

Su altı Araçlarının Manevra Karakteristiklerinin Değerlendirilmesi-I: Manevra Analizlerinde Kullanılan Yaklaşımlar

Oğuzhan Kırıkbaş¹, Ömer Kemal Kınacı², Şakir Bal³

^{1,2,3} Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE

¹ (sorumlu yazar), kirikbas17@itu.edu.tr, ORCID: [0000-0002-2504-8727](https://orcid.org/0000-0002-2504-8727)

² kinacio@itu.edu.tr, [0000-0002-2956-9562](https://orcid.org/0000-0002-2956-9562)

³ sbal@itu.edu.tr, [0000-0001-8688-8482](https://orcid.org/0000-0001-8688-8482)

ÖZET

Su altı araçları dalmış, şnorkel ve satıh gibi birbirinden çok farklı operasyonel isterlere sahip çeşitli işletme modlarında kullanılabilirler. Dolayısı ile bu araçların hidrodinamik tasarımının birbiri ile çelişen özelliklerin bir arada sağlanmasını gerektiren bir optimizasyon problemi olarak ele alınması gereklidir. Hidrodinamik tasarım konusunun su altı araçları açısından belki de en kritik yönü manevra probleminin çözülmesidir. Düşey düzlemde sahip oldukları ilave serbestlik dereceleri ile birlikte karakteristik hızları ve akışkan özellikleri nedeniyle baskın viskoz etkilere maruz kalmaları bu problemi daha da zorlayıcı hale getirmektedir. Ayrıca karakteristik geometrik özellikleri (yelken gibi büyük bir takıntıya sahip olmaları gibi) nedeniyle ve/veya operasyon moduna bağlı olarak (şnorkel seyri gibi) oluşan düzlem dışı etkiler ve serbestlik dereceleri arası karşılıklı etkileşimler de probleminin karmaşıklık seviyesini artıran etkenlerdir. Genelde askeri amaçlar için tasarlanıp kullanılmaları nedeniyle su altı araçlarının her şart altında gizliklerini korumaları beklenir. Operasyonları sırasında hidrostatik basınca maruz kalmaları ise bu araçların çalışabilecekleri azami derinliğe bir sınırlandırma getirir. Serbest yüzeyi yarıp gizliliği ihlal etmeme ve ezilme derinliğinin altına inip aracın kaybına neden olmama zorunluluğu aracın manevra karakteristiklerinin yüksek doğrulukla tahminini gerektirir. Literatürde bu karmaşık problemi her bir operasyon modunda istenilen hassasiyet seviyesinde çözebilmek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin geliştirilmesi jenerik geometriler, standart manevralar, hesaplama algoritmaları vb. gibi ikincil konularda da bir çok gelişmeyi beraberinde getirmiştir. Bu durum ise toplamda azımsanmayacak miktarda bir literatür oluşmasına sebep olmuştur. Bu çalışmanın amacı hâlihazırda mevcut literatürü sınıflandırmak, her bir kategorideki çalışmalar arasında ilişkileri ve kullanılan yöntemlerin zayıf ve güçlü taraflarını ortaya koymak ve bu yöntemlerle elde edilen önemli sonuçlara değinmektir. Kapsam dahilindeki materyal miktarı göz önüne alındığında; bunun tek bir başlık altında yapılması mümkün değildir. Bu durum sınıflandırmaya konu her bir ana başlığın ayrı bir çalışma halinde bir araya getirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Buna göre çalışmanın mevcut birinci bölümü; su altı araçlarının manevra probleminin çözümünde kullanılan yöntemlerin gruplandırılması ve ayrıca jenerik geometriler ve standart manevraların incelenmesine ayrılmıştır. Bu bölümde, dalmış durum şartları altındaki çalışmalar incelenmiştir. Aracın akışkan sınırlarına (serbest su yüzeyi gibi) yakınlığı nedeniyle oluşan sapmalar ise çalışmanın ikinci bölümünde değerlendirilmiştir. Son olarak, yakın zamanda literatürün ağırlıklı olarak hesaplamalı yöntemleri esas alacak şekilde gelişmesi nedeniyle, bu yaklaşımların kendi iç dinamiklerinin incelenmesi çalışmanın üçüncü bölümünde gerçekleştirilecektir.

Anahtar kelimeler: Su altı aracı, manevra, fiziksel yaklaşım, matematiksel yaklaşım, hidrodinamik katsayı, sistem tanımlama tekniği, manevra modeli, model deneyi, yarı-ampirik yöntem, standart manevra, HAD.

Makale geçmişi: Geliş 10/02/2021 – Kabul 25/06/2021

Assessment of the Maneuvering Characteristics of Underwater Vehicles-I: Approaches Used for Maneuvering Analysis

Oğuzhan Kırıkbaş¹, Ömer Kemal Kınacı², Şakir Bal³

^{1,2,3} Naval Architecture and Marine Engineering Department, İstanbul Technical University, İstanbul, TÜRKİYE

¹ (corresponding author), kirikbas17@itu.edu.tr, ORCID: [0000-0002-2504-8727](https://orcid.org/0000-0002-2504-8727)

² kinacio@itu.edu.tr, [0000-0002-2956-9562](https://orcid.org/0000-0002-2956-9562)

³ sbal@itu.edu.tr, [0000-0001-8688-8482](https://orcid.org/0000-0001-8688-8482)

ABSTRACT

Utilizing in various operating modes (such as submerged, snorkeling and surfaced) with diverse operational requirements; the hydrodynamic design of underwater vehicles must be considered as an optimization problem that enforces a balance between conflicting features. Possibly the most critical aspect of the hydrodynamic design process is the solution of maneuvering problem. Together with the additional degrees of freedom in the vertical plane and subjecting to dominant viscous effects due to characteristic velocities and fluid properties, makes the solution of the problem even more challenging. In addition, out-of-plane effects and interactions between degrees of freedom due to characteristic geometric features (existence of a relatively big appendage such as sail) and/or mode of operation (such as snorkeling) increase the level of complexity. Generally designed and used for military purposes, underwater vehicles are expected to maintain their stealth under all circumstances. Moreover, being exposed to hydrostatic pressure during their operations restricts the maximum diving depth. The requirements of not to broach (i.e., violate the stealthiness) and not to dive below the collapse depth (i.e., cause the loss of the vehicle) necessitate a high level of accuracy for the estimation of the maneuvering characteristics of the vehicle. In literature, various methods have been developed to solve this challenging problem at the desired level of accuracy for each operation mode of the vehicle. Development of these methods brought along improvements also in secondary subjects including generic geometries, standard maneuvers, calculation algorithms etc. and led to the formation of a substantial amount of literature. This study aims to classify currently subject and chronological wise scattered literature, reveal the relationships between studies in each category, clarify the weaknesses and strength of the methods used, and mention the significant results obtained using these methods. Considering the amount of material to be covered, it is not possible to achieve above described goals in a single study. This necessitates bringing together each topic as a separate section. Accordingly, the methods -grouped under the subtopics of physical and mathematical approaches- used in solving the maneuvering problem of underwater vehicles together with the generic geometries and standard maneuvers are formed the first section of the study. The assumption of submerged state used in the studies under this section requires examining the deviations caused by the fluid boundaries under a separate title, which constitutes the second section of the study. Finally, due to the recent progress in the literature on computational methods mainly, the formation of the

main topic in which the internal dynamics of these methods are examined is inevitable, which constitutes the third section of the study.

