



PROJEM İSTANBUL



ARAŞTIRMA PROJESİ

**Tuzla Kamil Abdüş Lagünü'nün Bilgisayarda Sonlu
Elemanlar Yöntemi ile Çevresel Akıntı Modellemesi
için Veri Toplanması ve bir Ağ Sistemi
Geliştirilmesi**

**Proje Yüklenicisi: Doç. Dr. Ata BİLGİLİ
İstanbul Teknik Üniversitesi
Denizcilik Fakültesi**

© 2008-İstanbul. Bu araştırma projesi "Projem İstanbul" kapsamında İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından hazırlanmıştır. İstanbul Büyükşehir Belediyesi ve araştırmacının yazılı izni olmadan çoğaltılamaz ve kopyalanamaz.

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|----|
| İÇİNDEKİLER..... | 1 |
| ŞEKİLLER..... | 2 |
| 1. GİRİŞ..... | 3 |
| 2. VERİ ARAŞTIRMASI..... | 4 |
| 2.1. Model Bölgesi Keşfi..... | 5 |
| 2.2. Kıyı Şeridi..... | 8 |
| 2.3. Batimetri..... | 8 |
| 2.4. Rüzgar..... | 9 |
| 2.5. Oşinografik Veriler..... | 11 |
| 3. SONLU ELEMANLAR HESAPLAMA AĞININ OLUŞTURULMASI..... | 12 |
| 4. TEST KOŞUSU..... | 18 |
| 5. SONUÇ..... | 20 |
| REFERANSLAR..... | 21 |

ŞEKİLLER

| | | |
|------------------|--|----|
| Şekil 1. | TC. Deniz Kuvvetleri Komutanlığı Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı Harita No 2919'un modellenecek bölgeyi gösteren kısmı..... | 6 |
| Şekil 2. | Lagünün kuzeydoğusunda bulunan ve halen oluşturulmakta olan adanın görünümü..... | 6 |
| Şekil 3. | Lagünün kuzeybatısında yer alan tersaneler bölgesine bakış..... | 7 |
| Şekil 4. | Lagünün deniz ile irtibatını sağlayan kuzey girişinin şu andaki görünümü..... | 7 |
| Şekil 5. | Tuzla Belediyesi Fen İşleri Müdürlüğü'nden alınan son durum lagün konfigürasyonu..... | 8 |
| Şekil 6. | Model bölgesinin genel batimetrik haritası..... | 10 |
| Şekil 7. | Lagün içi batimetrik haritası..... | 10 |
| Şekil 8. | Lagün girişleri batimetrik haritası..... | 11 |
| Şekil 9. | Model alanının düzlemsel doğru çizgesi..... | 13 |
| Şekil 10. | Lagün alanının düzlemsel doğru çizge detayı..... | 13 |
| Şekil 11. | Model bölgesinin genel ağ yapısı..... | 14 |
| Şekil 12. | Lagün içi ve çevresi ağ detayı..... | 14 |
| Şekil 13. | Lagün girişleri ve çevresinin ağ yapı detayı..... | 15 |
| Şekil 14. | Hesaplama ağı elemanlarının minimum iç açılı haritası..... | 16 |
| Şekil 15. | Hesaplama ağı elemanlarının kalite haritası..... | 16 |
| Şekil 16. | Model bölgesinde maksimum 50 cm/sn akıntı hızı kabulü ile CFL formülüne göre hesaplanmış model zaman aralıkları..... | 18 |
| Şekil 17. | Lagün çevresi için test koşusu sonucu elde edilen karakteristik örnek akıntı vektörleri..... | 19 |
| Şekil 18. | Güney lagün girişi için test koşusu sonucu elde edilen karakteristik örnek akıntı vektörleri..... | 19 |

1. GİRİŞ

Denizden beslenen lagün göllerinin ekolojik sistem üzerindeki değeri büyüktür. Organik materyel zenginliğine bağlı olarak plankton, planktonlarla beslenen diğer canlılar ve bunları yiyen balıkların yaşaması için uygun ortam oluşur. Kuşlar için de su, saz, balık, organik çökmüş materyel ideal ortam sağlar. Denizin tuzlu suyu lagün göllerinin kimyasal yapısını değiştirir, ve bu yüzden göldeki bitkiler ve fauna tuzlu suya dayanıklıdır. Balıkların bazıları yılın bir kısmını lagünde geçirir. Sazlık alan, suyu daha da arıtarak bu şekilde balık yaşamı için uygun özellikler kazandırıp lagün göllerine iletir. Ekosistem için bu kadar önemli olan lagünlerin yaşaması ve sürdürülmesi için ülkemizde gerekli önlemlerin alınması şarttır. Bu kapsamda İstanbul'un Tuzla ilçesinde bulunan Kamil Abdüş lagünü 1970'lerden önce bölge için balıkçılık ve barındırdığı kuşlar açısından çok önemli bir ekolojik unsur ve gelir kaynağı iken, 1978'de tersanelerin bu bölgeye taşınması ile bir dizi çevre açısından felaket sayılacak yanlış karar (tersane alanı için doldurma sonucu lagünün doğal ağzının kapatılması, yol yapımı sonucu denizden izole edilmesi, derelerin yönlerinin değiştirilmesi, vs...) sonrasında 2001'de tamamen kurumuş ve çöplük arazisi haline gelmiştir. Tuzla ve çevresi için ekolojik ve sosyo-ekonomik açılardan son derece önemli olan lagün, Tuzla Belediyesi, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Devlet Su İşleri ve İstanbul Çevre Vakfı'nın çalışmaları ile 'Tuzla Ekolojik Diriliş Projesi' adı altında rehabilite edilmektedir. Halihazırda lagünün denizle olan bağlantısı iki kanal açılarak sağlanmış ve deniz ile su değişimi gerçekleşmektedir. Bölgenin yakınında yer alan atık su arıtma tesislerinin deşarjının, tersanelerin ve diğer kirlenici endüstrinin lagünün etki alanında olduğu göz önünde bulundurulursa gölün rehabilitasyonunda su kalitesinin ne kadar önemli bir parametre olacağı açıktır. Su kalitesinin değişik doğal (rüzgar, akıntı, dalga, yağmur) ve yapay (kanal inşası, dip taraması) etkiler altında nasıl değişeceğinin incelenmesi ve kararların buna göre alınması gerekmektedir. Günümüzdeki ileri bilgisayar teknolojisi sayesinde bu faktörlerin su kalitesine olan etkilerini pahalı ve çok sayıda ölçümler yapmadan sayısal simülasyonlar ile modellemek olasıdır.

Bilgisayar kullanılarak yapılan denizel ortam modellemelerinde ilk adım su kütlelerinin hareketlerini tanımlayan denklemlerin (Navier-Stokes ve türevleri) sayısal yöntemler kullanılarak bilgisayarda çözümleri ve bu işlemin sonunda akışkan serbest su yüzeyi hareketlerinin ve akıntı alanlarının elde edilmesidir. Elde edilen ve güvenilirlikleri istatistiksel olarak kanıtlanmış bu fiziksel parametreler daha sonra çevre amaçlı her türlü modele temel teşkil ederler. Bu sayısal yöntemlerden Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method) karmaşık geometrilerin çözümlenmesi ve sayısal stabilite açısından üstünlük sağladığından özellikle de haliç ve lagün

gibi kıyısal alanla direkt ilişkisi olan ortamlarda tercih edilmektedir. Bu yöntemden elde edilecek sonuçların kalitesi üstünde hesaplama yapılan ve üçgenlerden oluşan ağın kalitesi ile doğrudan bağlıdır. Bu ağ yapısı, coğrafi ortamın sayısal ortama aktarılmış bir modeli olacağından, sisteme ait her türlü fiziksel özelliği (dip yapısının değişimi, sahil şeridinin çözümlenmesi, vs.) en iyi şekilde yansıtmalı ve aynı zamanda problem bazında gereklilikleri de (model zaman adımını sağlayacak üçgensel elemanların büyüklükleri, vs.) sağlayabilmelidir (Westerink et al., 1994; Foreman, 1983; Lynch et al., 2004). Bu amaçla ağın eleman sayısını arttırmak ilk çözüm olarak görülse de, bu işlem simülasyon süresini uzatacak ve programın koşturulabilmesi için gereken bilgisayar rasgele erişimli hafıza (RAM) miktarını arttırarak olumsuzluklara yol açacaktır. Bu nedenle olası olduğu kadar az nokta ile fiziksel ortamın bir sayısal modelini oluşturmak optimal anlamda esastır.

