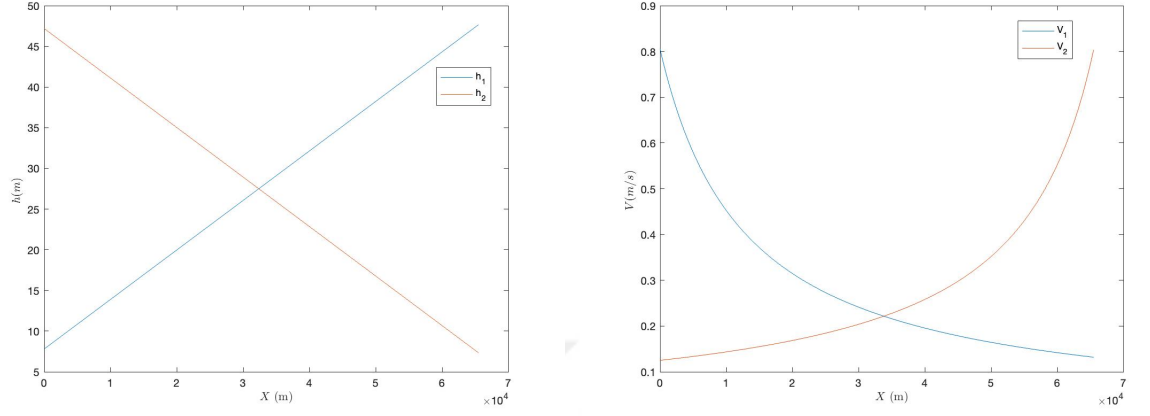
Bu bölümde açıklandığı üzere Denklem 5.4 ve Denklem 5.5 ile ifade edilen bağıntılar, matematik modele eklenen dört adet bilinmeyen çözölebilmesi için iki tuz kütlesi korunumu denklemine ek olarak kullanılacak iki denklemdir.

5.4 Tabakalar Arası Karışımın Basitleştirilmiş Hesap Prosedürü

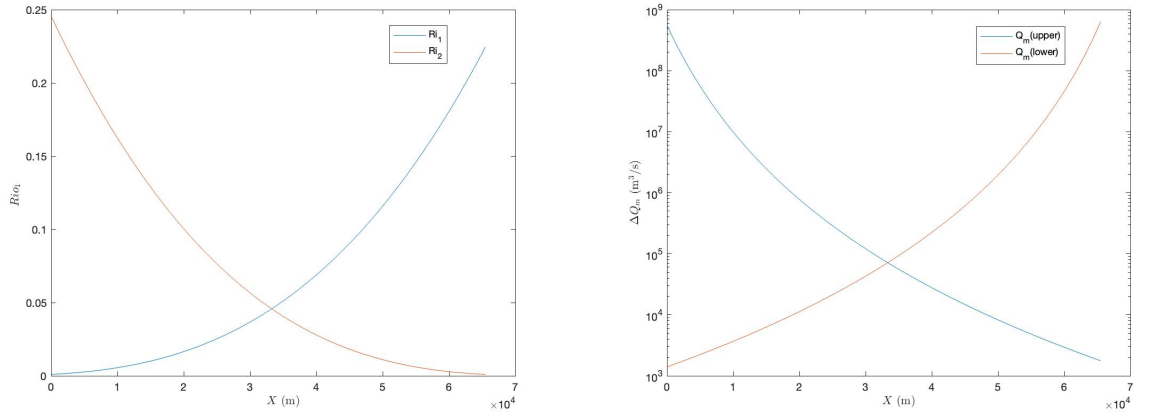
Orhon vd. [8] tarafından İstanbul Boğazı alt ve üst tabakaları arasındaki karışım debilerinin (Q_{m12} ve Q_{m21}) hesaplanması için aşağıda dört adım ile açıklanan prosedür uygulanmıştır. Bu prosedürde hesabı basit tutabilmek adına karışım debilerini üst ve alt tabaka debilerini DEĞİŞTİRMEYECEĞİ kabul edilmiştir. Bu prosedür aşağıdaki şekilde Çanakkale Boğazı için uygulanacaktır.

1. Akım parametreleri ($h_1, h_2, V_1, V_2, Ri_{01}, Ri_{02}$) Ege Denizi sınırı $x = 0$ kabul edilmek üzere Marmara Denizi sınırına ($x = L$ 'ye) kadar 100 m aralıklarla Sümer ve Bakioğlu [1] tek boyutlu matematik modeli kullanılarak (karışım debileri dikkate alınmadan) hesaplanır,
2. Boğaz uzunluğu boyunca her $\Delta x = 100 m$ aralıklarla Deklem 5.4 ve 5.5'de verilen eşitlikler kullanılarak karışım hızları (V_{m12} ve V_{m21}) hesaplanır,
3. Her mesafe adımında ($\Delta x = 100 m$) karışım debilerini (ΔQ_{m12} ve ΔQ_{m21}) hesaplamak için karışım hızları (V_{m12} ve V_{m21}) ile ara yüzey alanı çarpılır (Ara yüzey genişliği sabit kabul edilir.),
4. Her mesafe adımı için ($\Delta x = 100 m$) hesaplanan karışım debileri boğaz boyunca toplanır ve alt ve üst tabakalar arası toplam karışım debileri (Q_{m12} ve Q_{m21}) elde edilir.

Orhon vd. [8] tarafından ortaya konulan bu prosedür Çanakkale Boğazı için ortalama akım koşulları dikkate alınarak uygulandığında Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te verilen sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5.4 : Çanakkale Boğazı boyunca mesafeye göre derinlik değerleri($h_1(x)$ ve $h_2(x)$) ve hız değerleri ($V_1(x)$ ve $V_2(x)$).



Şekil 5.5 : Çanakkale Boğazı boyunca mesafeye göre Richardson sayıları ($Ri_{01}(x)$ ve $Ri_{02}(x)$) ve karışım debileri değerleri ($Q_{m12}(x)$ ve $Q_{m21}(x)$).

Bu şekilde yapılan hesaplamalarda Çanakkale Boğazı'nda alt tabakadan üst tabakaya geçen karışım debisi $Q_{m21} = 1.310 m^3/s$ ve üst tabakadan alt tabakaya geçen karışım debisi $Q_{m12} = 1 m^3/s$ tabakaların akım debilerinden yüksek bulunmuştur. Dolayısıyla bu tip bir basitleştirilmiş hesabın her zaman doğru sonuç veremeyeceği anlaşılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında dört bilinmeyen ve dört denklemden

oluşan iki sistemin ayrı ayrı çözülmesi yerine, sekiz bilinmeyen ve sekiz denklemden oluşan tek bir non-lineer sistemin çözülmesine dayalı bir matematik model geliştirilmesi uygun bulunmuştur.



6. İKİ TABAKALI AKIM SİSTEMİNİN KARIŞIM DENKLEMLERİNİ DE İÇEREN MATEMATİK MODELİ

Sümer ve Bakioğlu [1] geliştirmiş oldukları matematik modelde, İstanbul Boğazı için su seviyesi farkı (Δh) ve yoğunluk farkı ($\Delta \rho$) değerlerini girdi parametresi kullanarak her her iki tabakanın akım debilerini ve tabaka derinliklerini belirlemişlerdir. Geliştirilen bu matematik modelde, dört bilinmeyenli dört denklem takımı kullanılarak çözüme ulaşılmıştır. Bu sistemde bilinmeyenler; üst tabaka debisi (Q_1), alt tabaka debisi (Q_2), üst tabakanın $x = 0$ ucundaki (Marmara Denizi) kalınlığı (h_{10}) ve üst tabakanın $x = L$ ucundaki (Karadeniz) kalınlığıdır (h_{1L}). Bu dört bilinmeyenin çözümü için ise iki enerji denklemi ve iki Froude şartı denklemi (diğer bir değişle daralma bölgelerinin toplam Froude sayısının 1'e eşit olması şartı) uygulanmıştır. Bahsedilen bu denklemler ve elde edilen sonuçlar Bölüm 3'te ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu denklem takımlarının çözümü ışığında elde edilen sonuçlar ile her iki tabakanın debileri ve Boğaz'ın iki ucundaki yükseklikleri belirlenebilmektedir.