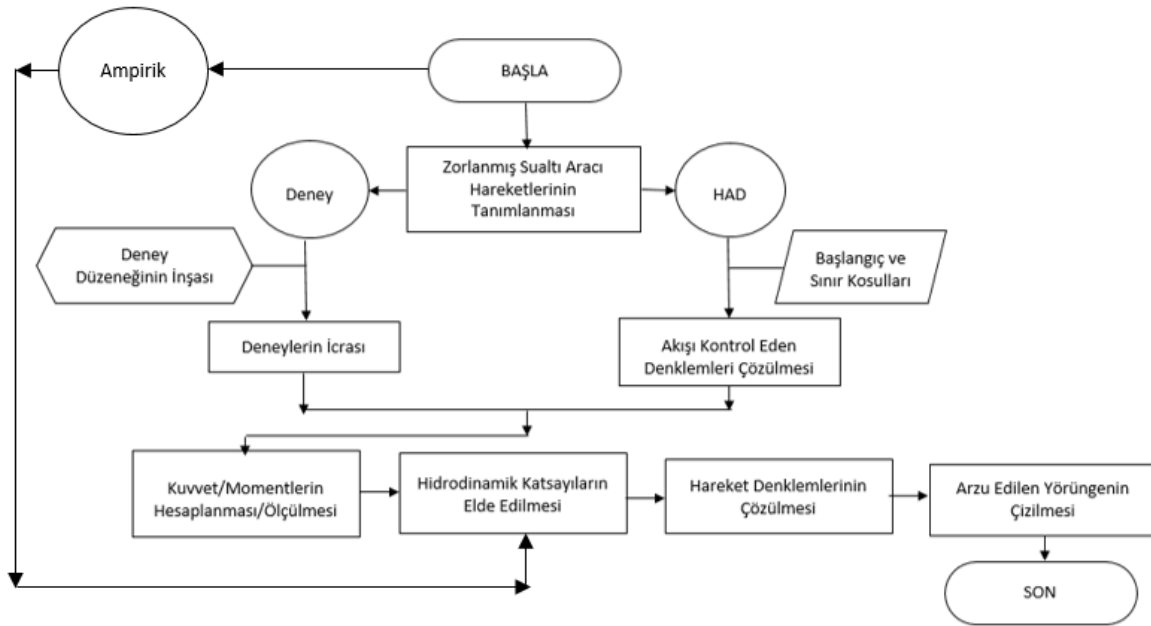
Keywords: Underwater vehicle, maneuvering, physics-based approach, mathematical based approach, hydrodynamic coefficient, system identification method, maneuvering model, model experiment, semi-empirical method, definite maneuvers, CFD.

Article history: Received 10/02/2021 – Accepted 25/06/2021

1. Giriş

En genel haliyle bir su altı aracının manevra probleminin çözümü; Newton'un birinci hareket yasasına göre eylemsizlik halinde olan aracın üzerindeki kuvvet dengesinin, kontrol yüzeyleri ve sevk sistemi vasıtası ile oluşturulacak dinamik kuvvetler ile geçici olarak bozulması anından başlayarak, aracın yeni ve istenilen bir doğrultu, pozisyon ve/veya hızda tekrar eylemsizlik durumuna geçmesine kadar Newton'un ikinci hareket yasasına tabi olarak yaptığı doğrusal ve dögüsel (açısal) (rotasyonel) hareketlerin tümünü kapsar. Bu çözüm, su altı aracının manevrası boyunca üzerine etkiyen kuvvet ve momentlerin bilinmesi halinde gerçekleştirilebilir. Bu kuvvet ve momentlerin büyüklüklerinin önceden bilinmesi su altı aracı için güvenli operasyon limitlerinin saptanmasına, belirli manevraların emniyetle icra edilip edilemeyeceğine karar verilmesine ve aracın manevra karakteristiklerinin iyileştirilebilmesi için izlenecek yöntemlerin belirlenmesine yardımcı olur.

Günümüzde su altı araçlarının operasyonel isterleri tasarımın erken aşamalarında manevra ve kontrol edilebilirlik karakteristiklerin yüksek doğrulukla tahmin edilerek olası tüm iyileştirmelerin yapılması konusunda giderek daha zorlayıcı olmaktadır. Bu karakteristiklerin tahmini ise ancak aracın hareketlerine kumanda eden katı cisim hareket denklemlerin çözümü ile anlaşılabilir. Denklem ifadelerinde yer alan kuvvet ve momentler manevra esnasında aracın etrafında oluşan akışı yöneten denklemlerin çözümü ile elde edilebilir.



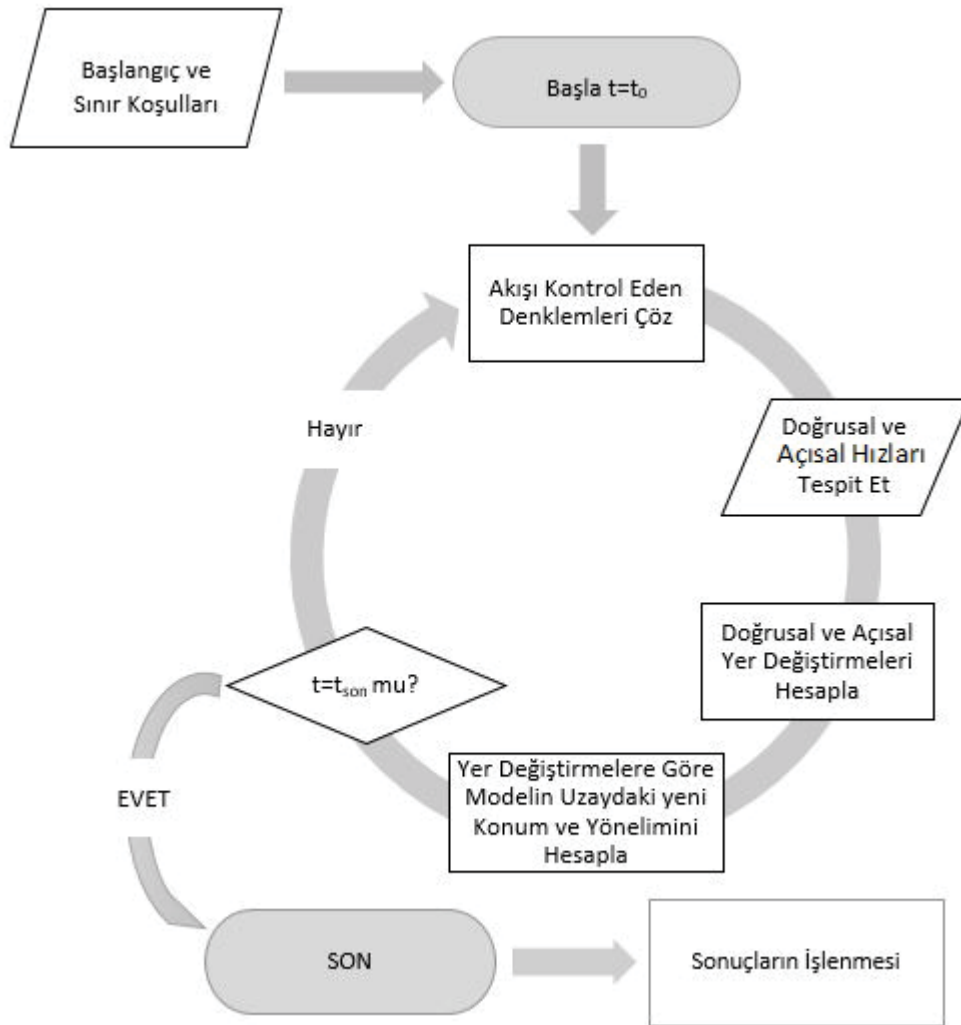
Şekil 1. Matematiksel (Dolaylı) yaklaşımlara ait akış şeması.

Bu konuda ilk akla gelen ve literatürdeki en yaygın yaklaşım görece büyük boyutlu bu problemi parçalarına ayırmak suretiyle çözmek; hareket denklemleri ile akışı yöneten denklemler arasında var olan karşılıklı etkileşimi kırarak her iki denklem takımının bağımsız olarak çözülmesini sağlayacak yöntemler geliştirmektir. Bu çalışma kapsamında bahse konu yaklaşımlar "Matematiksel (Dolaylı) Yaklaşımlar" başlığı altında toplanmışlardır. Matematiksel yaklaşımın genel işleyiş mantığı Şekil 1'de yer alan akış şemasında gösterilmiştir.