Bu projede, bir sonraki modelleme aşamasına hazırlık için Tuzla Lagünü hakkında veri (göl ve kıyı batimetrisi, su havzası geometrisi, kıyı hattı) toplanmış ve bu veriler ile yüksek çözünürlükte bir sonlu elemanlar ağ sistemi oluşturulmuştur. Yukarıda belirtilen optimal amaç doğrultusunda proje yürütücüsü ve ekibi tarafından denizel uygulamalara yönelik olarak oluşturulan BatTri programı kullanılmıştır (Bilgili et al, 2006). Batimetri bazlı çalışan bu program hesaplama ağının elemanlarının sayısı ve kalitesini kontrol altında tutarken problem bazında ağ optimizasyonu yapılmasına da izin vermekte, aynı zamanda bir grafik ağ editörü olarak ta kullanılabilir. Program hakkında detaylı bilgi yukarıda verilen referanstan ve http://www-nml.dartmouth.edu/Publications/internal_reports/NML-03-15/ adresinden elde edilebilir. Elde edilen sonlu elemanlar ağı, bundan sonraki modelleme çalışmalarında baz olarak alınacak ve lagün su kalitesinin bilgisayarlarda modellenmesine olanak verecektir.

2. VERİ ARAŞTIRMASI

Denizel simülasyonlarda kullanılmak üzere bir sonlu elemanlar ağının oluşturulabilmesi için öncelikle sahil şeridi koordinatlarına ve model alanı içindeki noktalarda batimetrik değerlere gereksinim vardır. Açık deniz uygulamaları için sahil şeridi ya da derinlik verisinin mekansal çözünürlüğü kilometre bazında olabilmesine karşın kıyı etkisinin hissedildiği ya da dominant olduğu bölgelerde metre ve hatta santimetre ölçeğinde çözünürlük gerekebilmektedir. Hesaplama ağı oluşturulduktan sonra modelleme aşamasında gereken bilgiler ise tamamen problem bazında olup sonuçta elde etmek istenilen parametrenin bu bilgilerin bir fonksiyonu olma şartı aranır. Bu çalışmada ilk etap olarak sistemin zorlayıcı fonksiyonları olması beklenen serbest su seviyesi,

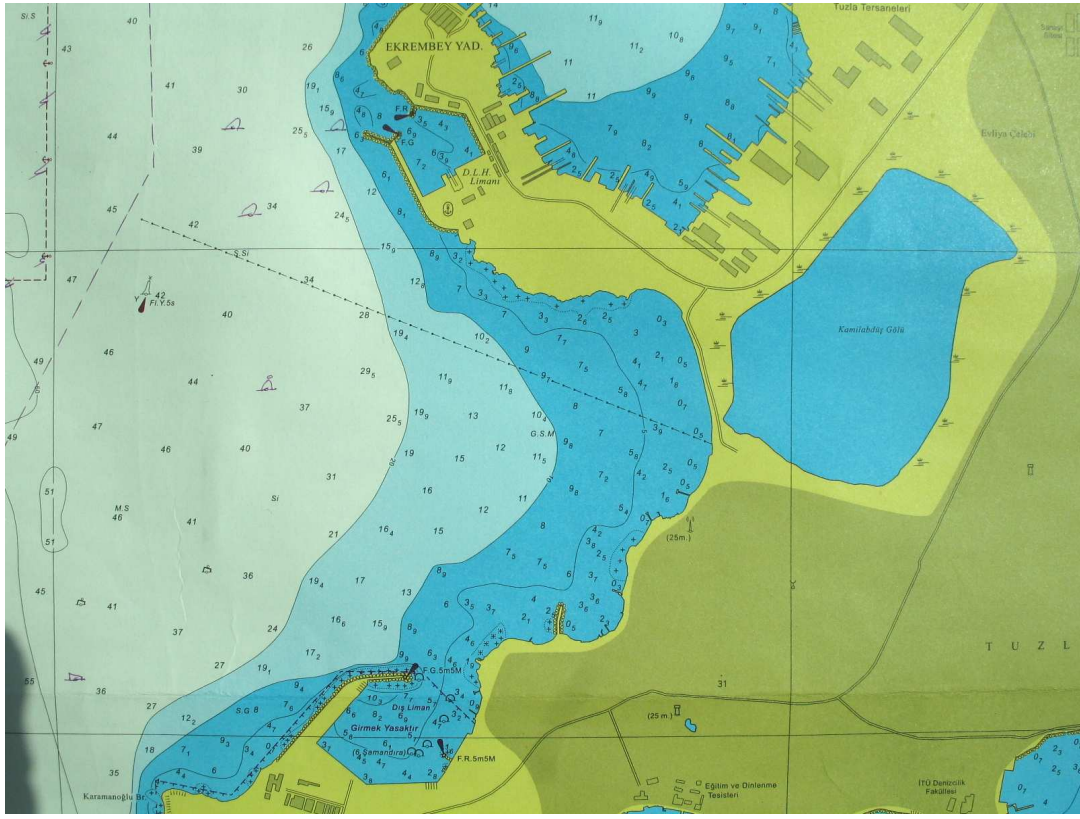
rüzgar ve akıntı verilerine ulaşılmaya çalışılmıştır. Bu başlık altında yapılan çalışmalar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

2.1. MODEL BÖLGESİ KEŞFİ

Lagün ve genel olarak modellenecek alan hakkında bilgi toplamak için 22 Ağustos 2008 tarihinde bir keşif gezisi yapılmıştır. Dünyadaki tüm lagün gölleri gibi denizden beslenen Kamil Abdüş Lagünü zamanla kuraklık, tersaneler ve yerleşim alanlarının verdiği zararlar nedeniyle denizle bağlantısı kesilerek taşkın sularla beslenen bir gölet halini almıştır. Derelerin ıslahından sonra ise dere yataklarında taşkın olmayınca göl beslenemeyip 2002-2003 yıllarında tamamen kurumuştur. Halen yürütülmekte olan tekrar yaşama döndürme proje kapsamında göl ıslah edilmekte ve çevre düzenleme çalışmaları yapılmaktadır. Karadan ve denizden yapılan keşif sırasında lagünün genel konfigürasyonu hakkında bilgi edinilmiş ve bölgenin ekolojik açıdan anlam ifade edecek şekilde modellenebilmesi için kuzeyde Ekrembey Yarımadası'ndan güneyde Karamanoğlu Burnu'na kadar olan alanın bir bütün olarak ele alınması gerektiği anlaşılmıştır (Şekil 1). Batı yönünde ise yaklaşık 44 metre derinlikte bulunan atık su deşarjı da modelleme alanı içinde kalacak şekilde sınır belirlemesine gidilmiştir. Lagün'ün dip yapısı daha sonra yapılacak olan modelleme çalışmalarında Manning katsayısının 0.22 ile 0.35 arasında değişen değerleri ile hesaplanacak dip sürtünme katsayılarının kullanımına uygundur. Dip sürtünme katsayısı, C_d , Manning katsayısı, n , cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir. Burada h su derinliğidir.

$$C_d = \frac{g \cdot n}{h^{1/3}} \quad (1)$$

Bunun yanında lagün için yaşamsal öneme haiz olan güney ve kuzey giriş kanalları da incelenmiş ve bu girişlerin önreilen geometrilerinin de deniz ile lagün arasında optimal bir su alışverişi için modelleme yolu ile analiz edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Gölün sığılığı, bir akarsu girdisinin olmaması ve bölgede esen lodos ve poyraz rüzgarlarının sertliği göz önüne alındığında sel ve aşırı yağmur gibi episodik olaylar dışında su sütununun iyi karışmış olacağı tahmin edilmektedir. Gölde oluşturulacak üç adadan sonuncusu için yapılan zemin tarama ve pompalama işlemleri hakkında da bilgi edinilmiştir (Şekil 2, 3 ve 4).



Şekil 1. TC. Deniz Kuvvetleri Komutanlığı Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı Harita No 2919'un modelleneyecek bölgeyi gösteren kısmı. Kuzeybatı yönünde uzanan oklar atık su deşarj hattını göstermektedir.



Şekil 2. Lagünün kuzeydoğusunda bulunan ve halen oluşturulmakta olan adanın görünümü. Bakış yönü kuzey istikametindedir.



Şekil 3. Lagünün kuzeybatısında yer alan tersaneler bölgesine bakış.



Şekil 4. Lagünün deniz ile irtibatını sağlayan kuzey girişinin şu andaki görünümü.