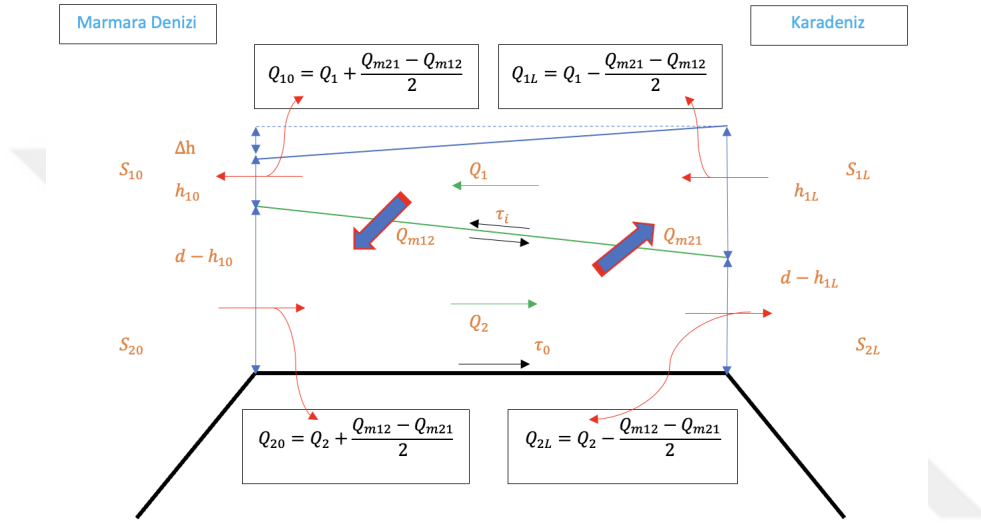
Tezin bu bölümünde ise, yukarıda da bahsedildiği üzere mevcut matematik model, tabakaların karışım debileri ve çıkış tuzluluğu değerleri de hesaplanacak şekilde sekiz bilinmeyenli sekiz denklem takımı halinde kurulacaktır.

6.1 Karışım Mekanizması Dahil Edilen Matematik Model

Karışım mekanizmasının da dahil edilerek boğaz yapısının çözülebilmesi için Sümer ve Bakioğlu [1] çalışmasına ek denklem sistemleri gerekmektedir. Yapılan bu kapsamlı matematiksel çözüme ek olarak tabakalar arasındaki karışım debilerinin ve tuzluluk değerlerinin hesaplanabilmesi yukarıda da bahsedildiği üzere bu tezin esas çıkış noktası olmuştur. Bu değerlerin hesaplanabilmesi için kullanılan dört bilinmeyenli dört denklem takımına ek olarak dört yeni bilinmeyen ilave edilmesi gerekmektedir. Bu ek bilinmeyenler ise; üst tabakadan alt tabakaya geçen karışım debisi (Q_{m12}), alt tabakadan üst tabakaya geçen karışım debisi (Q_{m21}), üst tabakanın $x = 0$ ucundaki (Marmara Denizi) çıkış tuzluluğu (S_{10}) ve alt tabakanın $x = L$ ucundaki (Karadeniz)

çıkış tuzluluğudur (S_{2L}). Üst tabakanın $x = L$ ucundaki (Karadeniz) giriş tuzluluğu ve alt tabakanın $x = 0$ ucundaki (Marmara Denizi) giriş tuzluluğu değerleri ise $S_{1L} = 17.5$ ppt ve $S_{20} = 38.5$ ppt olarak bilinmektedir. Başka bir deyişle bu değerler $\Delta\rho/\rho$ parametresinin hesaplanması için kullanılan tuzluluk değerleridir. Bu durum şematik olarak Şekil 6.1’de verilmektedir.

Yukarıda tanımlanan model parametrelerinin daha iyi açıklanabilmesi iki tabakalı akım ve karışım mekanizmasının şematik gösterimi Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1 : Boğazdaki iki tabakalı akım ve karışım mekanizmasının şematik gösterimi.

Karışım mekanizması dahil edildiğinde boğaz giriş çıkışlarında alt ve üst tabaka debilerinin tanımlanması ise bir diğer önemli husustur. Sırasıyla üst tabaka giriş, üst tabaka çıkış, alt tabaka giriş ve alt tabaka çıkış debilerin nasıl belirleneceği Denklem 6.1,6.2,6.3 ve 6.4’te verilmiştir.

$$Q_{10} = Q_1 + \frac{Q_{m21} - Q_{m12}}{2} \quad (6.1)$$

$$Q_{1L} = Q_1 - \frac{Q_{m21} - Q_{m12}}{2} \quad (6.2)$$

$$Q_{20} = Q_2 + \frac{Q_{m12} - Q_{m21}}{2} \quad (6.3)$$

$$Q_{2L} = Q_2 - \frac{Q_{m12} - Q_{m21}}{2} \quad (6.4)$$

Toplamda hesaplanması gereken sekiz bilinmeyen için gereken sekiz denklem ise Sümer ve Bakioğlu [1] çalışmasına dört bilinmeyene ek olarak iki karışım hızı denklemi ve iki tuz kütlesi sürekliliği denklemidir. Karışım hızı denklemlerinden çekilen karışım debileri denklemleri Denklem 6.5 ve 6.6'da verilmiştir.

$$Q_{m21} = \frac{Q_1}{\left(\frac{h_{10}+h_{1L}}{2}\right)} \times L \times a \times Ri_{0,1}^b \quad (6.5)$$

$$Q_{m12} = \frac{Q_2}{\left(\frac{h_{20}+h_{1L}}{2}\right)} \times L \times a \times Ri_{0,2}^b \quad (6.6)$$

Geriye kalan son denklem takımı olan tuz kütlesi sürekliliği üst tabaka ve alt tabaka için Denklem 6.7 ve 6.8'de verilmiştir.

$$Q_{1L}S_{1L} + Q_{m21}\left(\frac{S_{20}+S_{2L}}{2}\right) - Q_{m12}\left(\frac{S_{10}+S_{1L}}{2}\right) = Q_{10}S_{10} \quad (6.7)$$

$$Q_{20}S_{20} + Q_{m12}\left(\frac{S_{10}+S_{1L}}{2}\right) - Q_{m21}\left(\frac{S_{20}+S_{2L}}{2}\right) = Q_{2L}S_{2L} \quad (6.8)$$

Karışım mekanizmasının da dahil edilmesi ile ortaya çıkan sekiz bilinmeyen ve sekiz denklemlilikli non-lineer sistemin girdi parametreleri, bilinmeyenleri ve ana denklemleri özet olarak Çizelge 6.1'de sunulmuştur. Bu denklem sisteminin çözümü ile üst ve alt tabaka akımlarının tüm hidrodinamik ve karışım parametreleri elde edilebilmektedir. Denklem sistemi çözümünden üst tabaka debisi (Q_1), alt tabaka debisi (Q_2), sırasıyla üst tabaka boğaz giriş ve çıkışındaki su seviyesi yükseliği (h_{10} ve h_{1L}), alt tabaka boğaz giriş ve çıkışındaki su seviyesi yükseliği (h_{20} ve h_{2L}), sırasıyla alt tabakadan üst tabakaya ve üst tabakadan alt tabakaya geçen karışım debisi (Q_{m21} ve Q_{m12}), üst tabakanın $x = 0$ ucundaki (Marmara Denizi) çıkış tuzluluk değeri (S_{10}) ve alt tabakanın $x = L$ ucundaki (Karadeniz) çıkış tuzluluk değeri (S_{2L}) elde edilebilmektedir.

Çizelge 6.1 : Geliştirilen iki tabakalı akım ve karışım matematik modelinin girdi parametreleri, bilinmeyenleri, denklemleri.

Matematik Model Girdi Parametreleri	Matematik Model Bilinmeyenleri	Matematik Modelin Denklemleri
$L, W, D, \Delta h, \Delta \rho / \rho$ (S_{1L} ve S_{20})	$Q_1, Q_2, h_{10}, h_{1L},$ $Q_{m21}, Q_{m12}, S_{10}, S_{2L}$	Denklem 3.5- 3.8 Denklem 6.5-6.8

Matematik modelin çözümünde faydalanan diğer bağıntılar, sistemi daha komplike hale getirmemek adına ayrı ayrı denklemler şeklinde kullanılmak yerine parametrelerin değerleri yerlerine yazılmak suretiyle kullanılmıştır. Bununla birlikte hem tabandaki hem de arayüzdeki sürtünmenin hesaplanması için kullanılan Denklem 3.10-Denklem 3.15, Sümer ve Bakioğlu [1] çalışmasında yapıldığı üzere iterasyonla çözülmüştür. Modelin detayları Ek 1.A'da sunulan Matlab kodundan takip edilebilir.

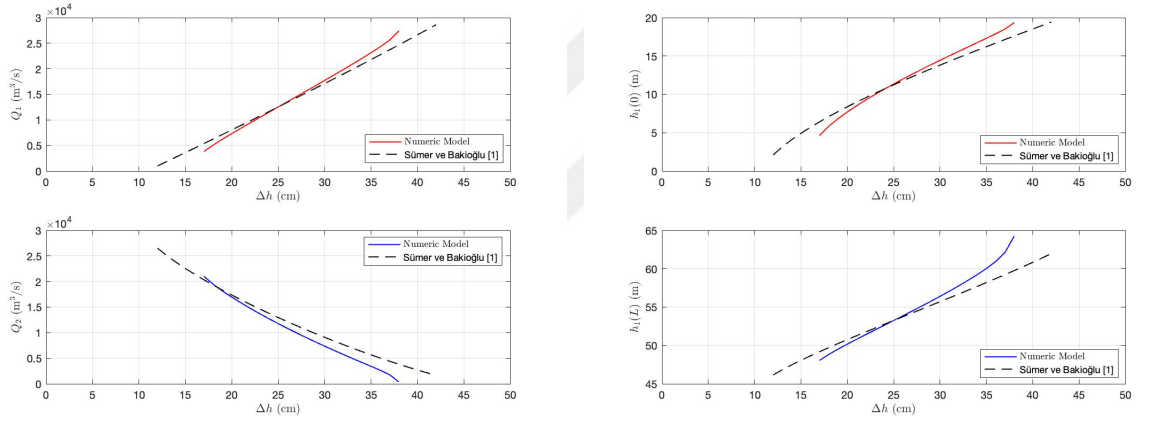
6.2 Matematik Modelin Uygulanması ve Elde Edilen Sonuçlar

Yukarıda ayrıntılı olarak açıklandığı şekilde geliştirilen matematik model Matlab'da kodlanmış ve çalışır hale getirilmiştir. Diğer taraftan, sunulan literatürde de görülebileceği üzere karışım debilerinin Richardson sayısı cinsinden ampirik olarak ifadesi ile ilgili çok farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Kurulan bu modelin istenilen herhangi bir Boğaz yapısına uygulanabilmesi, farklı Richardson sayıları için veya tabakaların farklı yoğunluk ve hız değerleri için genelleştirilebilmesi adına, Denklem 6.5 ve Denklem 6.6'da yer alan a ve b sabitleri kalibrasyon parametreleri olarak kullanılmıştır. Başka bir deyişle a ve b sabitlerinin seçilmesi ile model kalibre edilmiş olmaktadır.