Bu yaklaşımların ortak özelliği bir hidrodinamik katsayı seti olarak modellenmiş olan hareket denklemlerindeki kuvvet ve moment ifadelerini çeşitli yöntemlerle (deneysel, nümerik, yarı-ampirik) belirlemek üzere geliştirilmiş olmalarıdır. Belirlenen hidrodinamik katsayılar daha sonra hareket

denklemlerindeki yerlerine konularak aracın yörüngesi tahmin edilir. Özet olarak bir su altı aracının manevra probleminin çözülmesi, o aracın manevra katsayılarının belirlenmesi problemine indirgenebilir.

Matematiksel yaklaşımın dışında kalan ve son yıllarda hesaplama altyapısı ile aynı paralelde gelişen fizik temelli hesaplamalı analizler ile otonom kontrol/kumanda sistemlerinin gelişimi ile yetkinliği artan serbest hareketli modeller ile yapılan deneyler ise bu çalışma kapsamında “Fiziksel (Doğrudan) Yaklaşım” başlığı altında bir araya getirilmişlerdir. Fiziksel yaklaşım; matematiksel yaklaşımda olduğu gibi, aracın hareket denklemlerinden matematiksel işlemlerle elde edilen bir manevra modelinin aracın hareket parametrelerinden her durumda bağımsız kabul edilen katsayılarını bulup bu katsayıları aracın herhangi bir hareketine ait yörüngesini tespit etmekte kullanmak yerine, matematiksel tüm ara işlem basamaklarını atlayarak akışın ve su altı aracının hareket denklemlerinin zaman boyutunda akuple edilmesi ve belirli kontrol ve sevk sistemi girdileri altında aracın yörüngesinin doğrudan tespit edilmesine dayanır. Fiziksel yaklaşımın genel işleyiş mantığı Şekil 2’de yer alan akış şemasında gösterilmiştir.



Şekil 2. Fiziksel (Doğrudan) yaklaşımlara ait akış şeması.

Bu iki tür çözüm yaklaşımının detaylarının yanında, literatürde her iki yaklaşım tarafından ortak olarak kullanılan jenerik su altı aracı geometrileri ve analiz sonuçlarının kıyaslanabilmesi için gerek model

gerekse de araç ölçeğinde icra edilebilen standart manevralara ilişkin bilgiler de bu çalışmanın kapsamına dahil edilmişlerdir.

2. Jenerik Su altı Aracı Geometrileri

Su altı araçlarının form optimizasyonu literatürde bu araçlara ilişkin geniş ölçüde ve uzun süreden beri incelenen konuların başında gelir. Gerek deneysel gerekse de hesaplamalı yöntemleri kullanan birçok araştırmacı bu konudaki literatürün gelişmesine katkı sağlamışlardır. Gertler (1950)'in çalışması bu alandaki literatürü oluşturan ilk çalışmalar arasında yer almakta olup yazar, incelenen geometriler (Seri 58) arasında asgari direnci veren geometriyi tespit etmek için deneyler yapmıştır. Bu alandaki bir diğer önemli çalışma (Myring, 1981) tarafından yapılmıştır. Myring parçalı bir fonksiyon kullanarak ifade ettiği aksel simetrik ve akışa uyumlandırılmış geometri ailesi üzerinde deneyler yapmıştır. Eliptik bir baş ve parabolik bir kış formunun kapattığı bir paralel gövde bölümü içeren bu geometri ailesi verilen bir L/D oranı için asgari direnci veren geometrinin tespitini amaçlamakta ve halen AUV gövde tasarımlarında (REMUS ve MAYA AUV) dikkate alınmaktadır.

Su altı araçları görev yaptıkları ortam şartları gereği görev sırasında ihtiyaç duydukları enerjiyi yanma havasına ihtiyaç duymaksızın kullanabilecekleri bir formda (batarya, yakıt hücresi, nükleer enerji vb.) depolamak zorundadırlar. Özellikle küçük ve orta ölçekli su altı araçlarının sahip olduğu sınırlı hacim bu araçların görevlerini yerine getirebilmeleri için depolayabilecekleri tahrik gücünü oldukça sınırlandırmakta bu durum ise söz konusu bu enerjinin en verimli şekilde kullanımı konusunda yukarıdaki örneklerde olduğu gibi araştırmacıları motive etmektedir. Ancak aracın hidrodinamik formunun optimizasyonu ile çelişen bir takım başka isterler de mevcuttur. Mukavim teknenin üretim kolaylığı ve genel yerleşim ile ilgili isterler su altı aracının hidrodinamik formunun optimum narinlik oranından (L/D) artış yönünde uzaklaşmasını ve su altı araçlarının sınıflarına özgü olacak şekilde standartlaşmasını zorunlu kılmıştır.

Her ne kadar sınıf bazında standartlaşmış olsa da bu araçlar çoğunlukla askeri amaçlar için tasarlandıklarından çoğu durumda geometrileri araştırmacıların kullanımına açık değildir. Bu problemi çözmek için dünya çapında pek çok kuruluş/enstitü araştırmacılara incelenecek su altı aracı sınıfının standart geometrik özelliklerini ana hatları ile yansıtan jenerik geometriler sağlayarak gerek bu geometriler temelinde şekillenen ve sonuçların kıyaslanabileceği bir literatür inşa etmeyi gerekse de araştırma sonuçlarını doğrudan gerçek denizaltı geometrilerinde kullanmayı hedeflemişlerdir. Bu jenerik su altı aracı formlarından literatürde sıklıkla kullanılanlara ait geometrik özelliklere aşağıda değinilmiştir.

2.1. DARPA Suboff

Jenerik bir nükleer saldırı sınıfı denizaltı (SSN) formu geliştirilmesini ve bu geometrinin takıntısız ve farklı takıntı kombinasyonlarına ait deneysel ve hesaplamalı analizlerinin yapılmasını içeren proje, bu yol ile su altı araçlarının HAD analizleri ile ilgilenen akademik camia için çalışmalarından elde ettikleri sonuçları kıyaslayabilecekleri bir forum oluşturmayı hedeflemiştir.

Proje kapsamında çekme tankı ve rüzgâr tüneline test edilmek üzere iki ayrı model (sırasıyla DTRC 5470 ve 5471) geliştirilmiş olup her iki model eş geometrilere sahiptirler. Modeller arasındaki fark sensör yerleşimlerinden kaynaklanmaktadır.

Parçalı bir fonksiyon ile ifade edilen aksel simetrik bir gövde, yelken ve yelken başlığından (sailcap) oluşan temel geometri ve bu geometriye eklenecek takıntı alternatiflerine ilişkin matematiksel ifadeler

(Groves et al., 1989) tarafından verilmiş olup proje kapsamında toplam üç farklı kıç kontrol yüzeyi ve iki farklı sujeti konfigürasyon alternatifi geliştirilmiştir. DARPA Suboff geometrilerine ait ana boyutlar Tablo 1’de, üç boyutlu modelin yandan görünüşü Şekil 3’te verilmiştir.

Tablo 1. DARPA Suboff formunun geometrik özellikleri (uzaklıklar baş dikmeden ölçülür).

Büyükük	Boyut	Birim	Büyükük	Boyut	Birim
Tam Boy (LOA)	4.356	m	Yelken Uzunluğu (L_c)	0.368	m
Baş Gövde Boyu (L_f)	1.016	m	Yelken Konumu (x)	0.924	m
Paralel Gövde Boyu (L_p)	2.229	m	Yelken Yüksekliği (h_c)	0.460	m
Kıç Gövde Boyu (L_A)	1.111	m	Kıç Kontrol Yüzeyleri Konumu	4.007	m
Azami Tekne Çapı (D_{max})	0.508	m	Ölçek Oranı (λ)	24	-



Şekil 3. DARPA Suboff AFF-8 konfigürasyonunun yandan görünüşü.