2.2. KIYI ŞERİDİ

Tuzla Belediyesi Fen İşleri Müdürlüğü'nde Autocad yazılım formatında 'Değişken Kıyı' adlı katmanda mevcut olan kıyı şeridi kullanılmıştır (Şekil 5). Bu veri enlem-boylam formatından UTM (Universal Transverse Mercator) metrik koordinat sistemine çevrilmiştir. Lagün kıyı şeridinin çözünürlüğü maksimum 30 m ve minimum 0.20 m olmak üzere ortalama 9.21 metredir. Bu değerler lagün dışına çıkıldığında sırasıyla 47.5 m, 0.30 m ve 12.41 m olmaktadır.



Şekil 5. Tuzla Belediyesi Fen İşleri Müdürlüğü'nden alınan son durum lagün konfigürasyonu. Lagün içi kanallar, Marmara Denizi'ne açılan lagün girişleri ve oluşturulacak üç adanın konumları açık olarak gösterilmektedir.

2.3. BATİMETRİ

Modelleme için hem lagünün iç topografyası, hem de denizel ortamdan gelecek olan oşinografik sinyallerin belirlenmesi için lagün ağzına yakın alanlardaki deniz dibi topografyasına gereksinim duyulmaktadır. Denizel topografya T.C. Deniz Kuvvetleri Komutanlığı Seyir, Hidrografi ve Oşinografi Dairesi tarafından yayınlanmış olan TR 2919 No'lu harita kullanılarak ve sınırları Şekil 1'de verilmiş olan bölgeye ait batimetrik

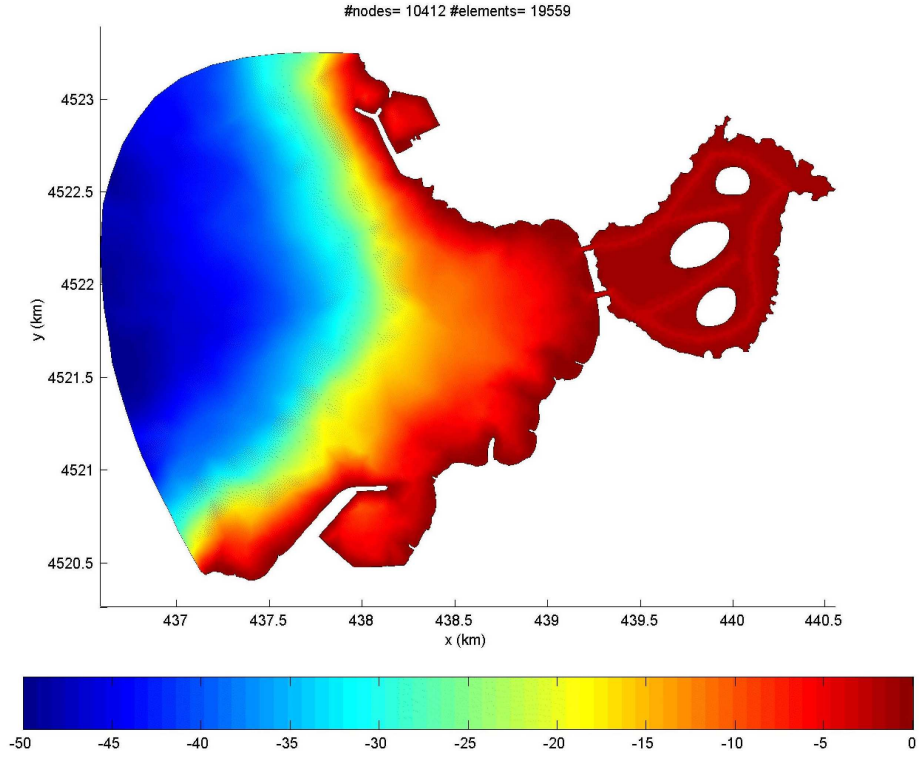
bilgilerin dijital ortama geçirilmesi ile elde edilmiştir. Bölgedeki çok önemli çevresel bir parametre olan atık su deşarjının da bu bölge içinde kalmasına özellikle önem verilmiştir.

Lagün içi topografyası bu bölgedeki dip tarama ve konfigürasyon işlemlerinin halen devam etmesinden ötürü Tuzla Belediyesi Fen İşleri Daire Başkanlığı'ndan elde edilen ve Şekil 5'de verilen lagünün tarama sonrası halini gösteren son durum konfigürasyonu baz alınarak hazırlanmıştır. Tuzla Belediyesi'nden alınan bilgiye göre Şekil 5'de gösterilen kanallar tarama sonrası ortalama su seviyesinden (MSL) 2.5 m derinlikte olacaklardır. Kanalları çevreleyen sığıklar ise 1.2 metreye taranacak ve lagün doğal işleyişine bırakılacaktır. Yaklaşık 3.5 metre derinlikte ve 20 m genişliğinde olacak iki adet giriş (Şekil 6) lagünün denizel ortamla su alışverişine izin vermektedir. Lagünün ıslahı bittikten sonra dip konfigürasyonun gerçekçi durumunu saptamak için bir arazi çalışması yaparak batimetrik veri toplamak modelin sonuçlarının doğruluğu açısından kaçınılmazdır.

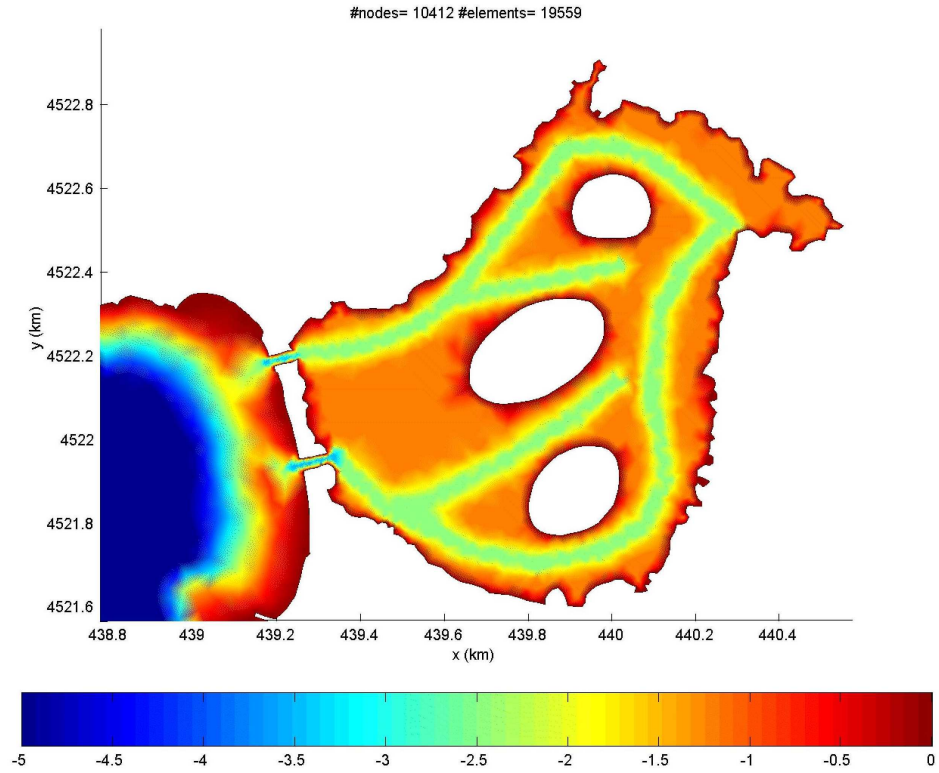
Bu değerler baz alınarak hazırlanan model alanının genel batimetrik haritası ve lagün içi batimetri haritaları Şekil 6 ve 7'de verilmiştir. Bu haritalar hazırlanırken sınırlı sayıdaki belirli noktalarda tanımlanan derinlikler ağ noktalarına doğrusal interpolasyon yöntemi kullanılarak aktarılmıştır. Lagün içi kanallar ile sığıklar arasındaki geçiş bölgesi yaklaşık 10 m olarak tanımlanmış ve bu bölgede derinlikler kanallar ve sığık bölgelerin sınırlarını birleştiren ve eğimi 0.08 olan bir doğru etrafında ortalama değer olan 1.85 m'den 0.4925 m'lik bir standart sapmayı sağlayacak şerhilde rasgele olarak belirlenmiştir. Bu sınır bölge ve lagün girişlerinin batimetrisi daha detaylı olarak Şekil 8'de görülebilir.

