

**MARMARA DENİZİ'NDE SUALTI HEYELANI
KAYNAKLI BİR TSUNAMİ:
TUZLA AÇIKLARI İÇİN BİR SENARYO**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Görkem SİVRİ
(601101014)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 03 Mayıs 2013

Tezin Savunulduğu Tarih: 04 Haziran 2013

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Sinan ÖZEREN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Nüzhet DALFES (İTÜ)
Prof. Dr. Nazmi POSTACIOĞLU (İTÜ)**

MAYIS 2013

ÖNSÖZ

Anlatılana göre genç bir okyanusbilimci, denize açılmak üzere olan bir araştırma gemisine binmeden hemen önce, kendisine gemide bulunma amacının ne olduğunu soran hocasına şu yanıtı vermiş: "Suyu takip etmek".

Aslında bu takip hepimizi yakından ilgilendiriyor, çünkü en büyük sorunlarımız arasında suyla ilgili olanların değişmez bir yeri var. Yerbilimlerinden örnek vermek gerekirse, 2004 Endonezya depreminde en büyük can kaybına neden olan şey depremin kendisi değil tetiklediği tsunamilerdi. 2005'te New Orleans'i vuran kasırgada en büyük zarara yolaçan yine su baskınları oldu - ki kasırğa olgusunun kendisi okyanusun yüzey sıcaklığı ve suyun buharlaşma hızına doğrudan bağlı. Enerji sorununa baktığımızda hidroelektriği ve dolayısıyla suyu görüyoruz; hava tahmini denince (genellikle hava sıcaklığının kendisinden çok yağışlarla ilgilendiğimizden) ön sırada yine su var. Uluslararası insani yardım kuruluşlarından birinde çalışan bir kimya mühendisi bana, görev yaptığı yerlerde kendisine doktorlardan çok daha fazla saygı gösterildiğini anlattığında hayli şaşırdığımı hatırlıyorum - işi, yardım merkezleri ve hastanelere su arıtma tesisi kurmakmış. Yani açlık ve salgın hastalıklarla mücadelede, anahtar yine suyun izleyeceği yolu bilmek.

Ancak genç okyanusbilimcinin dediğini yapmak, söylemek kadar kolay değil. Farklı disiplinlerden binlerce bilim adamı bu alanda yoğun bir uğraş vermekte, buna rağmen elde edilen başarıların çok büyük olduğu söylenemez, hele tsunamiler konusunda. Belki tam da bu yüzden, bu işle ilgilenenlerin tümü suya karşı -eski çağ denizcilerinininki gibi korkuyla karışık- derin bir saygı beslerler. Suyun neler yapabileceğini iyi biliyor olmalarının bunda payı olsa gerek.

Okumakta olduğunuz tezi hazırlamakla amaçladığım şey, işte bu insanların çabasına oldukça küçük çapta da olsa ortak olmaya çalışmaktır.

Bu süreçte bana yardımcı olan (ve bu kısıtlı alanda adlarını sayamayacağım) birçok kişi var elbette; hepsine ayrı ayrı teşekkürlerimi sunmak isterim. Ancak iki kişi var ki adlarını anmamak haksızlık olur: beni -hemen hemen tümüyle yabancı olduğu bir

konuda- kendilerine çalışma arkadaşı olarak kabul etmekle kalmayıp, matematik ve fizik konularındaki eksikliklerimi giderebilmek için sabırla uğraşan değerli hocalarım Dr. Sinan ÖZEREN ve Prof. Dr. Nazmi POSTACIOĞLU. Onlar olmasalardı, "suyu takip edemezdim".

Mayıs 2013

Görkem SİVRİ

Kimyager

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	ix
SUMMARY.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı.....	2
1.2 Literatür Özeti.....	2
1.3 Marmara Denizi'ndeki Eğimler ve Yamaçlar.....	4
2. TSUNAMİ KURAMI VE SIĞ SU DENKLEMLERİ.....	7
2.1 Sığ Su Denklemleri.....	7
2.1.1 Kütleinin korunumu.....	7
2.1.2 Momentumun korunumu.....	8
2.1.3 Sığ su denklemlerinin temel kabulleri.....	9
3. SONLU HACİM YÖNTEMİ.....	13
3.1 Sonlu Hacim Yöntemi.....	13
3.2 Sonlu Hacim Yönteminin Matematiksel Temelleri.....	13
4. TEST SENARYOLARI.....	15
4.1 Sabit genişlikli ve derinlikli kanalda Gauss dalgası.....	15
4.2 Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga (KKT).....	15
4.3 Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga (UKT).....	16
5. GERÇEK BATİMETRİ VERİLERİYLE YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	17
5.1 Gerçek Batimetri Dairesel Dalga (Solid).....	18
5.2 Gerçek Batimetri Dairesel Dalga (Solid+Transmissive).....	18
6. SONUÇLAR.....	21
7. SONSÖZ.....	23
KAYNAKLAR.....	25
EKLER.....	27
ÖZGEÇMİŞ.....	43

KISALTMALAR

3-D	: 3 boyutlu (3-Dimensional)
AMF	: Ana Marmara Fayı
ANU	: Australian National University
KAF	: Kuzey Anadolu Fayı
KKT	: Kısa Kenar Transmissive
MD	: Marmara Denizi
SSD	: Sığ Su Dalgaları
UKT	: Uzun Kenar Transmissive

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 – Marmara Denizi'ndeki aktif faylar ve heyelan alanları.....	5
Şekil 4.1 – Sabit genişlikli ve derinlikli kanalda Gauss dalgası.....	15
Şekil 4.2 – Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, t=1 s.....	28
Şekil 4.3 – Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, t=1 s.....	28
Şekil 4.4 – Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, t=10 s.....	29
Şekil 4.5 – Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, t=10 s.....	29
Şekil 4.6 – Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, t=60 s.....	30
Şekil 4.7 – Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, t=60 s.....	30
Şekil 4.8 – Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, t=300 s.....	31
Şekil 4.9 – Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, t=300 s.....	31
Şekil 4.10 – Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, t=1 s.....	32
Şekil 4.11 – Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, t=60 s.....	32
Şekil 4.12 – Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, t=60 s.....	33
Şekil 4.13 – Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, t=120 s.....	33
Şekil 4.14 – Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, t=300 s.....	34
Şekil 5.1 – Marmara Denizi'nin batimetri haritası.....	34
Şekil 5.2 – Çınarcık Havzası'nın daraltılmış batimetrisi.....	35
Şekil 5.3 – Gerçek batimetride dairesel dalga, t=1 s.....	35
Şekil 5.4 – Gerçek batimetride dairesel dalga, t=1 s.....	36
Şekil 5.5 – Gerçek batimetride dairesel dalga, t=10 s.....	36
Şekil 5.6 – Gerçek batimetride dairesel dalga, t=10 s.....	37
Şekil 5.7 – Gerçek batimetride dairesel dalga, t=60 s.....	37
Şekil 5.8 – Gerçek batimetride dairesel dalga, t=60 s.....	38
Şekil 5.9 – Gerçek batimetride dairesel dalga, t=180 s.....	38
Şekil 5.10 - Gerçek batimetride dairesel dalga, t=180 s.....	39
Şekil 5.11 - Gerçek batimetride dairesel dalga, t=1 s.....	39
Şekil 5.12 - Gerçek batimetride dairesel dalga, t=10 s.....	40
Şekil 5.13 - Gerçek batimetride dairesel dalga, t=60 s.....	40

Şekil 5.14 - Gerçek batimetride dairesel dalga, $t=60$ s.....	41
Şekil 5.15 - Gerçek batimetride dairesel dalga, $t=180$ s.....	41

MARMARA DENİZİ'NDE HEYELAN KAYNAKLI BİR TSUNAMİ: TUZLA AÇIKLARI İÇİN BİR SENARYO

ÖZET

Çınarcık havzasının kuzey kenarında bulunan sınır fayında yer alan fayın büyük olasılıkla trans-gerilimsel bir komponenti bulunduğu gibi, oldukça büyük normal komponente sahip bir depremin olasılıklar dahilinde olduğu söylenebilir. Bu nedenle normal faylanma sonucu ortaya çıkabilecek tsunamiler de sözkonusu olmakla birlikte, deniz tabanının morfolojisi, batimetrisi ve Ana Marmara Fayı'nın konumu bize, tsunamilerin üretilmesinde birinci adayın sualtı heyelanları olduğunu göstermektedir. Geç buzul çağında gerçekleşmiş olan bir vaka üzerinde çalışma Özeren ve diğer. (2010) tarafından yapılmıştır, ancak sözkonusu çalışma büyük oranda yarı-analitik olup kıyı şeridindeki su baskını senaryolarını gözönüne almamıştır.

Marmara Denizi'nin diğer taraflarında da, çeşitli büyüklükte toprak kayması ve sualtı heyelanı bölgeleri bulunmaktadır; ki bunlar Zitter ve diğer. (2012) tarafından yapılan çok yakın tarihli bir çalışmada yüksek çözünürlüklü batimetrik, sismik ve çekirdek verileriyle detaylı olarak incelenmiştir.

Bu tezde benimsenen yaklaşım iki türdür: İlk olarak, 3-D dalgaların yaratılması aşamasında kendimize ait basit bir model kullanılmış, ardından bu dalgalar non-lineer sıg su dalga denklemlerini çözen karmaşık bir sonlu hacim rutini (ANUGA Hydro, kaynak: ANU) yardımıyla ilerletilmiştir.

Asıl simülasyonlara geçilmeden önce, çeşitli ideal geometrilerde analitik sonuçları bilinen problemlerin simülasyonları yapılmış ve programın ürettiği verilerin analitik sonuçlarla makul ölçülerde (%1'den daha ufak hata paylarıyla) tutarlı olduğu görülmüştür.

Asıl simülasyonlarda çeşitli büyüklüklerde (5000 m. boy, 1000 m. en ve 1 m. yükseklik tipik değerlerdir) sualtı heyelanlarının üretebileceği kıyı dalga yüksekliklerine bakılmıştır.

Çalışmanın, yaklaşan Marmara Depremi'nin yolaçabileceği olumsuzlukların yeralacağı risk haritasının çıkarılmasında yardımcı olabileceğini umuyoruz.

A LANDSLIDE GENERATED TSUNAMI IN MARMARA SEA: A SCENARIO FOR TUZLA OFFSHORE

SUMMARY

On the northern fringe of the Çınarcık basin, the bounding fault has probably some trans-tensional component and an earthquake with significant normal component is not out of question. Therefore, tsunamis generated in a more conventional way through normal-faulting is also possible; but the morphology of the sea floor, bathymetry and the position of the Main Marmara Fault suggests that submarine landslides are primary candidates to generate tsunamis. Özeren et al. looked at a particular landslide that occurred in the late glacial period. However, their work was largely semi-analytical and did not consider wave run-up.

Elsewhere in the Sea of Marmara, there are other zones of submarine landslides and mass wastings of various spatial scales. A very recent work of Zitter et al. (2012) discusses these in detail using high-resolution bathymetric, seismic and core data.

Our approach is two-fold. We use a simple 3-D approach for wave generation using a home-built simple model. We then propagate the waves using a sophisticated finite-volume routine that solves the non-linear shallow water equations.

Before taking on the main simulations, simulations of some ideal-geometry problems for which the analytical solutions are known are performed as validation cases, and the results generated by the program are observed to be reasonably consistent (with error margins less than 1%) with the analytical solutions.

In the main simulations, the potential maximum wave heights generated by landslides of different sizes (5000 m. length, 1000 m. width and 1 m. height being characteristic values) at the shoreline are studied.

We hope this work will be of some help in creating the risk map concerning the possible inconveniences likely to be caused by the approaching earthquake at Marmara.

1. GİRİŞ

Marmara Denizi'nde gerçekleşecek olası bir depremin Tuzla bölgesi ve çevresini vuracak tsunamileri tetikleyebileceğini tarihsel kayıtlardan okumaktayız (Özeren ve diğer. 2010); son 3000 yıl içerisinde Anadolu kıyılarını vuran 90'dan fazla sayıda büyük tsunami olayının üçte birinin Marmara'da gerçekleştiği biliniyor (Yalçınar ve diğer. 2002). 1999 Kocaeli depreminde, dalga yüksekliğinin yer yer 10 metreyi aştığı yönünde gözlemler mevcut (Altınok ve diğer. 2001). Ancak sözkonusu kayıtların çoğunun hayli eski olmaları nedeniyle, (sayısal olmaktan çok sözel denebilecek) tarihsel verilerden yola çıkarak günümüz tsunami senaryoları için hassas tahminler yapmak pek mümkün gözüküyor. Öte yandan geçmişte olan depremlerin jeolojik kayıtları yönünden çok ayrıntılı bir literatür mevcut (Hubert-Ferrari ve diğer. 2000, Le Pichon ve diğer. 2001, İmren ve diğer. 2001, Armijo ve diğer. 2002, Polonia ve diğer. 2002, Flerit ve diğer. 2003, Le Pichon ve diğer. 2003, Armijo ve diğer. 2005, McHugh ve diğer. 2006, Seeber ve diğer. 2006, Pondard ve diğer. 2007, Géli ve diğer. 2008, Becel ve diğer. 2009, Becel ve diğer. 2010). Bu durumda, yerleşim bölgelerini ilgilendiren risklerin gerçeğe uygun bir biçimde hesaplanabilmeleri için elimizde bulunan en uygun araçlar olarak sayısal modeller kalıyor.

Çeşitli sayısal araçlar kullanarak dalga denklemlerini çözen bu modellerin sayısı son yıllarda bir hayli arttı ve her türlü akışkanlar mekaniği temelli problemin çözümünde yaygın olarak (ve eklemek gerekir ki başarıyla) kullanılmaktalar. Yapılan bu çalışmada yola, modeller yardımıyla kıyı bölgelerimizi bekleyen olası tehlikelerin belirlenmesi yolunda bir basamak oluşturma beklentisiyle çıkılmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Deprem bölgelerindeki risk haritalarının çıkarılması uzun süren ve çeşitli disiplinlerden bilimadamlarının ortak çabasını gerektiren bir iştir. Böyle bir haritanın çıkarılmasında depremin doğrudan kendisinden kaynaklanan yıkım kadar, tetiklediği diğer olumsuzluklardan kaynaklanan riskler de zorunlu olarak yer alır. Marmara Denizi'ndeki olası deprem sözkonusu olduğunda, denize kıyısı olan yerlerde nüfus oldukça yoğun olduğundan tsunami riski uzun süredir bilinmekte ve ilgili çalışmalar artarak devam etmektedir.