2.2. DRDC STR

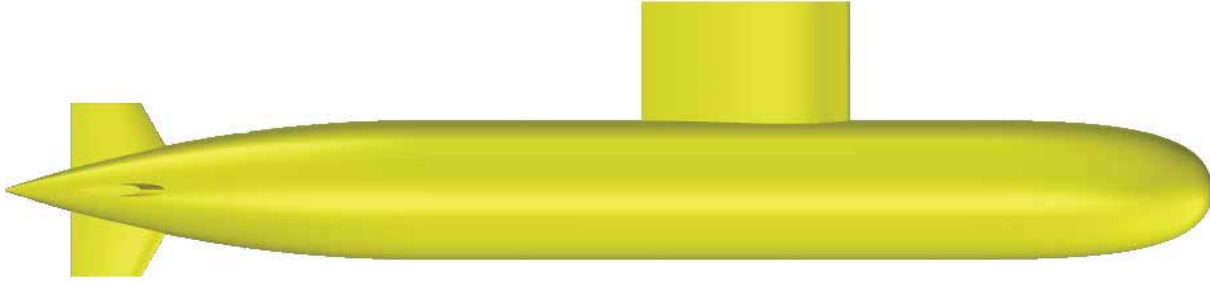
DRDC ve RNLN tarafından MARIN bünyesinde yapılacak testlerde kullanılmak üzere geliştirilen geometri daha eski referanslarda “Kanada-Hollanda Sistemik Serileri” olarak adlandırılmış, bu adlandırma daha sonra “Standart Denizaltı Modeli” veya kısaca “Standart Model” olarak değiştirilmiştir (Mackay, 2003). Bu serideki geometriler tekne, yelken ve “+” formundaki dört adet eş kontrol yüzeyinden oluşmaktadır. Bu takıntılarının farklı kombinasyonları için harf simgeleri belirlenmiş olup, “H” yalnızca tekneyi, “HS” tekne ve yelkeni, “HT” tekne ve kıç kontrol yüzeylerini ve “HST” ise tam donanımlı konfigürasyonu temsil etmektedir. Standart modele ait tekne çapı ile boyutsuzlaştırılmış ana boyutlar Tablo 2’de üç boyutlu modelin yandan görünüşü Şekil 4’te verilmiştir.

2.3. ONR BODY-1

ONR Body-1 geometrisi DTMB Body-1 veya DTMB Model #5484 olarak da bilinmekte olup, aksel simetrik bir gövdeye eklenen NACA profili kesitli bir yelken ve yine NACA profili kesitli dört eş kontrol yüzeyinden oluşan jenerik bir denizaltı geometrisidir (Fu et al., 2002). Bu model ONR ve DTMB tarafından manevra çalışmalarında kullanılmak amacıyla geliştirilmiştir (Mulvihill & Yang, 2007).

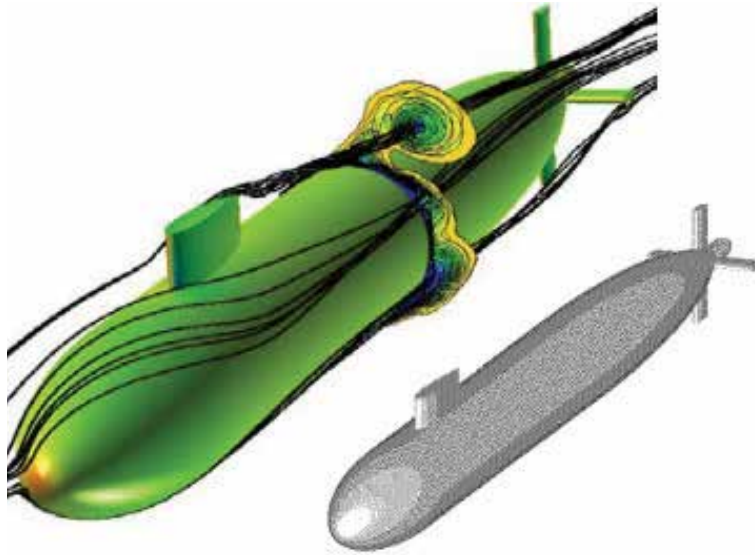
Tablo 2. Standart denizaltı modeline ait boyutsuzlaştırılmış ana boyutlar.

Büyükük	Boyut	Büyükük	Boyut
Tam Boy (LOA)	8.75D	Yelken Merkez Konumu (x)	3D
Baş Gövde Boyu (L_f)	1.75D	Yelken Yüksekliği (h_c)	6/7 D
Paralel Gövde Boyu (L_p)	4D	Yelken Kesiti	NACA 0020
Kıç Gövde Boyu (L_A)	3D	Kontrol Yüzeyleri Konumu (AP’den)	0.5D
Azami Tekne Çapı (D_{max})	D	Kontrol Yüzeyleri Kesiti	NACA 0015
Yelken Uzunluğu (L_c)	1.5D		



Şekil 4. Standart Denizaltı Model'inin yandan görünüşü.

ONR Body-1 geometrisine ait ana boyutlar Tablo 3'te üç boyutlu modelin yandan görünüşü Şekil 5'te verilmiştir.



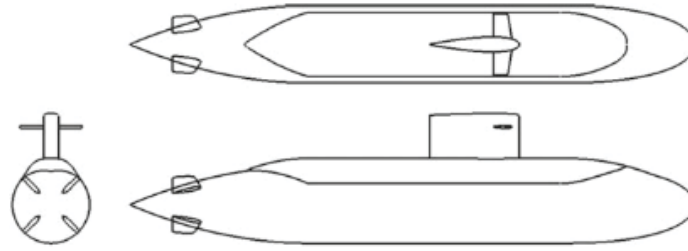
Şekil 5. ONR Body 1 geometrisinin görünüşü (Boger & Dreyer, 2006; Mulvihill & Yang, 2007).

Tablo 3. ONR Body-1 denizaltı modeline ait ana boyutlar.

Büyüklik	Boyut	Birim
Tam Boy (LOA)	5.1816	m
Azami Tekne Çapı (D_{max})	0.47244	m
Yelken Konumu (x/L)	0.2	-
Yelken Kesiti	NACA 0014	-
Yelken Eksen Oranı	0.27	-
Kontrol Yüzeyleri Kesiti	NACA 0018	-
Kontrol Yüzeyleri Eksen Oranı	0.27	-

2.4. Joubert BB1/BB2

BB1 geometrisi; Joubert tarafından Avustralya Savunma Bakanlığı'nın ihtiyacı için geliştirilen büyük ölçekli SSK sınıfı bir dizel-elektrik denizaltı konseptinden türetilmiş olup daha sonra birçok kuruluş tarafından kendi çalışmaları için standart bir geometri olarak kullanılmıştır (Renilson, 2018). Bu geometri Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. BB1 jenerik denizaltı modeli geometrisi (Renilson, 2018).

Joubert'in orijinal tasarımında yelken kesiti ve yelkende konuşlu baş ufki dümenlerin özellikleri belirtilmediğinden doğrultu stabilitesine sahip bir denizaltı geometrisi elde edebilmek için birkaç tasarım iterasyonuna ihtiyaç duyulmuştur. BB2 geometrisi BB1'in serbest hareketli model deneylerinde kullanılmak üzere ve doğrultu stabilitesini artıracak şekilde takıntı boyut ve konumlarının yukarıda bahsedilen iteratif yaklaşımla modifiye edilmesi yolu ile elde edilmiştir. Bu iteratif süreç; kış kontrol yüzeyi boyutlarının artırılması, kış kontrol yüzeylerinin sabit ve hareketli kısımlara ayrılması, yelken ve yelkende bulunan kontrol yüzeylerinin başa kaydırılması ve yelken kesitinin artırılması değişikliklerini kapsamaktadır (Carrica et al., 2016).