6.2.1 İstanbul Boğazı için matematik modelin uygulanması

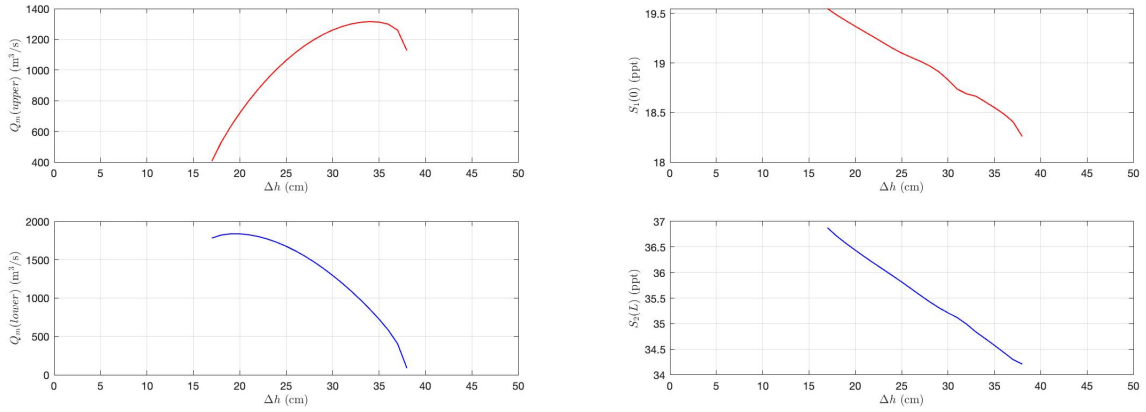
İstanbul Boğazı için model kalibrasyon işlemi ile, elde edilen değerlerin daha gerçekçi sonuçlar verebilmesi için, daha önce yapılan çalışmalar ışığında model sabitleri $a = 5 \times 10^{-4}$ ve $b = -1$ olarak belirlenmiştir. İstanbul Boğazı için bu değerler ve diğer girdi parametreleri ile ($\Delta \rho / \rho = 0.014$ $S_{1L} = 17.5$ ppt ve $S_{20} = 38.5$ ppt) seviye farkı Δh 'nin bir fonksiyonu olarak elde edilen üst ve alt tabaka debileri ve derinlikleri Şekil 6.2'de verilmektedir.

Şekil 6.2 ayrıca tabakalar arası karışımı dikkate almayan Sümer ve Bakioğlu [1] modelinin sonuçları da gösterilmektedir. Bu şekilden görüldüğü üzere Bölüm 4.1’de verildiği üzere, Sümer ve Bakioğlu [1] çalışmasında ortalama su seviyesi farkı ($\Delta h = 33 \text{ cm}$) için elde edilen üst tabaka debisi $Q_1 = 19700 \text{ m}^3/\text{s}$ ve alt tabaka debisi de $Q_2 = 7300 \text{ m}^3/\text{s}$ ’dir. Geliştirilen bu yeni modelin aynı girdi parametreleri için uygulanması ile üst tabaka debisi $Q_1 = 20100 \text{ m}^3/\text{s}$ ve alt tabaka debisi $Q_2 = 6700 \text{ m}^3/\text{s}$ olarak bulunmuştur. Görüldüğü üzere iki modelin çözümleri arasında net bir tutarlılık bulunmaktadır. Ayrıca iki modelin parametrik çözümleri de oldukça tutarlı bir tablo ortaya koymaktadır. Bu itibarla geliştirilen yeni modelin güvenilir sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 6.2 : İstanbul Boğazı için ortalama akım şartlarında debi ve derinlik değerlerinin Δh ’nin bir fonksiyonu olarak değişimi ($a = 5 \times 10^{-4}$ ve $b = -1$); Sümer ve Bakioğlu [1] çalışmasındaki debi ve derinlik değerleri ile karşılaştırılması.

Karışım debileri ve tuzluluk değerlerinin değişimi ise Şekil 6.3’te verilmiştir. Bulunan bu değerlere ek olarak, İstanbul Boğazı için alt tabakadan üst tabakaya ve üst tabakadan alt tabakaya gerçekleşen karışım debileri (sırasıyla Q_{m21} ve Q_{m12}) ve her iki tabakanın çıkış tuzluluk değerleri (S_{10} ve S_{2L}) de geliştirilen yeni model sayesinde hesaplanabilmektedir. Bu değerler seviye farkı Δh ’ın fonksiyonu olarak sunulmaktadır.



Şekil 6.3 : İstanbul Boğazı için ortalama akım şartlarında karışım debileri ve tuzluluk değerlerinin Δh 'nin bir fonksiyonu olarak değişimi ($a = 5 \times 10^{-4}$ ve $b = -1$)

Şekil 6.3'te görülebileceği gibi Δh 'nin küçük değerlerinde üst tabakadan alt tabakaya doğru karışım daha baskın iken Δh 'ın artmasıyla üst akımın kuvvetlenmesi sonucu alt tabaka üst tabakaya doğru karışım baskın hale gelmektedir. Buna karşın yaklaşık olarak $\Delta h = 33 \text{ cm}$ 'de alt tabakadan üst tabakaya geçiş debisinin (Q_{m21}) en yüksek değerine ulaştığı, Δh 'ın daha da artması ile tedrici olarak azaldığı görülmektedir. Bu azalmanın sebebi, üst tabaka debisinin artmasına rağmen, üst tabaka derinliğinin de artması ve Richardson sayısının yükselerek tabakalaşmanın daha stabil hale gelmesidir. Karışım mekanizmasının Δh ile bu şekilde değişmesi, incelenen olgunun ne denli çok yönlü bir fiziğe sahip olduğunu göstermektedir. Benzer bir durum üst tabakadan alt tabakaya karışım debisinin (Q_{m12}) değişiminde de görülmektedir, ancak bu davranış üst tabakaya karışım debisinde olduğu kadar belirgin değildir.

Sümer ve Bakioğlu [1] çalışmasında İstanbul Boğazı'nın iki ucundaki su seviyesi farkının eldeki saha verilerine göre ortalaması $\Delta h = 33 \text{ cm}$ ve standart sapması da 13 cm olarak verilmiştir. Benzer şekilde aynı çalışmada Karadeniz ve Marmara arasındaki yoğunluk farkı da $\Delta \rho / \rho = 0.014$ ($S_{1L} = 17.5 \text{ ppt}$ ve $S_{20} = 38.5 \text{ ppt}$) olarak verilmektedir. Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda yürütülen matematik model ile alt tabakadan üst tabakaya geçen toplam karışım debisi $Q_{m21} = 1300 \text{ m}^3/\text{s}$ bulunurken, zıt yöndeki (üst tabakadan alt tabakaya geçen) toplam karışım debisi $Q_{m12} = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ olarak hesaplanmaktadır. Ünlüata vd. [6] tarafından yapılan saha

ölçümleri ise alt tabakadan üst tabakaya geçen toplam karışım debisi ve üst tabakadan alt tabakaya geçen toplam karışım debileri yaklaşık olarak sırasıyla $Q_{m21} = 2000 m^3/s$ ve $Q_{m12} = 1200 m^3/s$ olarak ölçülmüştür. Görüldüğü üzere model sonuçları mertebe ve oran olarak saha ölçümleri ile uyumludur.

