YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KIYI BOYU KATI MADDE TAŞINIMININ BULANIK MANTIK YÖNTEMİ ile BELİRLENMESİ

Çevre Müh. Hande Asena YUMUK

F.B.E İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Kıyı ve Liman Mühendisliği Programında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. H. Anıl GÜNER (YTÜ)

İSTANBUL, 2011

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ……iv

KISALTMA LİSTESİ……...vi

ŞEKİL LİSTESİ……...viii

ÇİZELGE LİSTESİ…….....x

ÖNSÖZ……..xi

ÖZET……...xii

ABSTRACT……xiii

1. GİRİŞ 1

1.1 Problemin Tanımı 1
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı 1

2. KATI MADDE TAŞINIMI 3

2.1 Giriş 3
2.2 Katı Madde Taşınım Mekanizması 4
2.3 Katı Madde Taşınım Modları 5
2.4 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımı 7
2.4.1 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımının Bağlı Olduğu Faktörler 7
2.4.2 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımının Hesaplanması 10
2.4.2.1 Saha Ölçümleri 11
2.4.2.2 Teorik Yaklaşım 12
2.5 Kıyıya Dik Katı Madde Taşınımı 16
2.6 Katı Madde Bütçesi 17
2.7 Kıyı Sınıflandırması 19
2.7.1 Etkin Kıyılar 19
2.7.2 Orta Etkinlikteki Kıyılar 20
2.7.3 Korunmuş Kıyılar 20
2.7.4 Gel-git Düzlükleri 21
2.7.5 Soluğan Kıyıları 21
2.7.6 Koheziv Kıyılar 22
2.7.7 Mercan Kıyıları 22
2.8 Konu ile İlgili Çalışmalar 24

3. BULANIK MANTIK YÖNTEMİ 39

3.1 Giriş 39
3.2 Bulanık Mantığın Gelişimi 39
3.3 Bulanık Sistem Ne Demektir? 42
3.4 Üyelik Fonksiyonları 45
3.4.1 Üyelik Fonksiyonunun Kısımları 47
3.4.2 Bulanıklaştırma 48

3.5 Kümeler 49
3.5.1 Klasik Kümeler 50
3.5.2 Bulanık Kümeler 51
3.5.3 Bulanık Küme Notasyonu 51
3.6 Bulanık Mantık Yöntemleri 53
3.6.1 Mamdani Bulanık Mantık Yöntemi 53
3.6.2 Takagi–Sugeno Bulanık Mantık Yöntemi 55
3.7 Uyarlanabilir Ağ Yapısına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) 56
3.8 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımının Bulanık Mantıkla Modellenmesi ile İlgili Çalışmalar 59

4. BULANIK MANTIK YÖNTEMİ ile KIYI BOYU KATI MADDE TAŞINIMININ MODELLENMESİ 64

4.1 Bulanık Mantık Modeli Kurulumu 64
4.1.1 Bulanık Mantık Modeli Sonuçları 72
4.2 ANFIS Modeli Kurulumu 79
4.2.1 ANFIS Modeli Sonuçları 83
4.3 Bulanık Mantık Yöntemi Sonuçlarının Değerlendirilmesi ..... ……91

5. KARABURUN KIYI ALANINDA KIYI BOYU KATI MADDE TAŞINIMININ BULANIK MANTIK YÖNTEMİ ile BELİRLENMESİ: ÖRNEK UYGULAMA..97

5.1 Problemin Tanımı……..97
5.2 Saha Çalışmaları 98
5.2.1 Katı Madde Özellikleri 99
5.2.2 Dalga İklimi……99
5.3 Bulanık Mantık Modelinin Karaburun Kıyı Alanına Uygulanması 100
5.4 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınım Modellerinin Değerlendirilmesi 102
5.5 Karaburun Kıyı Sınıfının Belirlenmesi 106

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 108

KAYNAKLAR……..……112

ÖZGEÇMİŞ……115

SİMGE LİSTESİ

$\underline{A}$	Bulanık A kümesi
A_i	İlgili düğüm fonksiyonu ile ilişkili sözel değişken
a_i	Öncül parametre
$\underline{B}$	Bulanık B kümesi
b_i	Öncül parametre
$C(x,z)$	Sörf bölgesindeki katı madde konsantrasyonu dağılımı
c_i	Öncül parametre
C_f	Sürtünme katsayısı
D	Nominal tane çapı
D_{16}	Katı madde tanelerinin % 16'sının geçtiği çap
D_{50}	Medyan tane çapı (Katı madde tanelerinin % 50'sinin geçtiği çap)
D_{50s}	Sürüntü modundaki katı madde tanelerinin % 50'sinin geçtiği çap
D_{84}	Katı madde tanelerinin % 84'ünün geçtiği çap
E	Spektrum (enerji) yoğunluğu
G	Yerçekimi ivmesi
h_b	Kırılma derinliği
H	Dalga yüksekliği
H_b	Kırılma derinliğindeki dalga yüksekliği
H_{m0}	Belirgin spektral dalga yüksekliği
H_{rms}	Potansiyel dalga yüksekliği
$H_{rms,b}$	Kırılan potansiyel dalga yüksekliği
H_s	Belirgin dalga yüksekliği
$H_{s,12}$	12 saat/yılda oluşan belirgin dalga yüksekliği
H_{sb}	Belirgin kırılan dalga yüksekliği
H_0	Derin deniz dalga yüksekliği
I_l	Birim genişlik ve birim zaman için batık ağırlık katı madde debisi
k	Bulanık küme sabiti
K	Boyutsuz katsayı
K'	CERC (USACE, 1984) formülü katsayısı
L_0	Derin deniz dalga boyu
L_{0p}	Pik dalga periyoduna karşılık gelen dalga boyu
m	Kıyı eğimi
m_b	Kırılma derinliğindeki kıyı eğimi
N	ANFIS üçüncü katmandaki düğümler
O_i^1	ANFIS birinci katmandaki çıktı verisi
O_i^4	ANFIS dördüncü katmandaki çıktı verisi
O_i^5	ANFIS beşinci katmandaki çıktı verisi
P_l	Kıyı boyu dalga gücü
p_i, q_i, r_i	ANFIS dördüncü katmandaki çıktı parametreleri
Q	Kıyı boyu katı madde taşınım debisi
Q_h	Hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım debisi
Q_l	Kıyı boyu katı madde taşınım debisi
$Q_ö$	Ölçülen kıyı boyu katı madde taşınım debisi
Q_{net}	Kıyı boyu net katı madde taşınım debisi
$Q_{sağ}$	Sağdan sola taşınan kıyı boyu katı madde debisi
Q_{sol}	Soldan sağa taşınan kıyı boyu katı madde debisi
Q_{top}	Toplam katı madde taşınım debisi
Q_{x1}	Akıntı nedenli kıyı boyu katı madde taşınımı

Q_{x2}	Dalga nedenli kıyı boyu katı madde taşınımı
R	Korelasyon katsayısı
R	Deşarj parametresi
R_c	Kritik su şartlarındaki deşarj parametresi
R^2	Determinasyon katsayısı
S	Kıyı boyu akıntı hızı
$S_{y/x}$	Standart hata
t	Zaman
T	Dalga Periyodu
T_p	Pik dalga periyodu
u_m	Dalganın maksimum yörüngesel hızı
u_{mb}	Kırılan dalgada maksimum yörüngesel hız
ü	Üyelik derecesi
V	Akıntı hızı
$\overline{V_l}$	Ortalama kıyı boyu akıntı hızı
V_a	İzleyici adveksiyon hızı
x	i düğümü ile ilişkili girdi
x,y	Bulanık küme girdilerinin üyelik fonksiyonları
x,y,z	Uzay koordinatları
W	Surf bölgesi genişliği
X	Kıyı boyu konumu
α	Dalga geliş açısı
α_b	Kırılma derinliğindeki dalga açısı
α'	Kıyıdaki katı maddenin porozite oranı
α_0	Derin deniz dalga geliş açısı
γ	Kırılma indeksi
π_Q	Boyutsuz katı madde taşınım parametresi
ρ	Akışkan özgül kütlesi
ρ_s	Katı madde özgül kütlesi
φ	Kıyı boyu akıntı yönü
λ	Rip akımının dalga boyu
η	Rip akımının dalga boyu yüksekliği
μ	Akışkanın viskozitesi
μ_{A_i}	Üyelik fonksiyonu
Π	ANFIS ikinci katmandaki düğümler
ω_i	ANFIS ikinci katmanın çıktısı
$\overline{\omega_1}$	ANFIS üçüncü katmanın çıktısı
Σ	ANFIS beşinci katmandaki düğüm
Φ	Boyutsuz katı madde taşınım fonksiyonu

KISALTMA LİSTESİ

ANFIS	Adaptive Network Based Fuzzy Inference System
ANN	Artificial Neural Network
AW	Ackers-White formülü
B	Bijker formülü
BI	Bailard-Inman formülü
BM	Bulanık Mantık
CHL	Coastal and Hydraulic Laboratory
CERC	Coastal Engineering Research Center
DHI	Danish Hydraulic Institute
DTM	Digital Terrain Model
E	Etkin kıyı
E	East
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EH	Engelund-Hansen formülü
EMS	Elliptic Mild Slope
ENE	East North East
ERDC	Engineer Reserch and Development Center
ESE	East South East
EW	East West
FIS	Fuzzy Inference System
GDO	Gözlenen Değerlerin Ortalaması
HKOK	Hata Karelerinin Ortalamasının Karekökü
K	Korunmuş kıyılar
LITDRIFT	LITtoral Drift
LITPACK	LITtoral Processes and Coastline Kinetics
LSTF	Large scale Sediment Transport Facility
LT-MOD	Longshore Sediment Transport Model
MATLAB	MATrix LABoratuary
N	North
NE	North East
NNE	North North East
NNW	North North West
NS	North South
NW	North West
O	Orta etkinlikteki kıyılar
OBS	Optical Back Scatter
OH	Ortalama Hata
S	South
SE	South East
Sİ	Saçılım İndeksi
SS	Standart Sapma
SPM	Shore Protection Manual
SSE	South South East
SSW	South South West
SW	Spectral Waves
TSK	Tagaki-Suseno-Kank bulanık sistemi
USACE	United States Army Corps of Engineers
VR	Van Rijn formülü

W	Watanabe Formülü
W	West
WB	Walton-Bruno formülü
WNW	West North West
WSW	West South West
YSA	Yapay Sinir Ağları

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Katı madde taşınım hız bileşenleri (Nelson, 2003)……..4
Şekil 2.2 Katı madde taşınım modları (Yang, 1996)..... .6
Şekil 2.3 Belirgin dalga yüksekliğine (H_s) bağlı olarak kıyı boyu katı madde taşınım miktarındaki (Q) değişim (Mangor, 2004)..... 8
Şekil 2.4 H_s = 1.0 m, 3.0 m ve 5.0 m dalga yükseklikleri için kıyı profili boyunca kıyı boyu katı madde taşınımının dağılımı a) D_{50} = 0.2 mm tane çapı için b) D_{50} = 0.5 mm tane çapı için (Mangor, 2004)..... 10
Şekil 2.5 Kıyı profilleri (Schwartz, 2005) 16
Şekil 2.6 Yaklaşım açısı ve dalga büyüklüğünün fonksiyonu olarak kıyısal taşınım (Mangor, 2004)..... 23
Şekil 2.7 Ölçülen katı madde taşınımı (Kamphuis, 1991)..... 26
Şekil 2.8 Hesaplanan ve ölçülen kıyı boyu katı madde taşınımlarının karşılaştırılması (Kamphuis, 1991) 27
Şekil 2.9 Saha verileri ve (2.22) eşitliği ile hesaplanan katı madde taşınımının karşılaştırılması (Kamphuis, 1991)..... 29
Şekil 2.10 Kıyı boyu katı madde taşınımının kıyıya dik dağılımının hesaplanan ve ölçülen değerlerinin üç veri seti için karşılaştırılması (Kamphuis, 1991) 31
Şekil 3.1 Bulanık mantığın bilimsel yöntemler arasındaki yeri (Şen, 2000)..... 43
Şekil 3.2 Klasik sistem (Şen, 1999) 43
Şekil 3.3 Genel bulanık sistem (Şen, 2000)..... 43
Şekil 3.4 TSK Bulanık sistemi (Şen, 2000)..... 45
Şekil 3.5 Klasik kümelerin üyelik fonksiyonları (Toprak, 2002) 46
Şekil 3.6 Bulanık kümelerin üyelik fonksiyonları (Toprak, 2002) 46
Şekil 3.7 Üyelik fonksiyonu kısımları (Şen, 2004)..... 47
Şekil 3.8 Bulanık kümeler a) Normal bulanık küme b) Normal olmayan bulanık küme (Şen, 2004) 48
Şekil 3.9 Bulanık kümeler (a) Dış bükey (b) Dış bükey olmayan (Şen, 2004) 48
Şekil 3.10 Hassaslık (a) Bulanık (b) Klasik (Şen, 1999)..... 49
Şekil 3.11 Hız grafiği (a) Klasik mantık (b) Bulanık mantık (Zadeh, 1965)..... 50
Şekil 3.12 İki bulanık kümenin Venn diyagramı (Şen, 2004) 53
Şekil 3.13 Dilsel değişkenler, sıcaklık (Pedrycz, 1993)..... 53
Şekil 3.14 Dile ait değişkenler "Sıcaklıktaki Değişim" (Pedrycz, 1993)..... 54
Şekil 3.15 a) Üç girdi parametresine sahip Sugeno tipi bulanık model b) Karşılık gelen ANFIS yapısı (Bakhtyar, 2008)..... 59
Şekil 3.16 Çalışma alanının şematik gösterimi (Bakhtyar, 2008)..... 60

Şekil 4.1 BM1 girdilerinin üyelik fonksiyonları a) Belirgin kırılan dalga yüksekliği (H_{sb}) b) Pik dalga periyodu (T_p) c) Taban eğimi (m_b)..... 66

Şekil 4.2 BM2.1 girdilerinin üyelik fonksiyonları a) Belirgin kırılan dalga yüksekliği (H_{sb}) b) Pik dalga periyodu (T_p) c) Taban eğimi (m_b) d) Medyan tane çapı (D_{50}) e) Kırılan dalga açısı (α_b)……..67
Şekil 4.3 BM2.2 girdilerinin üyelik fonksiyonları a) Belirgin kırılan dalga yüksekliği (H_{sb}) b) Pik dalga periyodu (T_p) c) Taban eğimi (m_b) d) Medyan tane çapı (D_{50}) e) Kırılan dalga açısı(α_b)..……69
Şekil 4.4 Bulanık mantık modelleri için sistemin çalışma şemaları a) BM1 Modeli b) BM2.1 modeli c) BM2.2 modeli……...71

Şekil 4.5 Bulanık mantık yöntemiyle hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım debilerinin ölçüm sonuçları ile serpilme diyagramı şeklinde karşılaştırılması

a) BM1 Modeli b) BM2.1 Modeli c) BM2.2 Modeli 73

Şekil 4.6 Modellerden elde edilen kıyı boyu katı madde taşınım verilerinin saha ve laboratuar ölçümleriyle seri şeklinde karşılaştırılması a) BM1 Modeli b) BM2.1 Modeli c) BM2.2 modeli..... 76

Şekil 4.7 ANFIS editör yapısı..... 81

Şekil 4.8 Geliştirilen modelin genel yapısı a) ANFIS1 modeli b) ANFIS2.1 modeli c)ANFIS2.2 modeli..... 82

Şekil 4.9 Model çalışma şeması a) ANFIS1 modeli b) ANFIS2.1 modeli c) ANFIS2.2 modeli 83

Şekil 4.10 ANFIS1 ve ANFIS 2.1 model sonuçlarının ölçüm değerleriyle serpilme diyagramı şeklinde karşılaştırılması a) Eğitme verileri b) Doğrulama verileri... ..84

Şekil 4.11 ANFIS2.2 model sonuçlarının ölçüm değerleriyle serpilme diyagramı şeklinde karşılaştırılması a) Eğitme verileri b) Doğrulama verileri..... 85

Şekil 4.12 ANFIS1 ve ANFIS2.1 model sonuçlarının ölçüm değerleri ile seri şeklinde karşılaştırılması a) Eğitme verileri b) Doğrulama verileri……...…88

Şekil 4.13 ANFIS2.2 modeli sonuçlarının ölçüm değerleri ile seri şeklinde karşılaştırılması a) Eğitme verileri b) Doğrulama verileri……...89

Şekil 5.1 Karaburun mevkii..... 97

Şekil 5.2 Karaburun Balıkçı Barınağı'nın genel görünümü..... 98

Şekil 5.3 Karaburun kıyı alanı (Google Earth, 2010)..... 98

Şekil 5.4 Ocak 2003-Aralık 2006 tarihleri arasında elde edilmiş yıllık açık deniz dalga gülü (Arı, 2009)..... 100

Şekil 5.5 Karaburun kıyı alanını etkileyen dalga yönleri……101

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Kıyı boyu katı madde taşınımının genel sınıflandırması (Yüksel, 2005). 8
Çizelge 2.2 Belirgin dalga yüksekliği (H_s) ve dalga yaklaşım açısının (α_0) fonksiyonu olarak kıyı boyu katı madde taşınım miktarları (Q) (Mangor, 2004)……...10
Çizelge 2.3 Kıyı boyu taşınım formülleri (Larangeiro, 2003). 14
Çizelge 2.4 Dalga yaklaşım açısı ve dalga büyüklüğünün fonksiyonu olarak kıyı sınıflandırması (Mangor, 2004). 24
Çizelge 2.5 Ölçülen ve hesaplanan toplam kıyı boyu katı madde değerlerinin karşılaştırılması (Wang vd., 2002). 33
Çizelge 2.6 Kıyı boyu katı madde taşınım deneylerinin dalga koşulları (Smith vd., 2004) 34
Çizelge 2.7 Ölçülen ve hesaplanan toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının karşılaştırılması (Smith vd., 2004) 35
Çizelge 3.1 Veri setlerinin istatistiksel parametreleri 61
Çizelge 3.2 Ölçüm değerlerine göre CERC, WB ve VR formüllerinden hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım debilerinin istatistikleri 62
Çizelge 3.3 Ölçüm değerlerine göre FIS ve ANFIS modelleriyle tahmin edilen kıyı boyu katı madde taşınım debilerinin hata istatistikleri 62
Çizelge 4.1 Bulanık mantık yönteminde kıyı boyu katı madde taşınımının belirlenmesinde kullanılan parametreler 65
Çizelge 4.2 Model kontrolünde kullanılan Kamphuis (2008) ölçüm verileri 73
Çizelge 4.3 Kıyı boyu katı madde taşınımının Bulanık Mantık ve ANFIS ile modellemesinden elde edilen ortalama hata (OH), hata karelerinin ortalamasının karekökü (HKOK), saçılım indeksi (Sİ), determinasyon katsayısı (R^2) ve korelasyon katsayısı (R) ..... …92
Çizelge 4.4 Kıyı boyu katı madde taşınımının ANFIS ile modellemesinden elde edilen ortalama hata (OH), hata karelerinin ortalamasının karekökü (HKOK), saçılım indeksi (Sİ), determinasyon katsayısı (R^2) ve korelasyon katsayısı (R)…93
Çizelge 5.1 Bulanık mantık yönteminde kullanılan ortalama dalga parametreleri (Arı, 2009)……101
Çizelge 5.2 Bulanık mantık yöntemi ile belirlenen Karaburun saha çalışmasına ait katı madde taşınım debisinin diğer modellerle karşılaştırılması 105
Çizelge 5.3 Kıyı boyu katı madde taşınım miktarı, dalga büyüklüğü ve kıyı boyu katı madde taşınım işleminin gerçekleştiği genişliğin fonksiyonu olarak kıyı sınıflandırması……107

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, kıyısal alanlar için önemli bir konu olan kıyı boyu katı madde taşınım miktarı bulanık mantık yöntemi ile modellenmiştir. Geliştirilen model ile hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım debileri, ölçüm verileri ile karşılaştırılarak modelin tahmin kapasitesi belirlenmiştir. Karaburun bölgesinin kıyı sınıflandırmasının, geliştirilen kıyı boyu katı madde taşınım modeli ile belirlendiği örnek bir uygulama yapılmıştır.

Tez çalışmam süresince bilgileri, tecrübesi ile bana daima destek olan danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. H. Anıl GÜNER'e tüm içtenliğimle teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitimim süresince engin bilgileri ve bizlere verdiği emeklerinden dolayı hocam Sayın Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL'e çok teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitimim boyunca bilgilerini ve desteğini esirgemeyen hocam Sayın Prof. Dr. Esin ÇEVİK'e çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında benimle bilgilerini paylaşan hocam Sayın Arş. Gör. Burak Aydoğan'a desteklerinden dolayı çok teşekkür ederim.

Yaşamım boyunca maddi ve manevi daima yanımda olan aileme, bana vermiş oldukları sonsuz sevgi ve emekten dolayı çok teşekkür ederim.

Ocak, 2011

ÖZET

Kıyı boyu katı madde taşınım miktarının doğru olarak belirlenmesi, kıyı mühendisliği için oldukça önemli bir konudur. Kıyı boyu katı madde taşınımının doğru olarak tahmin edilmesi ile kıyı morfolojisinde meydana gelebilecek değişimler ve kıyı yapılarının kıyı çizgisine etkileri belirlenebilmektedir. Bu amaçla birçok yöntem geliştirilmiştir. Ancak oldukça karmaşık bir kıyısal işlem olan kıyı boyu katı madde taşınımı için yeterli güvenilirlikte sonuçlar elde edilememektedir. Bu sebeple çalışmada katı madde taşınımını yeterince doğru tahmin edecek ve tüm dalga koşullarında uygulanabilecek yeni bir kıyı boyu katı madde taşınım modeli kurulması amaçlanmıştır. Bu modelin geliştirilmesiyle pratik ve hızlı kullanımın yanı sıra saha ve laboratuar ölçüm verileri ile kalibre edilerek birçok deterministik modelde görülen belirsizliklerin en az seviyede içerilmesi hedeflenmiştir.

Bu çalışmada kıyı boyu katı madde taşınımı, bulanık mantık yöntemi ile modellenmiştir. Bu amaçla bulanık çıkarım sistemi (FIS) ve bulanık çıkarım sistemi ile yapay sinir ağlarının birlikte kullanıldığı uyarlanabilir ağ yapısına dayalı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) kullanılarak kıyı boyu katı madde taşınım modelleri geliştirilmiştir. Bulanık mantık yöntemi ile kıyı boyu katı madde taşınımının modellenmesinde Kamphuis'den (2008) elde edilen kıyı boyu katı madde taşınımı ölçüm verilerinden yararlanılmıştır. Modellerden hesaplanan veriler ile Kamphuis (2008) ölçüm verileri karşılaştırılarak modellerin tahmin kapasitesi belirlenmiştir. En uygun yaklaşımın ANFIS yöntemi kullanılarak geliştirilen bulanık mantık modeli olduğu görülmüştür. Bu modelin sonuçları gerek saha gerekse laboratuar ölçüm verileri ile karşılaştırıldığında en küçük HKOK (hata karelerinin ortalamasının karekökü= 0.0058) değerine ve en yüksek korelasyon katsayısına (R= 0.98) sahip olduğu belirlenmiştir.

Çalışmanın son aşamasında, kıyı boyu katı madde taşınımı için geliştirilen bulanık mantık modelleri arasından tahmin kapasitesi en yüksek olan model kullanılarak Karaburun kıyı alanında meydana gelen net ve toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarı belirlenmiştir. Model ile hesaplanan net kıyı boyu katı madde taşınım debisi dikkate alınarak Karaburun bölgesinin kıyı sınıflandırması yapılmıştır. Karaburun bölgesinde meydana gelen kıyı boyu katı madde taşınımının ve kıyı sınıfının belirlenmesi amacıyla Arı (2009) tarafından Karaburun kıyı alanında gerçekleştirilen saha ölçüm verileri kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kıyı boyu katı madde taşınımı, bulanık mantık, bulanık çıkarım sistemi (FIS), uyarlanabilir ağ yapısına dayalı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS), kıyı sınıflandırılması

ABSTRACT

An important task for coastal engineers is to predict the longshore sediment transport rate accurately. With correct estimation of the longshore sediment transport rate, it is possible to predict beach morphology changes and the influence of coastal structures on the coastline. For this purpose lots of determination systems have been suggested until now. However there is still no precise prediction model of longshore sediment transport rate since it is a highly complex littoral process. For this reason it is purposed to develop a new longshore sediment transport model that can give an accurate prediction for longshore sediment transport rate and be used for every wave energy level. By the development of this model, it is aimed to gain a practical and rapid determination of longshore sediment transport rate and include less uncertainities in the model by means of calibration against the field and laboratuary data.

In this study, a fuzzy inference system was developed to estimate the longshore sediment transport rate. For this purpose longshore sediment transport models were developed by using fuzzy inference system (FIS) and adaptive network based fuzzy inference system (ANFIS), the combination of fuzzy inference system and neural networks. The measurement data obtained from Kamphuis (2008) was used during the development of the model. The performance of the models were determined by comparing the predicted values from the models with the measurement data obtained from Kamphuis (2008). It was seen that the model calculated the longshore sediment transport values with best prediction was developed with ANFIS. When the ANFIS model's prediction values were compared with both field and experiment measurement data set, it was found that the ANFIS model gives the lowest RMSE (root mean square error= 0.0058) and the highest R (correlation coefficient= 0.98).

In the last step of the study, net and total longshore sediment transport rates were calculated using the model with the best prediction capacity. The coastal classification of Karaburun zone was predicted by considering the net longshore sediment transport rate which was calculated using the model. For the purpose of estimating the longshore sediment transport rate and the coastal classification, the measurement data obtained from Arı (2009) that were observed in Karaburun coastal zone were used.

Keywords: Longshore sediment transport, fuzzy logic, fuzzy inference system, adaptive network based fuzzy inference system, coastal classification

1. GİRİŞ

1.1 Problemin Tanımı

Kıyı bölgesindeki deniz hareketlerinden kaynaklanan akımlar ve havanın kara ile etkileşimi nedeniyle taban malzemesini oluşturan katı madde taşınabilmektedir. Katı madde taşınımına bağlı olarak, uzun dönemde kıyı bölgesinin erozyonu ve dolması nedeniyle kıyı morfolojisinde bazı değişimler olabilmektedir. Yakın kıyı bölgesinde kıyı boyu kıyı madde taşınımının yeterli hassasiyette tahmin edilmesi, kıyı çizgisi erozyonu ve kıyı gelişiminin belirlenmesi açısından oldukça önemlidir.

Kıyı boyu katı madde taşınımının tespit edilmesi amacıyla çeşitli araştırmacılar tarafından birçok ampirik formül ve fiziksel model yöntemleri sunulmuştur. Doğa olaylarında her zaman var olan belirsizliklerin, kesin yöntemlerle modellemeyi güçleştirmesi nedeniyle genelde varsayımlar ve ihmaller yapılmaktadır. Çözümlerinin kesin olduğu sanılan diferansiyel denklemlerin çözümlerinin asla kesin olmadığı ve kaotik yani belirsiz çözümler içerdiği son 30 yılda anlaşılmıştır. Bu sebeple araştırmacılar daha başka yöntemlerle problemleri yaklaşık olarak modellemeye çalışmışlardır. Yaklaşık sonuç elde etmek için, ya eldeki problem idealleştirilmeli, ya da çok sayıda değişken kullanılmalıdır.

Gitgide mükemmele yakınlaşma isteği ve doğanın belki de bir gün aynısının yapay yollarla ortaya çıkarılmaya çalışılması Yapay Zeka, Yapay Sinir Ağları ve Bulanık Mantığın ortaya çıkarılmasına neden olmuştur. Bu çalışmada kıyı boyu katı madde taşınımının yeterli hassasiyette tahmin edilmesi amacıyla bulanık mantık yöntemi ile bir kıyı boyu katı madde taşınım modeli geliştirilmiştir. Bulanık mantık her gün kullanılan ve insan davranışlarının yorumlandığı yapıya ulaşılmasını sağlayan matematiksel bir disiplindir. Bulanık mantık kuramının insan düşünüş tarzına çok yakın olması en büyük üstünlüğünü oluşturmaktadır. Bulanık mantık yaklaşımı matematiksel modele ihtiyaç duymadığından, matematiksel modeli iyi tanımlanamamış, zamanla değişen ve doğrusal olmayan sistemler başarılı uygulama alanlarıdır (Elmas, 2003; Günal, 1997; Şen, 1999).

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Kıyı boyu katı madde taşınım miktarının belirlenmesi amacıyla birçok deterministik ve analitik yöntem kullanılmaktadır. Ancak veri yetersizliği ve problemin karmaşıklığı nedeniyle kıyı boyu katı madde taşınım mekanizması deterministik ve analitik yöntemlerle yeterli hassasiyette temsil edilememektedir. Bu çalışmada kıyı boyu katı madde taşınım miktarının

en doğru şekilde belirlenmesi amaçlanmış ve bulanık mantık tabanlı bir model geliştirilmesi üzerinde çalışılmıştır. Çözüm yöntemi olarak bulanık çıkarım sistemi (FIS) ve bulanık çıkarım sistemi ile yapay sinir ağları yönteminin birleştirildiği ağ yapısına dayalı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) kullanılmıştır. Kamphuis'in (2008) saha ölçüm verilerinden yararlanılarak geliştirilen modellerin tahmin kapasitelerini belirlemek üzere saha ölçüm verileri ile modellerden hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım değerleri karşılaştırılmıştır. Çalışmanın son aşamasında Karaburun kıyı bölgesinde meydana gelen katı madde taşınımı ve kıyı sınıfının belirlenmesi amacıyla ANFIS yöntemi ile geliştirilen kıyı boyu katı madde taşınım modeli kullanılmıştır.

Bu amaçlarla hazırlanan tezin kapsamını şu bölümler oluşturmaktadır:

Bölüm 1'de kıyı boyu katı madde taşınımının önemi anlatılmış, bu çalışmanın amacı ve izlenecek yollar açıklanmıştır.

Bölüm 2'de katı madde taşınım mekanizması, katı madde bütçesi ve kıyı sınıflandırması anlatılmıştır. Kıyı boyu katı madde taşınımı ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

Bölüm 3'te bulanık mantık yöntemi ayrıntılı olarak anlatılmış ve kıyı boyu katı madde taşınımının bulanık mantık yöntemi ile belirlenmesi hakkında literatür çalışmasına yer verilmiştir.

Bölüm 4'te bulanık mantık yöntemi ile bu çalışmada geliştirilen kıyı boyu katı madde taşınım modeli anlatılmıştır. Modelden hesaplanan veriler ölçüm verileri ile karşılaştırılmış ve modelin tahmin kapasitesi belirlenmiştir.

Bölüm 5'te bu çalışmada geliştirilmiş olan kıyı boyu katı madde taşınım modeli Karaburun Bölgesi'nde uygulanmıştır. Karaburun'da meydana gelen net ve toplam kıyı boyu katı madde taşınımları belirlenmiş ve bölgenin kıyı sınıflandırması yapılmıştır.

Bölüm 6'da yapılan tüm çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

2. KATI MADDE TAŞINIMI

2.1 Giriş

Deniz tabanında katı madde hareketinin başlangıcının bilinmesi deniz yapılarının etrafındaki yerel taban hareketi ve kıyıların şekillenmesinde taban ve askı malzemesi taşınımlarının belirlenebilmesi açısından önemlidir. Kıyıların dalga etkisi ile meydana gelebilecek taşkına karşı korunması ile mevcut kıyı çizgisinin erozyondan korunması için yine deniz tabanındaki katı madde taşınımının bilinmesi gerekmektedir (Yüksel ve Çevik, 2009).

Deniz tabanındaki katı madde taşınımı, taban malzemesi su hareketinden kaynaklanan yeterli büyüklükte kuvvetlere veya kayma gerilmesine maruz kaldığında başlamaktadır. Su hareketinin oluşma nedenleri akıntı, dalganın yörüngesel hızı veya her ikisinin kombinasyonudur. Kıyı çizgisi boyunca veya bir kıyı alanındaki katı madde taşınımı ile ilgili parametreler şunlardır (Mangor, 2004):

- Bölgedeki dalga koşulları ve yakın çevresiyle etkileşimi,
- Akıntı şartları,
- Su seviyesi değişimleri (gel-git, fırtına kabarması, dalga kabarması),
- Batimetri,
- Bölgedeki katı madde özellikleri,
- Katı madde birikimine ve kaybına neden olan kaynaklardır.

Kıyı bölgelerindeki katı madde taşınım miktarlarının doğru tahmin edilmesi kıyı mühendisleri için oldukça önemlidir. Katı madde taşınım miktarlarının doğru tahmin edilmesi kıyıdaki morfolojik değişikliklerin ve kıyı yapılarının kıyı çizgisine etkilerinin belirlenmesini sağlamaktadır. Kıyı boyu katı madde taşınımı dalga, rüzgar, akıntı, gel-git, katı madde ve kıyı bölgesindeki diğer olayların etkileşimi ile meydana gelmektedir. Yakın kıyı bölgesindeki katı madde taşınımı, kıyı gelişimi için önemli olduğundan bu bölgedeki karmaşık işlemlere daha çok dikkat edilmektedir. Yakın kıyı bölgesinde katı madde taşınımını etkileyen birçok parametre olması ve arazi ölçümlerindeki zorluklar nedeniyle bu bölgenin hidrodinamiği ve katı madde taşınımı ile ilgili incelenecek hala birçok olay bulunmaktadır (Bakhtiyar vd., 2008).

Katı madde taşınımı, uzun dönemde kararlı kıyı morfolojisine sahip kıyı alanları haricindeki kıyılarda erozyon veya yığılmaya neden olarak uzun yıllar sürecinde kıyı coğrafyasında bazı değişimlerin oluşmasına sebep olabilmektedir. Dolayısıyla kıyı bölgelerinde yapılan gerek

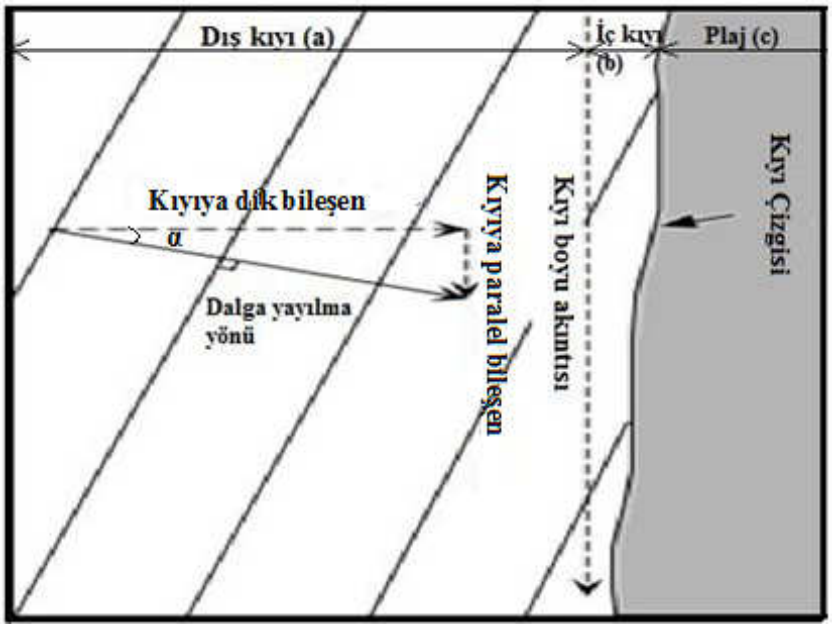
koruma, gerekse özel amaçlı mühendislik uygulamalarında bazen sebep bazen de sonuç bakımından katı madde hareketlerinin incelenmesi oldukça önemlidir.

2.2 Katı Madde Taşınım Mekanizması

Katı madde taşınımının genel hatları ile temel mekanizması maddeler halinde verilmiştir (Yüksel, 2005):

- Dalganın yörüngesel hareketi ile katı taneler hareketlendirilir ve salınımlı bir hareket yaparlar.
- Dalga etkisiyle bir kere hareketlendirilmiş olan katı taneler akıntı doğrultusunda taşınırlar. Bu akıntılar ya dalga hareketlerinin neden olduğu tek doğrultulu akıntılardır ya da gel-git, rüzgar veya yoğunluk farkının neden olduğu akıntılardır.

Bir kıyıya belirli bir açıyla yaklaşan dalga ortamında akıntının kıyıya dik ve paralel iki bileşeni olacaktır (Şekil 2.1). Bu bileşenlere bağlı olarak kıyı bölgesindeki katı madde taşınımı da kıyıya dik doğrultuda ve kıyıya paralel olmaktadır. Kıyıya dik doğrultudaki katı madde taşınımı dalga iklimindeki kısa dönem farklılıklarından kaynaklanan taban profili değişimlerinde (tipik olarak yaz profili, kış profili gibi) etkili olduğu halde kıyı boyu katı madde taşınımı uzun dönemde kıyı bölgelerinde aşınma veya yığılmaya ve bunlara bağlı olarak kıyı çizgisi değişimlerine sebep olabilmektedir.



Şekil 2.1 Katı madde taşınım hız bileşenleri (Nelson, 2003)

Katı madde taşınımını etkileyen mekanizmalar açısından bir kıyı bölgesini üçe ayırmak mümkündür (Şekil 2.1).

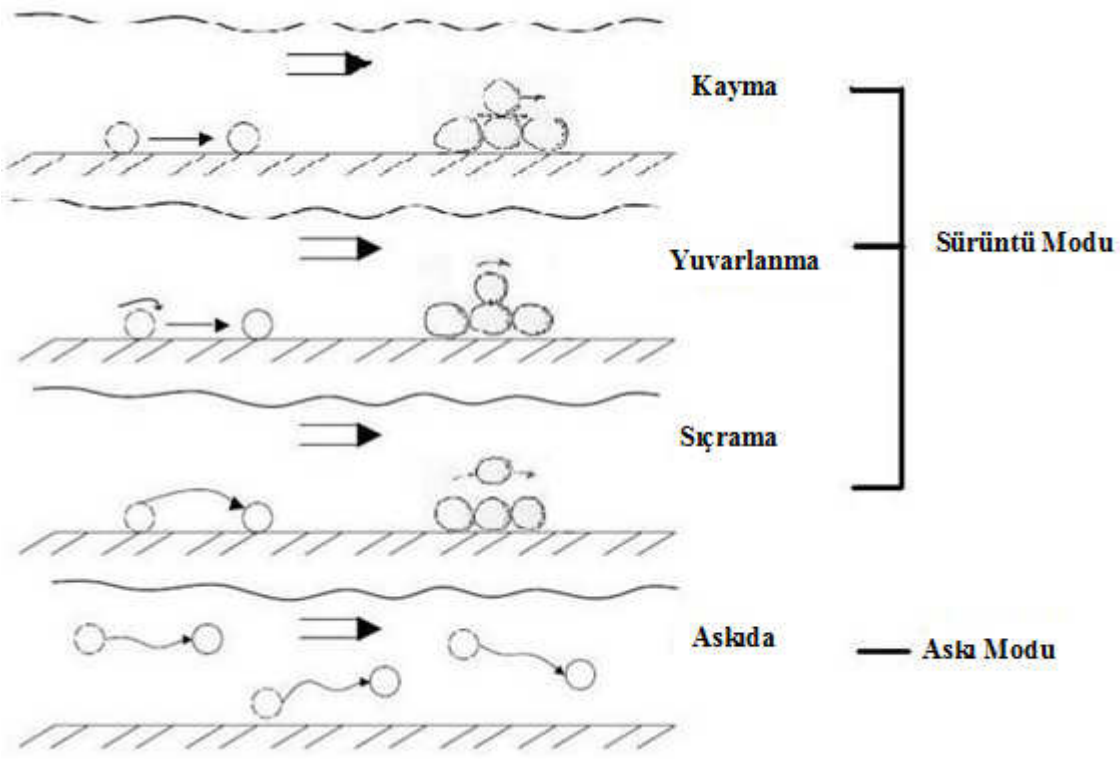
a. Dış Kıyı**:** Dalga hareketinin tabanda hissedildiği yer ile dalganın kırıldığı nokta arasında kalan sürüntü hareketinin daha etkin olduğu bölgedir. Kıyılarda taşınıma maruz kalan katı maddeler çoğunlukla çapı 0.1-1 mm arasında değişen kum sınıfındandır. Sığlaşan dalga durumunda deniz tabanının hissedilmesinden sonra tabanda kritik kayma gerilmesinin aşılmasıyla beraber çift yönlü sürüntü malzemesi hareketi gerçekleşmektedir. Katı madde hareketinin başlangıcı ile birlikte tabanda kum dalgacıkları formasyonunun oluşumu başlamaktadır. Rastgele bir desen içindeki bu taban şekillenmesi ve normal koşullarda kara yönündeki net sürüntü malzemesi taşınım süreci dalga kırılma noktasına kadar dış kıyı boyunca devam etmektedir (Bijker vd., 1976). Dış kıyıdaki katı madde taşınımında başrolü oynayan kütle taşınımını ve dolayısıyla katı madde taşınımını etkileyen faktörler; dalga karakteristikleri, gel-git olayı, rüzgar durumu, rip akıntıları, yoğunluk akımları, kıyı ve deniz yapılarının durumu, biyolojik aktivitenin varlığı, batimetrik düzensizlikler, taban eğimi ve katı madde özellikleri olarak sıralanabilmektedir.
b. İç Kıyı: Dalga kırılma noktası ile kıyı çizgisi arasındaki köpüklenme bölgesidir. Dalga kırılması ile birlikte akıma şiddetli çalkantıların ve hava kabarcıklarının karışması sonucu tüm derinlik üzerinde askı malzemesi konsantrasyonu artmakta (20-2000 ppm) ve sürüntü malzemesi yanında askı malzemesi hareketi de önem kazanmaktadır. Bu bölgede dalgaların kıyıya dik açı dışında bir açı ile yaklaşması durumunda kıyı boyunca oluşan yanal akıntılar bir kısım askı malzemesinin kıyıya paralel olarak taşınmasına sebep olmaktadır. Bu bölgedeki kıyı boyu taşınımına maruz kalan katı malzemeler kıyı bölgelerinde uzun dönemde görülen erozyon ve yığılmanın önemli kaynağını oluşturmaktadırlar. İç kıyıdaki katı madde taşınımı; dalgaların kıyıya geliş açısı, dalga karakteristikleri, taban eğimi ve katı madde özelliklerinden etkilenmektedir. Bazı koşullarda iç kıyıdaki askı maddesinin bir kısmı çökelme fırsatı bulamadan kütle taşınımı ile dış kıyıya doğru sürüklenebilir ve bu gibi durumlarda deniz yönünde net bir askı malzemesi taşınımı oluşabilmektedir.
c. Plaj: Kıyı çizgisi ile dalga tırmanmasının üst sınırı arasında kara ve deniz yönünde sürüntü malzemesi hareketinin etkin olduğu kısım ile bunun devamında yer alan rüzgar erozyonuna ve diğer etkilere açık taneli malzemeden oluşan kıyının kara üzerindeki bölümüdür (Kırkgöz, 2002).

2.3 Katı Madde Taşınım Modları

Akıntı ve dalga etkisinde akışkan partiküllerinin hızı hareketi başlatacak hızın oldukça üzerine çıktığında tabanla temas halinde hareketini sürdüren taneler askı haline geçerler ve akışkan

partikülleri ile aynı hızda hareket etmeye başlarlar. Bu durumda askı halinde bulunan malzeme miktarı sürüntü malzemesinden daha fazla olduğundan askı malzemesi miktarı toplam katı maddenin önemli bir miktarını oluşturmaktadır (Yüksel, 2005).

Akıntı ve dalgadan kaynaklanan akım, hareketin başlangıç koşullarını aştığında kum sürüntü hareketi modunda hareket eder. Taşınımın bu modu yuvarlanma, kayma ve sıçrama halinde tabanla temasta olacak şekilde meydana gelmektedir. Her ne kadar birçok sürüntü ifadesi tanenin sıçrama modunu esas alacak biçimde geliştirilmişse de, deniz tabanında kumun bu tip hareketi mevcut değildir. Ancak rüzgar etkisinde kumun hareketi bu modda olabilmektedir (Yüksel, 2005). Katı madde taşınım modları Şekil 2.2'de görülmektedir.



Şekil 2.2 Katı madde taşınım modları (Yang, 1996)

Askıdaki katı madde konsantrasyonunun, deniz tabanından yüzeye çıktıkça azaldığı tespit edilmiştir (Kraus vd., 1988, 1989). Daha yüksek konsantrasyonlar kırılma ve çalkantı bölgesinde bulunmaktadır. Yansıma olayının hakim olduğu kıyılarda tanelerin askıda kalma durumları, dalga periyoduna bağlıdır. Yansımanın olmadığı, enerjinin yakın kıyıda sönümlendiği kumsallarda uzun periyotlu dalgalar, katı maddenin askı moduna geçmesine neden olmaktadır. Böyle kıyılarda uzun periyotlu dalgalar sebebiyle oluşan askıdaki katı madde konsantrasyonunun, kısa periyotlu dalgaların oluşturduklarından 3-4 kat daha fazla olduğu ölçülmüştür (Beach ve Sternberg, 1987).

2.4 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımı

Kıyı profili boyunca dalga ilerlemesi, dalga kabarmasına ve kıyı boyu akıntıların oluşumuna neden olmaktadır. Bu hidrodinamik şartlar veya işlemler sonucunda profildeki katı madde hareket etmekte ve taşınmaktadır. Bu duruma kıyı boyu taşınım işlemi denmektedir (Mangor, 2004).

Farklı deniz yapılarının etkisindeki kıyı çizgisi gelişiminde kıyı boyu katı madde taşınımı önemli bir yer almaktadır. Kıyı mühendisliği açısından da oldukça önemli olduğu için üstünde birçok çalışma yapılmış ve farklı şekillerde tanımlanmaya çalışılmıştır.

Kıyı boyu katı madde taşınımı genel bir sınıflandırmayla özet olarak Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Kıyı boyu taşınım, koheziv olmayan katı maddelerin taşınımı için kullanılan bir terimdir. Genelde kıyı çizgisinin doğrusal ve batimetri çizgilerinin birbirine paralel olduğu kabul edilerek ifade edilmektedir.

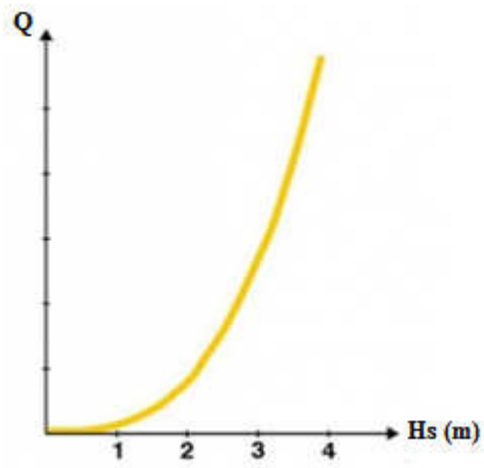
Dalgalar kıyıya belirli bir açıyla yaklaştıklarında, kıyıya yakın kısımları sapma etkisiyle kıyıya paralel olma eğilimindedir. Aynı zamanda kırılma bölgesine yaklaşırken sığlaşma etkisiyle dikleşirler ve yükseklikleri artar. En sonunda kırılırlar. Kırılma işlemi boyunca deniz tabanındaki katı maddeler türbülans etkisiyle askı moduna geçerler. Askı moduna geçen katı maddeler ve sürüntü modundaki katı maddelerin bir bölümü, kırılma çizgisi yakınında en yüksek seviyede olan kıyı boyu akıntısı sebebiyle kıyı çizgisi boyunca taşınmaktadırlar. Kıyı boyu katı madde taşınımı, askı ve sürüntü modundaki taşınımların toplamıdır (Mangor, 2004).

2.4.1 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımının Bağlı Olduğu Faktörler

Kıyı boyu taşınım miktarının (Q) bağlı olduğu en önemli faktör kıyıya ulaşan dalgalardır. Daha yüksek dalgalar kıyıdan daha açıkta kırılarak surf bölgesini genişletmekte ve daha fazla katı maddenin harekete geçmesini sağlamaktadırlar. Dalga periyodu (T) ve dalga yüksekliğinde (H) meydana gelen değişiklikler katı maddenin kıyıdan açığa veya kıyıya doğru taşınmasına sebep olmaktadır. Kırılan dalganın doğrultusuyla kıyı çizgisi arasındaki açı, surf bölgesindeki su hareketinin kıyı boyu bileşenini ve genellikle de kıyı boyu katı madde taşınım yönünü belirlemektedir. Bu nedenle belli bir kıyı alanındaki kıyı boyu katı madde taşınım işleminin anlaşılabilmesi için o alanın dalga iklimi hakkında yeterli bilgiye sahip olmak gerekmektedir (USACE, 1984). Şekil 2.3'te belirgin dalga yüksekliğine (H_s) bağlı olarak kıyı boyu katı madde taşınım miktarındaki (Q) değişim görülmektedir. Dalga yüksekliği arttıkça, kıyı boyu katı madde taşınım miktarı da artmaktadır.

Çizelge 2.1 Kıyı boyu katı madde taşınımının genel sınıflandırması (Yüksel, 2005)

Model	Sınıflandırma
CERC (USACE, 1984)	Enerji modeli
Davies ve Kamphius (1985)	Enerji modeli, tane boyutu ve kıyı eğimini içerir
Sayao, Nairn ve Kamphuis (1985)	Enerji modeli, tane boyutu ve kıyı eğimini içerir
Bijker (1971)	Akıntıyla sürüntü ve askı malzemesi konsantrasyonunu esas alır. Hareketin başlangıç kriteri yoktur.
Engelund-Hansen (Swart, 1976)	Akıntıyla sürüntü ve askı malzemesi konsantrasyonunu esas alır. Hareketin başlangıç kriteri yoktur.
Fleming (1977)	Akıntıyla sürüntü ve askı malzemesi konsantrasyonunu esas alır. Hareketin başlangıç kriteri vardır.
Ackers-White (Van der Graaf ve Van Overeem, 1979)	Hareketin başlangıç kriteri vardır.
Ackers-White (Fleming ve Swart, 1982)	Dalga ve akıntı şartlarının geniş bir aralığından türetilen harekete başlangıç kriteri vardır.
Nielsen (1979, 1985)	Akıntıyla sürüntü ve askı malzemesi konsantrasyonunu esas alır. Hareketin başlangıç kriteri vardır.
Kamphuis (1991)	Kıyı eğimi, taban malzemesi özelliklerini dikkate alır.