BB2 geometrisi tekne, form güverte (casing), yelken, kış kontrol yüzeyleri ve MARIN 7371R (Carrica et al., 2016) stok pervanesinden oluşmakta olup (Bettle, 2018), bu komponentlerin farklı kombinasyonlarına göre konfigürasyon kodlandırması yapılmaktadır. Buna göre "C1" tekne ve form güvertesi, "C2" bir önceki konfigürasyona ilave olarak yelkeni, "C3" C2'ye ilave olarak kış kontrol yüzeylerini, "C4" C3'e ilave olarak baş kontrol yüzeylerini ve nihai olarak "C4P" kodu C4'e ilave edilmiş stok pervaneyi tanımlamak için kullanılmaktadır.

Joubert BB2 geometrisine ait ana boyutlar Tablo 4'te, üç boyutlu modelin yandan görünüşü Şekil 7'de gösterilmiştir.

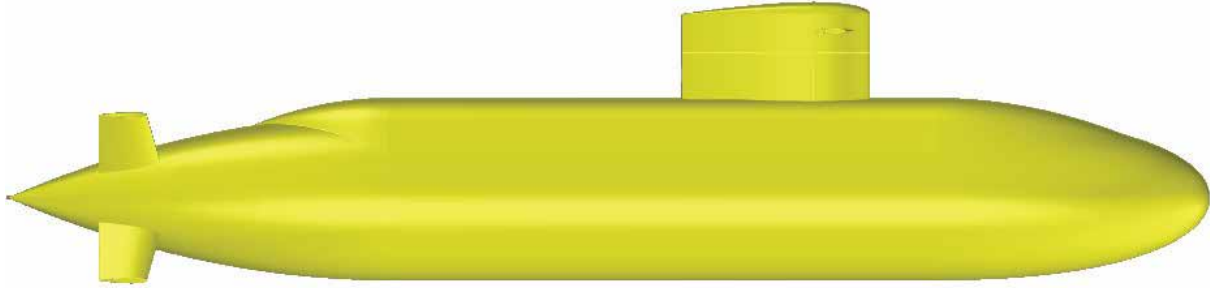
2.5. IHSS

Bu jenerik denizaltı serisi; özellikle modern denizaltı geometrilerinin hidrodinamik özelliklerinin incelenmesi için bir temel teşkil etmek üzere geliştirilmiştir. Seriyi oluşturan geometriler aksel simetrik bir tekne (eliptik baş formu, paralel gövde ve konik kış formu) ve NACA profili kesitli bir yelkenden oluşmakta olup bu geometriyi şekillendiren boyutsuz katsayılar 15 haneli tanımlama kodunu oluşturmak için kullanılmışlardır. Bu kodun ilk 7 hanesi teknenin sonraki 8 hanesi ise yelkenin geometrik özelliklerini tarif etmektedir (Mooresun, 2014).

Seriyi oluşturan geometriler için diğer jenerik geometrilere benzer şekilde bir kontrol yüzeyi konfigürasyonu tanımlaması yapılmamıştır. Bunun nedeni geometrinin mümkün olduğunca basit tutulmak istenmesi ve kontrol yüzeyleri için baz kabul edilebilecek bir konfigürasyonun olmayışdır. Kontrol yüzeylerinin yapısı ve konumu daha çok tasarımcının tercihlerine göre şekillendiğinden (örneğin baş ufki dümenlerin yelken veya baş tarafta konumlandırılması tercihi gibi) ve bahse konu parametrelerin aracın hidrodinamik özellikleri üzerinde çok güçlü etkisi olması sebebiyle standart seride yer almalarının fayda sağlamayacağı değerlendirilmiştir. Bu serideki denizaltı formlarını tanımlayan boyutsuz geometri Şekil 8'de gösterilmiştir.

Tablo 4. BB2 jenerik denizaltısının ana boyutları.

Büyükölç	Boyut	Birim
Dikmeler Arası Boy (LPP)	70.2	m
Genişlik (B)	9.6	m
Yükseklik	10.6	m
Tonaj	~4000	ton
Dolgunluk Oranı (C_D)	0.85	-


Şekil 7. BB2 jenerik denizaltı modelinin yandan görünüşü (MARIN).

3. Standart Manevralar

Manevra analizlerinin nihai amacı analizi yapılan geometrinin (model, prototip, üç boyutlu model) doğrudan (fiziksel yaklaşım) veya dolaylı (matematiksel yaklaşım) yoldan elde edilen yörüngesinden yola çıkarak su altı aracının aynı kontrol girdileri altındaki davranışını tahmin etmektir. Su altı aracı ölçeğinde (tam ölçekte) ancak deniz tecrübelerinde tespit edilebilecek bu davranış, analiz sonuçları ile doğrudan kıyas yapılmasına imkân vermeyen insan girdileri (kumanda gecikmesi, insan kaynaklı hatalar vb.) içerir. Bu girdilerin etkilerinin ölçeklendirilerek model deneylerinde dikkate alınmasının herhangi bir yolu yoktur (Burcher, 1972).

Bu problemi ortadan kaldırmak ve insan girdisini asgari seviyeye indirerek model-su altı aracı arasında doğrudan kıyaslanabilir verilere ulaşabilmek için su altı aracı ölçeğinde (tam ölçekte) de icra edilebilen standart manevralar (deniz tecrübelerinde) adı altında bir dizi manevra tanımlanmıştır. Bu manevralardan literatürde su altı araçlarının manevra özelliklerinin analizi için en sık kullanılanları (Renilson, 2018) tarafından tanımlanmış ve aşağıda listelenmiştir.

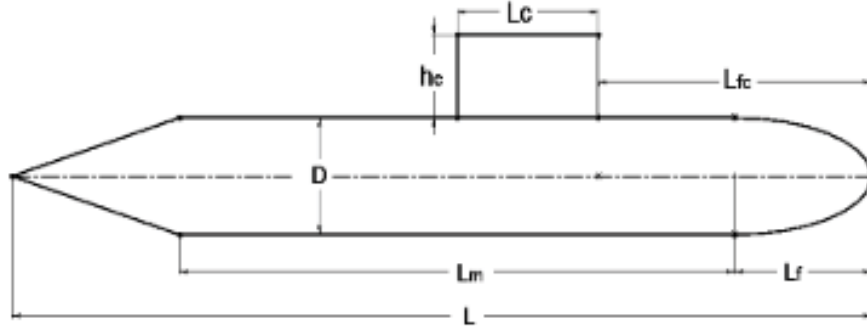
3.1. Dairesel dönüş manevrası

Bu manevra su altı araçlarının yatay düzlem manevra analizlerinde kullanılır. Belirli bir dümen açısı ve sabit itme kuvveti altında aracın zamandan bağımsız (ivmelenme etkileri olmaksızın) manevra özelliklerinin belirlenmesi için yapılır. Manevranın giriş safhasında doğrusal bir rotada istenilen sürat değerine çıkılır daha sonra su altı aracının amudi dümenleri istenilen açığa basılır ve yörüngenin zamandan bağımsız hale gelmesi beklenir. Son safhada yörüngenin belirli parametreleri (taktik çap, ilerleme, yanlama vb.) ölçülerek model ölçeğinde elde edilen parametreler ile (ölçek etkisi de dikkate alınarak) karşılaştırılır. Dairesel dönüş manevrasının şematik gösterimi Şekil 9'da verilmiştir.