Marmara kıyılarına vuracak bir tsunami hakkında birçok çalışma yapılmıştır. Bunlar arasında birincil dalgayı yaratan nedene (fay hareketi ya da sualtı heyelanı) yoğunlaşanlar olduğu gibi, dalganın nerede ortaya çıkacağı, kıyıları ne kadar süre sonra vuracağı ve en yıkıcı etkilerin hangi kıyılarda sözkonusu olacağı gibi farklı (ve konunun ayrılmaz bir parçası olan) noktalara eğilenler de mevcuttur.

Bu çalışmada ise öncelik, sıkça kullanılan programların (TWO-LAYER, Delft_3D, Clawpack, Gerris ve TELEMAC ilk akla gelenlerdendir) yanında yeni bir kodla çalışmak ve böylelikle yeni simülasyon sonuçlarını daha ilerideki çalışmalarda dikkate alınmak üzere ortak veri havuzuna kazandırmaktır.

Bu öncelik doğrultusunda somut olarak amaçlanan şey, sonlu hacimler yöntemini kullanan bir program (ANUGA Hydro) ve gerçek batimetri verilerinin yardımıyla, Tuzla açıklarında oluşacak sualtı heyelanı kaynaklı bir tsunaminin kıyıda ne büyüklükte dalgalar üreteceğini öngörmektir. Sonlu hacimler yöntemi çok hızlı bir sayısal yöntem olmamakla birlikte özellikle hiperbolik sistemlerin çözümlerindeki yüksek performansı nedeniyle son yıllarda çok kullanılan bir yöntemdir (Leveque 2004).

1.2 Literatür Özeti

Marmara Denizi'nde tsunamiler ile ilgili birçok çalışma yapılmış olup, bunlar içerisinden birkaçını kısaca da olsa gözönüne almak, konunun genel çerçevesinin çizilebilmesi açısından gerekli ve yararlı olacaktır.

Marmara Denizi'ni batıdan doğuya kateden Ana Marmara Fayı (AMF) denizin temel tektonik unsuru olsa da, özellikle doğuda Çınarcık çukurunun güneyinde eşelon olarak gelişmiş bir dizi normal fay da bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar (Zitter ve

diğer. 2012) geçmişte güney bölümündeki daha az dik olan yamaçlarda da sualtı heyelanlarının meydana geldiğini göstermektedir. Bunun yanısıra AMF'nin İzmit Körfezi'nin çıkışından Adalar bölgesine uzanan kısmının KB-GD doğrultusunda uzanması sonucunda, bu kısımda oluşabilecek büyük bir depremin normal bileşeninin de olabileceği ileri sürülmektedir (Bulut ve diğer. 2009).

A.C. Yalçın ve diğer. 2002

Bu makalede Marmara Denizi'ndeki yamaçların heyelan üretme potansiyelleri, çok-ışınlı verilerin yanısıra derin ve sığ sismik veriler aracılığıyla belirlenmeye çalışılmıştır. Simülasyon içerisinde dalgaların üretilmesi, yayılması ve sahilde alacakları biçimin belirlenmesi için TWO_LAYER adlı program kullanılmıştır. Bu program nonlineer uzun dalga denklemlerini, sonlu farklar (finite differences) yöntemini esas alarak kurbağa-adımı (leap-frog) adı verilen prosedürü uygulamak yoluyla çözmektedir.

Simülasyonu yapılan üç senaryonun birincisinde, Yenikapı açıklarında 300 m. derinlikte bulunan bir kütle (boyutları doğu-batı yönünde 10 km., kuzey-güney yönünde 1.8 km., yükseklik 6 m.) güney yönünde 900 m. derinliğe sürükleniyor kabul edilmiştir. Kuzey kıyıları için üreteceği dalgaların 3 ile 4 m. arasında olacağı öngörülmüştür.

İkinci senaryoda ise Tuzla açıklarında 250 m. derinlikte bulunan bir kütle (doğu-batı yönünde 4.5 km., kuzey-güney yönünde 2 km., yükseklik 5 m) 600 m. derinliğe sürükleniyor kabul edilmiştir. Kuzey kıyıları için üreteceği dalgaların 3 metreyi aşacağı öngörülmüştür.

Üçüncü simülasyonda, Armutlu fayının kırılmasıyla aynı anda, Armutlu açıklarında iki farklı heyelan olayının eşzamanlı olarak gerçekleştiği senaryo ele alınmıştır. Kayan kütlelerden biri (25 km. x 1.3 km. x 6 m.) diğeri ise (12 km. x 2.6 km. x 12 m.) boyutlarında kabul edilmiştir. Kuzey kıyıları için oluşacak dalgaların çoğu yerde 3 metreyi aşacağı, kimi yerlerde ise 4-5 metre arasında olacağı öngörülmüştür.

Hebert ve diğer. 2005

Bu makalede üç deprem kaynaklı tsunami, üç de heyelan kaynaklı tsunaminin simülasyonları sonlu farklar (finite difference) yöntemiyle yapılmıştır. Deprem kaynaklı tsunamilerde en büyük dalga yüksekliğinin 2 m. olacağı öngörülmüştür.

Çalışmada denizden kıyıya doğru gitgide artan çözünürlükte batimetri verisi kullanılmıştır. Heyelan kaynaklı tsunamiler için, kayan maddenin miktarının büyüklüğüne (0.15, 0.60 ve 1.5 km³) göre yapılan üç farklı senaryo çalışılmıştır. 0.60 km³ hacminde toprağın kaydığı senaryoda en büyük dalga yüksekliğinin 5 m., 1,5 km³ hacmindeki için ise beklenenin aksine bundan daha az (~4m.) olduğu görülmüş, bu da yazarlar tarafından belli bir miktardan sonra dalga yüksekliklerinin bir tür doygunluğa ulaşmış olabileceği biçiminde yorumlanmıştır.

Postacıoğlu ve Özeren 2008

Bu makalede, çoğunlukla kullanılan aksine sığ su denklemleri değil, integral denklemlerine dayanan yarı-spektral bir yöntem kullanılmıştır - çalışmada amaçlanan şey özellikle Marmara Denizi'ndeki bir senaryo olmayıp, genel olarak heyelan kaynaklı tsunamilerin modellenmesine getirilen yeni bir matematiksel yaklaşımdır. Bununla birlikte yazarlar geliştirdikleri yöntemin Çınarcık Platosu'nun güney yamaçlarında gerçekleşecek çeşitli heyelan senaryolarına uygulanması halinde, H yüksekliğinde bir kütlenin kaymasının yaratacağı maksimum dalga yüksekliğinin H/2 civarında olacağını öngörmüşlerdir.

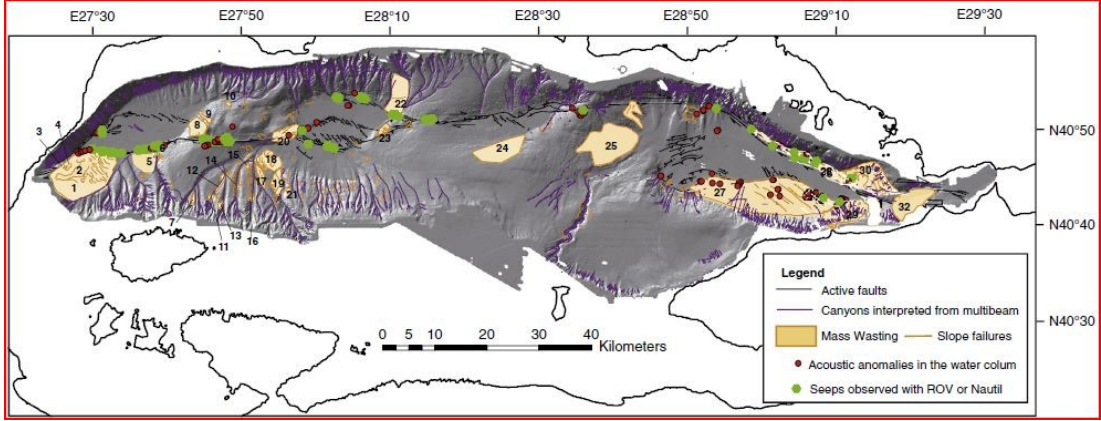
Özeren ve diğer. 2010

Bu çalışmada da sığ su dalgaları temelli yaklaşım yerine üç boyutlu ve Green fonksiyonuna dayalı bir potansiyel teori temelinde yaklaşım benimsenmiştir. Makalenin günümüz koşulları değil 17.000 yıl önceki koşullar (yazarlarca, sözü edilen zamanda Marmara Denizi'ndeki su düzeyinin şimdikinden ~85 m. daha alçakta olduğu kabul edilmiştir) gözönüne alınarak çizilen senaryoda, Çınarcık Platosu'nda gerçekleşen 7 km. genişliğinde ve 30 m. yüksekliğinde bir heyelanın 15-17 m. yükseklikte dalgalara yolaçmış olabileceği hesaplanmıştır.

1.3 Marmara Denizi'ndeki Eğimler ve Yamaçlar

Eldeki batimetri verileri, Marmara Denizi'ndeki üç platodan en doğuda yer alan Çınarcık Platosu'nun, aynı zamanda en derini (max. 1276 m.) olduğunu göstermektedir (Şekil 1.1). İstanbul'un güney kıyılarınca uzanan (ve içinde Prens Adaları'nın da yer aldığı) sahanlıktan, kuzeybatı-güneydoğu doğrultusunda uzanan oldukça dik bir yamaçla ayrılan ve doğu ucu KAF ile Trakya-Eskişehir fayının

kesiştiği biz çizgiye oturan bu platonun, depremlerce tetiklenen sualtı heyelanlarına bağlı olarak oldukça güçlü tsunamiler üretebileceği tarihsel kayıtlardan bilinmekte olduğuna yukarıda değinilmişti (Yalçınmer ve diğer. 2002). Çınarcık Platosu'nun hemen kuzeyinde bulunan Tuzla, bu kayıtlara göre tsunamilerin yıkıcı etkilerinin en çok hissedildiği yerdir.



şekil 1.1: Marmara Denizi'ndeki aktif faylar ve heyelan alanları (Zitter ve diğer. 2012, s.61)

Yerçekiminden kaynaklanan heyelanlar yalnızca Çınarcık ile sınırlı olmayıp Marmara Denizi'nin birçok yerinde görülürler ve küçük ölçekli yamaç kaymalarından başlayarak 20 ila 80 km² büyüklüğündeki alanlara yayılan geniş heyelanlara (örneğin Tuzla, Ganos ve Yalova civarındaki kaymalar) kadar değişiklik gösterirler (Zitter ve diğer. 2012).

Yapılan çeşitli çalışmalar Çınarcık Platosu'nun doğu ucunun (Zitter ve diğer. 2012, Özeren ve diğer. 2010) özellikle yüksek risk içeren bir bölge olduğunu ortaya koyduğundan, tsunami simülasyonlarının bu çevrede yoğunlaşmasının doğal bir sonuç olduğu söylenebilir.

2. TSUNAMİ KURAMI VE SIĞ SU DENKLEMLERİ

İster deprem isterse heyelan kaynaklı olsun, bir tsunami oluştuğu andan itibaren dalganın yayılması (ilerlemesi, hareket ettirilmesi) problemi ile karşı karşıya kalınır. Elimizde suyun hareketini üç boyutta yeterince iyi betimleyen bir denklem seti olmakla birlikte (Navier-Stokes), bu denklemler non-lineerdir ve çözülebildikleri durumlarda bile süreç oldukça karmaşık olup yüksek işlemgücüne malolur. Bu nedenle, önümüzdeki örnek sadeleştirmelere izin verdiği ölçüde denklemlerde çeşitli basitleştirmeler yapmak çoğu kez başvurulan bir yöntemdir.

Tsunamiler sözkonusu iken elimizdeki en önemli veri, dalga boyunun suyun derinliğine göre çok daha büyük oluşudur; bu da bize birazdan göreceğimiz türden basitleştirmeler yapma olanağı verir.

Navier-Stokes ve sığ su denklemlerinin çıkarılışı birçok çalışmada (farklı biçimlerde de olsa) ele alınmıştır; en önemli kaynak metin olarak Lamb'in kitabını anmak gerekir (Lamb, *Hydrodynamics*, 1932). Burada ise özellikle (Stewart, 2008) ve (Jakeman, 2006) kaynaklarından geniş ölçüde yararlanılmıştır.

2.1 Sığ Su Denklemleri

Burada yapılan tüm işlemlerde, incelenen akışkanın ağdasız (nonviscous) ve sıkıştırılmaz olduğu ve burğasız aktığı ($\text{curl} = 0$) kabul edilecektir.

2.1.1 Kütlenin korunumu

Uzayda yeralan bir W_0 hacminin t -anındaki içerdiği toplam kütle aşağıdaki basit integralle ifade edilebilir:

$$m_t(W_0) = \int_{W_0} \rho dV \quad (2.1)$$

Eğer bu hacmin içerdiği kütledeki anlık değişimi bulmak istersek, denklemin her iki tarafının da zamana göre türevini almamız gerekir:

$$\frac{\partial}{\partial t} m_t(W_0) = \frac{\partial}{\partial t} \int_{W_0} \rho dV \quad (2.2)$$

İncelemekte olduğumuz sıvının akmakta olduğu gözönüne alınırsa ($u \neq 0$), aradan Δt kadar bir zaman geçtikten sonra, W_0 hacminin içindeki kütle değişiminin çeperlerden

içeri giren ve dışarı çıkan sıvının miktarına bağlı olduğu görülebilir. Bunun neye eşit olduğunu bulmak için sıvının akış hızını da denkleme katarak bir yüzey integrali almak gerekir. Birim yüzey (dA), yüzeyin normal birim vektörü de (\vec{n}) ile gösterilirse bu integral

$$\left[\frac{m_{gir} - m_{çık}}{\Delta t} \right] = \frac{1}{\Delta t} \int_{\partial W_0} \rho \vec{u} \cdot \vec{n} \Delta t dA \quad (2.3)$$

biçiminde yazılabilir. Yukarıdaki bağıntı bir zaman aralığı değil herhangi bir an için ifade edilmek istenirse, Δt 'yi düşürmek yeterli olacaktır. O zaman da kütlenin içeri giriş hızı

$$\int_{W_0} \frac{\partial}{\partial t} \rho dV = - \int_{\partial W_0} \rho \vec{u} \cdot \vec{n} dA \quad (2.4)$$

olarak ifade edilebilir. "Divergence theorem" uyarınca,

$$\int_{W_0} \vec{\nabla} \cdot \vec{u} dV = \int_{\partial V} \vec{u} \cdot \vec{n} dA \quad (2.5)$$

olduğundan üstteki integral

$$\int_{W_0} \left[\frac{\partial}{\partial t} \rho + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) \right] dV = 0 \quad (2.6)$$

haline gelir. Buradan da

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.7)$$

eşitliği görülür ki, bu da Euler'in kütle korunum denklemi olarak bilinir.