Şekil 2.3 Belirgin dalga yüksekliğine (H_s) bağlı olarak kıyı boyu katı madde taşınım miktarındaki (Q) değişim (Mangor, 2004)

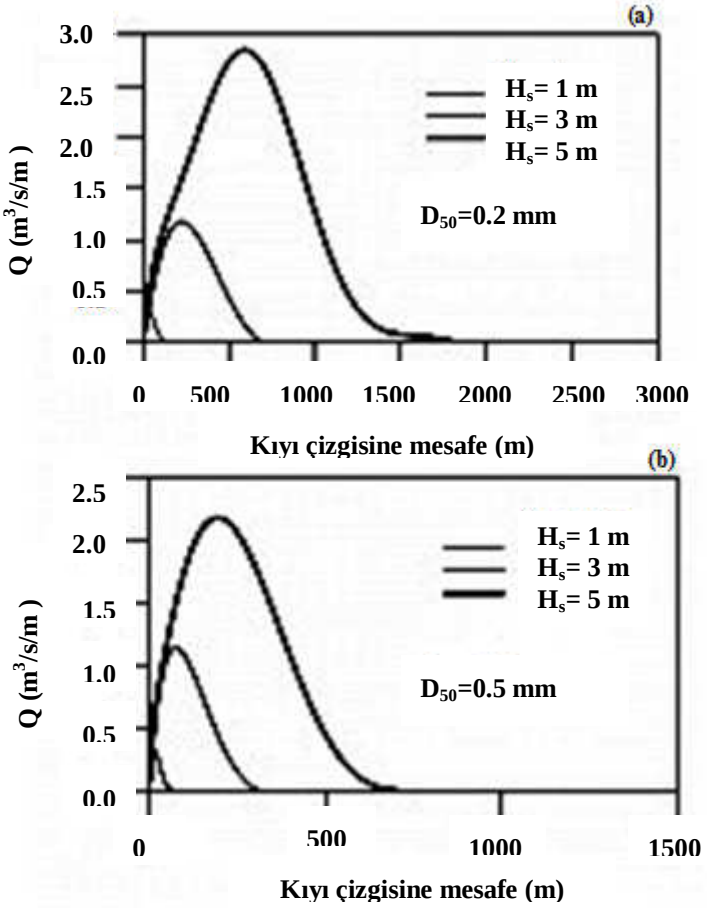
Kıyı boyu katı madde taşınımının bağlı olduğu faktörlerden bir diğeri de medyan tane çapıdır (D_{50}). Mangor (2004) çalışmasında, kıyı boyu katı madde taşınımını iki farklı tane boyutunu (D_{50} = 0.2 mm ve D_{50} = 0.5 mm) ele alarak incelemiştir. Bu çalışmadan tane boyutu ile kıyı boyu katı madde taşınımı arasında ters orantı olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 2.4'te görüldüğü

gibi kıyı boyu katı madde taşınımının tane boyutu ile değişimi, üç farklı dalga yüksekliği (H_s=1.0 m, 3.0 m ve 5.0 m) mevcudiyetinde incelenmiştir. Buradan dalga yüksekliği ile taşınım arasında doğru orantı olduğu bir kez daha görülmektedir.

Kıyı boyu katı madde taşınım miktarı, dalga geliş açısının da bir fonksiyonudur. Dalga geliş açısının etkisi Mangor'un (2004) çalışmasında açıkça görülmektedir. Kıyı boyu katı madde taşınım miktarı, dalga ve akıntı etkisinde koheziv olmayan katı madde taşınımını modellemek için Danimarka Hidrolik Enstitüsü (DHI, 2008b) tarafından geliştirilmiş bir yazılım olan LITPACK ile belirlenmiştir. LITPACK yakın kıyı bölgesindeki kıyısal işlemleri modellemeye yarayan sayısal bir yazılım sistemidir. LITPACK ile kıyısal katı madde taşınımı ve kıyı çizgisi gelişimi modellenebilmektedir. Birçok kıyı mühendisliği uygulamasında LITPACK yazılımından yararlanılmaktadır. Karmaşık kıyısal işlemlerin kısa sürede modellenebildiği LITPACK yazılımı ile kıyısal işlemleri belirlemek için kullanılmakta olan ampirik formüllerden daha hassas sonuçlar elde edilebilmektedir.

Mangor (2004) çalışmasında LITDRIFT modülünü kullanmıştır. LITDRIFT modülü ile düzenli ve düzensiz dalga koşulları için dalga yüksekliğinin kıyıya dik dağılımı, kabarma olayı ve kıyı boyu akıntısı benzeştirilebilmektedir.

Mangor (2004), dalga yüksekliği ve dalga yaklaşım açısının kıyı boyu katı madde taşınım miktarı üzerindeki etkisini gözlemlemek adına beş farklı dalga yüksekliğinde ve altı farklı dalga yaklaşım açısı değerlerini kullanarak LITPACK modeli ile hesaplamalar yapmıştır (Çizelge 2.2). Çizelge 2.2'den de görüldüğü gibi dalga yüksekliği arttıkça kıyı boyu katı madde taşınım miktarı artmaktadır. Dalga geliş açısı arttıkça kıyı boyu katı madde taşınım miktarı da artmakta ve $\alpha_0 = 45^0$'de pik değere ulaşmaktadır. $45^{0'}$den 0^0'ye ve 90^0'ye doğru gidildiğinde kıyı boyu katı madde taşınım miktarında azalma olduğu görülmektedir.



Şekil 2.4 H_s = 1.0 m, 3.0 m ve 5.0 m dalga yükseklikleri için kıyı profili boyunca kıyı boyu katı madde taşınımının dağılımı a) D_{50} = 0.2 mm tane çapı için b) D_{50} = 0.5 mm tane çapı için (Mangor, 2004)

Çizelge 2.2 Belirgin dalga yüksekliği (H_s) ve dalga yaklaşım açısının (α_0) fonksiyonu olarak kıyı boyu katı madde taşınım miktarları (Q) (Mangor, 2004)

Q [m^3/24 sa]		**α_0[^{0}]**					
		5	**15**	**30**	**45**	**60**	**75**
H_s[m]	**1.0**	50	100	300	350	300	150
	2.0	400	1000	2000	3000	2500	1000
	3.0	1500	4000	10000	15000	10000	5000
	4.0	4000	10000	30000	40000	35000	15000
	5.0	8000	25000	65000	100000	85000	35000

2.4.2 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımının Hesaplanması

Kumsal kıyıların morfolojik gelişiminin belirlenmesi, mühendislik ve kıyı yönetimi uygulamaları için kıyı boyu katı madde taşınım miktarı tahminlerine ihtiyaç duyulmaktadır

(Bayram vd., 2007). Kıyı boyu katı madde taşınım miktarı genellikle saha ölçümlerinden veya fiziksel modellerden elde edilen ampirik ifadelerden bulunmaktadır. Ancak bu formüllerin türetilmesi ve uygulanması dört zorluğu içermektedir. Bu zorluklar yakın kıyı bölgesindeki çevresel şartların değişiklik göstermesi, temel fiziksel işlemlerin karmaşıklığı, formüllerin kalibrasyonunda kullanılan verilerdeki hatalar ve sınırlı sayıdaki saha verileridir (Larangeiro ve Oliveira, 2003).

2.4.2.1 Saha Ölçümleri

Kıyı boyu taşınım miktarının sahada ölçümü için üç deneysel yöntem bulunmaktadır. Deneysel ölçüm yöntemleri olarak (1) izleme yöntemi, (2) askı modunda taşınan kum hacminin doğrudan ölçümü ve (3) katı madde kapanları kullanılmaktadır. İzleme yönteminde doğal kıyı kumu florasan boya veya düşük radyoaktiviteye sahip bir maddeyle kaplanarak işaretlenmektedir. Bu işleme tabii tutulan kumlar sörf bölgesine bırakılmakta ve bu tanelerin kıyı boyunca kat ettikleri mesafe gözlenmektedir. Kumun yatay hareketinin hızı, tanenin aldığı yatay mesafenin kat etme süresine bölünmesiyle bulunmaktadır. Bu süre genellikle birkaç saat olduğundan, izleme yöntemi uzun dönemli net taşınım miktarının veya yönünün tespiti için tercih edilen bir yöntem değildir. Katı madde taşınım miktarını tespit etmek üzere Komar ve Inman (1970), Knoth ve Numeddal (1977), Duane ve James (1980), Inman vd. (1980), Kraus vd. (1982), White (1987) ve daha birçok araştırmacı izleme yöntemini kullanmışlardır (USACE, 2008).

Askı modundaki katı madde taşınımını belirlemek için sörf bölgesinden pompayla askı malzemesini içeren su çekilmektedir. Bu yöntemle büyük miktarlarda numune alınabilmesi nedeniyle, numunelerde ölçülen katı madde konsantrasyonunun sörf bölgesinde bulunan katı madde konsantrasyonunu güvenilir bir şekilde temsil ettiği ifade edilmektedir. Çekilen sudaki katı madde miktarı ile kıyı boyu akıntı hızının anlık ölçümleri birleştirildiğinde, askı modundaki kıyı boyu katı madde taşınım miktarı belirlenmektedir. Dalga hareketlerinin anlık değişimi nedeniyle oluşan ani konsantrasyon değişimlerinin ölçülememesi ve bu işlem nedeniyle su ve katı madde hareketlerinin doğal dengesinin bozulabilmesi, bu yöntemin dezavantajlarıdır (USACE, 2008).

Bir diğer saha ölçüm yöntemi ise kum kapanlarıdır. Sürüntü modundaki katı madde taşınımı, tabana yerleştirilen katı madde kapanlarıyla belirlenmektedir. Askı modundaki katı madde taşınımını belirlemek için ise dikey olarak dizilmiş, katı maddeyi tutmasına karşın su akışına engel olmayan kapanlar kullanılmaktadır. Sörf bölgesi boyunca herhangi bir noktaya yerleştirilen kapanlarda biriken katı madde miktarı ölçülmekte ve askıdaki katı maddenin

düşey dağılımı belirlenmektedir.

Saha ölçümlerinin belki de en büyük dezavantajı fırtına nedenli taşınımın tam anlamıyla ölçülememesidir. Bilindiği kadarıyla, belirgin bir fırtına süresince izleme yöntemi veya kum kapanları ile yapılmış başarılı bir çalışma bulunmamaktadır. Kum kapanı ve izleme çalışmalarının çoğu çalkantı ve surf bölgelerinde uygulanmaktadır. Katı madde taşınımının büyük bir kısmının surf bölgesinin hemen önünde olduğu gözlenmiştir. Toplam kıyı boyu katı madde hacminin doğrudan arazi ölçümüyle belirlenmesi için çok az yöntem vardır. Kum hareketi ve birikim sisteminin tümü asla tam olarak bilinememektedir. Ayrıca kıyı boyu taşınımı sistemi ve hangi olayların kıyı boyu taşınım kapsamına girdiği tam olarak tanımlanamamıştır. Deneylerde yıllık kum taşınım hacmini bulmak adına surf bölgesindeki kum hacminin birkaç dakika, saat ya da gün için tanımlanması belirsizliğe sebep olmaktadır (Pilkey ve Cooper, 2002).

2.4.2.2 Teorik Yaklaşım

Kıyı boyu katı madde taşınımının belirlenmesinde kullanılan ampirik formüller dört yönteme dayanmaktadır. Bunlar; enerji akısı yöntemi, akım gücü yöntemi, boyut analizi yöntemi ve kuvvet dengesi yöntemidir (Reeve vd., 2004). Kıyı boyu taşınımının hesaplanmasında sıklıkla kullanılan ifadeler Çizelge 2.3'te özetlenmiştir.

Kıyı boyu taşınım hesaplarında yaygın olarak kullanılan enerji akısı yönteminde batık ağırlık katı madde kıyı boyu taşınım debisi (I_l), kıyı boyu dalga gücünün kıyı uzunluğuna oranı (P_l) ile ilişkili olarak verilmektedir. Çizelge 2.3'te verilen eşitliklerden (2.1), (2.2) ve (2.3) eşitlikleri enerji akısı yöntemi ile elde edilmiş ifadelerdir. (2.1) eşitliği bu yöntemde en yaygın olarak kullanılan CERC (USACE, 1984) ifadesidir. CERC ifadesinin düzensiz dalgalar için kullanılması halinde, formülde kullanılacak dalga yüksekliği (H_s veya H_{rms}) K' katsayısı ile kalibre edilmelidir. K' katsayısı için yaygın olarak kullanılan iki değer bulunmaktadır. Bunlardan ilki Komar ve Inman (1970)'in dalganın (rms) kırılma yüksekliği için önerdikleri 0.77 değeridir. Valle vd. (1993) ise K değerinin artan katı madde tane çapı (D_{50}) ile azaldığını tespit etmiş ve K değeri için (2.2) ifadesini üretmişlerdir.

Akım gücü yöntemi Bagnold (1963) tarafından üretilmiş ve Bailard (1981) tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem katı madde taşınımının fiziksel yorumuna dayanmaktadır. Yani dalganın salınımlı hareketinden kaynaklanan taban kayma gerilmeleri katı madde tanelerinin askı haline geçmelerine neden olmaktadır. Askı haline geçen taneler herhangi bir ek kayma gerilmesine gerek duymadan akıntı ile birlikte akım doğrultusunda taşınmaktadırlar

(Larangeiro ve Oliveira, 2003). (2.2) eşitliğinden (2.13) eşitliğine kadar olan ifadeler akım gücü yöntemi ile elde edilmiş denklemlerdir.

Boyut analizi yönteminde öncelikle laboratuar deneyleri yapılmakta ve ölçülen çevresel parametreler hacimsel taşınım miktarları ile ilişkilendirilmektedir. Bu yöntemle elde edilen ifadeler, enerjiye dayanan ifadelere benziyor olsa da fiziksel prensiplerden değil boyutsuz değişkenler arasındaki matematiksel ilişkilerden elde edilmişlerdir. (2.13) ve (2.14) eşitlikleri boyut analizi yöntemiyle elde edilmiş denklemlerdir.

Komar ve Inman (1970), (2.1) eşitliğinin ampirik olduğunu ve Bagnold (1963) tarafından geliştirilen modeldeki katı madde taşınım mekanizmasının fiziksel olarak daha gerçekçi bir ilişki verdiğini belirtmişlerdir. Bu sebeple araştırmacılar, boyutsuz K' katsayısı aracılığı ile batık ağırlık katı madde debisinin (I_l), dalga ve akıntı parametreleriyle ilişkilendirildiği (2.4) eşitliğini önermişlerdir. Kraus vd. (1982) kum izleme yöntemiyle yaptıkları saha çalışmalarından elde ettikleri verileri kullanarak (2.6) ve (2.7) lineer eşitliklerini sunmuşlardır.

Araştırmacılar bu ifadeleri (2.5) eşitline uyarlamış ve kıyı boyu katı madde taşınım debisinin hesaplanması için dalga ve akıntı parametrelerinin birlikte kullanıldığı (2.8) eşitliğini geliştirmişlerdir. Kraus vd. (1988), geliştirdikleri (2.9) eşitliğinden elde edilen katı madde taşınım değerlerinin, kum kapanı yöntemi kullanılarak elde edilen saha verileri ile iyi bir korelasyonda olduğunu ifade etmişlerdir. I_l ve (2.9) eşitliği arasında lineer bir bağıntı olduğu varsayan araştırmacılar bu bağıntıdan (2.10) eşitliğini elde etmişlerdir. Walton (1980) tarafından sunulan (2.12) eşitliği, Longuet-Higgins tarafından geliştirilen akıntı hızı dağılımının kullanıldığı (2.11) eşitliğini içermektedir (Larangeiro ve Oliveira, 2003).

Boyut analizi yönteminde Kamphius (1986), kapsamlı saha ve laboratuar verileri kullanarak yaptığı boyut analizi sonucunda (2.13) ampirik eşitliğini elde etmiştir. Bu eşitlikte taban eğimi ve tane çapı etkisi dikkate alınmıştır. Kamphius (1991) (2.13) eşitliğini, daha detaylı laboratuar çalışması ve boyut analizi yaparak geliştirmiş ve dalga periyodu etkisini de içeren (2.14) eşitliğini sunmuştur (Larangeiro ve Oliveira, 2003). Kuvvet dengesi yöntemi ile yapılan ilk çalışmalardan biri Bijker (1971) tarafından sunulmuştur. Araştırmacı sörf bölgesinin hidrodinamik modeli ile kayma gerilmesine dayanan katı madde taşınım denklemini beraber kullanmış ancak analitik bir formül elde edememiştir.

Çizelge 2.3 Kıyı boyu taşınım formülleri (Larangeiro, 2003).

Kaynak	Matematiksel ifade	Denklem numarası
Komar ve Inman (1970)	$K=0.77$ $Q_l = \frac{KP_{lb}}{\left[(\rho_s-\rho)g\alpha'\right]} = \frac{K}{\left[16\gamma^{1/2}(\rho_s-\rho)\alpha'\right]\rho g^{1/2}H_b^{1/2}\sin(2\alpha_b)}$	2.1
Valle vd. (1993)	$K = 1.4e^{(-2.5D_{50})}$ $Q_l = \frac{K}{\left[16\gamma^{1/2}(\rho_s-\rho)\alpha'\right]\rho g^{1/2}H_b^{1/2}\sin(2\alpha_b)}$	2.2 2.3
Komar ve Inman (1970)	$K'=0.28$ $I_l = K'(EC_g)_b\cos\alpha_b \overline{V} / u_m$	2.4
Kraus vd. (1982)	$Q_l = V_a h_b W$ $b = 0.027H_b$ $V_a = 0.014\overline{V_l}$ $Q_l = 3.8x10^{-4}/(\gamma i)H_b^2\overline{V_l}$	2.5 2.6 2.7 2.8
Kraus vd. (1988)	$R = \overline{V_l}\, WH_b$ $I_l = 2.7(R-R_c);\ R_c = 0.39 m^3/s$	2.9 2.10
Walton (1980)	$\left(\frac{V}{V_0}\right)_{LH} = 0.2\left(\frac{X}{W}\right) - 0.714\left(\frac{X}{W}\right)\ln\left(\frac{X}{W}\right)$ $P_l = \frac{\rho g H_b WVC_f}{\left[\left(\frac{5\pi}{2}\right)\left(\frac{V}{V_0}\right)_{LH}\right]}$	2.11 2.12
Kamphuis vd. (1986)	$Q_l = \frac{1.28}{\left[(\rho_s-\rho)g\alpha'\right]H_b^{7/2}m_b D_{50}^{-1}\sin(2\alpha_b)}$	2.13
Kamphuis (1991)	$Q_l = 2.27H_{sb}^2T_p m_b^{0.75}D_{50}^{-0.25}\sin^{0.6}(2\alpha_b)$	2.14

burada; Q_l = Kıyı boyu katı madde taşınım debisi, ρ_s= Katı madde özgül kütlesi, ρ= Suyun özgül kütlesi, g = Yerçekimi ivmesi, γ= Kırılma indeksi, H_b = Kırılan dalga yüksekliği, α_b= Kırılan dalga açısı, $(EC_g)_b$ = Kırılma çizgisindeki enerji akısı, $\overline{V_l}$ = Ortalama kıyı boyu akıntı hızı, α'=Kıyıdaki katı maddenin porozite oranı (1 porozite), u_m = Dalganın maksimum yörüngesel hızı, u_{mb} = Kırılan dalgada maksimum yörüngesel hız, P_l= Kıyı boyu dalga gücü, P_{lb} = Kırılma bölgesindeki dalga enerji akısı, I_l = Birim genişlik ve birim zaman için batık ağırlık katı madde debisi, V_a = İzleyici adveksiyon hızı, h_b = Kırılma derinliği, W =Surf bölgesi genişliği, m_b= Deniz tabanı eğimi, $(V / V_0)_{LH}$ = Longuet-Higgins akıntı hızı dağılımı, X = Akıntı hızının ölçüm noktasının kıyı çizgisinden itibaren mesafesi, R= deşarj parametresi, R_c = Kritik su şartlarındaki deşarj parametresi, V = X mesafesinde ölçülen akıntı hızı, C_f = Sürtünme katsayısıdır.

Damgaard ve Soulsby (1996) kuvvet dengesi yöntemini, iri çakıllar için sürüntü modundaki toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarını belirlemek için kullanmışlardır. Soulsby (1994) tarafından geliştirilmiş olan dalga-akıntı kombinasyonu için sürüntü modu katı madde taşınım formülünden yararlanarak yeni bir formül geliştirmişlerdir. Bu formül, kayma gerilmesi vektörünün ortalama ve salınımlı olmak üzere iki bileşene ayrılması ilkesine dayanmaktadır. Hacimsel katı madde taşınım miktarının kıyıya dik integre edilmesiyle toplam kıyı boyu taşınım miktarı (Q_l) elde edilmektedir. Damgaard ve Soulsby (1996) bu

integrasyonu yapmak ve analitik bir ifade üretmek yerine işlemi basitleştiren bazı kabuller yapmışlardır. Bu kabuller uniform kıyı koşulları, sığ su dalgaları, sabit kırılma indeksi, sörf bölgesinde sapma olmaması ve radyasyon gerilme gradyanının taban kayma gerilmesi ile dengede olmasıdır. Sonuç olarak akıntı nedenli taşınım (Q_{x1}) ve dalga nedenli taşınımın (Q_{x2}) kombinasyonu olarak kıyı boyu katı madde taşınım miktarı (Q_l) için (2.15) eşitliği elde edilmiştir.

$$Q_1 = \sin\{\theta_b\}\max\{|Q_{x1}|, |Q_{x2}|\} \quad (2.15)$$

Damgaard ve Soulsby (1996) tarafından geliştirilen formülle elde edilen taşınım miktarlarının, kıyı profili verilerinden hesaplanan değerlerden 12 kat fazla olduğu ifade edilmektedir. (2.15) eşitliğinden elde edilen sonuçlar 12'ye bölündüklerinde, kaba taneli kıyılardaki sürüntü modundaki katı madde taşınım debisi için güvenilir sonuçlar elde edilmektedir (Reeve vd., 2004).

Belirli bir sürede kıyıya dalgaların farklı açılarla yaklaşması, katı madde taşınım yönünde günlük ve mevsimsel değişiklere sebep olmaktadır. Böyle bir kıyı bölgesinde kıyı boyu taşınım yılın belirli bir bölümünde sağa (açık deniz yönüne bakıldığında) ve diğer bölümünde sola doğru olabilmektedir. Sağ ve sol taşınımlar sırayla $Q_{sağ}$ ve Q_{sol} olarak tanımlanıp, $Q_{sağ}$'ın pozitif, Q_{sol}'un negatif değerde olduğu kabul edilirse net katı madde taşınımı (2.16) eşitliği ile sunulmaktadır (USACE, 2008):

$$Q_{net} = Q_{sağ} + Q_{sol} \quad (2.16)$$

Bu ifade ile net kıyı boyu katı madde taşınım debisi $Q_{sağ} > Q_{sol}$ olduğu takdirde sağa doğru ve pozitif, $Q_{sağ} < |Q_{sol}|$ olduğu takdirde ise sola doğru ve negatif değerde olmaktadır. Net taşınım miktarı yıllık, sıfır ile milyon metre küp değerleri arasında olabilmektedir.

Göz önüne alınan kıyıda, kıyı boyu katı madde hareketine katılan katı maddenin miktarı toplam kıyı boyu katı madde taşınımı olarak adlandırılmaktadır. Toplam kıyı boyu katı madde taşınımı, taşınım yönlerini hesaba katmadan taşınım miktarlarının toplanmasıyla bulunmaktadır:

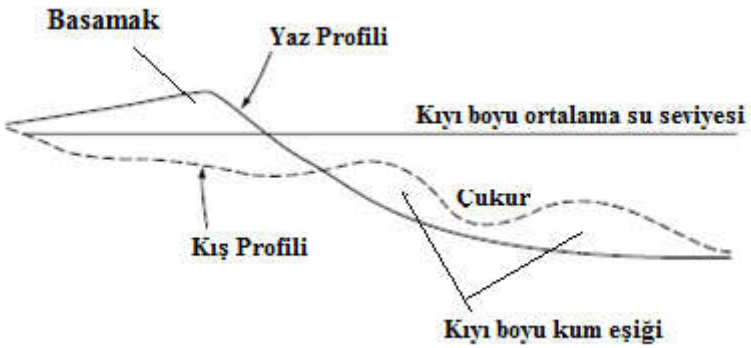
$$Q_{top} = Q_{sağ} + |Q_{sol}| \quad (2.17)$$

Bir kıyı bölgesinde net taşınımın sıfır olabilmesine karşın toplam katı madde taşınımı çok büyük değerlerde olabilmektedir. Toplam katı madde taşınımının büyüklüğü o kıyıdaki deniz tabanının hareketliliğini karakterize etmektedir, çünkü Q_{net} sıfır olsa bile Q_{top}'ın büyük olması

o kıyıda kıyı yapıları açısından şiddetli bir katı madde hareketinin söz konusu olduğunu göstermektedir (Yüksel, 2005).

2.5 Kıyıya Dik Katı Madde Taşınımı

Kıyıya dik katı madde taşınımı gel-git, rüzgar, dalga ve bunların oluşturduğu kıyıya dik akıntılar sebebiyle katı maddenin kıyıya dik doğrultuda taşınmasıdır. Kıyı boyu katı madde taşınımının aksine incelenmesi daha kolay olan kıyıya dik katı madde taşınımı, kıyı erozyonuna sebebiyet vermesinden dolayı önemli bir kıyısal işlemdir. Kıyı alanlarında her gel-git döngüsünde küçük miktarlarda oluşan kıyıya dik katı madde taşınımı, birkaç gün sürebilen büyük fırtınalarda çok daha büyük miktarlarda meydana gelmektedir. Daha küçük dalgaların gelmesi durumunda, erozyona uğramış kıyılar yenilenmeye başlar. Yenilenme işlemi haftalar veya aylar gibi daha uzun bir zaman diliminde olmaktadır. Kış aylarında daha şiddetli olan fırtına ve dalga şartları, yaz aylarında azalan dalga yüksekliği gibi mevsimsel şartlar, kıyı boyu katı madde taşınım miktarında mevsimsel farklılıklara neden olmaktadır (Seymour, 2005). Bu durum kıyı profilleriyle açıklanmaktadır (Şekil 2.5). Zaman içinde değişken özelliğe sahip kıyı batimetrisinin belli dalga ve akıntı koşullarında sahip olduğu şekile kıyı profili denilmektedir (Yüksel, 2005).



Şekil 2.5 Kıyı profilleri (Schwartz, 2005)

Yaz ayları haricinde oluşan yüksek ve dik fırtına dalgaları, kıyıdan açığa katı madde taşınımına sebep olmaktadır. Kıyıdan açığa katı madde taşınımı, kıyı bölgesini aşındırmakta ve dalga kırılma bölgesinde kıyı boyu kum eşiği oluşturmaktadır. Bu eşikler, dalgaların daha açıkta kırılmalarını sağlayarak kıyıyı şiddetli dalga etkilerine karşı korurlar. Aynı zamanda açığa doğru olan şiddetli katı madde kayıplarını önlerler. Yaz aylarında ise dalgaların yüksekliği ve diklikleri azalır. Kum kıyıya doğru taşınır ve kıyı yenilenir. Kıyıya doğru katı madde taşınımı nedeniyle kum eşiklerinin yükseklikleri azalır ve tırmanmadan dolayı yeni bir

basamak oluşur. Uzun dönemde kıyıdan açığa taşınan katı madde miktarının, kıyıya doğru taşınan katı madde miktarından fazla olması durumunda erozyon meydana gelmektedir.

2.6 Katı Madde Bütçesi

Katı madde bütçesi tahminleri, doğal oluşumların (Gel-git'le oluşan doğal ağızlar,..vb.) civarında oluşabilecek kıyı erozyonu derecesini ve önemini belirlemek ve insanların doğaya müdahalesi nedeniyle (dalgakıran ve barajların inşaatı,..vb.) oluşabilecek muhtemel etkilerin değerlendirilmesi için önemlidir (Van Rijn, 1998).

Bir kıyı profili için kıyı boyu taşınım bütçesi, dalga yükseklikleri ve dalga yönlerinin mümkün olan tüm kombinasyonları ile gel-git ve fırtına kabarmasının kıyı boyu katı madde taşınıma neden olduğu katkıların toplamıdır (Mangor, 2004). Belirlenmiş bir kontrol hacimde kum miktarını arttıran ve azaltan her işleme sırasıyla kaynaklar ve kayıplar denmektedir. Genelde kaynaklar pozitif, kayıplar negatif olarak tanımlanmaktadır. Nokta kaynaklar ve kayıplar, kontrol hacimde sınırlı miktarda kum kaybına veya kazancına neden olan kaynak veya kayıplardır ve yıllık hacim olarak ölçülmektedir. Gel-git olayları nedeniyle kum kaybının gerçekleştiği bir koy, kum kaybının olduğu nokta olarak tanımlanabilmektedir. Çizgi kaynak veya kayıp bölgeleri ise kontrol hacim sınırları içinde bir kesit boyunca kum kaybına veya kazancına neden olan kaynak veya kayıplardır. Düşük bariyerli bir adada, rüzgar sebebiyle kıyıdan karaya doğru kum taşınımı, kıyı alanı için çizgisel bir kayıptır. Çizgi kaynaklar ve kayıplar genel olarak kıyı çizgisinin birim uzunluğu için yıllık hacim cinsinden hesaplanmaktadır (USACE, 1984).

Van Rijn (1988) muhtemel katı madde kayıp ve kaynaklarını aşağıdaki gibi ifade etmiştir:

Muhtemel katı madde kaynakları :

- Akarsular; akarsu drenaj havzası doğasına, bitki yoğunluğuna, iklime (yağış), katı madde tipine (çamur, silt, kum), baraj olmasına veya kum çıkarımı olmasına (denize giren katı madde kaynağındaki azalma) bağlıdır.
- Akıntılar; yoğunluk veya gel-git akımları kıyı alanına alüvyal katı madde taşıyabilmektedirler.
- Eşik erozyonu/yamaç erozyonu; dalganın akıntı ile kombinasyonu fırtına sırasında kıyı çizgisinin oldukça geri çekilmesine neden olabilmektedir (10 m/olay). Dalga eşiklerin veya yamaçların altını oymaktadır. İngiltere'deki Holderness Kıyısı (2 m/yıl) ve Hollanda'nın kuzey kıyısı (uzun dönem miktarı ile 2 ile 3 m/yıl arasında değişmektedir) bu erozyona örnek oluşturmaktadırlar. Gel-gitle oluşan doğal ağızlara yakın olan kıyı

alanları (kuyu gibi davranmaktadırlar) özellikle önemlidir; eğer yamaçlar kil ve siltten oluşuyorsa, kıyı alanına katkısı minimum olacaktır çünkü katı maddenin çoğu derin sulara taşınacak veya komşu havzanın içinde tutulacaktır. Erozyon hacmini tahmin edebilmek için aşınan tabakaların boyu ve uzunluğu, yamaç malzemesinin kum yüzdesinin bilinmesi gerekmektedir.

- Açık deniz kıta sahanlık alanı (yerel kum basamakları); kıyıya doğru taşınım işlemleri kıta sahanlığından kıyı alanına doğru kum taşıyabilmektedir. Osborne vd. (1991) ABD'nin doğu kıyısı boyunca kıta sahanlığı ve kıyıya yakın kumların tanecik şekillerini analiz etmişler ve kumun büyük kısmının (%30-%40) kıta sahanlığından ön kıyıya doğru dalga hareketi ile taşındığını görmüşlerdir.
- Kıyı yenilemesi; sahilde veya kıyı yüzeyinde kumun pompalanarak suni depolanması ve erozyona tampon yaratmak ve böylece kıyı çizgisinin daha fazla geri çekilmesinin engellenmesi amacıyla komşu açık deniz alanlarından, göl ve karasal alanlardan kumun taranması.
- Biyolojik depolama; tropikal alanlarda biyolojik üretimin katkısı (deniz mercan kabukları)
- Hidrolojik depolama; deniz suyunda doğrudan çökelme nedeniyle maddenin oluşumu (kalsiyum-karbonat tanecikleri).
- Rüzgarla taşınan kum; esen rüzgar genelde sahilde katı madde kaybına neden olmaktadır, bu malzemenin asıl kısmı eşik alanında depolanmaktadır. Sahilden azalan bu kumun miktarı kumul alanında gözlenen hacim değişikliğinden tahmin edilebilmektedir.

Muhtemel katı madde kayıpları:

- Koy, göl ve iç denizlerde kumun tutulması; gel-git, rüzgar ve yoğunlukla oluşan net sirkülasyonlar kıyı alanında kayba neden olmaktadır.
- Kum çıkarımı; ticari amaçlar için kumun sahil ve kıyı yüzey alanından çıkarılması sadece yığılma alanlarında mümkündür.
- Derin açık deniz alanlarında/çukur alanlarda ve deniz altı alanlarda kumun tutulması; özellikle küçük tanecikler askı halinde bölgeden taşınabilmektedirler, genellikle kanyonlar derin sulara sahip açık denizlerde yer almaktadırlar fakat bazı durumlarda kanyonun başlangıç kısmı sahil alanının yakınında sığ suda bulunabilmektedir ve kıyı boyu taşınımı engellemektedir. Katı madde bazen yoğunluk akımı etkisinde derin sulara taşınmaktadır. Bir kanyon bazen koya kadar uzanır ve kumu akarsulardan açıkta tutar.
- Rüzgarla kıyıdan kumullarla taşınan kum.

- Çözünme ve aşınma; kıyı boyu eğimi, aşınma ve ayırıcı taşınım işlemleri sebebiyle katı madde kaybı olabilmektedir. Katı maddelerin dereceli aşınımı kayba sebep olabilmektedir çünkü küçük tanecikler askı maddesi olarak alandan taşınabilmektedirler, rölatif olarak kısa mesafelerde (10 km) aşınım sadece kaba malzemeler için belirgindir. Deniz ve mercan gibi kabuğu gibi katı maddeler aşınım ve çözünmeye karşı daha dayanıksız olmaktadırlar.

Kaynak ve kayıpların yanında depo ve yığılmalar da belirlenmelidir. Depolar, kıyı sisteminde taşınan veya hareketsiz olan kum/çakıl eşik veya basamaklar olabilmektedir. Belirli bir zaman için katı madde taneleri burada depolanabilmektedirler fakat tekrar taşınım işleminde yer almak için hareketlenmektedirler (Van Rijn, 1998).

Seçilen kontrol hacminde net olarak toplanan veya çıkarılan katı maddeler, kaynak veya kayıplardır. Katı madde kaynağı ile kaybının eşit olduğu durumlarda, kontrol hacmindeki katı madde miktarında bir değişim meydana gelmemektedir. Korunmasız bir kıyı çizgisinde yıllık brüt kıyı boyu katı madde taşınım hacmi 750000 metreküp olabilmektedir. Yapılaşmanın olmadığı bir kıyı alanında böyle büyük bir brüt debi meydana gelebilmesine karşın kıyı çizgisinde değişim olmadığı gözlenebilmektedir (USACE 1984).

2.7 Kıyı Sınıflandırması

Kıyı bölgelerinin jeolojik yapısından meydana gelen kıyısal işlemler, farklı tiplerde kıyı profillerinin ve kıyı çizgilerinin oluşmasına neden olmaktadır.

Kıyı profili genel olarak dalga koşulları, gel-git ve fırtına kabarması ve bölgedeki katı madde türüne bağlı olarak değişim göstermektedir. Kıyı çizgisi de yukarıda belirtilen koşullarla birlikte dalga ikliminin yönsel karakteristiklerine, kıyı alanındaki farklı türde katı madde kaynaklarına, jeolojik ve biyolojik faktörlere bağlıdır.

Gerçek kıyı profilleri genelde teorik denge profiline uymaktadır. Ancak kum eşiği oluşumları, taban malzemesindeki değişiklikler ve gel-git gibi akıntıların etkisiyle denge profilinden sapmalar görülmektedir. Mangor (2004) bu etkileri göz önünde bulundurarak kıyı tiplerini şu şekilde sınıflandırmıştır:

2.7.1 Etkin Kıyılar

Etkin kıyılar genellikle geniş kumsal alanlarla karakterize edilmektedirler. Birden fazla (bu sayı üçe kadar çıkabilir) kum eşiklerine sahiptirler.

Kıyı alanının jeolojisi kum taşı gibi yarı sert malzemeden oluşmakta ise, bu malzeme kıyı

profilinde belli bir mesafeye kadar açığa taşınabilmektedirler. Böylelikle erozyona uğrayan kıyının yapısı falez formunu alır. Bu gibi durumlarda kıyılar, "etkin falez kıyılar" olarak, kumulların hakim olduğu durumlarda ise "etkin kumul kıyılar" olarak karakterize edilmektedir.

Etkin tip kıyılar genellikle 100 km veya daha büyük denizel alanların etkisindedirler. Kıyı alanındaki etkili dalga iklimi $H_{s,12}$ (12 saat/yılda oluşan belirgin dalga yüksekliği) değerinin 3m'den fazla olabileceğini göstermektedir. Kıyı alanında gel-git etkileri az ile orta derece arasında, fırtına kabarması orta ile etkin derece arasındadır. Rüzgar hızı, dalga yükseklikleri ve fırtına kabarması arasında genelde doğru orantı vardır. Yıllık katı madde taşınımı 50,000 m^3'den 1,000,000 m^3'e hatta daha yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Katı madde taşınımının gerçekleştiği genişlik tipik olarak 300 m ile 1 km arasındadır.

Bu tip kıyılar yüksek taşınım değerlerine sahip olmaları nedeniyle büyük dikkatle yönetilmelerini gerektirmektedir.

2.7.2 Orta Etkinlikteki Kıyılar

Bu tip kıyılar daha dar kumsallara sahiptirler. Kıyı profili tek bir eşiğe sahiptir. Kıyı, küçük kumul ve kayalıklardan oluşmaktadır. 10 km'den 100 km'ye kadar olan denizel alanların etkisindedirler. $H_{s,12}$ değerinin 1 ile 3 m arasında olduğu dalga iklimine sahiptirler. Düşük ve orta etkinlikteki gel-git etkisi altındadırlar. Yıllık toplam katı madde taşınımı 10,000 ile 50,000 m^3 arasındadır. Taşınım işleminin gerçekleştiği genişlik 50 ile 300 m arasındadır.

2.7.3 Korunmuş Kıyılar

Dar kumsallara sahiptirler veya kumsalları olmayabilir. Bu tip kıyılarda eşik bulunmaz. Genelde bitki örtüsüyle kaplıdırlar. 10 km'den küçük nehir ağzı ve lagünler gibi küçük denizel alanların etkisindedirler. Ancak aşağıdaki koşullardan bir veya daha fazlasının gerçekleşmesi durumunda daha büyük denizel alanların etkisinde olabilmektedirler:

a) Rüzgar ve dalga ikliminin ılımlı olması
b) Yakın kıyı bölgesinin çok sığ olması sebebiyle kıyının sert dalga koşullarından korunması
c) Karaya doğru esen kuvvetli rüzgarların su seviyesini düşürmesi

Bu tip kıyılar düşük ve orta etkinlikteki gel-git rejimleri ve kuvvetli fırtına kabarması şartları altında oluşabilmektedir. Yıllık katı madde taşınımı 5000 m^3'ten azdır. Korunmuş kıyılarda erozyon olmaz ancak taşkın olayına maruz kalabilirler.

2.7.4 Gel-git Düzlükleri

Bu tip kıyılar çok geniş ve küçük eğime sahiptirler. Gel-git etkilerinin rüzgar etkilerinde göre daha baskın olduğu durumlarda oluşurlar. Gel-git düzlüklerinin genişlikleri ve karakteri, bölgedeki fırtına kabarması koşullarına, jeolojik ve morfolojik özelliklere bağlıdır. Kıyı seviyesinin düşük olduğu, fırtına kabarması ve gel-git etkilerinin yüksek olduğu durumlarda taşkın görülebilir. Kıyı seviyesinin yüksek olduğu durumlarda ise plaj gerisi kumlu ve kıyı çizgisinin gerisi kayalıktır.

Gel-git düzlükleri genelde tropik olmayan iklim şartlarında, orta etkinlikteki kıyılar ile korunmuş kıyılarda oluşmaktadır. Tropik iklim şartlarında gel-git düzlükleri bitkilenmekte bu durum da gel-git düzlüklerinin yapısının değişmesine neden olmaktadır.

Nehir ağzı gibi korunaklı bölgelerde gel-git düzlükleri ince taneli kum ve çamurdan, daha etkin bölgelerde ise kumdan meydana gelmektedir.

Gel-git düzlüklerindeki katı madde taşınımı üzerinde hem dalgalar hem de gel-git nedeniyle oluşan akıntıların etkili olması, bu bölgelerde katı madde taşınımını karmaşık bir işlem haline getirmektedir. Bu işlemin karmaşık olmasının bir diğer sebebi ise hem koheziv hem de koheziv olmayan katı maddelerin taşınım işlemine dahil olmasıdır. Bu bölgelerde kıyıya dik katı madde taşınımının yanı sıra kıyı boyu katı madde taşınımı da etkili olmaktadır.

Bu tip kıyılardan genellikle kıyı yenileme amacıyla yararlanılmaktadır. Kumsal yapıda olmamalarından dolayı turistik alanlar olarak değerlendirilememekle birlikte önemli doğal alanlardır. Gel-git düzlüklerinde kıyı erozyonu bir problem oluşturmamaktadır. Ancak bu bölgelerde taşkın olabilmektedir.

2.7.5 Soluğan Kıyıları

Göreceli olarak küçük dalgaların etkisi altındadırlar. H_s değeri 1 ile 2 m arasındadır, ekstrem durumlarda 3 m'ye ulaşılabilmektedir. Bu durum 3-4 m su derinliğine kadar etkin katı madde taşınımına neden olmaktadır. Bu derinliğin ötesinde ise taşınım nerdeyse olmamaktadır. Bu tip kıyılar, yüksek miktarda katı madde kaynaklarının bulunduğu kıyılarda oluşmaktadır.

Yeterli miktarda katı madde kaynağı ve sabit dalga iklimi mevcudiyetinde katı maddeler belirgin şekilde sınıflanmaktadırlar. Bu sebeple dar ve kumlu bir plaj oluşur. Plaj genişliği 2-300 m arasındadır.

Kumsal iyi sınıflanmış orta büyüklükteki malzemeden oluşabilmektedir. Kumsaldan denize doğru gidildikçe taban malzemesi aniden silt veya çamura dönüşebilir. Bu durumda kıyı

profilinin eğimi çok daha yumuşak olmaktadır. Açık deniz tabanında bulunan büyük taneli katı madde, sadece soluğan periyodunun kuvvetli olduğu dönemde askı moduna geçmekte ve taşınmaktadırlar.

Soluğan kıyıları, sakin dalga dönemlerinde kıyı yenileme çalışmaları için kullanılmaktadırlar. Kıyıda katı madde kaynağının bulunmaması durumunda soluğan kıyılarda erozyon meydana gelmektedir. Bu tip kıyılarda meydana gelen diğer problemler limanlardaki katı madde yığılması ve nehir ağızlarının kapanmasıdır.

2.7.6 Koheziv Kıyılar

Koheziv kıyılar genelde mangrov tipi bitki örtüsüyle kaplı çamur tabana sahiptirler. Bu tip kıyılar gel-git etkisindedir. Koheziv kıyılar, nehirler tarafından yeterli miktarda katı madde kaynağı sağlanan tropik iklimlerde gözlenmektedir. Bu tip kıyıların maruz kaldığı dalga ikliminin şiddeti düşük ile orta arasındadır.

Genelde bu tip kıyılarda taşkın ihtimaline karşı kıyı duvarı inşa edilmektedir. Koheziv kıyılardaki mangrov bitki örtüsü, kıyı profilinin stabilitesini sağladığı için bu profil oluşumu üzerindeki etkisi büyüktür.

2.7.7 Mercan Kıyıları

Mercan kıyılar tropik iklimin hakim olduğu, temiz, berrak, besin maddesinden yoksun ve askıda katı maddenin bulunmadığı denizlerde oluşmaktadırlar. Mercanların yetişmesi ve tutunması için deniz tabanının sağlam olması gerekmektedir. Mercanlar, yapısında karbonat bulunan sert bir iskelet yapısı oluştururlar. Bu iskelet yapısının devamlı büyümesi, eski iskeletler üzerinde mercan resiflerinin oluşmasına neden olur.

Mercan kıyılar, mercan kırıntıları ve mercan kumları üreterek başlangıçta kum bulunmayan kıyıları kumsallara dönüştürmektedirler. Mercan ürünleri sayesinde kumsala dönüşen kıyılara karbonat kıyılar denmektedir.

Mercan kıyılar tropik iklimin hakim olduğu kayalık bölgelerde görülmektedir. Katı madde taşıyan nehirlerin bulunduğu veya kurak iklimin hakim olduğu bölgelerde görülmemektedir.

Gelen dalgalar, mercan resifleri sayesinde kıyıdan açıkta kırıldıkları için bu tip kıyılar şiddetli dalga etkilerine maruz kalmazlar. Bu da kıyı alanının dar olmasına ve kumsal tabanının resiflerle kaplı olmasına neden olmaktadır.

Kıyılar dalga yaklaşım açısına bağlı olarak beş sınıfa ayrılmaktadır.

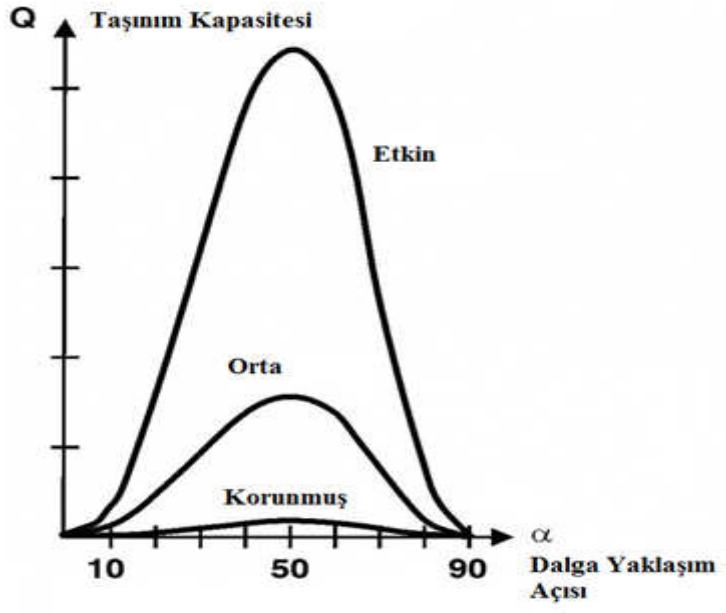
1. Dalganın dik yaklaşması durumu, yaklaşım açısı sıfıra yakındır.
2. Dalganın hemen hemen dik yaklaşması durumu, yaklaşım açısı 1^0-10^0 arasında, net taşınım az ile orta miktardadır.
3. Dalganın orta açıda yaklaşması durumu, yaklaşım açısı 10^0-50^0 arasında, net taşınım miktarı fazladır.
4. Dalganın büyük açıyla yaklaşması durumu, dalga yaklaşım açısı 50^0-85^0 arasında, net taşınım miktarı fazladır.
5. Dalganın kıyıya paralel yaklaşması durumu, dalga yaklaşım açısı 85^0'den büyük, net taşınım miktarı hemen hemen sıfırdır.

Kıyı sınıflandırmasının dalga büyüklüğüne bağlı olarak bir alt sınıflandırması (Şekil 2.6) aşağıdaki gibidir:

1. K (Korunmuş), $H_{s,12} < 1$ m
2. O (Orta Etkinlikte), 1 m < $H_{s,12}$ < 3 m
3. E (Etkin), $H_{s,12} > 3$ m

burada $H_{s,12}$; 12saat/yılda oluşan belirgin dalga yüksekliğini ifade etmektedir.

Kıyı alanlarının karakterize edilmesi sadece yukarıda ifade edilen kurallarla sağlanamaz. Mevsimsel değişikler gibi belirleyici parametreler de dikkate alınmalıdır.



Şekil 2.6 Yaklaşım açısı ve dalga büyüklüğünün fonksiyonu olarak kıyısal taşınım (Mangor, 2004)

Çizelge 2.4'te değişik kıyı sınıflandırmalarının karakteristikleri görülmektedir.

2.8 Konu ile İlgili Çalışmalar

Günümüze kadar kıyı boyu katı madde taşınımı ile ilgili çeşitli araştırmacıların çalışmaları mevcuttur. Bölüm 2.4'te kıyı boyu katı madde taşınım miktarının tespit edilmesi için yaygın olarak kullanılan yöntemler özet olarak anlatılmıştır. Bu yöntemler, kıyı boyu katı madde taşınımı ile ilgili fikir edinmemizi sağlıyor olsa da, sonuçlarının doğruluğu çeşitli araştırmacılar tarafından halen tartışılmaktadır.

Çizelge 2.4 Dalga yaklaşım açısı ve dalga büyüklüğünün fonksiyonu olarak kıyı sınıflandırması (Mangor, 2004)

Kıyı Tipi	Yaklaşım Açısı (0^0 = Kıyı normali)	Etkinlik	Kıyı karakteristikleri
1 K	0^0	Korunmuş	Bitkilenmiş
1 O		Orta	Dar stabil kum plaj, bariyer adaları, kum muskaları
1 E		Etkin	Geniş stabil kum plaj, bariyer adaları, kum dilleri
2 K	1^0-10^0	Korunmuş	Bitkilenmiş
2 O		Orta	Dar stabil kum plaj, bariyer adaları, kum dilleri
2 E		Etkin	Geniş stabil kum plaj, bariyer adaları, kum dilleri
3 K	10^0-50^0	Korunmuş	Bitkilenmiş
3 O		Orta	Dar stabil olmayan kum/çakıl plaj, falez veya kumullar
3 E		Etkin	Geniş stabil olmayan kum/çakıl plaj, falez veya kumullar
4 K	50^0-85^0	Korunmuş	Bitkilenmiş
4 O		Orta	Dar stabil olmayan kum/çakıl plaj, falez veya kum muskaları,
4 E		Etkin	Geniş stabil olmayan kum/çakıl plaj, falez veya kum muskaları
5 K	85^0-90^0	Korunmuş	Bitkilenmiş
5 O		Orta	Kumsal plaj, kum birikimleri, kum muskaları
5 E		Etkin	Kumsal plaj, kum birikimleri, kum muskaları

Kamphuis (1991) yapmış olduğu çalışmada düzenli ve düzensiz dalga etkisinde gerçekleştirilen üç boyutlu fiziksel modelleme ile kıyı boyu katı madde taşınım miktarını

incelemiştir. Derin su dalga koşulları, surf bölgesi boyunca dalga yükseklikleri, dalga kırılma açıları, kıyı boyu hız dağılımı, sürüntü ve askı modundaki katı madde taşınım miktarını eş zamanlı ölçmüştür. Katı madde taşınım miktarının dalga dikliğine, kıyı eğimine, ortalama tane çapına ve kırılma açısına bağlı olduğunu ifade etmiştir. Deney düzeneği 23.4 m uzunluğunda, 10 m genişliğindedir. 1:10 eğimdeki beton taban üzerindeki kum kalınlığı 100 mm'dir.

Deneylerini 7 saatlik sürelerle gerçekleştirmiştir. Her testi bir saatlik dilimlere ayırarak her bir saatlik dilimde dalga yükseklikleri, dalga açıları, kıyı boyu akıntı miktarı, katı madde taşınım miktarı ve dağılımı ile kıyı profili parametrelerini ölçmüştür. Dalga kırılma açılarını 8 ayrı testte video kamera ile 3.5 dakikalık kayıtlar alarak ölçmüştür. Tırmanma ve surf bölgelerinde, sürüntü ve askı modunda taşınan katı madde miktarlarını ölçmek amacıyla aşağı kıyı bölgesine katı madde kapanı yerleştirmiştir. Katı madde dağılımını, kıyı profili denge durumuna ulaştıktan sonra belirlemiştir. Dalga verilerini derin suda 10 Hz'lik ölçme hızıyla ve kırılma bölgesi boyunca 15 noktada ölçüm yaparak elde etmiştir. Örnek alma süresi yaklaşık 3.5 dakikadır. H_s ve H_{rms} değerlerini sıfırı kesme yöntemiyle belirlemiştir.