2.4. RÜZGAR

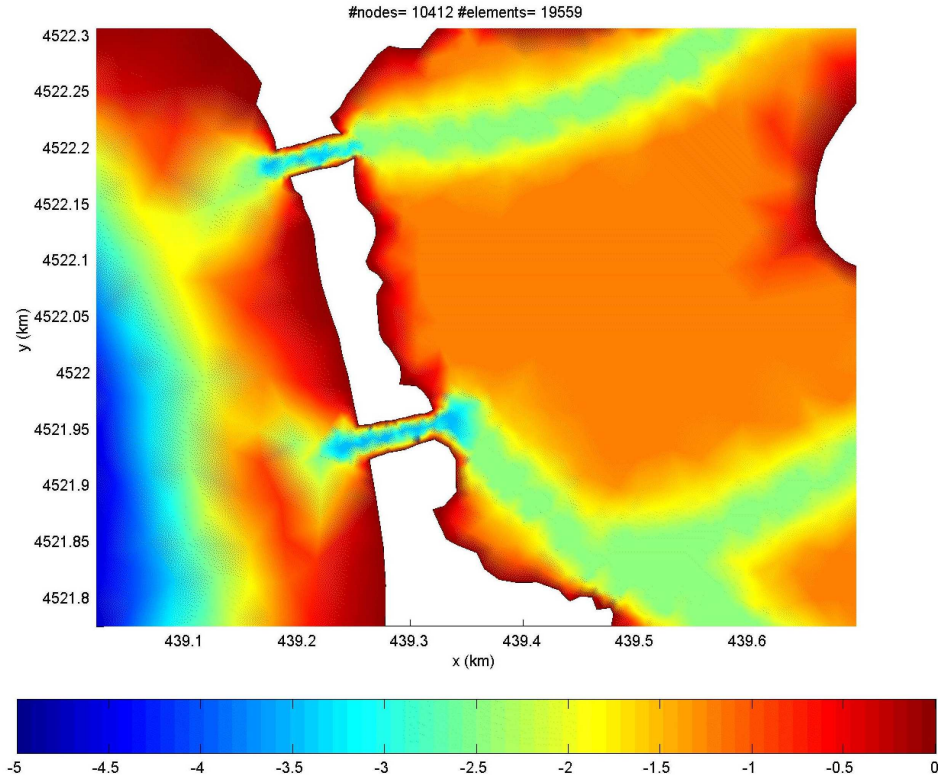
Bölgedeki santimetre bazındaki ($\approx 20\text{cm}$) gelgit yükseklikleri, lagüne akan bir tatlı su kaynağının yokluğu ve lagünün sığığı göz önüne alındığında denizel ortam ile su ve materyel değişiminde en önemli faktörün rüzgardan oluşacak kayma gerilmesi olması beklenmektedir. Bölgede dominant olan rüzgarlar poyraz ve lodostur. Bu rüzgarlara ait bilgiler Kartal Bölge Meteoroloji Müdürlüğü'nden elde edilmiştir ve hesaplama ağının oluşturulmasından sonraki adım olan modelleme sırasında sayısal modele zorlayıcı bir fonksiyon olarak girilecektir.



Şekil 6. Model bölgesinin genel batimetrik haritası. Renk skalası metre olarak derinlikleri göstermektedir.



Şekil 7. Lagün içi batimetrik haritası. Renk skalası metre olarak derinlikleri göstermektedir.



Şekil 8. Lagün girişleri batimetrik haritası. Renk skalası metre olarak derinlikleri göstermektedir.

2.5. OŞİNOGRAFIK VERİLER

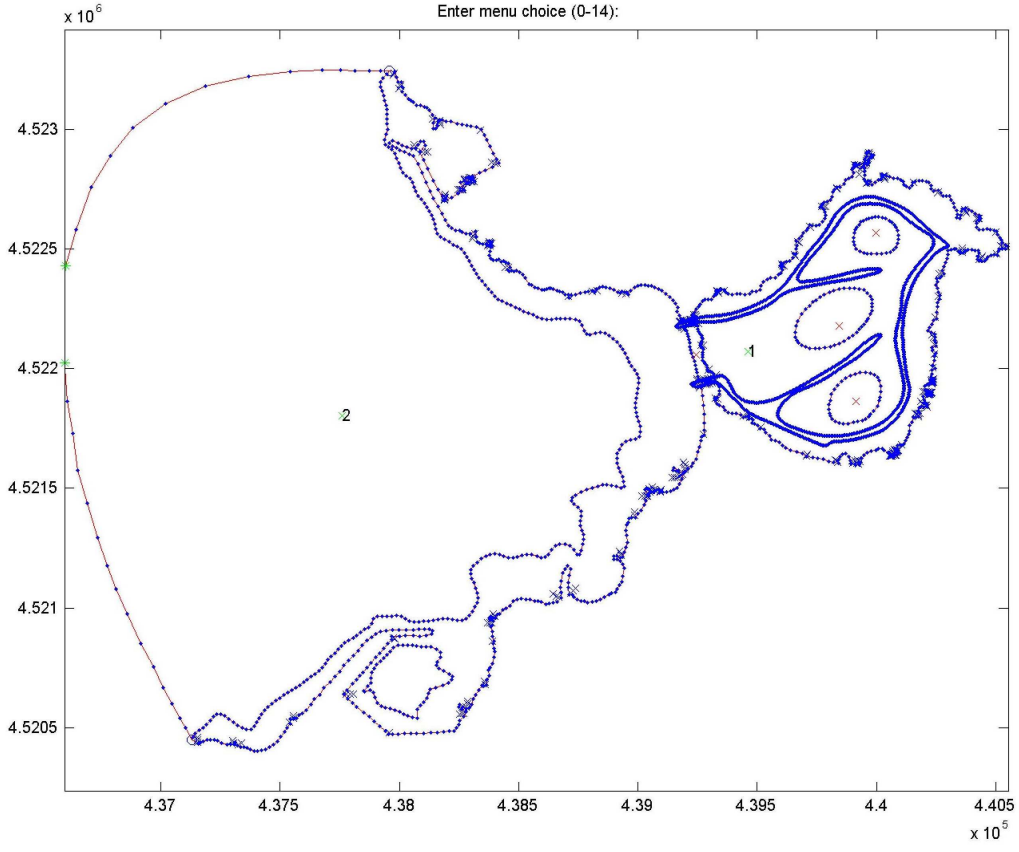
T.C. Deniz Kuvvetleri Komutanlığı Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi ile yapılan görüşme ve yazışmalarda model bölgesini tanımlayan koordinatlarla belirli saha içinde batimetrik veri dışında oşinografik verilerin bulunmadığı görülmüştür. Bunun yanında bölgeye yakın sayılabilecek sahalarda aşağıda özetlenen veriler mevcuttur. Bunlar gerekirse modelleme aşamasında elde edilip incelenecek ve kullanılacaktır.

- Pendik mevkiinde 170 günlük su seviyesi ölçümleri.
- Tuzla mevkiinde 20 adet noktada derinliğe göre toplanmış sıcaklık, tuzluluk ve yoğunluk bilgileri.
- Kartal yakınlarında 2 istasyonda toplanmış noktasal akıntı verisi.