2.1.2 Momentumun korunumu

Bu kez sözkonusu olan hareketli bir su kütesinin zaman içindeki momentum değişimiyle ilgili olduğundan, belli bir hacmin sınırlarını çizerek giriş-çıkışları hesaplayan Euler yaklaşımı yerine, incelenmekte olan su kütesini hareketi boyunca takip etmeye dayanan Lagrange yaklaşımı öne çıkar. Bir su kütesinin toplam momentumu, birim hacimde (yoğunluk x hız) teriminin tüm hacim boyunca integralinin alınmasıyla bulunabilir:

$$\int_{w_t} \rho(\vec{x}, t) \vec{u}(\vec{x}, t) dx \quad (2.8)$$

Kuvvet ise momentumun zamana göre türevi olduğundan,

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} \int_{w_t} \rho(\vec{x}, t) \vec{u}(\vec{x}, t) dx \quad (2.9)$$

ifadesi ortaya çıkar. Değişken değiştirme yöntemi uygulanır ve kütlelenin korunumu eşitlikleri de denkleme alınır,

$$\vec{F} = \int_{w_t} \rho \frac{D}{Dt} \vec{u} dx \quad (2.10)$$

bulunur. Öte yandan, tüm kütleyle etkiyen basıncı bulmak için birim alana düşen basıncı yüzeyin normali ile çarparak tüm yüzey boyunca integralini almak yeterlidir (ki bu da basınç gradiyentinin tüm hacim boyunca integraline eşittir). Dolayısıyla:

$$\vec{F}_p = - \int_{\partial W_t} p \vec{n} dA = - \int_{W_t} \nabla p dV \quad (2.11)$$

ifadesi yazılabilir. Birim kütleyle etkiyen kuvvet (b) de gözönüne alındığında (ki toplam kuvveti bulmak için yoğunluk ile çarpılarak tüm hacim boyunca integralinin alınması gerekir), şu ifade ile karşılaşılır:

$$\vec{F}_b = - \int_{\partial W_t} p \vec{n} dA = - \int_{W_t} \nabla p dV \quad (2.12)$$

Eğer kütlelere etkiyen tek dış kuvvetin yerçekimi olduğu kabul edilirse, o zaman Euler hareket denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (2.15)$$

2.1.3 Sıg Su Denklemlerinin temel kabulleri

Bölümün başındaki kabullere ek olarak, incelediğimiz sıvının sıkıştırılmaz olduğunu kabul edelim. Bu durumda $dP/dt = 0$ olacaktır ve

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.16)$$

ifadesi yazılabilir. Sıvı sıkıştırılmaz kabul edildiğinden basıncın (yoğunluğun sabit olması nedeniyle) yalnızca derinlikle arttığı söylenebilir, bu durumda ortaya

$$\int_b^{b+h} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) dz = 0 \quad (2.17)$$

denklemi çıkar. Leibniz kuralından yararlanılarak

$$\frac{\partial}{\partial t} h + \frac{\partial}{\partial x} (h \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \bar{v}) = 0 \quad (2.18)$$

eşitliği gösterilebilir ki, bu da iki boyutta derinliğe göre ortalaması alınmış sığ su dalga denklemlerinin birincisidir.

Euler'in hareket denklemleri kullanılarak, x-doğrultusundaki momentum denklemi kullanılarak sıvının dikey eksenini boyunca integral alındığında

$$\int_b^{b+h} \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \right) dz = 0 \quad (2.19)$$

ifadesi bulunur. Basıncın derinliğe göre lineer arttığı kabul edilerek (yani $p = \rho g(z_1 - z_0)$ kabul edildiğinde) -ki sığ su denklemlerinin başında yapılan dikey eksenin yatay eksenlerden çok daha küçük olduğu kabulüne dayanır - gerekli düzenlemeler yapıldığında,

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (h u^2 + \frac{1}{2} g h^2) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = 0 \quad (2.20)$$

ve

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} (h u^2 + \frac{1}{2} g h^2) = 0 \quad (2.21)$$

denklemleri ortaya çıkar.

Eğer ele alınan durumda dalga boyu (okyanustaki bir tsunami için ~200 km.) derinlikten (~4 km.) çok daha büyük ise, yatay ivmelerin dikey ivmeye göre çok daha büyük olduğunu söyleyebiliriz. İşte bu sonuç bize, 2.1 no.'lu denklemin sol tarafındaki üçüncü terimi (dikey ivme terimi) gözardı edebilme olanağı verir ki, bu da sistemimiz için önemli bir sadeleştirmeye yolaçar.

Dolayısıyla Sığ Su Denklemleri, 3. boyuta yayılan etkilerin önemli olduğu (çünkü denklemlerde gözardı edilirler) durumlarda (örneğin dalga boylarının derinliğe göre çok büyük olmadığı ya da dalga yüksekliğinin büyük olduğu haller) uygulanamazlar.

Uygulanabildikleri zaman ise ortaya, dalganın ilerleme hızının dalga boyundan bağımsız olduğunu (ki ortamın non-dispersive olduğu anlamına gelir) gösteren

$$\omega = k \sqrt{gh} \quad (2.22)$$

formülü türetilebilir.

Dolayısıyla şu sonuç ile karşılaşılır: suda yayılan bir dalganın hızı, derinliğin karekökü ile doğru orantılıdır. İşte bu nedenle açık denizde hızı 800 km/h olan bir dalga kıyıya yaklaştığında oldukça yavaşlayacak (50 km/h tipik bir hızdır), ancak momentumun (ve enerji akışının) korunum gerekliliğinden ötürü dalga genliği ($H^{1/4}$ ile orantılı olarak) artacaktır. Böyle bir dalga, açık denizde seyreden gemilerce farkedilmeyip ancak kıyıda (derinliğin azaldığı yerlerde) kendini hissettirir, işte *tsunami* adı da (Japonca *tsu*: liman, *nami*: dalga) buradan gelmektedir.

Marmara denizi özelinde bir örnek vermek gerekirse, Tuzla açıklarında derinliğin 1200 m. seyrettiği bölgede (Çınarcık platosu) ortaya çıkan 1m. yüksekliğindeki bir dalga, kıyıya doğru ilerleyerek derinliğin 10 m. olduğu bölgeye ulaştığında yüksekliği yaklaşık 3,3 metre olacaktır.

3. SONLU HACİM YÖNTEMİ

3.1 Sonlu Hacim Yöntemi

Sonlu hacim yöntemi, kısmi diferansiyel denklemlerin cebirsel denklemler yardımıyla ifade edilmeleri ve hesaplanmaları için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde değerler, çalışılan bölgenin tüm noktalarında hesaplanmaz (ki bu hesaplamalara olanak tanıyacak analitik ifadelerin oluşturulması, yüzeylerin parametrik olarak ifade edilmesi vb. çoğu kez olanaksız ya da aşırı ölçüde zordur); bunun yerine bir ağ (“mesh”) oluşturulur ve değerler yalnızca bu ağın üzerindeki sınırlı sayıda noktada hesaplanır. Sonlu hacimlerin her biri, her bir mesh noktasını çevreleyen ufak bir bölgeye denk gelir.

3.2 Sonlu hacim yönteminin matematiksel temelleri

Tek boyutta sonlu hacim yönteminin temeli, çalışılan alanı (domain) küçük aralıklara bölerek tüm bu hücrelerde (yani *sonlu hacimlerde*) asıl ilgilendiğimiz q -integralinin yaklaşımlarını yapmaktır (Leveque 2002). Aralıklarla oluşturulan ızgaradaki (grid) i no.lu hücreyi

$$C_i = x_{(i-\frac{1}{2})}, x_{(i+\frac{1}{2})} \quad (3.1)$$

olarak yazalım. Şimdi t_n anında bu aralıktaki ortalama değere bir yaklaşırma yapabilmek için

$$Q_i^n \approx \frac{1}{\Delta x} \int_{x_{i-\frac{1}{2}}}^{x_{i+\frac{1}{2}}} q(x, t_n) dx \equiv \frac{1}{\Delta x} \int_{C_i} q(x, t_n) dx \quad (3.2)$$

eşitlik yazılabilir. Burada hücrenin boyu $\Delta x = x_{i+1/2} - x_{i-1/2}$ 'ye eşittir. Kolaylık olması açısından bu ızgaranın eşit aralıklı olduğu kabul edilebilir.

Burada tüm $[a,b]$ aralığında $\sum_{i=1}^N Q_i^n \Delta x$ ifadesi q integraline yakınsar. Bu sonlu toplam, yalnızca $x=a$ ve $x=b$ sınırlarındaki akış yüzünden değişebilir; ki bu da toplam kütle korunacağı (ya da sınır koşulları doğru belirlenmişse değişiminin bilineceği) anlamına gelir. Korunum kanununun integral yardımıyla yazılması

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{C_i} q(x, t) dx = f(q(x_{i-\frac{1}{2}}, t)) - f(q(x_{i+\frac{1}{2}}, t)) \quad (3.3)$$

biçiminde olur. Bu ifade yardımıyla zaman adımları üzerinden yürüyen bir algoritma için, üstteki integrali t_n den t_{n+1} 'e kadar almak yeterlidir; ve aynı zamanda sonlu hacim yöntemini esas alan yaklaşımların (lineer ya da parabolik gibi değişik türden yaklaştırım algoritmaları sözkonusudur ki bunlardan hangisinin kullanılacağı üzerinde çalışılan probleme, eldeki işlem gücüne ve istenen hassasiyete göre değişir) çıkış noktasını oluşturur. Yine unutulmamalıdır ki seçilen hücrelerin büyüklükleri azaldıkça (başka bir deyişle aralıklar “inceldikçe”) hata oranı (tıpkı Riemann anlamında integralleme yönteminde olduğu gibi) düşer, ancak bunun karşılığının daha büyük bir işlem yükü olduğunu da gözönünde bulundurmak gerekir.

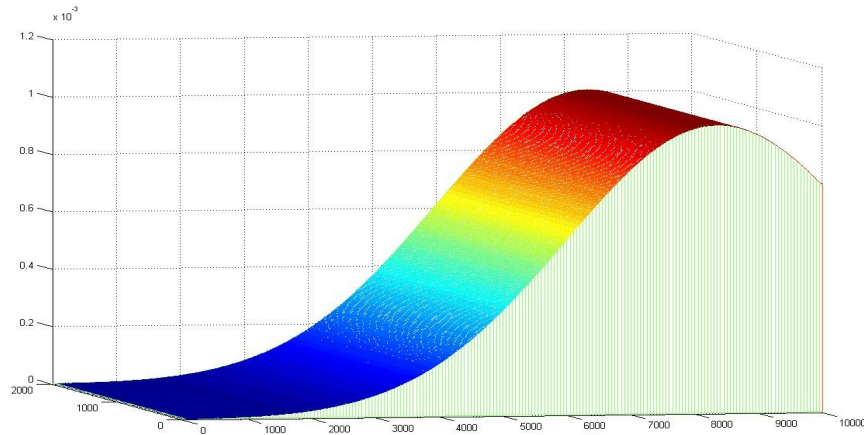
4. TEST SENARYOLARI

Programın bilgisayarlarımızdaki çalışma rutinlerini doğru olarak yerine getirip getirmediğini doğrudan karşılaştırmalar yaparak anlayabilmek için, sonucunu analitik yollarla hesaplayabildiğimiz kimi problemlerin çözümlerini üretmesini istedik. Bununla ilgili olarak yapılan üç farklı senaryo ve sonuçlar şu şekildedir:

4.1 Sabit Genişlikli ve Derinlikli Kanalda Gauss Dalgası

Derinliğin 10 metre, genişliğin 2000 ve uzunluğun 10000 metre olduğu bir kanalda Gauss biçimli (sığ su dalga denklemlerinin kabullerini ihlal etmemek için dalga yüksekliği 1 mm. alınarak düşey ivmelerin olabildiğince az olması sağlanmıştır) bir dalga tanımlanarak yayılması izlenmiştir. Sınır koşullarının simülasyon değerlerini etkilememesi için zaman aralığı (sınır uzaklıklarının dalga hızına oranına göre) yeterince düşük verilmiştir.

Elde edilen değerler daha sonra analitik sonuçlarla karşılaştırıldığında, nümerik sonuçların analitik olanlarla %1'in altında hata paylarıyla uyum içinde olduğu görülmüştür. Bu simülasyona ait dalga şekillerinden birinin grafiği aşağıda gösterilmiştir (eksen gridleri metre cinsindedir).



Şekil 4.1: Sabit genişlikli ve derinlikli kanalda Gauss dalgası

4.2 Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga (KKT)

Derinlik değişken olup (min. 50, max. 100 metre) vadi profili olarak hiperbolik tanjant fonksiyonunun mutlak değeri kullanılmıştır. Genişliğin 4000 ve uzunluğun 20000 metre olduğu bir kanalda daire profilli ve 1 m. yüksekliğinde bir kubbe dalga tanımlanarak yayılması izlenmiştir. Sınır koşulları olarak kısa kenarlardan biri (ilişik

şekillerde orijine uzanan kısa kenar) geçirgen (transmissive), diğer üçü ise katı (solid) olarak tanımlanmıştır. Bu simülasyona ait dalga şekillerinin $t=1$ (Şekil 4.2 ve Şekil 4.3), $t=10$ (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5), $t=60$ (Şekil 4.6 ve Şekil 4.7) ve $t=300$ (Şekil 4.8 ve Şekil 4.9) anlarındaki grafikleri çeşitli açılardan Ek A.1'de gösterilmiştir.

4.3 Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga (UKT)

Bu simülasyonun Bölüm 4.2'de ayrıntıları verilen ile aynı batimetri ve dalga parametrelerine sahip olup tek farkı sınır koşullarının değiştirilmiş olmasıdır. Sınır koşulları olarak uzun kenarlardan biri (aşağıdaki şekillerde orijine uzanan uzun kenar) geçirgen (transmissive), diğer üçü ise katı (solid) olarak tanımlanmıştır. Bu simülasyona ait dalga şekillerinin $t=1$ (Şekil 4.10), $t=60$ (Şekil 4.11 ve Şekil 4.12), $t=120$ (Şekil 4.13) ve $t=300$ (Şekil 4.14) anlarındaki grafikleri çeşitli açılardan Ek A.1'de gösterilmiştir.

5. GERÇEK BATİMETRİ VERİLERİYLE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Marmara Denizi'nin tümüne yayılan bir tsunami simülasyonunun yapılabilmesi oldukça karmaşık bir iştir. Gerektirdiği işlem gücü bir yana, sözkonusu simülasyonun kullanılan modelin temel aldığı çeşitli kabuller ve gerçekçi sonuçlar verdiği sınırlar ihlal edilmeden yapılması gerekir ki, uygulamada en büyük zorluklar işte bu noktada ortaya çıkmaktadır.