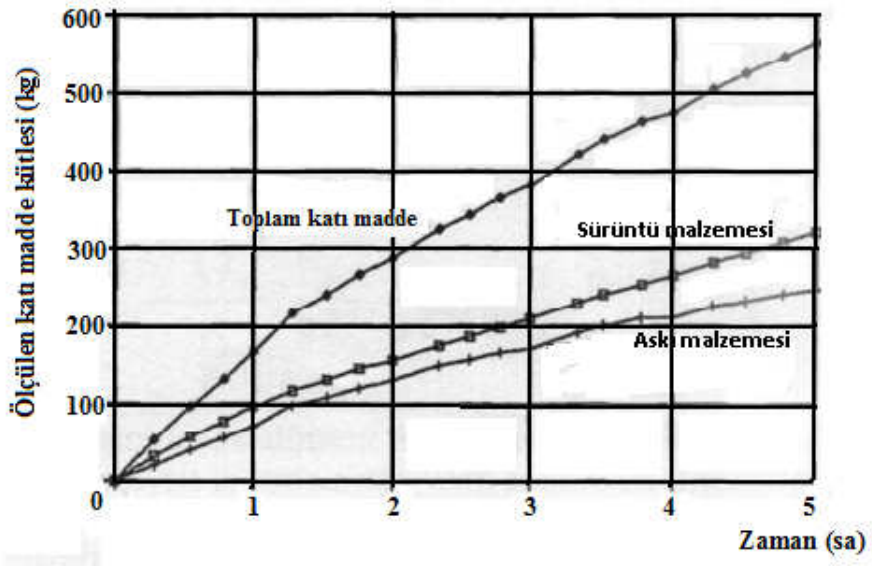
Araştırmacı sürüntü modu, askı modu ve toplam katı madde batık ağırlıklarını her 15 dakikada bir zamanın fonksiyonu olarak kaydetmiştir (Şekil 2.7). Deneyin her bir saatlik bölümünün sonunda, ölçülen katı madde kütlesi ile zaman arasındaki eğrinin eğimini hesaplayarak katı madde taşınım debisini kg/s cinsinden tespit etmiştir. Araştırmacı katı madde taşınım miktarının en yüksek değerini deneyin en başında, yani kıyı profili denge durumuna ulaşmadan ölçtüğünü belirtmiştir. Deney başladıktan yaklaşık 3 saat sonra Şekil 2.7'deki çizginin eğiminin azaldığını gözlemleyerek kıyı profilinin dengeye ulaştığını ve katı madde taşınım miktarının sabitlendiğini tespit etmiştir. Kıyı profilinin denge durumuna ulaşmasının ardından katı madde kapanlarını boşaltmıştır. 3-4 saatlik bir süreç sonunda kapanlarında biriken katı madde miktarını ölçmüştür.

Araştırmacı kıyı boyu katı madde taşınım miktarını aşağıdaki parametrelerin fonksiyonu olarak vermiştir. Bunlar dalga, akışkan, katı madde ve kıyı profili parametrelerinden oluşmaktadır.

$$Q= f (H, T, \alpha, d, \rho, \mu, g, x, y, z, t, \rho_s, D, m) \quad (2.18)$$

burada; Q kıyı boyu katı madde taşınım miktarı, H dalga yüksekliği, T dalga periyodu, α dalga geliş açısı, d su derinliği, ρ akışkanın özgül kütlesi, μ akışkanın viskozitesi, g yerçekimi ivmesi, x, y, z, uzay koordinatları, t zaman, ρ_s katı maddenin özgül kütlesi, D nominal tane

çapı, m kıyı eğimidir.



Şekil 2.7 Ölçülen Katı Madde Taşınımı (Kamphuis, 1991)

Kamphuis (1991) boyut analizi sonucunda aşağıdaki ifadeyi elde etmiştir.

$$\pi_Q = \Phi\left(\frac{H}{gT^2}, \alpha, \frac{H}{d}, \frac{H\left(\frac{H}{T}\right)}{\frac{\mu}{\rho}}, \frac{x}{gT^2}, \frac{y}{gT^2}, \frac{z}{d}, \frac{t}{T}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{H}{D}, m\right) \tag{2.19}$$

(2.19) eşitliğinde π_Q boyutsuz katı madde taşınım parametresini, Φ fonksiyonu ifade etmektedir. Çalışmasında kırılma bölgesindeki katı madde taşınımını inceleyen araştırmacı bu nedenle kırılma işlemi ile tanımlanan H/d ifadesini eşitlikten çıkarmıştır. Kırılma bölgesindeki yüksek türbülans nedeniyle viskozite teriminin ihmal edileceğini belirtmiştir. Deneylerde sadece kum/su kombinasyonu kullanıldığından ρ_s/ρ oranı dikkate alınmamıştır. Aynı şekilde x, y, z koordinatları ve t/T ifadeleri ihmal edilmiştir. Katı madde taşınımını hacimsel olarak elde etmek için dalga kırılma açısı $\sin 2\alpha_b$'nin fonksiyonu olarak belirtilmiştir. Kıyı profili parametresi olarak kırılma bölgesindeki kıyı eğimi ($m_b = d_b / \lambda_b$; λ_b kıyı çizgisinden kırılma bölgesine kadar olan mesafedir) ve tane boyutu olarak D_{50} (medyan tane çapı) kullanılmıştır. (H/gT^2) ifadesi yerine ise dalga dikliği (H_0/L_0) kullanılmıştır.

Yapılan sadeleştirmeler sonucunda (2.20) eşitliği elde edilmiştir:

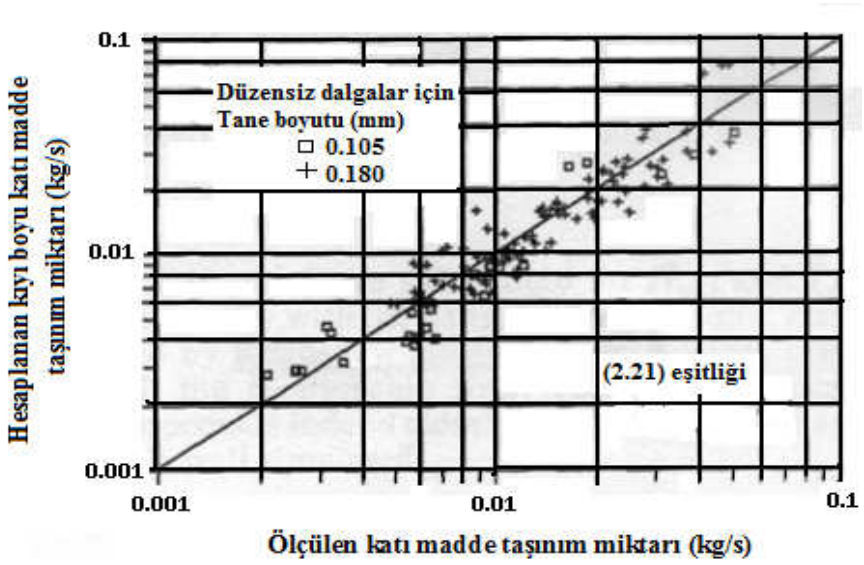
$$\frac{Q}{\left(\frac{\rho H^3}{T}\right)} = \left(\frac{H}{L_0}\right)^p m_b^q \left(\frac{H}{D_{50}}\right)^r \sin^s(2\alpha_b) \tag{2.20}$$

burada; p, q, r, s katsayılardır. Bu ifadeden katı madde taşınımının dalga dikliği (H_0/L_0), kıyı eğimi (m_b), medyan tane çapı (D_{50}) ve dalga yaklaşım açısının (α_b) fonksiyonu olduğu anlaşılmaktadır.

Araştırmacı, düzensiz dalgalar için (2.21) eşitliğini geliştirmiştir.

$$\frac{Q}{\left(\frac{\rho H^3}{T}\right)} = 1.3\cdot 10^{-3}\left(\frac{H}{L_0}\right)^{-1.25} m_b^{0.75}\left(\frac{H_{sb}}{D_{50}}\right)^{0.25} \sin^{0.6}(2\alpha_b) \qquad (2.21)$$

burada; H_{sb} belirgin kırılan dalga yüksekliği, T_p açık deniz dalga spektrumundaki pik periyod ve L_{0p} derin suda pik periyoda karşılık gelen dalga uzunluğudur. Şekil 2.8' de, (2.21) eşitliği kullanılarak hesaplanan değerler ile ölçüm verileri karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.8 Hesaplanan ve ölçülen kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının karşılaştırılması (Kamphuis, 1991)

Tahmin edilen katı madde taşınımının doğruluğunu belirlemek için (2.22) eşitliği ile verilen standart hata ifadesini kullanmıştır:

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{(\log Q_h - \log Q_ö)^2}{k^2}} \qquad (2.22)$$

burada Q_h ve $Q_ö$ sırayla Q'nun hesaplanan ve ölçülen değerleri, k veri noktası sayısıdır. Araştırmacı (2.21) eşitliği için $S_{y/x}$ değerini 0.10 olarak bulmuştur. Bu değer hesaplanan Q_h değerlerinden % 95'inin, 1.6 $Q_ö$ ile 0.6 $Q_ö$ arasında olduğunu göstermektedir. (2.21) eşitliğindeki p, q, r, s üsleri için yapılan hassasiyet analizleri, üslerin aşağıdaki aralıklarda değer alabileceklerini göstermektedir:

$1.15 < p < 1.30,\ 0.6 < q < 0.85,\ 0.15 < r < 0.30,\ 0.55 < s < 0.6$ (2.23)

Araştırmacı H_{rms} ile yaptığı benzer bir analiz sonucunda (2.24) eşitliğini elde etmiştir:

$$\frac{Q}{\left(\frac{\rho H_{rms}^{\ 3}}{T_p}\right)} = 2.6\cdot 10^{-3}\left(\frac{H_{rms,b}}{L_{0p}}\right)^{-1.25} m_b^{0.75}\left(\frac{H_{rms,b}}{D_{50}}\right)^{0.25} \sin^{0.6}(2\alpha_b) \tag{2.24}$$

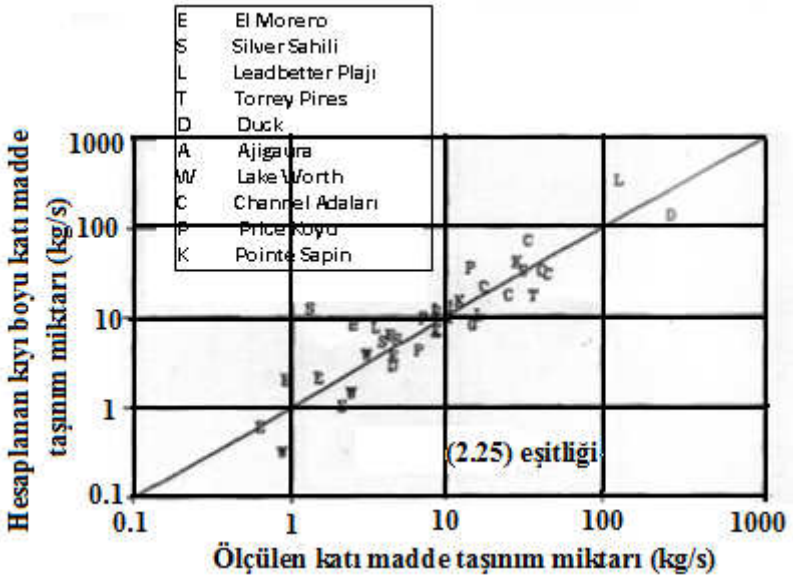
burada $H_{rms,b}$; kırılan potansiyel dalga yüksekliğini ifade etmektedir.

(2.24) eşitliği için de $S_{y/x}$ değeri 0.10'dur. (2.21) ve (2.24) eşitlikleri incelendiğinde katı madde taşınım miktarının, dalga yüksekliğinin karesi ile orantılı olduğu görülmektedir. Araştırmacı, kırılma bölgesinde ölçülen dalga yüksekliği dağılımının Rayleigh dağılımına uyması durumunda, (2.24) eşitliğindeki sabit çarpanın, (2.21) eşitliğindeki sabit çarpanın iki katı olması gerektiğini belirtmiştir. Bu nedenle (2.24) eşitliğindeki sabit çarpan 2.6 (1.3∗2) alınmıştır.

Kamphuis (1991) saha verileri olarak Kamphuis vd. (1986) tarafından elde edilen veri setlerini kullanmıştır. Bu veri setleri Komar (1969), Gable (1981), Inman vd. (1980), Kana ve Ward (1980), Kraus vd. (1982), Watts (1953), Bruno vd. (1980), Kana (1977), Kooistra ve Kamphuis (1984)' ün sırasıyla El Moreno ve Silver Sahili, Leadbetter Plajı, Torrey Pines, Duck, Ajiguara, Lake Worth, Channel Adaları, Price Koyu ve Pointe Sapin' de yapmış oldukları çalışmalardan elde edilmiştir. Kamphuis vd. (1986) bu saha verilerine dayanarak katı madde taşınımı için (2.25) eşitliğini elde etmişlerdir:

$$\frac{Q}{\left(\frac{\rho H_{rms}^{\ 3}}{T_p}\right)} = 0.6\cdot 10^{-3}\left(\frac{H_{sb}}{L_{0p}}\right)^{-0.5} m_b^{1.0}\left(\frac{H_{sb}}{D_{50}}\right)^{1.0} \sin(2\alpha_b) \tag{2.25}$$

Saha verileri ve (2.25) eşitliğinden hesaplanan katı madde taşınım miktarları Şekil 2.9'da görülmektedir.



Şekil 2.9 Saha verileri ve (2.22) eşitliği ile hesaplanan katı madde taşınımının karşılaştırılması (Kamphuis, 1991)

Kamphuis (1991) (2.21) ve (2.24) eşitliklerini aşağıdaki forma indirgemiştir:

$$Q = K \cdot \rho \left(\frac{g}{2\pi} \right)^{1.25} H^2 T^{1.5} m^{0.75} D^{-0.25} \sin^{0.6}(2\alpha_b) \tag{2.26}$$

(2.26) eşitliğinden:

$$Q = 2.27 H_{sb}^2 T_p^{1.5} m_b^{0.75} D_{50}^{-0.25} \sin^{0.6}(2\alpha_b) \qquad (m^3/s) \tag{2.27}$$

Orta yoğunluktaki kumun porozitesi %32 kabul ederek:

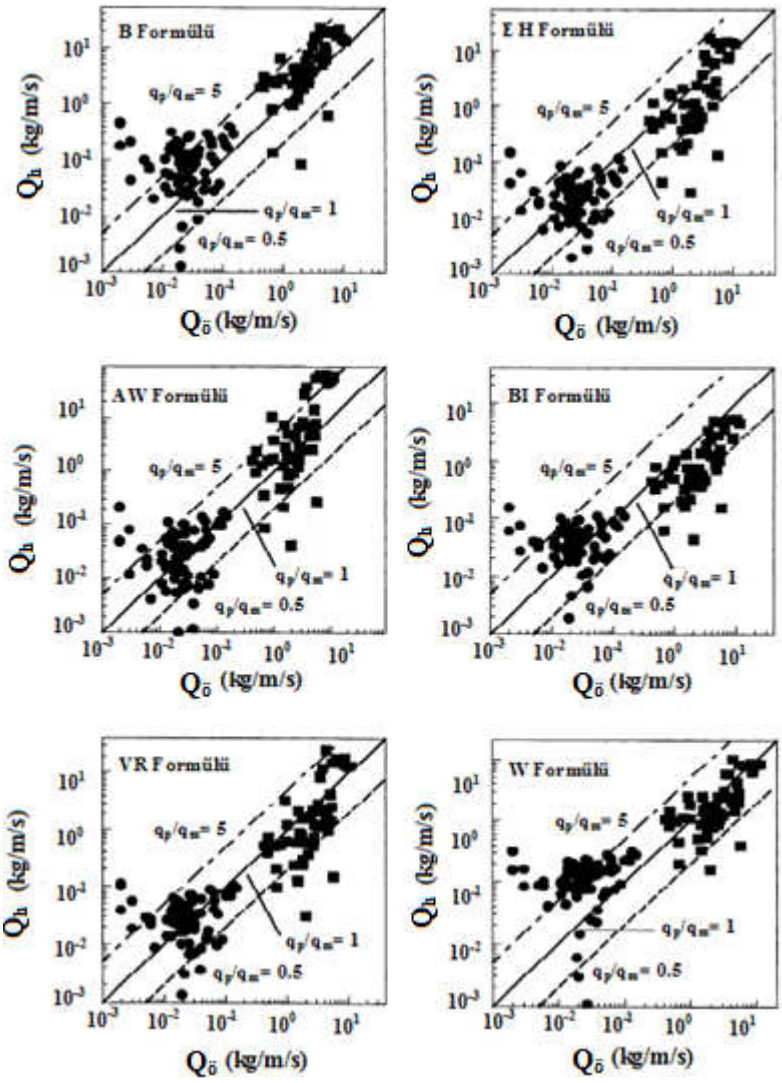
$$Q = 6.4 \cdot 10^4 H_{sb}^2 T_p^{1.5} m_b^{0.75} D_{50}^{-0.25} \sin^{0.6}(2\alpha_b) \qquad (m^3/yıl) \tag{2.28}$$

ifadelerini elde etmiştir.

Denklemlerde katı madde taşınım miktarının H^2 ile orantılı olduğu görülmektedir. Araştırmacı katı madde taşınım miktarının kıyı eğiminin bir fonksiyonu olduğunu ve doğrudan tane boyutuyla ve dalga açısı ile $(\sin 2\alpha_b)$ orantılı olduğunu ifade etmiştir.

Bayram vd. (2001) çalışmalarında kıyı boyu katı madde taşınımının kıyıya dik dağılımını belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılan Bijker (1967, 1971), Engelund-Hansen (1967), Ackers-White (1973), Bailard-Inman (1981), Van Rijn (1984) ve Watanabe (1992) formüllerinin tahmin kabiliyetini, saha ölçümünden elde edilen veri setleri ile karşılaştırarak değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Saha verileri Duck, Kuzey Carolina'da yapılan DUCK85, SUPERDUCK ve SANDYDUCK deneylerinden elde edilmiştir. DUCK85 ve SUPERDUCK

deneylerinde, surf bölgesine kum kapanları yerleştirilerek kapanlarda biriken katı madde miktarı tespit edilmiştir. SANDYDUCK deneyinde ise surf bölgesindeki kıyı boyu katı madde taşınımı optik sensörler ile kurulan bir düzenekle belirlenmiştir. Deneyler Birleşik Devletler Ordusu Mühendis Teşkilatı Saha Araştırma Tesisi'nde kurulan düzenekte gerçekleştirilmiştir. Sörf bölgesinde kıyı boyu katı madde taşınımının kapanlarla ölçüldüğü DUCK85 ve SUPERDUCK deneyleri sırasıyla Kraus vd. (1989) ve Rosati vd. (1990) tarafından, kıyı boyu katı madde taşınımının kıyıya dik dağılımının optik geri saçılım sensörleriyle (OBS) ölçüldüğü SANDYDUCK deneyi Miller (1999) tarafından gerçekleştirilmiştir. Kraus vd. (1989) ve Rosati vd. (1990) tarafından yapılan ölçümler sakin su koşullarında yapılmasına karşın Miller'ın (1999) ölçümleri fırtına koşullarını da kapsamaktadır. Altı formül kullanılarak hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım debileri (Q_h) ile üç veri setinden elde edilen saha ölçümlerinin ($Q_ö$) karşılaştırılması Şekil 2.10'da gösterilmektedir. Şekil 2.10'da daireler düşük enerji koşullarında kıyı boyu katı madde taşınımının belirlendiği DUCK85 ve SUPERDUCK deneylerinden elde edilen verileri, kareler ise fırtına koşullarında katı madde taşınımının belirlendiği SANDYDUCK deneyinden elde edilen verileri temsil etmektedir. Şekil 2.10'da görüldüğü üzere Bailard-Inman (1981) (BI) ve Van Rijn (1984) (VR) formüllerinden, DUCK85 ve SUPERDUCK verilerine en yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bijker (1967,1971) (B) ve Watanabe (1992) (W) ölçümlerden yüksek sonuç vermekte, Ackers-White (1973) (AW) ve Engelund-Hansen (1967) (EH) yüksek saçılım göstermektedir. SANDYDUCK deney sonuçları ile karşılaştırıldığında Ackers-White (1973) ve Bijker (1967,1971) formüllerinden çok yüksek değerler elde edilirken, Bailard-Inman (1981) ve Engelund-Hansen (1967) formüllerinden çok düşük değerler bulunmaktadır. Van Rijn (1984) ve Watanabe (1992) formülleri en düşük saçılımı ve en iyi sonucu sağlamaktadır. Araştırmacılar tüm dalga koşulları için en iyi sonucu Van Rijn (1984) formülünün sağladığını ifade etmişlerdir. Ackers-White'ın (1973) da tüm dalga koşullarında iyi sonuçlar verdiğini ancak durgun ve fırtına koşullarında düşük sonuçlar sağladığını, aynı durumun Engelund-Hansen (1967) için de geçerli olduğunu belirtmişlerdir. Watanabe (1992) fırtına koşulları için en iyi sonuçları vermekte ancak durgun su koşullarında yüksek değerler vermektedir. Bijker'den (1967, 1971) ise tüm koşullarda yüksek sonuçlar elde edilmektedir. Araştırmacılar formüllerden elde edilen katı madde taşınım miktarlarındaki hataların sebebi olarak, formüllerdeki katsayı değerlerinin laboratuar veya nehirlerden elde edilen verilerle uyumlu olmasını göstermişlerdir. Sörf bölgesinden elde edilmiş saha verileriyle bu katsayılar kalibre edilirse, katsayı sebepli hataların azalacağını ancak yüksek kalitede saha verisinin yetersiz olmasının kalibrasyon işlemini zorlaştırdığını ifade etmişlerdir.



Şekil 2.10 Kıyı boyu katı madde taşınımının kıyıya dik dağılımının hesaplanan ve ölçülen değerlerinin üç veri seti için karşılaştırılması (Bayram vd., 2001)

Şekil 2.10'da Q_h hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım debisini, $Q_{ö}$ ölçülen kıyı boyu katı madde taşınım debisini ifade etmektedir.

Wang vd. (2002) deneylerini Birleşik Devletler Ordusu Mühendis Araştırma ve Geliştirme Merkezi (ERDC) Kıyı ve Hidrolik Laboratuarı'nda (CHL) kurulan Büyük Ölçekli Katı Madde Taşınım Düzeneği'nde (LSTF) gerçekleştirmişlerdir. Wang vd. (2002), kıyı boyu katı madde taşınımı üzerinde kırılma tipinin önemini (spilling ve plunging tipi kırılma), kıyı boyu katı madde taşınım hızını belirlemek için yapılan çalışmaların doğruluğunu ve değişen surf bölgesi koşullarında kıyı boyu taşınım debisi ve kıyıya dik dağılımı için geliştirilmiş tahmin yöntemlerini araştırmışlardır.

Deney düzeneği 50 m genişliğinde (kıyı boyu mesafesi), 30 m uzunluğunda (kıyıya dik mesafe) ve 1.4 m yüksekliğindedir. Katı madde taşınım deneylerinin gerçekleştirilmesi için

deney düzeneğinin ortasına kuvartz kumundan hareketli bir taban, üniform bir kıyıyı benzeştirecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu kıyı alanı 35 m genişliğinde, 20 m uzunluğunda ve 20 cm kalınlığındadır. Dört adet senkronize çalışan dalga üreteci açık deniz tarafında tek yönlü uzun dalga üretimi amacı ile yerleştirilmiştir. Kıyı boyu akıntısı ve katı madde taşınımı sağlamak amacıyla 20 adet akım kanalı düzenekte bulunmaktadır (Hamilton vd., 2001).

Hem spilling hem plunging dalgaları için tipik deniz şartlarını temsil eden düzensiz dalgalar üretilmiştir. Spilling tipi kırılma için belirgin dalga yüksekliği (H_s=0.27m), pik spektral periyot (T_p=1.5s) ve kırılan ortalama dalga yönü (α_b= 6.5^0) iken plunging tipi kırılma için belirgin dalga yüksekliği (H_{sb} = 0.24 m), pik spektral periyot (T_p = 3 s) ve kırılan ortalama dalga yönü (α_b= 6.4^0) olarak belirlenmiştir. Kıyı boyu katı madde taşınım düzeneğinde ortalama tane boyutu 0.15 mm olan kuvartz kum kullanılmıştır. Ölçümler, kıyı denge profiline ulaştığında yapılmaya başlanmıştır. Spilling tipi kırılma durumunda denge profiline 14 saatte, daha büyük dalga periyoduna dolayısıyla daha büyük enerjiye sahip olan plunging tipi kırılma durumunda ise 4 saatte ulaşılmıştır.

Araştırmacılar kıyı boyu katı madde taşınım düzeneğinde toplam kıyı boyu taşınan katı madde miktarını, düzeneğin aşağı kıyı bölgesine yerleştirilen katı madde kapanlarında ölçülen birim genişlikteki katı madde akılarının toplanmasıyla elde etmişlerdir. Çizelge 2.5'te ölçülen ve farklı yöntemlerle hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım miktarları verilmektedir.

Araştırmacılar yaptıkları deney sonuçlarını CERC (USACE, 1984) (2.29) eşitliği, Kamphuis (1986) (2.30) eşitliği ve Kamphuis (1991) (2.28) eşitliği yöntemleriyle karşılaştırmışlardır.

$$Q = \frac{K_1}{\sqrt[16]{\gamma}} \rho g^{\frac{3}{2}} H_{sb}^{\frac{5}{2}} \sin(2\theta_b) \tag{2.29}$$

$$Q = 1.28 \frac{H_{sb}^{3.5} m}{D_{50}} \sin(\alpha_b) \tag{2.30}$$

CERC (USACE, 1984) ve Kamphuis (1986) yöntemleri ile hesaplanan toplam taşınım miktarlarının, ölçülen değerlerden belirgin derecede fazla olduğu görülmektedir. Kamphuis (1986) eşitliğine dalga periyodunun eklenmesiyle elde edilen Kamphuis (1991) yöntemi ile yapılan hesaplamalarda ise daha tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.

Çalışmada maksimum kıyı boyu katı madde taşınımının gerçekleştiği bölgelerin kırılma tipine göre farklılık gösterdiği belirtilmiştir.

Çizelge 2.5 Ölçülen ve hesaplanan toplam kıyı boyu katı madde değerlerinin karşılaştırılması (Wang vd., 2002)

Kırılma tipi	**Spilling tipi kırılma**	**Plunging tipi kırılma**
	Taşınım miktarları (m^3/yıl)	
Ölçüm	2660	7040
CERC (USACE, 1984) Yöntemi	18040	23850
Kamphuis (1986) Yöntemi	8130	9100
Kamphuis (1991) Yöntemi	1870	5360
Kraus (1988) Yöntemi	2670	3150
	Fazla (+) veya Az (-) Tahmin Yüzdesi (%)	
CERC (USACE, 1984) Yöntemi	+578	+239
Kamphuis (1986) Yöntemi	+206	+29
Kamphuis (1991) Yöntemi	-30	-24
Kraus (1988) Yöntemi	0	-55

Araştırmacılar maksimum taşınımın spilling tipi kırılmada tırmanma bölgesinde, plunging tipi kırılmada ise tırmanma bölgesinde ve kırılma çizgisinde olduğu belirtilmişlerdir. Günümüze kadar yapılan tahminler de göz önünde bulundurarak fırtına şartları için en uygun yaklaşımın CERC (USACE, 1984) yöntemi, düşük enerjili dalga şartların için ise Kamphuis (1991) yöntemi olduğunu ifade etmişlerdir.

Pilkey ve Cooper (2002) çalışmalarında, kıyı boyu katı madde taşınımını belirlemek için uygulanan saha ölçümü, teorik yaklaşım ve modelleme yöntemlerini incelemişler ve bu yöntemlerden tutarlı sonuçlar elde edilmediğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar arazi ölçümlerindeki problemlerden en önemlisinin şiddetli fırtınalarda katı madde taşınımının ölçülememesi olduğunu ifade etmişlerdir. Teorik yaklaşım ve modellerde ise genel kabuller, hatalı katsayılar ve ölçek etkileri nedeniyle hatalı sonuçlar elde edildiğini belirtmişlerdir.

Kumar vd. (2003) çalışmalarında Hindistan'ın batı kıyısında surf bölgesi boyunca saha ölçümüyle tespit edilen kıyı boyu katı madde taşınım miktarını, belirlenen üç ampirik formül sonucu ile karşılaştırmışlardır. Saha ölçümü sörf bölgesi boyunca yerleştirilen katı madde kapanları ile gerçekleştirilmiştir. Teorik yaklaşımda ise CERC (USACE, 1984), Walton-Bruno (1989) ve Van Rijn (1989) formüllerini kullanmışlardır. Saha ölçümü ile belirlenen kıyı boyu katı madde taşınım miktarına en yakın değerlerin Van Rijn (1989) formülü ile elde

edildiğini tespit etmişlerdir. Araştırmacılar bu çalışmada saha ölçüm sonuçları ve ampirik formülle hesaplanan değerler arasındaki farkın sürüntü modunda taşınan katı maddenin hatalı ölçülmesi, özellikle düşük dalga enerjisine sahip kıyılarda akıntının deniz tabanına kadar etki etmesi fakat hesaplamalarda deniz yüzeyinde ölçülen akıntının kullanılması ve çalışma alanında saha ölçüm süresince hakim olan düşük dalga yüksekliğine rağmen yüksek enerjili kıyılar için geçerli olan formüllerin kullanılması nedenlerinden kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Smith vd. (2004), deneylerini Birleşik Devletler Ordusu Mühendis Araştırma ve Geliştirme Merkezi (ERDC) Kıyı ve Hidrolik Laboratuarı'nda (CHL) kurulan Büyük Ölçekli Katı Madde Taşınım Düzeneği'nde (LSTF) gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar dalga yüksekliğinin, dalga periyodunun ve kırılma tipinin toplam kıyı boyu katı madde taşınım debisi üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla dört farklı dalga koşulu oluşturmuşlardır (Çizelge 2.6). Deney sonuçlarını CERC (USACE, 1984), Kamphuis (1991), Bailard (1984) ve del Walle vd. (1993) modellerinin sonuçları ile karşılaştırmışlardır.

Deneyde değişik kırılma tiplerindeki kıyı boyu katı madde taşınım miktarları ölçülmüştür. Çizelge 2.6'da gösterildiği gibi dört farklı dalga koşulu oluşturulmuştur H_{m0} dalga üreticinin yanında ölçülen belirgin spektral dalga yüksekliğidir. Dalga şartları enerji seviyelerine göre gruplandırılmıştır. Deney 1 ve Deney 3 birbirine yakın dalga yüksekliklerine ve yüksek enerjiye sahipken Deney 5 ve Deney 6 daha düşük enerji şartlarındaki dalga yüksekliklerine sahiptir. Dalga üreteçleri 0.9 m su derinliğinde bulunmaktadır.

Çizelge 2.6 Kıyı boyu katı madde taşınım deneylerinin dalga koşulları (Smith vd., 2004)

Deney numarası	**Kırılma Tipi**	**H_{m0} (m)**	**H_{sb} (m)**	**T_p (s)**	**d (m)**	**α_b (^{o})**	**m_b (-)**
1	Spilling	0.25	0.26	1.5	0.9	6.5	0.031
3	Plunging	0.23	0.27	3.0	0.9	6.4	0.024
5	Spilling	0.16	0.28	1.5	0.9	6.7	0.025
6	Plunging	0.19	0.21	3.0	0.9	6.4	0.020

Düzeneğin aşağı kıyısına yerleştirilen katı madde kapanlarında ölçülen birim genişlikteki katı madde akılarının toplanmasıyla elde edilen katı madde taşınım debileri Çizelge 2.7'de gösterilmektedir. Çizelgede deneylerde ölçülen kıyı boyu katı madde taşınımı debilerinin yanı

sıra CERC (USACE, 1984), Kamphuis (1991), Bailard (1981, 1984) ve Valle vd. (1993) modelleri ile hesaplanan taşınım miktarları gösterilmektedir.

Araştırmacılar CERC (USACE, 1984) yönteminde K katsayısının 0.39 alınması durumunda hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının, ölçülen değerlerden spilling tipi kırılmada 7-8 kat, plunging tipi kırılmada 3 kat daha büyük olduğunu belirtmişlerdir. K katsayısı kalibre edilerek, CERC (USACE, 1984) yöntemiyle yapılan hesaplamalar daha tutarlı sonuçlar verebilmektedir. K katsayısı spilling tipi kırılma için 0.05 alındığında, hesaplanan ve ölçülen değer arasındaki fark %5 oranına kadar azaltılabilmektedir. Plunging tipi kırılma için K=0.13 alındığında hesaplanan ve ölçülen değerler arasındaki fark % 8 oranına düşürülebilmektedir.

Araştırmacılar kırılma tipini etkileyen bir parametre olan dalga periyodunu içermesi sebebiyle Kamphuis (1991) denkleminin ölçülen değerlerle daha uyumlu sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Çizelge 2.7 Ölçülen ve hesaplanan toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının karşılaştırılması (Smith vd., 2004)

Deney numarası	**Ölçülen (m^3/yıl)**	**CERC (K=0.39) (m^3/yıl)**	**Kamphuis (m^3/yıl)**	**Bailard (m^3/yıl)**	**del Valle vd. (m^3/yıl)**
1	2660	20740	2390	10060	20570
3	7040	22900	6060	14570	33000
5	1130	8400	1010	4500	7760
6	4040	12040	3160	5250	11010

Çalışmada kıyı boyu katı madde taşınımının kıyıya dik dağılımı için kırılmanın başladığı bölge, surf bölgesinin içi ve tırmanma bölgesi olmak üzere üç bölge belirtilmiştir. Kırılmanın başladığı bölgede, plunging tipi kırılma için en yüksek miktarda katı madde taşınımı gerçekleşmektedir. Bu kırılma tipinde taşınım için daha fazla katı maddenin askıya geçtiğini göstermektedir. Kırılma tipi dalga yüksekliğinin, dalga periyodunun ve kıyı eğiminin bir fonksiyonudur (Galvin, 1968). Surf bölgesinin içindeki katı madde taşınımında ise etkin parametre dalga yüksekliğidir. Bu bölgede katı madde taşınımı dalga periyodundan bağımsızdır. Toplam katı madde taşınımının büyük bir yüzdesi tırmanma bölgesinde gerçekleştirmektedir. Bu bölgede katı madde taşınımı dalga yüksekliği, dalga periyodu ve kıyı eğimine bağlıdır.

Bayram vd. (2007) mühendislik uygulamalarında kullanılmak amacıyla, toplam kıyı boyu katı madde taşınımı miktarını belirlemek için yeni bir formül geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri formülün tahmin kapasitesini, saha ve laboratuar çalışmalarında elde edilen yüksek kalitede altı adet veri seti ile değerlendirmişlerdir. 180 adet saha ve laboratuar olayını içeren veri setlerinden 2/3'ünü geliştirilen formüldeki taşınım katsayısının belirlenmesi için, 1/3'ünü formül sonuçlarının değerlendirilmesi için kullanmışlardır. Formülün esas parametresi olan taşınım katsayısının (dalgaların katı maddeyi askıda tutma kapasitesini ifade eder) Dean sayısının bir fonksiyonu olduğunu ifade etmişlerdir. Son olarak formül sonuçları, toplam veri setlerinin 1/3'ü ile birlikte, Inman ve Bagnold (1963), CERC denklemi (USACE, 1984) ve Kamphuis (2002) olmak üzere üç adet formülle karşılaştırılmıştır. Kıyı boyu katı madde taşınım miktarını belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılan formüllerdeki sınırlamaları, geliştirdikleri yeni formülle ortadan kaldırmayı amaçlayan araştırmacılar, formüllerinin yapısını aşağıdaki gibi açıklamışlardır:

- Formül sadece dalga nedenli akıntı etkilerini değil, rüzgar ve gel-git nedenli akıntı etkilerini de içermelidir.
- Kıyı boyu katı madde taşınımını kontrol eden birçok fiziksel faktörü (katı madde özellikleri ve dalga karakteristikleri gibi) içermelidir.
- Dalga, katı madde özellikleri ve kıyı şartlarını kapsamlı bir şekilde içeren veri seti ile kontrolü yapılmalıdır.

Güçlü dalga hareketi ile tabandaki katı maddenin askı moduna geçmesi nedeniyle, sörf bölgesinde etkin olan taşınım modunun askı malzemesi hareketi olduğunu ifade etmişlerdir. Kırılan dalgalar, katı maddeyi askı moduna geçirmekte ve sörf bölgesinde C(x,z) ortalama konsantrasyon dağılımına sebep olmaktadır (C'nin birimi m^3 (katı madde)/m^3 (su)'dur). Katı maddeyi askı modunda tutmak için yapılan toplam işin enerji akısı ile doğru orantılı olduğunu kabul etmişlerdir. Kıyı boyu akıntısı ve sörf bölgesi boyunca düşey katı madde konsantrasyonunun integre edilmesiyle toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarını elde etmişlerdir. Araştırmacılar geliştirdikleri formülün, toplam taşınım miktarını kıyı boyu akıntı hızı ve dalga enerji akısı ile doğru, çökelme hızı ile ters orantılı olduğunu belirtmişlerdir. Veri noktalarından elde edilen değerlerle formül sonuçlarını karşılaştırmış ve formülün sonuçları ile arazi verileri arasında % 0.5 ile 2 sapma olduğunu belirtmişlerdir. Geliştirdikleri formülün tahmin kapasitesinin CERC (1984), Inman-Bagnold (1963) ve Kamphuis (1991) formüllerinden daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir.

Zviely vd. (2007) çalışmalarında İsrail'de bulunan Haifa Körfezinde ve Zevulun ovasında, holosen süresince biriken katı madde miktarını belirlemeyi amaçlamışlardır. Bu veriler son 7900-8500 yılı kapsamaktadır. Haifa Körfezi ve Zevulun Ovasının stratigrafisi (yer kabuğu katmanlarının incelenmesi) ve litolojisi (taşbilim), 1934-2004 yılları arasında ortaya çıkarılan 224 adet sondaj verilerine dayanmaktadır (Zviely, 2006; Zviely vd., 2006). Körfez alanının litolojik ve krono-stratigrafik verilerinin renk, granülometri, mineraloji, fauna kalıntıları ve tarihleme ile belirlemişlerdir. Zevulun ovasındaki holosen kum hacmi sondajlarla bulunan kum kalınlığı ile belirlenirken Haifa körfezinde jeofizik haritalarından çıkarmışlardır. Kum kalınlığı verileri üç boyutlu dijital vektör haritasında yerleştirilmiş ve jeofizik haritalarından elde edilen kum tabaka kalınlıklarını belirleyen kontörlerle birleştirmişlerdir. Ardından tüm verileri, yüksek çözünürlüklü dijital arazi model (Digital Terrain Model, DTM) ağı oluşturmak üzere bir haritalama yazılım programına (Microstation Java, 2000) aktarmışlardır. Microsoft Java'daki Geo Terrain yazılımı (Geo Terrain, 2000) kullanılarak körfez alanındaki toplam holosen kum hacmini hesaplamışlardır. Hesaplanan sonuçlar uzun dönemde değerlendirildiğinde İsrail kıyısı boyunca net kıyı boyu katı madde taşınım miktarında son 7900-8500 yılda belirgin bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir.

Estevez vd. (2009) çalışmalarında, kıyı boyu katı madde taşınım miktarını belirlemek amacıyla bir model kurmuşlardır (LT-MOD). Araştırmacılar LT-MOD'u katı madde özellikleri, taban pürüzlülüğü, dalga-akıntı etkileşimi ve gel-git olaylarını dikkate alarak oluşturmuşlardır. Model sonuçlarını Brezilya, Danimarka ve Portekiz kıyılarında gerçekleştirilen saha ölçümleri sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. LT-MOD'da kullanılmak üzere askı malzemesi konsantrasyon profilleri (C-Profili) ve hidrodinamik parametrelerin kıyıya dik dağılımlarından ölçülen ve hesaplanan değerler kullanmışlardır. LT-MOD'un saha ölçümlerinden elde edilen girdi parametreleri aşağıdaki gibidir:

a) Kıyı boyu akıntı hızı (S) ve kıyı boyu akıntı yönü (φ)
b) Dalga yüksekliği (H veya H_b), dalga periyodu (T veya T_P), ve dalganın kırılma açısı (α_b)
c) Kıyı profili
d) Tabandaki ve sürüntü modundaki tanenin ortalama tane çapı (D_{50} ve D_{50s})
e) Rip akımının dalga boyu (λ) ve yüksekliği (η)
f) C-profili

Araştırmacılar saha verileriyle LT-MOD'un sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Sörf bölgesinde hidrodinamik kuvvetlerin ve taban şekillerinin yeteri kadar bilinmemesi ve kısa zaman aralıklı dalga grupları nedeniyle taban pürüzlülüğünde meydana gelen anlık değişimlerin oluşması

nedeniyle belirsizlikler olsa da yeterli sayıda ve doğru saha verileri mevcudiyetinde modelin etkili sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

3. BULANIK MANTIK YÖNTEMİ

3.1 Giriş

Doğa olaylarında her zaman var olan belirsizlikler, kesin yöntemlerle modellemeyi güçleştirmektedir. Çözümlerinin kesin olduğu sanılan diferansiyel denklemlerin çözümlerinin asla kesin olmadığı ve kaotik yani belirsiz çözümler içerdiği son 30 yılda anlaşılmıştır. Bu yüzden araştırmacılar daha başka yöntemlerle problemleri yaklaşık olarak modellemeye çalışmışlardır. Yaklaşık sonuç elde etmek için, ya eldeki problem idealleştirilmeli, ya da çok sayıda değişken kullanılmalıdır (Toprak, 2002).

Her insan günlük hayatında kesinlik arz etmeyen durumlarla karşılaşır. Bu durumların sistematik bir şekilde önceden planlanarak, sayısal öngörülerinin yapılması ancak bir takım kabul ve varsayımlardan sonra mümkün olabilmektedir. Bulanık mantığa kadar yapılan mühendislik araştırmalarında ve modellemelerinde, bu varsayım, kabul ve kavramlara kesinlik kazandırmak için değişik çalışmalarda bulunulmuştur. Bulanıklık belirsizliğin bir ifadesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Geçmişte, belirsizliklerin işlenmesi ve anlamlı sonuçlara varılabilmesi için ihtimaller teorisi kullanılmıştır. Matematik ve mühendislikte bu teori, belirsizlik durumlarında istatistik yöntemlerle birlikte kullanılmaktadır. Bu nedenle, bütün belirsizliklerin gelişigüzel karakterde olduğu kavramı yerleşmiştir. Rastgeleliğin en önemli özelliği, sonuçların ortaya çıkmasında tamamen şans olayının rol oynaması, gerekli öngörülerin ve tahminlerin kesin bir doğrulukla önceden yapılamamasıdır. Günlük hayatta karşılaşılan belirsizliklerin çoğunun tesadüf olmadığı kolayca anlaşılabilir. Rastgele karakterde olmayan olayların, örneğin, sözel belirsizlikler halinde inceleme ve sonuç çıkarma işlemlerinde, ihtimal teorisi ve istatistik gibi sayısal belirsizlikleri gerektiren yöntem bilimler kullanılamaz (Şen, 1999).

3.2 Bulanık Mantığın Gelişimi

Günümüzün gelişen teknolojileri artık geleneksel elektronik denetim biçimlerinden yeteri kadar verim alamamaktadır. Gün geçtikçe ortaya çıkan daha hassas birimler ve kaçınılmaz olan enerjiden tasarruf sağlama zorunluluğu bilim adamlarını bu yönde araştırmalar yapmaya itmiştir. Gitgide mükemmele yakınlaşma isteği ve doğanın belki de bir gün aynısının yapay yollarla ortaya çıkarılmaya çalışılması Yapay Zeka, Yapay Sinir Ağları ve Bulanık Mantığın ortaya çıkarılmasına neden olmuştur.

Mantık, insan ile birlikte var olan bir olgudur. Mantığın, bir bilim olarak temellerinin Aristo tarafından atıldığı bilinmektedir. Bir bilim olarak ilk kullanım alanı da felsefe olmuştur. Klasik yaklaşımda bir varlık ya kümenin elemanıdır ya da değildir. Matematiksel olarak ifade edildiğinde varlık küme ile olan üyelik ilişkisi bakımından kümenin elemanı olduğunda (1), kümenin elemanı olmadığı zaman (0) değerini almaktadır. Aristo aklın, dolayısıyla mantığın şu üç prensibinden söz etmektedir:

1) Özdeşlik İlkesi: "Bir şey kendisidir" yani A, A'dır.

2) Çelişmezlik İlkesi: Özdeşlik ilkesi tek başına bir nesneyi tanımlamaya yetmez. İlk prensibe göre nesnenin kendisi olduğu kesindir, fakat başka bir şey olmadığı kesin değildir. Bunun önüne geçmek için Aristo, "Aynı niteliğin, aynı zamanda ve aynı bakımdan aynı özneye hem ait hem de ait olmaması imkansızdır" demekte ve çelişmezlik ilkesini kabul etmektedir. Çelişmezlik ilkesi, nesnelerin birbirinden ayırt edilmesini sağlamaktadır.

3) Üçüncü Halin Olanaksızlığı İlkesi: Bir şey ya doğrudur ya da doğru değildir. Aristo mantığına göre eğer bir şey doğru ise, o şeye aynı zamanda "doğru değildir" denemez. Benzer şekilde, bir şey var, ya da yoktur. Bir eleman, bir kümenin ya elemanıdır ya da değildir. Örnekler çoğaltılabilir. Bu ilke "bir şey ya A'dır, ya da A değildir" şartını getirmektedir. Yani üçüncü bir alternatif söz konusu değildir (Şen, 2000).

Bulanık mantık her gün kullanılan ve insan davranışlarının yorumlandığı yapıya ulaşılmasını sağlayan matematiksel bir disiplindir. Temelini doğru ve yanlış değerlerin belirlendiği Bulanık Küme Kuramı oluşturmaktadır. Burada geleneksel mantıkta olduğu gibi (1) ve (0) değerleri vardır. Ancak bulanık mantık yalnızca bu değerlerle yetinmeyip bunların ara değerlerini de kullanarak; örneğin bir uzaklığın yalnızca yakın ya da uzak olduğunu belirtmekle kalmayıp ne kadar yakın ya da ne kadar uzak olduğunu da söylemektedir. Bu mantık elektrikli ev aletlerinden oto elektroniğine, gündelik hayatta kullanılan iş makinelerinden üretim mühendisliğine, endüstriyel teknolojilerden otomasyona kadar akla gelebilecek her yerde kendisine uygulama alanı bulabilir (Günal, 1997).

Bulanık mantık hakkında ilk bilgiler, Zadeh (1965) tarafından literatüre kazandırılmıştır. Ancak bu fikirler batı dünyasında şüphe ile karşılanmış ve oldukça yoğun tenkit almıştır. Bulanık kavram ve sistemlerin dünyanın değişik araştırma merkezlerinde dikkat kazanması 1975 yılında Mamdani ve Assilian tarafından yapılan gerçek bir kontrol uygulaması ile olmuştur (Mamdani ve Assilian, 1975). Bu araştırıcılar ilk defa bir buhar makinası kontrolünün bulanık sistem ile modellenmesini başarmıştır. Bu ön çalışmadan, bulanık

sistemlerle çalışmanın ne kadar kolay ama sonuçlarının da ne kadar etkili olduğu anlaşılmıştır (Şen, 2001).

Bulanık küme teoremi, hayattaki kesin olmayan, örneğin; "sıcak" ve "soğuk" kesin ifadelerinin arasında kalan "az soğuk" veya "soğuğa yakın" şeklindeki belirsizlikleri de matematiksel olarak ifade etmeye yönelik bir teoremdir (Taşkın ve Gümüştaş, 1996).

Bulanık küme teorisi üyelikten üye olmamaya geçişi, parametrelere atanan üyelik dereceleri ile ifade etmektedir. Bu dereceli geçiş bize, belirsizliğin ölçülmesinde güçlü ve anlamlı araçlar sunmasının yanı sıra, doğal dilde ifade edilen belirsiz kavramların anlamlı bir şekilde temsilini de vermektedir. Fakat Aristo mantığı üzerinde temellenen klasik küme teorisi, verilen bir alana ait bütün bireyleri, incelenen özelliğe göre ikiye ayırmaktadır: kümeye ait olan elemanlar ve ait olmayan elemanlar. Kümeye üye ve üye olmayan elemanlar arasında kesin ve belirsiz olmayan bir ayrım vardır. Doğal dilde ifade edilen ve üzerinde çalışılan çoğu sınıflandırma kavramı, bu türde bir karakterde değildir. Örneğin; uzun insanlar kümesi, orta yaşlı insanlar kümesi gibi kavramlar klasik kümenin öngördüğü şekilde incelenemezler. Bu kümeler, kesin olmayan sınırlara sahip olarak kabul edilmekte ve üyelikten üye olmamaya geçişin dereceli olduğu göz önüne alınarak işlem yapılmaktadır (Klir ve Yuan, 1995).

Bulanık mantığın genel özellikleri Zadeh (1965) tarafından şu şekilde ifade edilmiştir;

- Bulanık mantıkta, kesin değerlere dayanan düşünme yerine, yaklaşık düşünme kullanılmaktadır,
- Bulanık mantıkta her şey [0,1] aralığında belirli bir derece ile gösterilmektedir,
- Bulanık mantıkta bilgi; büyük, küçük, çok az gibi dilsel ifadeler şeklindedir,
- Bulanık çıkarım işlemi dilsel ifadeler arasında tanımlanan kurallar ile yapılmaktadır,
- Her mantıksal sistem bulanık olarak ifade edilebilmektedir,
- Bulanık mantık matematiksel modeli çok zor elde edilen sistemler için oldukça uygundur.

Bulanık mantık işlemleri problemin analiz edilmesi ve tanımlanması, kümelerin ve mantıksal ilişkilerin oluşturulması, mevcut bilgilerin bulanık kümelere dönüştürülmesi ve modelin yorumlanması aşamalarından oluşmaktadır. Sistemin her bir girdi ve çıktı değişkenleri için üyelik işlevi tanımlanmalıdır. Üyelik işlevinin sayısı sistemin davranışına bağlı olmakla birlikte, aynı zamanda tasarımcının seçimine de bağlıdır (Elmas, 2003).

Bulanık mantık kuramının insan düşünüş tarzına çok yakın olması en büyük üstünlüğünü oluşturmaktadır. Bulanık mantık yaklaşımı matematiksel modele ihtiyaç duymadığından, matematiksel modeli iyi tanımlanamamış, zamanla değişen ve doğrusal olmayan sistemler

başarılı uygulama alanlarıdır. Bulanık mantık yaklaşımında bulanık girdilerin bir ön işlemeye tabii tutulmaları ve geniş bir alana yayılmış değerlerin az sayıda üyelik değerlerine indirgenmeleri uygulamaların daha hızlı bir şekilde sonuca ulaşmasını sağlamaktadır. Sistemlerin kararlılık, gözlemlenebilirlik ve denetlenebilirlik analizlerinin yapılmasında ispatlanmış kesin bir yöntemin olmayışı bulanık mantığın temel dezavantajıdır. En önemli ve sürekli belirtilen dezavantaj ise; üyelik işlevlerinin ayarlanmasının uzun zaman alması ve öğrenme yeteneği olmamasıdır (Elmas, 2003).