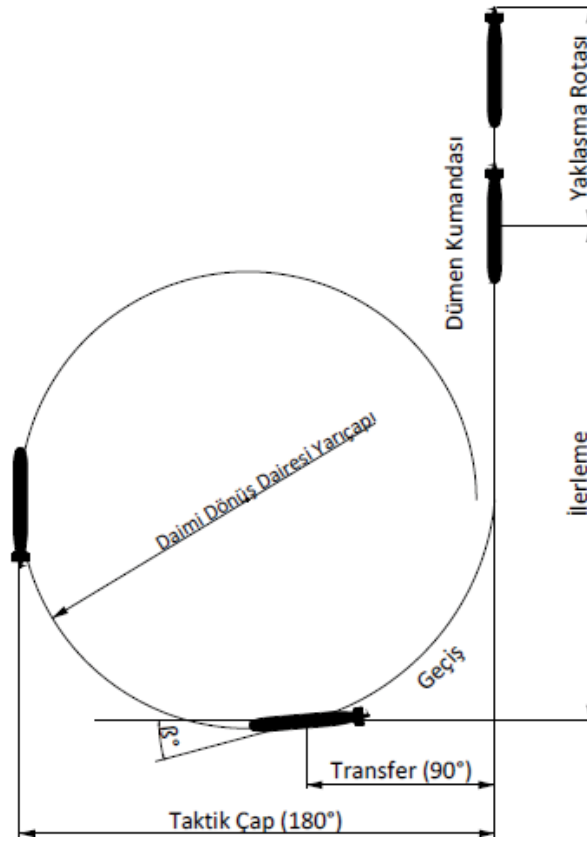
3.2. Kempf manevrası

Zig-zag veya overshoot manevrası olarak da bilinen bu manevra yatay veya düşey düzlemde icra edilebilir. Hangi düzlemde icra edileceğine göre ilgili kontrol yüzeyleri önceden belirlenmiş bir açığa

kadar basılır. Su altı aracının pruvası yine önceden belirlenmiş bir değere ulaştığında ise bu sefer ilgili kontrol yüzeyleri ters yöne ilk adımdaki açı değeri kadar basılarak bu döngü 5-6 kere tekrarlanır. Bu manevra için ölçülen en önemli parametre "overshoot" (sapma) miktarıdır. Sapma; kontrol yüzeylerinin ters yöne basılması sonrasında aracın dümenin önceki basılma yönüne kaç derece daha döneceğini gösteren bir parametredir. 20°/20° Kempf manevrası sırasında dümenin açılma konumunun zamana bağlı değişimi ile aracın yörüngesi Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 8. IHSS'de yer alan su altı aracı formlarını tanımlayan boyutsuz geometri (Mooresun, 2014).

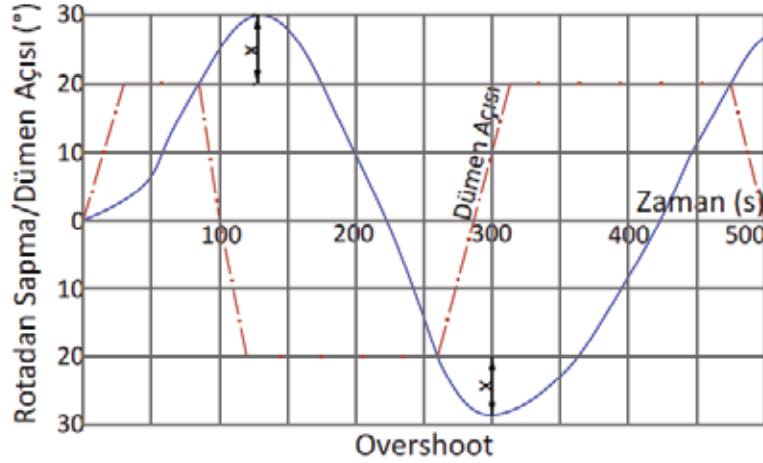


Şekil 9. Dairesel dönüş manevrasının şematik gösterimi.

3.3. Spiral testleri

Dieudonne manevrası olarak da bilinen bu manevra doğrultu stabilitesinin doğrudan belirlenebilmesi için yatay ve düşey düzlemde kullanılabilen bir test yöntemidir. Araç manevraya 10°-15° dümen açısı ile başlar. Daha sonra dümen açısı kademeli olarak 0° oradan da -10°-15° derece değiştirilir. Sonrasında aynı işlem başlangıç dümen açısına doğru tekrarlanır. Dümenin her bir kademesinde dümen açısı aracın dönüş hızı zamandan bağımsız hale gelene kadar sabit tutulur. Daha sonra dönüş hızının dümen açısına

bağlı değeri grafik üzerinde çizilir. Eğer su altı aracı doğrultu stabilitesinde sahipse sonuç eksenin 0 noktasından geçen tek değerli bir fonksiyondur. Aksi durumda grafikte iki değerli bir döngü (loop) bölgesi görülür. Bunun anlamı sancak dümen açısına rağmen geminin iskele tarafı dönmek istemesidir (hafıza etkisi).



Şekil 10. Kempf manevrasının şematik gösterimi.

3.4. Meanders manevrası

Bu manevra su altı aracının yunuslama yönündeki herhangi bir pertürbasyona maruz kalması durumunda etki ortadan kalktıktan sonra kararlı bir yörüngeye dönüp dönmediğini gözlemlemek için yapılır. Bu manevra su altı araçları için özellikle kritik olan düşey düzlem stabilitesinin durumunun doğrudan bir göstergesidir. Tipik bir Meanders manevrası sırasında kontrol yüzeylerinin açıları, derinlik ve baş-kıç vurma hareketindeki değişim Şekil 11'de gösterilmiştir.

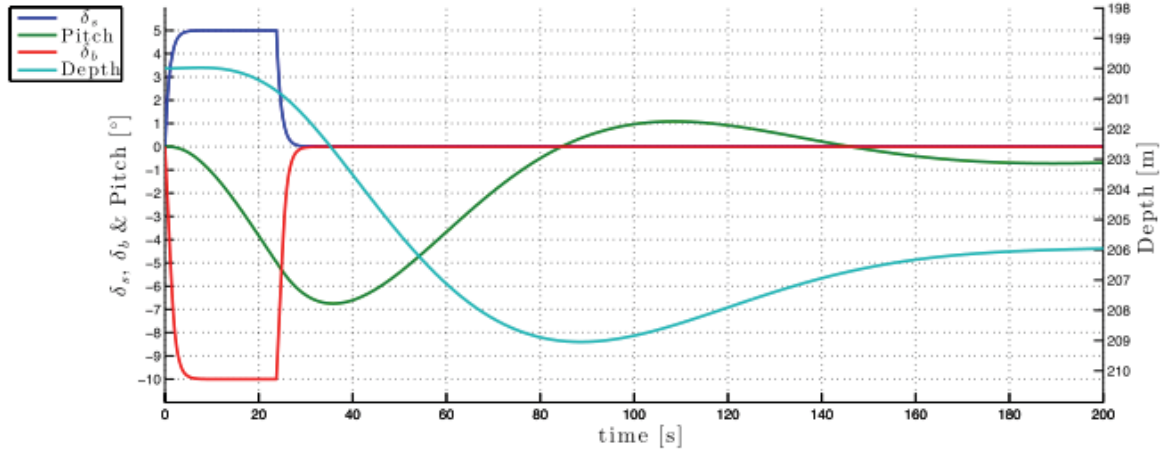
3.5. Max q manevrası:

Bu manevra su altı aracının serbest yüzey etrafındaki manevra karakteristiklerini belirlemek ve serbest yüzeyi yarma simülasyonları gerçekleştirmek için kullanılır. Su altı aracı derin suda belirlenen süratteki sevk noktasında doğrusal rotada ilerlerken baş ve kıç kontrol yüzeylerinin önceden belirlenen bir açıya basılması suretiyle araca baş yukarı hareketi yaptırılır ve kontrol yüzeylerinin bu oryantasyonunda aracın serbest yüzeyi yarması sağlanır. Max q manevrası yapan BB2 modeli Şekil 12'de gösterilmiştir.

3.6. Diğer manevralar

Su altı aracı ölçeğinde (tam ölçek) asgari insan girdisi ile icra edilebilen ve böylece matematiksel/fiziksel yaklaşımla elde edilen sonuçlarla doğrudan kıyaslama imkânına kavuşan yukarıdaki standart manevraların haricinde son yıllarda bazı zorlayıcı manevralar da (acil satılı, ufki dümen kilitlenmesi, yaralanma durumları vb.) su altı araçlarının operasyonel isterlerinin bu yönde genişlemesi nedeniyle araştırmacıların dikkatini çekmeye başlamıştır. Özellikle hesaplama imkanları ile aynı paralelde gelişen fizik temelli hesaplamalı analizler ve otonom kontrol/kumanda sistemlerinin gelişimi ile yetkinliği artan serbest hareketli modeller anılan manevraların da standart manevralarda olduğu gibi (her ne kadar bu manevraları araç ölçeğinde icra etmek zor ve riskli olsa da) analiz edilebilmelerine imkân tanımaktadır.