Birincisi (ve en önemlisi), su dalgalarının hareketini ifade etmekte kullanılan denklem setinin nelere izin verdiğiidir. Bizim kullanmakta olduğumuz non-linear SSD setinin en temel kısıtlaması, dikey ivmelerin ihmal edilebilir olmasıdır. Marmara'nın tümünü kapsayan bir simülasyonda, üç derin havza sözkonusudur ve havza içlerinde başlayan bir dalga hareketi, sınırlara giderek yamaçlara ulaştığı anda bidenbire 1200 m. civarı derinliklerden 300 m. civarında sığlıklara çıkmak zorunda kalacağıından çeşitli zorluklarla karşılaşılır.

Ani batimetri değışiklikleri aslen SSD'nin felsefesiyle bir uyumsuzluk oluşturmaktadır. SSD, tabandaki her türlü engebeyi suyun yüzeyine filtrelemeden iletmektedir – ancak doğadaki sürecin bu şekilde işlemediği apaçıktır, dolayısıyla tabanın dümdüz olduğu durumlar dışında hiçbir sistem tam anlamıyla bir sığ su sistemi olamaz. Bu durumda dalganın yayılımı problemi SSD ile çözmek istenirse yapılabilecek tek şey, batimetride varolan kısa dalga boylu ani değışiklikleri matematiksel yöntemler yardımıyla “yumuşatmak” ya da elimine etmektir. Bunu yaparken, iki boyutlu Fourier dönüşüm uzayında bir filtre kullanılabileceği gibi, batimetriyi makul ölçüde iyi ifade edecek basit bir analitik fonksiyon uydurmak da seçenekler arasındadır. Yapılacak bu işlemler simülasyonu gerçeklikten uzaklaştırmaz, çünkü derindeki sinyal su yüzeyine hidrodinamik prosesin bir sonucu olarak filtrelenmiş halde ulaşacaktır.

İkinci potansiyel sorun dünyanın yuvarlaklığıdır. Denklem setinde Coriolis terimi yoksa (başka bir deyişle işlem yapılan alanın temel eğriliği sıfır kabul ediliyorsa), simülasyon yapılan alanın taradığı açı çok önemli hale gelir; nitekim ANUGA Hydro için 4 dereceden daha geniş bir boylamı içine alan simülasyonların gerçekçi olamayacağı özellikle belirtilmiştir. Dolayısıyla çalışılan alan dar boylamı taradığı ölçüde Coriolis teriminden kaynaklanan hata payı da azalır ve simülasyonun gerçeklikten uzaklaşması önlenmiş olur.

Yukarıda belirtilen iki olumsuz etkiden korunabilmek ve simülasyonun gerçekliğini olabildiğince korumak amacıyla, görece dar bir alan seçilmiş (35 km. x 25 km.) ve batimetrinin çözünürlüğü 3-nokta lineer interpolasyon yöntemiyle azaltılarak geçişler yumuşatılmaya çalışılmıştır. Marmara Denizi'nin total batimetri haritası (Şekil 5.1) ve çalışılan alt-alan (Şekil 5.2) Ek A.1'de gösterilmiştir.

5.1 Gerçek Batimetride Dairesel Dalga (Solid + Transmissive)

Bu simülasyonda karaya bitişik olan kenarlar katı (solid), denizin içindeki kenarlar ise geçirgen (transmissive) alınmıştır. Bu simülasyona ait dalga şekillerinin $t=1$ (Şekil 5.3 ve Şekil 5.4), $t=10$ (Şekil 5.5 ve Şekil 5.6), $t=60$ (Şekil 5.7 ve Şekil 5.8) ve $t=180$ (Şekil 5.9 ve Şekil 5.10) anlarındaki grafikleri çeşitli açılardan Ek A.1'de gösterilmiştir.

Şekil (5.3)'te, dalganın içerdiği enformasyonun derin yamaç boyunca Yalova'ya doğru gerçekçi olmayan bir hızla yayıldığı ve enerjinin geçirgen kenardan dışarı kaçtığı görülmektedir.

Şekil (5.4)'te, enformasyonun ne kadar uzun bir mesafeyi katettiği göze daha açık olarak çarpmaktadır.

Şekil (5.5)'te, 10. saniyede dalganın merkezi gerçek durumlarda beklenen şekli almaya başlamış, ancak yamaçlardan havza boyunca ilerleyen hızlı dalgalar her iki tarafta simülasyonun gerçeklikten uzaklaşmasına neden olmuşlardır.

Şekil (5.7) ve (5.8)'de ise dalga cephesi Tuzla yönünde ilerlemeye başlamıştır, ancak bu sırada kenarlardan iç bölgeye geri yansıyan etkilerin, yayılan cephenin görünümünü bozmaya başladıkları görülmektedir. Bu görünüm $t=180$ anında da sürmektedir (Şekil 5.9 ve 5.10).

5.2 Gerçek Batimetride Dairesel Dalga (Solid)

Önceki simülasyonda geçirgen kenarlardan momentum kaçışlarının gerçeğe aykırı görünen sonuçlar yaratması üzerine, bu simülasyonda tüm kenarlar katı (solid) alınmıştır. Bu simülasyona ait dalga şekillerinin $t=1$ (Şekil 5.11), $t=10$ (Şekil 5.12), $t=60$ (Şekil 5.13 ve 5.14) ve $t=180$ (Şekil 5.15) anındaki grafikleri çeşitli açılardan Ek A.1'de gösterilmiştir.

Şekil 5.11'e bakıldığında, bu aşamada bir önceki senaryoyla herhangi bir fark göze çarpmamaktadır.

Şekil 5.12'de informasyonun yine oldukça hızlı yayıldığı gözlenmektedir, ancak katı sınırlar nedeniyle yamaç kenarlarına koşut momentum kaçışları yoktur.

Şekil 5.13 ve 5.14'te dalga yüksekliklerinin son derece hızlı düşmüş olması dikkate değerdir. Tuzla kıyısına yaklaşan dalga cephesi (beklenenin tersine) 8 cm.'ye kadar düşmüştür, bu da modelde normalin dışında bir enerji dispersiyonu olduğunu göstermektedir.

Şekil 5.15'te dalga yüksekliğinin yamacın derin tarafında daha yüksek olduğu görülmektedir. SSD kabullerine göre dalgalar sığ suda oldukça daha yavaş ilerlediğinden, dalga cephesi Tuzla kıyılarına vardığında açıklardaki katı kenarlardan yansıyan dalgalar merkeze ulaşmıştır.

6. SONUÇLAR

Sınırlı alanda yapılan modellemelerde denize açılan kenarlarda çeşitli (geçirgen ya da katı) sınır koşullarının kullanılmasının, simülasyonların gerçekliğini olumsuz etkilediği görülmüştür (1m. olan başlangıç dalga yüksekliği 60. s. civarında 10 cm.'ye kadar düşmektedir). Söz konusu etkiden kaçınmak için olası bir yol, simülasyon alanını büyüterek kenar koşullarının etkileri merkeze geri yansımadan önce simülasyonun bitirilmesi biçimindedir, ancak Marmara Denizi'nin büyüklük ve yapısı gözönüne alındığında bu çözüm yolu da gerçekçi olamayacaktır.

Bu durumda, söz konusu sorunun aşılması için her kenarda katı olma koşulunun sağlanmasının gerekli olacağı düşünülmüştür, ancak tüm kenarların katı kabul edilebilmesi için simülasyonun tüm Marmara Denizi'ni kapsamaması gerekli olacaktır ki bu da bölümün başında belirtilen sorunların ortaya çıkmasına yol açar. Şu ana dek (Mayıs 2013) yapılan simülasyonlarda bu sorun henüz aşılamamıştır.

Yapılan çalışmanın verdiği sonuçlara bakarak gerçeğe daha yakın simülasyonların, ancak batimetri ve topoğrafya verilerinin birleştirilmesiyle oluşan bir alanda, tüm Marmara Denizi'ni içine alacak şekilde oluşturulabileceği söylenebilir. Böyle bir simülasyon belki de her noktada SSD kullanmak yerine kimi alanlarda Boussinesq yaklaşımını temelinde Derin Su Denklemleri'ni kullanacaktır.

7. SONSÖZ

Bir tsunami senaryosunun sayısal modellemesi yapıldıktan sonra, kaçınılmaz olarak şu soru ile karşı karşıya kalınır: “Yapılan simülasyon, gerçekte olacakları ne ölçüde yansıtıyor?”

Boris Levin ve Mikhail Nosov, herhangi bir model çıktısının bize gösterdiklerinin, gerçek bir tsunami kıyıya vurduğunda göreceğimizi birebir yansıtmasının önünde üç temel engel olduğunu söylemekte:

“(…) *Birinci zorluk*, eldeki batimetri ve topoğrafya verilerinin yetersizliğidir. Dalga boylarının 100 km. civarında olduğu okyanus tsunamilerinin modellenmesi için, elimizdeki 2" (- 4 km.) çözünürlüklü veriler gayet yeterlidir. Ancak iş kıyı bölgelerindeki tsunamilerin güvenilir simülasyonlarının yapılabilmesine geldiğinde, kıyı bölgesinde – 10 m. çözünürlükte batimetri ve topoğrafya verilerine ihtiyaç vardır.”

“(…) Laboratuvar deneyleri sayısal modellerin etkinliklerini ölçmeye elbette olanak tanır, ama ne olursa olsun en güvenilir testler, simülasyon sonuçlarının gerçek tsunami verileriyle karşılaştırılması ile yapılanlar olacaktır. İşte burada *ikinci zorluk* karşımıza çıkmaktadır; bu da in situ ölçüm sonuçlarının varlığı ve niteliği ile ilgilidir.”

“ *Üçüncü zorluk* ise güçlü tsunami dalgalarının, kıyının başlangıçtaki halini değiştirebilmeleridir ki buna sahil şeridinin topoğrafyası (aşındırma, binaların yıkılması ve bitki örtüsünün tahribi) da dahildir. Dolayısıyla arkadan gelen dalgaların etkileşime girecekleri kıyının özellikleri (topoğrafya, düzensizlikler), kendilerinden önceki dalgalar tarafından değiştirilmiş olacaktır. Yüksek hassasiyete sahip su baskını simülasyonlarının bu tür etkileri dikkate alma gerekliliğiyle yüzleşmeleri kaçınılmazdır.”

Bu bilgiler ışığında güvenle söyleyebiliriz ki, her ne kadar elimizdeki sayısal araçlar karşı karşıya olduğumuz risklerin büyüklüklerinin kestirilmesinde oldukça başarılı işler ortaya çıkarmakta olsalar da, gerçeğe yakın senaryoların ortaya konabilmesi için çok daha ayrıntılı veri setlerine, büyük ölçekli deneylere ve zamana gereksinim vardır. Tüm bu sayılan alanlarda iyileştirmelerin kaydedilebilmesi için, gerekli beyin

gücü ve maddi kaynakların doğru yerlere yönlendirilmesi konusunda en büyük görev ise, insan hayatını korumakla yükümlü kurum ve kuruluşlara düşmektedir.

KAYNAKLAR

- Armijo, R., Meyer, B., Navarro, S., King, G., Barka, A.,** 2002: Asymmetric slip partitioning in the Sea of Marmara pull-apart: a clue to propagation processes of the North Anatolian Fault?, *Terra Nova* **14**, 80 – 86.
- Armijo, R., Pondard, N., Meyer, B., Uçarkus, G.,** 2005: Submarine fault scarps in the Sea of Marmara pull-apart (North Anatolian Fault): Implications for seismic hazard in Istanbul, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **6**, Q06009, doi:10.1029 / 2004GC000896.
- Bécel, A., Laigle, M., de Voogd, B., Hirn, A., Taymaz, T., Galvé, A., Shimamura, H., Murai, Y., Lépine, J.-C., Sapin, M., Özalaybey, S.,** 2009: Moho, crustal architecture and deep deformation under the North Marmara Trough, from the SEISMARMARA Leg 1 offshore–onshore reflection–refraction survey, *Tectonophysics* **467**, 1 – 21.
- Bécel, A., Laigle, M., de Voogd, B., Hirn, A., Taymaz, T., Yolsal-Cevikbilen, S., Shimamura, H.,** 2010: North Marmara Trough architecture of basin infill, basement and faults, from PSDM reflection and OBS refraction seismics, *Tectonophysics* **490**, 1 – 14.
- Bulut, F., Bohnhoff, M., Ellsworth, W.L., Aktar, M., Dresen, G.,** 2009: Microseismicity at the North Anatolian Fault in the Sea of Marmara offshore Istanbul, NW Turkey, *Journal of Geophysical Research* **114**, 1 – 16.
- Flerit, F., Armijo, R., King, G.C.P., Meyer, B., Barka, A.,** 2003: Slip partitioning in the Sea of Marmara pull-apart determined from GPS velocity vectors, *Geophysics J. Int.* **154**, 1 – 7.
- Géli, L., Henry, P., Zitter, T., Dupré, S., Tryon, M., Çağatay, M.N., Mercier de Lépinay, B., Le Pichon, X., Şengör, A.M.C., Görür, N., Natalin, B., Uçarkuş, G., Özeren, S., Volker, D., Gasperini, L., Burnard, P., Bourlange, S., the Marnaut Scientific Party,** 2008: Gas emissions and active tectonics within the submerged section of the North Anatolian Fault zone in the Sea of Marmara, *Earth and Planetary Science Letters* **274**, 34 – 39.
- Gokceoglu, C., Tunusluoğlu, M.C., Gorum, T., Tur, H., Gokasan, E., Tekkeli, A.B., Batuk, F., Alp, H.,** 2009: Description of dynamics of the Tuzla Landslide and its implications for further landslides in the northern slope and shelf of the Cinarcik Basin (Marmara Sea, Turkey), *Engineering Geology* **106**, 133 – 153.
- Hebert, H., Schindele, F., Altinok, Y., Alpar, B. and Gazioglu, C.,** 2005: Tsunami hazard in the Marmara Sea (Turkey): a numerical approach to discuss active faulting and impact on the Istanbul coastal areas, *Marine Geology* **215**, 23 – 43.
- İmren, C., Le Pichon, X., Rangin, C., Demirbağ, E., Ecevitoglu, B., Görür, N.,** 2001: The North Anatolian Fault within the Sea of Marmara: a new

interpretation based on multi-channel seismic and multi-beam bathymetry data, *Earth and Planetary Science Letters* **186**, 143 - 158.

Jakeman, J., 2006: On numerical solutions of the shallow water wave equations, BSc Thesis, ANU, Canberra, Australia, 140p.

Lamb, H., 1932: Hydrodynamics, 6th Edition., The University Press, 738p.