3.3 Bulanık Sistem Ne Demektir?

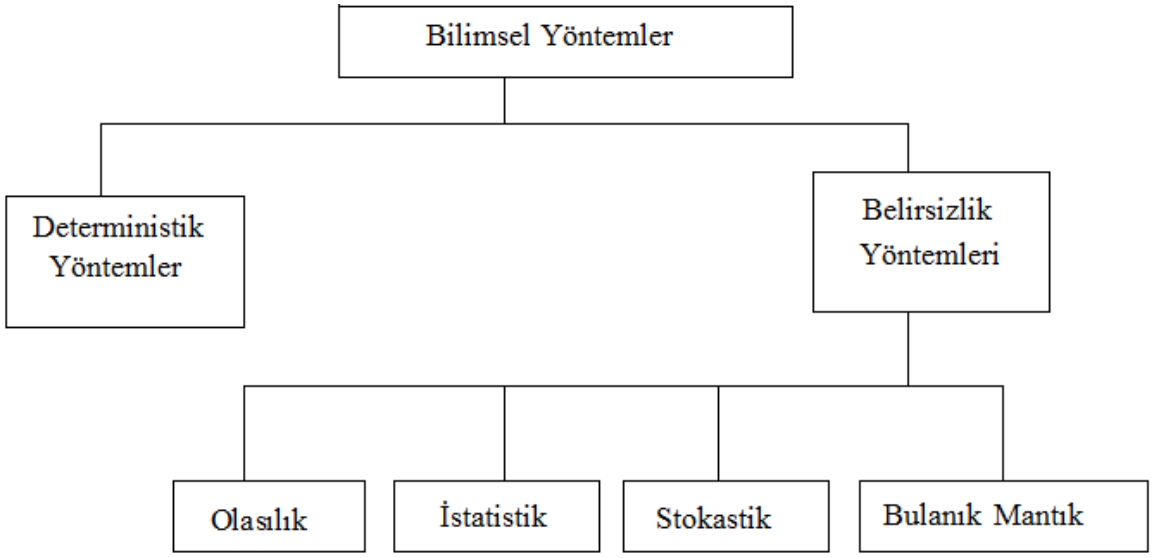
Bulanıklığın anlamı, bir araştırmacının incelediği konunun kendisi tarafından, kesinlikle bilinmemesi durumunda, sahip olduğu eksik ve belirsiz bilgilerin tümüdür. Böylece araştırmacı, klasik analitik yöntemler, dinamik ve korunum ilkelerinden (enerjinin, maddenin ve momentumun korunumları gibi) elde ettiği denklemleri, verilerinde ve bilgilerinde belirsizlik yani bulanıklık bulunduğu için doğrudan kullanamaz. Araştırmacının incelediği olay veya mekanizma modellenirken, kesin kurallı ve çıkarımlarında kabuller olan denklemler yerine, sözel ve belirsiz bilgiler kullanılabilmektedir. Bulanık ilkelerin yardımı ile olayların incelenmesinde veri ve bilgi bakımından bir bulanıklık söz konusu ise de, bulanık yöntemlerin işleyişi tamamen belirgindir (Şen, 1999).

Şekil 3.1'de bulanık mantığın diğer bilimsel yöntemler içerisindeki yeri gösterilmektedir. Günümüzde bulanık uzman sistemler, kontrol, örnek tanıma, finans sistemleri, işletme araştırmaları, veri analizleri ve benzeri birçok alanda kullanılmaktadır.

Araştırmacıların bulanık sistemleri kullanması için genel olarak iki sebep vardır (Şen, 1999). Bunlar:

a) Çok karmaşık olmaları nedeniyle doğa olaylarının kesin sonuç verebilecek denklemlerle ifade edilememesi ve bunun doğal sonucu olarak da araştırmacının kesin olmasa bile yaklaşık fakat çözülebilirliği olan yöntemlere başvurmayı her zaman tercih etmesi,

b) Mühendislikte kullanılan bütün teori ve denklemlerin, gerçek dünyayı yaklaşık bir şekilde ifade etmesidir.



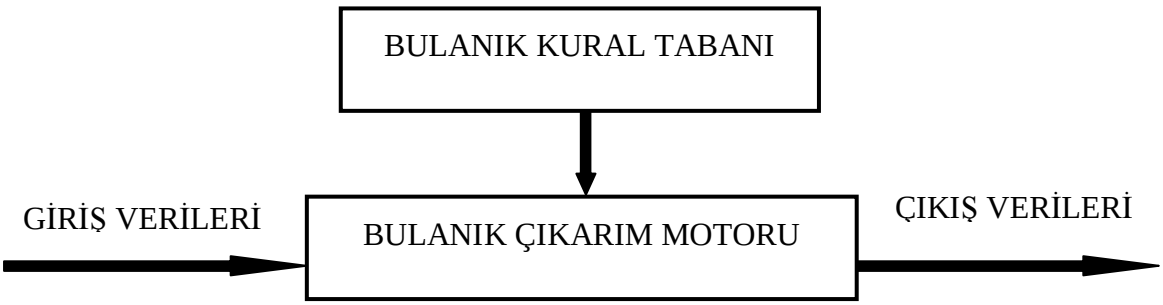
Şekil 3.1 Bulanık mantığın bilimsel yöntemler arasındaki yeri (Şen, 2000)

Şimdiye kadar öğrenilen matematik, stokastik veya kavramsal sistemlerin hemen hepsi klasik sistem sınıfındadır ve Şekil 3.2' de verilen üç ayrı birimden ibarettir (Şen, 1999).



Şekil 3.2 Klasik Sistem (Şen, 1999)

Bu birimler; giriş, bu girişi çıkışa dönüştüren, sistem davranışı denilen bir kutu ve buradan olan çıkış kısımlarıdır. Bulanık sistemlerin bu klasik tasarımdan farkı, sistem davranışı kısmının ikiye ayrılarak Şekil 3.3'te gösterildiği gibi kendi aralarında bağlantılı dört birimin oluşmasıdır (Şen, 1999).



Şekil 3.3 Genel Bulanık Sistem (Şen, 2000)

Bu birimler:

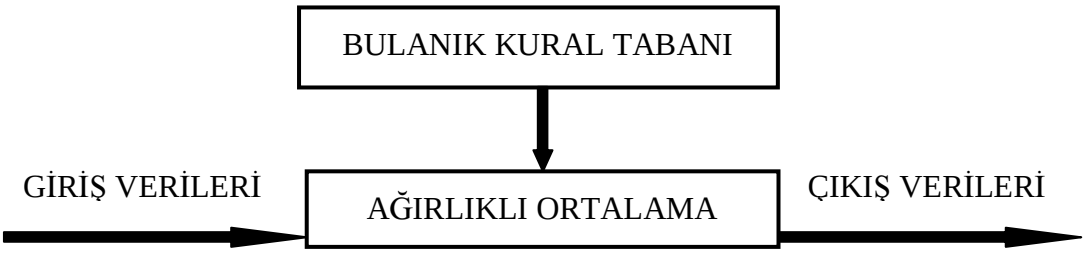
1) **Giriş Birimi:** İncelenecek olayın maruz kaldığı girdi değişkenlerini ve bunlar hakkındaki tüm bilgileri içermektedir. Buna genel veri tabanı veya kısaca giriş adı verilmektedir.

Genel veri tabanı adı verilmesinin nedeni, buradaki bilgilerin sayısal veya sözel olabilmesidir.

2) **Bulanık Kural Taban Birimi:** Veri tabanındaki girişleri, çıkış değişkenlerine bağlayan mantıksal 'EĞER-İSE' türünde yazılabilen kuralların tümünü içermektedir. Bu kuralların yazılmasında sadece, girdi verileri ile çıktılar arasında olabilecek tüm ara (bulanık küme) bağlantılar düşünülür. Böylece, her bir kural girdi uzayının bir parçasını çıktı uzayına mantıksal olarak bağlar. İşte bu bağlantıların tümü, kural tabanını oluşturmaktadır.
3) **Bulanık Çıkarım Motoru Birimi:** Bulanık kural tabanında giriş ve çıkış bulanık kümeleri arasında kurulmuş olan parça, ilişkilerin hepsini bir araya toplayarak sistemin bir çıkışlı davranmasını sağlayan işlemler topluluğunu içeren bir mekanizmadır. Bu motor, her bir kuralın çıkarımlarını bir araya toplayarak, tüm sistemin girdiler paralelinde nasıl bir çıktı vereceğinin belirlenmesine yaramaktadır.
4) **Çıktı Birimi:** Bilgi ve bulanık kural tabanlarının, bulanık çıkarım motoru ile etkileşimi sonunda elde edilen çıktı değer topluluğunu belirtilmektedir. Şekil 3.3'teki sistem temel bir genel bulanık sistemi temsil etmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, veri tabanındaki bilgilerin ve çıktıların bulanık değerler olmasıdır. Şekil 3.3'teki sistemde, her birim bulanık kümelerden oluşmaktadır. Temel bulanık sistemin en önemli sakıncası, sayısal olan veri tabanının, böyle bir genel bulanık sisteme girememesi ve çıktıların sayısal olmaması yani, mühendislik tasarımlarında doğrudan kullanılamamasıdır.

Genel bulanık sistemin sakıncalarını bir dereceye kadar ortadan kaldırabilmek için Takagi ve Sugeno (1985) ve Sugeno ve Kank (1988) tarafından teklif edilen Takagi, Sugeno, Kank (TSK) bulanık sistemi denilen sistem kullanılmaktadır. Burada veri tabanındaki girdiler, birer sayı ve bulanık kural, çıkarım motorunun çalışması sonunda elde edilen çıktılar ise girdilerin bir fonksiyonu şeklindedir. Yani, kural tabanındaki öncül kısımların değişkenleri İSE'den sonraki kural soncul kısmına, birer doğrusal fonksiyonu olarak yansıtılmaktadır (Şen, 2004).

Bütün kuralların soncul kısımları, çoklu doğrusal denklemden ibarettir. Böyle bir yapıya sahip olan bulanık sistemde, soncullar bulanık küme şeklinde olmadıklarından Şekil 3.3'teki 'Bulanık Çıkarım Motoru' birimi yerine, ağırlıklı çıkarım hesaplaması birimi gelmektedir. Bu birimde her bir kuralın öncül kısmından hesaplanan üyelik dereceleri, o kuralın ağırlığı olarak atanmaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 TSK Bulanık Sistemi (Şen, 2000)

Böyle bir bulanık sistemde çıktı uzayı, girdilerin fonksiyonu olarak her bir alt uzayda geçerli bir kural almak üzere temsil edilmiştir. Ancak TSK bulanık sisteminde, 'İSE' kısmından sonra matematiksel bir ilişki bulunmamasının bazı sakıncaları vardır. Kuralların soncul kısımları insanlar tarafından verilecek sözel bilgileri modelleyememektedir. Ayrıca giriş-çıkış değişkenleri arasında yazılması mümkün olan tüm kurallar, soncul kısımların bulanık olmaması dolayısıyla yazılamamaktadır.

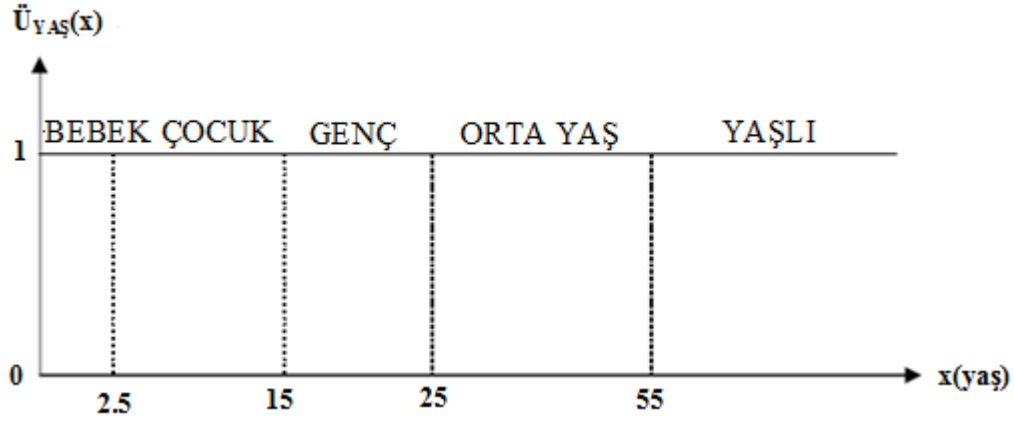
3.4 Üyelik Fonksiyonları

Küme üyelerinin değerleri ile değişiklik gösteren böyle bir eğriye üyelik fonksiyonu adı verilmektedir. Üyelik fonksiyonlarının en önemli özelliklerinden biri, alt küme sınırlarındaki değerlerin orta öğelere göre daha düşük olmasıdır. Ancak, klasik kümelere benzerlik teşkil etmesi açısından en büyük önem derecesine sahip olan ortaya yakın öğelere 1 değeri atanırsa, diğerlerinin 0 ile 1 arasında ondalıklı ve sürekli değişen değerler olacağı sonucuna varılmaktadır. Bu şekilde 0 ile 1 arasındaki değişimin, her bir öğe için değerine üyelik derecesi, bunun bir alt küme içindeki değişimine ise üyelik fonksiyonu adı verilmektedir. Üyelik fonksiyonu şemsiyesi altında toplanan öğeler, önem derecelerine göre birer üyelik derecesine sahip olmaktadır (Şen, 2004).

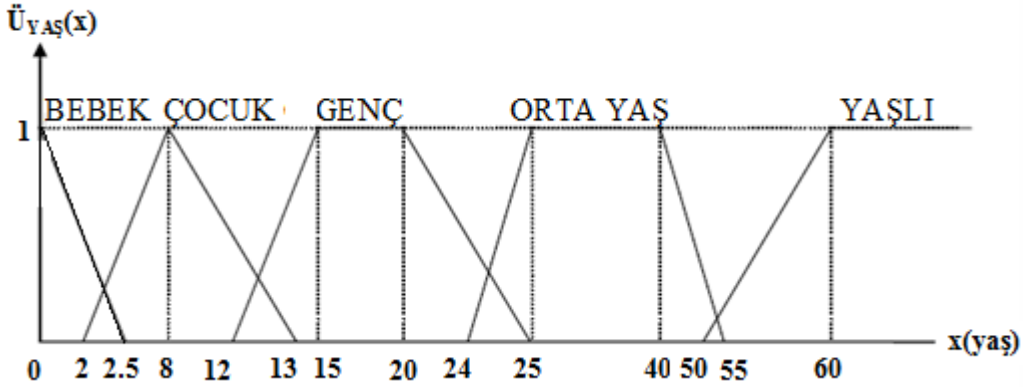
Literatürde kullanılan üyelik fonksiyonları: üçgen üyelik fonksiyonu, yamuk üyelik fonksiyonu, Gauss üyelik fonksiyonu, genelleştirilmiş çan üyelik fonksiyonu ve sigmoidal üyelik fonksiyonudur. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı ve bize kolaylık sağlayan üçgen üyelik fonksiyonu ve yamuk üyelik fonksiyonudur.

Daha önce, herhangi bir elemanın bulanık bir kümeye üyelik (aitlik) derecesinden söz edilmiştir. Bir x değeri için bir üyelik derecesi atanmakta, kesin veriler için ise yine değerler kümesinin her bir elemanı için ayrı ayrı üyelik derecesi atanmaktadır. Eğer değerler kümesi sürekli ise bu durumda üyelik dereceleri de x değerlerine bağlı bir fonksiyon (f(x)) şeklinde alınmaktadır. Değişen x değerlerine ve atanan üyelik fonksiyonuna göre üyelik dereceleri de değişmektedir. Örneğin, "yaş" uzayının "bebek", "çocuk", "genç", "orta yaş" ile "yaşlı" alt

kümeleri için, önce klasik, daha sonra bulanık mantığa göre birer üyelik fonksiyonu belirlendiğinde, klasik kümelerin üyelik fonksiyonları ya bir nokta veya yatay bir doğru şeklinde iken bulanık kümelerin üyelik fonksiyonları doğrusal olmayan herhangi bir fonksiyon şeklinde olmaktadır. Bu seçim uzman tarafından elemanların bulanık kümeye üyelik derecesine göre yapılmaktadır. İkili mantığa göre klasik kümelerin üyelik fonksiyonları arasında bir geçiş bölgesi yoktur. Oysa bulanık kümelerin üyelik fonksiyonları iç içe geçmektedir (Şekil 3.5 ve Şekil 3.6).



Şekil 3.5 Klasik kümelerin üyelik fonksiyonları (Toprak, 2002)

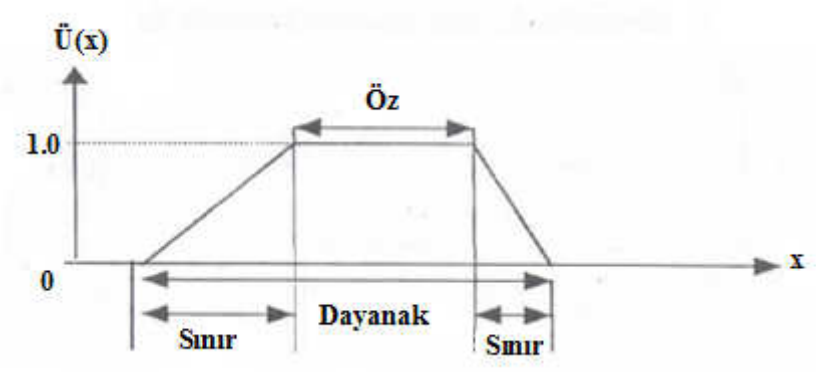


Şekil 3.6 Bulanık kümelerin üyelik fonksiyonları (Toprak, 2002)

Şekil 3.6'da "yaş" uzayında, "bebek" yaşı sıfırdan başlamakta ve 2.5 yaşına kadar sürmektedir. "Bebek" yaşı en küçük yaş grubudur. O halde en düşük yaş olan sıfır yaş, en büyük üyelik derecesi olan 1 ile "bebek" bulanık kümesine ait olacaktır. Mantık olarak, "sıfır" yaştan uzaklaştıkça bebeklik yaşından uzaklaşma, buna karşın "çocukluk " yaşına yaklaşma söz konusu olacaktır. Nitekim, "bebek" bulanık alt kümesinin üyelik fonksiyonu, gittikçe azalan üyelik derecesi ile en yüksek bebek yaşı olan 2.5 yaşında sıfır olacaktır (Toprak, 2002).

3.4.1 Üyelik Fonksiyonunun Kısımları

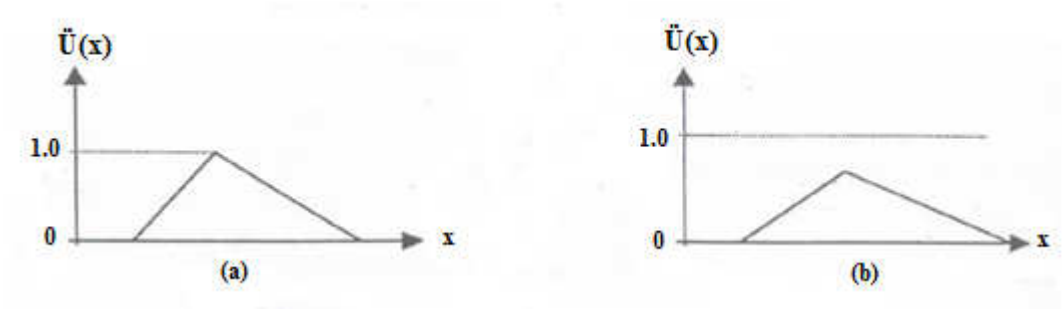
Üyelik fonksiyonlarının daha bilimsel terminoloji ile açıklanması aşağıda yapılmaktadır. Genel olarak, yamuk şeklindeki bir üyelik fonksiyonu Şekil 3.7'de gösterildiği gibi değişik kısımlara sahiptir.



Şekil 3.7 Üyelik fonksiyonu kısımları (Şen, 2004)

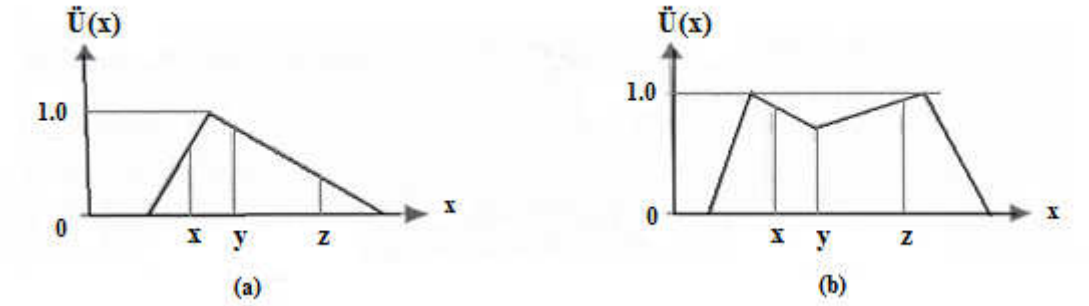
Şekil 3.7'deki gibi verilen bir bulanık alt kümede bir değil, birden fazla öğenin üyelik derecesi 1' e eşit alınabilmektedir. Bu durumda, 1 üyelik dereceli öğelerin tam anlamı ile hiçbir şüphe olmadan sadece o alt kümeye ait olduğu sonucuna varılmaktadır. Böyle üyelik derecesine sahip olan öğeler, alt kümenin orta kısmında toplanmıştır. Üyelik dereceleri 1'e eşit olan öğelerin toplandığı alt küme kısmına, o alt kümenin özü denmektedir (ü(x) = 1'dir). Üçgen şeklindeki üyelik fonksiyonunda sadece bir öğenin üyelik derecesi 1'e eşit olduğundan, üçgen üyelik fonksiyonlarının özü bir nokta olarak karşımıza çıkmaktadır. Bir alt kümenin tüm öğelerini içeren aralığa, o alt kümenin dayanağı adı verilmektedir. Dayanak kısmında bulunan her öğenin az veya çok değerde (0 ile 1 arasında) üyelik dereceleri vardır. Bunun matematik gösterimi ü(x) > 0'dır (Şen, 1999).

Üyelik dereceleri 1'e veya 0'a eşit olmayan öğelerin oluşturduğu kısımlara üyelik fonksiyonunun sınırları veya geçiş bölgeleri adı verilmektedir. Bunun matematik tanımı 0 < ü(x) < 1 şeklindedir. Bunlar alt kümenin kısmi öğeleridir. Genel olarak, tüm üyelik fonksiyonlarında biri sağda diğeri de solda olmak üzere iki tane geçiş bölgesi bulunmaktadır. Şekil 3.7'deki en sol ve en sağdaki bulanık kümelerde birer tane geçiş bölgesi vardır. Yukarıda şekil olarak açıklanan bu üç özelliğe ilave olarak, üyelik fonksiyonunun sahip olması gerekli olan iki tane daha özellik bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, bulanık kümenin normal olduğunu tespit etmemize yarayan bir kavramdır. Buna göre normal bulanık kümede, en azından bir tane üyelik derecesi 1'e eşit olan öğe bulunmalıdır. Şekil 3.8, normal ve normal olmayan bulanık kümeleri göstermektedir.



Şekil 3.8 Bulanık kümeler a) Normal bulanık küme b) Normal olmayan bulanık küme (Şen, 2004)

İkinci özellik ise bulanık kümenin dış bükey (konveks) olmasıdır. Dış bükey olan bulanık kümelerde üyelik fonksiyonu kümenin dayanağı üzerinde, ya sürekli artar veya sürekli azalır veya üçgen üyelik fonksiyonunda olduğu gibi önce sürekli olarak üyelik derecesi bir öğede 1'e eşit oluncaya kadar artar, ondan sonraki dayanağa düşen öğeler için sürekli azalır. Bunun aksi durumlar da söz konusudur. Ancak, onlar bulanık kümelere üyelik fonksiyonu olamaz. Şekil 3.9'da dış bükey olan ve olmayan bulanık alt kümelere bazı örnekler gösterilmiştir.



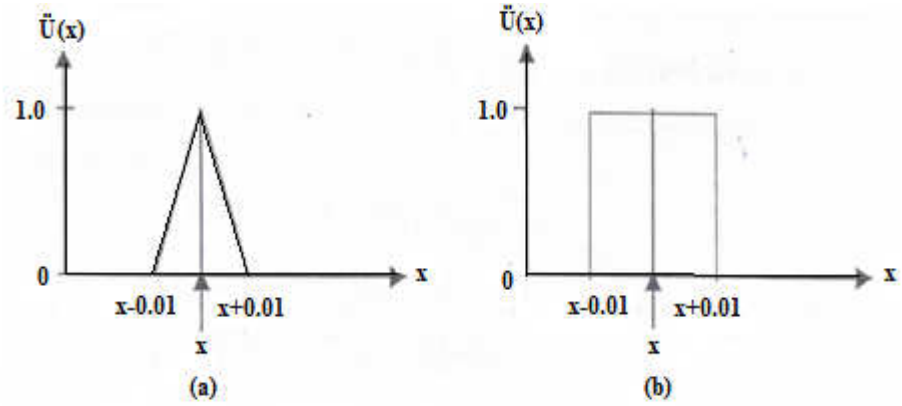
Şekil 3.9 Bulanık kümeler (a) Dış bükey (b) Dış bükey olmayan (Şen, 2004)

Bulanık kümelerin üyelik fonksiyonlarında üyelik derecesinin 0.5'e eşit olması durumundaki noktaya geçiş noktası adı verilmektedir. Bu durum geçiş noktasında, ü(x) = 0.5 olması anlamına gelmektedir. Bulanık kümenin yüksekliği denilen bir büyüklük ise üyelik derecesinin en büyük olduğu öğelere karşı gelmektedir. Yüksekliği 1'e eşit olmayan bulanık kümeler normal olmadıklarından herhangi bir bulanık küme, mantık ve sistem içerisinde kullanılamazlar. Normal olmayan bulanık kümeleri normal hale dönüştürmek için, mevcut her bir üyelik derecesinin, en büyük üyelik derecesine bölünmesi gerekmektedir (Şen, 1999).

3.4.2 Bulanıklaştırma

Pratikte, klasik küme şeklinde beliren değişim aralıklarının bulanıklaştırılması, bulanık küme, mantık ve sistem işlemleri için gereklidir. Bunun için, bir aralıkta bulunabilecek öğelerin

hepsinin, 1'e eşit üyelik derecesine sahip olması yerine, 0 ile 1 arasında değişik değerlere sahip olması düşünülmektedir. Bazı öğelerin belirsizlik içerdikleri kabul edilmektedir. Özellikle, bazı cihazların hassaslığı diye tabir edilen durumlarda mesela (+,-) % 1 'lik hassaslık, ölçülen x büyüklüğünün x+0.01 ve x-0.01 arasında değişeceği beklentisini ifade etmektedir. Bunun klasik ve bulanık kümelerde gösterimi Şekil 3.10 'da verilmiştir.



Şekil 3.10 Hassaslık (a) Bulanık (b) Klasik (Şen, 1999)

Bulanıklaştırma sürecinde ele alınan üyelik fonksiyonları, problemin yapısına ve amacına uygun olmalıdır. Genel anlamda üyelik fonksiyonları sezgisel, matematik, geometrik ya da istatistiksel yaklaşımlara dayandırılabilmektedir (Arslan, 2007).

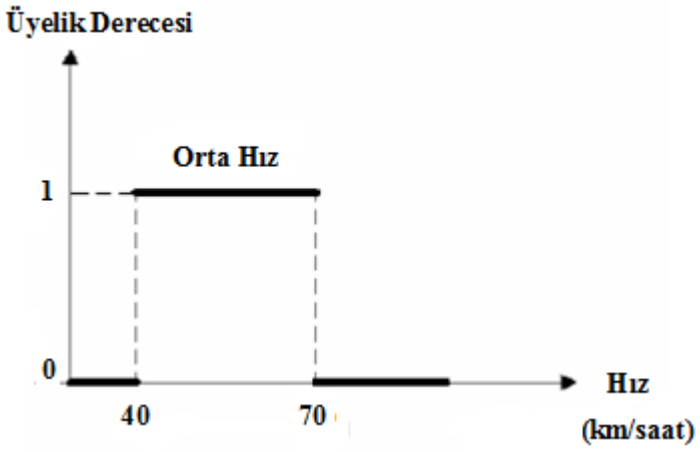
3.5 Kümeler

Küme kavramı aslında bir tür sınıflandırma kavramıdır. İnsanoğlu ilk çağlardan beri küme kavramını kullanmıştır. İlk zamanlarda insanlar “küme”yi kavramlaştırmadan, başka bir ifade ile “küme”yi, “küme” olduğunu bilmeden kullanmıştır. Aynı şekilde iletişim, düşünme, tasvir ve karar için ilk insandan itibaren kümeler kullanılmıştır. Örneğin, “bebekler”, “çocuklar”, “yetişkinler”, “yaşlılar”, “kadınlar”, “erkekler”, “koyunlar”, “sığırlar”, “vahşi hayvanlar” gibi terimler aslında birer sınıf dolayısıyla birer kümeyi temsil etmektedir (Şen, 1999).

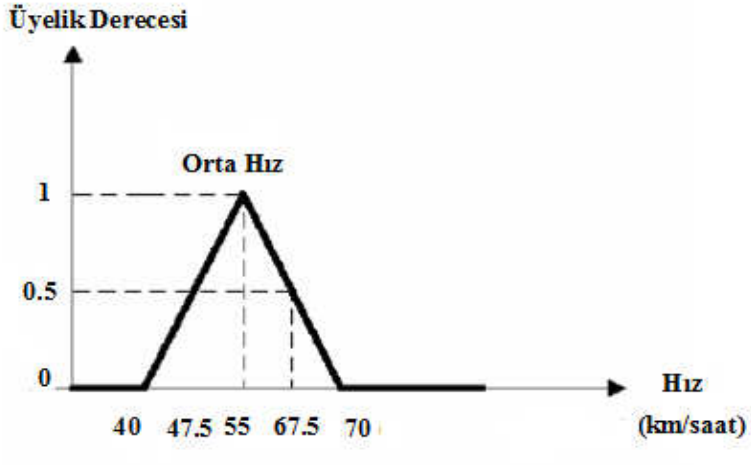
“Kümeler” temel matematik ve mantık kavramlarının esaslarını teşkil etmektedir. Aslında insan düşüncesinin en temel öğelerini kümeler meydana getirir, fakat insanoğlu onları günlük hayatının her safhasında kullanmasına rağmen küme kavramını bilmeyebilir. Artık düşünce sisteminde sistematik bir şekilde mantık ve matematiğin kullanılması ile küme kavramları da otomatik olarak kullanılır hale gelmiştir. Bu durum eğitilmiş veya fazlaca eğitilmemiş herkeste vardır. Eğitim sisteminin geçmişteki klasik matematik yerine modern matematik haline dönüştürülmesinde kümeler teorisine önemli bir yer verilmiştir (Şen 2004).

3.5.1 Klasik Kümeler

Klasik mantıkta bir olayın olabilirlik derecesi 1 (doğru) ve 0 (yanlış) olmak üzere iki çeşittir. Dolayısıyla klasik mantıkta olayın olabilirlik derecesi 1 ile 0 arasında herhangi bir değer olamaz. Olay olarak hızı düşünecek olursak; 40 km/saat ve 70 km/saat arası orta hız olarak kabul edilirse bu durumda Şekil 3.11a'da gösterildiği gibi klasik mantıkta 40 km/saat ve 70 km/saat dahil olmak üzere bu iki değer arasında her hız değeri orta hız olarak kabul edilir. Yani bu değerler için olabilirlik derecesi 1'dir. Sınır hız değeri arasında yorum yapmak mümkün değildir (Zadeh, 1965). Oysa gerçek hayatta her kümenin sınırı ve dolayısıyla bu kümelere ait her elemanın özellikleri o kadar kesin değildir. Dolayısıyla klasik küme anlayışı böyle durumları ifade etmekte yetersiz kalmaktadır (Toprak, 2002). Bu durumu daha olumlu hale getirmek için Bulanık Mantık kullanılmaktadır (Zadeh, 1965).



(a)



(b)

Şekil 3.11 Hız grafiği a) Klasik mantık b) Bulanık mantık (Zadeh, 1965)

3.5.2 Bulanık Kümeler

Bulanık kümelerin arasındaki sınırlar klasik küme mantığının aksine çok net ve keskin değildir. Bulanık mantıkta sınır ve ara değerler için yalnız bir durum yoktur. Çok seviyeli mantığın bir çeşidi olan olabilirlik derecesi (0,1) arasında değişik değerler alabilmektedir. Şekil 3.11b'de gösterildiği gibi 40-70 km/saat arası yine orta hız olarak kabul edilirse bu iki değer arasındaki hızların olabilirlik dereceleri değişik değerlere sahiptir. Bu durumda 40 km/saat ve 70 km/saat hızlarının olabilirlik derecesi 0 olur. Yani orta hız sayılmazlar. 55 km/saat hızının olabilirlik derecesi 1 olur. Yani bu değer tam orta hız sayılır. Dolayısıyla bir değerden diğer bir değere daha yumuşak bir geçiş yapmış olur. Ayrıca 47.5 km/saat ve 67.5 km/saat hızlarının olabilirlik derecesi 5.0'tir. Bu hız değerleri noktalarına geçiş noktası adı verilmektedir. Bulanık mantıkta Şekil 3.11b'de gösterilen eğriye üyelik fonksiyonu adı verilmektedir (Zadeh, 1965). Hız ekseni üzerinde başka hız grupları için üyelik fonksiyonları gösterilebilmektedir (çok yavaş, yavaş, orta, hızlı, çok hızlı gibi). Hız eksenindeki tüm hız değerlerinin bulunduğu bulanık küme, hız için evrensel küme olarak adlandırılmaktadır. Her hızın üyelik fonksiyonunda aldığı olabilirlik derecesi, üyelik derecesi olarak isimlendirilmektedir (Şen, 2004).

Bulanık küme mantığına göre, bir elemanın bir kümenin elemanı olduğunun bilinmesi o elemanın tanımlanması için yeterli olmamaktadır. Aynı zamanda, elemanın hangi üyelik derecesi ile o kümeye ait olduğunun da bilinmesi gerekmektedir. Örneğin, 40 derecelik bir sıcaklık, ekvator bölgesinde "sıcaklık" uzayının bir alt kümesi olan "sıcak" bulanık kümesinin 0.9l'lik üyelik derecesi ile bir elemanı iken, aynı zamanda "çok sıcak" bulanık kümesinin de 0.2'lik üyelik derecesi ile elemanı olabilir. Oysa aynı sıcaklık derecesi kutuplarda "sıcaklık" uzayının bir alt kümesi olan "çok çok sıcak" bulanık kümesinin 1.0 üyelik derecesi ile elemanı olabilir. O halde, değerlerin bir bulanık kümeye aitlik ölçüsünü gösteren "üyelik derecesi" her zaman her yerde aynı olmayabilir. Bu daha çok alt kümenin ait olduğu uzaya bağlıdır. Nitekim "çok sıcak" tanımlaması bir insanın zihninde ekvator ve kutup bölgeleri için farklı sıcaklık değerlerini çağrıştırdığı gibi, yaz ve kış mevsimlerinin uzayları için de farklı sıcaklık değerlerini çağrıştırmaktadır (Toprak, 2002).

3.5.3 Bulanık Küme Notasyonu

Bulanık küme işlemleri ile özelliklerinin tanımlanması ve ifade edilmesi için klasik kümelerde olduğu gibi bazı notasyonlara gereksinim duyulmaktadır. Bu notasyonlar genel olarak klasik kümelerin notasyonlarından pek farklı değildir. Bu bölümde klasik kümelerle karışmaması için, notasyon olarak bulanık kümeler, büyük harflerin altında bir çizgi işareti ile

gösterilecektir. Örneğin, A kümesinin bulanık kümedeki karşılığı $\underline{A}$'dır. x ∈ A ise x'in üyelik derecesi $Ü_{\underline{A}}(x)$ ile gösterilmektedir. X klasik kümesi X ={x_1,x_2,x_3 …} şeklinde gösterilmektedir. Bunun bulanık küme gösterimi ise;

$$\underline{X}= \left\{ \frac{ü_x(x_1)}{x_1} + \frac{ü_x(x_2)}{x_2} + ... \right\} = \left\{ \sum_i \frac{ü_x(x_i)}{x_i} \right. \tag{3.1}$$

şeklindedir.

Bulanık kümenin sürekli olması durumunda ise;

$$\underline{X}= \left\{ \int \frac{ü_x(x)}{x} \right. \tag{3.2}$$

şeklini almaktadır.

Bulanık küme gösteriminin yukarıdaki iki halinde de, bölüm işareti asla bölmeyi göstermez, küme elemanları ile o elemanların üyelik derecesini birbirinden ayırmak için kullanılmaktadır. Bu denklemlerdeki + işareti de toplama işareti değil, küme elemanlarının topluluğunu ifade eden bir işarettir. Benzer şekilde integral işareti de bilinen integral anlamına gelmez, topluluğu gösteren bir işaret olarak kullanılmaktadır. Örneğin, "sıcaklık" uzayının iki farklı bulanık kümesi, elemanları ile birlikte

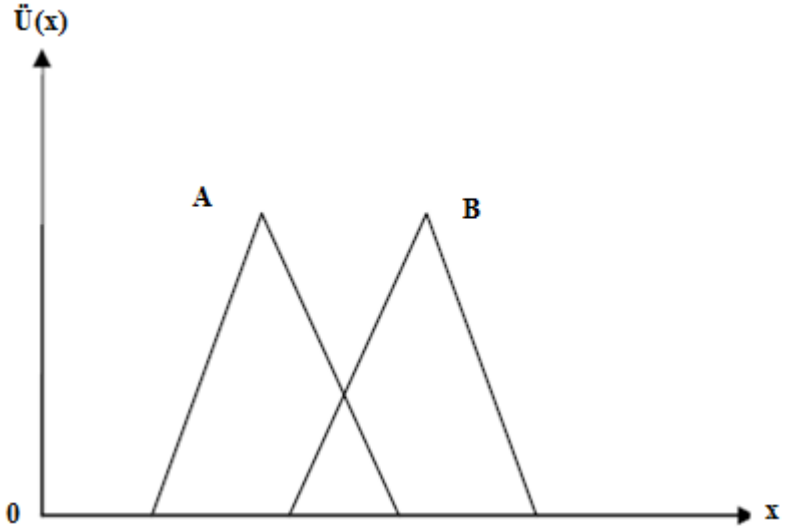
$\underline{A}$={0.2/40+0.4/45+0.6/50+0.8/55+1/60} (3.3)

ve

$\underline{B}$={0.2/20+0.4/25+0.6/30+0.8/35+1/40} (3.4)

şeklinde gösterilebilir.

Herhangi iki bulanık kümenin klasik küme Venn diyagramına karşı gelen gösterimi Şekil 3.12'de verilmiştir. Diğer notasyonlar ise tıpkı klasik küme anlayışındaki gibidir. Farklı olan, kesişim (∩) ve bileşim (∪) işaretleri yerine "VE" ve "VEYA" kelimelerini ifade eden kesişim (^) ve bileşim (Y) sembollerinin gelmesidir. $\underline{A}$ ve $\underline{B}$ gibi iki bulanık kümenin bileşimi, $\underline{A}$'da VEYA $\underline{B}$'de kesişimi ise $\underline{A}$ ve $\underline{B}$'de olan elemanların kümesi anlamına gelmektedir. Sırasıyla, $\underline{A}Y\underline{B}$ ve $\underline{A}^\underline{B}$ şeklinde gösterilmektedir. Birleşim veya kesişimin tanımlanması üyelik derecesi ile birlikte yapıldığı için $\underline{A}Y\underline{B}=Ü_{\underline{A}}(x)$ Y $Ü_{\underline{B}}(x)$ şeklinde gösterilmektedir.



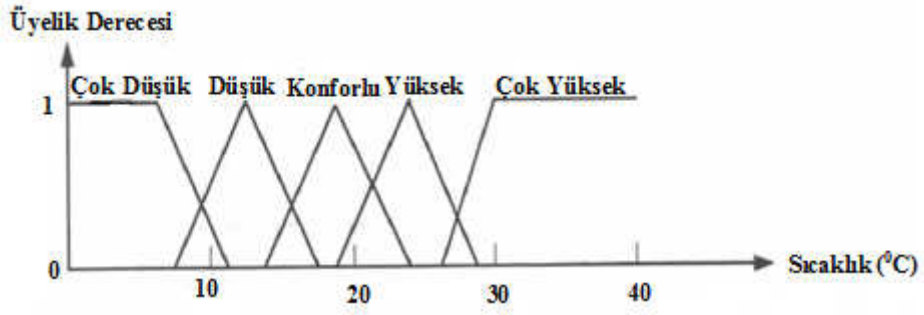
Şekil 3.12 İki bulanık kümenin Venn diyagramı (Şen, 2004)

3.6 Bulanık Mantık Yöntemleri

Mamdani ve Sugeno gibi birçok araştırmacı, bilgisayar ortamında insan tecrübesini operatör olarak kullanan, bulanık mantık yöntemlerini geliştirmeye yönelik çalışmalar yapmışlardır. Bu sistemler bulanık kümeler, bulanık mantık ve bulanık işlemcilerini kullanarak, insan kararlarını işleme dahil etmektedirler. Bunlardan en önemli ikisi, Mamdani ve Takagi-Sugeno tipi bulanık mantık yöntemleridir. Aşağıda bu yöntemlerin temelleri özetle anlatılacaktır.

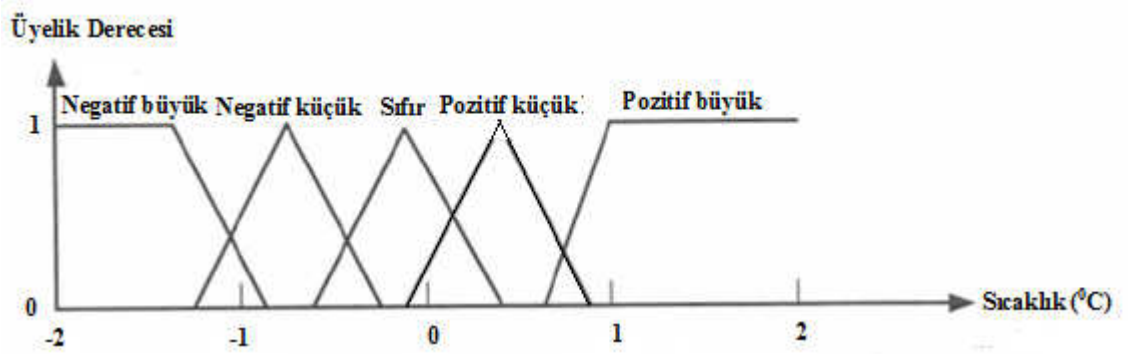
3.6.1 Mamdani Bulanık Mantık Yöntemi

Mamdani bulanık mantığı, yöntem durumlarını açıklamak için dile ait değişkenleri kullanmakta ve bu değişkenleri, kontrol kuralları için girdi olarak belirlemektedir. Şekil 3.13'te görülen ısıtıcı sistem örneğinde, oda sıcaklıkları giriş değişkenleridir. Sıcaklık değişkenleri çok az, az, konforlu, yüksek ve çok yüksek olarak bölünmüştür.



Şekil 3.13 Dilsel değişkenler, sıcaklık (Pedrycz, 1993)

Sıcaklık değişiminin üyelik fonksiyonu Şekil 3.14'te gösterilmiştir.



Şekil 3.14 Dile ait değişkenler "Sıcaklıktaki Değişim" (Pedrycz, 1993)

Bu yöntem, çıkış değişkenlerinin üyelikleri tespit edilirken kullanılmaktadır. Güç; küçük, orta ve büyük olarak sınıflandırılmaktadır. Bu iki dile ait değişken ile sıcaklık sisteminin kuralları belirlenmektedir. Bu yöntemde kurallar aracılığıyla her durum için farklı güç bileşeni atanmaktadır. Bu yöntemde, insan tecrübesine dayalı kurallar kullanılmaktadır. Eğer sıcaklık yüksek ve sıcaklık değişimi pozitif (az) ise güç az kullanılmaktadır.

Yukarıda anlatılan tüm adımlar Mamdani kontrolünün tasarımını amaçlamaktadır. Mamdani sisteminde giriş verilerine üyelik fonksiyon değerleri atanmakta, kural sonuçları hesaplanmaktadır. Hesaplanmış olan kural sonuçları ile modellenmek istenen olayı temsil eden çıktı verileri ve üyelik fonksiyonları belirlenmektedir.

Kural sonuçlarını topladığımız zaman, sistemi kontrol etmek için klasik çıktı değerine ihtiyaç duyarız. Buna durulaştırma denmektedir. Durulaştırmanın amacı, bulanık kümeyi klasik kümeye çevirmektir (Şen, 1999).

Mamdani metodunun avantajları;

a) Oluşturulması kolaydır,

b) Diğer bulanık metotların da temelini oluşturmaktadır,

c) İnsan düşüncesine uygundur.

Mamdani metodunun dezavantajları;

a) İşlemi kontrol etmek çabuk ve kolaydır ancak uzun vadeli sistemlerde başarılmaktadır (Sıcaklık kontrol sistemleri gibi),

b) Yüksek frekanslı giriş sistemlerini kontrol ettiği zaman, hassasiyeti arttırmak için ek beceriye ihtiyaç duymaktadır (Zimmerman, 1996).

Mamdani tipi bir bulanık model beş adımda oluşturulmaktadır.

a) Girdilerin bulanıklaştırılması: Öncül kısımdaki bütün bulanık ifadeleri kullanarak girdi değişkenlerine ait 0 ile 1 arasında değişen üyelik derecelerinin belirlenmesi,
b) Bulanık mantık işlemlerini kullanarak kural ağırlıklarının belirlenmesi,
c) Bulanık küme mantıksal işlemcilerin (ve, veya) uygulanması,
d) Sonuçların toplanması: Her bir kuralın çıktısını temsil eden bulanık kümelerin birleştirilmesi,
e) Durulaştırma: Tek bir sayıya dönüştürülmüş toplam bulanık küme sonuçlarının durulaştırılması.

3.6.2 Takagi–Sugeno Bulanık Mantık Yöntemi

Takagi - Sugeno bulanık mantığı ilk olarak 1985 yılında yayınlanmıştır. Bu yöntem, Mamdani yönteminin geliştirilmiş halidir. Girdi değişkenlerinin bulanıklaştırılması ve bulanık mantık işlemleri, Mamdani metoduyla aynıdır. İkisi arasındaki fark, Mamdani metodunda çıkış üyelik fonksiyonunun sözel ifadeler, Tagaki-Sugeno'da ise lineer veya sabit sayısal ifadeler şeklinde olmasıdır (Pedrycz, 1993).

Çıkış fonksiyonları sabit ise, bu fonksiyonlara sıfırıncı derece Sugeno bulanık modeli denmektedir. Örnek olarak;

'Eger x = $\underline{A}$ ve y = $\underline{B}$ ise z = k' (3.5)

A ve B, x ve y girdilerinin üyelik fonksiyonlarını ifade eden bulanık kümelerdir. 'k' ise sabit bir sonuç değeridir.

Birinci dereceden Sugeno bulanık modeli;

'Eğer x = $\underline{A}$ ve y = $\underline{B}$ ise z = f(x,y) = px+qy+r (c)' (3.6)

Denklemdeki $\underline{A}$ ve $\underline{B}$ bulanık kümeler, p, q, r ise sabitlerdir.

Sugeno metodunun avantajları;

a) Hesaplama için oldukça uygundur.

b) Lineer olmayan sistemleri kontrol etmek için lineer teknikleri kullanmaktadır.

c) Hassasiyeti arttırmak için çıktıları optimize edebilir.

d) Sürekli çıktı yüzeyine sahiptir.

e) Matematik ile analiz edilebilir.

Sugeno metodunun dezavantajları;

a) Sezgisel değildir.

b) Daha yüksek dereceden Sugeno metodu kullanıldığında karmaşıklaşmaktadır.

3.7 Uyarlanabilir Ağ Yapısına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS)

Bulanık sistemler, genel anlamda, giriş değişkenlerinden çıkış değişkenlerine dönüşümü sağlamak amacıyla bulanık kümeleri kullanan sistemlerdir (Zadeh, 1965). Bulanık mantık ile doğrudan sayısal karşılığı bulunmayan değişkenler uzman kişilerin görüş ve tecrübeleriyle modele aktarılabilir, anlaşılması kolaydır ve eksik ya da yetersiz verilerle işlem yapılabilmektedir. Bulanık mantık insanların günlük hayatlarında kullandığı dili kullanır, ayrıca ANFIS gibi uyarlanabilir teknikler yardımı ile girdi ve çıktı veri kümelerini kullanarak modellerin oluşturulmasında kolaylık sağlar (Yılmaz vd., 2008). ANFIS yapısı, Sugeno tipi bulanık sistemlerin, sinirsel öğrenme kabiliyetine sahip bir ağ yapısı olarak temsilinden ibarettir. Bu ağ, her biri belli bir fonksiyonu gerçekleştirmek üzere, katmanlar halinde yerleştirilmiş düğümlerin birleşiminden oluşmuştur (Ülke ve Doğan, 2008).

Bulanık çıkarım sistemleri için çok sayıda ve değişik modeller bulunmaktadır. Bu modellerden bazıları Mamdani, Tsukamoto ve Sugeno tipi çıkarım sistemleridir. Sugeno tipi çıkarım sistemi, girdi ve çıktı veri setlerine göre bulanık kuralların oluşturulması için sistematik bir yaklaşım sağlamaktadır. Parametrelerinin optimize edilebilmesinin kolaylığı bakımından diğer sistemlerden avantajlıdır. Sugeno tipi bulanık çıkarım sisteminde çıktı değişkeni, girdi değişkenlerinin lineer bir fonksiyonu ya da sabit bir fonksiyon şeklindeki üyelik fonksiyonuna sahiptir. Parametreleri optimize edilen Sugeno tipi çıkarım sistemlerine ANFIS adı verilmektedir (Jang ve Sun, 1995).

ANFIS tekniği, yeterli miktarda deneysel veri ve saha ölçümü mevcudiyetinde kullanışlı olan bir yöntemdir. Karmaşık doğa olaylarını matematiksel ifadeler kullanmadan modelleyen bir sistem olduğu için, klasik yaklaşımların yüksek hata verdiği veya çok karmaşık olduğu mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir. Bulanık mantık modellerinde en iyi çıktı verilerinin elde edilebilmesi amacıyla üyelik fonksiyonlarının türü ve şeklinin belirlenmesi için sistematik bir yol yoktur. Yeterli hassasiyette çıktılar elde edilmesi amacıyla model parametreleri, deney ve/veya saha ölçümlerinden elde edilen veri setlerinden yararlanılarak oluşturulmalıdır. Bu işlem ANN (Yapay Sinir Ağları) modelinin, optimize edilmiş girdi-çıktı verileri kullanılarak alıştırılmasıyla gerçekleştirilebilmektedir (Bakhtyar, 2008).

ANFIS temel olarak Bulanık Çıkarım Sistemi'nin (Fuzzy Inference System) sinir ağlarına uyarlanmış halidir. Melez öğrenme algoritmasına sahip olan ANFIS, bulanık eğer-ise kuralları

ile insan bilgisini yansıtan girdi çıktı yapısını ortaya koymaktadır. Jang (1993) tarafından ANFIS yöntemi geliştirilmiş ve doğrusal olmayan fonksiyonların modellenmesinde, kaotik zaman serilerinin tahmininde kullanılmıştır. MATLAB yazılımındaki Bulanık Mantık Modülü'nde bir kullanıcı ara yüzü (ANFIS Editor) aracılığı ile yöntem araştırmacıların kullanımına sunulmuştur. Yöntemin çıkış noktası, insan düşünce ve bilgisini yansıtan bulanık eğer-ise kurallarının avantajı ile sinirsel ağların öğrenme yeteneklerini bir araya getirerek etkili bir çözüm sunma gereksinimidir (Yücel ve Güneri, 2010).

Bulanık eğer-ise kuralları, "Eğer A koşul ise B sonuçtur." şeklinde ifade edilebilecek kurallar olup bulanık çıkarım sistemlerinin de temelini oluşturmaktadır. Yapıları itibariyle, bulanık ve belirsiz ortamlarda insan düşünce ve muhakeme yeteneğini yansıtma kabiliyeti bulunmaktadır. Bulanık çıkarım sistemi (FIS) de bulanık eğer-ise kurallarını kullanarak insan bilgisinin muhakeme sürecini ve nicel yönünü modelleyebilmektedir. Uyarlanabilir ağ, çeşitli sayıda birbirine bağlanmış düğümler içeren, elde bulunan girdi ve çıktı veri setini ortaya koymaya yarayan bir ağ yapısıdır. Her bir düğüm bir işlem birimi içerir ve düğümler arası bağlantılar, birleştirilen düğümler arasındaki nedensel ilişkiyi belirlemektedir. Düğümlerin hepsi veya bir kısmı uyarlanabilirdir. Bunun anlamı düğümlerin çıktısının bu düğümlerle ilişkili düzenlenebilir parametrelere dayandığıdır. Öğrenme kuralı, öngörülmüş bir hata ölçüsünü minimize etme adına bu parametrelerin nasıl güncellenmesi gerektiğini belirlemektedir. Hata ölçüsü ağın mevcut çıktısı ile beklenen çıktı arasındaki farkı belirten matematiksel bir gösterimdir.