Marmara Denizi ve Karadeniz arasındaki yoğunluk farkının $\Delta\rho/\rho = 0.014$ olması durumunda su seviyesi farkının çeşitli değerleri için elde edilen model sonuçları rakamsal olarak Çizelge 6.2’de verilmiştir. Burada Δh su seviyesi farkı, Q_1 ve Q_2 sırasıyla üst ve alt tabaka debileri, h_{10} ve h_{1L} sırasıyla üst tabaka giriş ve çıkış su seviyesi yükseklikleri, h_{20} ve h_{2L} sırasıyla alt tabaka giriş ve çıkış su seviyesi yükseklikleri, Q_{m21} alt tabakadan üst tabakaya geçen debi, Q_{m12} üst tabakadan alt tabakaya geçen debi, S_{10} üst tabaka girişindeki tuzluluk, S_{2L} alt tabaka çıkışındaki tuzluluk değerleridir. Su seviyesi farkının elde edilen değerlerde belirleyici bir role sahip olduğu açıkça görülmektedir ve İstanbul Boğazı için ortalama su seviyesi farkı olan $\Delta h = 33 cm$ için model sonuçları daha önce yapılan saha ölçümleri ile örtüşmektedir (Şekil 2.3).

Çizelge 6.2 : Farklı su seviyesi değerleri için model sonuçları.

Δh [cm]	$Q_1(\times 10^3)$ [m^3/s]	$Q_2(\times 10^3)$ [m^3/s]	h_{10} [m]	h_{1L} [m]	h_{20} [m]	h_{2L} [m]	$Q_{m21}(\times 10^3)$ [m^3/s]	$Q_{m12}(\times 10^3)$ [m^3/s]	S_{10} [ppt]	S_{2L} [ppt]
17	3.8	21	4.6	48.1	59.9	16.4	0.4	1.8	19.5	36.9
20	7.3	17	7.7	50.2	56.8	14.3	0.7	1.8	19.4	36.4
22	9.4	14.7	9.3	51.4	55.2	13.1	0.9	1.8	19.3	36.2
25	12.5	11.8	11.4	53.3	53.2	11.2	1.1	1.7	19.1	35.8
27	14.6	10	12.6	54.5	51.9	10	1.2	1.5	19	35.6
30	17.7	0.7	14.4	56.4	50	8.1	1.3	1.3	18.8	35.2
33	20.9	5	16.2	58.5	48.3	6	1.3	1	18.7	34.8
35	23.1	3.4	17.3	60	47.2	4.5	1.3	0.7	18.6	34.6
37	25.6	1.8	18.5	62.1	46	2.4	1.3	0.4	18.4	34.3

6.2.2 Çanakkale Boğazı için matematik modelin uygulanması

Karışım mekanizmasının da dahil edilmesiyle hazırlanan model İstanbul Boğazı’na uygulandıktan sonra, girdi parametreleri değiştirilerek Çanakkale Boğazı için de uygulanmıştır. Burada bahsedilen girdi parametreleri; kıvrımlardan, ani daralma-genişlemeden ve boğaz giriş-çıkışlarından kaynaklanan toplam yersel yük kayıpları katsayısı, boğazın Ege ve Marmara Denizi ucundaki tuzluluk oranları, boğazın derinlik, uzunluk ve genişliğidir (6.1). Çanakkale Boğazı’ndaki Reynolds

sayılarının İstanbul Boğazı ile benzer değerlere sahip olmasına rağmen, Richardson sayısının çarpanı ve üssü olan a ve b sabitleri İstanbul Boğazı için kullanılan değerler ile Çanakkale Boğazı'ndaki akım ve karışım mekanizmasının temsil edilemediği görülmüştür. Bölüm 2'de verilen Ünlüata vd. [6] saha ölçümleri ile kıyaslandığında, a ve b sabitlerinin farklı değeri seçildiğinde dahi, model sonuçlarının uyumsuz olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar Çanakkale Boğazı ortalama akım koşullarını yansıtan su seviyesi farkı için ($\Delta h = 13 \text{ cm}$) tutarsız olduğu kadar, farklı Δh ve $\Delta \rho / \rho$ değerleri için de beklenen mertebelerde değildir.

Çanakkale Boğazı için model sonuçlarının neden saha ölçümleri ile uyumlu olmadığını anlayabilmek için kullanılan denklem takımları ve elde edilen sonuçlar tekrar derinlemesine incelenmiştir. Karışım debilerinin ihmal edildiği dört bilinmeyenli dört denklem sisteminde ve karışım debilerinin eklendiği sekiz bilinmeyenli sekiz denklem sisteminde kullanılan Froude şartı denklemi, diğer bir deyişle daralma bölgelerinin toplam Froude sayısının 1'e eşit olması şartı denklemlerinde (Denklem 6.9 ve 6.10) eşitliğin sağ tarafındaki boyutsuz yoğunluk farkı değerleri bir miktar farklıdır. Karışımın dikkate alındığı sekizli denklem sisteminde Froude şartı denklemleri aşağıdaki biçimde yer almaktadır.

$$\frac{q_1^{*2}}{h_{10}^3} + \frac{q_2^{*2}}{h_{20}^3} = \left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)_0 \quad (6.9)$$

$$\frac{q_1^{*2}}{h_{1L}^3} + \frac{q_2^{*2}}{h_{2L}^3} = \left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)_L \quad (6.10)$$

Dörtlü denklem sisteminde $\left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)_0 = \left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)_L$ olmaktadır, dolayısıyla bu denklemler her iki model sisteminde de aynıdır. Bu denklem takımının İstanbul Boğazı'nda doğru sonuçlar verip Çanakkale Boğazı'nda yeterince doğru sonuçlar verememesinin nedeni olarak, Çanakkale Boğazı'nın su seviyesinin tedrici olarak değişmesi öngörülebilir. Zira hem Çanakkale Boğazı boyunca birçok noktada ani daralma ortaya çıkmakta, hem de Boğaz'ın Marmara ve Ege uçlarında daralma tedrici olarak meydana gelmektedir (Şekil 2.1). Bu noktada iş bu tez çalışması kapsamında geliştirilmiş olan bir boyutlu model yaklaşımının Çanakkale Boğazı'nın akım ve karışım mekanizmasının çözülebilmesi için uygun olmadığı düşünülmektedir. Bu tip bir akım yapısı için hem Ege Denizi hem de Marmara Denizi ucundaki yoğunluk profilini ve iki deniz

arasındaki seviye farkını sınır koşulu olarak dikkate alacak, Boğaz'ın tüm geometrisini hesaba katacak üç boyutlu bir sayısal model uygulanması en doğru yaklaşım olacaktır.





7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yürütülen bu yüksek lisans tez çalışması ile boğazların iki tabakalı akım yapıları üzerinde durulmuş; üst ve alt tabakaların hidrolik parametreleri ile tabakalar arası karışımın bir boyutlu basit bir model ile hesaplanabilmesi amaçlanmıştır. Ortaya konulan matematiksel modelde boğaz sistemlerinde akımın ana nedeni olan su seviyesi farkı ve tuzluluktan kaynaklanan yoğunluk farkı ana girdi parametreleri olarak ele alınmıştır. Hazırlanan denklem takımlarıyla dünyanın en önemli boğazlarından olan İstanbul ve Çanakkale Boğazı için parametrik çözümler elde edilmiş ve literatürdeki saha ölçümleri ve model sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Konu ile ilgili literatürdeki kapsamlı çalışmalar Bölüm 2’de derlenmiştir. İstanbul ve Çanakkale Boğazları’nın fiziksel özelliklerinin yanı sıra, bu boğazlardaki akımın hidrodinamiği de özetlenmiştir. Özellikle boğazlardaki tabakalı akımı ortaya çıkaran su seviyesi ve tuzluluk (yoğunluk farkı) başta olmak üzere, her iki boğaz için de modelin ihtiyaç duyduğu geometrik ve hidrolik girdi parametreleri belirlenmiştir. Tabakalar arası karışımı kontrol eden ana boyutsuz parametre olan Richardson sayısının, tabakalar arasındaki karışımı nasıl belirlediği ile ilgili olarak literatürde birçok farklı yaklaşım olduğu görülmüştür. Bu yaklaşımların genel itibarı ile ortak sonucu tabakalar arasındaki boyutsuz karışım hızının Richardson sayısının bir fonksiyonu olduğudur. Bu fonksiyonun sabitleri olan a ve b sabitlerinin değerleri için literatürde birçok farklı yaklaşım bulunmaktadır (Bölüm 2).

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen matematik modelin çıkış noktası olan Sümer ve Bakioğlu [1] çalışması Bölüm 3’te ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ortaya konulan bu matematik modelde yükseklik farkı (Δh) ve yoğunluk farkı ($\Delta \rho$) değerlerine bağlı olarak dinamik denklemlerle her iki tabakanın akım debileri ve tabaka derinliklerini belirlenebilmektedir. Sümer ve Bakioğlu [1] çalışmasında bu dört bilinmeyenin çözülmesi için dört denklemlilik bir non-lineer sistem kullanılmıştır. İlgili modelin çözümünde bilinmeyenler alt ve üst akım debileri Q_1 ve Q_2 , üst tabakanın her bir ucundaki derinliği (h_{10} ve h_{1L})’dir. Bu bilinmeyenlerin çözümü için kullanılan dört

denklem ise iki enerji denklemi ve iki Froude şartı denklemi diğer bir deyişle daralma bölgelerinin toplam Froude sayısının 1'e eşit olması şartını sağlayan denklemlerdir. Sümer ve Bakioğlu [1] yaptıkları matematik model çözümü ile İstanbul Boğazı'nın iki ucu arasındaki seviye farkının ortalama değeri olan $\Delta h = 33 \text{ cm}$ için üst ve alt tabaka debilerini sırasıyla $Q_1 = 19700 \text{ m}^3/\text{s}$ ve $Q_2 = 7300 \text{ m}^3/\text{s}$ olarak elde etmişlerdir.