Le Pichon, X., Chamot-Rooke, N., Rangin, C., Şengör, A.M.C., 2003: The North Anatolian fault in the Sea of Marmara, *Journal of Geophysical Research* **108**, NO. B4, 2179, doi:10.1029/2002JB001862.

Le Pichon, X., Şengör, A.M.C., Demirbağ, E., Rangin, C., İmren, C., Armijo, R., Görür, N., Çağatay, N., Mercier de Lépinay, B., Meyer, B., Saatçılar, R., Tok, B., 2001: The active Main Marmara Fault, *Earth and Planetary Science Letters* **192**, 595 - 616.

Levin, B., Nosov, M., 2009: Physics of Tsunamis, Springer Science, 338p.

McHugh, C.M.G., Seeber, L., Cormier, M.-H., Dutton, J., Çağatay, N., Polonia, A., Ryan, W.B.F., Gorur, N., 2006: Submarine earthquake geology along the North Anatolia Fault in the Marmara Sea, Turkey: A model for transform basin sedimentation, *Earth and Planetary Science Letters* **248**, 661–684.

Özeren, S. and Postacioglu, N., 2011: Nonlinear landslide tsunami run-up, *J. Fluid Mech.* **691**, 440–460.

Polonia et al., 2002: Exploring Submarine Earthquake Geology in the Marmara Sea, *Eos* **83-21**, 229 – 236.

Pondard, N., Armijo, R., King, G.C.P., Meyer, B., Flerit, F., 2007: Fault interactions in the Sea of Marmara pull-apart (North Anatolian Fault): earthquake clustering and propagating earthquake sequences, *Geophys. J. Int.* **171**, 1185–1197.

Postacioglu, N. and Özeren, S., 2008: A semi-spectral modelling of landslide tsunamis, *Geophys. J. Int.* **175**, 1–16.

Stewart, R. H., 2008: Introduction to Physical Oceanography. Texas A & M University, 353p.

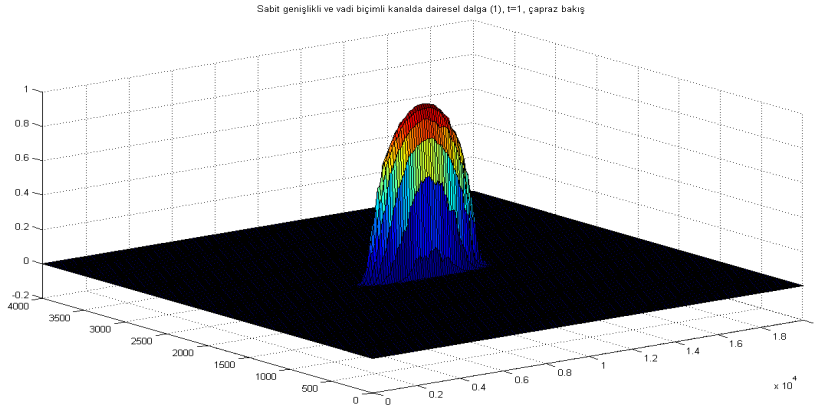
Yalçiner, A. C., Alpar, B., Altınok, Y., Özbay, İ., Imamura, F., 2002: Tsunamis in the Sea of Marmara Historical documents for the past, models for the future, *Marine Geology* **190**, 445-463.

Zitter, T. A. C., Grall, C., Henry, P., Özeren, M. S., Çağatay, M. N., Şengör, A. M. C., Gasperini, L., Mercier de Lépinay, B., Géli, L., 2012: Distribution, morphology and triggers of submarine mass wasting in the Sea of Marmara, *Marine Geology* **329-331**, 58-74.

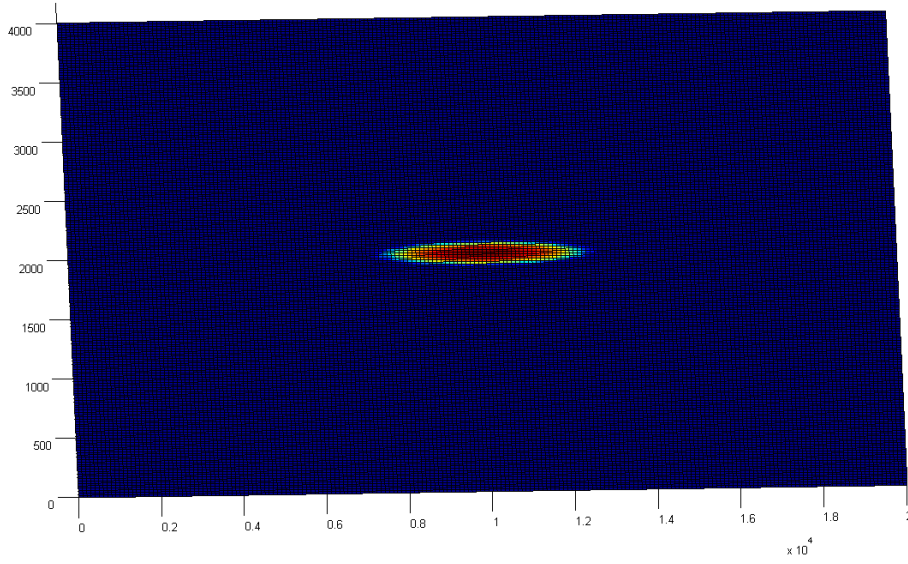
EKLER

EK A.1 : Şekiller

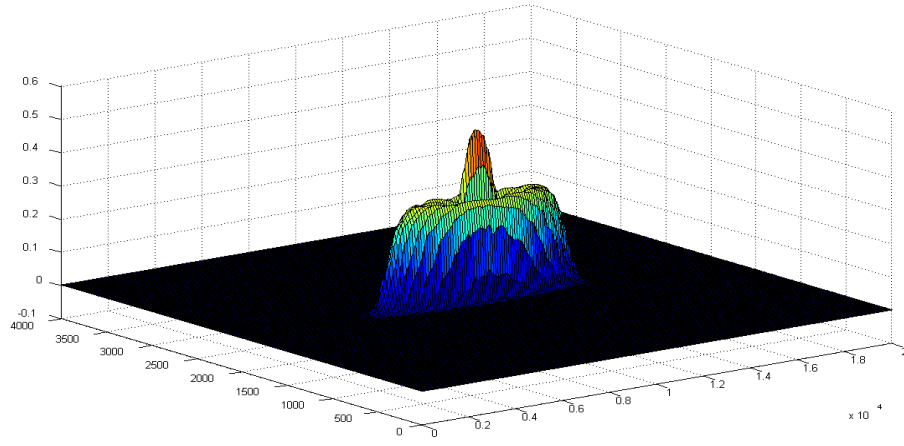
EK A.1 : Şekiller



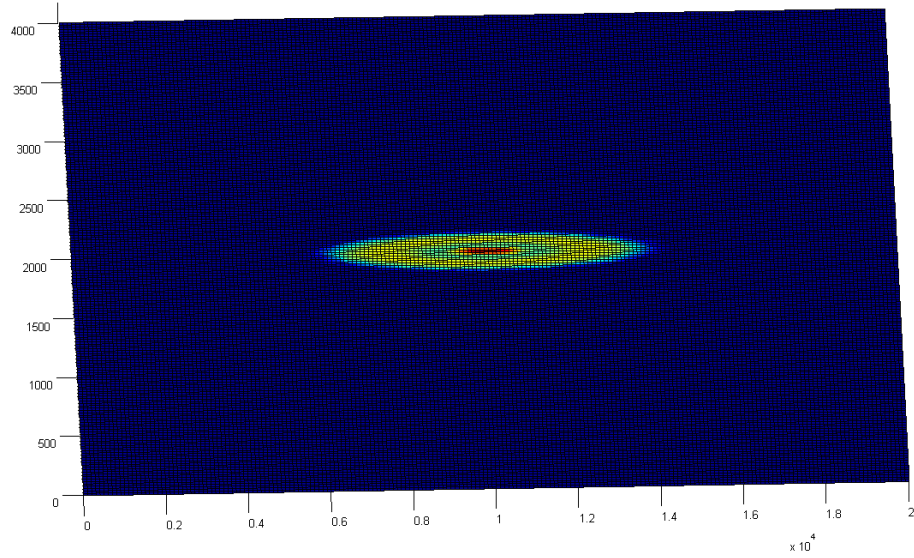
Şekil 4.2: Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, t=1 s., çaprazdan bakış (eksen gridleri metre cinsindedir).



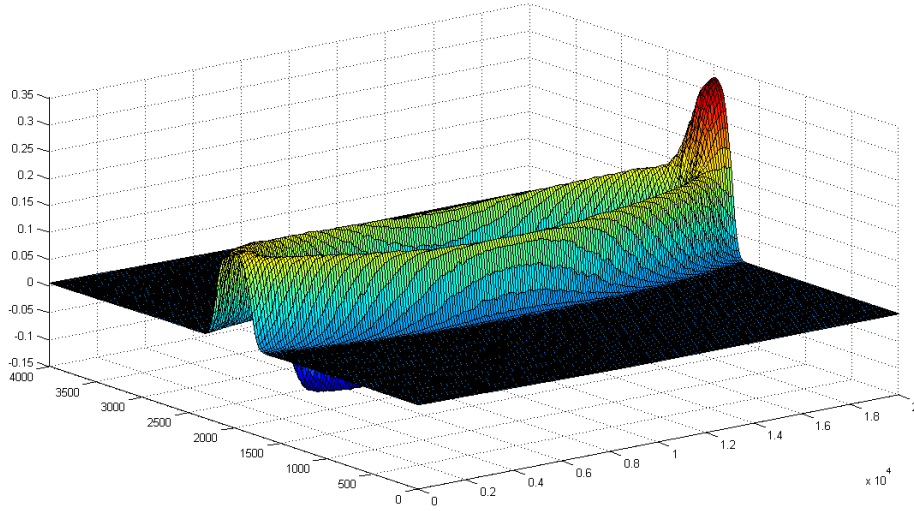
Şekil 4.3: Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, t=1 s., üstten bakış (eksen gridleri metre cinsindedir).



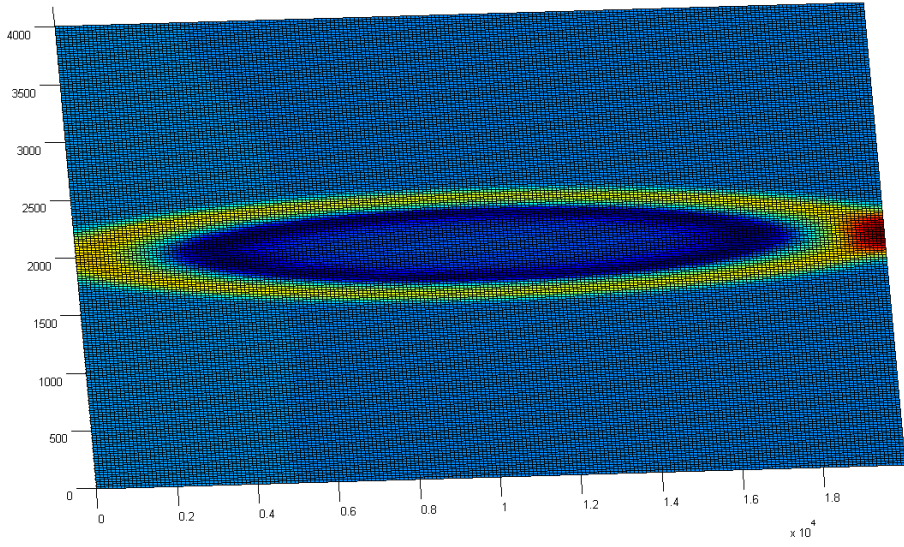
Şekil 4.4: Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, $t=10$ s., çaprazdan bakış (eksen gridleri metre cinsindedir).



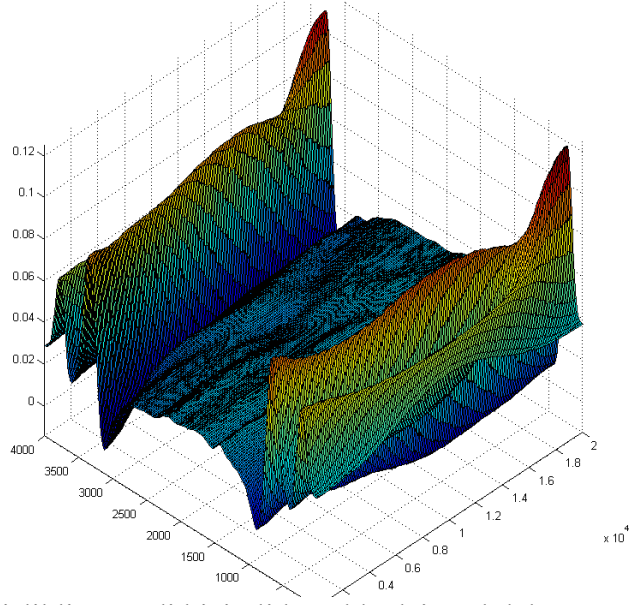
Şekil 4.5: Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, $t=10$ s., üstten bakış (eksen gridleri metre cinsindedir).



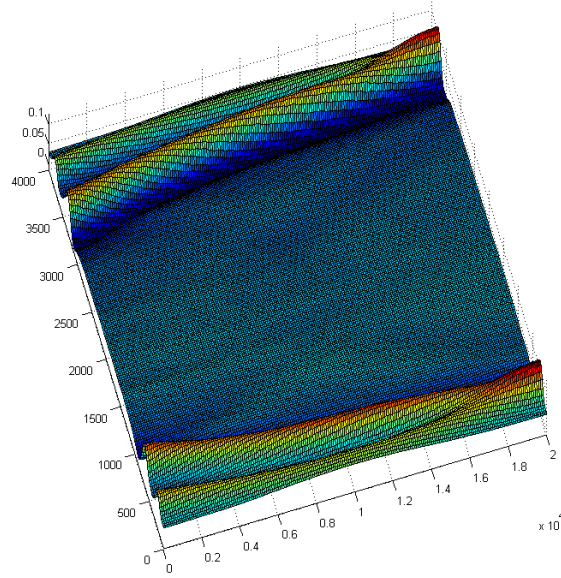
Şekil 4.6: Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, $t=60$ s., çaprazdan bakış (eksen gridleri metre cinsindedir).