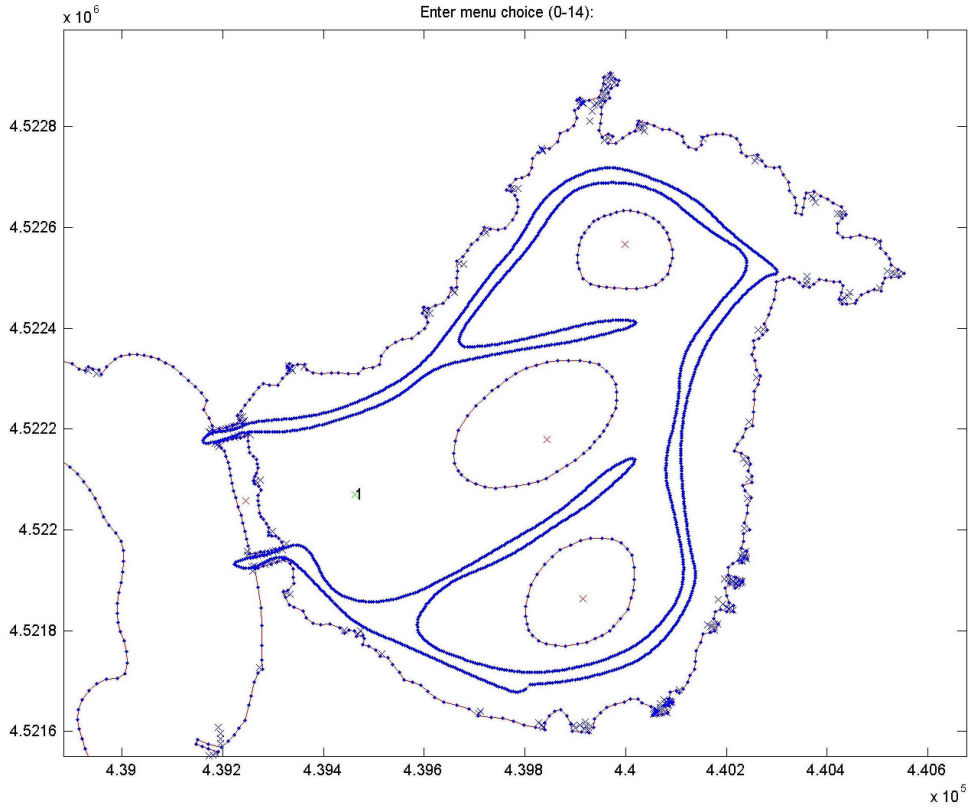
3. SONLU ELEMANLAR HESAPLAMA AĞININ OLUŞTURULMASI

Yukarıda özetlenen bilgilerden batimetrik ve kıyı hattı verileri bilgisayar ortamına geçirilerek ağ sisteminin oluşturulacağı bölge belirlenmiş ve düzlemsel doğru çizgesi (Planar Straight Line Grapg, PSLG) formatında kaydedilmiştir. Lagün ile deniz arasındaki su ve malzeme değişimi lagün ağzlarına yakın kıyısız bölgede gerçekleşeceğinden buradaki akıntının yüksek çözünürlükte hesaplanabilmesi amacı ile bölge iki alana bölünmüştür. 5 metre eşderinlik çizgisi ile ayrılan ve Şekil 9'da gösterilen bu iki alandan 1 numaralı kıyısız alanda üçgenel eleman sayısını arttırmak için üçgenlerin izin verilen maksimum alanı $1,000 \text{ m}^2$ olarak belirlenmiştir. Batıdaki açık su bölgesinde (2 numara) ise bu değer $10,000 \text{ m}^2$ 'dir. Buna ek olarak taşınımın göreceli olarak büyük olacağı lagün içindeki kanalların yakın çevresindeki akımın çözümlenebilmesi için de bu kanalların sınırları 2.5 m eşderinlik hattı kullanılarak aralıkları 5 m'yi geçmeyen noktalardan oluşan eğrilerle belirlenmiştir. Varlıkları ağ sisteminde şart koşulan bu noktalar, bu bölgelerdeki coğrafi yapının etkisinin model tarafından efektif bir şekilde hissedilmesi amacı ile daha küçük ve daha sık elemanların oluşmasını sağlamıştır (Şekil 10). Açık deniz bölgesinde oluşturulan göreceli anlamda büyük elemanların amacı buradaki akımın detaylı olarak modellenmesi değil, su seviyesi ve rüzgar etkisi altında oluşan oşinografik zorlama sinyallerinin ana araştırma bölgesi olan 1 numaralı alana doğru olarak iletilmesidir.

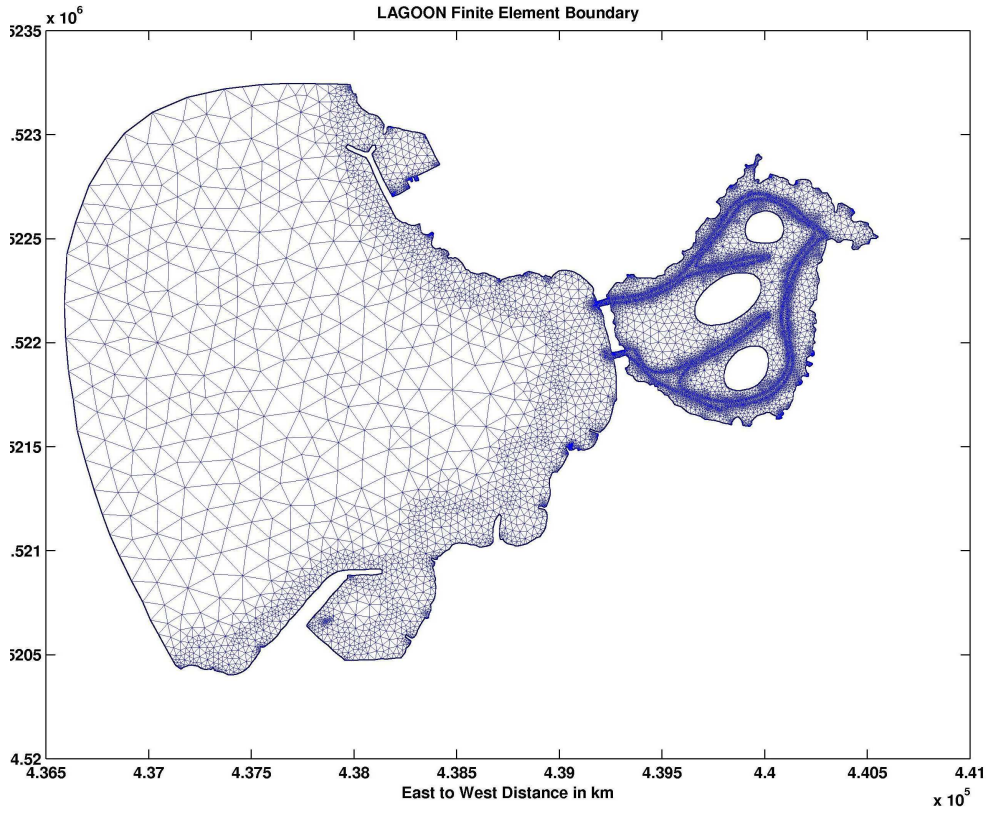
PSLG üstünde, BatTri programı kullanılarak Şekil 11, 12 ve 13'te görülen ağ yapısı oluşturulmuştur. Şekil 13'te lagün içi kanallarının 2.5 m eşderinlik çizgisi kullanılarak nasıl yüksek çözünürlükte oluşturulduğu açıkça görülmektedir. Bu hesaplama ağının, A eleman alanları olmak üzere, $\sqrt{2} \cdot A$ olarak verilen karakteristik eleman uzunluğu lagünün içinde yaklaşık 0.10 metreden, açık denizde 153 metre arasında ortalama 11.17 m ve standard sapma 16.9 m olacak şekilde değişmektedir. Ağ 15,347 düğüm noktasından ve 29,287 üçgenel elemandan oluşmaktadır. Hesaplama ağının geometrik bant genişliği Cuthill-McKee algoritması (Cuthill ve McKee, 1969) kullanılarak optimal bir şekilde 619'a düşürülmüştür.



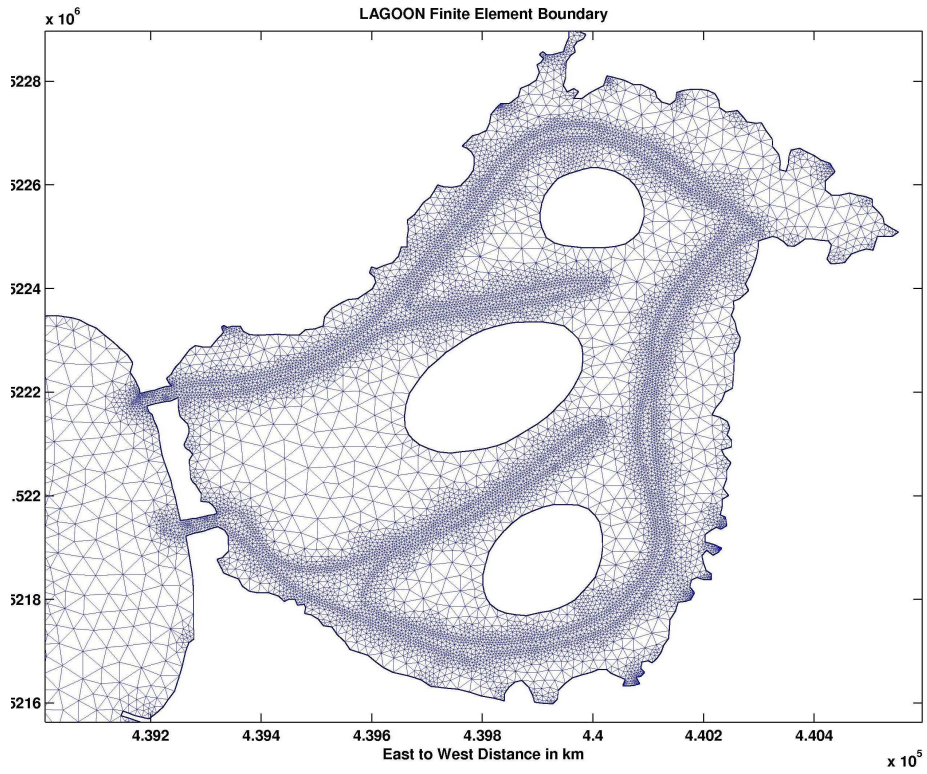
Şekil 9. Model alanının düzlemsel doğru çizgesi.