Bu tez çalışması kapsamında, tabakalı akımların hidrodinamiği ve karışım mekanizmasını çözebilmek için Sümer ve Bakioğlu [1] çalışması ve literatürdeki diğer çalışmalar ışığında bir matematik model oluşturulmuştur. Öncelikle modelde tabakalar arası karışım debisi ihmal edilerek, Sümer ve Bakioğlu [1] çalışmasındaki metodoloji izlenmiştir. Bu ilk matematik model ile İstanbul Boğazı'ndaki ortalama akım koşulları için Sümer ve Bakioğlu [1] modelinin sonuçları ile özdeş bir biçimde üst tabaka debisi ($Q_1 = 19700 \text{ m}^3/\text{s}$) ve alt tabaka debisi ($Q_2 = 7300 \text{ m}^3/\text{s}$) değerleri hesaplanmıştır.

Modeldeki girdi parametreleri, Çanakkale Boğazı için elde edilen değerler ile değiştirilerek ortalama akım koşulları için alt ve üst tabakaların akım debileri ve tabaka derinlikleri hesaplanmıştır. Daha sonra farklı tuzluluk değerlerinin alt ve üst akımın debi ve derinlik değerlerine etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için model tuzluluk farkına göre parametrik olarak çalıştırılmıştır. Bu aşamada üst ve alt tabaka akımlarının baskılanıp durma seviyesine geldikleri limit su seviyesi farkı (Δh) değerleri de hem İstanbul Boğazı hem de Çanakkale Boğazı için tuzluluk farkı (ΔS) bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlardan açıkça görülmektedir ki, üst ve alt tabakadaki tuzluluk farkı (ΔS) arttıkça akımı durma noktasına getiren limit su seviyesi farkı (Δh) da hem üst hem de alt tabaka için artmaktadır. Bu matematik model sonuçları, Sannino vd. [2] çalışmasında elde edilen üst ve alt akım debileri ve net debi farkı değerleri ile karşılaştırıldığında uyumlu sonuçlar elde ettiği görülmüştür (Bölüm 4).

Bu yüksek lisans tezi kapsamında hedeflenen ana amaç, boğaz sistemi boyunca alt ve üst tabaka debilerinin belirlenmesinin yanı sıra alt tabakadan üst tabakaya ve üst tabakadan alt tabakaya geçen karışım debilerinin de belirlenebilmesidir. Bu amaçla Sümer ve Bakioğlu [1] çalışmasındaki matematik model temel alınmış ve tabakalar arası karışım mekanizmasının denklem takımına eklenmesi ile model geliştirilmiştir. Tabakalar arası karışım hesabında, tabakalaşmanın stabilitesinin bir ölçütü olan boyutsuz Richardson sayısı (Ri_0) çok önemli bir rol oynamaktadır (Denklem 2.1). Tabakalar arası boyutsuz karışım hızı literatürde Richardson sayısının bir fonksiyonu

olarak ampirik eşitliklerle ifade edilmektedir (Denklem 2.3). Bu eşitliklerdeki a ve b sabitleri için Richardson sayısının değerine bağlı olarak birçok değer önerilmektedir (Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.2). Bu yaklaşım kullanılarak Orhon vd. [8] tarafından İstanbul Boğazı tabakalar arası karışım debileri (Q_{m12} ve Q_{m21}) dört adımlı prosedür ile hesaplanmıştır. Bu çalışmada da benzer bir yaklaşım Çanakkale Boğazı'na uygulanmıştır (5.3).

Karışım mekanizmasının da dahil edilerek boğaz akımlarının çözülebilmesi için Sümer ve Bakioğlu [1] çalışmasındaki matematik modele çeşitli denklemler eklenerek, sekiz bilinmeyenli sekiz denklem esasına dayalı yeni bir matematik model ortaya konmuştur (Bölüm 6). Sümer ve Bakioğlu [1] çalışmasındaki mevcut dört bilinmeyen olan üst tabaka debisi (Q_1), alt tabaka debisi (Q_2), sırasıyla üst tabaka boğaz girişi ve çıkışındaki arayüz derinliği (h_{10} ve h_{1L}) parametrelerine ek olarak sisteme dahil edilen bu ek dört bilinmeyen ise; üst tabakadan alt tabakaya geçen karışım debisi (Q_{m12}), alt tabakadan üst tabakaya geçen karışım debisi (Q_{m21}), üst tabakanın $x = 0$ ucundaki (Marmara Denizi) çıkış tuzluluğu (S_{10}) ve alt tabakanın $x = L$ ucundaki (Karadeniz) çıkış tuzluluğudur (S_{2L}).

Sümer ve Bakioğlu [1] çalışmasında İstanbul Boğazı'nın iki ucundaki su seviyelerinin eldeki saha verilerine göre ortalaması $\Delta h = 33 \text{ cm}$ ve standart sapması da 13 cm olarak verilmiştir. Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda uygulanan matematik model ile alt tabakadan üst tabakaya geçen karışım debisi $Q_{m21} = 1300 \text{ m}^3/\text{s}$ iken üst tabakadan alt tabakaya geçen karışım debisi $Q_{m12} = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ olarak hesaplanmıştır. Ünlüata vd. [6] tarafından yapılan saha ölçümlerinde ise bu iki debiyi sırasıyla sırasıyla $Q_{m21} = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ ve $Q_{m12} = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$ raporlanmaktadır. Görüldüğü üzere matematik model sonuçları ile saha ölçümleri arasında mertebe ve oran olarak genel bir uyum söz konusudur.

Karışımın da dahil edildiği matematik modelden elde edilen sonuç matrisi Çanakkale Boğazı ortalama su seviyesi ($\Delta h = 13 \text{ cm}$) için incelendiğinde, elde edilen sonuçların literatürdeki değerlerle örtüşmediği görülmektedir. Bu uyumsuzluğun muhtemel sebebinin anlaşılması için kullanılan denklem takımlarından çıkan sonuçlar tekrar derinlemesine incelenmiştir. Yapılan inceleme sonucunda modelde kullanılan Froude şartı denklemlerinin Çanakkale Boğazı için istenilen sonucu veremeyebileceği, zira Çanakkale Boğazı'nın geometrisi itibarı ile su seviyesinin ve akım rejiminin tedrici

olarak değişmesinin ilgili denklemde esas alınan şartı ihlal edebileceği sonucuna varılmıştır.

Tüm bunlara ek olarak, modeldeki karışım mekanizmasının daha hassas temsil edilebilmesi için, karışım denklemleri Boğaz boyunca her 100 *m* aralık için çözülmüş ve matematik modele toplam karışım debisi olarak yansıtılmıştır. Ancak bu yaklaşımla da elde edilen sonuçlarda herhangi bir iyileşme sağlanamamıştır. Bu tür bir modelin kullanılmamasındaki bir diğer neden de işlem yükünün artmasıdır. Yani bu yüksek lisans tezinin çıkış noktası olan boğazdaki karışım debilerinin etkili ve pratik bir şekilde hesaplanabilmesi ilkesinin dışına çıkılmış olmaktadır.

Tabakalı akımların hidrodinamiği, akım ve karışım parametrelerini ele alacak daha sonraki çalışmaların yönü karışımın mekanizmasının daha iyi anlaşılması ve matematiksel modellere daha iyi yansıtılması olacaktır. Gelecekteki bu tür çalışmalara yol gösterebilmek adına aşağıdaki noktalar üzerinde durulması faydalı olacaktır:

- Boğaz hidrodinamiğini etkileyen geometrik, coğrafi, hidrografik, meteorolojik, jeolojik ve hidrolik etmenlerin denklem takımlarına daha detaylı eklenmesi,
- Hidrolik parametrelerin tedrici değişkenlik gösterdiği boğazlar için boyutsuz yoğunluk farkı denkleminin daha iyi sonuçlar verebilen hale dönüştürölmesi ya da başka denklemlerle değiştirilmesi,
- Bu tez kapsamında kullanılan girdi parametrelerinden daha geniş bir aralıktaki parametreler için uygulanması,
- Taban etkileşiminin yanı sıra Boğazların kıyılarında ortaya çıkan sürtünme ve enerji kayıplarının modele dahil edilmesi.