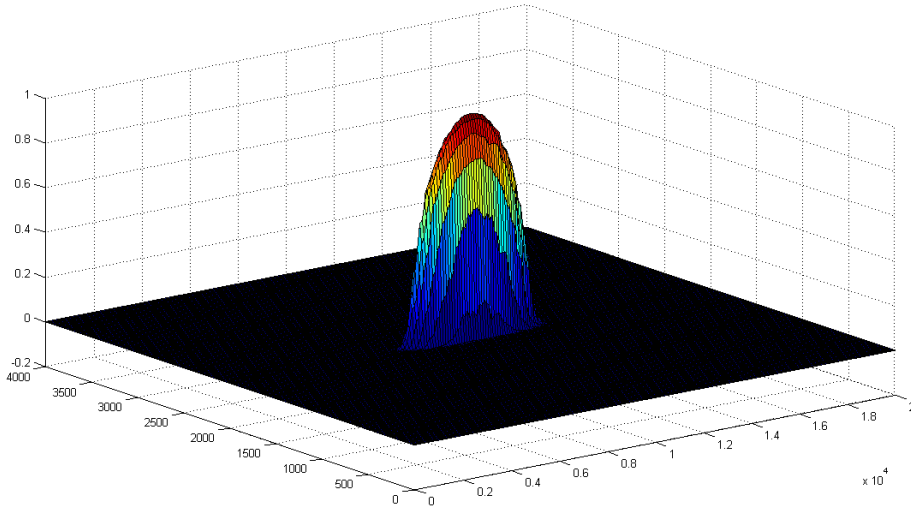
Şekil 4.7: Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, $t=60$ s., üstten bakış (eksen gridleri metre cinsindedir).



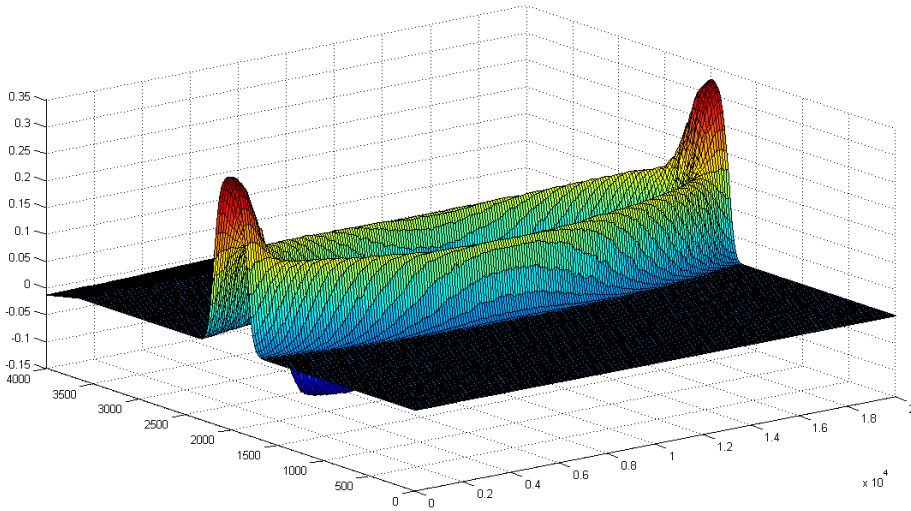
Şekil 4.8: Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, $t=300$ s., çaprazdan bakış (eksen gridleri metre cinsindedir).



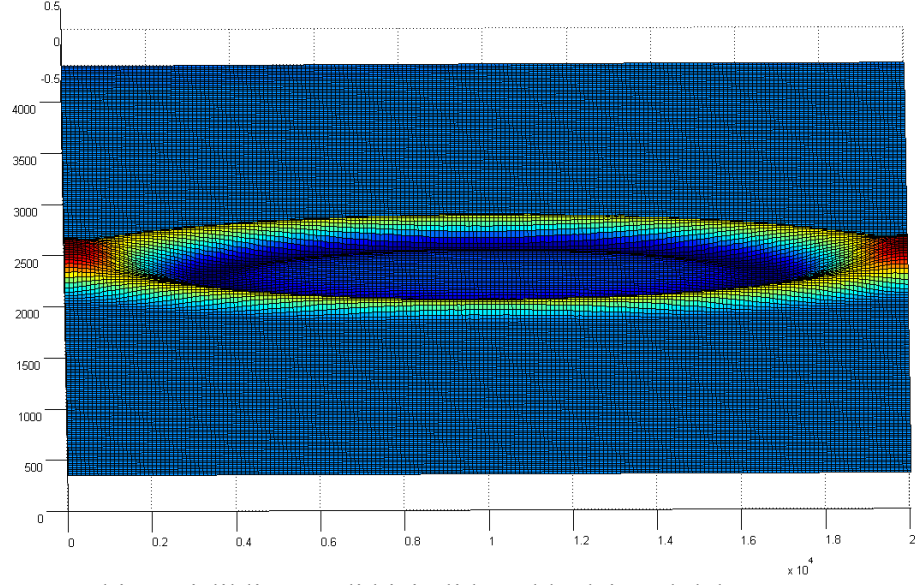
Şekil 4.9: Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, $t=300$ s., üstten bakış (eksen gridleri metre cinsindedir).



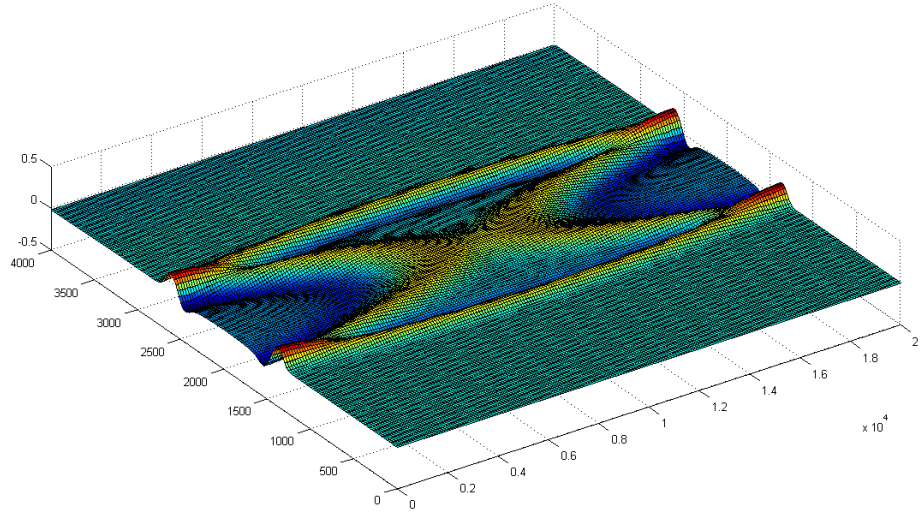
Şekil 4.10: Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, $t=1$ s., çaprazdan bakış (eksen gridleri metre cinsindedir). Dalga henüz kenarlara ulaşmadığından önceki simülasyonla herhangi bir fark gözükmemektedir.



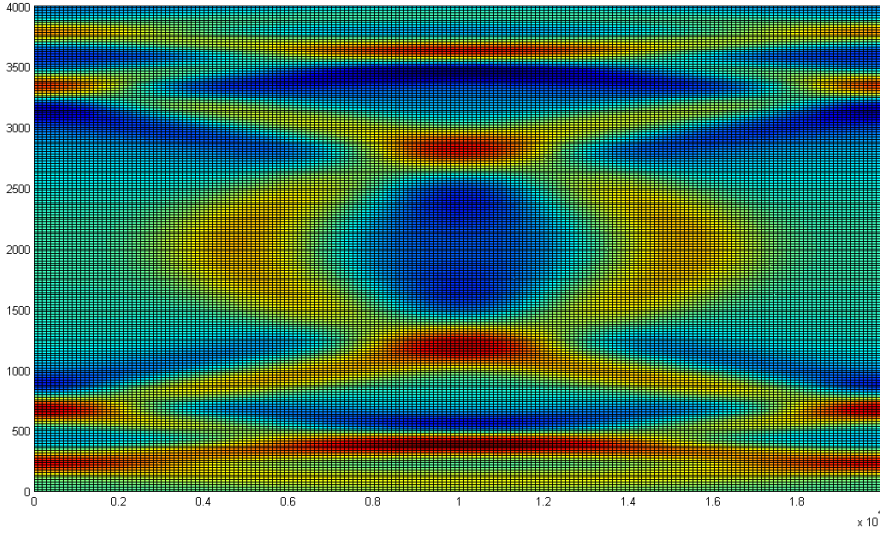
Şekil 4.11: Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, $t=60$ s., çaprazdan bakış (eksen gridleri metre cinsindedir). Şimdi her iki kısa kenarın da katı sınır koşullarına sahip olduğu göze çarpar.



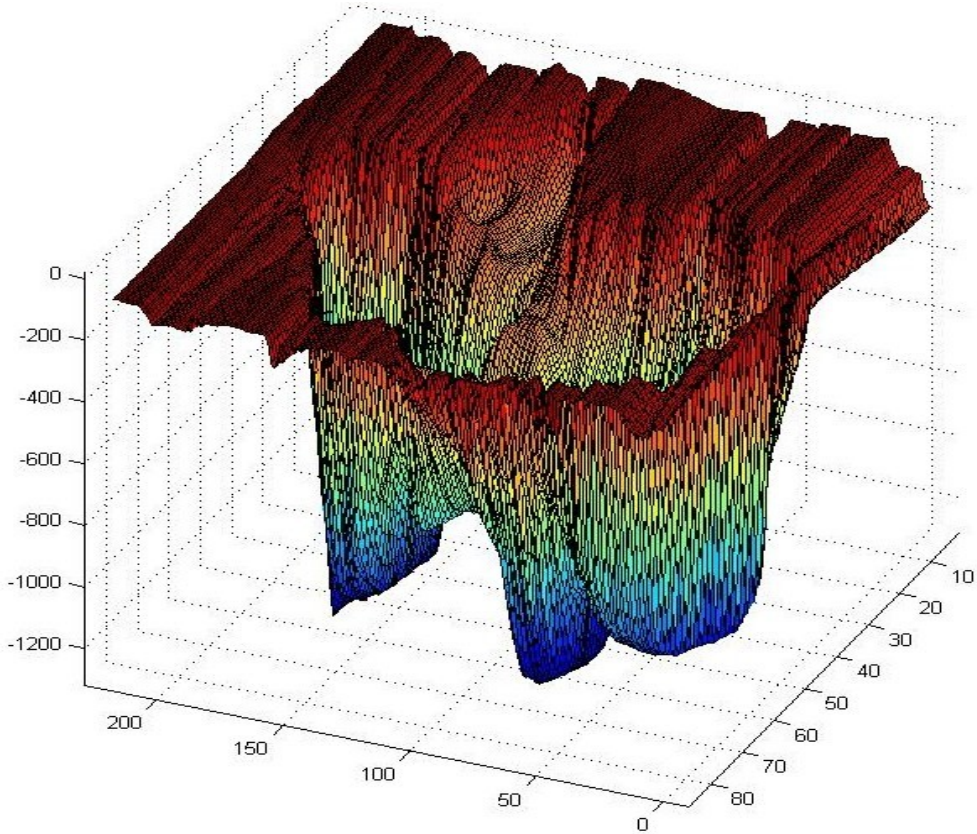
Şekil 4.12: Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, $t=60$ s., üstten bakış (eksen gridleri metre cinsindedir). Dalga uzun kenarlara ulaşmamış olduğundan henüz bir asimetri görülüyor.



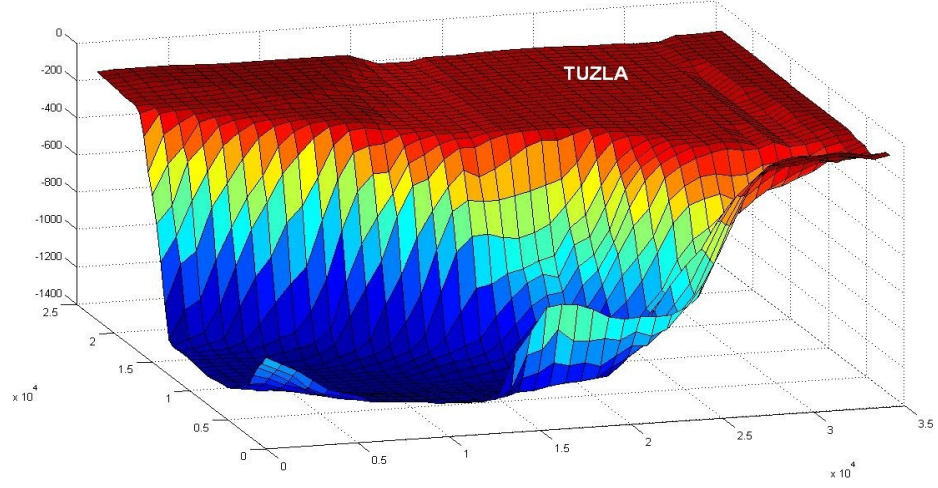
Şekil 4.13: Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, $t=120$ s., üstten bakış (eksen gridleri metre cinsindedir). Vadi batimetrisi dolayısıyla dalganın uzun ekseninde daha hızlı ilerlediği açıkça görülmektedir. Dalga uzun kenarlara varmadan önce kısa kenarlardan geri yansımış ve merkezde birleşmiştir.



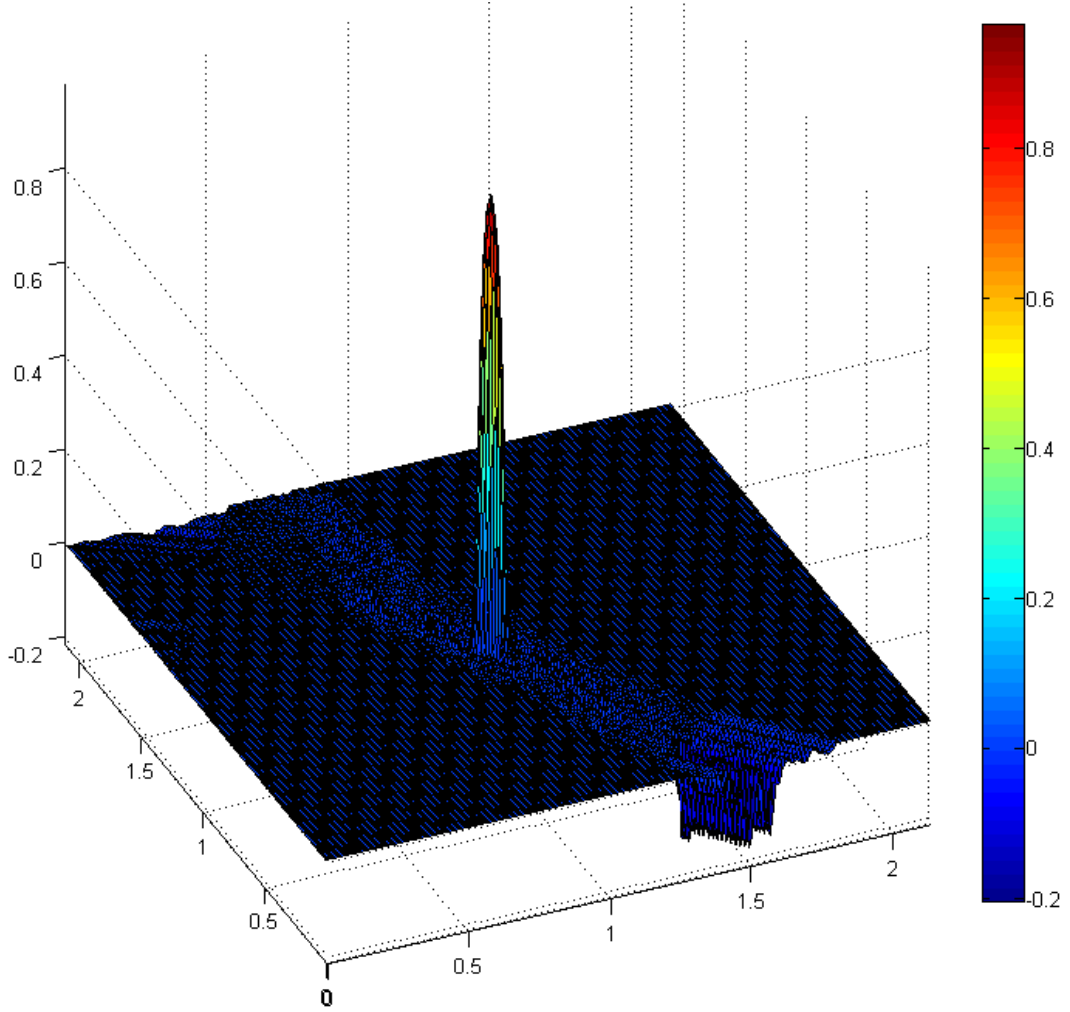
Şekil 4.14: Sabit genişlikli ve vadi biçimli kanalda dairesel dalga, $t=300$ s., üstten bakış (eksen gridleri metre cinsindedir). Orijine bağlı uzun kenarın katı, karşı kenarın ise geçirgen oluşunun getirdiği fark ancak şimdi görünür hale gelmektedir (bkz. kırmızı renkteki bölgeler).