Standart manevraların yukarıda açıklanan doğrulama/gerçekleme rollerinin yanında, sistem tanımlama teknikleri perspektifinden bakıldığında kullanılan algoritmayı eğitmek için girdi olarak kullanıma işlevleri de mevcuttur. Bu konunun detayları bölüm 0'de açıklanmıştır.



Şekil 11. Meanders manevrası esnasında kontrol yüzeyi ve yunuslama açıları ile aracın derinlik değişimi geçmişi (Thune, 2015).



Şekil 12. Max "q" manevrası yapan serbest hareketli BB2 modeli (Overpelt et al., 2015).

4. Hareket Denklemleri ve Manevra Modelleri

Bu başlık altında su altı araçları için doğrusal ve doğrusal olmayan hareket denklemlerinin altı serbestlik derecesinde türetimi yapılmıştır. Bu denklemlerin literatürde su altı araçları için sıklıkla kullanılan manevra modelleri ile bağlantısına değinilerek söz konusu modellere ilişkin açıklamalara yer verilmiştir.

4.1. Hareket denklemlerinin türetilmesi

Fizikte herhangi bir dinamik sistemin hareketini yöneten denklemlerin türetimi Newton'un ikinci hareket yasasına göre araca etkiyen kuvvetlerin -Denklem (1)'de gösterildiği gibi- aracın reaksiyonuna eşitlenmesi suretiyle yapılır. Eşitliğin sol tarafında bulunan kuvvetler ise araca dışarıdan etkiyen kuvvetler olup; hidrodinamik, yerçekimi ve sephiye kuvvetlerinin toplamından oluşur. Bu kuvvetlerden yerçekimi ve sephiye kuvvetlerinin manevra modelinde ifade edilmesi hidrodinamik kuvvetlere kıyasla görece basittir.

$$\sum F_i = m \cdot a_i \quad (1)$$

Bu ifade doğrusal momentumun korunumunun bir sonucudur. Benzer şekilde açısal momentumun korunumu da bir su altı aracına etkiyen açısal momentlerin aracın seçilen doğrultudaki atalet momentinin (I) ve o doğrultu etrafındaki açısal ivmesinin (α) çarpımına eşit olmasını gerektirir.

$$\sum M_i = I_i \cdot \alpha_i \quad (2)$$

Su altı araçları için düşey yöndeki serbestlik derecelerinin de hesaplamalara dahil edilip altı serbestlik derecesinin tamamında hareket denklemlerinin türetilmesi gereklidir. Ayrıca literatürde var olan deneysel verilerden yararlanılabilmesi için hareket denklemleri bünye eksen takımında ifade edilmelidirler. Su altı araçlarının hareketini yöneten ve eşitliğin sağ tarafını oluşturan bu denklemler yukarıdaki ifadelerden Euler açıları kullanılarak yapılan bir seri rotasyon ile elde edilirler. Hareket denklemleri tüm serbestlik dereceleri için bünye eksen takımında aşağıdaki gibi ifade edilirler.

$$\begin{aligned} X &= m[\dot{u} - rv + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] \\ Y &= m[\dot{v} - wp + ur + x_G(qp + \dot{r}) - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p})] \\ Z &= m[\dot{w} - uq + vp + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p}) - z_G(p^2 + q^2)] \\ K &= I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - (\dot{r} + pq)I_{zx} + (r^2 + q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} \\ &\quad + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] \\ M &= I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yx} \\ &\quad - m[x_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{u} - vr + wq)] \\ N &= I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq - (\dot{q} + rp)I_{yx} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rp - \dot{q})I_{zx} \\ &\quad + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] \end{aligned} \quad (3)$$

Burada X , Y ve Z teknenin doğrusal (ileri öteleme), yanal (yan öteleme) ve dikey (dalıp-çıkma) yönlerdeki kuvvetlerini K , M ve N ise teknenin sırasıyla yalpa, baş-kıç vurma ve savrulma hareketleri esnasında karşılaştıkları açısal momentleri temsil etmektedir. m hareket eden kütle (su altı aracının deplasmanı + ek su kütlesi); I_{xx} , I_{yy} ve I_{zz} teknenin sırasıyla x , y ve z doğrultularındaki atalet momentleridir. x_G , y_G ve z_G tekne ağırlık merkezinin koordinatlarını vermektedir. u , v ve w teknenin sırasıyla ileri öteleme, yan öteleme ve dalıp çıkma hızlarıdır. p , q ve r ise teknenin sırasıyla yalpa, baş-kıç vurma ve savrulma açısal hızlarıdır. (.) işareti ilgili parametrelerin zamana bağlı türevlerini vermektedir.

Su altı araçları, dalmış durumda operasyonları sırasında oluşabilecek hidrostatik etkileri (deniz suyunun yoğunluk değişimleri, yakıtın/ikmal malzemelerinin sarf edilmesi nedeniyle oluşan ağırlık ve trim değişimleri vb.) karşılayabilecek donanıma (tazmin ve ayar tankları vb.) sahip olmak zorundadır. Dolayısı ile ağırlık merkezlerinin konumlarının yüklenme durumlarından bağımsız olduğu iddia edilebilir. Ağırlık merkezinin sabit konumu dolayısı ile manevra analizlerinde bünye eksen takımının merkezi olarak seçilmesi Denklem (3)'te bu iki merkez arasındaki mesafeye bağlı terimlerin sıfır olmasına neden olur. Ayrıca su altı aracının katı bir cisim (statik basınç altında hacminin değişmediği) olduğu ve geometrisinin x-z düzlemine göre simetrik olduğu kabulleri hareket denklemlerinin Denklem (4)'te gösterildiği gibi sadeleşmesine neden olur.

$$\begin{aligned}
 X &= m[\dot{u} - rv + wq] \\
 Y &= m[\dot{v} - wp + ur] \\
 Z &= m[\dot{w} - uq + vp] \\
 K &= I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - (\dot{r} + pq)I_{zx} \\
 M &= I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp + (p^2 - r^2)I_{zx} \\
 N &= I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + (rq - \dot{p})I_{zx}
 \end{aligned} \tag{4}$$

Literatürde bu denklemler boyutsuz halleri ile kullanılırlar. Boyutsuzlaştırma işlemi (SNAME, 1950)'nin önerdiği şekilde yapılır. Buna göre kütle; $m' = \frac{m}{0,5\rho L^3}$, geometrik parametreler $x'_G = \frac{x_G}{L}$, hız ifadeleri; $u' = \frac{u}{U}$, ivme ifadeleri; $\dot{u}' = \frac{\dot{u}L}{U^2}$, kuvvet ifadeleri; $F' = \frac{F}{0,5\rho U^2 L^2}$ ve atalet momentleri ise $I' = \frac{I}{0,5\rho L^5}$ şeklinde boyutsuzlaştırılır. Hidrodinamik katsayılar, kuvvet ve momentlerin doğrusal/açısal hız bileşenleri, doğrusal hız bileşenlerinin çarpım ifadeleri ile doğrusal/açısal ivme bileşenlerine göre türevlerini ifade ettiklerinden boyutsuzlaştırılmaları bu türev ifadesine bağlı olarak yapılır. Örneğin doğrusal hız bileşenlerine göre birinci dereceden türev ifadeleri; $X'_u = \frac{x_u}{0,5\rho UL^2}$ ve $N'_u = \frac{N_u}{0,5\rho UL^3}$ şeklideyken açısal hız bileşenlerine göre birinci dereceden türev ifadeleri; $X'_p = \frac{x_p}{0,5\rho UL^3}$ ve $N'_p = \frac{N_p}{0,5\rho UL^4}$ şeklinde olur. Benzer şekilde doğrusal ivme bileşenlerine göre türev ifadeleri $X'_{\dot{u}} = \frac{x_{\dot{u}}}{0,5\rho L^3}$ ve $N'_{\dot{u}} = \frac{N_{\dot{u}}}{0,5\rho L^4}$ şeklindeyken açısal ivme bileşenlerine göre türev ifadeleri ise; $X'_{\dot{p}} = \frac{x_{\dot{p}}}{0,5\rho L^4}$ ve $N'_{\dot{p}} = \frac{N_{\dot{p}}}{0,5\rho L^5}$ şeklindedir.