KAYNAKLAR

- [1] **Sümer, B.M. ve Bakioğlu, M.** (1981). Sea-Strait flow with special reference to Bosphorus.
- [2] **Sannino, G., Sözer, A. ve Özsoy, E.** (2017). A high-resolution modelling study of the Turkish Straits System, *Ocean Dynamics*, 67(3), 397–432.
- [3] **Christodoulou, G.** (1986). Interfacial mixing in stratified flows, *Journal of hydraulic research*, 24(2), 77–92.
- [4] **Strang, E. ve Fernando, H.** (2001). Entrainment and mixing in stratified shear flows, *Journal of Fluid Mechanics*, 428, 349–386.
- [5] **Fernando, H.J.** (1991). Turbulent mixing in stratified fluids, *Annual review of fluid mechanics*, 23(1), 455–493.
- [6] **Ünlülata, Ü., Oğuz, T., Latif, M. ve Özsoy, E.,** (1990). On the physical oceanography of the Turkish Straits, *The physical oceanography of sea straits*, Springer, s.25–60.
- [7] **Hager, W.H.,** (2010). Losses in flow, *Wastewater Hydraulics*, Springer, s.17–54.
- [8] **Orhon, D., Sözen, S., Kirca, V., Duba, S., Mermutlu, R. ve Sumer, B.** (2021). Pollutant dynamics between The Black Sea and The Marmara Sea: Basis for wastewater management strategy, *Marine Pollution Bulletin*, 168, 112388.
- [9] **Özsoy, E. ve Altıok, H.** (2016). A review of water fluxes across the Turkish Straits System, *The Sea of Marmara; Marine Biodiversity, Fisheries, Conservation and Governance*, (Eds: E. Özsoy, MN Çağatay, N. Balkıs, N. Balkıs, and B. Öztürk), TÜDAV, 42–61.
- [10] **Özsoy, E.** (2016). Introduction to geographical, historical and scientific importance of the Turkish Straits System, *The Sea of Marmara; Marine Biodiversity, Fisheries, Conservation and Governance*, (Eds: E. Özsoy, MN Çağatay, N. Balkıs, N. Balkıs, and B. Öztürk), TÜDAV, 1–12.
- [11] **Soffientino, B. ve Pilson, M.** (2009). Osservazioni intorno al Bosforo Tracio overo Canale di Constantinopoli rappresentate in lettera alla sacra real maestá Cristina regina di Svezia da Luigi Ferdinando Marsilii, 1681: first English translation, with notes, *Earth sciences history*, 28(1), 57–83.
- [12] **Assaf, G. ve Hecht, A.** (1974). Sea straits: a dynamical model, *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, cilt 21, Elsevier, s.947–958.

- [13] **Anati, D.A., Assaf, G. ve Thompson, R.O.** (1977). Laboratory models of sea straits, *Journal of Fluid Mechanics*, 81(2), 341–351.
- [14] **Özsoy, E., Di Iorio, D., Gregg, M.C. ve Backhaus, J.O.** (2001). Mixing in the Bosphorus Strait and the Black Sea continental shelf: observations and a model of the dense water outflow, *Journal of marine systems*, 31(1-3), 99–135.
- [15] **Çeçen, K., Bayazıt, M., Sümer, M., Güçlüer, Ş., Doğusal, M. ve Yüce, H.** (1981). İstanbul Boğazı'nın Hidrolik ve Oşinografik Etüdü (The Hydraulic and Oceanographic Survey of Istanbul Strait), *Istanbul Technical University: Istanbul, Turkey*.
- [16] **Gregg, M.C. ve Özsoy, E.** (2002). Flow, water mass changes, and hydraulics in the Bosphorus, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(C3), 2–1.
- [17] **Damoc** (1971). *Master Plan and Feasibility Report for Water Supply and Sewerage for the Istanbul Region*, Damoc.
- [18] **Ozturk, M. ve Altas, F.** (2021). The meteorological, hydrological and tidal components of Bosphorus flow, *Regional Studies in Marine Science*, 48, 102060.
- [19] **Peneva, E., Stanev, E., Belokopytov, V. ve Le Traon, P.Y.** (2001). Water transport in the Bosphorus Straits estimated from hydro-meteorological and altimeter data: seasonal to decadal variability, *Journal of Marine Systems*, 31(1-3), 21–33.
- [20] **Yuksel, Y., Ayat, B., Ozturk, M.N., Aydoğan, B., Guler, I., Cevik, E.O. ve Yalçın, A.C.** (2008). Responses of the stratified flows to their driving conditions—A field study, *Ocean Engineering*, 35(13), 1304–1321.
- [21] **Jarosz, E., Teague, W.J., Book, J.W. ve Beşiktepe, Ş.** (2011). Observed volume fluxes in the Bosphorus Strait, *Geophysical Research Letters*, 38(21).
- [22] **Beşiktepe, Ş.T., Sur, H.İ., Özsoy, E., Latif, M.A., Oğuz, T. ve Ünlüata, Ü.** (1994). The circulation and hydrography of the Marmara Sea, *Progress in Oceanography*, 34(4), 285–334.
- [23] **Sözer, A. ve Özsoy, E.** (2017). Modeling of the Bosphorus exchange flow dynamics, *Ocean dynamics*, 67(3-4), 321–343.
- [24] **Ilicak, M., Federico, I., Barletta, I., Mutlu, S., Karan, H., Ciliberti, S.A., Clementi, E., Coppini, G. ve Pinardi, N.** (2021). Modeling of the Turkish Strait System Using a High Resolution Unstructured Grid Ocean Circulation Model, *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(7), 769.
- [25] **Koşucu, M.M., Demirel, M.C., Kirca, V.O. ve Özger, M.** (2019). Hydrodynamic and Hydrographic Modeling of Istanbul Strait, *Processes*, 7(10), 710.
- [26] **Öztürk, M., Ayat, B., Aydoğan, B. ve Yüksel, Y.** (2012). 3D Numerical modeling of stratified flows: case study of the Bosphorus Strait, *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 138(5), 406–419.

- [27] **Öztürk, M.** (2013). Numerical modeling of the effect of duration of barotropic forcing on sea strait flow: case study of the Bosphorus Strait, *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(11), 1199–1211.
- [28] **Oguz, T., Özsoy, E., Latif, M.A., Sur, H.I. ve Ünlüata, Ü.** (1990). Modeling of hydraulically controlled exchange flow in the Bosphorus Strait, *Journal of Physical Oceanography*, 20(7), 945–965.
- [29] **Ozturk, M., Sahin, C. ve Yuksel, Y.** (2017). Current power potential of a sea strait: The Bosphorus, *Renewable Energy*, 114, 191–203.
- [30] **Abraham, G., Karelse, M. ve Van Os, A.** (1979). On the magnitude of interfacial shear of subcritical stratified flows in relation with interfacial stability, *Journal of Hydraulic Research*, 17(4), 273–287.
- [31] **Grubert, J.P.** (1989). Interfacial mixing in stratified channel flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(7), 887–905.
- [32] **Partheniades, E. ve Dermisis, V.** (1978). Interfacial friction coefficients in a two-layered stratified flow, *Coastal Engineering* 1978, s.2778–2797.
- [33] **Ellison, T. ve Turner, J.** (1959). Turbulent entrainment in stratified flows, *Journal of Fluid Mechanics*, 6(3), 423–448.
- [34] **Pollard, R.T., Rhines, P.B. ve Thompson, R.O.** (1973). The deepening of the wind-mixed layer, *Geophysical Fluid Dynamics*, 4(4), 381–404.
- [35] **Price, J.F.** (1979). On the scaling of stress-driven entrainment experiments, *Journal of Fluid Mechanics*, 90(3), 509–529.
- [36] **Kantha, L., Phillips, O. ve Azad, R.** (1977). On turbulent entrainment at a stable density interface, *Journal of Fluid Mechanics*, 79(4), 753–768.
- [37] **Moore, M.J. ve Long, R.R.** (1971). An experimental investigation of turbulent stratified shearing flow, *Journal of Fluid Mechanics*, 49(4), 635–655.
- [38] **Pedersen, F.B.** (1980). *A monograph on turbulent entrainment and friction in two-layer stratified flow*, Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University
- [39] **Atkinson, J.** (1988). Note on “Interfacial mixing in stratified flows”, *Journal of Hydraulic Research*, 26(1), 27–31.
- [40] **Sözer, A.** (2013). Numerical modeling of the Bosphorus exchange flow dynamics.
- [41] **Hill, A., Hickey, B., Shillington, F., Strub, P., Brink, K. ve Thomas, A.,** (1998), Eastern ocean boundaries. In *The sea. II. The global coastal ocean*.
- [42] **Maderich, V., Ilyin, Y. ve Lemeshko, E.** (2015). Seasonal and interannual variability of the water exchange in the Turkish Straits System estimated by modelling, *Mediterranean Marine Science*, 16(2), 444–459.

- [43] **Bayazit, M. ve Sümer, M.** (1982). İstanbul Boğazı'nın Hidrolik ve Oşinografik Etüdü-2 (The Hydraulic and Oceanographic Survey of Istanbul Strait-2), *TBTAK Su. Alma. Ünitesi. Kesin. Rapor*, 23.
- [44] **Kato, H. ve Phillips, O.** (1969). On the penetration of a turbulent layer into stratified fluid, *Journal of Fluid Mechanics*, 37(4), 643–655.
- [45] **Wu, J.** (1973). Wind-induced turbulent entrainment across a stable density interface, *Journal of Fluid Mechanics*, 61(2), 275–287.
- [46] **Kit, E., Berent, E. ve Vajda, M.** (1980). Vertical Mixing Induced By Wind And Rotating Screen In A Stratified Fluid In A Channel, *Journal of Hydraulic Research*, 18(1), 35–58.
- [47] **Chu, V.H. ve Vanvari, M.R.** (1976). Experimental study of turbulent stratified shearing flow, *Journal of the Hydraulics Division*, 102(6), 691–706.
- [48] **Buch, E.**, (1980). Mixing experiments in fjords, *Fjord Oceanography*, Springer, s.227–232.
- [49] **Lofquist, K.** (1960). Flow and stress near an interface between stratified liquids, *The Physics of Fluids*, 3(2), 158–175.
- [50] **Macagno, E.O. ve Rouse, H.** (1961). Interfacial mixing in stratified flow, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 87(5), 55–81.