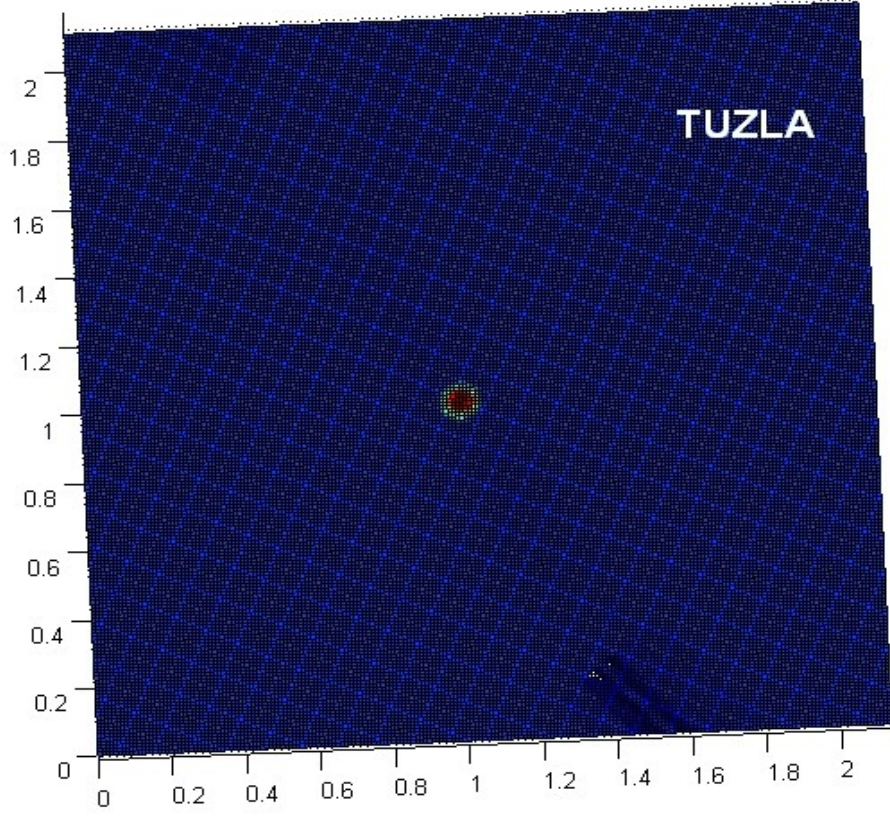
Şekil 5.1: Marmara Denizi'nin batimetri haritası (Kuzey yönünden bakış).



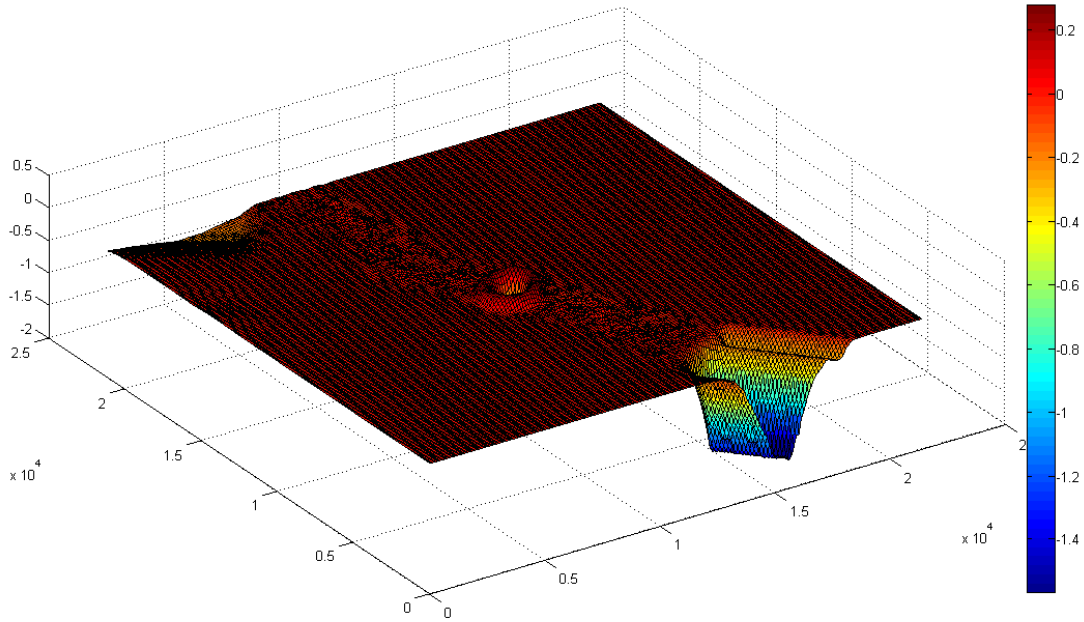
Şekil 5.2: Çınarcık Havzası'nın daraltılmış batimetrisi (G-GD yönünden bakış, sağ uçta havzanın Yalova'ya olan çıkışı görülüyor).



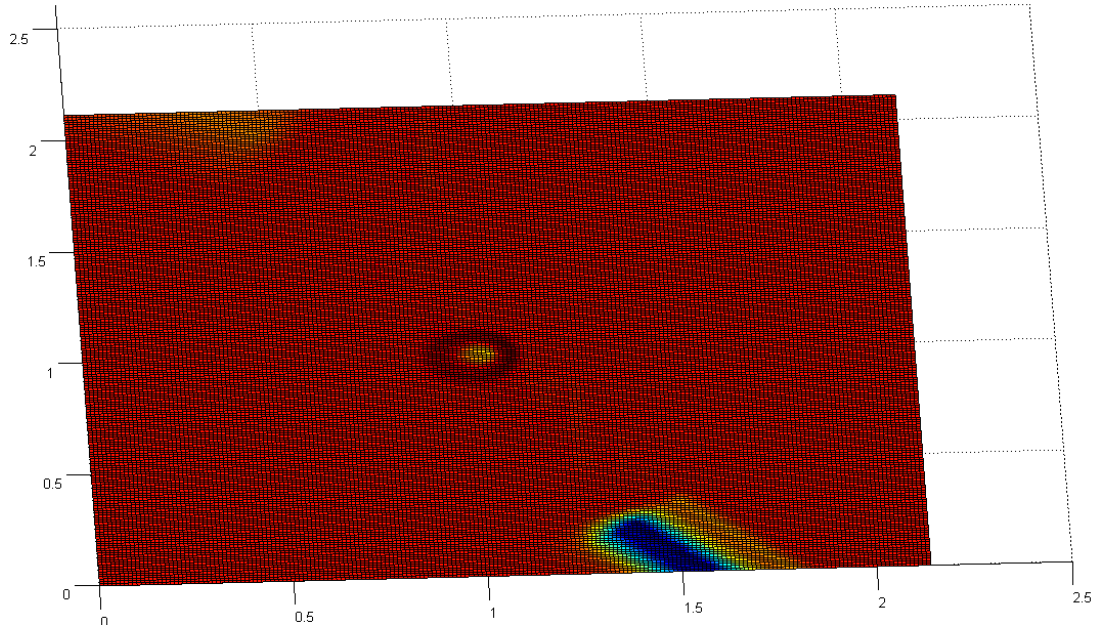
Şekil 5.3: Gerçek batimetride dairesel dalga, $t=1$ s., çaprazdan bakış (x- ve y- eksen gridleri 10^4 m., z- eksen m. cinsindedir).



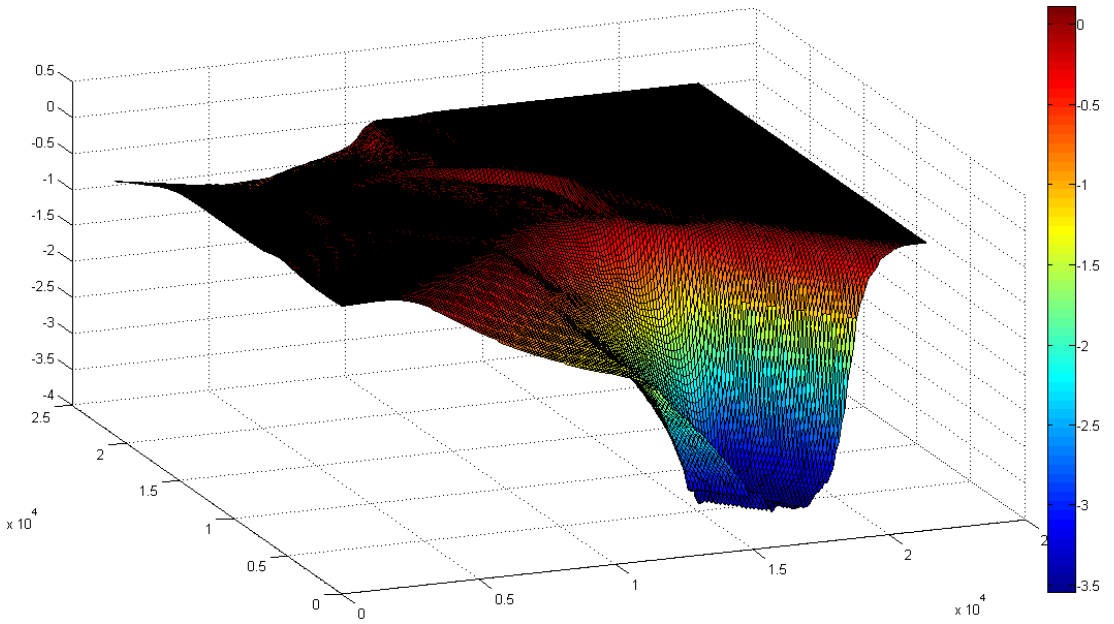
Şekil 5.4: Gerçek batimetride dairesel dalga, $t=1$ s., üstten bakış (x- ve y- eksen gridleri 10^4 m., z- eksenini m. cinsindedir).



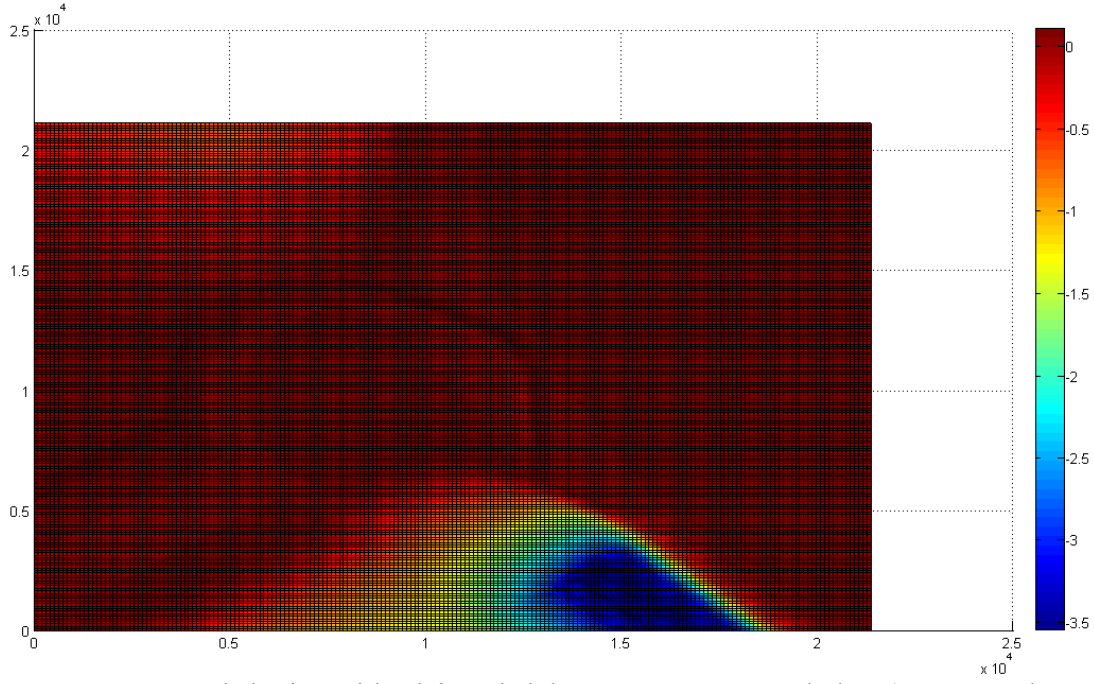
Şekil 5.5: Gerçek batimetride dairesel dalga, $t=10$ s., çaprazdan bakış (x- ve y- eksen gridleri 10^4 m., z- eksenini m. cinsindedir).