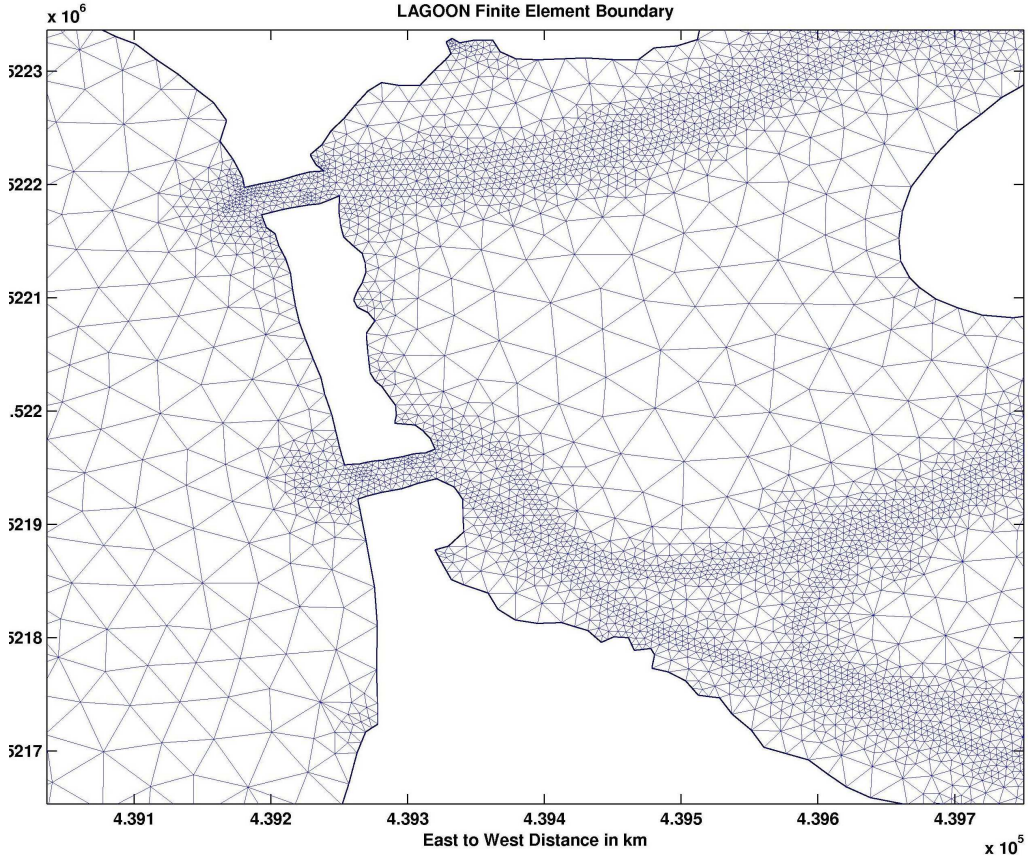
Şekil 10. Lagün alanının düzlemsel doğru çizge detayı.



Şekil 11. Model bölgesinin genel ağ yapısı.



Şekil 12. Lagün içi ve çevresi ağ detayı.

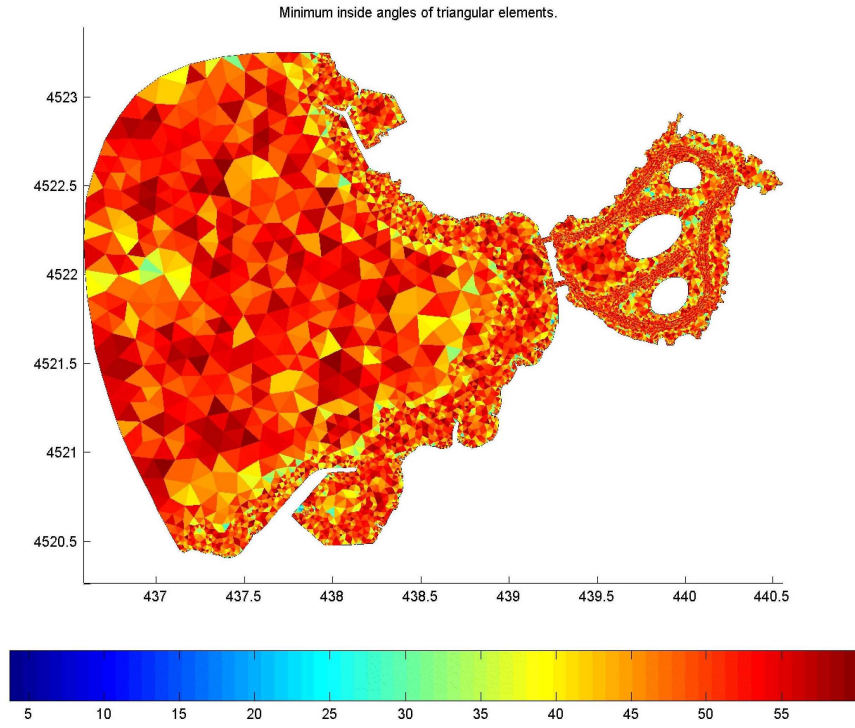


Şekil 13. Lagün girişleri ve çevresinin ağ yapı detayı.

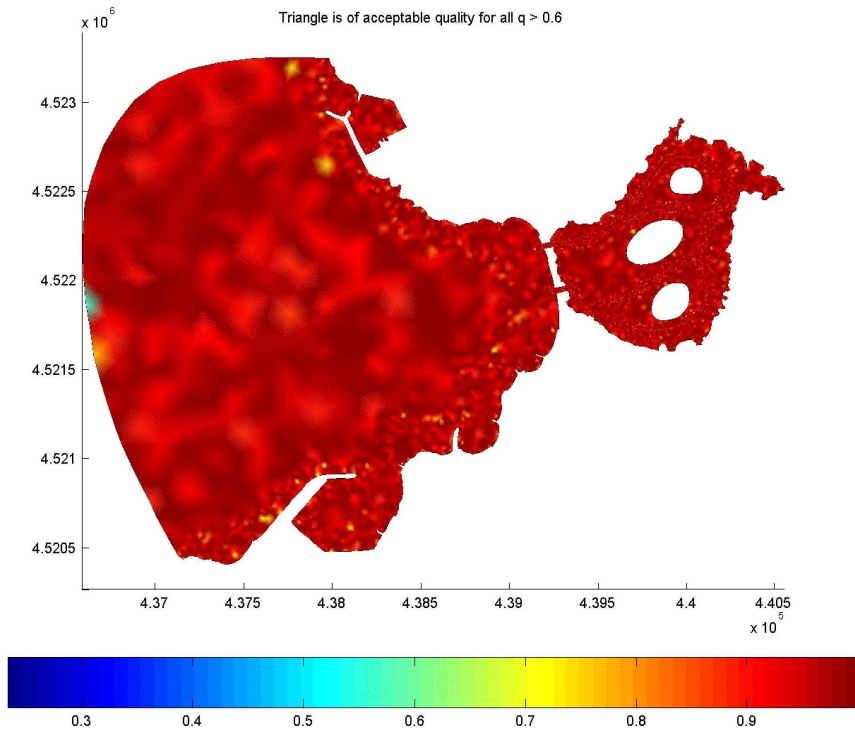
Elemanların kalitesi minimum 30°'lik bir üçgen iç açısı şartı konularak sağlanmıştır (Şekil 14). Bu şart şekilden de görüleceği gibi model alanının çoğunda sağlanmakta, ama varlığı ağ sisteminde şart koşulan düğüm noktalarının etkisi ile ender olarak 25°'ye kadar düşmektedir. Elemanların kalitesi Şekil 15'de

$$q = \frac{4 \cdot \sqrt{3} \cdot A}{L_1^2 + L_2^2 + L_3^2} \quad (2)$$

formülü kullanılarak ta gösterilmiştir. Burada q eleman kalite ölçütü, A eleman alanı, L_1 , L_2 ve L_3 'te üçgenin kenar uzunluklarıdır. $q \geq 0.6$ için bir üçgenin kalitesinin yeterli olduğu söylenebilir. İdeal eşkenar üçgen durumunda, $L_1 = L_2 = L_3$ olacağından $q = 1$ olacaktır. Bir dip not olarak ideal durumda sonlu elemanlar ağını oluşturan bütün üçgenlerin eşkenar üçgen olması sistemin hataları minimuma indirecektir.