EKLER

EKLER A.1 : MATEMATİK MODELDE KULLANILAN MATLAB KODU



```

clc;
clear;
close all;
% Sumer and Bakioglu (1981) 0-D model of Bosphorus

%% Basic parameters
mixing=1;
g=9.81;
nu=1e-6;
Depth=64.5; % total depth
Length=31250; % total length
L=Length/Depth;
Width=907; % total width
ks=0.003; %Nikuradse equivalent sand roughness
k1=6; % loss coef. for upper layer
k2=k1; % loss coef. for the lower layer
% fi=0.0056; % initial value of interfacial friction coef.
% f0=0.01; % initial value of D-W friction coef.
a=5e-4; % Pedersen 1981, a
b=-1; % Pedersen 1981, b

salM=38.5;
salK=17.5;
    S1L=salK;    S20=salM;
rhoM=999.972*(1+6.67e-4*salM);
rhoK=999.972*(1+6.67e-4*salK);
drho_initial=(rhoM-rhoK)/rhoK; % relative density difference
%dh=0.33; % decline of elevation

results=zeros(51,10);

%% Equations on non-dimensional parameters
for dh=0:0.1:0.50 %dh=0.33
    nn=round(dh/0.5*50)+1;
    h=dh/Depth;
    deltaf=1;
    fi=0.0056; % initial value of interfacial friction coef.
    f0=0.01; % initial value of D-W friction coef.

    if mixing==1
        % mixing accounted for
        tryme=0;
        while deltaf>0.001
            tryme=tryme+1
            syms h10 h1L q1 q2 qm21 qm12 S10 S2L

            eq15=h1L-h10+(1+h-h1L)-(1-h10)+q1^2/2*...
                (1/h1L^2-1/h10^2)-fi*L/8*(q1^2*(h10+h1L)/...

```

$$\begin{aligned}
& (2 \cdot h_{10}^2 \cdot h_{1L}^2) + 2 \cdot q_1 \cdot q_2 / (h_{10} \cdot (1 + h - h_{1L}) - \dots \\
& (1 - h_{10}) \cdot h_{1L}) \cdot ((h_{10} - h_{1L}) / (h_{10} \cdot h_{1L}) + \dots \\
& ((1 + h - h_{1L}) - (1 - h_{10})) / (h_{10} \cdot (1 + h - h_{1L}) - \dots \\
& (1 - h_{10}) \cdot h_{1L}) \cdot \log(h_{10} \cdot (1 + h - h_{1L}) / \dots \\
& (1 - h_{10}) / h_{1L})) + q_2^2 / (h_{10} \cdot (1 + h - h_{1L}) - \dots \\
& (1 - h_{10}) \cdot h_{1L}) \cdot (((1 + h - h_{1L}) - (1 - h_{10})) / \dots \\
& ((1 - h_{10}) \cdot (1 + h - h_{1L})) + (h_{1L} - h_{10}) / \dots \\
& (h_{10} \cdot (1 + h - h_{1L}) - (1 - h_{10}) \cdot h_{1L}) \cdot \dots \\
& \log((1 - h_{10}) \cdot h_{1L} / h_{10} / (1 + h - h_{1L}))) - \dots \\
& k_{1/2} \cdot q_1^2 / (h_{1L} - h_{10})^2 \cdot (\log(h_{1L} / h_{10}))^2;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
eq16 = & (1 - ((999.972 \cdot (1 + 6.67e-4 \cdot (S_{20} + S_{2L}) / 2) - \dots \\
& 999.972 \cdot (1 + 6.67e-4 \cdot (S_{10} + S_{1L}) / 2)) / \dots \\
& (999.972 \cdot (1 + 6.67e-4 \cdot (S_{10} + S_{1L}) / 2))) \cdot \dots \\
& (h_{1L} - h_{10}) + (1 + h - h_{1L}) - (1 - h_{10}) + q_2^2 / 2 \cdot \dots \\
& (1 / (1 + h - h_{1L})^2 - 1 / (1 - h_{10})^2) + \dots \\
& f_i \cdot L / 8 \cdot ((1 + f_0 / f_i) \cdot q_2^2 \cdot ((1 - h_{10}) + \dots \\
& (1 + h - h_{1L})) / (2 \cdot (1 - h_{10})^2 \cdot (1 + h - h_{1L})^2) + \dots \\
& 2 \cdot q_1 \cdot q_2 / ((1 - h_{10}) \cdot h_{1L} - h_{10} \cdot (1 + h - h_{1L})) \cdot \dots \\
& (((1 - h_{10}) - (1 + h - h_{1L})) / ((1 - h_{10}) \cdot (1 + h - h_{1L}))) \dots \\
& + (h_{1L} - h_{10}) / ((1 - h_{10}) \cdot h_{1L} - h_{10} \cdot (1 + h - h_{1L})) \cdot \dots \\
& \log((1 - h_{10}) \cdot h_{1L} / h_{10} / (1 + h - h_{1L})) + q_1^2 / \dots \\
& ((1 - h_{10}) \cdot h_{1L} - h_{10} \cdot (1 + h - h_{1L})) \cdot ((h_{1L} - h_{10}) / \dots \\
& (h_{10} \cdot h_{1L}) + ((1 + h - h_{1L}) - (1 - h_{10})) / ((1 - h_{10}) \dots \\
& \cdot h_{1L} - h_{10} \cdot (1 + h - h_{1L})) \cdot \log(h_{10} \cdot (1 + h - h_{1L}) / \dots \\
& (1 - h_{10}) / h_{1L})) + k_{2/2} \cdot q_2^2 / ((1 + h - h_{1L}) - \dots \\
& (1 - h_{10}))^2 \cdot (\log((1 + h - h_{1L}) / (1 - h_{10})))^2;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
eq22 = & (q_1 + (q_{m21} - q_{m12}) / 2)^2 / h_{10}^3 + (q_2 - \dots \\
& (q_{m12} - q_{m21}) / 2)^2 / (1 - h_{10})^3 - \dots \\
& ((999.972 \cdot (1 + 6.67e-4 \cdot S_{20}) - 999.972 \cdot \dots \\
& (1 + 6.67e-4 \cdot S_{10})) / (999.972 \cdot (1 + 6.67e-4 \cdot S_{10}))) ;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
eq23 = & (q_1 - (q_{m21} - q_{m12}) / 2)^2 / h_{1L}^3 + \dots \\
& (q_2 + (q_{m12} - q_{m21}) / 2)^2 / (1 + h - h_{1L})^3 - \dots \\
& ((999.972 \cdot (1 + 6.67e-4 \cdot S_{2L}) - 999.972 \cdot \dots \\
& (1 + 6.67e-4 \cdot S_{1L})) / (999.972 \cdot (1 + 6.67e-4 \cdot S_{1L}))) ;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
upmix = & q_1 / ((h_{10} + h_{1L}) / 2) \cdot a \cdot (g \cdot ((999.972 \cdot \dots \\
& (1 + 6.67e-4 \cdot (S_{20} + S_{2L}) / 2) - 999.972 \cdot \dots \\
& (1 + 6.67e-4 \cdot (S_{10} + S_{1L}) / 2)) / \dots \\
& (999.972 \cdot (1 + 6.67e-4 \cdot (S_{10} + S_{1L}) / 2))) \cdot \dots \\
& Depth \cdot (h_{10} + h_{1L}) / 2 / (g \cdot Depth^3) / \dots \\
& (q_1 / (Depth \cdot (h_{10} + h_{1L}) / 2) + q_2 / \dots \\
& (Depth \cdot (1 - (h_{10} + h_{1L}) / 2)))^2 \cdot b \cdot L - q_{m21};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
downmix = & q_2 / (1 - (h_{10} + h_{1L}) / 2) \cdot a \cdot \dots \\
& (g \cdot ((999.972 \cdot (1 + 6.67e-4 \cdot (S_{20} + S_{2L}) / 2) - \dots
\end{aligned}$$

```

999.972*(1+6.67e-4*(S10+S1L)/2))/...
(999.972*(1+6.67e-4*(S10+S1L)/2)))*...
Depth*(1-(h10+h1L)/2)/(g.*Depth^3)/...
(q1/(Depth*(h10+h1L)/2)+q2/...
(Depth*(1-(h10+h1L)/2)))^2).^b.*L-qm12;

Salt1=(q1-(qm21-qm12)/2)*S1L-qm12*(S10+S1L)/2+...
qm21*(S20+S2L)/2-(q1+(qm21-qm12)/2)*S10;

Salt2=(q2-(qm12-qm21)/2)*S20-qm21*(S20+S2L)/2+...
qm12*(S10+S1L)/2-(q2+(qm12-qm21)/2)*S2L;

S=vpasolve([eq15,eq16,eq22,eq23,upmix,downmix,...
Salt1,Salt2],...
[h10,h1L,q1,q2,qm21,qm12,S10,S2L],...
[0 1;0 1;0 0.02;0 0.02;0 0.02;0 0.02;...
salK salM;salK salM]);

qq1=double(S.q1)*sqrt(g*Depth^3);
qq2=double(S.q2)*sqrt(g*Depth^3);
qqm21=double(S.qm21)*sqrt(g*Depth^3);
qqm12=double(S.qm12)*sqrt(g*Depth^3);
hh10=double(S.h10)*Depth;
hh1L=double(S.h1L)*Depth;
hh20=Depth-hh10;
hh2L=Depth+h-hh1L;

if isempty(hh10)==0
    f01=fzero(@(f0) 1/sqrt(f0)+2*log10(ks/12/...
        (hh20+hh2L)*4+2.5/sqrt(f0)/(qq2*2/nu)),0.01);

    fi1=fzero(@(fi) fi-max(0.0056,0.5/(qq2*2/nu)^0.45),fi);
    deltaf=max(abs(f01/f0-1),abs(fi1/fi-1));
    f0=f01;
    fi=fi1;
else
    deltaf=0;
end

if tryme>5
    qq1=0;
    qq2=0;
    hh10=0;
    hh1L=0;
    hh20=0;
    hh2L=0;
    qqm21=0;