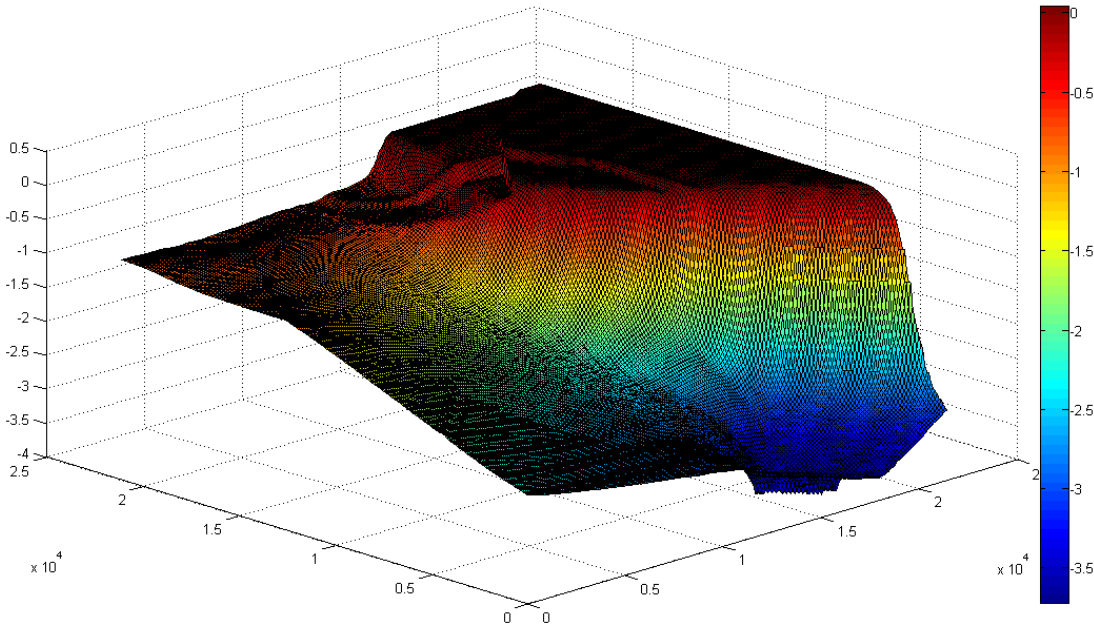
Şekil 5.6: Gerçek batimetride dairesel dalga, $t=10$ s., üstten bakış (x- ve y- eksen gridleri 10^4 m., z- eksen m. cinsindedir).



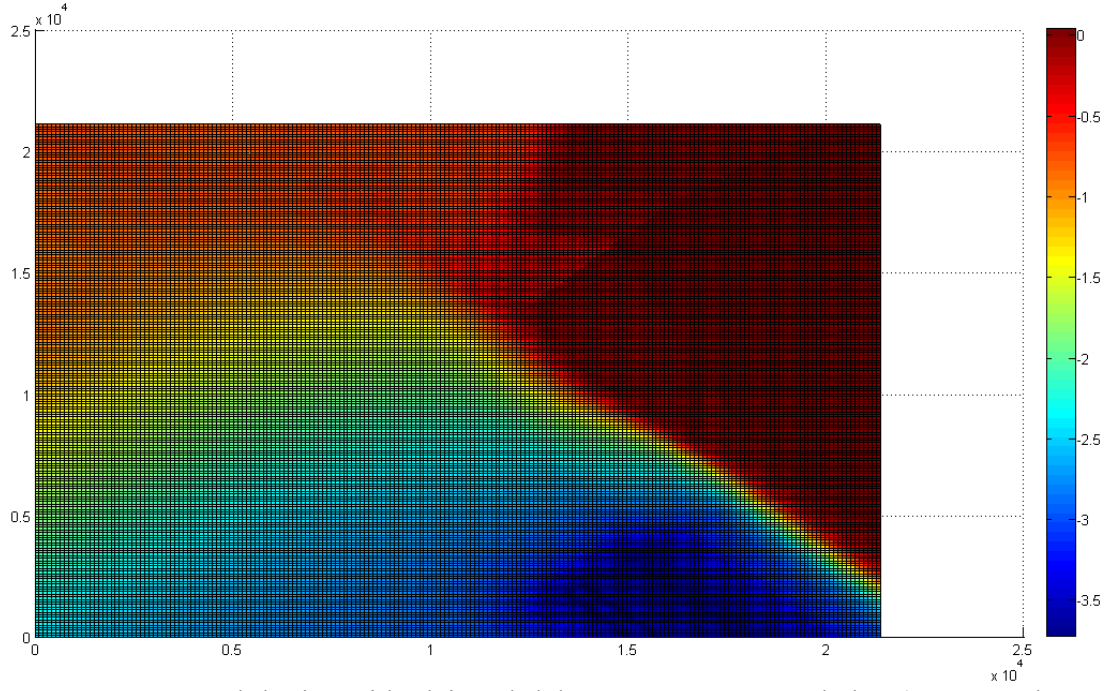
Şekil 5.7: Gerçek batimetride dairesel dalga, $t=60$ s., çaprazdan bakış (x- ve y- eksen gridleri 10^4 m., z- eksen m. cinsindedir).



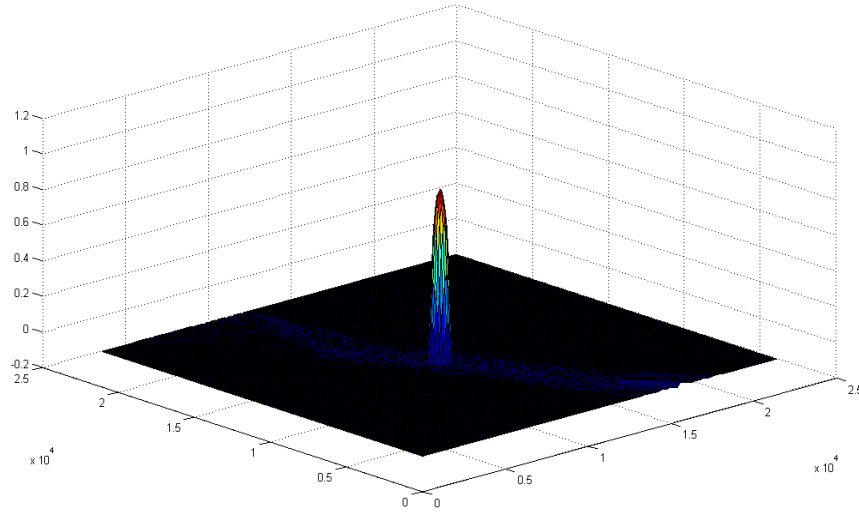
Şekil 5.8: Gerçek batimetride dairesel dalga, $t=60$ s., üstten bakış (x- ve y- eksen gridleri 10^4 m., z- eksen m. cinsindedir).



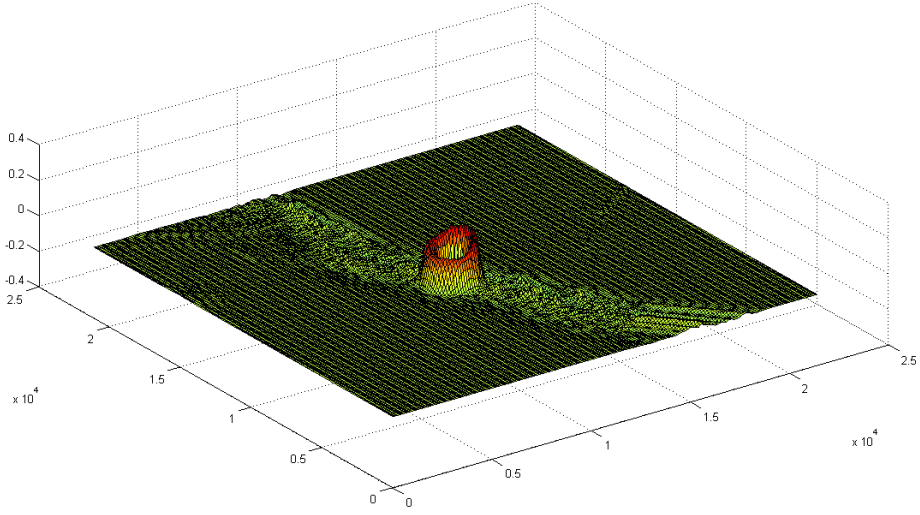
Şekil 5.9: Gerçek batimetride dairesel dalga, $t=180$ s., çaprazdan bakış (x- ve y- eksen gridleri 10^4 m., z- eksen m. cinsindedir).



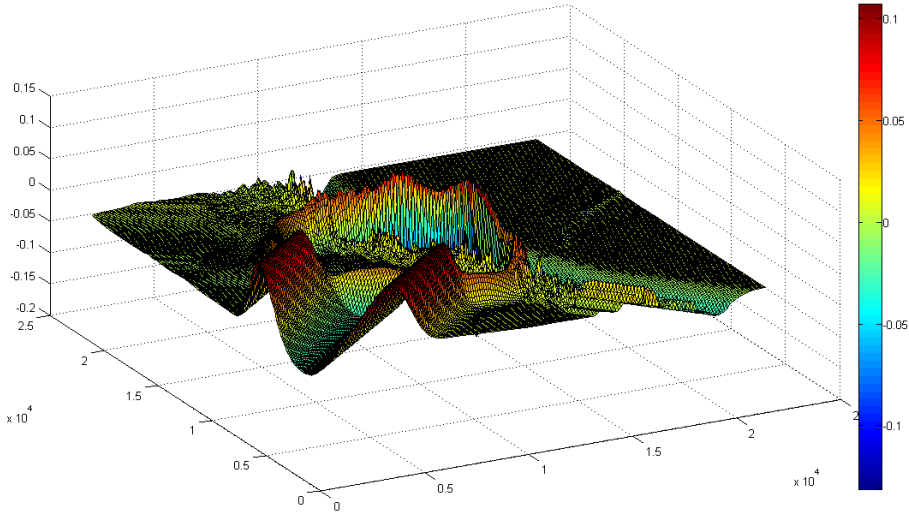
Şekil 5.10: Gerçek batimetride dairesel dalga, $t=180$ s., üstten bakış (x- ve y- eksen gridleri 10^4 m., z- eksen m. cinsindedir).



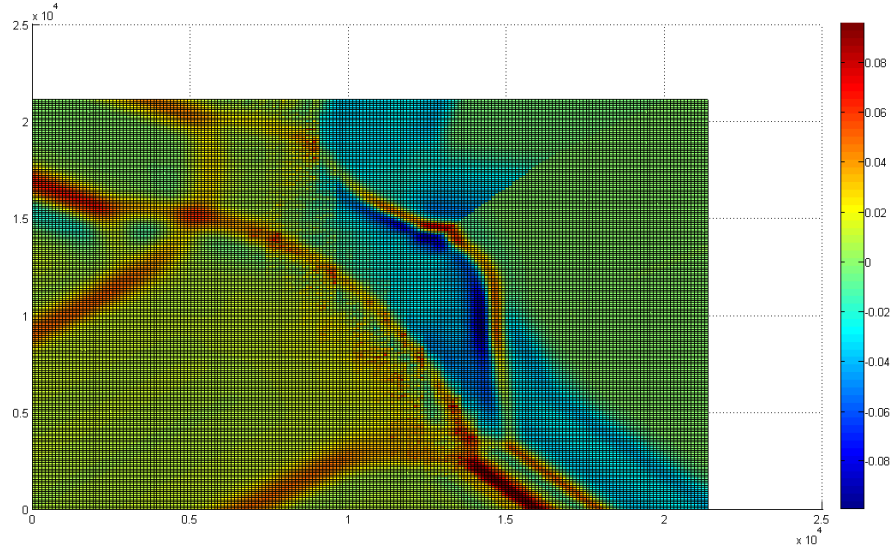
Şekil 5.11: Gerçek batimetride dairesel dalga, $t=1$ s., çaprazdan bakış (x- ve y- eksen gridleri 10^4 m., z- eksen m. cinsindedir).



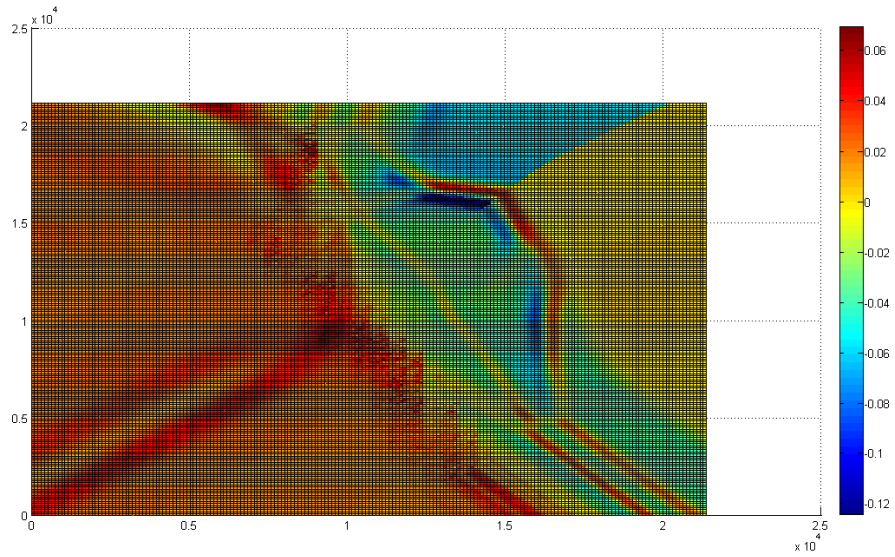
Şekil 5.12: Gerçek batimetride dairesel dalga, $t=10$ s., çaprazdan bakış (x- ve y- eksen gridleri 10^4 m., z- eksen m. cinsindedir).



Şekil 5.13: Gerçek batimetride dairesel dalga, $t=60$ s., çaprazdan bakış (x- ve y- eksen gridleri 10^4 m., z- eksen m. cinsindedir).

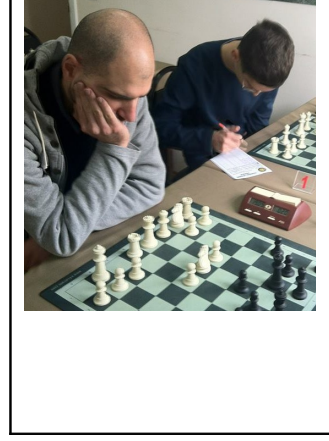


Şekil 5.14: Gerçek batimetride dairesel dalga, $t=60$ s., üstten bakış (x- ve y- eksen gridleri 10^4 m., z- eksenini m. cinsindedir).



Şekil 5.15: Gerçek batimetride dairesel dalga, $t=180$ s., üstten bakış (x- ve y- eksen gridleri 10^4 m., z- eksenini m. cinsindedir).

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Görkem SİVRİ

Doğum Yeri ve Tarihi: 30.08.1979

Adres: Yeşiltepe mah. Güzeldeniz sit. D/2 Şişli İSTANBUL

Lisans Üniversitesi: Kimya Bölümü, Fen-Edebiyat Fak., Boğaziçi Ün., İstanbul