Şekil 14. Hesaplama ağı elemanlarının minimum iç açısı haritası. Renk skalası derece cinsinden minimum iç açıları göstermektedir.



Şekil 15. Hesaplama ağı elemanlarının kalite haritası. Renk skalası eleman kalite ölçütü q 'yu açıları göstermektedir.

Hesaplama ağının sağlanması gereken bir başka koşul da Courant-Friedrichs-Levy (CFL) şartı olarak bilinen ve sayısal formülasyonlarda (özellikle de Sonlu Farklar yöntemlerinde) direkt olarak simülasyonun stabilitesini ve konverjansını etkileyen durumdur. Bir boyutta

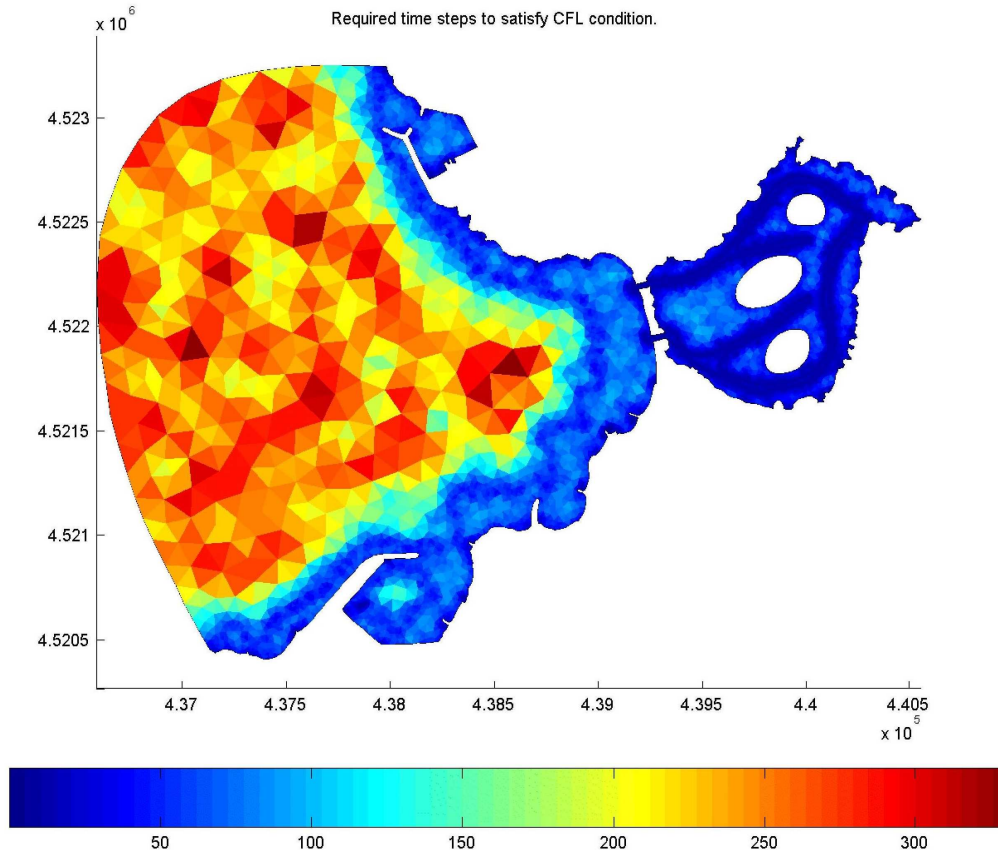
$$\frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x} < C \quad (3)$$

denklemleri ile verilen bu şart, dolaylı (Implicit) sonlu elemanlar formülasyonlarında programın stabilitesine direkt olarak etkide bulunmasa da yine de olayın fiziği açısından sağlanması özellikle de Lagrange bazlı yöntemlerde doğruluğa katkı sağlayacaktır. Burada u akıntı hızı, Δt model zaman aralığı, Δx eleman karakteristik uzunluğu ve C probleme bağlı bir sabittir. Denklem 3 ile verilen şart sağlandığında model zaman aralığı öyle belirlenmektedir ki hesaplanmış belirli bir hız ile hareket eden bir su zerreciği bu zaman aralığında herhangi bir elemanı atlamayarak içinde kalmakta ve o eleman tarafından belirlenen zorlama ya da direnç sinyalini hissetmektedir. Çok basit bir örnek olarak, bir elemandaki derinlik çevresine göre azalmışsa CFL şartı sağlandığında su zerreciği buradaki sinyalin etkisini hissederek hızlanacaktır. Eğer bu eleman zaman adımı yeterince küçük olmadığı için atlanırsa, o su zerreciğinin eleman içindeki derinlik azalmasından haberi olmayacak ve daha yavaş olarak seyrine devam edecektir.

Denklem 3'ün iki boyutlu denizel simülasyonlara uygulanması eşdeğer üçgen kabulü ile aşağıdaki denklemle olmaktadır:

$$\frac{\sqrt{3}}{4} \cdot \frac{g \cdot h \cdot t^2}{R^2} > A \quad (4)$$

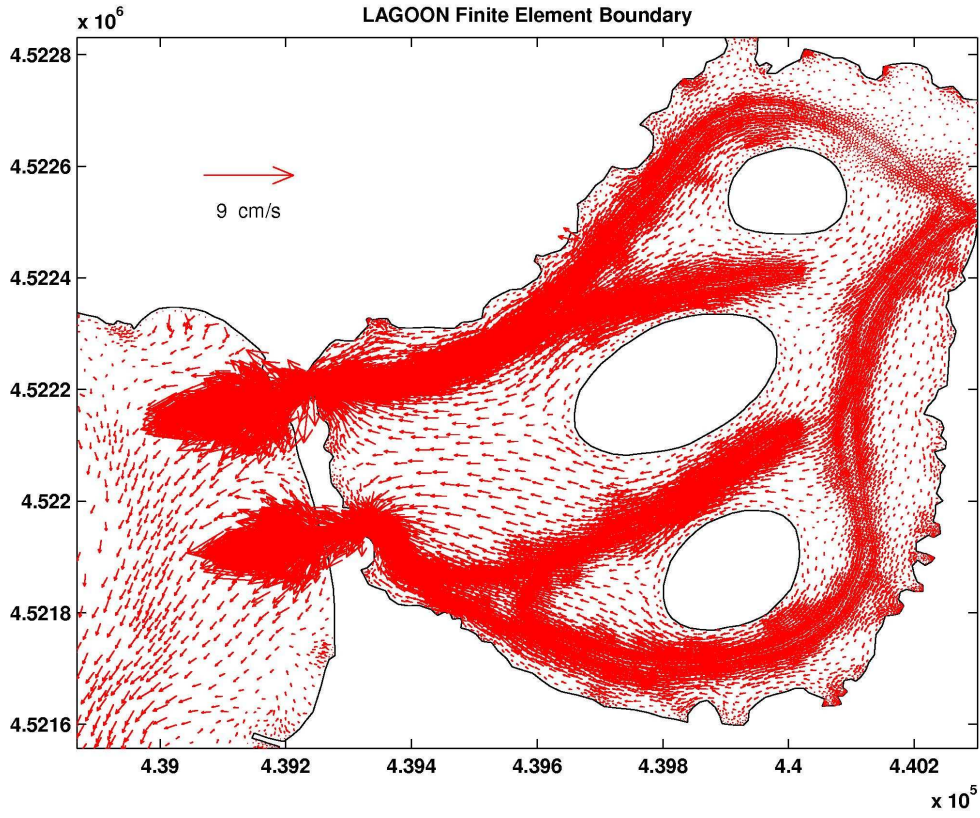
Burada g yerçekimi ivmesi, h su derinliği t model zaman aralığı, A eleman alanı ve R bir sabittir. R 'nin değerleri, düz dip topografyası olan alanlarda 25 ile yüksek batimetrik değişim gösteren alanlarda 500 arasında değişebilmektedir. Genelde $R = 100$ birçok durum için optimal bir seçim olacaktır (Westerink et al., 1994; Luettich ve Westerink, 1995). Şekil 16'da Kamil Abdüş Lagünü için model bölgesinde rastlanabilecek akıntı hızının maksimum 0.50 m/sn olabileceği kabulü ile hesaplanmış model zaman adımları görülmektedir. Görüldüğü gibi sığ bölgelerdeki küçük elemanlar nedeni ile bu maksimum hıza ulaşılması durumunda modelin CFL şartının sağlanması için 25 saniyeye varan zaman adımları ile koşturulması gerekebilecektir.