```



```

        qqm12=0;
        S10=0;
        S2L=0;
        break
    else
        continue
    end

end

if isempty(hh10)==0

    results(nn,1)=qq1*Width;
    results(nn,2)=qq2*Width;
    results(nn,3)=hh10;
    results(nn,4)=hh1L;
    results(nn,5)=hh20;
    results(nn,6)=hh2L;
    results(nn,7)=qqm21*Width;
    results(nn,8)=qqm12*Width;
    results(nn,9)=double(S.S10);
    results(nn,10)=double(S.S2L);
end

else
    % mixing not accounted for
    drho=drho_initial;
    while deltaf>0.001
        syms h10 h1L q1 q2

        eq15=h1L-h10+(1+h-h1L)-(1-h10)+q1^2/2*...
            (1/h1L^2-1/h10^2)-fi*L/8*(q1^2*(h10+h1L)/...
            (2*h10^2*h1L^2)+2*q1*q2/...
            (h10*(1+h-h1L)-(1-h10)*h1L))*...
            ((h10-h1L)/(h10*h1L)+((1+h-h1L)-(1-h10))/...
            (h10*(1+h-h1L)-(1-h10)*h1L)*log(h10*(1+h-h1L)/...
            (1-h10)/h1L))+q2^2/(h10*(1+h-h1L)-(1-h10)*h1L)*...
            (((1+h-h1L)-(1-h10))/((1-h10)*(1+h-h1L)))+...
            (h1L-h10)/(h10*(1+h-h1L)-(1-h10)*h1L))*...
            log((1-h10)*h1L/h10/(1+h-h1L)))-...
            k1/2*q1^2/(h1L-h10)^2*(log(h1L/h10))^2;

        eq16=(1-drho)*(h1L-h10)+(1+h-h1L)-(1-h10)+...
            q2^2/2*(1/(1+h-h1L)^2-1/(1-h10)^2)+...
            fi*L/8*((1+f0/fi)*q2^2*((1-h10)+(1+h-h1L))/...
            (2*(1-h10)^2*(1+h-h1L)^2)+...
            2*q1*q2/((1-h10)*h1L-h10*(1+h-h1L))*...

```

```

(( (1-h10)-(1+h-h1L)) / ((1-h10)*(1+h-h1L)) + ...
(h1L-h10) / ((1-h10)*h1L-h10*(1+h-h1L)) * ...
log((1-h10)*h1L/h10/(1+h-h1L)) + q1^2 / ...
((1-h10)*h1L-h10*(1+h-h1L)) * ((h1L-h10) / ...
(h10*h1L) + ((1+h-h1L)-(1-h10)) / ((1-h10)* ...
h1L-h10*(1+h-h1L)) * log(h10*(1+h-h1L) / ...
(1-h10)/h1L)) + k2/2*q2^2 / ...
((1+h-h1L)-(1-h10))^2*(log((1+h-h1L)/(1-h10)))^2;

eq22=q1^2/h10^3+q2^2/(1-h10)^3-drho;
eq23=q1^2/h1L^3+q2^2/(1+h-h1L)^3-drho;
S=vpasolve([eq15,eq16,eq22,eq23], ...
[h10,h1L,q1,q2],[0 1;0 1;0 0.02;0 0.02]);

qq1=double(S.q1)*sqrt(g*Depth^3);
qq2=double(S.q2)*sqrt(g*Depth^3);
hh10=double(S.h10)*Depth;
hh1L=double(S.h1L)*Depth;
hh20=Depth-hh10;
hh2L=Depth+h-hh1L;

if isempty(hh10)==0
    f01=fzero(@(f0) 1/sqrt(f0)+2*log10(ks/12/...
        (hh20+hh2L)*4+2.5/sqrt(f0)/(qq2*2/nu)),0.01);

    fi1=fzero(@(fi) fi-max(0.0056,0.5/(qq2*2/nu)^0.45),fi);
    deltaf=max(abs(f01/f0-1),abs(fi1/fi-1));
    f0=f01;
    fi=fi1;
else
    deltaf=0;
end
end
qqm21=0;
qqm12=0;
S10=salK;
S2L=salM;

if isempty(hh10)==0

    results(nn,1)=qq1*Width;
    results(nn,2)=qq2*Width;
    results(nn,3)=hh10;
    results(nn,4)=hh1L;
    results(nn,5)=hh20;
    results(nn,6)=hh2L;
    results(nn,7)=qqm21*Width;
    results(nn,8)=qqm12*Width;

```

```

        results(nn,9)=S10;
        results(nn,10)=S2L;

        end
    end
    dh
end

results(results==0)=NaN;

%% figures
% q1 q2 h10 h1L h20 h2L qm21(upmix) qm12(downmix) S10 S2L

figure(1)
subplot(2,1,1)
plot(0:50,results(:,1),'r','linewidth',1)
xlim([0 50])
xlabel('$\Delta h$ (cm)','interpreter','latex')
ylabel('$Q_1$ (m$^3$/s)','interpreter','latex')
grid on

subplot(2,1,2)
plot(0:50,results(:,2),'b','linewidth',1)
xlim([0 50])
xlabel('$\Delta h$ (cm)','interpreter','latex')
ylabel('$Q_2$ (m$^3$/s)','interpreter','latex')
grid on

figure(2)
subplot(2,1,1)
plot(0:50,results(:,3),'r','linewidth',1)
xlim([0 50])
xlabel('$\Delta h$ (cm)','interpreter','latex')
ylabel('$h_1(0)$ (m)','interpreter','latex')
grid on

subplot(2,1,2)
plot(0:50,results(:,4),'b','linewidth',1)
xlim([0 50])
xlabel('$\Delta h$ (cm)','interpreter','latex')
ylabel('$h_1(L)$ (m)','interpreter','latex')
grid on

figure(3)
subplot(2,1,1)
plot(0:50,results(:,7),'r','linewidth',1)
xlim([0 50])

```

```

xlabel('$\Delta h$ (cm)', 'interpreter', 'latex')
ylabel('$Q_m(\text{upper})$ (m$^3$/s)', 'interpreter', 'latex')
grid on

subplot(2,1,2)
plot(0:50, results(:, 8), 'b', 'linewidth', 1)
xlim([0 50])
xlabel('$\Delta h$ (cm)', 'interpreter', 'latex')
ylabel('$Q_m(\text{lower})$ (m$^3$/s)', 'interpreter', 'latex')
grid on

figure(4)
subplot(2,1,1)
plot(0:50, results(:, 9), 'r', 'linewidth', 1)
xlim([0 50])
xlabel('$\Delta h$ (cm)', 'interpreter', 'latex')
ylabel('$S_1(0)$ (ppt)', 'interpreter', 'latex')
grid on

subplot(2,1,2)
plot(0:50, results(:, 10), 'b', 'linewidth', 1)
xlim([0 50])
xlabel('$\Delta h$ (cm)', 'interpreter', 'latex')
ylabel('$S_2(L)$ (ppt)', 'interpreter', 'latex')
grid on

```

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Selahattin Bayram

Öğrenim Durumu:

- **Lise:** 2013, Trabzon Lisesi
- **Lisans:** 2018, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
- **Yüksek Lisans:** 2022, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

- Stajyer, Has Selim İnşaat, 2017
- Stajyer, LCK adi ortaklığı, Yusufeli Barajı ve HES Projesi, 2017-2018
- Laboratuvar Asistanı, ITU Hidrolik ve Kıyı Bilimleri Laboratuvarı, 2019
- Tübitak Bursiyeri, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, 2020
- Erasmus+ Öğrencisi, Hidrolik ve Çevre Mühendisliği Laboratuvarı(HECE), ULiège, 2021