ANFIS'in en önemli özelliği dereceli azaltım ve en küçük kareler yöntemini bir arada uygulayarak sunduğu melez (hybrid) öğrenme algoritmasıdır ve bu da ANFIS'in diğer yöntemlere yönelik üstünlüğünde temel teşkil etmektedir. Şekil 3.15'te üç girdili bir çıktılı Sugeno bulanık modeli ile buna karşılık gelen ANFIS yapısı yer almaktadır. Düğümlerin 4. katmana kadar ileri gidişlerinde çıktı parametreleri en küçük kareler yöntemi ile belirlenmekte, geriye doğru gidişte ise bu sefer öncül parametreler derceli azaltım yöntemi ile belirlenmektedir.

Şekil 3.15'te de belirtildiği üzere ANFIS beş katmandan oluşmaktadır. Beş katmandan oluşan ANFIS'in ancak iki katmanı ayarlanabilir ağırlıktadır (Şekil 3.15'te kare olarak gösterilen parametrelerdir) (Bakhtyar, 2008).

Her bir katmanın fonksiyonları aşağıda anlatılmaktadır (Yücel ve Güneri, 2010):

Katman 1 : Bu katmanda her düğüm kare olup bir düğüm fonksiyonu ile ilişkilidir.

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) \tag{3.7}$$

x i düğümü ile ilişkili girdi, A_i ise ilgili düğüm fonksiyonu ile ilişkili sözel değişkendir (iyi, çok iyi vs.). Diğer bir ifadeyle,O_i^1,A_i'nin üyelik fonksiyonu olup x'in A'yı ne kadar karşıladığının derecesini vermektedir. Genel olarak, maksimum $\mu_{A_i}(x)$ 1 ve minimum 0'a eşit olmak üzere çan eğrisi şeklinde seçilmektedir:

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x - c_i}{a_i}\right)^2\right]^{bi}} \tag{3.8}$$

veya

$$\mu_{A_i}(x) = \exp\left\{-\left(\frac{x - c_i}{a_i}\right)^2\right\} \tag{3.9}$$

$\{a_i, b_i, c_i\}$ parametre seti olup öncül parametreler olarak nitelendirilir. Bu aşamada çeşitli üyelik fonksiyonları kullanılabilmektedir.

Katman 2 : Bu katmanda yer alan bütün düğümler (Π) daire şeklinde olup gelen sinyalleri çarpıp değeri dışarı çıkarır.

$$\omega_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{A_i}(y), \; i=1, 2 \tag{3.10}$$

Her düğüm çıktısı, her bir kuralın ateşleme seviyesini (firing strength) göstermektedir.

Katman 3 : Bu katmanda yer alan bütün düğümler (N) daire şeklinde olup, i. düğüm, i. kuralın ateşleme seviyesinin tüm kuralların toplam ateşleme seviyesine oranını hesaplamaktadır.

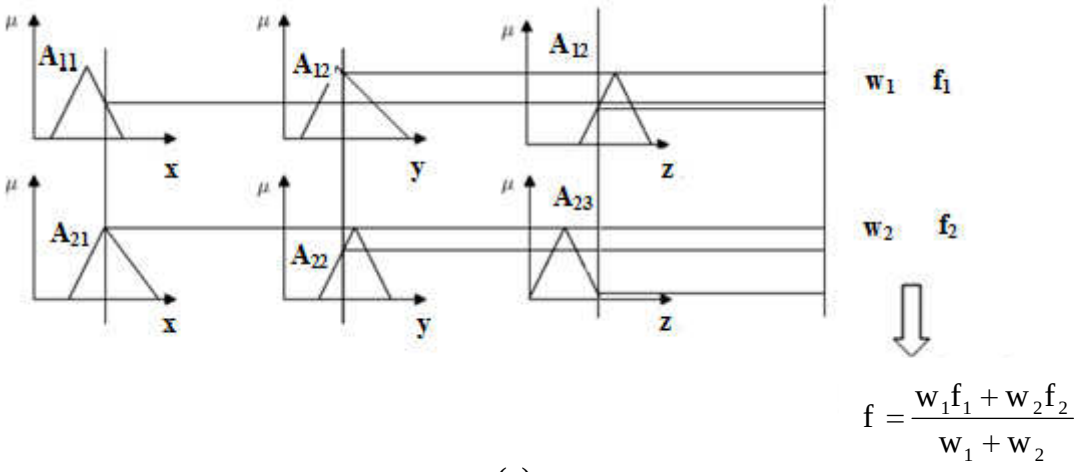
$$\overline{\omega_1} = \frac{\omega_i}{\omega_1 + \omega_2}, \; i=1, 2 \tag{3.11}$$

Bu katmanın çıktısı normalleştirilmiş ateşleme seviyesi olarak da nitelendirilmektedir.

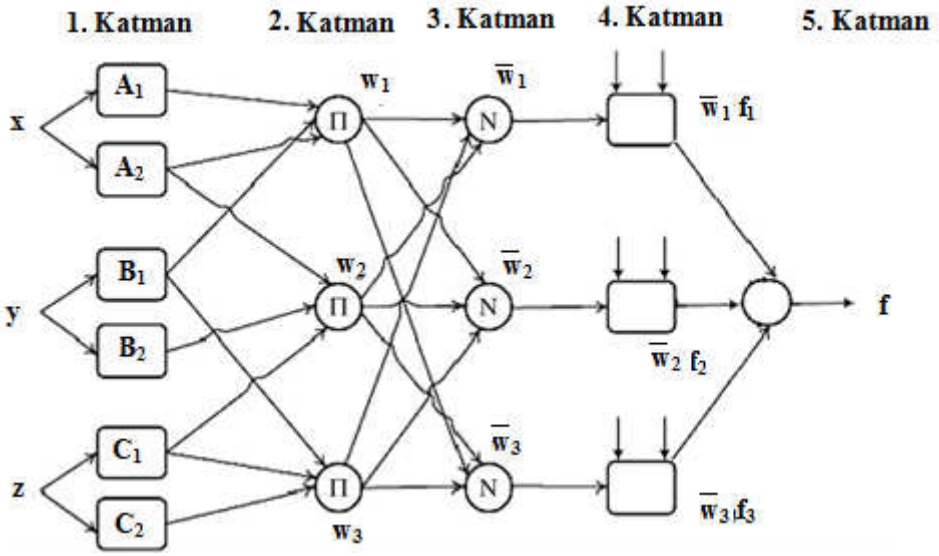
Katman 4 : Bu katmanda her düğüm kare olup bir düğüm fonksiyonu ile ilişkilidir.

$$O_i^4 = \overline{\omega_i} f_i = \overline{\omega_1}(p_i x + q_i y + r_i) \tag{3.12}$$

$\overline{\omega_1}$ Katman 3'ün çıktısı olup, {p_i, q_i, r_i} parametre seti çıktı parametreleri olarak nitelendirilmektedir.



(a)



(b)

3.15 a) Üç girdi parametresine sahip Sugeno tipi bulanık model b) Karşılık gelen ANFIS yapısı (Bakhtyar, 2008)

Katman 5 : Bu katmanda yer alan tek düğüm (Σ) daire şeklinde olup tüm çıktıyı bütün gelen sinyallerin toplamı şeklinde hesaplamaktadır.

$$O_i^5 = \sum_i \overline{\omega_i} f_i = \frac{\sum_i \omega_i f_i}{\sum_i \omega_i} \qquad (3.13)$$

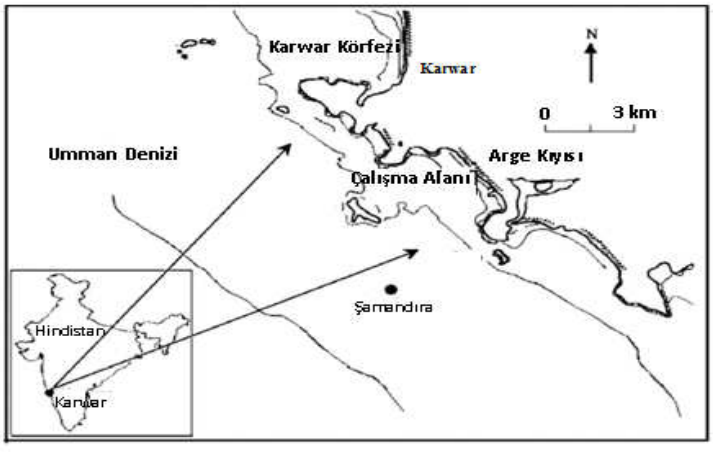
3.8 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımının Bulanık Mantıkla Modellenmesi ile İlgili Çalışmalar

Yakın kıyı bölgesinde kıyı boyu taşınımın doğru tahmini, kıyı çizgisi erozyonu ve kıyı

oluşumu kontrolü açısından esastır. Kıyı boyu katı madde taşınım tahmini için kırılan dalga karakteristiklerinin ve kıyı eğiminin fonksiyonu olan birçok ampirik formül ve parametrik model mevcuttur. Ancak bulanık mantık yöntemi ile kıyı boyu katı madde taşınımının belirlenmesi oldukça yeni bir konudur. Bu sebeple literatürde bu konu ile ilgili çok az sayıda çalışmaya rastlanmaktadır.

Bakhtiyar vd. (2008) çalışmalarında sörf bölgesindeki kıyı boyu katı madde taşınım debisini belirlemek amacıyla Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System (ANFIS, Uyarlanabilir ağ yapısına dayalı bulanık çıkarım sistemi) ve Fuzzy Inference System (FIS, Bulanık mantık sistemi) modelleri kurmuşlardır. Model tahmin kabiliyetini belirlemek üzere, aynı verilerle CERC, Walton Bruno (WB) ve Van Rijn (VR) yöntemleriyle elde ettikleri kıyı boyu katı madde taşınım debilerini karşılaştırmışlardır.

Araştırmacılar, Hindistan'ın kuzeyinde, Karwar yakınlarında bulunan kumsalın 4 km uzunluğundaki bölümünden elde edilen verilere göre FIS ve ANFIS modellerini kurmuşlardır. Kıyı çizgisi doğrusal, batimetri çizgileri neredeyse paraleldir. Karwar'ın kıta sahanlığının ortalama eğimi 1:500'dür. Sahanlık kumla kaplıdır ancak kıyıya yakın kısımda çamur bulunmaktadır. Çalışma alanında Haziran- Eylül ayları arası güneybatı musonu ve Ekim-Mayıs ayları arası musonun olmadığı dönem hakimdir. Bölgedeki gel-git çoğunlukla yarı günlüktür. Karwar Limanındaki gel-git için yapılan tahminlere göre kabarma 0.252 m ile 2 m arasındadır. Kırılan dalga yüksekliği 0.5 ile 1.2 m arasında, dalga periyodu 3-9 s arasındadır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16 Çalışma alanının şematik gösterimi (Bakhtiyar vd., 2008)

Araştırmacılar National Institute of Oceanography tarafından 16 m su derinliğinde konumlandırılan dalga şamandırası ile elde edilen dalga verilerini kullanmışlardır. Kıyı boyu katı madde taşınım miktarını Şubat-Mayıs 1990 arasında katı madde kapanı kullanarak

ölçmüşlerdir. FIS ve ANFIS modellerini uygulayabilmek için, veri setini eğitme, kontrol ve test bölümlerine ayırmışlardır. Çizelge 3.1'de dalga periyodunun, kırılma açısının, belirgin dalga yüksekliğinin ve kıyı boyu katı madde verilerinin istatistiksel parametreleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.1 Veri setlerinin istatistiksel parametreleri

Veri Seti	**Kıyı uzunluğu (km)**	**Veri türü**	x_{ort}	**Standart sapma (SS)**	SS/x_{ort}	x_{maks}	x_{min}
Eğitme	4	Dalga periyodu (s)	4.85	0.67	0.14	6.21	3.54
Eğitme	4	Kırılan dalga yüksekliği (m)	0.74	0.13	0.18	1.18	0.51
Eğitme	4	Kırılma açısı (^{0})	6.20	2.27	0.36	10.18	0.75
Eğitme	4	Katı madde (m^3/gün)	173.80	578.07	3.33	1179.57	-1173.37
Test	4	Dalga periyodu (s)	6.67	1.31	0.20	9.17	4.38
Test	4	Kırılan dalga yüksekliği (m)	1.04	0.132	0.13	1.18	0.73
Test	4	Kırılma açısı (^{0})	3.78	2.97	0.78	8.49	-5.28
Test	4	Katı madde (m^3/gün)	221.99	868.90	3.91	1334.42	-1560.91

Kıyı boyu katı madde taşınım debisini belirlemek üzere öncelikle FIS modeli kurulmuştur. Model girdileri dalga periyodu, dalga kırılma açısı ve dalga yüksekliği ve model çıktısı kıyı boyu katı madde taşınım debisidir. İkinci aşama olarak, oluşturulan FIS modeli kullanılarak ANFIS modeli kurulmuştur. ANFIS modeli kurulumunda eksiltmeli kümeleme yöntemi kullanılmış ve model eğitim verileri ile kalibre edilmiştir. Girdi parametrelerinin üyelik dereceleri Gauss tipi üyelik fonksiyonu ile belirlenmiştir.

Model sonuçları ve CERC, WB ve VR formüllerinden elde edilen sonuçlar, arazi ölçümlerinden elde edilen kıyı boyu katı madde taşınımı verileriyle karşılaştırılmış ve saçılım indeksi (SI), ortalama hata (OH), hata karelerinin ortalamasının karekökü (HKOK), determinasyon katsayısı (R^2) ve korelasyon katsayısı (R) değerleri tespit edilerek performansları incelenmiştir. Çizelge 3.2'de CERC, WB ve VR formülleriyle hesaplanan,

Çizelge 3.3'te ise FIS ve ANFIS modelleriyle tahmin edilen kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarının hata istatistikleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.2 Ölçüm değerlerine göre CERC, WB ve VR formüllerinden hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım debilerinin istatistikleri

Yöntem	**Ortalama ölçülen değer (m^3/gün)**	**Ortalama tahmin edilen değer (m^3/gün)**	**Sİ (%)**	**OH (m^3/gün)**	**HKOK**	**R^2**	**R**
CERC	221.99	872.25	51.9	620.58	1153.69	0.14	0.38
WB	221.99	354.01	27.9	141.66	620.27	0.51	0.71
VR	221.99	258.70	22.2	35.13	492.81	0.54	0.74

Çizelge 3.3 Ölçüm değerlerine göre FIS ve ANFIS modelleriyle tahmin edilen kıyı boyu katı madde taşınım debilerinin hata istatistikleri

Yöntem	**Veri türü**	**Ortalama net ölçüm değeri (m^3/gün)**	**Ortalama net tahmin edilen değer (m^3/gün)**	**Sİ (%)**	**OH (m^3/gün)**	**R^2**
FIS	Eğitme verisi	173.8	183.67	12.85	10.92	0.86
	Test verisi	221.99	253.64	20.06	29.31	0.79
ANFIS	Eğitme verisi	173.8	180.21	9.56	8.03	0.93
	Test verisi	221.99	245.32	17.32	25.52	0.86

Bakhtyar vd. (2008) çalışmalarında kıyı boyu katı madde taşınımının belirlenmesinde oldukça tercih edilen CERC, WB ve VR formüllerinin kapasitelerini değerlendirmek üzere saha ölçümlerinden elde edilen verilerle formüllerden hesaplanan değerleri karşılaştırmışlardır. Çizelge 3.2'de, bu formüller kullanılarak hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım değerleri için hata istatistikleri görülmektedir. CERC, WB ve VR formüllerinin ortalama hatalarına bakıldığında, üç formülün de gözlenen değerlerden yüksek sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Bu formüller saçılım indekslerine göre karşılaştırıldığında, CERC formülünün (Sİ= %51) en yüksek Sİ değerine sahip olduğu görülmektedir. Ardından WB (Sİ= %27) ve VR (Sİ= %22) eşitlikleri gelmektedir. Çizelge 3.2'de CERC formülünün korelasyon değerinin, WB ve VR

eşitliklerine göre çok daha düşük olduğu görülmektedir. CERC, WB ve VR eşitlikleri için HKOK değerleri sırasıyla 1153 m^3/gün, 620 m^3/gün ve 492 m^3/gün'dür. Bu eşitliklerin hata istatistiklerine bakıldığında, yaygın olarak kullanılmalarına rağmen tahmin kapasitelerinin yeterli olmadığı görülmektedir. Bakhtyar vd. (2008) CERC, WB ve VR eşitlikleriyle hesaplanan değerler ve ölçüm verileri arasındaki farkı şu üç nedene bağlamaktadırlar:

1) Bu formüllerde sürüntü modunda taşınan malzeme dikkate alınmamaktadır.
2) Kıyı boyu akıntıları su yüzeyinden derinlere inildikçe de etkili olmakta fakat bu formüllerde sadece yüzeydeki akıntı etkileri dikkate alınmaktadır.
3) CERC, WB ve VR formülleri yüksek dalga enerjisi koşulları için türetilen formüllerdir. Ancak araştırma bölgesi nispeten düşük dalga enerjisi koşullarına sahiptir.

Araştırmacılar CERC, WB ve VR formüllerinin tahmin kapasitelerinin ardından FIS ve ANFIS modellerinin tahmin kapasitelerini incelemişlerdir. Bunun için modellerde kullanılan eğitim veri setleri haricindeki ölçüm verilerini doğrulama verileri olarak kullanmış ve Çizelge 3.3'te görülen hata istatistiklerini elde etmişlerdir. Çalışmada incelenen beş yöntem de dikkate alındığında saha ölçümleriyle en iyi korelasyona sahip yöntemin ANFIS modeli olduğu görülmektedir. ANFIS modelinin ardından FIS modeli gelmektedir. Ortalama hata değerleri CERC, WB ve VR eşitliklerinde elde edilen ortalama hata değerlerinde sırayla 20, 6 ve 1.5 kat küçüktür. ANFIS modelinin saçılım indeksi (Sİ= % 17.3) ve ortalama hata değeri (OH= 25.52 m^3/gün) FIS modeline (Sİ= % 20.06, Sİ = 29.31 m^3/gün) göre daha düşük, R^2 değeri ise daha yüksektir.

Tüm sonuçlar karşılaştırıldığında ANFIS modelinin kıyı boyu katı madde taşınım debisi tahmin kapasitesinin FIS modelinden üstün olduğu görülmektedir. Ayrıca FIS ve ANFIS modelleri, CERC, WB ve VR ampirik formüllerine göre daha uyumlu sonuçlar vermektedir.

4. BULANIK MANTIK YÖNTEMİ ile KIYI BOYU KATI MADDE TAŞINIMININ MODELLENMESİ

Kıyı bölgelerinde taşınan katı madde miktarı, kıyıdaki morfolojik değişikliklerin ve kıyı yapılarının kıyı çizgisine etkilerinin belirlenmesi açısından oldukça önemli bir parametredir. Tüm liman ve kıyı mühendisliği yapılarının planlaması, operasyonu, tasarımı ve bakımı için kıyı boyu katı madde taşınım miktarı tahminlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Kıyı boyu katı madde taşınım tahmini için birçok ampirik formül ve sayısal model mevcut olmasına rağmen yeterli güvenilirlikte sonuçlar elde edilememektedir.

Mühendislik çalışmalarında sosyal ve doğal olayları deterministik ve analitik modeller ile birlikte işlemek çoğu zaman mümkün değildir. Bunların modellenmesi için belirsizlik teknikleri gerekmektedir. Bugüne kadar analitik, olasılık, istatistik, stokastik, dinamik modelleme teknikleri gibi bütün bilimsel yöntemler genelde iki unsur gerektirmiştir. Bunlardan ilki yapılan kabuller, diğeri ise sayısal verilerdir. Kabuller incelenen olayı mevcut bilgi ve yöntemlerle insanın kavrayabileceği en basit seviyeye indirmek içindir. Böylece kabuller temel bilgilerin, bazı önemli belirsiz bölümlerinin kaybolabilmesine neden olacak bir çeşit filtre etkisi göstermektedirler. Bu yüzden bu gibi sistemlerin modellenmesinde bulanık mantık ve sistem yaklaşımı daha önemli hale gelmektedir (Özger, 1999).

Bu çalışmada kıyı boyu katı madde taşınım miktarının bulanık mantık tabanlı bir model ve uyarlanabilir ağ yapısına dayalı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) ile tahmini üzerinde çalışılmıştır.

4.1 Bulanık Mantık Modeli Kurulumu

Bulanık mantık teorisi çerçevesinde bulanık mantık kontrolcüsü tasarlanmıştır. Öncelikle girdiler bulanıklaştırılmış ve girdilerle çıktı arasındaki mantıksal ilişkiyi açıklayan kural tabanı oluşturulmuştur. Bulanıklaştırma, üyelik fonksiyonlarıyla tanımlanan değerlere kesin değerler veren bir işlemdir. Başka bir deyişle girdi değerleri “düşük”, “orta”, “yüksek” gibi dilbilimsel alt kümelere dönüştürülmektedir. Üyelik fonksiyonları doğruluk derecesini ifade etmektedir. Kural tabanı kontrol hedeflerle ilgili deneyimleri veya bilgileri temsil etmekte ve “EĞER…VE…İSE” formunda dilbilimsel açıklamaları içermektedir. Bu çalışmada, verilen kuralın sonucunun dilbilimsel veri değişkenlerinin fonksiyonu olduğu Sugeno çıkarım modeli kullanılmıştır. TSK bulanık mantık modeli olarak da bilinen Sugeno modeli Tagaki, Sugeno ve Kank (1985) tarafından geliştirilmiştir. Bu amaçla kullanılan programa, kıyı boyu katı madde taşınımı üzerinde etkili olan parametreler girilmiştir. Bu parametreler belirgin kırılan

dalga yüksekliği (H_{sb}), pik dalga periyodu (T_p), kıyı eğimi (m_b), medyan tane çapı (D_{50}) ve dalga kırılma açısıdır (α_b). Modelin kurulmasından sonra programa girilen farklı parametreler doğrultusunda, kıyı boyu katı madde taşınım miktarları tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Kıyı boyu katı madde taşınım debisini belirlemek üzere bir bulanık mantık modeli oluşturabilmek için yeterli sayıda girdi ve çıktı verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla Kamphuis (1991) tarafından geliştirilen (4.1) eşitliğinden yararlanılmıştır. (4.1) eşitliğinde kullanılan belirgin kırılan dalga yüksekliği (H_{sb}), pik dalga periyodu (T_p), kıyı eğimi (m_b), medyan tane çapı (D_{50}) ve dalga kırılma açısı (α_b) girdi verileri olarak kullanılmıştır.

$$Q = 6.4 \cdot 10^4 \, H_{sb}^{2} \, T_p^{1.5} \, m_b^{0.75} \, D_{50}^{-0.25} \sin^{0.6}(2\alpha_b) \qquad (m^3/yıl) \qquad (2.28)\ (4.1)$$

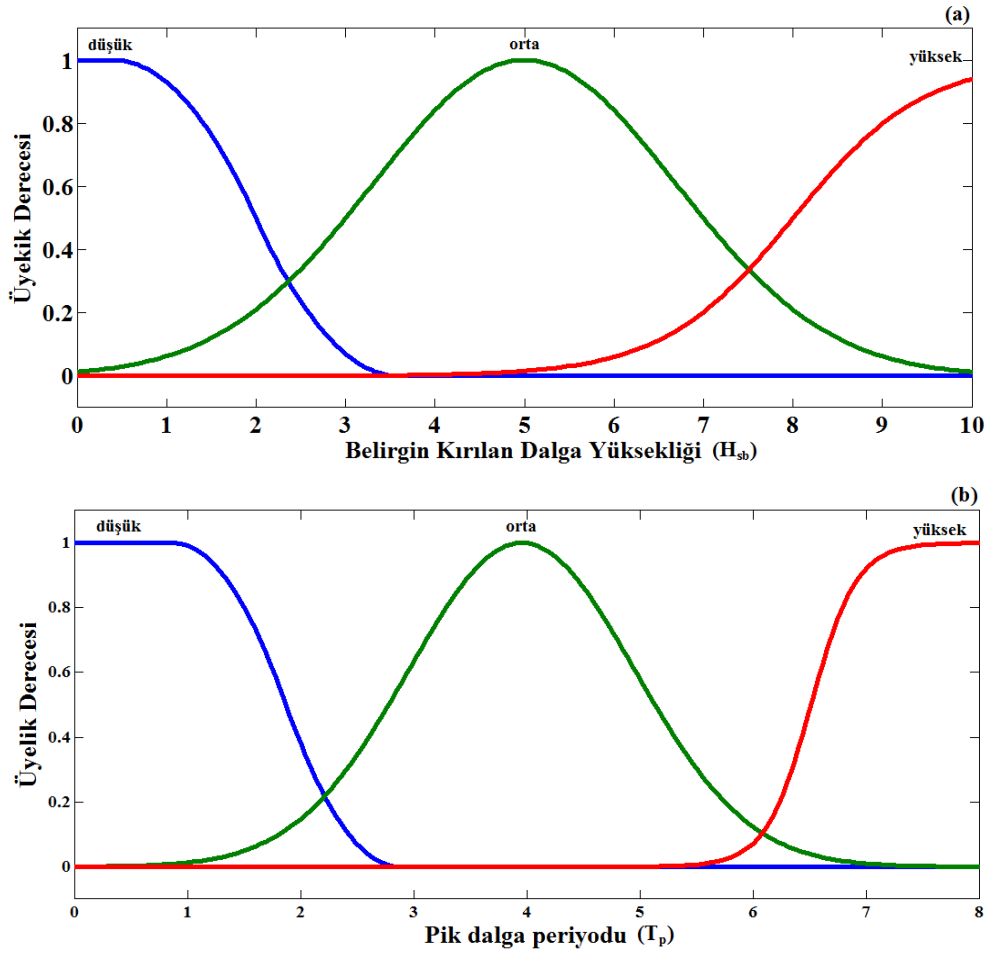
Bulanık mantık yöntemi ile modelleme için MATLAB R2008a yazılımı kullanılmıştır. Çalışmada üç farklı modele yer verilmiştir. Model kurulumunda ilk aşama olarak girdi ve çıktı parametreleri atanmıştır. Oluşturulan üç modelin de kurulumunda öncelikle girdi ve çıktı parametreleri belirlenmiş, ardından her bir parametreye üyelik fonksiyonları atanmış ve sözel kural tabanı ile kurallar oluşturulmuştur. İlk modelde (BM1) üç girdi parametresi ve bir çıktı, diğer iki modelde (BM2.1 ve BM2.2) beş girdi parametresi ve bir çıktı bulunmaktadır (Çizelge 4.1). İkinci ve üçüncü modellerin girdi ve çıktı parametreleri, üyelik fonksiyonu şekilleri, kural yapıları ve kural sayıları aynı olduğundan BM2.1 ve BM2.2 olarak adlandırılmışlardır. BM2.1 modelinin tahmin kapasitesini arttırmak amacıyla, kurallardaki çıktı parametresine atanan üyelik fonksiyonları değiştirilerek BM2.2 modeli elde edilmiştir.

Çizelge 4.1 Bulanık mantık yönteminde kıyı boyu katı madde taşınımının belirlenmesinde kullanılan parametreler

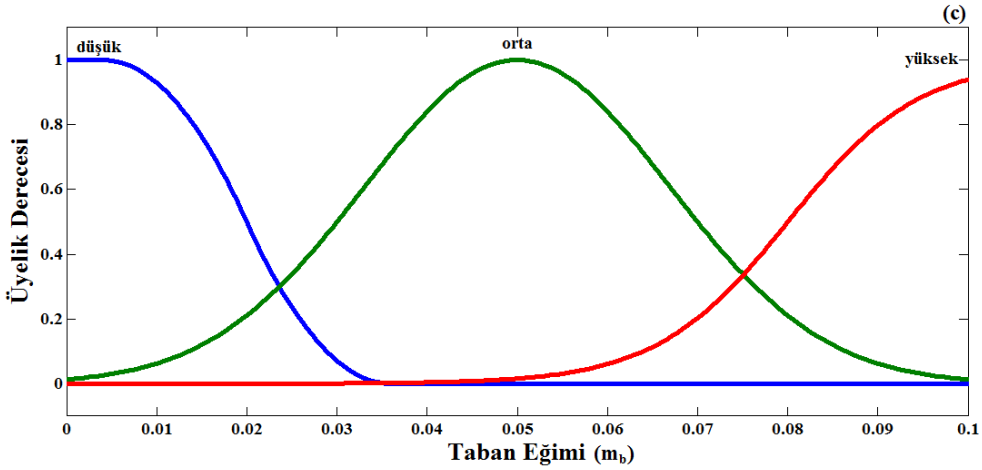
Model	**Çıktı (m^3/yıl)**	**Girdi Parametreleri**				
		H_{sb} (m)	**T_p (s)**	**m_b (-)**	**D_{50} (mm)**	**α_b (^{0})**
BM1	Q	X	X	X	-	-
BM2.1	Q	X	X	X	X	X
BM2.2	Q	X	X	X	X	X

Girdi sayısının, dolayısıyla üyelik fonksiyonlarının ve kural sayılarının artması, bulanık mantık model kurulumunu daha karmaşık bir hale getirdiğinden ilk modelde (BM1) üç adet girdi parametresi kullanılmıştır. Tüm girdi parametreleri ve ölçüm verileri arasında yapılan

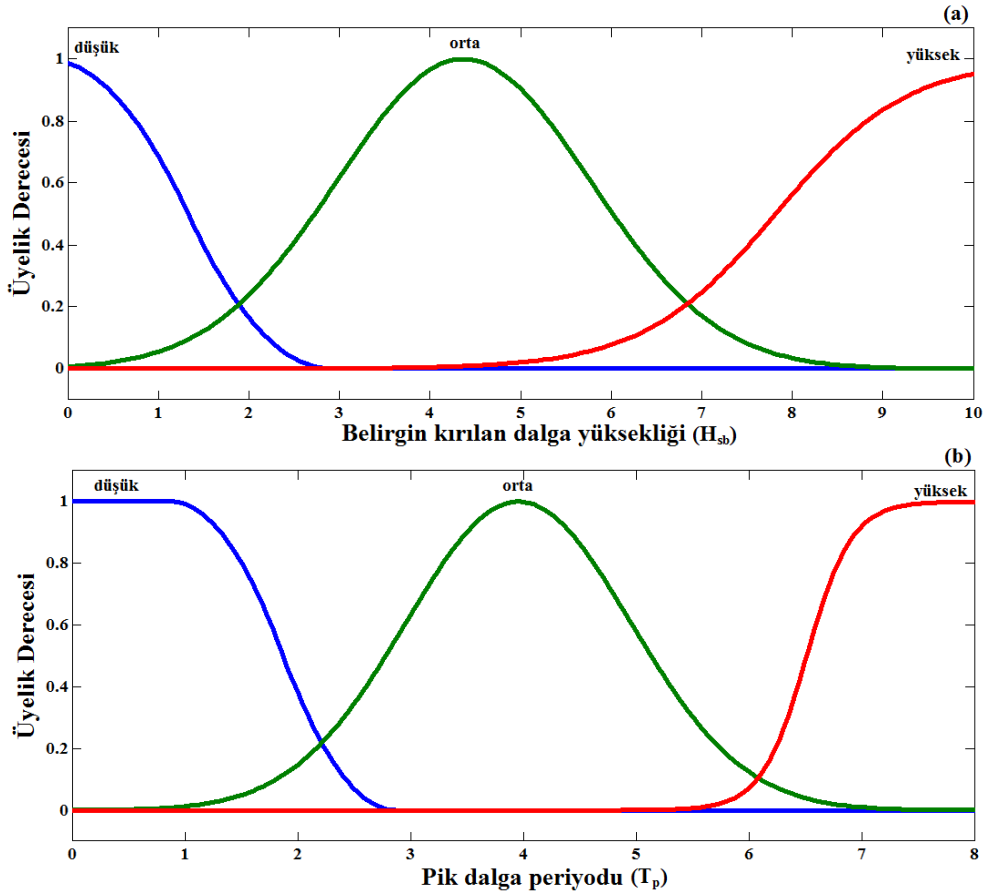
korelasyon analizi sonucunda, BM1'de girdi parametreleri olarak belirgin kırılan dalga yüksekliği (H_{sb}), pik dalga periyodu (T_p) ve taban eğiminin (m_b) kullanılmasına karar verilmiştir. BM2.1 ve BM2.2'de ise, modellerin doğal şartlarla daha uyumlu olması amacıyla girdi olarak medyan tane çapı (D_{50}) ve dalga kırılma açısı (α_b) parametreleri de eklenmiştir. Girdi ve çıktı parametreleri kendi aralarında gruplandırılmış ve deneme-yanılma yöntemi ile üç modele de "düşük", "orta", "yüksek" gibi üyelik dereceleri atanmıştır (Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3). Bulanık mantık yöntemiyle modellemede trapez, üçgen, Gauss fonksiyonu gibi birçok farklı üyelik fonksiyonları, üyelik derecelerini belirlemek için kullanılmaktadır. Kurulan modelde, yapılan çalışmalar sonucunda diğer üyelik fonksiyonu türlerinden daha iyi sonuçlar verdiği gözlenen Gauss tipi üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Modellerdeki girdi ve çıktı parametrelerinin değer aralıkları ve üyelik fonksiyonları, şu ana kadar farklı araştırmacılar tarafından (Smith vd., 2004; Bayram vd., 2007 ve Kamphuis, 2008) yapılmış çalışmalar sonucunda elde edilmiş olan belirgin kırılan dalga yüksekliği (H_{sb}), pik dalga periyodu (T_p), taban eğimini (m_b), medyan tane çapı (D_{50}) ve dalga kırılma açısı (α_b) verileri ile kıyı boyu katı madde taşınımı (Q) arasındaki ilişki dikkate alınarak belirlenmiştir.



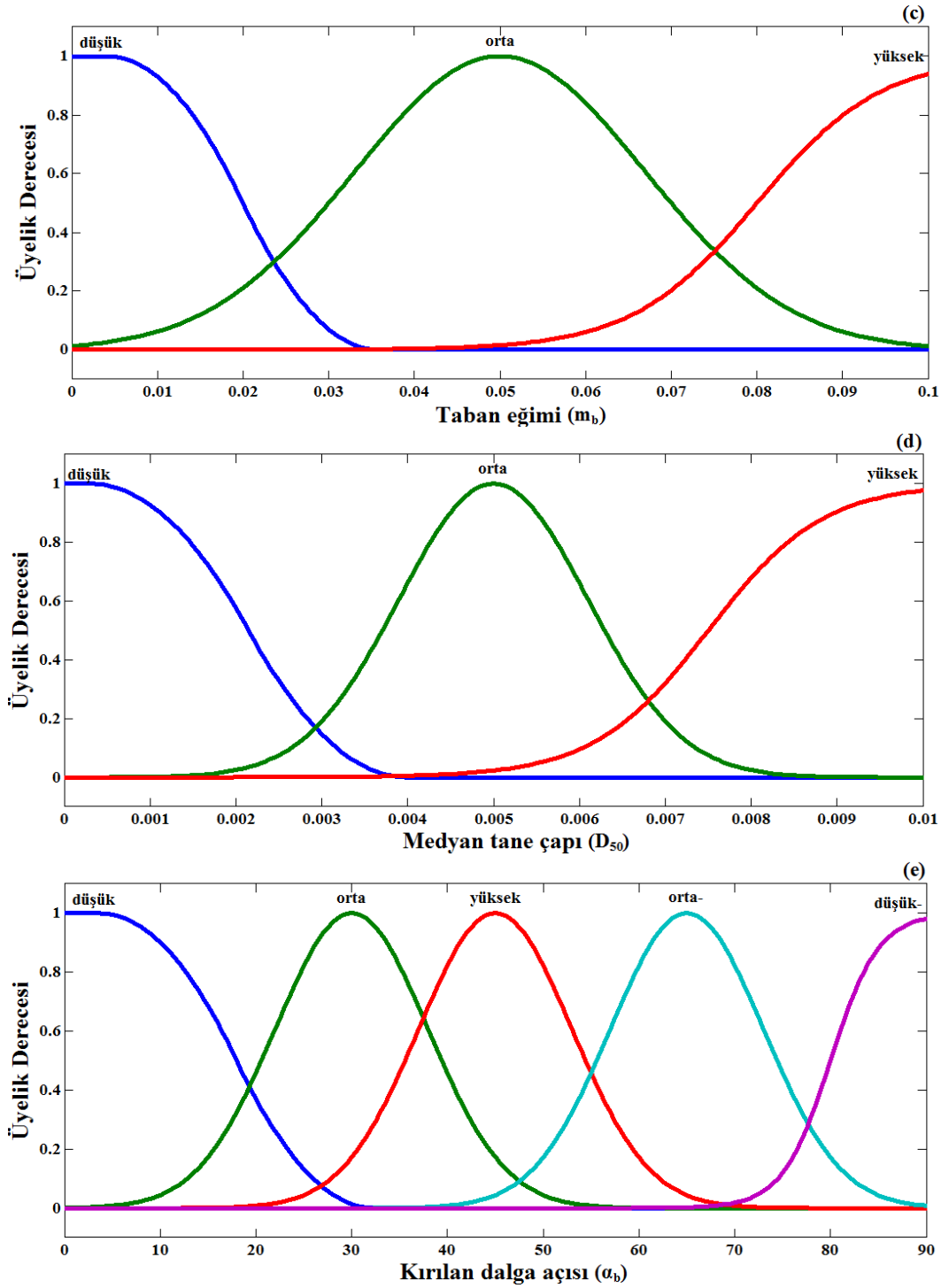
Şekil 4.1 BM1 girdilerinin üyelik fonksiyonları a) Belirgin kırılan dalga yüksekliği (H_{sb}) b) Pik dalga periyodu (T_p) c) Taban eğimi (m_b)



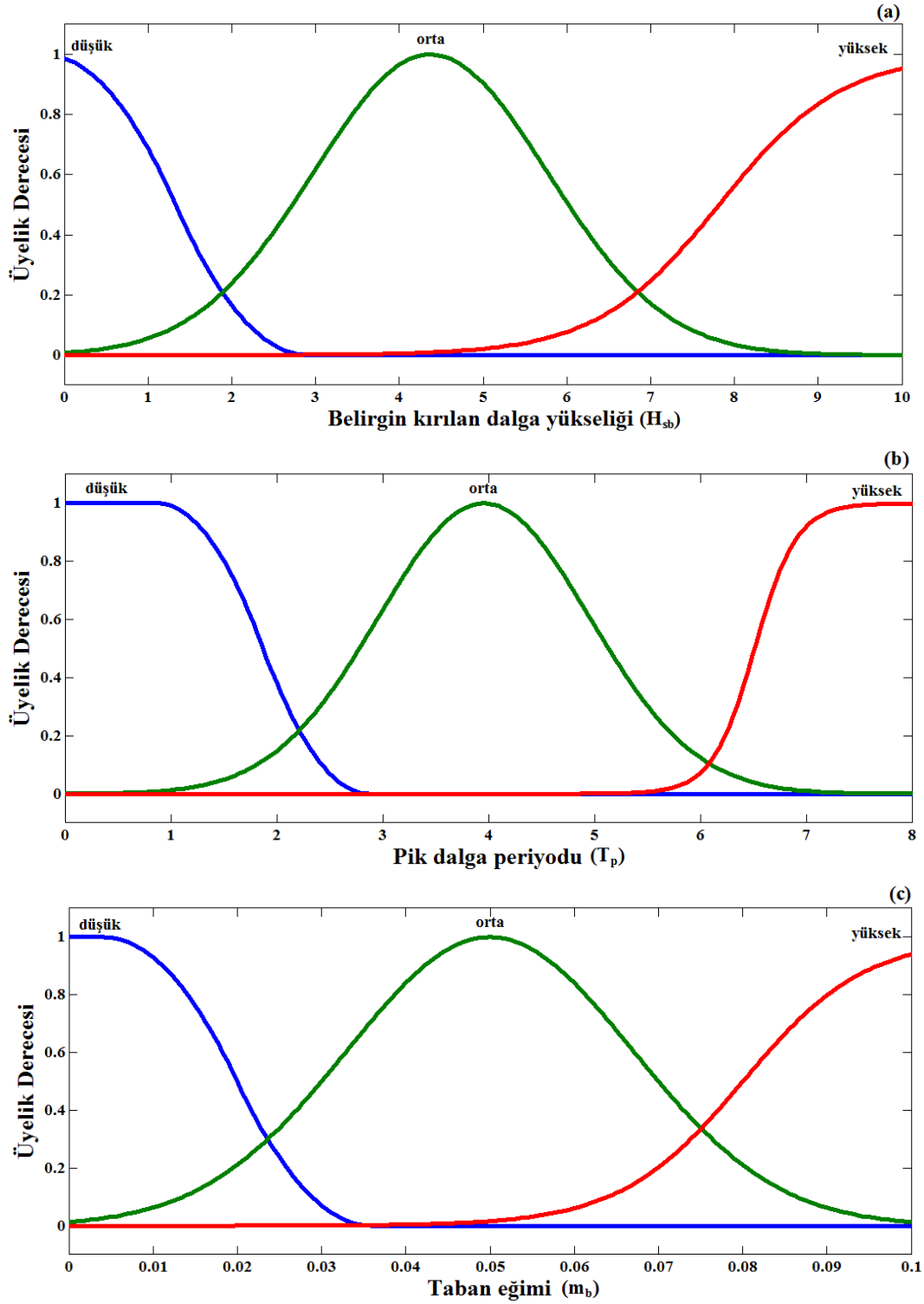
Şekil 4.1 Devam



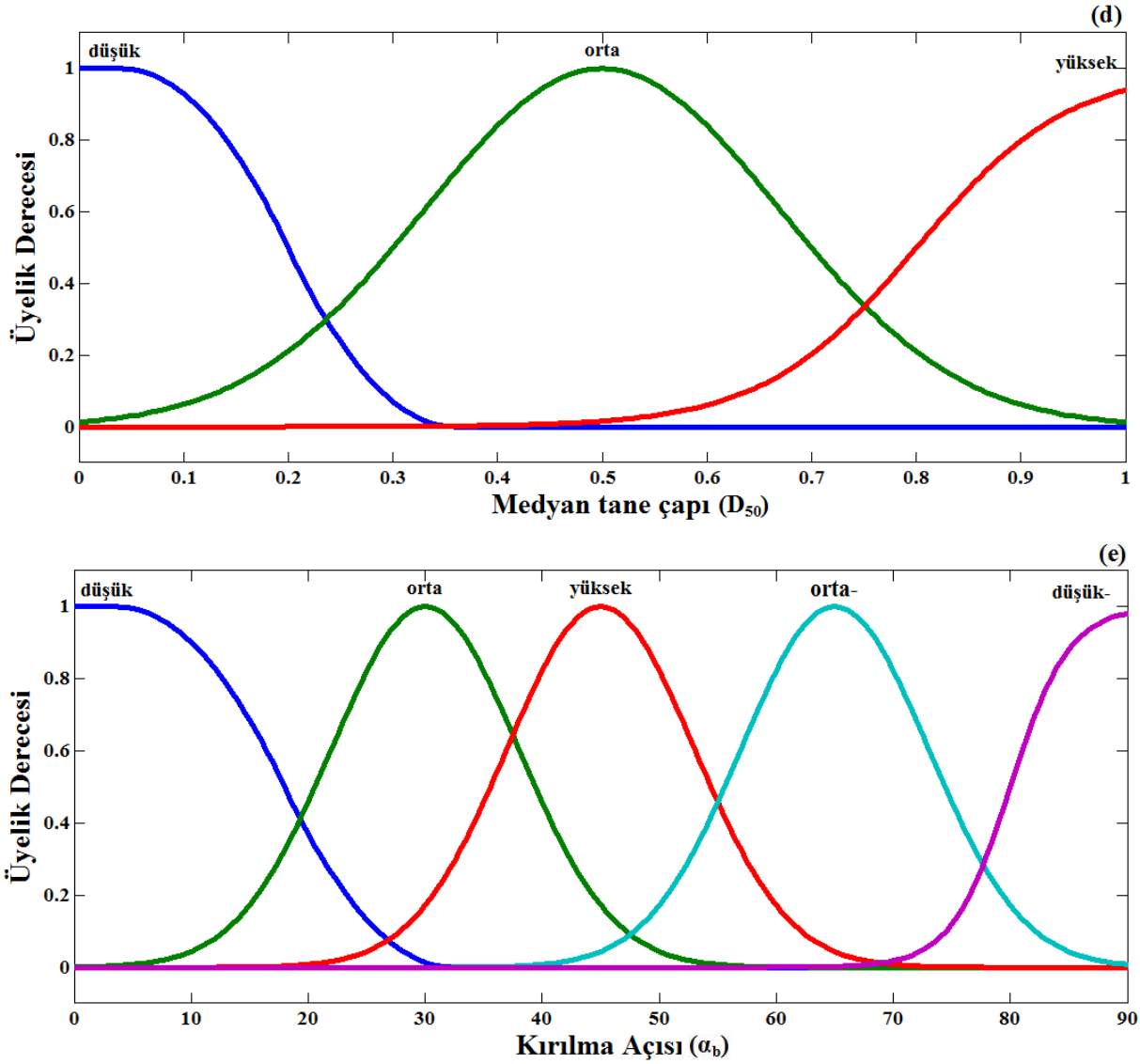
Şekil 4.2 BM2.1 girdilerinin üyelik fonksiyonları a) Belirgin kırılan dalga yüksekliği (H_{sb}) b) Pik dalga periyodu (T_p) c) Taban eğimi (m_b) d) Medyan tane çapı (D_{50}) e) Kırılan dalga açısı (α_b)



Şekil 4.2 Devam



Şekil 4.3 BM2.2 girdilerinin üyelik fonksiyonları a) Belirgin kırılan dalga yüksekliği (H_{sb}) b) Pik dalga periyodu (T_p) c) Taban eğimi (m_b) d) Medyan tane çapı (D_{50}) e) Kırılan dalga açısı (α_b)



Şekil 4.3 Devam

Model kurulumunda sözel kural tabanı, girdi parametrelerinin birbirleriyle tüm kombinasyonları göz önüne alınarak oluşturulmuştur. Dolayısıyla birinci modelde 27 (3^3), ikinci ve üçüncü modelde ise 405 (3^4*5) adet kural oluşturulmuştur. Kurallarda "ve" bağlacı kullanılmıştır ve tüm kurallar eşit ağırlığa sahiptir. Modellerdeki kural yapısı örnek olarak aşağıdaki gibidir;

"Eğer H_{sb} düşük ve T_p düşük ve m_b düşük ve D_{50} düşük ve α_b düşük ise Q çok düşüktür"

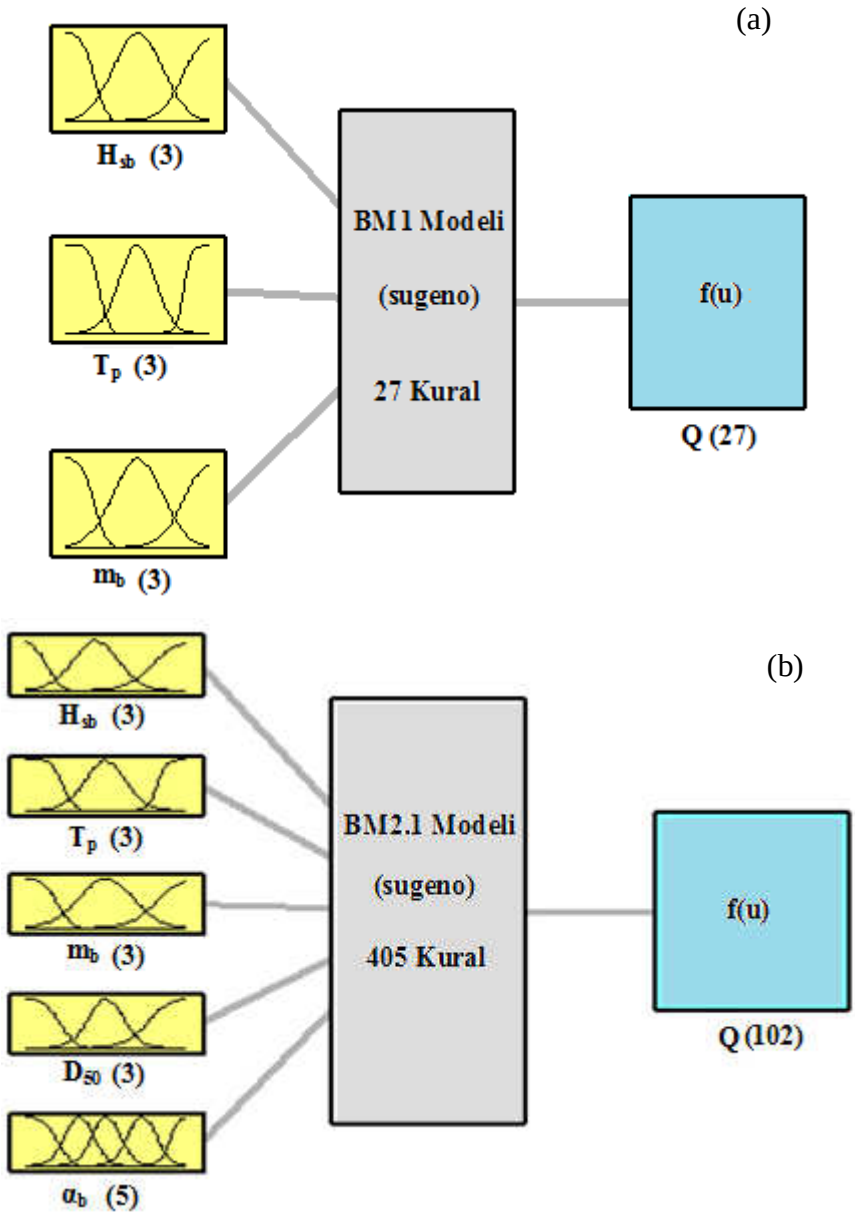
"Eğer H_{sb} orta ve T_p orta ve m_b düşük ve D_{50} düşük ve α_b düşük ise Q düşüktür"

"Eğer H_{sb} orta ve T_p orta ve m_b orta ve D_{50} orta ve α_b orta ise Q ortadır"

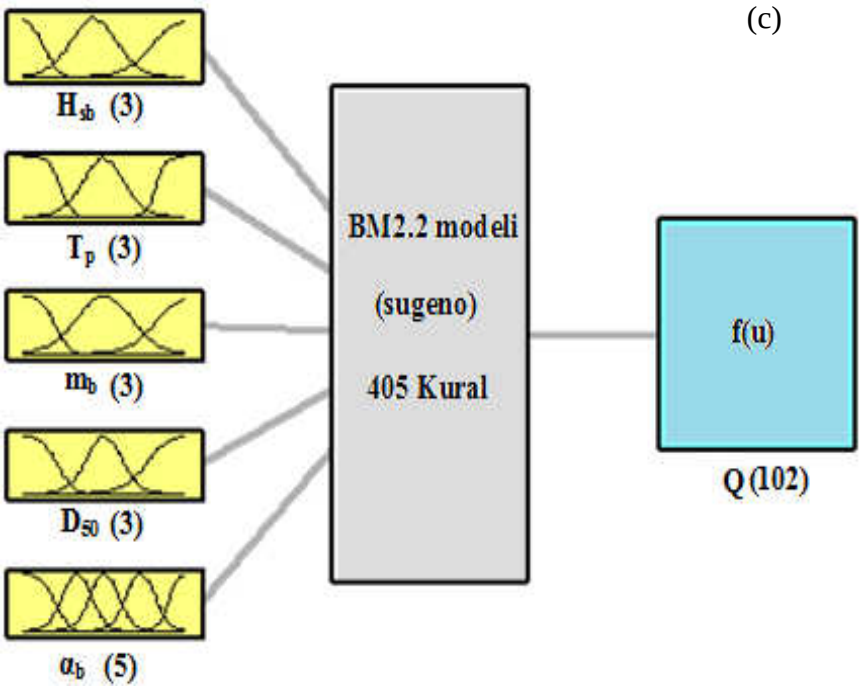
"Eğer H_{sb} yüksek ve T_p yüksek ve m_b yüksek ve D_{50} yüksek ve α_b yüksek ise Q yüksektir"

Üç model için oluşturulan sistemin çalışma şemaları Şekil 4.4'te ifade edilmektedir. Şekilde,

kullanılan bulanık mantık model türü (Sugeno), kural adedi, girdi ve çıktı parametreleri verilmektedir. Girdi ve çıktı parametrelerinin yanında parantez içinde olan sayılar, her bir parametre için atanan üyelik fonksiyonu sayısını ifade etmektedir.