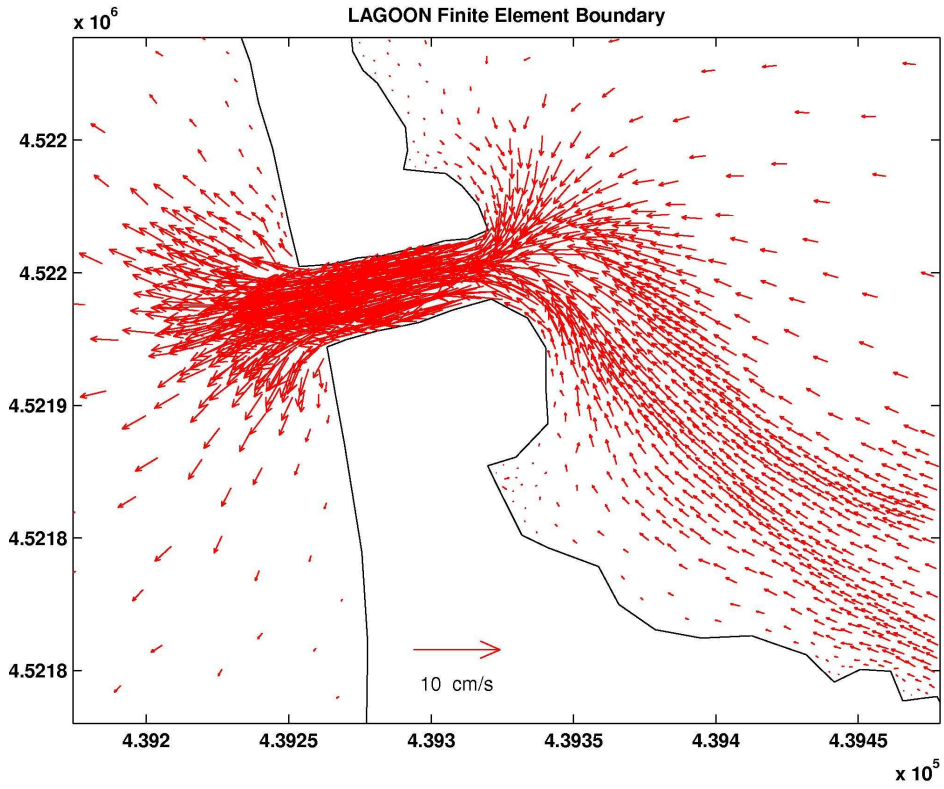
Şekil 16. Model bölgesinde maksimum 50 cm/sn akıntı hızı kabulü ile CFL formülüne göre hesaplanmış model zaman aralıkları. Renk skalası saniye cinsinden model zaman aralığını göstermektedir.

4. TEST KOŞUSU

Oluşturulan hesaplama ağı standard girdiler ile 3.20 MHz ve 1 GB RAM'li bir dizüstü bilgisayar kullanılarak Cygwin ortamında test amaçlı koşturulmuştur. 24 saatlik bir simülasyon 144 saniyelik bir zaman adımı ile 51 dakikada tamamlanmıştır. Sonuçta hesaplanan hız vektörlerinin incelemesinde hesaplama ağına bağlı herhangi bir anomali görülmemiştir. Ağ, açık deniz serbest su yüzeyi ve rüzgar zorlamasına ait sinyalleri kıyısal bölge ve lagün içine aktarmakta ve bu alanlardaki vektörler bu etkilere tepki vermektedirler. Gerçek zamanlı modelleme aşamasında giriş parametrelerinin optimizasyonu ile elde edilecek sonuçların istatistiksel anlamda doğruluğunun sağlanması için hesaplama ağı açısından bir problem yaşanmayacağı öngörülmektedir. Test koşullarına ait akıntı vektörü grafikleri Şekil 17 ve 18'te görülebilir. Bu vektörlere ait bir animasyon da projenin internet sitesinde yer almaktadır. Bu vektör haritaları sadece karakteristik örnekler olarak verilmiştir ve sayısal olarak bir anlam ifade etmemektedir.



Şekil 17. Lagün çevresi için test koşusu sonucu elde edilen karakteristik örnek akıntı vektörleri.



Şekil 18. Güney lagün girişi için test koşusu sonucu elde edilen karakteristik örnek akıntı vektörleri.

5. SONUÇ

Bu çalışmada Tuzla'da bulunan Kamil Abdüş lagünü ve lagünün etkileşimde bulunduğu denizel alanın bilgisayarlarda çevresel simülasyonlarına baz olacak yüksek kalitede bir iki boyutlu sonlu elemanlar hesaplama ağı oluşturulmuştur. Oluşturulan ağ sistemi ilerki aşamalarda yeni bilgilerin edinilmesi ile kolayca güncellenebilecek şekilde yapılandırılmıştır. Hesaplama ağı ve daha sonraki modelleme çalışmaları için toplanan veriler İstanbul Teknik Üniversitesi bünyesinde (<http://www2.itu.edu.tr/~bilgili/>) bilgisayar-internet ortamında arşivlenerek bundan sonraki aşamalar ve çalışmalar için merkezi bir adreste toplanmıştır.

Tuzla Lagünü'nün rehabilitasyonu ile tekrar kazanılmasının faydaları İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nin de desteklediği Tuzla Ekolojik Diriliş Projesi'nden de anlaşılacağı gibi tartışılmaz. Lagünün su kalitesinin bilgisayarda modellenmesinin faydaları ise çok sayıda ölçüm yapmaya göre daha ucuz olması ve değişik giriş parametrelerinin etkilerinin çabuk, kolay ve güvenilir bir şekilde irdelenmesine olanak sağlamasıdır. Bu şekilde sadece normal durumda değil, acil durumlarda da bu işlem yapılabilecek ve doğru ve çabuk karar alınmasına katkıda bulunacaktır. Hesaplama ağının, simülasyon sonuçlarının en çabuk ve istatistiksel anlamda en gerçekçi şekilde elde edilebilecek anlamda bir dizüstü bilgisayarda dahi koşturulacak şekilde optimize edilmesi ise modelin arazi çalışmaları sırasında bile kullanılıp özellikle de acil durum planlamalarında ve operasyonlarında kullanılmasına olanak verecektir.

Bu projede hazırlanan yüksek çözünürlükteki sonlu elemanlar ağ sisteminin oluşturulması bölgeye ait bundan sonraki modelleme aşamaların daha çabuk ve daha ucuza mal edilmelerini sağlayacak ve bundan sonra böyle çalışmaların devam etmesi için sağlam ve bilimsel bir temel oluşturacaktır. Bu tür çalışmaların Türkiye dahilinde bütün benzer kıyasal sistemlere uygulanmasının hem bilimsel, hem de yönetsel alanlarda sağlayacağı katkı aşikardır. Bu iki alanın birlikte çalışması ve yönetsel kararların bilimsel temellere dayandırılması, efektif ve ekonomik olarak optimize sonuçlar alınması anlamında bir gerekliliktir.

REFERANSLAR

Westerink, J.J., Luettich Jr., R.A., Muccino, J.C., 1994. Modeling tides in the western North Atlantic using unstructured grids. *Tellus* 46A, 178–199.

Foreman, M.G.G., 1983. An analysis of the wave equation model for finite-element tidal computations. *Journal of Computational Physics* 52, 290–312.

Lynch, D.R., Smith, K.W., Blanton, B., Luettich, R., Werner, F., 2004. Forecasting the coastal ocean: resolution, tide and operational data in the South Atlantic Bight. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 21 (7), 1074–1085.

Bilgili, A., Smith, K.W., Lynch, D.R., 2006, BatTri: A two-dimensional bathymetry-based unstructured triangular grid generator for finite element circulation modeling. *Computers Geosciences* 32, 632-642.

E. Cuthill and J. McKee. 1969. Reducing the bandwidth of sparse symmetric matrices. In *Proc. 24th Nat. Conf. ACM*, pp. 157-172.

Luettich Jr., R.A., Westerink, J.J., 1995. Continental shelf scale convergence studies with a barotropic tidal model. In: Lynch, D.R., Davies, A. (Eds.), *Quantitative Skill Assessment for Coastal Ocean Models*. Coastal and Estuarine Studies Series, vol. 48. American Geophysical Union Press, Washington, DC, pp. 349–371.