Şekil 4.4 Bulanık mantık modelleri için sistemin çalışma şemaları a) BM1 modeli b) BM2.1 modeli c) BM2.2 modeli



Şekil 4.4 Devam

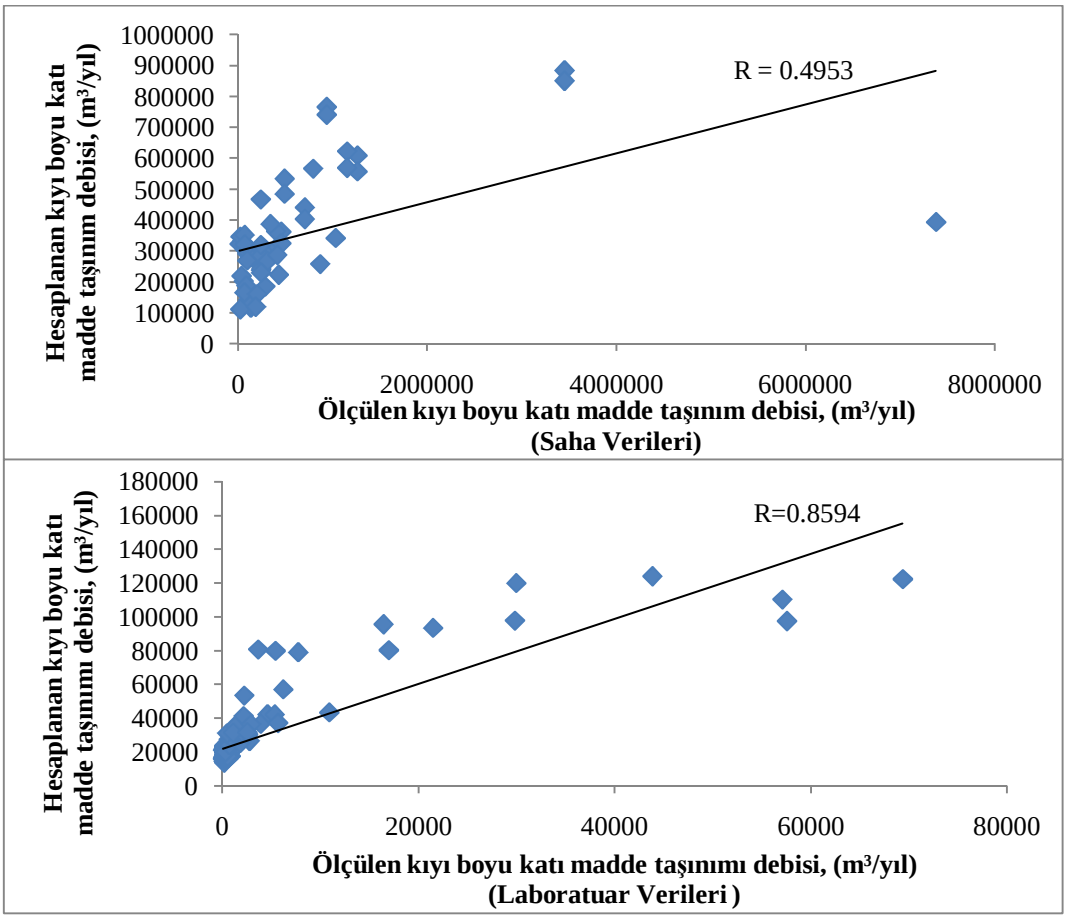
4.1.1 Bulanık Mantık Modeli Sonuçları

Oluşturulan modellerin çıkış verilerinin kontrolü için Kamphuis'den (2008) elde edilen ölçüm verileri kullanılmıştır. Ölçüm verileri, 163 adet laboratuar ve 54 adet saha olmak üzere 217 adettir. Kurulan bulanık mantık modellerinden elde edilen kıyı boyu katı madde taşınım debileri (m^3/yıl) biriminde, ölçüm verileri ise (kg/s) birimindedir. Bu nedenle modelin doğrulanması ölçüm verilerinin (kg/s)'den (m^3/yıl)'a dönüştürülmesiyle yapılmıştır. Çizelge 4.2'de modelde kullanılan Kamphuis (2008) verileri ve veri aralıkları görülmektedir.

Modellerin doğrulanması için Kamphuis (2008) verilerinin dışında Smith vd. (2004) ve Bayram vd. (2007) tarafından yapılan çalışmalardan elde edilen ölçüm verilerinden yararlanılmıştır. Bu sayede girdi ve çıktı parametrelerinin daha kapsamlı ölçüm değerleri değerleri dikkate alınmıştır. Şekil 4.5'te BM1, BM2.1 ve BM2.2 bulanık mantık modellerinin saha ve laboratuar verileri ile saçılım diyagramı şeklinde karşılaştırılması görülmektedir.

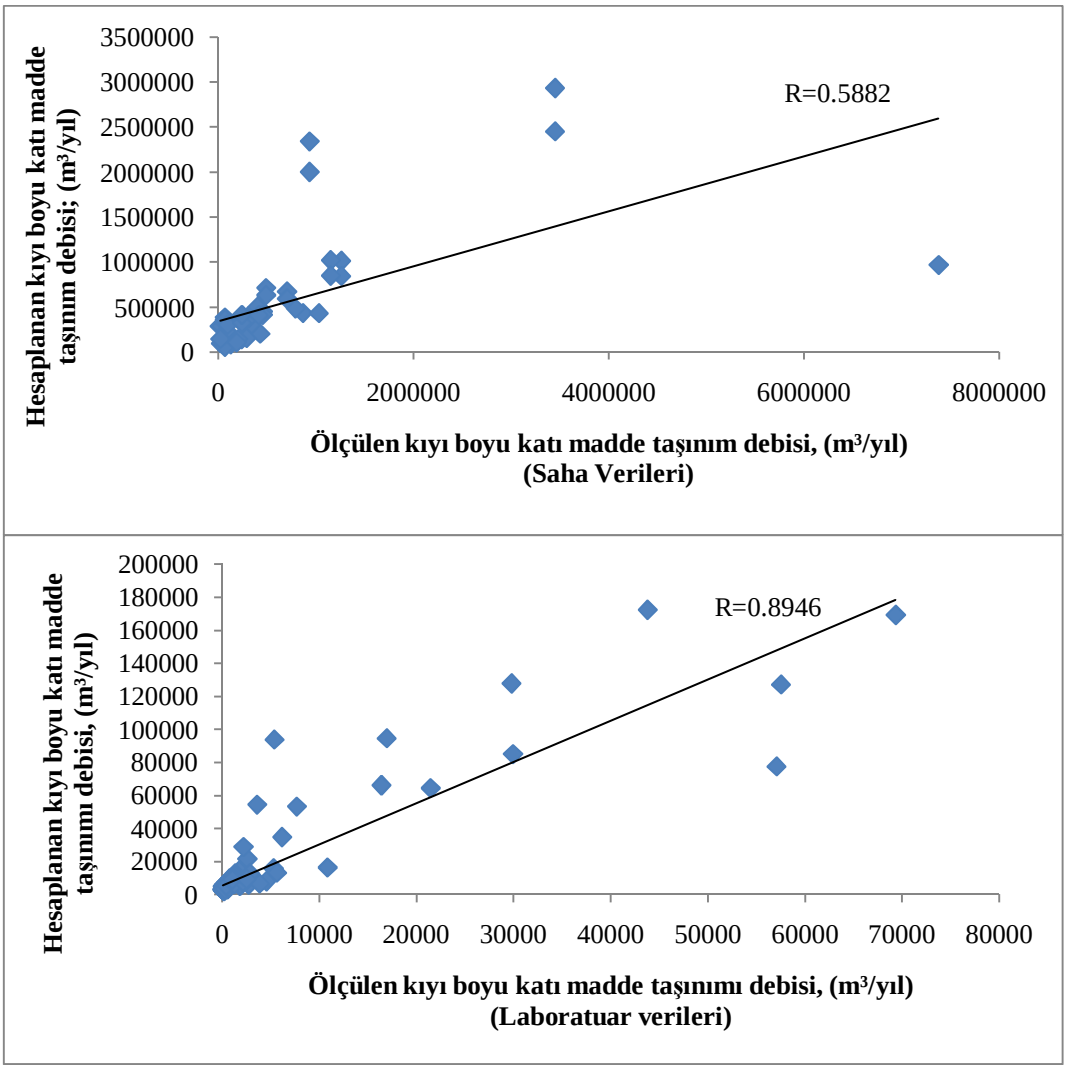
Çizelge 4.2 Model kontrolünde kullanılan Kamphuis (2008) ölçüm verileri

Veri Tipi	**Aralık**
Kıyı boyu katı madde taşınım debisi, Q (m^3/yıl)	58.42-7376580
Belirgin kırılan dalga yüksekliği, H_{sb} (m)	0.049-1.99
Pik dalga periyodu, T_p (s)	0.92-13.4
Kıyı eğimi, m_b (-)	0.012-0.2
Medyan tane çapı, D_{50} (mm)	0.0105-8.3
Dalga kırılma açısı, α_b (^{0})	2-32.3

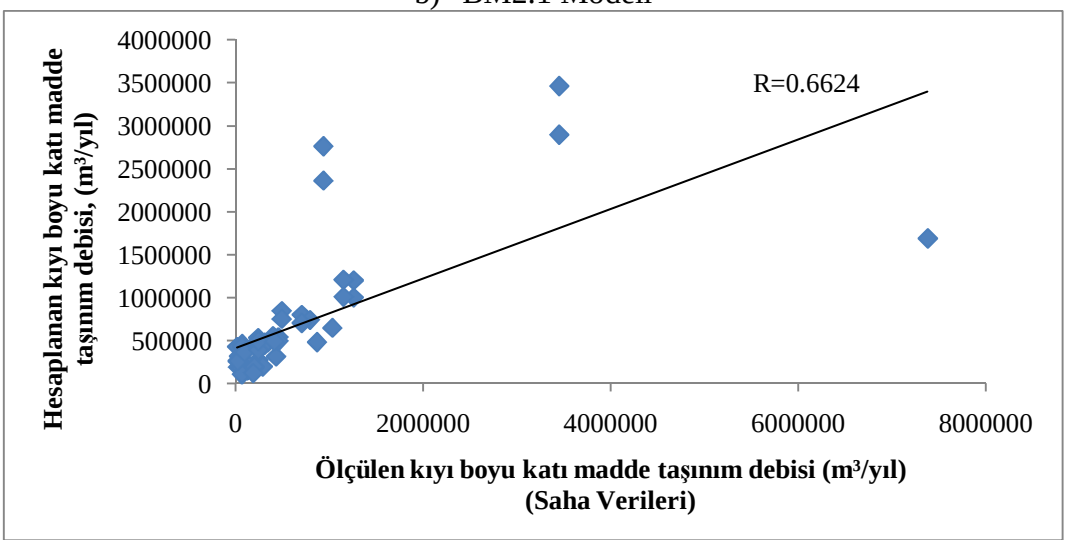


a) BM1 Modeli

Şekil 4.5 Bulanık mantık yöntemiyle hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım debilerinin ölçüm sonuçları ile serpilme diyagramı şeklinde karşılaştırılması a) BM1 Modeli b) BM2.1 Modeli c) BM2.2 Modeli

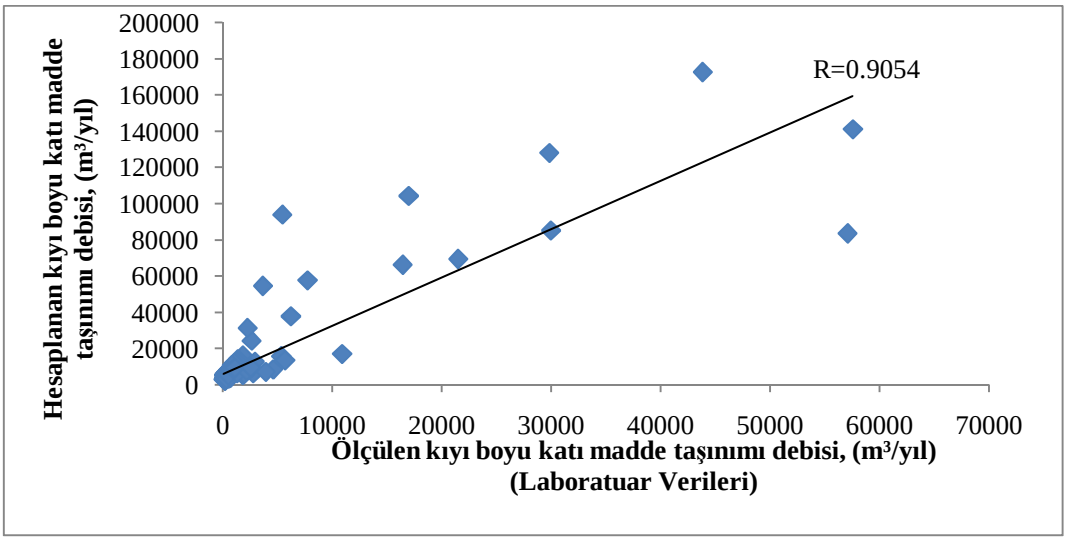


b) BM2.1 Modeli



c) BM2.2 Modeli

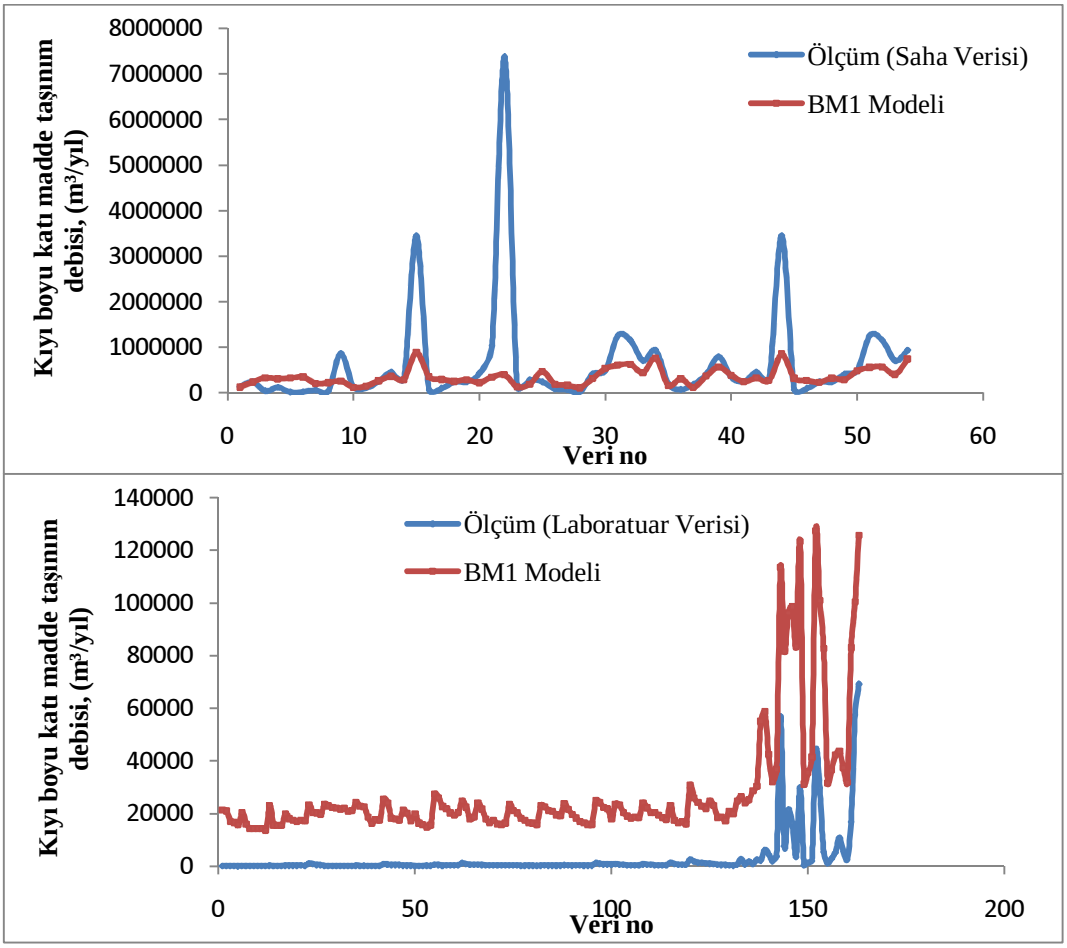
Şekil 4.5 Devam



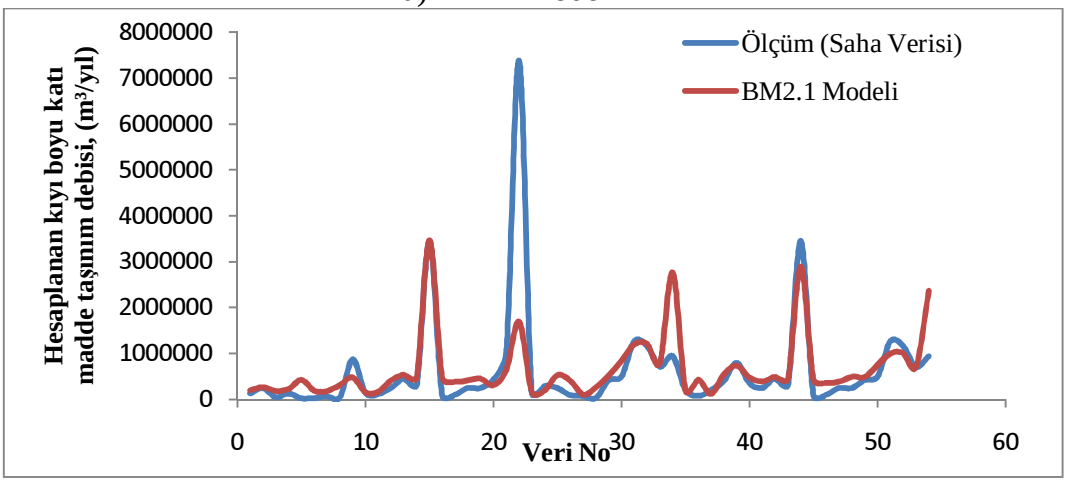
c) BM2.2 Modeli
Şekil 4.5 Devam

BM1, BM2.1 ve BM2.2 modelleri ile hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım debilerinin, ölçülen saha ve laboratuar verilerine göre korelasyon katsayıları (R) incelendiğinde hem saha hem de laboratuar verilerinde en düşük korelasyona sahip olan modelin BM1 modeli (R_{saha}=0.4953, R_{lab}=0.8594) olduğu görülmektedir. Bunun nedeni daha basit bir model kurmak amacıyla kıyı boyu katı madde taşınımını etkileyen tüm parametrelerin (belirgin kırılan dalga yüksekliği, pik dalga periyodu, taban eğimi, medyan tane çapı ve dalga kırılma açısı) girdi olarak kullanılması yerine medyan tane çapı ve dalga kırılma açısının ihmal edilmesidir. Yapılan ihmal sonucunda daha kısa sürede daha basit ancak yeterli hassasiyete sahip olmayan bir model elde edilmiştir. BM2.1 ve BM2.2 modelleri, BM1 modeline göre daha yüksek korelasyon katsayısına sahiptir. BM2.2 modeli ise (R_{saha}=0.6624, R_{lab}=0.9054) BM2.1 modeline (R_{saha}=0.5882, R_{lab}=0.8946) göre daha yüksek korelasyon katsayısına sahiptir. BM2.1 ve BM2.2 modellerinde, kıyı boyu katı madde taşınımını en çok etkileyen beş parametre girdi olarak kullanılmıştır. İki modelde de girdilere eşit sayıda üyelik fonksiyonu ve kural atanmıştır. Benzer özellikte olmalarına rağmen BM2.2 modelinin BM2.1 modelinden daha iyi sonuç vermesinin nedeni, BM2.2 modeline ait üyelik fonksiyonlarının ve kural yapısının BM2.1 modeli üzerinden deneme-yanılma yöntemiyle geliştirilmiş olmasıdır. BM2.1 ve BM2.2 modelleri kurulurken birçok farklı kural yapısı oluşturulmuş ve kurallara değişik girdi-çıktı üyelik fonksiyonları atanmıştır. Bu süreçte ölçüm verileri kullanılarak hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım debileri sürekli kontrol edilmiştir. Kontroller sonucunda modellerde, en doğru çıktı verilerine ulaşılmasını sağlayan kural ve üyelik fonksiyonu yapısı oluşturulmuştur. Modellerle laboratuar ve saha verileri kullanılarak hesaplanan çıktı değerleri karşılaştırıldığında, üç modelde de laboratuar değerleri için daha

yüksek korelasyon değerine sahip çıktılar elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.6'da BM1, BM2.1 ve BM2.2 modelleri ile hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım debilerinin (saha ve laboratuar verileri ayrı ayrı olmak üzere) ölçüm sonuçları ile seri şeklinde karşılaştırılması görülmektedir.

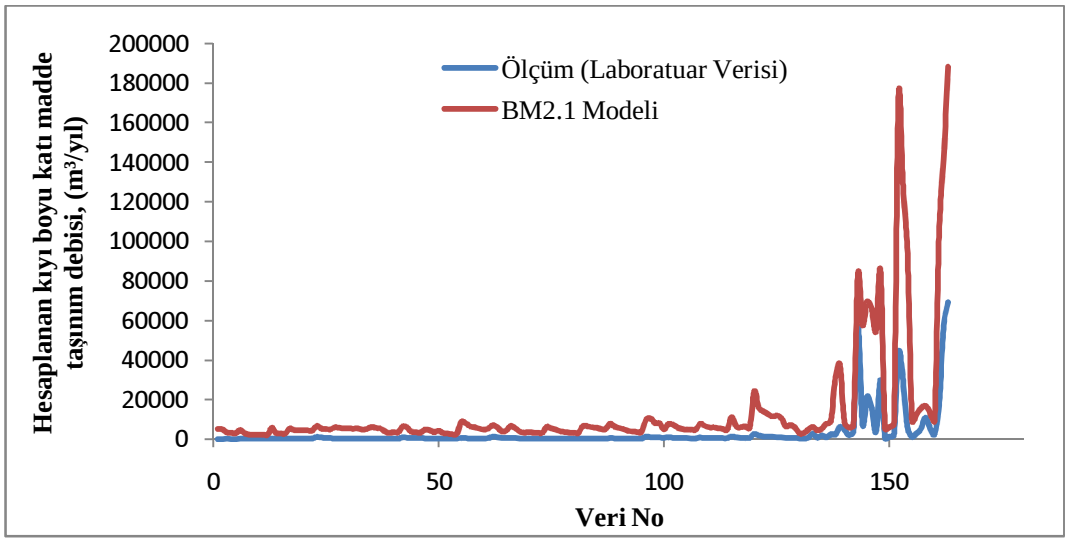


a) BM1 Modeli

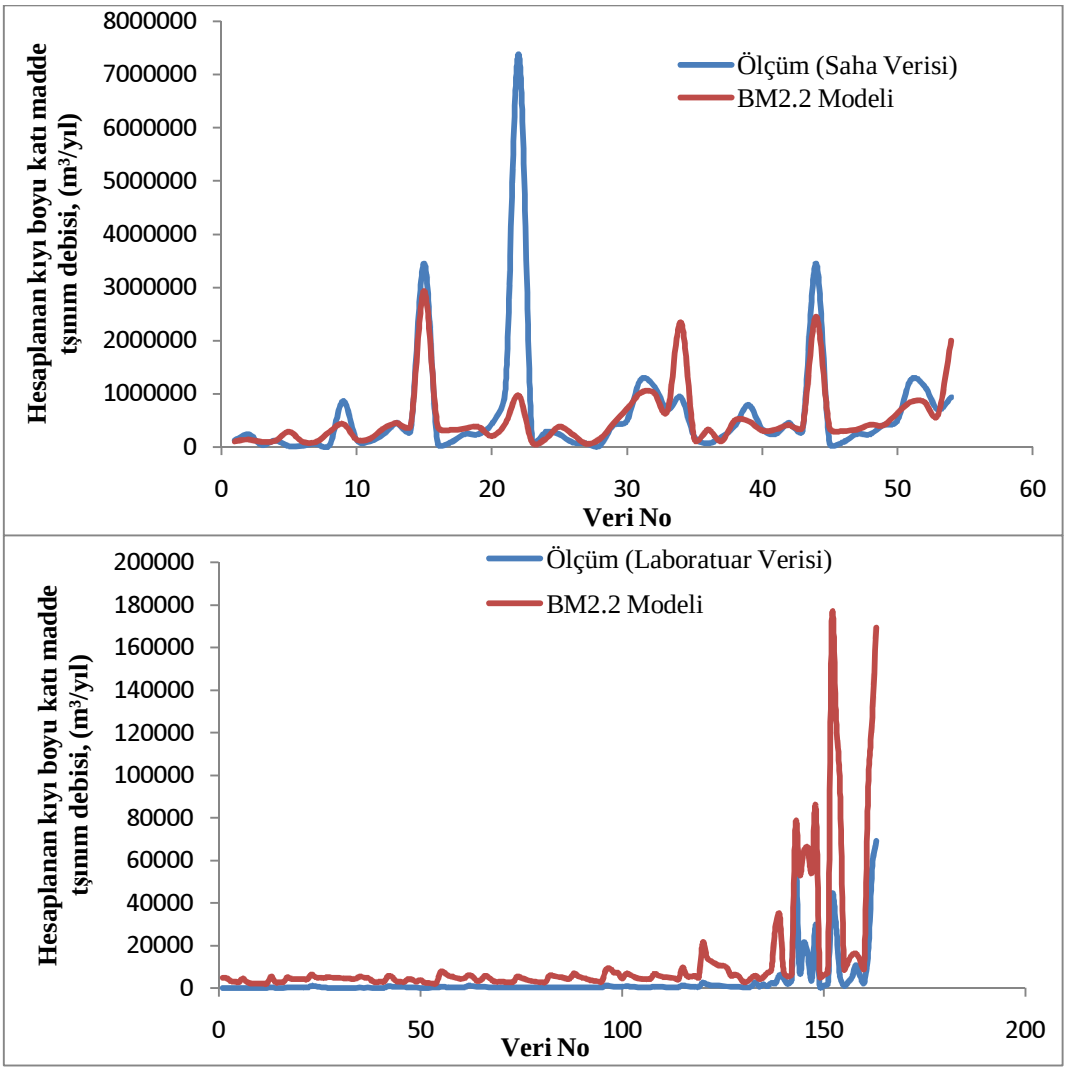


b) BM2.1 Modeli

Şekil 4.6 Modellerden elde edilen kıyı boyu katı madde taşınım verilerinin saha ve laboratuar ölçümleriyle seri şeklinde karşılaştırılması a) BM1 Modeli b) BM2.1 Modeli c) BM2.2 modeli



b) BM2.1 modeli



c) BM2.2 modeli
Şekil 4.6 Devam

BM1, BM2.1 ve BM2.2 modelleri ile saha ve laboratuar verileri kullanılarak hesaplanan katı

madde taşınımları seri şeklinde karşılaştırıldığında, ölçüm verilerine en az yaklaşan çıktı değerlerinin BM1 modeli ile hesaplandığı görülmektedir. BM1 modeli ile hesaplanan saha verileri incelendiğinde, girdi parametrelerinin düşük olduğu durumlarda hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım değerlerinin, ölçüm değerlerinden yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni BM1 modelinde kıyı boyu katı madde taşınımını etkileyen beş parametreden (belirgin kırılan dalga yüksekliği (H_{sb}), pik dalga periyodu (T_p), taban eğimi (m_b), medyan tane çapı (D_{50}) ve kırılan dalga açısı (α_b)) ikisinin (medyan tane çapı (D_{50}) ve kırılan dalga açısı (α_b)) ihmal edilmiş olmasıdır. Girdi parametrelerinin azaltılmasıyla daha basit ancak daha düşük hassasiyete sahip bir model olan BM1 modeli elde edilmiştir. Ayrıca BM1 ile saha ölçümlerinde gözlenen pik taşınım değerleri yakalanamamaktadır. BM1 modeli sonuçları ile laboratuar verileri karşılaştırıldığında modelden elde edilen sonuçların, ölçüm verilerine göre çok yüksek olduğu ancak aynı artış-azalış oranına sahip olduğu görülmektedir. Laboratuar veri girdilerinin değerleri saha verilerine göre oldukça düşüktür. BM1 girdileri için tanımlanan üyelik fonksiyonlarının düşük değerdeki girdi parametrelerini yeteri kadar temsil edememesi nedeniyle hesaplanan değerler ile ölçüm verileri arasındaki fark Şekil 4.6a'dan da görülmektedir. BM2.1 modeli ile hesaplanan saha verilerinin, ölçüm verilerine daha yakın olduğu görülmektedir. BM2.1 modelinde, BM1 modelinden farklı olarak medyan tane çapı (D_{50}) ve kırılan dalga açısı (α_b) da girdi olarak sistemde kullanılmıştır. Bununla birlikte, oluşturulan kural sayısının ve çıktı parametrelerinin de artması, modelden daha hassas sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Sonuçlar seri şeklinde incelendiğinde saha ölçümlerinden elde edilen kıyı boyu katı madde taşınım miktarlarında belirgin üç adet pik değer olduğu görülmektedir. BM2.1 modeli ile bu pik değerlerden ikisi, ölçüm verilerine yakın değerlerde hesaplanmıştır. BM2.1'den laboratuar verileri kullanılarak hesaplanan çıktı değerleri, ölçüm verilerinden yüksektir. Ancak bu değerlerin, BM1 ile hesaplanan değerlerden daha tutarlı olduğu görülmektedir. BM2.1 ve BM2.2 model sonuçları ile saha ölçüm verileri karşılaştırıldığında, BM2.1 modelinin saha ölçüm verilerinden daha yüksek sonuçlar hesapladığı ve BM2.2 modelinin saha ölçüm verileri ile daha uyumlu olduğu anlaşılmıştır. BM2.2 modeli ile BM2.1 modeline benzer şekilde saha verilerindeki iki pik değere yaklaşık sonuçlar elde edilmiştir. Bu iki pik değer, belirgin kırılan dalga yüksekliğinin fazla olması nedeniyle, yakalanamayan pik değer ise pik dalga periyodunun yüksek olması nedeniyle oluşmaktadır. Buradan da, kurulan bulanık mantık modellerinde pik dalga periyodu için hassasiyetin yeterli olmadığı anlaşılmaktadır. BM2.2 modeli ile laboratuar verileri için BM2.1 modeline benzer şekilde, BM1 modelinden düşük ancak laboratuar ölçüm verilerinden yüksek değerler hesaplanmaktadır.

4.2 ANFIS Modeli Kurulumu

ANFIS temel olarak Bulanık Çıkarım Sistemi'nin (Fuzzy Inference System) sinir ağlarına uyarlanmış halidir. Sinir ağları kullanılarak parametreleri optimize edilen Sugeno tipi çıkarım sistemlerine ANFIS adı verilmektedir. ANFIS tekniği, yeterli miktarda deneysel veri ve saha ölçümü mevcudiyetinde kullanışlı olan bir yöntemdir. Karmaşık doğa olaylarını matematiksel ifadeler kullanmadan modelleyen bir sistem olduğu için, klasik yaklaşımların yüksek hata verdiği veya çok karmaşık olduğu mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir.

ANFIS yönteminin uygulanabilmesi için girdi ve çıktıya dayanan bir veri setine ihtiyaç duyulmaktadır. Kıyı boyu katı madde taşınımının belirlenmesi için Kamphuis'den (2008) elde edilen ölçüm verileri kullanılarak üç adet ANFIS modeli kurulmuştur. Bölüm 3.7'de verilen Şekil 3.17'de ANFIS modelinin genel yapısı, Şekil 4.7'de ise modelin editör yapısı görülmektedir. Birinci modelde (ANFIS1) bulanık çıkarım sistemi olarak ağlara bölme yöntemi (grid partition), ikinci ve üçüncü modellerde ise (ANFIS2.1 ve ANFIS2.2) eksiltmeli kümeleme (subtractive clustering) yöntemi seçilmiştir. İkinci ve üçüncü modellerde aynı girdi parametreleri ve çıkarım sistemi kullanıldığından modeller ANFIS2.1 ve ANFIS2.2 olarak adlandırılmışlardır. ANFIS2.1 ve ANFIS2.2 modellerinin yapıları benziyor olsa da modellerin eğitme ve doğrulama veri setlerinde kullanılmak üzere seçilen veri aralıkları ve veri adedi farklıdır. Ağlara bölme ve eksiltmeli kümeleme yöntemleri aşağıdaki gibi açıklanabilmektedir.

Ağlara bölme yöntemi

Eğitme aşamasında ağlara bölme yöntemi seçildiği zaman, model tarafından rastgele seçilen veri setlerine denk gelen üyelik fonksiyonları, ANFIS'in birinci aşaması olarak dikkate alınmaktadır. Eğitme süresince parametrelerin üyelik fonksiyonları değişmekte ve ağlar oluşmaktadır. Ağlara bölme yönteminde girdi ve çıktı parametrelerinin üyelik fonksiyonu sayıları kullanıcı tarafından belirlenmelidir. Üyelik fonksiyonu sayısı arttıkça modelin daha doğru sonuçlar vermesi beklenmektedir. Ancak girdi sayısı çok olan bir modelde üyelik fonksiyonu sayıları arttıkça, ANFIS tarafından oluşturulan kural sayıları da artmakta ve ANFIS'in performansı düşmektedir (Castellanos ve James, 2009). ANFIS1 modelinde ağlara bölme yöntemi kullanılmıştır. Model verimliğinin yüksek olması amaçlandığı için girdi parametrelerinin her birine altı adet üyelik fonksiyonu atanmasına karar verilmiştir. Üyelik fonksiyonu seçiminin ardından model tarafından 5^6 adet kural ve çıktı parametresi için kural sayısı kadar üyelik fonksiyonu atanmıştır.

Eksiltmeli kümeleme yöntemi

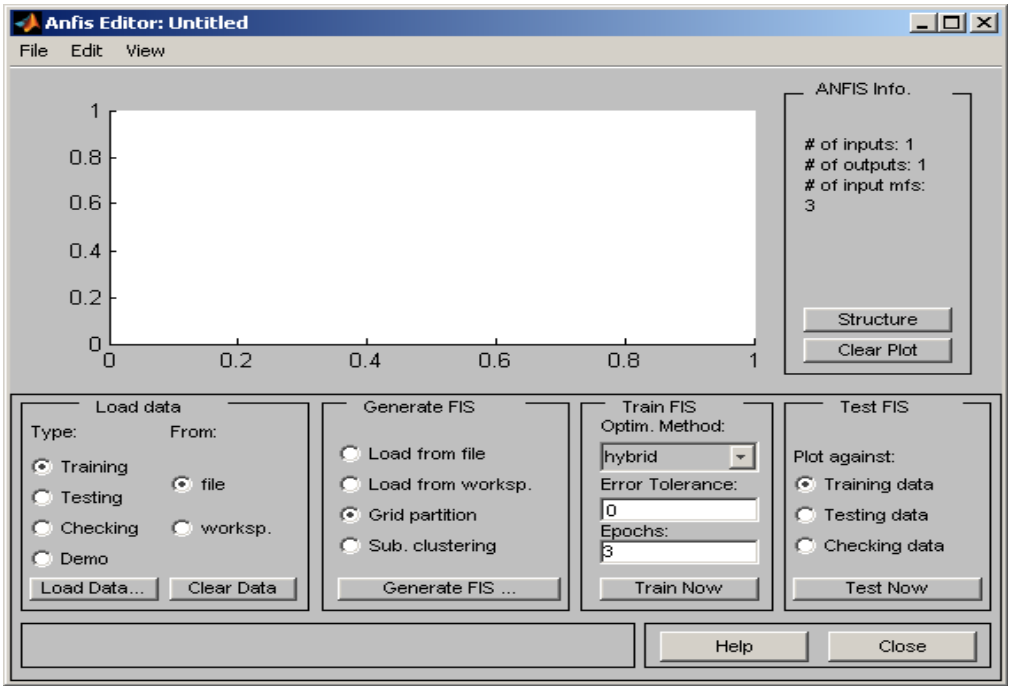
Eksiltmeli kümeleme yönteminde ANFIS modeli veri topluluklarını sınıflandırarak küme merkezleri belirlemekte ve bu merkezlere bulanık kural ataması yapmaktadır. Bu şekilde, büyük veri topluluklarının az sayıda kural ile tanımlanması amaçlanmaktadır. İşlem yoğunluğu verilerin kümelendirilmesi yöntemiyle azaltılmakta, böylelikle ağlara bölme yöntemine göre daha basit bir yaklaşım sağlanmaktadır. Bu yöntem, girdi sayısının fazla olduğu bulanık modellerde tercih edilmektedir (Castellanos ve James, 2009). Bu nedenle ANFIS2.1 ve ANFIS2.2 modellerinde eksiltmeli kümeleme yöntemi tercih edilmiş ve ANFIS1 modeline göre daha basit bir model daha kısa sürede elde edilmiştir.

Üç modelde de girdi verileri olarak belirgin kırılan dalga yüksekliği (H_{sb}), pik dalga periyodu (T_p), kıyı eğimi (m_b), medyan tane çapı (D_{50}) ve dalga kırılma açısı (α_b) kullanılmıştır. MATLAB'ın modüllerinden biri olan Fuzzy Logic Toolbox modülündeki Şekil 4.7'de yer alan ANFIS Editor kullanılarak elde bulunan girdi çıktı seti sisteme yüklenebilmekte, kurulan model eğitilmekte ve sonuç olarak etkinliği test edilebilmektedir. Etkin girdiler ortaya konulduktan sonra elde bulunan veri setinin eğitme ve test verisi olmak üzere ikiye bölünmesi gerekmektedir. Eğitmenin optimizasyonu için melez öğrenme ve geri yayılma olmak üzere iki yöntem bulunmaktadır. ANFIS1, ANFIS2.1 ve ANFIS2.2 modellerinde, geri yayılma yöntemine göre daha yaygın ve daha hızlı olan melez öğrenme modeli kullanılmıştır.

ANFIS elde bulunan girdi setine göre üyelik fonksiyonunun seçiminde çeşitli seçenekler (üçgen üyelik fonksiyonu, yamuk üyelik fonksiyonu, gauss kombinasyon üyelik fonksiyonu, genelleştirilmiş çan eğrisi üyelik fonksiyonu vb.) sunmaktadır. ANFIS1, ANFIS2.1 ve ANFIS2.2 modellerinde, parametreler arası dereceli geçiş sağlama üstünlüğünden dolayı Gauss tipi üyelik fonksiyonu seçilmiştir. Model kurulma aşamasında girdi verilerine atanan üyelik fonksiyonu sayıları arttıkça, model eğitmesi için ihtiyaç duyulan ölçüm verilerinin sayısı artmaktadır. Bu durumda eğitme aşamasında kullanılması gereken veri sayısı, elde bulunan eğitme veri setinin büyüklüğünü aşmamalıdır. Aksi takdirde sistemde hata alınmakta, kurulan modelin eğitmesi etkin bir şekilde gerçekleştirilememektedir (Yücel ve Güneri, 2010).

ANFIS1 ve ANFIS2.1 modellerinin eğitme aşamasında 148 adet veri kullanılmıştır. Eğitme veri seti Smith vd.'ne (2004) ait 4 adet laboratuar verisi ve Kamphuis'e (2008) ait 144 adet ölçüm verisi (34 adet saha, 110 adet laboratuar verisi) içermektedir. Eğitme işleminin ardından ANFIS1 ve ANFIS2.1 modellerin performansını belirlemek üzere Kamphuis (2008)

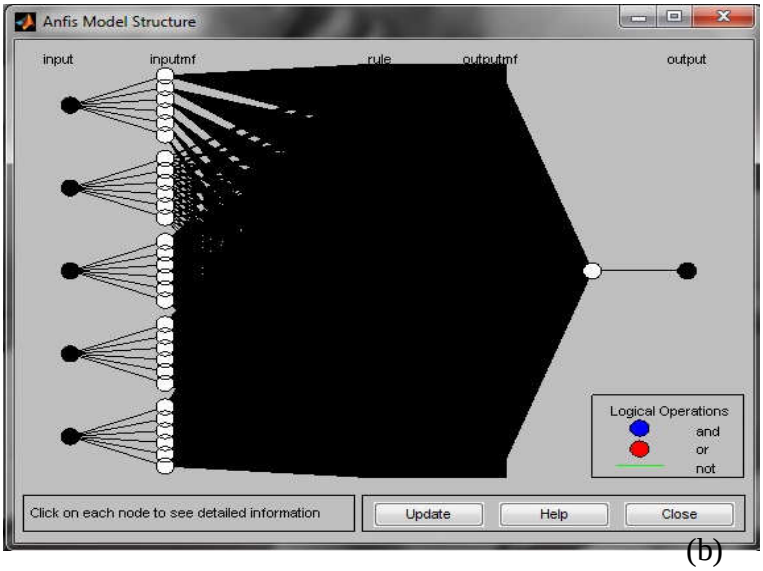
ölçüm verilerinden kalan 73 adet veri (20 adet saha, 53 adet laboratuar verisi) modellerin doğrulama aşamasında kullanılmıştır.



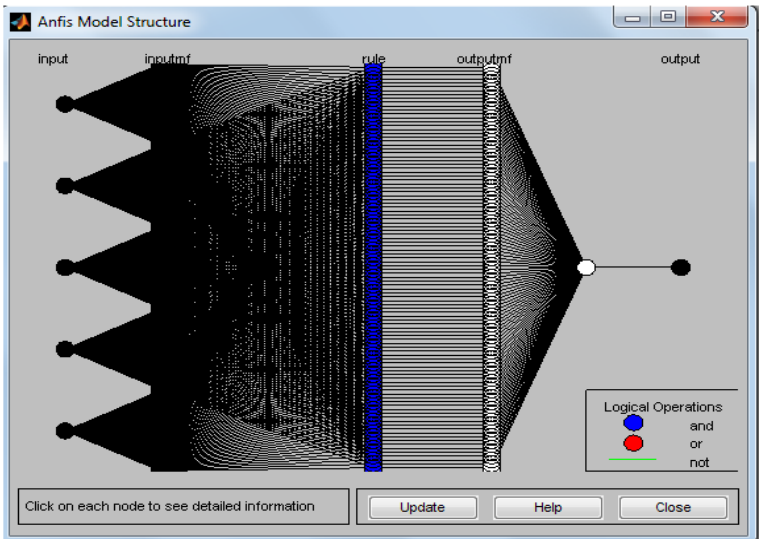
Şekil 4.7 ANFIS editör yapısı

ANFIS2.2 modelinin eğitme aşamasında Kamphuis'e (2008) ait 217 adet ölçüm verisi arasından seçilen 157 adet veri (38 adet saha, 119 adet laboratuar verisi) kullanılmıştır. ANFIS2.2 modelinin tahmin kapasitesini belirlemek üzere seçilen doğrulama veri seti ise Kamphuis (2008) ölçüm verilerinden kalan 60 adet veri (16 adet saha, 44 adet laboratuar verisi) ve Smith vd. (2004) tarafından ölçülen 4 adet laboratuar verisinden oluşmaktadır. Bulanık modelin sonuçları aşağıda gösterildiği gibi, MATLAB programı içinde yazılan program modülü tarafından oluşturulan grafikler halinde sunulmaktadır. Geliştirilen modellerin genel yapısını ifade eden Şekil 4.8, veri sayısı, üyelik fonksiyonu sayısı, kural sayısı gibi sonuçları ifade eden Şekil 4.9 aşağıda verilmiştir.

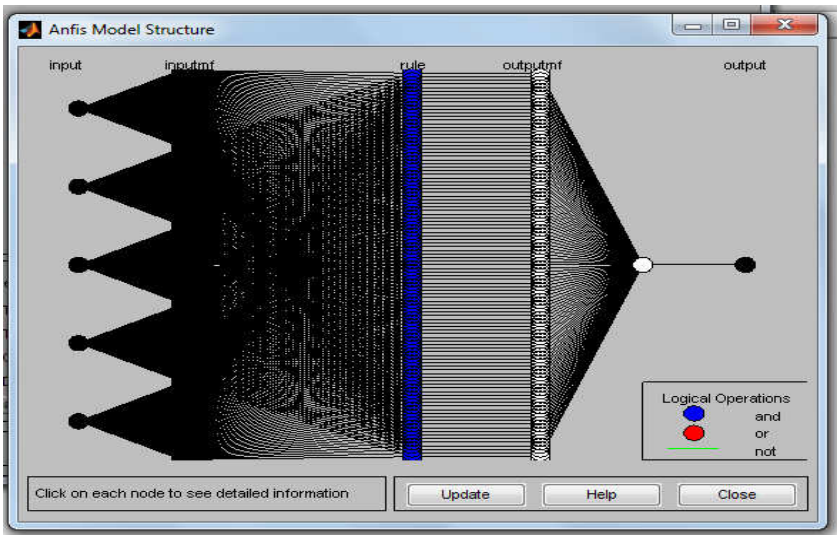
(a)



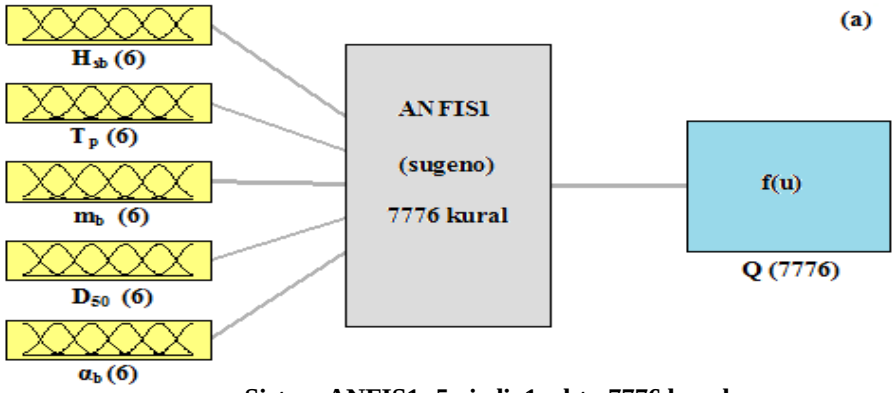
(b)



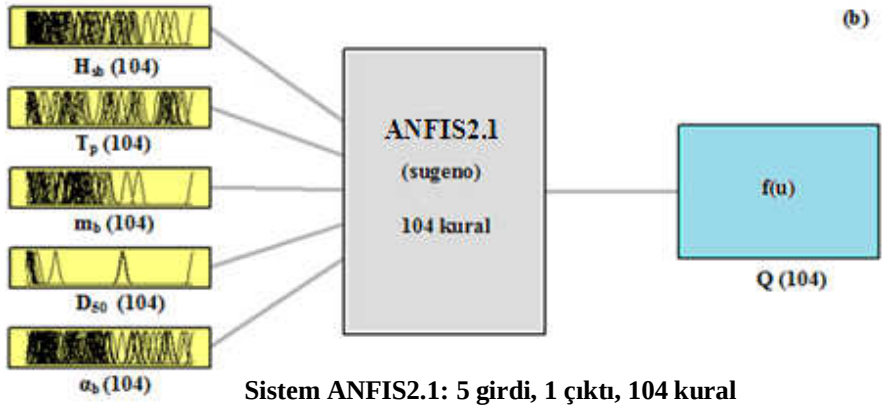
(c)



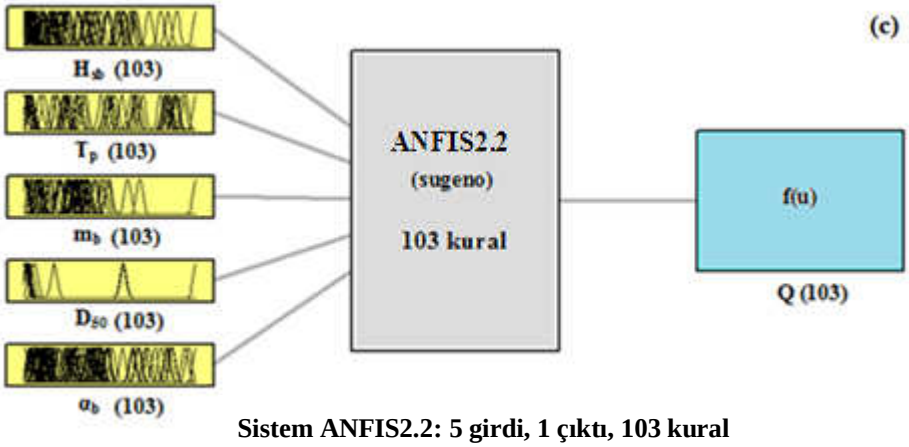
Şekil 4.8 Geliştirilen modelin genel yapısı a) ANFIS1 modeli b) ANFIS2.1 modeli c) ANFIS2.2 modeli



Sistem ANFIS1: 5 girdi, 1 çıktı, 7776 kural



Sistem ANFIS2.1: 5 girdi, 1 çıktı, 104 kural



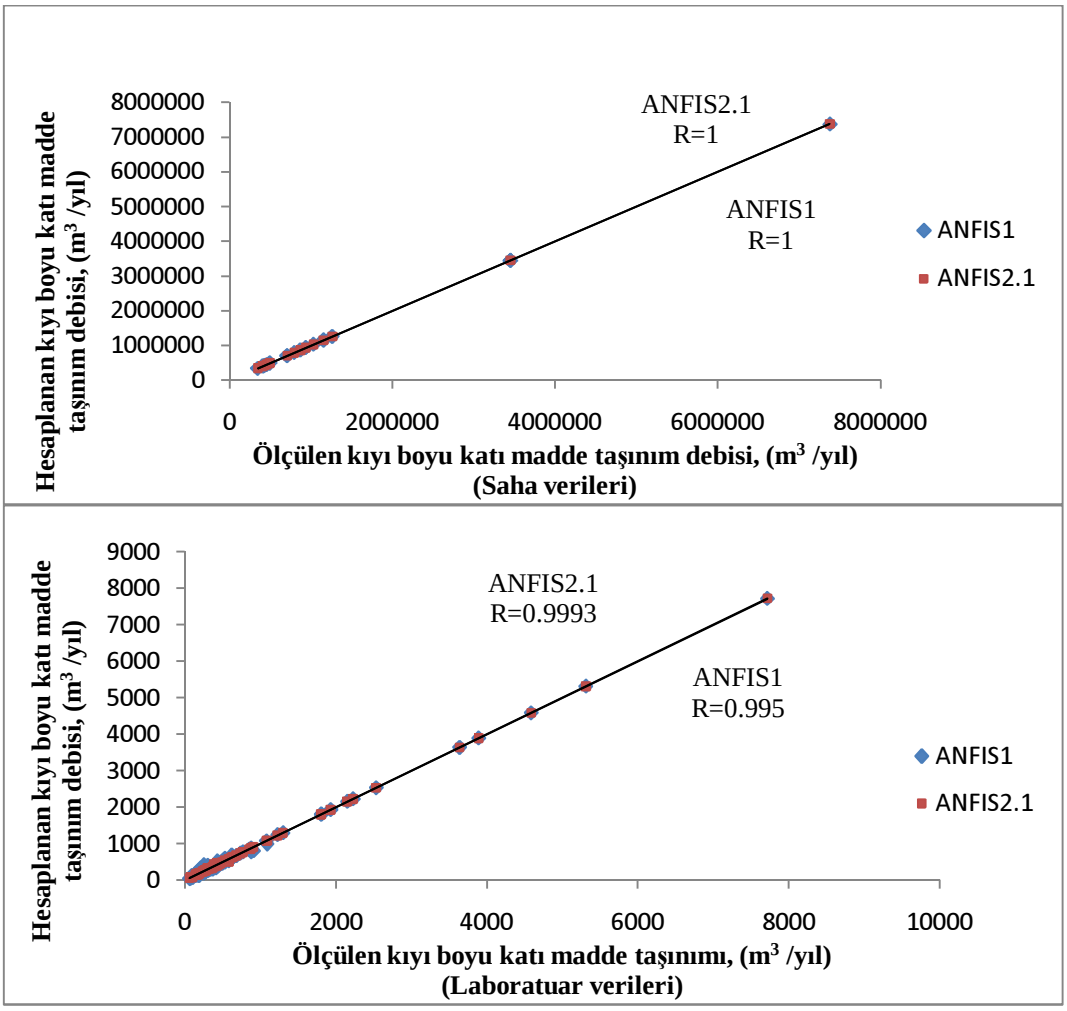
Sistem ANFIS2.2: 5 girdi, 1 çıktı, 103 kural

Şekil 4.9 Model çalışma şeması a) ANFIS1 modeli b) ANFIS2.1 modeli c) ANFIS2.2 modeli

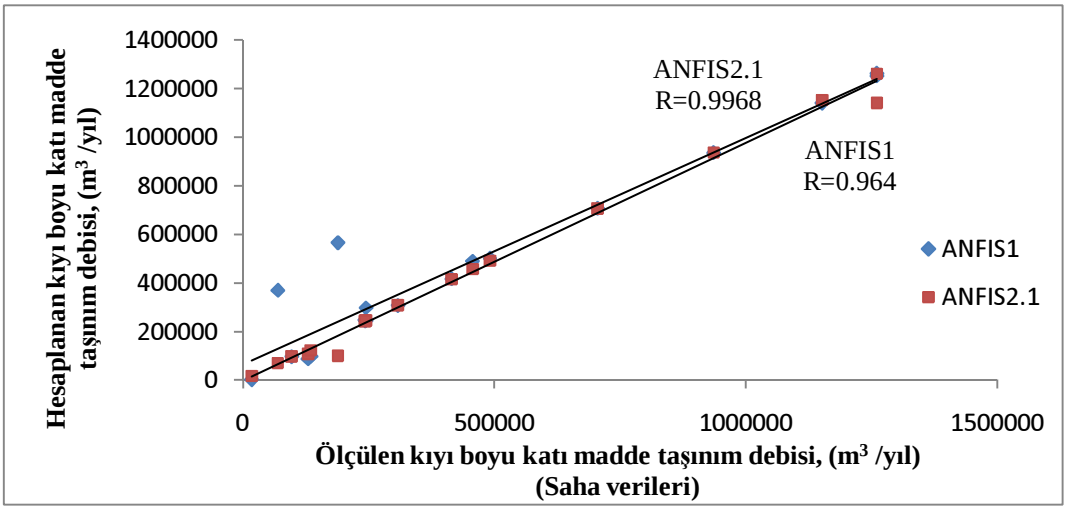
4.2.1 ANFIS Modeli Sonuçları

Şekil 4.10 ve 4.12'de ANFIS1, ANFIS2.1 modelleri ile, Şekil 4.11 ve 4.13'te ise ANFIS2.2 modeli ile hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım debilerinin saha ve laboratuar ölçüm verilerinin eğitme ve doğrulama değerleriyle karşılaştırılması görülmektedir. Eğitme ve doğrulama aşamalarında ANFIS1 ve ANFIS2.2 modelleri için aynı veri setleri kullanılmıştır. Bu nedenle ANFIS1 ne ANFIS2.1 modellerinin saha ve laboratuar ölçüm verileri ile karşılaştırılmaları aynı grafiklerde verilmiştir. ANFIS2.2 modelinin ölçüm verileriyle karşılaştırmaları, eğitme ve doğrulama veri setlerinin ANFIS1 ve ANFIS2.1 modellerinden

farklı olması nedeniyle ayrı grafikler üzerinde gösterilmiştir.

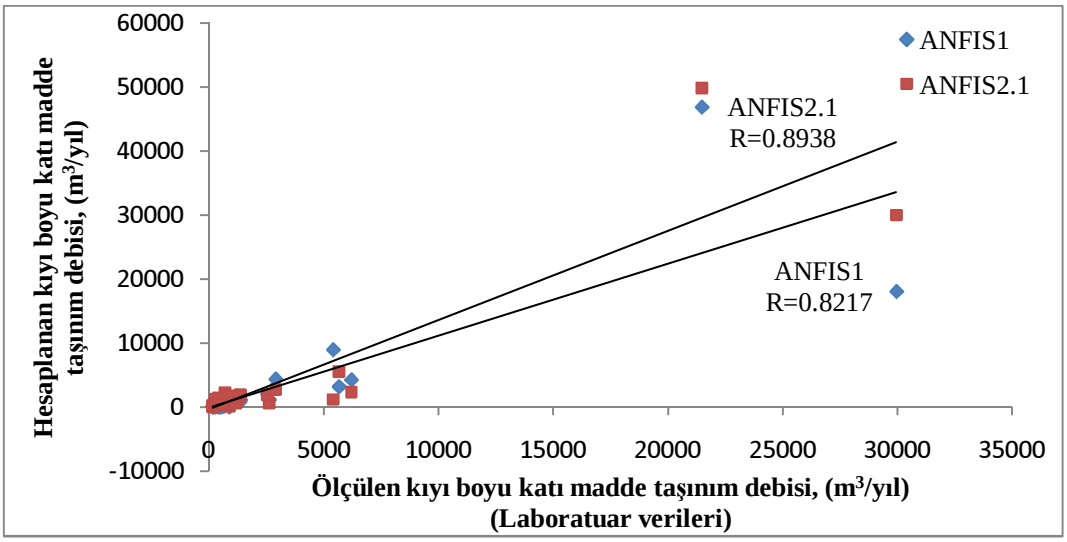


a) Eğitme verileri



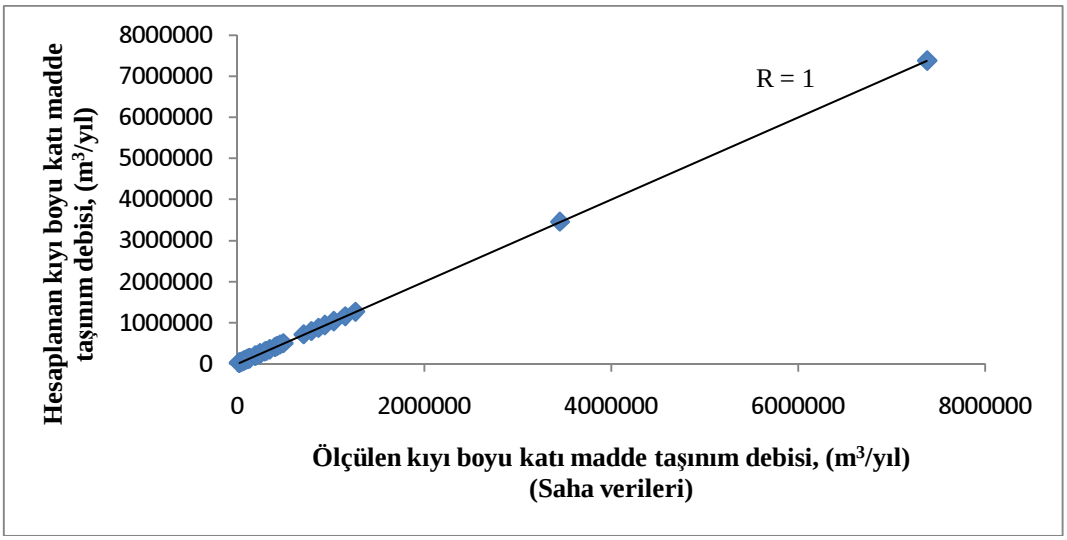
b) Doğrulama verileri

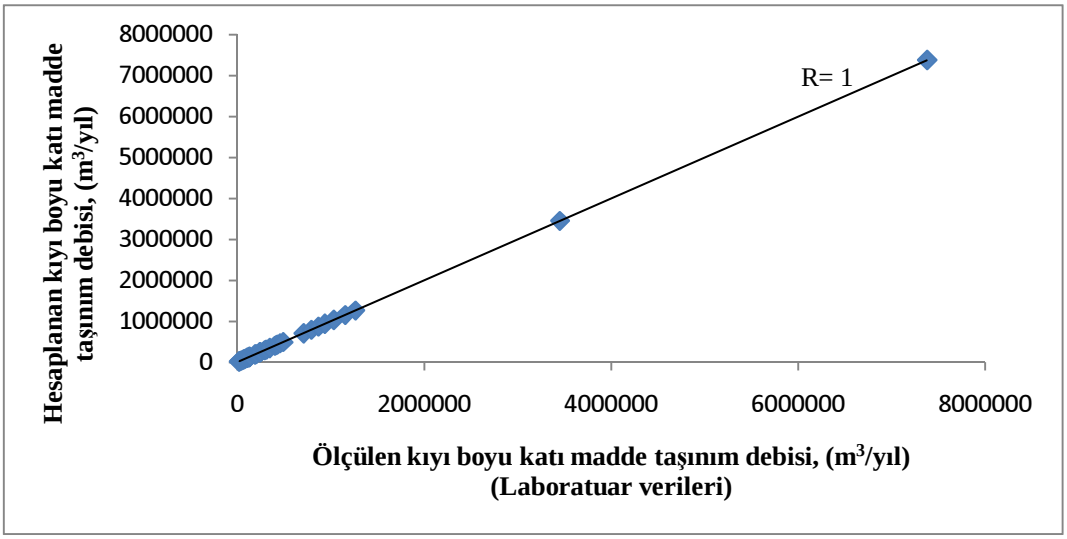
Şekil 4.10 ANFIS1 ve ANFIS 2.1 model sonuçlarının ölçüm değerleriyle serpilme diyagramı şeklinde karşılaştırılması a) Eğitme verileri b) Doğrulama verileri



b) Doğrulama verileri

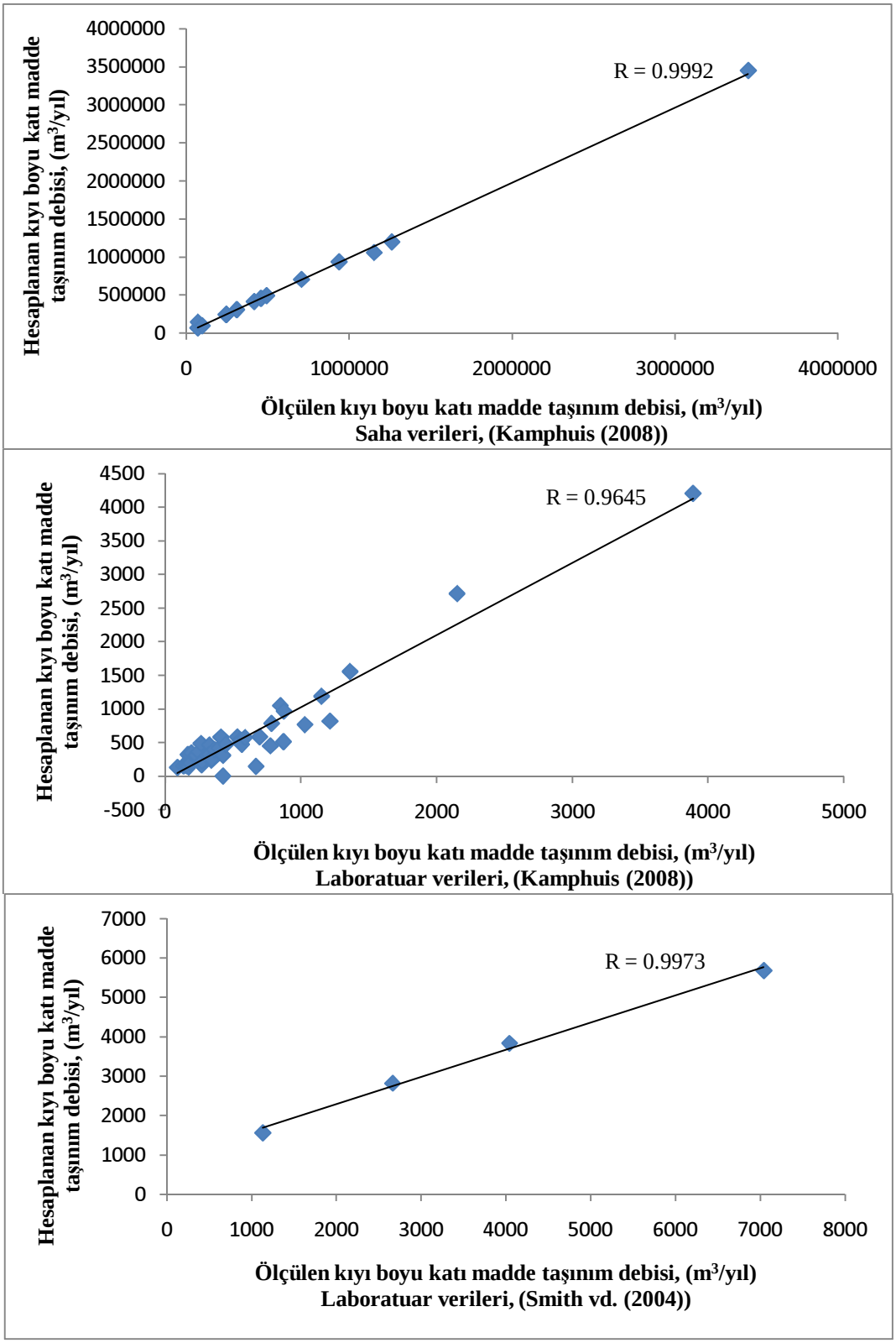
Şekil 4.10 Devam





a) Eğitme verileri

Şekil 4.11 ANFIS2.2 model sonuçlarının ölçüm değerleriyle serpilme diyagramı şeklinde karşılaştırılması a) Eğitme verileri b) Doğrulama verileri



b) Doğrulama verileri

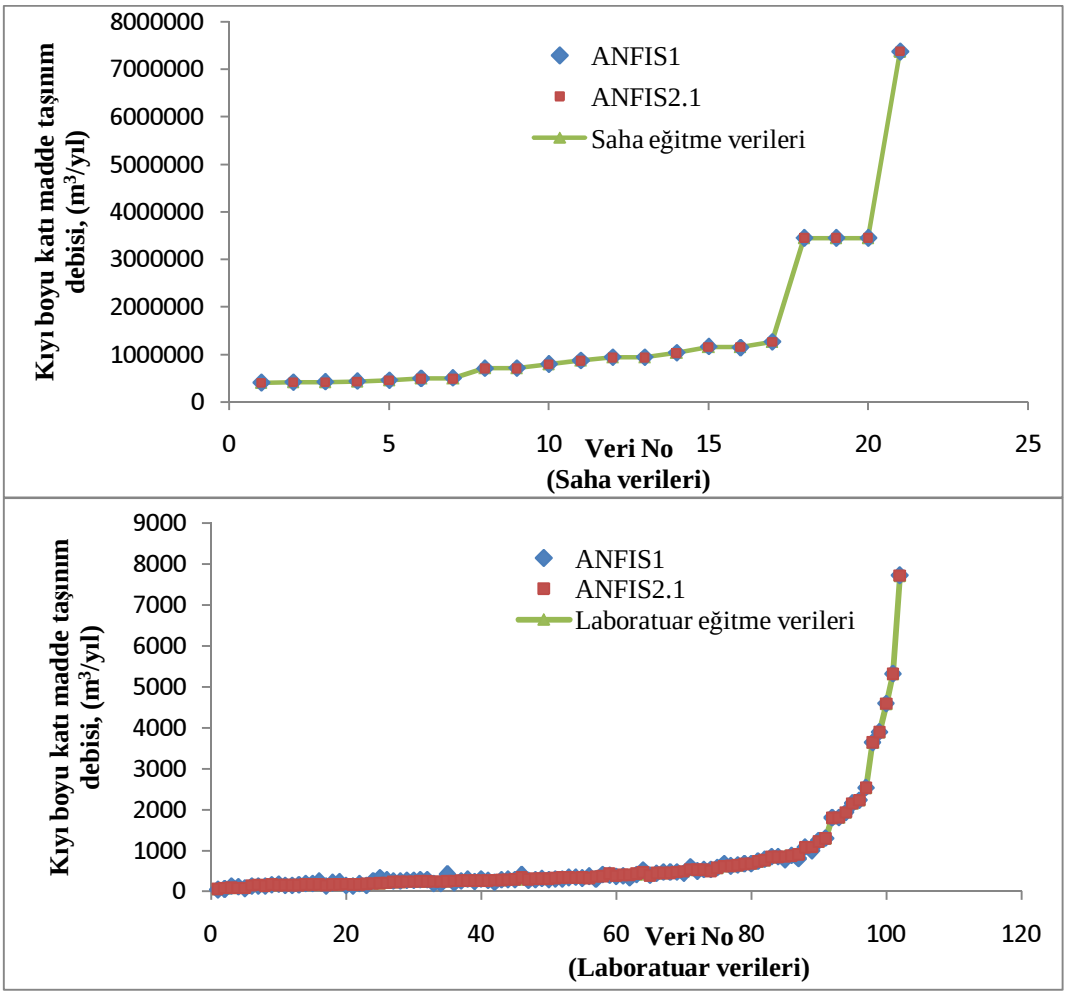
Şekil 4.11 Devam

Şekil 4.10'da ANFIS1 ve ANFIS2.1 modelleri, Şekil 4.11'de ise ANFIS2.2 modeli ile

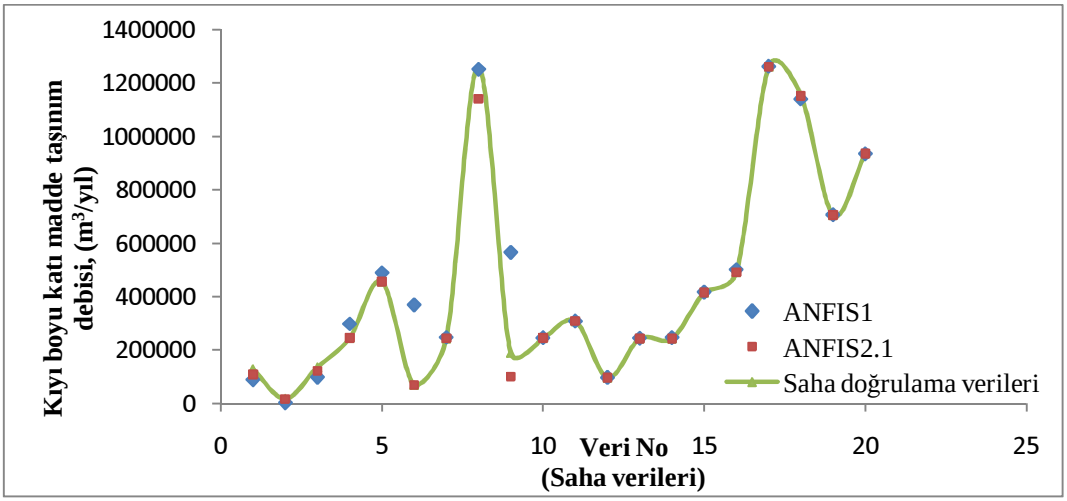
hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım debilerinin eğitme ve doğrulama verileri ile serpilme diyagramı şeklinde karşılaştırılmaları verilmiştir. Eğitme verileri ile ANFIS1 modelinden elde edilen kıyı boyu katı madde taşınımlarının korelasyon katsayıları (R) saha ve laboratuar verileri için sırasıyla 1 ve 0.995'tir. ANFIS2.1'in saha verileri için korelasyon katsayısı (R=1), laboratuar verileri için ise (R=0.9993)'tür. Eğitme verileri ile ANFIS2.2 modelinden elde edilen kıyı boyu katı madde taşınımlarının korelasyon katsayıları (R) saha ve laboratuar verileri için 1'dir

Şekil 4.10b'de ANFIS1 ve ANFIS2.1 modelleri ile hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım debilerinin doğrulama verileri ile serpilme diyagramı şeklinde karşılaştırılmaları verilmiştir. Saha ve laboratuar verileri için ANFIS2.1 modelinin korelasyon katsayıları (R_{saha}=0.9968, R_{lab}=0.8938), ANFIS1 modelinden (R_{saha}=0.964, R_{lab}=0.8217) yüksek olduğu görülmektedir. Bu değerlerden ANFIS2.1 modelinin doğrulama verilerini tahmin etme kapasitesinin, ANFIS1 modelinden yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.11b'de ANFIS2.2 modeli ile hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım debilerinin doğrulama verileri ile serpilme diyagramı şeklinde karşılaştırılmaları verilmiştir. Üç modelin de Kamphuis (2008) doğrulama verileri için tahmin kapasiteleri karşılaştırıldığında, ANFIS2.2 modelinin korelasyon katsayılarının (R_{saha}=0.9992, R_{lab}=0.9645), ANFIS1 ve ANFIS2.1'den yüksek olduğu görülmektedir. ANFIS2.2 modelinin Smith vd. (2004) doğrulama verileri ile karşılaştırıldığında da oldukça yüksek korelasyon değerine (R=0.9997) sahip olduğu görülmektedir. Tüm model sonuçları karşılaştırıldığında ANFIS2.2 modelinin, ANFIS1 ve ANFIS2.1 modellerine göre hem saha hem de laboratuar verileri ile daha uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 4.12'de ANFIS1 ve ANFIS2.1 modelleri, Şekil 4.13'te ise ANFIS2.2 modeli ile hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım debilerinin eğitme ve doğrulama verileri ile seri şeklinde karşılaştırılmaları verilmiştir.

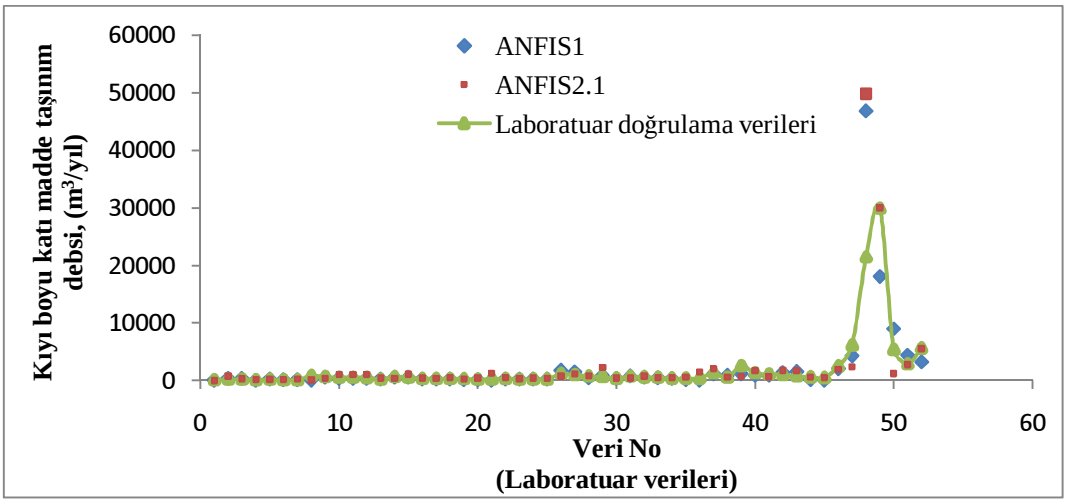


a) Eğitme verileri

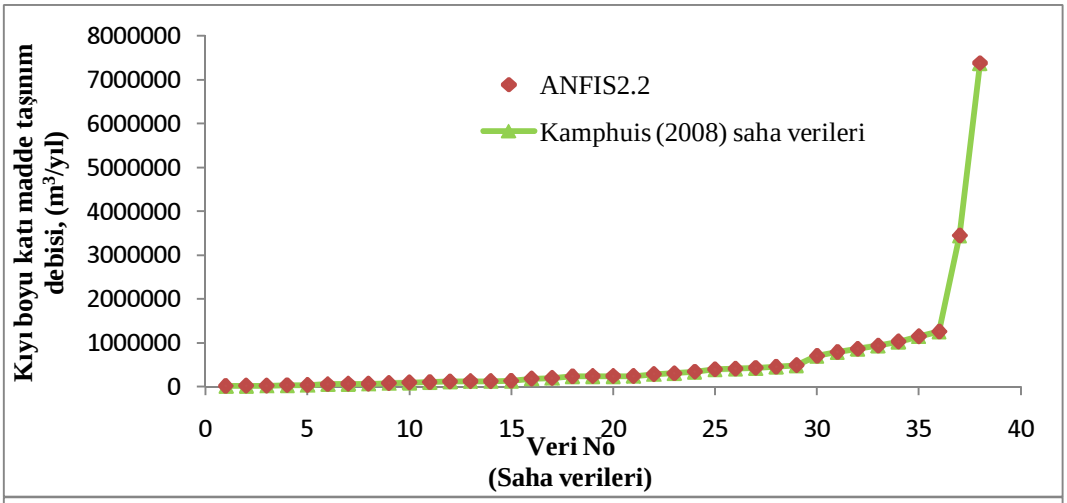


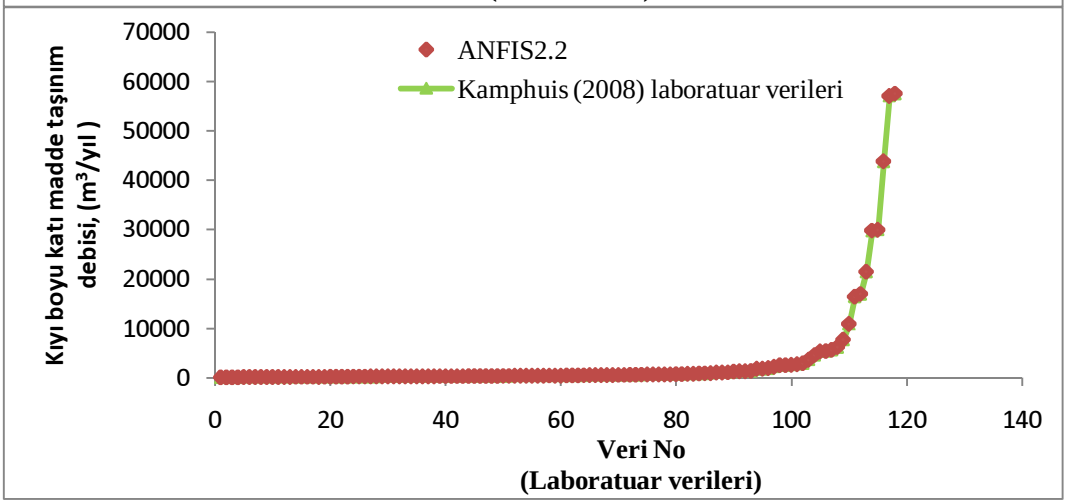
b) Doğrulama verileri

Şekil 4.12 ANFIS1 ve ANFIS2.1 model sonuçlarının ölçüm değerleri ile seri şeklinde karşılaştırılması a) Eğitme verileri b) Doğrulama verileri

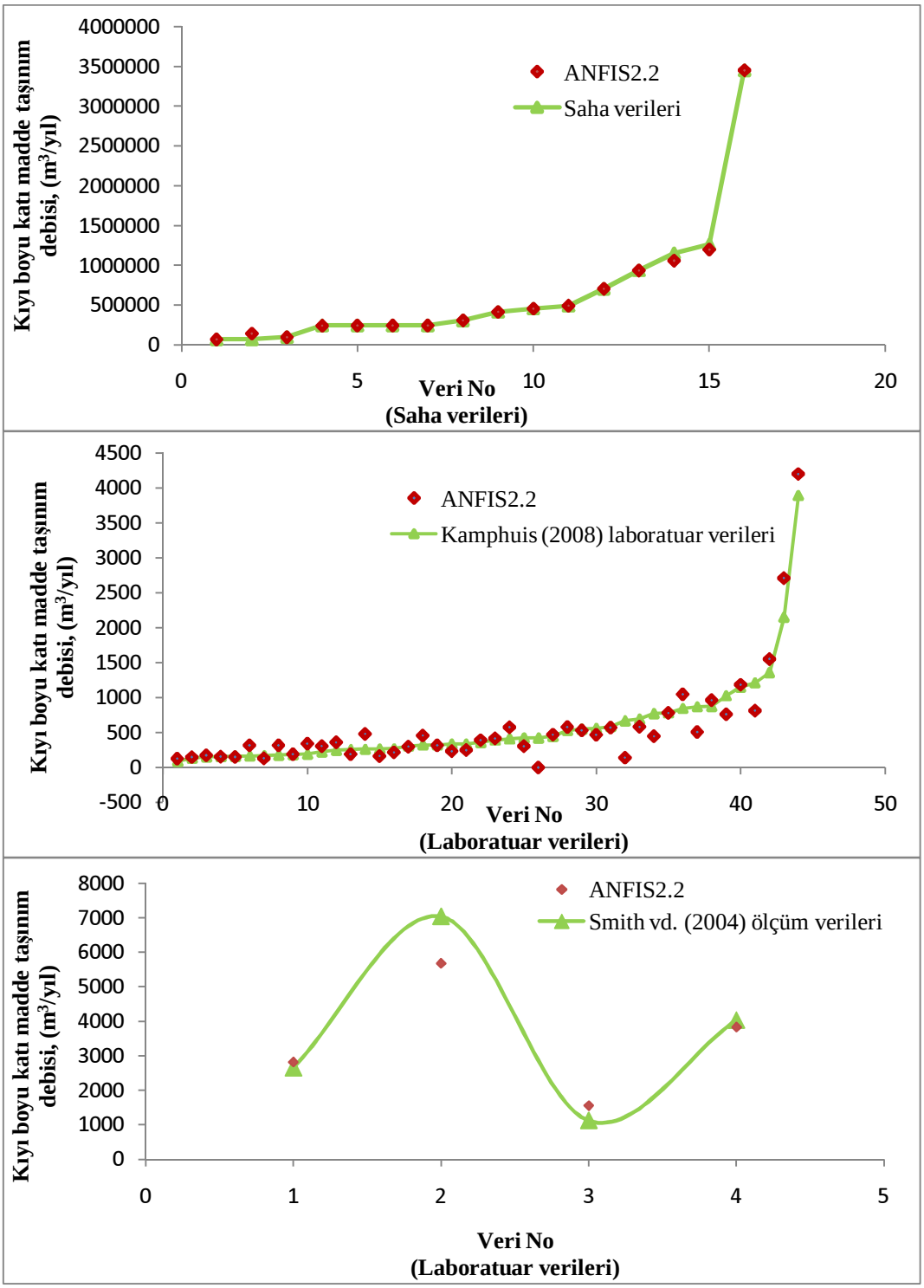


b) Doğrulama verileri
Şekil 4.12 Devam





a) Eğitme verileri
Şekil 4.13 ANFIS2.2 modeli sonuçlarının ölçüm değerleri ile seri şeklinde karşılaştırılması a) Eğitme verileri b) Doğrulama verileri



b) Doğrulama verileri

Şekil 4.13 Devam

Şekil 4.12'de ANFIS1 ve ANFIS2.1 modelleri, Şekil 4.13'te ise ANFIS2.2 modeli ile hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım debilerinin eğitme ve doğrulama verileri ile seri şeklinde karşılaştırılmaları verilmiştir. Şekil 4.12a ve Şekil 4.13a'da her üç model ile hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım debilerinin saha ve laboratuar eğitme verileri ile oldukça uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir. Şekil 4.12b'de ANFIS2.1 modelinin hem

saha hem de laboratuar doğrulama verileriyle ANFIS1 modeline göre daha uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir. Şekil 4.13b'de ANFIS2.2 model sonuçlarının Kamphuis (2008) ve Smith vd. (2004) doğrulama verileri ile uyumunun oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Her üç modelin sonuçları Kamphuis (2008) verileri ile karşılaştırıldığında en yüksek tahmin kapasitesine sahip olan modelin ANFIS2.2 olduğu, ANFIS2.1'in de ANFIS1'e göre daha verimli bir model olduğu anlaşılmaktadır.

Tüm sonuçlar karşılaştırıldığında ANFIS1, ANFIS2.1 ve ANFIS2.2 modellerinin farklı tahmin kapasitelerine sahip oldukları görülmektedir. Bu fark, modellerin farklı bulanık çıkarım yöntemleriyle modellenmesinden kaynaklanmaktadır. ANFIS1 modelinde ağlara ayırma yöntemi kullanılmıştır. Ağlara ayırma yönteminde girdi verileri için atanacak üyelik fonksiyonu sayıları kullanıcı tarafından belirlenmekte, kural yapısı ve çıktı üyelik fonksiyonları sistem tarafından atanmaktadır. ANFIS1 modelinde her bir girdi parametresi için sisteme altışar üyelik fonksiyonu atanmasına karar verilmiştir. ANFIS2.1 ve ANFIS2.2 modellerinde eksiltmeli kümeleme yöntemi kullanılmıştır. Eksiltmeli kümeleme yönteminde ANFIS1 modelinden farklı olarak girdi üyelik fonksiyonu sayıları da sistem tarafından belirlenmektedir. Bu sayı girilen eğitme verilerinin sayısı ve değer aralığına göre değişmektedir. Bu yolla ANFIS2.1 ve ANFIS2.2 modellerinde girdi parametreleri için sırasıyla 104'er ve 103'er adet üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur. ANFIS1, ANFIS2.1 ve ANFIS2.2 modellerinin yapıları karşılaştırıldığında, girdi verilerine daha çok üyelik fonksiyonu atanan ANFIS2.1 ve ANFIS2.2 modellerinin ANFIS1'e göre daha doğru sonuçlar vermesi beklenmektedir. Aynı yöntemle modellenen ANFIS2.2'nin ANFIS2.1 ile aynı yapıda olmasına rağmen daha yüksek tahmin kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ANFIS2.2 modelinin eğitme aşamasında seçilen veri sayısının ve veri aralığının ANFIS2.1 modelinden daha fazla olmasıdır.

4.3 Bulanık Mantık Yöntemi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kurulan bulanık mantık ve ANFIS modelleri ile kıyı boyu katı madde taşınımın modellenmesinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3'te verilmektedir. Çizelge 4.4'te ise ANFIS modellerinden elde edilen sonuçların saha ve laboratuar doğrulama verileriyle uyumları görülmektedir. Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te her modelin doğrulama verileriyle karşılaştırılması sonucunda bulunan ortalama hata (OH), hata karelerinin ortalamasının karekökü (HKOK), saçılım indeksi (Sİ), determinasyon katsayısı (R^2) ve korelasyon katsayısı (R) verilmiştir. Laboratuar değerleri saha değerlerinden oldukça küçüktür. Saha ve laboratuar değerlerinin bir arada değerlendirilebilmesi için Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te bulunan

değerler katı madde taşınımı miktarlarının $Q/\left(\frac{\rho H_{sb}^{3}}{T_p}\right)$ boyutsuz parametresine dönüştürülmesiyle hesaplanmıştır. Ölçüm ve tahmin edilen değerler arasındaki uyum oranı aşağıda verilen istatistiksel parametrelerle belirlenmiştir:

$$OH = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(Q_{hi} - Q_{öi}\right) \tag{4.9}$$

$$HKOK = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(Q_{hi} - Q_{öi}\right)^2} \tag{4.10}$$

$$Sİ = \frac{HKOK}{GDO}\times 100 \tag{4.11}$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(Q_{öi} - \overline{Q_ö}\right)\left(Q_{hi} - \overline{Q_h}\right)}{\left(\sum_{i=1}^{N}(Q_{öi} - \overline{Q_ö})^2\right)^{0.5}\left(\sum_{i="}^{N}(Q_{hi} - \overline{Q_h})^2\right)^{0.5}} \tag{4.12}$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N}(Q_{hi})(Q_{öi}) - \frac{\sum_{i=1}^{N}(Q_{hi})(Q_{öi})}{N}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{N}Q_{hi}^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^{N}Q_{hi}^2\right)}{N}\right)\left(\sum_{i=1}^{N}Q_{öi}^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^{N}Q_{öi}^2\right)}{N}\right)}} \tag{4.13}$$

burada Q_h model ile hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım debisi, $Q_ö$ ölçülen kıyı boyu katı madde taşınım debisi, $\overline{Q_h}$ hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım debilerinin ortalaması, $\overline{Q_ö}$ ölçülen kıyı boyu katı madde taşınım debilerinin ortalaması, GDO gözlenen değerlerin ortalaması, N veri sayısıdır.

Çizelge 4.3 Kıyı boyu katı madde taşınımının Bulanık Mantık ve ANFIS ile modellemesinden elde edilen ortalama hata (OH), hata karelerinin ortalamasının karekökü (HKOK), saçılım indeksi (Sİ), determinasyon katsayısı (R^2) ve korelasyon katsayısı (R)

Model	**OH**	**HKOK**	**Sİ (%)**	**R^2**	**R**
BM1	1.48	1.612	85	0.35	0.59
BM2.1	0.87	0.4647	70	0.53	0.73
BM2.2	0.66	0.3897	58	0.57	0.76
ANFIS1	0.003	0.03	43	0.80	0.89
ANFIS2.1	0.002	0.0084	9	0.90	0.95
ANFIS2.2	0.0006	0.0058	7.1	0.96	0.98

Çizelge 4.4 Kıyı boyu katı madde taşınımının ANFIS ile modellemesinden elde edilen ortalama hata (OH), hata karelerinin ortalamasının karekökü (HKOK), saçılım indeksi (Sİ), determinasyon katsayısı (R^2) ve korelasyon katsayısı (R)

Model	Veri Türü	OH	HKOK	Sİ (%)	R^2	R
ANFIS1	Laboratuar (Kamphuis, 2008)	0.027	0.07	26	0.7	0.83
	Saha (Kamphuis, 2008)	0.016	0.065	20	0.91	0.95
ANFIS2.1	Laboratuar (Kamphuis, 2008)	0.006	0.04	14	0.81	0.90
	Saha (Kamphuis, 2008)	0.005	0.013	5.82	0.9936	0.9968
ANFIS2.2	Laboratuar (Kamphuis, 2008)	0.0005	0.0028	10.5	0.93	0.9645
	Saha (Kamphuis, 2008)	0.0004	0.001	4.4	0.9984	0.9992
	Laboratuar (Smith vd., 2004)	0.0013	0.0043	4.9	0.9947	0.9973

Çizelge 4.3'te bulanık mantık ve ANFIS modellerinin hata istatistik parametreleri karşılaştırıldığında ANFIS modellerinin bulanık mantık modellerinden oldukça üstün oldukları görülmektedir. Bulanık mantık modellerinin kapasiteleri kendi aralarında karşılaştırılacak olursa, en yüksek tahmin kapasitesine sahip bulanık modelin BM3 olduğu anlaşılmaktadır. Laboratuar ve saha verileri modellerden elde edilen çıktılarla karşılaştırıldığında, en düşük HKOK ve en yüksek R^2 değerlerinin ANFIS2.2 modeli ile elde edildiği görülmektedir (Çizelge 4.4). Bundan dolayı kıyı boyu katı madde taşınım debisinin belirlenmesinde ANFIS2.2 modelinin bulanık mantık modellerinden üstün olduğu söylenebilir. ANFIS'in bulanık mantık modelinden daha iyi sonuç vermesi, bulanık mantık modellerinde kuralların yapısının ve parametre özelliklerinin modeli kuran kişi tarafından belirleniyor olmasıdır. ANFIS'te ise kurallar ve üyelik fonksiyonları, en iyi çıktı verileri elde edilecek şekilde sistem tarafından atanmaktadır. Model sonuçlarını özetlemek gerekirse:

- BM1 modeli girdi parametreleri olarak H_{sb}, T_p ve m_b parametrelerini içermektedir. Bulanık mantık modellerinde girdi ve üyelik fonksiyonu sayısı, dolayısıyla kural sayıları azaldıkça model daha az karmaşık bir hale gelmektedir. Bu durumda daha kısa sürede BM1 modeli gibi daha basit bir model kurulabilmektedir. Ancak BM1 modeli ile hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım debileri ölçüm değerleriyle karşılaştırıldığında, en yüksek ortalama hata (OH=1.48), hata karelerinin ortalamasının karekökü (HKOK=1.612) ve saçılım indeksi (Sİ=%85) değerlerine sahip modelin BM1 modeli olduğu görülmektedir. Ayrıca BM1 modeli diğer modeller arasında en düşük

determinasyon katsayısı (R^2 =0.35) ve korelasyon katsayısı (R=0.59) değerlerine sahiptir. BM1 modelinde kıyı boyu katı madde taşınımı daha basit bir model sistemi ile belirlenmeye çalışılmıştır. Ancak girdi parametrelerinde medyan tane çapının (D_{50}) ve dalga kırılma açısının (α_b) ihmal edilmesi nedeniyle kıyı boyu katı madde taşınımı yeterli hassasiyette hesaplanamadığı görülmektedir.

- BM2.1 modeli girdi olarak H_{sb}, T_p, m_b, D_{50}, α_b parametrelerini içermektedir. Girdi verileri, üyelik fonksiyonları ve dolayısıyla kural sayıları artmıştır. H_{sb}, T_p, m_b, D_{50} parametreleri üçer, α_b ise beş adet üyelik fonksiyonu içermektedir. BM2.1 modeli, BM1 modeline göre kıyı boyu katı madde taşınım mekanizmasını daha ayrıntılı temsil eden bir yapıya sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı BM2.1 modelinin BM1 modeline göre daha hassas sonuçlar vermesi beklenmektedir. Çizelge 4.3'teki hata parametreleri değerlerinden de BM2.1 modeli ile BM1 modelinden daha düşük ortalama hata (OH=0.87), hata karelerinin ortalamasının karekökü (HKOK=0.46) ve saçılım indeksine (Sİ=%70) sahip değerler elde edildiği görülmektedir. BM2.1 modelinin determinasyon katsayısı (R^2 =0.53) ve korelasyon katsayısı (R=0.73) BM1 modelinden yüksektir. Bu değerlerden BM2.1 modelinin BM1 modelinden daha doğru sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır.
- BM2.2 modeli girdi olarak H_{sb}, T_p, m_b, D_{50}, α_b parametrelerini içermektedir. H_{sb}, T_p, m_b, D_{50} parametreleri üçer, α_b ise beş adet üyelik fonksiyonu içermektedir. BM2.2 modelinin yapısı, BM2.1 modeline benziyor olsa da girdi parametrelerine atanan üyelik fonksiyon şekillerinde ve kural yapılarında değişiklikler bulunmaktadır. Bu değişiklikler BM2.1 modeli üzerinden daha hassas bir model elde etmek amacıyla, deneme-yanılma yoluyla yapılmış ve BM2.2 modeli oluşturulmuştur. BM2.2 modelinin ortalama hata (OH=0.66), hata karelerinin ortalamasının karekökü (HKOK=0.3897) ve saçılım indeksi (Sİ=%58) değerleri BM2.1 modelinden düşüktür. Determinasyon katsayısı (R^2 =0.57) ve korelasyon katsayısı (R=0.76) değerleri ise BM2.1 modelinden yüksektir. Bu değerlerden BM2.2 modelinin BM2.1 modelinden üstün olduğu anlaşılmaktadır.
- ANFIS1, ANFIS2.1 ve ANFIS2.2 modellerinde H_{sb}, T_p, m_b, D_{50}, α_b girdi parametreleridir. ANFIS1 modeli ağlara ayırma yöntemi ile kurulmuş ve her bir girdi parametresine altı adet üyelik fonksiyonu atanmıştır. Bu yöntemde girdi verileri arasında olabilecek tüm etkileşimleri içeren kurallar model tarafından belirlenmektedir. Model eğitimi süresince her kural için farklı bir çıktı üyelik fonksiyonu atanmaktadır. ANFIS2.1 ve ANFIS2.2 modellerinin kurulumunda eksiltmeli kümeleme yöntemi kullanılmıştır. ANFIS2.1 ve ANFIS2.2 modellerinde girdi parametrelerine atanan üyelik fonksiyonu sayıları model tarafından belirlenmektedir. ANFIS1 ve ANFIS2.1 modellerinde eğitme veri seti olarak

Kamphuis (2008) saha ve laboratuar ölçüm değerlerinden seçilen veriler ve Smith vd. (2004) laboratuar verileri kullanılmıştır. ANFIS1 ve ANFIS2.1 modellerinde aynı eğitme ve doğrulama veri setleri kullanılmıştır. ANFIS2.2 modelinin eğitme verileri Kamphuis (2008) verilerinden seçilmiştir ve sayıca ANFIS1 ve ANFIS2.1 modellerinin eğitme verilerinden fazladır. ANFIS2.2 modelinin eğitme veri setindeki parametreler, ANFIS1 ve ANFIS2.1 modellerine göre daha geniş bir aralığı temsil etmektedir. Modellerin hata değerleri, model eğitiminde kullanılmamış olan doğrulama parametreleri ile belirlenmiştir. Çizelge 4.3'teki hata istatistik değerleri karşılaştırıldığında ANFIS1, ANFIS2.1 ve ANFIS2.2 modellerinin BM1, BM2 ve BM3 modellerine göre doğrulama verileri ile daha uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir. ANFIS1, ANFIS2.1 ve ANFIS2.2 modelleri kendi aralarında karşılaştırıldıklarında, ANFIS2.2 modelinin ANFIS1 ve ANFIS2.1 modeline göre daha uyumlu sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. ANFIS1 modelinin ortalama hata (OH=0.003), hata karelerinin ortalamasının karekökü (HKOK=0.03) ve saçılım indeksi (Sİ=%43) değerleri ANFIS2.1 modelinin ortalama hata (OH=0.002), hata karelerinin ortalamasının karekökü (HKOK=0.0084) ve saçılım indeksi (Sİ=%9) değerlerinden yüksek olduğu görülmektedir. ANFIS2.2 modelinin ise (OH=0.0006, HKOK=0.0058 ve Sİ=%7) en düşük hata istatistik parametrelerine sahiptir. Ayrıca ANFIS2.2'nin determinasyon katsayısı (R^2 =0.96) ve korelasyon katsayısı (R=0.98) değerleri ANFIS2.1 (R^2 =0.90, R=0.95) ve ANFIS1 (R^2 =0.80, R=0.89) modellerinden yüksektir. Bu değerlerden ANFIS2.2 modelinin kıyı boyu katı madde taşınım debisini tahmin etme kapasitesinin ANFIS1 ve ANFIS2.1 modellerinden daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Buradan da kıyı boyu katı madde taşınımı gibi karmaşık bir olayın, eksiltmeli kümeleme yöntemi ile daha iyi temsil edilmekte olduğu anlaşılmaktadır.

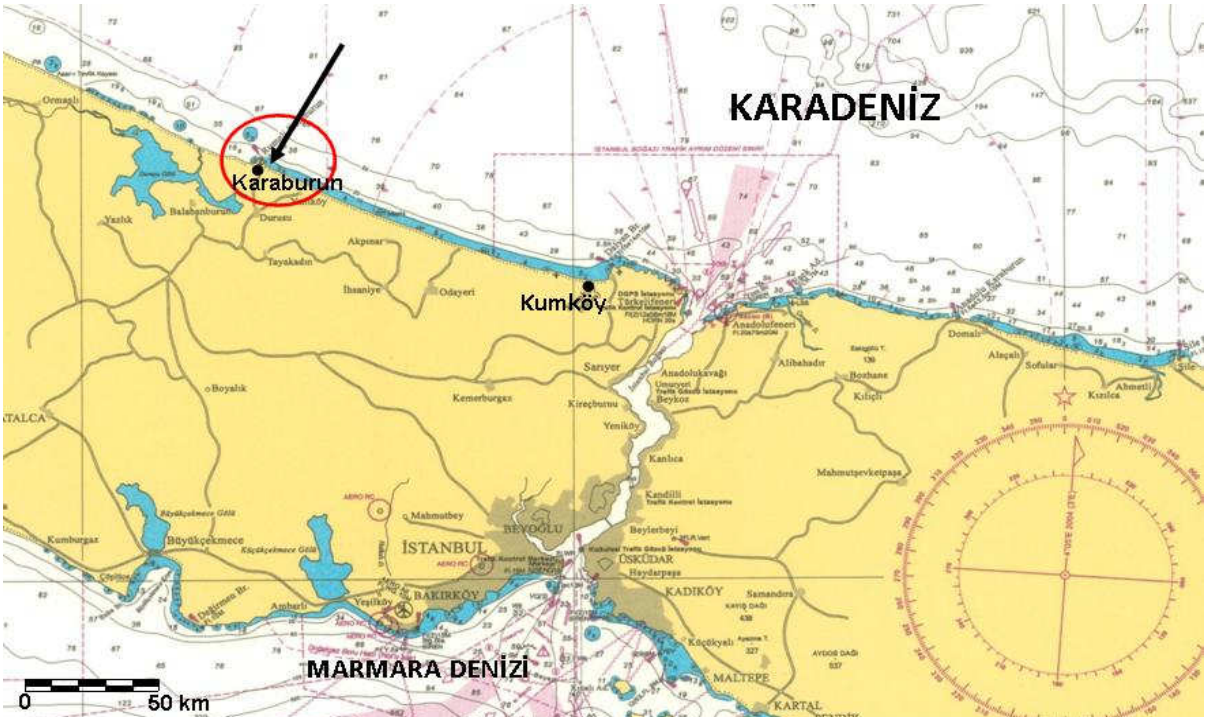
- ANFIS modellerinin tahmin kapasiteleri, Çizelge 4.4'teki gibi laboratuar ve saha doğrulama verileri için ayrı ayrı incelenecek olursa ANFIS1 modelinin laboratuar doğrulama verileri için determinasyon katsayısı (R^2 =0.7) ve korelasyon katsayısı (R=0.83) değerlerinin ANFIS2.1 (R^2 =0.81, R=0.90) ve ANFIS2.2 (R^2 =0.93, R=0.9645) modellerinden düşük olduğu görülmektedir. Modellerin laboratuar doğrulama verileri için hata istatistik parametreleri karşılaştırıldığında en yüksek OH, HKOK ve Sİ değerlerine sahip modelin ANFIS1 (OH=0.027, HKOK=0.07 ve Sİ=%26) olduğu anlaşılmaktadır. ANFIS2.1 modelinin laboratuar doğrulama değerleri için hata istatistik parametrelerinin ise (OH=0.006, HKOK=0.004 ve Sİ=%14) ANFIS2.2 modelinden (OH=0.0005, HKOK=0.0028 ve Sİ=%10.5) yüksek olduğu tespit edilmiştir. Modellerin saha doğrulama verileri için tahmin kapasiteleri karşılaştırıldığında ANFIS1 modelinin determinasyon

katsayısı (R^2 =0.91) ve korelasyon katsayısı (R=0.95) değerlerinin ANFIS2.1 (R^2 =0.9936, R=0.9968) ve ANFIS2.2 (R^2 =0.9984, R=0.9992) modellerinden düşük olduğu görülmektedir. Modellerin saha doğrulama verileri için hata istatistik parametreleri karşılaştırıldığında en yüksek OH, HKOK ve Sİ değerlerine sahip modelin ANFIS1 (OH=0.016, HKOK=0.065 ve Sİ=%20) olduğu anlaşılmaktadır. ANFIS2.1 modelinin hata istatistik parametrelerinin ise (OH=0.005, HKOK=0.013 ve Sİ=%5.82) ANFIS2.2 modelinden (OH=0.0004, HKOK=0.001 ve Sİ=%4.4) yüksek olduğu tespit edilmiştir. ANFIS modellerinin hata istatistik parametreleri, korelasyon ve determinasyon sayıları saha ve laboratuar doğrulama verileri için karşılaştırıldığında, üç modelin de saha verilerini tahmin etme kapasitelerinin, laboratuar verilerini tahmin etme kapasitelerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. ANFIS2.2 modeli ise saha verileri ile daha uyumlu olmakla birlikte laboratuar doğrulama verileri için de oldukça yüksek tahmin kapasitesine sahiptir. Bu bilgilerden saha ve laboratuar verileri ile en uyumlu modelin ANFIS2.2 olduğu anlaşılmaktadır.

- Tüm sonuçlar karşılaştırıldığında ANFIS yöntemi ile modellemenin, klasik bulanık mantık ile modellemeye göre daha iyi sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Klasik bulanık mantık ile modelleme aşamasında kural yapıları, girdi ve çıktı parametrelerinin karakteristikleri modeli kuran kişi tarafından belirlenmektedir. ANFIS modelinde ise eğitim aşamasında ölçüm verileri ile yapılan kalibrasyon sonucunda üyelik fonksiyonları model tarafından otomatik olarak belirlenmekte ve kurallar oluşturulmaktadır. Bu sayede ANFIS modeli ile çok karmaşık girdi-çıktı ilişkilerine sahip olaylar, eğitim aşamasında sinir ağları yardımıyla kolaylıkla öğrenilmekte ve tahmin edilebilmektedir.

5. KARABURUN KIYI ALANINDA KIYI BOYU KATI MADDE TAŞINIMININ BULANIK MANTIK YÖNTEMİ ile BELİRLENMESİ: ÖRNEK UYGULAMA

Bulanık mantık yöntemi ile kıyı boyu katı madde taşınımının belirlenmesi için seçilen uygulama bölgesi Karaburun kıyı alanıdır. Karaburun İstanbul Boğazı'nın Karadeniz'e açıldığı kesimin batısında yaklaşık 40 km mesafede yer almaktadır (Şekil 5.1). Karaburun kıyısı erozyon ve yığılma gibi çok önemli problemlere sahiptir. Bu sebeple bu bölgede oluşan katı madde taşınımının belirlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Karaburun; kıyı çizgisi değişimi ve buna neden olan kıyı hidrodinamiği açısından çalışmaya önemli katkı sağlayacak bir kıyı alanıdır.



Şekil 5.1 Karaburun mevkii

5.1 Problemin Tanımı

Karaburun kıyısında, İstanbul gibi önemli bir hinterlanda hizmet eden ve bölge halkı için oldukça önemli bir ekonomik yatırım olan balıkçı barınağı bulunmaktadır (Şekil 5.2). İnşaatına 1966 yılında başlanarak 1979 yılında tamamlanan bu barınakta 412 m uzunluğunda ana dalgakıran ve 110 m uzunluğunda ikincil dalgakıran bulunmaktadır. Barınağın yaklaşık olarak 4.5 km doğusunda kömür ocaklarından çıkan toprak dökülerek 500 m uzunluğunda bir yapay burun oluşturulmuştur. Doğudan batı yönüne olan net kıyı boyu katı madde taşınımı 4.5 km doğudaki yapay burundan etkilenmiştir (Şekil 5.3). Bu sebeple Karaburun kıyısında meydana gelen toplam ve net yıllık katı madde taşınım miktarı ve yönünün doğru olarak

belirlenmesi oldukça önemlidir.



Şekil 5.2 Karaburun Balıkçı Barınağı'nın genel görünümü



Şekil 5.3 Karaburun kıyı alanı [1]

5.2 Saha Çalışmaları

Arı (2009) tarafından Karaburun kıyı alanında katı madde taşınımının belirlenmesi için çeşitli

saha çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler tezin bu bölümünde girdi verisi olarak kullanılmıştır.

5.2.1 Katı Madde Özellikleri

Karaburun bölgesindeki katı madde özelliklerinin belirlenmesi için yığılma bölgesi (ikincil dalgakıran yanı) ve dalga ölçerin bulunduğu derinlikten katı madde numuneleri alınmıştır. Katı madde granülometrik özelliklerinin belirlenebilmesi için altı veya sekiz örneğin taban yüzeyinden 5 cm kalınlığında alınması gerekmektedir (Yüksel, 2005). İki farklı bölgeden altı örnek alınmış ve granülometrik özellikler belirlenmiştir. Karaburun Balıkçı Barınağı yanındaki kıyıdan ve -16m derinlikten alınan kumun granülometrik özelliklerinin belirlenmesi için Yıldız Teknik Üniversitesi Malzeme Laboratuvarı'nda elek analizi deneyleri yapılmıştır.

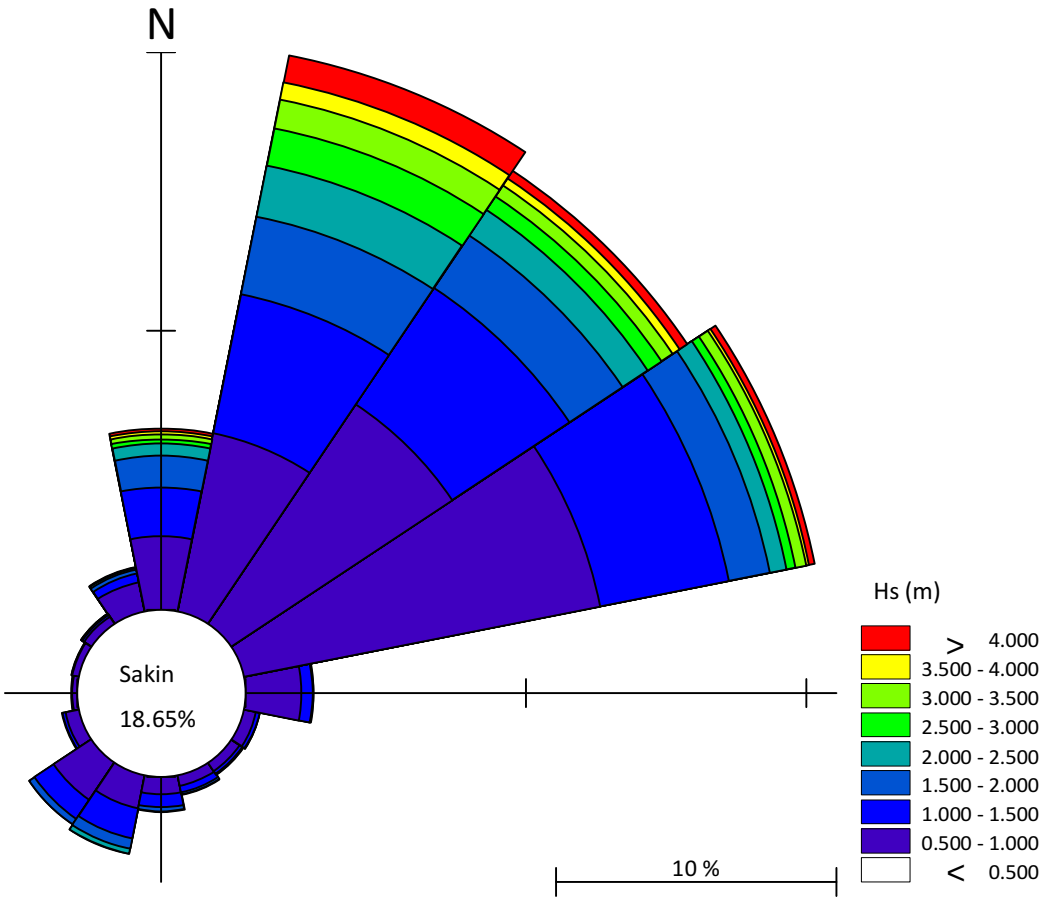
Kıyı bölgesindeki katı maddenin medyan tane çapı D_{50}=1.53 mm olarak tanımlanmış ve Wenthworth ölçeğine göre kaba kum olarak sınıflandırılmıştır. Bölgedeki D_{84}/D_{16} =1.84 oranına göre malzemenin iyi sınıflandığı tespit edilmiştir.

5.2.2 Dalga İklimi

Karaburun kıyısındaki dalga karakteristiklerini belirlemek üzere basınç ve ultrasonik tipi dalga ölçer balıkçı barınağının kuzeybatısında, 41°20´51˝N ve 28°40´59˝E koordinatlarında -16 m derinliğe yerleştirilmiştir. Ölçümlerde her iki saatte bir 10'ar dakikalık dalga verisi kaydedilmiştir. Ağustos 2003–Mart 2005 tarihleri arasında yapılan ölçümler sonucunda bölgedeki su seviyesi değişimleri, su sıcaklığı, dalga yüksekliği, dalga periyodu, dalga yönü ve cihazın bulunduğu ölçüm derinliğindeki akıntı yönü ve hızı belirlenmiştir.

Karaburun kıyısından dalga verileri elde etmek için yapılan ölçümlere ek olarak DHI tarafından geliştirilmiş bir sayısal model olan MIKE 21 SW kullanılmıştır. MIKE 21 SW yeni nesil yapılandırılmamış ağ sistemi üzerine kurulu rüzgar-dalga modelidir. Açık deniz ve kıyı alanlarında rüzgar kaynaklı dalga ile soluğan dalgasının gelişimini, transformasyonunu ve enerji harcanımıyla değişimini benzeştirmektedir (DHI, 2008a). Sayısal modelde ECMWF'den (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) Ocak 2003 ile Aralık 2005 tarihleri arasında elde edilen rüzgar verileri kullanılmıştır. Dalga tahmini için simülasyonlara başlamadan önce model kalibre edilmeli ve doğrulanmalıdır. Modelde kullanılan kalibrasyon parametreleri taban sürtünmesi, kırılma parametreleri, köpüklenme ve rüzgar verileridir. Model optimizasyonu için farklı türde birçok ağ sistemi çözümleri denenmiştir.

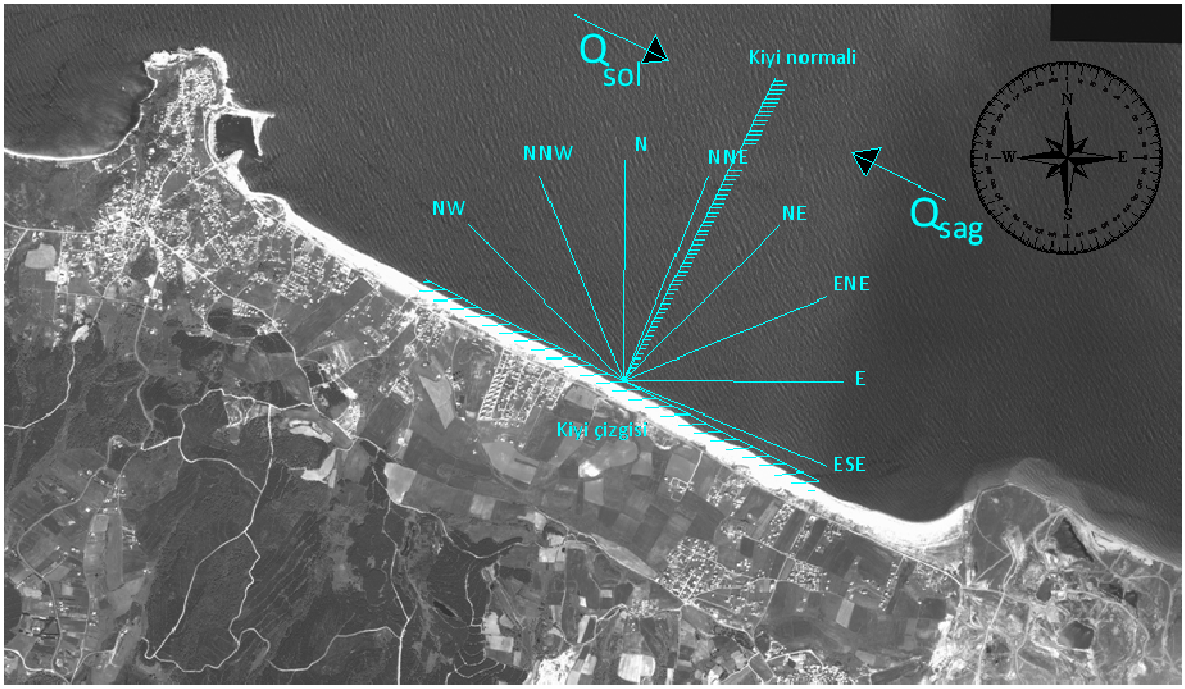
Ölçülen dalga verileri ile üçüncü nesil sayısal dalga modeli kalibre edilmiş ve belirgin dalga yüksekliği ile ortalama dalga periyodunu başarıyla tahmin ettiği görülmüştür. Modelden elde edilen belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu verilerinin HKOK (Hata Karelerinin Ortalamasının Karekökü) değerleri sırayla 0.23m ve 0.68s'dir (Arı, 2009). Şekil 5.4'te Karaburun kıyısı için derin denizde elde edilen yıllık dalga gülü görülmektedir. Bölgeye gelen etkin rüzgar yönü kuzeydoğudur. Bu da doğudan batı yönüne büyük miktarda kıyı boyu katı madde taşınımına neden olmaktadır.



Şekil 5.4 Ocak 2003-Aralık 2005 tarihleri arasında elde edilmiş yıllık açık deniz dalga gülü (Arı, 2009)

5.3 Bulanık Mantık Modelinin Karaburun Kıyı Alanına Uygulanması

Bulanık mantık yöntemi ile Karaburun kıyı alanında oluşan kıyı boyu katı madde taşınım miktarının belirlenmesi için Şekil 5.4'te verilen dalga ikliminden faydalanılmıştır. Kıyı alanı için etkili olan her dalga yönüne göre (Şekil 5.5) belirgin kırılan dalga yüksekliği (H_{sb}), dalga kırılma açısı (α_b), pik dalga periyodu (T_p) ve o yönden gelen dalgaların oluşum yüzdeleri belirlenmiştir (Çizelge 5.1)



Şekil 5.5 Karaburun kıyı alanını etkileyen dalga yönleri

Çizelge 5.1 Bulanık mantık yönteminde kullanılan ortalama dalga parametreleri (Arı, 2009)

Yön	**H_{sb}**	**α_b**	**T_p**	**Frekans (%)**
N	1.24	15	4.86	5.54
NNE	1.31	3	4.89	19.33
NE	1.17	11	4.67	21.76
ENE	0.84	22	4.10	25.55
E	0.45	28	3.31	3.95
ESE	0.27	22	3.77	1.19
NW	0.53	27	3.89	0.51
NNW	0.76	25	4.01	1.79

Bölüm 4'te anlatılan bulanık mantık yöntemlerinden ölçüm değerlerine göre en yüksek tahmin kapasitesine sahip olan ANFIS2.1 ve ANFIS2.2 modelleri ile katı madde taşınımı belirlenmiştir.

Modelde medyan tane çapı D_{50}=1.53 mm ve taban eğimi m_b=0.05 olarak tanımlanmıştır.

Modellerde kıyı çizgisini etkileyen her yön için dalga parametreleri girilmiş (H_{sb}, T_p, m_b, D_{50} ve α_b) ve model çalıştırıldıktan sonra ise her yön için kıyı boyu katı madde taşınım debisi (m^3/yıl) elde edilmiştir. Hesaplamalara göre kıyı boyu taşınan toplam ve net katı madde miktarları ANFIS2.1 modeli ile:

Q_{net}= 82140 m^3/yıl

Q_{top}= 225172 m^3/yıl

ANFIS2.2 modeli ile:

Q_{net}= 67267 m^3/yıl

Q_{top}= 177902 m^3/yıl

olarak bulunmuştur (Çizelge 5.2).

5.4 Kıyı Boyu Katı Madde Taşınım Modellerinin Değerlendirilmesi

Model tahmin kabiliyetini belirlemek üzere, Arı (2009) tarafından aynı saha verileriyle (katı madde özellikleri, dalga iklimi, vb.) CERC (USACE, 1984), Kamphuis (1991), sayısal model (LITDRIFT) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemleriyle belirlenen kıyı boyu katı madde taşınım debileri ve bu çalışmada geliştirilen model sonuçları (ANFIS2.1 ve ANFIS2.2) karşılaştırılmıştır. Modelin değerlendirilmesinde kullanılan diğer yöntemler kısaca anlatılmıştır:

CERC (USACE, 1984) Yöntemi

CERC (USACE, 1984) formülü sörf bölgesindeki birim genişlikte meydana gelen katı madde taşınımını belirlemektedir. Bu model kıyı boyu katı madde taşınımının, kırılma bölgesindeki dalga enerji akısı ile orantılı olduğunu ifade etmektedir. CERC (USACE, 1984) formülünde ((5.1) eşitliği) bulunan K katsayısı bu oranı ifade etmektedir.

$$Q = \frac{K}{\sqrt[16]{\gamma_b}} \rho g^{3/2} H_b^{5/2} \sin(2\alpha_b) \tag{5.1}$$

burada; Q toplam batık ağırlık olarak kıyı boyu katı madde taşınımını, ρ suyun özül kütlesi, g yerçekimi ivmesi, K ampirik katsayı, H_b kırılma bölgesindeki belirgin dalga yüksekliği, γ_b kırılma indeksi, α_b kırılan dalga açısıdır. Bu çalışmada K ve γ_b değerleri sırasıyla 0.39 ve 0.8 olarak alınmıştır.

CERC (USACE, 1984) modeli, kıyı boyu katı madde taşınımı belirlenmesinde yaygın

kullanılan modeldir. Ancak modelde taban malzemesi özelliklerinin, kıyı eğiminin ve sörf bölgesi genişliğinin hesaba katılmaması bazı problemler için sınırlamalara neden olmaktadır.

Karaburun kıyısı için yapılan hesaplamalarda toplam ve net kıyı boyu katı madde taşınımları Çizelge 5.2'de görülmektedir.

Kamphuis (1991) Yöntemi

Kamphuis (1991) kıyı boyu katı madde taşınımı belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir diğer formüldür. Kamphuis (1991) laboratuar çalışmalarından ve saha ölçümlerinden elde ettiği verileri kullanarak boyut analizi yöntemi ile ampirik bir formül elde etmiştir.

Kamphuis (1991), (5.2) eşitliği ile dalga periyodunu, kıyı eğimini ve tane çapının etkisini dikkate almaktadır.

$$Q=6.4x10^{4}H_{sb}^{2}T_{p}^{1.5}m^{0.75}D_{50}^{-0.25}\sin^{0.6}(2\,\alpha_{b}) \qquad (4.1)\ (5.2)$$

burada; Q kıyı boyu katı madde taşnım miktarı (m^3/yıl), H_{sb} belirgin kırılan dalga yüksekliği (m), T_p pik dalga periyodu (s), m kıyı eğimi, D_{50} medyan tane çapı (m) ve α_b dalga kırılma açısı (^{0}) olarak alınmıştır.

Kamphuis (1991) ifadesi ile belirlenen net ve toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarları Çizelge 5.2'de görülmektedir.

Sayısal Model (LITDRIFT)

Karaburun kıyısı için katı madde taşınımı Arı (2009) tarafından CERC (USACE, 1984) ve Kamphuis (1991) yöntemlerine ek olarak sayısal bir model olan LITDRIFT yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. LITDRIFT yazılımı ile kıyı morfolojisi çalışmalarında önemli bir yere sahip olan katı madde bütçe analizi yapılmakta ve bir kıyı profili için dalga yüksekliğinin kıyıya dik dağılımı, dalga kabarması ve kıyı boyu akıntısı modellemektedir. Deterministik bir sayısal model olan bu modül hesaplamalarda iki temel modelden faydalanmaktadır (DHI, 2008):

- Hidrodinamik model,
- Katı madde taşınım modeli.

LITDRIFT, uzun ve üniform bir kıyı boyunca dalga kaynaklı akıntı ve koheziv olmayan kıyı boyu katı madde taşınımı çalışmalarında kullanılabilmektedir (Arı, 2009).

LITDRIFT modülü ile;

- Kıyı boyu akıntısı,

- Kıyı boyu katı madde taşınımı,
- Yıllık katı madde taşınımı belirlenebilmektedir.

Yazılımda kıyı profili, başlangıç kıyı çizgisi ve çalışma alanına ait dalga iklimi tanımlanmıştır. Yazılımda taban pürüzlülüğü etkisi, rüzgar etkisi, kıyı çizgisi doğrultusunun etkisi parametreleri kullanılarak model kalibrasyonu yapılmıştır. Kamphuis (1991) yöntemine göre modelin kalibrasyonu tamamlandıktan sonra sayısal model dalga iklimi verileri kullanılarak koşturulmuştur. LITDRIFT yazılımı ile elde edilen net ve toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarları Çizelge 5.2'de görülmektedir.

Yapay Sinir Ağları Modeli (Arı, 2009)

Bir yapay zeka teknolojisi olan YSA'nın temel prensibi, mevcut örneklerden yararlanarak olayları öğrenme ve yeni durumlara karşı uygun yanıtlar üretmeye dayanmaktadır. İnsan beyni örnek alınarak geliştirilen bu yöntemde, öğrenme yapay sinir hücreleri (nöronlar) aracılığıyla gerçekleştirilmektedir (Arı, 2009).

Yapay sinir ağları yöntemi ile kıyı boyu katı madde taşınımının belirlenmesi için kıyı boyu katı madde taşınım debisi ölçüm verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Kamphuis'den (2008) elde edilen ölçüm verileri yardımıyla model kurulumu gerçekleştirilmiştir (163 adet laboratuar ve 54 adet saha olmak üzere toplam 217 adet ölçüm verisi) (Arı, 2009).

Kamphuis (2008) tarafından eş zamanlı olarak ölçülen belirgin kırılan dalga yüksekliği, pik dalga periyodu, medyan tane çapı, kırılma derinliği, kıyı eğimi ve dalga kırılma açısına karşılık kıyı boyu katı madde taşınım debisi verileri hem saha hem de deney verileri içerdiğinden yapay sinir ağları modelinde kullanılmak üzere boyutsuzlaştırılmıştır. Yapay sinir ağları ile modelleme için MATLAB R2008a yazılımı kullanılmıştır. Yapay sinir ağlarının MATLAB yazılımı ile modellenmesinde girdi ve çıktı verileri rastgele şekilde eğitme, test ve doğrulama verileri olarak üç kısıma ayrılmaktadır. Belirli sayıda veri ilk önce eğitime tabi tutulup, diğer kalan veriler ise modelin test ve doğrulama aşamasında kullanılmaktadır (Arı, 2009). Yapay sinir ağları ile kıyı boyu katı madde taşınımın modellenmesinden elde edilen net ve toplam kıyı boyu katı madde taşınım miktarları Çizelge 5.2'de görülmektedir.

Kıyı mühendisliği için önemli bir işlem olan kıyı boyu katı madde taşınımını belirlemek üzere bulanık mantık yaklaşımının kullanıldığı Bulanık Çıkarım Sistemi (FIS) ve Uyarlanabilir Ağ Yapısına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) tekniği kullanılmıştır. Bu tekniklerin yapıları Bölüm 3'te anlatılmıştır. FIS ve ANFIS teknikleri ile kıyı boyu katı madde taşınımının belirlenmesi oldukça yeni bir konu olduğundan literatürde bu konuyla ilgili çok az

sayıda çalışmaya rastlanmaktadır. Bulanık mantık, karmaşık doğa olaylarını matematiksel ifadeler kullanmadan modelleyen bir sistem olduğu için, klasik yaklaşımların yüksek hata verdiği veya çok karmaşık olduğu mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir. Bu amaçla FIS ve ANFIS yöntemleri kullanılarak kıyı boyu katı madde taşınım modelleri geliştirilmiştir. FIS ve ANFIS modelleri ile hesaplanan değerler karşılaştırıldığında en düşük hata istatistik değerlerine sahip olan ANFIS2.1 ve ANFIS2.2 modellerinin daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu sebeple Karaburun bölgesinde meydana gelen net ve toplam katı madde taşınım debileri ANFIS2.1 ve ANFIS2.2 modelleri kullanılarak hesaplanmış, CERC (USACE,1984) formülü, Kamphuis (1991) formülü, sayısal model (LITDRIFT) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) modeli ile karşılaştırılmaları yapılmıştır.

Çizelge 5.2 Bulanık mantık yöntemi ile belirlenen Karaburun saha çalışmasına ait katı madde taşınım debisinin diğer modellerle karşılaştırılması

	Q_{net} (m^3/yıl)	**Q_{toplam}(m^3/yıl)**
CERC (USACE, 1984)	443292	772350
Kamphuis (1991)	76448	186510
Sayısal Model (LITDRIFT)	85210	152600
Yapay Sinir Ağları Modeli	73541	178121
Bulanık Mantık Modeli (ANFIS2.1)	82140	225172
Bulanık Mantık Modeli (ANFIS2.2)	67267	177902

Tüm yöntemlerle elde edilen net (Q_{net}) ve toplam (Q_{top}) katı madde taşınımları, bölgede herhangi bir katı madde taşınım ölçümü olmadığından ve hangi yöntemin gerçek taşınım miktarına daha yakın sonuç verdiği bilinmediğinden (5.3) eşitliği ile verilen yüzdesel fark değerlerine göre karşılaştırılmıştır.

$$\text{Yüzdesel Fark} = \frac{|\text{Veri1} - \text{Veri2}|}{(\text{Veri1} + \text{Veri2})} \times 100 \tag{5.3}$$

Net kıyı boyu katı madde taşınım için hesaplanan değerler karşılaştırıldığında ANFIS2.1 modeli ile CERC (USACE, 1984), Kamphuis (1991), LITDRIFT ve YSA yöntemleri arasındaki yüzdesel farklar sırasıyla %137.47, %7.17, %3.66 ve %11.05'tir. Bu değerlerden,

ANFIS2.1 modeli ile en uyumsuz yöntemin CERC (USACE, 1984) olduğu anlaşılmaktadır. ANFIS2.1 modeli ile en düşük yüzdesel farka sahip yöntemin LITDRIFT sayısal modeli olduğu görülmektedir. LITDRIFT sayısal modelinin ardından Kamphuis (1991) ve YSA yöntemleri gelmektedir. ANFIS2.2 modeli ile hesaplanan net kıyı boyu katı madde taşınım miktarı ile CERC (USACE, 1984), Kamphuis (1991), LITDRIFT ve YSA yöntemleri arasındaki yüzdesel farklar ise sırasıyla %147.29, %12.77, %23.53 ve %8.91'dir. ANFIS2.2 modelinin en yüksek ve en düşük yüzdesel farka sahip olduğu ölçüm yöntemleri sırasıyla CERC (USACE, 1984) ve YSA yöntemleridir.

Tüm yöntemlerden hesaplanan toplam kıyı boyu katı madde taşınım debileri karşılaştırıldığında, ANFIS2.1 yöntemi ile CERC (USACE, 1984), Kamphuis (1991), LITDRIFT sayısal modeli ve YSA yöntemleri arasındaki yüzdesel farklar sırasıyla %109.70, %18.78, %38.42 ve %23.33'tür. Bu değerlerden, (Q_{toplam}) için ANFIS2.1 modeli ile diğer yöntemlerin hesapladığı değerler arasındaki farkın arttığı görülmektedir. ANFIS2.1 yöntemi ile en düşük yüzdesel farka sahip yöntemin 18.78% değerle Kamphuis (1991), en yüksek yüzdesel farka sahip yöntemin ise %109.70 değerle CERC (USACE, 1984) olduğu anlaşılmaktadır. ANFIS2.2 modelinin toplam katı madde taşınım miktarı içim CERC (USACE, 1984), Kamphuis (1991), LITDRIFT sayısal modeli ve YSA yöntemleri arasındaki yüzdesel farklar sırasıyla %125.11, %4.72, %15.31 ve %0.12'dir. Q_{toplam} değerleri için ANFIS2.2 modelinin diğer yöntemlerle yüzdesel farkı, Q_{net} değerlerinin yüzdesel farkından düşüktür. ANFIS2.2 yöntemi ile en düşük yüzdesel farka sahip yöntemin %0.12 değerle YSA (Arı, 2009), en yüksek yüzdesel farka sahip yöntemin ise %125.11 değerle CERC (USACE, 1984) olduğu anlaşılmaktadır. ANFIS2.2 modelinin %4.72'lik farkla Kamphuis (1991) formülü ile de oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

Net ve toplam kıyı boyu katı madde taşınım debileri için ANFIS2.1 ve ANFIS2.2 modelleri ile en yüksek yüzdesel fark değerinin CERC (USACE, 1984) formülü ile hesaplanmış olduğu görülmektedir. CERC (USACE, 1984) formülü fırtına yani ortalama dalga yüksekliklerinin 4 m'yi geçtiği koşullarda uygulanırsa daha doğru sonuç vermektedir (Wang vd., 1998). Ancak çalışma alanı yılın büyük bir zaman diliminde düşük dalga enerjisine ($H_{ort} \cong$ 1m) sahip bir bölgedir. Bu nedenle CERC (USACE, 1984) formülü ile Karaburun'da meydana gelen kıyı boyu katı madde taşınım debileri yeterli doğrulukta temsil edilememektedir.

5.5 Karaburun Kıyı Sınıfının Belirlenmesi

Bölüm 2.7'de anlatıldığı gibi kıyı bölgelerinin jeolojik yapısından da meydana gelen kıyısal işlemler, farklı tiplerde kıyı profillerinin ve kıyı çizgilerinin oluşmasına neden olmaktadır.

Kıyı profili genel olarak dalga koşulları, gel-git ve fırtına kabarması ve bölgedeki katı madde türüne bağlı olarak değişim göstermektedir. Kıyı çizgisi de yukarıda belirtilen koşullarla birlikte dalga ikliminin yönsel karakteristiklerine, kıyı alanındaki farklı türde katı madde kaynaklarına, jeolojik ve biyolojik faktörlere bağlıdır. Kıyılar yıllık katı madde taşınım miktarlarına göre etkin kıyılar, orta etkinlikteki kıyılar, korunmuş kıyılar, gel-git düzlükleri, soluğan kıyıları, koheziv kıyılar ve mercan kıyıları olarak sınıflandırılmaktadır. ANFIS2.1 ve ANFIS2.2 modellleri ile Karaburun bölgesinde net kıyı boyu katı madde taşınım miktarı sırasıyla 82140 m^3/yıl ve 67267 m^3/yıl olarak bulunmuştur. Dolayısıyla Karaburun bölgesi, yıllık katı madde taşınımı 50000-1000000 m^3/yıl aralığında olduğundan "etkin kıyı" sınıfındadır.

Karaburun bölgesindeki yönlere göre ortalama $H_{s,12}$ değeri 3 m'den fazladır. Ayrıca Şekil 5.4'te görülen açık deniz yıllık dalga gülüne göre etkin dalga yaklaşım açısı 22.5^0-67.5^0 (NNE, NE, ENE) aralığındadır. Çizelge 5.3'te kıyı boyu katı madde taşınım miktarı, dalga büyüklüğü ve kıyı boyu katı madde taşınım işleminin gerçekleştiği genişlik değerlerinin fonksiyonu olarak kıyı sınıflandırması görülmektedir. Bu değerler dikkate alındığında dalga yaklaşım açısı ve dalga büyüklüğüne göre Karaburun bölgesinin yine etkin kıyı sınıfında olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.3 Kıyı boyu katı madde taşınım miktarı, dalga büyüklüğü ve kıyı boyu katı madde taşınım işleminin gerçekleştiği genişliğin fonksiyonu olarak kıyı sınıflandırması

Kıyı sınıfı	**Q (m^3/s)**	**$H_{s,12}$ (m)**	**Taşınım işleminin gerçekleştiği genişlik (m)**
Etkin Kıyı	50000~1000000	>3	300-1000
Orta Etkin Kıyı	10000~50000	1-3	50-300
Korunmuş Kıyı	<50000	<1	Oldukça dar

Çizelge 2.4'e göre kıyı tipi olarak 3E sınıfında olan Karaburun bölgesinin kıyı karakteristikleri "geniş stabil olmayan kum/çakıl plaj, falez veya kumullar" şeklindedir. Etkin kıyılar yüksek taşınım değerlerine sahip olmaları nedeniyle dikkatle yönetilmelidir.

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Yakın kıyı bölgesinde kıyı boyu katı madde taşınımının yeterli doğrulukta tahmin edilmesi, kıyı bölgesindeki erozyon ve kıyı gelişiminin belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Bu amaçla günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından ampirik formüller ve sayısal modeller geliştirilmiştir. Ancak halen daha oldukça karmaşık bir doğa olayı olan kıyı boyu katı madde taşınımı yeterli doğrulukta tespit edilememektedir.

Bu çalışmada kıyı boyu katı madde taşınımının yeterli doğrulukta belirlemesi amacıyla klasik bulanık mantık ve uyarlanabilir ağ yapısına dayalı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) yöntemleri kullanılmıştır. Bulanık mantık yöntemiyle üç adet (BM1, BM2.1 ve BM2.2), ANFIS yöntemiyle üç adet (ANFIS1, ANFIS2.1 ve ANFIS2.2) model kurulmuştur. Modelde Kamphuis (1991) yönteminde kıyı boyu katı madde taşınımının fonksiyonu olan parametreler girdi değişkenleri olarak belirlenmiştir. FIS yönteminde girdi-çıktı parametrelerine atanan üyelik fonksiyonları ve kurallar, en doğru sonuca ulaşmak amacıyla deneme yanılma yöntemi ile belirlenmiştir. ANFIS yönteminde ise Kamphuis (2008) ve Smith vd. (2004) tarafından gerçekleştirilen saha ve laboratuar çalışmaları sonucunda elde edilmiş ölçüm verileri eğitme ve doğrulama verileri olarak ikiye ayrılmıştır. Eğitme verileri model kalibrasyonunda kullanılmaktadır. Kalibrasyon aşamasında girdi-çıktı parametrelerinin üyelik fonksiyonları ve bulanık kural tabanı, model tarafından oluşturulmaktadır. BM1, BM2.1 ve BM2.2 modellerinin tahmin kapasiteleri Kamphuis'den (2008) elde edilen saha ve laboratuar ölçüm verileriyle, ANFIS1 ve ANFIS2.1 modellerinin tahmin kapasiteleri Kamphuis (2008) ölçüm verilerinden seçilen doğrulama verileriyle, ANFIS2.2 modelinin tahmin kapasitesi ise Kamphuis (2008) verilerinin eğitme aşamasında kullanılmayan bölümü ve Smith vd. (2004) laboratuar ölçüm verileriyle belirlenmiştir. Modellerin hata istatistik parametreleri (ortalama hata (OH), hata karelerinin ortalamasının karekökü (HKOK) ve saçılım indeksi (Sİ)), determinasyon katsayısıları (R) ve korelasyon katsayıları (R^2) karşılaştırılarak tahmin kapasiteleri değerlendirilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. BM1 modelinde girdi verileri olarak belirgin kırılan dalga yüksekliği (H_{sb}), pik dalga periyodu (T_p) ve kıyı eğimi (m_b) kullanılmıştır. Kamphuis (1991) yönteminde kıyı boyu katı madde taşınımının fonksiyonu olduğu medyan tane çapı (D_{50}) ve dalga kırılma açısı (α_b) parametreleri, daha kısa sürede daha basit bir model oluşturmak amacıyla BM1 modelinde ihmal edilmiştir. BM2.1 ve BM2.2 modellerinde girdi verileri olarak H_{sb}, T_p, m_b, D_{50} ve α_b parametreleri kullanılmıştır. BM1, BM2.1 ve BM2.2 modellerinin tahmin

kapasiteleri karşılaştırıldığında, BM1 modelinin en başarısız yaklaşıma sahip olduğu görülmektedir. BM1 modelinde, kıyı boyu katı madde taşınımını temsil eden parametrelerden D_{50} ve α_b'nin ihmal edilmesi ile girdi parametreleri olarak H_{sb}, T_p ve m_b'nin kullanılması modelin hassasiyetini azaltmıştır. BM2 modellerinde kıyı boyu katı madde taşınım işlemini temsil eden tüm parametrelerin (H_{sb}, T_p, m_b, D_{50} ve α_b) girdi verisi olarak hesaba katılmasıyla, BM1'den daha yüksek tahmin kapasitesine sahip kıyı boyu katı madde taşınım modelleri elde edilmiştir. Buradan H_{sb}, T_p ve m_b girdi parametrelerinin yüksek hassasiyette bir kıyı boyu katı madde taşınım modeli oluşturmak için yeterli olmadıkları, kıyı boyu katı madde taşınımı üzerinde medyan tane çapı (D_{50}) ve dalga kırılma açısının da (α_b) oldukça etkili parametreler olduğu anlaşılmaktadır.

2. BM2 modellerinin (BM2.1 ve BM2.2) tahmin kapasiteleri, kıyı boyu katı madde taşınımını temsil eden tüm parametrelerin girdi verileri olarak kullanılmasından dolayı BM1 modelinden üstündür. BM2.1 ve BM2.2 modellerinin yapıları aynı olsa da, girdi ve çıktı parametrelerine atanan üyelik fonksiyonu aralıkları farklıdır. İki modelin de kural yapısı aynıdır ancak kural tabanında BM2.1 modelinin girdi ve çıktı parametrelerine atanan üyelik fonksiyonları daha yüksek tahmin kapasitesine sahip bir model elde edilmesi amacıyla değiştirilmiştir. Bu işlem süresince ölçüm verileri ile modelden hesaplanan değerler karşılaştırılarak model performansı belirlenmiş ve daha yüksek tahmin kapasitesine sahip olan BM2.2 modeli oluşturulmuştur. BM2.2 modelinin BM2.1 modelinden daha doğru sonuçlar hesaplaması, model parametreleri için kurallara atanan üyelik fonksiyonlarının önemini göstermektedir. Bulanık mantık yönteminde kural tabanında girdi ve çıktı parametrelerine atanacak üyelik fonksiyonları, en iyi çıktı verisi hesaplanana kadar ANFIS2.2 modelindeki gibi deneme-yanılma yöntemiyle belirlenebilmektedir.
3. Bulanık mantık ve ANFIS yöntemlerinin tahmin kapasiteleri karşılaştırıldığında, ANFIS yöntemi ile oluşturulan modellerin bulanık mantık yöntemi ile oluşturulan modellere göre oldukça başarılı olduğu görülmektedir. Bulanık mantık yönteminde en iyi çıktı verisi elde edilmesi amacıyla üyelik fonksiyonu tür ve şekilinin belirlenebilmesi için sistematik bir yol yoktur. Bulanık mantığın bu özelliğinden dolayı, oldukça karmaşık bir kıyısal işlem olan kıyı boyu katı madde taşınımını yüksek tahmin kapasitesiyle hesaplayabilecek model özelliklerinin kullanıcı tarafından belirlenebilmesi mümkün değildir. ANFIS yönteminde ise yeterli hassasiyette çıktılar elde edilmesi amacıyla girdi ve çıktı parametrelerine atanan üyelik fonksiyonları ve kural yapıları model tarafından oluşturulmaktadır. ANFIS yöntemi bulanık mantık yönteminin "Eğer-İse" kural yapısının avantajını ve sinir ağlarının

öğrenme kabiliyetini birleştirmektedir. Bu özelliğinden dolayı ANFIS modelleri kullanılarak oldukça karmaşık bir kıyısal işlem olan kıyı boyu katı madde taşınımı, bulanık mantık yönteminden oldukça yüksek bir hassasiyette tahmin edilebilmektedir.

4. ANFIS1 modelinde ağlara ayırma, ANFIS2 modellerinde ise eksiltmeli kümeleme sistemleri kullanılmıştır. Modellerin tahmin kapasiteleri değerlendirildiğinde ANFIS2 modellerinin ANFIS1 modeline göre daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. Ağlara ayırma yönteminde girdi ve çıktı parametrelerine atanan üyelik fonksiyonu sayıları kullanıcı tarafından belirlenmekte, üyelik fonksiyon eğrileri ve kural yapısı model tarafından oluşturulmaktadır. Ağlara ayırma yönteminde üyelik fonksiyonu sayısı arttıkça oluşturulan kural sayısı, dolayısıyla model karmaşıklığı artmaktadır. Eksiltmeli kümeleme yönteminde ise kullanıcı tarafından belirlenen model hassasiyetine göre üyelik fonksiyonu sayısı, üyelik fonksiyonu şekli ve kural yapısı model tarafından oluşturulmaktadır. Bu yöntemde parametrelere atanan üyelik fonksiyonu sayısı ve kural sayısı eşit olduğundan ağlara ayırma yöntemine göre daha çok üyelik fonksiyonuna ve daha az sayıda kurala sahip bir model oluşturulabilmektedir. Üyelik fonksiyonu sayısının artması girdi ve çıktı parametrelerinin daha geniş bir aralıkta temsil edilmesini, kural sayısının azalması ise daha basit bir model oluşturulmasını sağlamaktadır. Kıyı boyu katı madde taşınım miktarının da eksiltmeli kümeleme yöntemi ile kurulan ANFIS2 modeli ile daha iyi temsil edildiği anlaşılmıştır.
5. ANFIS2 modelleri karşılaştırıldığında ise ANFIS2.2 modelinin ANFIS2.1 modeline göre daha yüksek tahmin kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. ANFIS2.1 ve ANFIS2.2 modellerinde aynı yöntemlerin kullanılmasına rağmen farklı performansta olmalarının nedeni, eğitme veri setlerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. ANFIS2.1 modelinin eğitme veri seti hem saha hem de ölçüm verilerini içerecek şekilde rasgele seçilerek oluşturulmuştur. ANFIS2.2 modelinin veri setindeki parametre sayısın ANFIS2.1 yönteminden fazladır. Bunula birlikte ANFIS2.2 modelinin eğitme veri seti hem saha hem laboratuar verilerinin daha iyi temsil edilmesi amacıyla daha geniş parametre aralığına sahip olacak şekilde seçilmiştir. Dolayısıyla ANFIS2.2 modeli ANFIS2.1 modeline göre daha geniş dalga parametre aralıkları için daha doğru sonuçlar hesaplamaktadır.
6. Çalışmanın son aşamasında ANFIS2.1 ve ANFIS2.2 modelleri kullanılarak Karadeniz bölgesindeki Karaburun alanı için kıyı boyu katı madde taşınım debileri belirlenmiştir. Bu aşamada girdi verisi olarak Arı (2009) tarafından yapılan saha ölçümleri kullanılmıştır. Karaburun Kıyısı'nda yıllık net kıyı boyu katı madde taşınım debileri ANFIS2.1 ve ANFIS2.2 modelleri tarafından sırasıyla Q_{net}=82140 m^3/yıl ve Q_{net}=67267 m^3/yıl olarak

belirlenmiştir.

7. ANFIS2.1 ve ANFIS2.2 modelleri ile hesaplanan net kıyı boyu katı madde taşınım miktarına (82140 m^3/yıl ve 67267 m^3/yıl) göre Karaburun kıyı alanı "etkin kıyı" olarak sınıflandırılmıştır. Bir başka sınıflandırma kriteri olan etkin dalga yaklaşım açısına göre (22.5^0-67.5^0) bölgedeki net kıyı boyu katı madde taşınım miktarının fazla olduğu anlaşılmaktadır. Dalga büyüklüğüne göre kıyı sınıflandırması yapıldığında, Karaburun kıyı alanının $H_{s,12}$>3 m değeri ile yine "etkin kıyı" sınıfında olduğu görülmektedir. Tüm kriterlere göre "etkin kıyı" sınıfında olduğu belirlenen Karaburun kıyı alanı dikkatle yönetilmelidir.
8. Bu çalışmada geliştirilen bulanık model pratik açısından da oldukça kullanışlıdır. Geliştirilen bulanık modelde, sonuçlar çok hızlı alınmakta ve tahmin kapasitesi hata istatistik parametrelerine göre yorumlanabilmektedir.
9. Yüksek derecede belirsizlik içeren kıyı boyu katı madde taşınımının, deterministik yöntemler yerine doğrusal olmayan bulanık mantık yöntemi ile elde edilmesi, mevcut belirsizliklerin azaltılması yoluyla karmaşık modellere gereksinim duyulmadan modellenmesine olanak sağlamıştır.

Bu sonuçlar ışığında ileride yapılabilecek araştırmalar için öneriler aşağıda ifade edilmiştir:

- Çok daha fazla girdi verisi kullanılarak modelin kıyı boyu katı madde taşınımı ile uyumu arttırılabilir.
- Karaburun bölgesi için ANFIS2.1 ve ANFIS2.2 ile hesaplanan net ve toplam kıyı boyu katı madde taşınım debilerinin doğruluklarını tespit etmek üzere elde saha verisi bulunmadığından, diğer ampirik yöntemlerden daha hassas bir yaklaşım sağladığı kabul edilmekte olan Kamphuis (1991) denkleminden yararlanılmıştır. Bölgedeki kıyı boyu katı madde taşınım debisinin saha ölçüm yöntemleri ile tespit edilmesi durumunda modellerin tahmin kapasiteleri, hesaplanan kıyı boyu katı madde taşınım debileri ile saha ölçüm verilerinin karşılaştırılmasıyla daha güvenilir bir şekilde belirlenebilir.
- Model kalibrasyonunda kullanılan ölçüm verisi sayısı ve ölçüm parametrelerinin sayısal aralığı arttırılarak tahmin kapasitesi daha yüksek bir model elde edilebilir.

KAYNAKLAR

Arı, A., (2009) "İstatistiksel Bir Dalga Modeli Kurulumu ve Kıyı Boyu Katı Madde Taşınımının Modellenmesi" Doktora Tezi, YTÜ, İstanbul.

Arslan, M., (2007) "Bulanık Mantık Yönteminin Liman planlamasına Uygulanması" Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, İstanbul.

Bakthyar, R., Ghaheri, A., Yeganeh-Bakhtiary, A. Ve Baldock, T. (2008), "Longshore Sediment Transport Estimation Using a Fuzzy Inference System", Applied Ocean Research 30:273-286.

Bayram, A., Larson, M., Miller, H. ve Kraus, N. (2001), "Cross-shore distribution of longshore sediment transport: comparison between predictive formulas and field measurements", Coastal Engineering 44:79-99.

Bayram, A., Larson, M. ve Hanson, H. (2007), "A New Formula fort he Total Longshore Sediment Transport Rate", Coastal Engineering 54:700-710.

Beach, R.A. ve Sternberg, R.W. (1987), "The Influence of Infragravitiy Motions on Suspended Sediment Transport in the Inner Surf Zone", Proceeding of Coastal Sediments, American Society of Civil Engineers:913-928.

Castellanos, F., James, N. (2009), "Average Hourly Wind Speed Forecasting with ANFIS", 11. American Conference on Wind Emgineering, San Juan, Puerto Rico.

DHI (2008a), MIKE 21-Wave Modelling, User Guide, DHI Water and Environment.

DHI (2008b), LITPACK-An Integrated Modelling System for LITtoral Processes And Coasline Kinetics, Short Introduction and Tutorial, DHI Water and Environment.

Elmas, Ç. (2003), Bulanık Mantık Denetleyiciler, Seçkin Yayınları, İstanbul.

Estevez, L. S., Williams, J. J. Ve Lisniowski, M. A. (2009), "Measuring and Modelling Longshore Sediment Transport", Estuarine, Coastal and Shelf Science 83:47–59.

Günal, Ü. (1997), Bulanık Mantık, Otomasyon Dergisi, 55:50-55.

Jang, J.S.R., and Sun,C. T. (1995). "Neuro-Fuzzy Modeling and Control", The Proceedings of the IEEE,3(83):378-406.

Kamphuis, J.W. (1991), "Along Shore Sediment Transport Rate", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE,117:624-640.

Klir, G. and Yuan, B. (1995). Fuzzy Sets and Fuzzy Logic, Theory and Applications, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA.

Kumar, V. S., Anand, N. M., Chandramohan, P. ve Naik, G. N. (2003), "Longshore Sediment Transport Rate- Measurement and Estimation, Central West Coast of India", Coastal Engineering 48:95-109.

Larangeiro, S.H.C.D. ve Oliveira, F.S.B.F. (2003), "Assessment of the Longshore Sediment Transport at Buarcos Beach (West Coast of Portugal) Through Different Formulations", Fifth International Symposium on GIS and Computer Cartography for Coastal Zone Management, 16-18 October, Genova, Italy.

Mamdani, E.H., Assilian, S., (1975), "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller", Int. Journal of Man-Machine Studies, 7(1):1-13.

Mangor, K. (2004), Shoreline Management Guidelines, DHI Water and Environment Kırkgöz, S. (2002), "Kıyı Erozyonunun Boyutları", Türkiye Mühendislik Haberleri, 420-421-422, 72-74.

Nelson, S.A. (2003), Earth and Environmental Sciences-Physical Geology Lecture Notes, TU.

Özger, M., (1999) "Taşkın Debilerinin Tahmini Üzerine Bulanık Model Çalışması" Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, İstanbul.

Pedrycz,W. (1993), Fuzzy Control and Fuzzy Systems second edition.

Pilkey, H. O. Ve Cooper, G. A.(2002), "Longshore Trasnport Volumes: A Critical View", Journal of Coastal Research 36: 572-580.

Reeve, D., Chadwick, A. ve Fleming, C. (2004), Coastal Engineering: Process, Theory and Design Practice, Spon Press, New York.

Rijn, L.C. (1998), Principles of Coastal Morphology, Aqua Publications, Amsterdam.

Smith, E.R., Ebersole, B.A. ve Wang, P. (2004), "Dependence of Total Longshore Sediment Transport Rates on Incident Wave Parameters and Breaker Type", ERDC/CHL CHETN-IV-62, US Corps of Engineers, Vicksburg.

Şen, Z., (1999) "Bulanık Mantık ve Modelleme İlkeleri", Bilge kültür sanat yayınları, İstanbul.

Şen, Z., (2000) Olasılık ilkeleri ders notları, İTÜ.

Şen, Z., (2004) " Mühendislikte Bulanık Mantık İle Modelleme Prensipleri", Su Vakfı Yayınları, İstanbul.

Taşkın H., Gümüştaş R. (1996), Trafik Akış sistemlerinde Bulanık Denetim ve Bir Uygulama, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK'96).

Toprak, F., (2002) "Boyuna Dispersiyon Katsayısının Bulanık Mantıkla Modellenmesi", Doktora Tezi, İTU, İstanbul.

U.S.Army Corps of Engineers (1984), Coastal Engineering Manual, U.S.A.

U.S.Army Corps of Engineers (2008), Coastal Engineering Manual, U.S.A.

Ülke A., ve Doğan M. (2008) "ANFIS Ve Çoklu Regresyon Teknikleri İle Eksik Yağış Gözlemlerinin Tamamlanması**,** Gediz Örneği", Bilimde Modern Yöntemler Sempozyumu, Eskişehir.

Van Rijn, L.C. (1988), Handbook on Sediment Transport by Currents and Waves, Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.

Wang, P., Ebersole, B.A. ve Smith, E.R. (2002), "Longshore Sand Transport- Initial Results from Large-Scale Sediment Transport Facility", ERDC/CHL CHETN-II-46, US Corps of Engineers, Vicksburg.

Yang, C. T. (1996), Sediment transport: Theory and Practice, The McGraw-Hill Companies, Inc., San Francisco.

Yücel, A., Güneri, A. F. (2010), "Application of Adaptive Neuro Fuzzy Inference System to Supplier Selection Problem", Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Sigma 28:224-234.

Yüksel, Y. (2005), Deniz Tabanı Hidrodinamiği ve Kıyı Morfolojisi (Planlama ve Tasarım), Deniz Mühendisliği Serisi No:2, Arıkan Ltd., İstanbul.

Yüksel, Y. ve Çevik, E. (2009), Kıyı Mühendisliği, Deniz Mühendisliği Serisi No:1, Beta Basım, İstanbul.

Zahed, L.A., (1965) " Fuzzy Sets and Control" 8:338-353.

Zimmermann, H.-J. (1996). Fuzzy Set Theory and Its Application third edition.

Zviely, D., Kit, A. ve Klein, B. (2007), "Longshore sand transport estimates along the Mediterranean coast of Israel in the Holocene", Marine Geology 238: 61-73.

İnternet Kaynakları

[1] earth.google.com

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi	30.04.1987	
Doğum Yeri	İstanbul	
Lise	2001-2004	İSTEK Vakfı Semiha Şakir Lisesi
Lisans	2004-2008	Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2008-2011	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Ana Bilim Dalı, Kıyı ve Liman Müh