4.1.1. Doğrusal hareket denklemleri

Yukarıdaki denklemler bağlı değişkenlerin çarpım ve üstel ifadelerini içerdiklerinden doğrusal değildirler. Denklemleri doğrusallaştırmanın ilk adımı aracın manevrası esnasında kararlı (equilibrium) durumundan küçük sapmalara (pertürbasyon) maruz kaldığı kabul edilir (Humphreys, 1976). Böylece aracın hareketinin kararlı durumu temsil eden bir ortalama (U_0 ve A_0) ve denge durumundan sapmaları temsil eden bir dinamik bileşenin (u_i ve α_i) toplamından oluştuğu söylenebilir. Bu varsayımın matematiksel ifadesi Denklem (5)'te gösterilmiştir.

$$U_i = U_{0i} + u_i ; \quad A_i = A_{0i} + \alpha_i \tag{5}$$

Bu denklemde U doğrusal A ise açısal hızları temsil etmektedir. Aracın ilerleme yönünde sabit hızda seyrettiği durumu kararlı durum olarak kabul edilirse yalnızca "x" eksenindeki doğrusal hareketin ortalama hız bileşeni (U_0) mevcut olur ($U=U_0+u$). Dolayısı ile Denklem (5) diğer bileşenler için aşağıdaki şekilde sadeleşir.

$$U_i = u_i ; \quad A_i = \alpha_i \tag{6}$$

Tüm bu ifadelerin Denklem (4)'te yerine yazılması ve yukarıda doğrusal olmadığı ifade edilen terimlerin ihmal edilmesi ile hareket denklemleri Denklem (7)'de gösterildiği gibi basitleştirilebilir.

$$\begin{aligned}
 X &= m\dot{u} \\
 Y &= m[\dot{v} + rU_0] \\
 Z &= m[\dot{w} - qU_0] \\
 K &= \dot{p}I_{xx} - \dot{r}I_{zx} \\
 M &= \dot{q}I_{yy} \\
 N &= \dot{r}I_{zz} + \dot{p}I_{zx}
 \end{aligned} \tag{7}$$

Su altı aracına etkiyen hidrodinamik kuvvetler/momentler literatürde aracın akışkana göre göreceli hızının, ivmesinin, pozisyonunun ve kontrol yüzeylerinin açılmal konumu gibi aracın durum değişkenlerinin ve bunların türevlerinin bir fonksiyonu olarak düşünülürler. Bu durum matematiksel olarak Denklem (8)'deki gibi ifade edilir. Burada $\delta_B, \delta_S, \delta_R$ sırasıyla baş ufki, kıç ufki ve amudi dümen açılarını tanımlamaktadır.

$$X = f(u, v, w, p, q, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}, \delta_B, \delta_S, \delta_R) \tag{8}$$

Bu varsayımdan yola çıkarak hidrodinamik kuvvetler ile yukarıda sıralanan büyüklükler (su altı aracının durum değişkenleri) arasındaki ilişki matematiksel olarak su altı aracının kararlı durumunu baz alan Taylor serisi açılımı ile temsil edilir (Humphreys, 1976). Doğrusal hareket denklemleri bu ilişkiyi, Denklem (7)'nin Taylor serisine açılımının yalnızca birinci dereceden terimlerini kullanılarak Denklem (9)'da gösterildiği gibi açıklar. Boyutsuzlaştırma bölümü O'de anlatıldığı şekli ile (SNAME, 1950) referans alınarak yapılmıştır.

$$\begin{aligned}
 X'_u(u' - U'_0) + (m' - X'_u)\dot{u}' &= 0 \\
 -v'Y'_v + \dot{v}'(m' - Y'_v) - r'(Y'_r - m'U'_0) - \dot{r}'Y'_r &= 0 \\
 -w'Z'_w + \dot{w}'(m' - Z'_w) - q'(Z'_q + m'U'_0) - \dot{q}'Z'_q &= 0 \\
 -p'K'_p - \dot{p}'(K'_p - I'_{xx}) - r'K'_r - \dot{r}'(K'_r + I'_{zx}) &= 0 \\
 -q'M'_q - \dot{q}'(M'_q - I'_{yy}) &= 0 \\
 -p'N'_p - \dot{p}'(N'_p + I'_{zx}) - r'N'_r - \dot{r}'(N'_r - I'_{zz}) &= 0
 \end{aligned} \tag{9}$$

Hareket denklem takımı bu haliyle iki tür bilinmeyen içerir. Bunlardan ilki analitik, yarı ampirik, deneysel veya hesaplamalı yollardan birisi ile belirlenmesi gereken hidrodinamik katsayılarıdır. Hidrodinamik katsayıların bilinmesi durumunda denklem takımı bağlı değişkenler -doğrusal ve açılmal hızlar ile ivmeler- ($u', v', w', p', q', r', \dot{u}', \dot{v}', \dot{w}', \dot{p}', \dot{q}', \dot{r}'$) için çözülmesi gereken bir diferansiyel denklem sistemi halini alır (Sukas et al., 2017).

4.1.2. Doğrusal olmayan hareket denklemleri

Yukarıda bahsedilen yöntemlerle görece kolay olarak elde edilebilen daha az sayıda katsayıya sahip olmaları doğrusal hareket denklemlerinin manevra analizlerinde kullanımını cazip hale getirebilir. Ancak bir su altı aracının hareketi çoğunlukla serbestlik dereceleri arasında güçlü bağımlılıkların olduğu doğrusal olmayan bir harekettir. Dolayısı ile doğrusal olmayan bu etkilerin de Denklem (4)'te verilen hareket denklemlerinde matematiksel olarak temsil edilmesi gereklidir. Bu işlem ise daha yüksek dereceden türev ifadelerini içeren Taylor serisi terimlerinin eşitliğin sol tarafına eklenmesi suretiyle yapılır ve böylece doğrusal olmayan hareket denklemleri elde edilir. Literatürde mevcut manevra

modelleri doğrusal olmayan hareket denklemlerinden türetilmiştir. Dolayısı ile manevra modelleri incelenmeden önce bu konuya değinilmesi gereklidir.

Doğrusal olmayan hareket denklemlerinden bir manevra modeli türetilmesi için seri açılımı neticesinde elde edilen sonsuz sayıda terimden belirli bir dereceden daha büyük dereceli olanların ihmal edilerek serinin sonlandırılması gereklidir. (Racine & Paterson, 2005). Doğrusal olmayan etkilerin Taylor serisinin hangi dereceye kadarki terimleri ile manevra modelinde temsil edileceği ise modelden beklenen hassasiyet ve doğruluk seviyesi ile model oluşturulurken yapılan temel varsayımlara bağlıdır. Literatürde kabul görmüş manevra modelleri 2. ve 3. dereceden türevlerle birlikte çapraz türev terimlerini de içerebilir (Zierke, 1997). Su altı araçları için yaygın olarak kullanılan manevra modellerinde ise aşağıdaki varsayımlara dayanarak ikinci dereceden daha büyük dereceli terimler ihmal edilmiştir (Racine & Paterson, 2005).

- Türbülanslı bir sınır tabakada yüzey kayma gerilmesi ve hız arasındaki ilişki ikinci dereceden olduğundan doğrusal hızlara bağlı daha büyük dereceli terimler ihmal edilir.
- Viskoz sönümlenme kuvvetleri birinci dereceden rotasyonel hızlar ile ilişkili olduğundan rotasyonel hızların karelerini içeren terimler ihmal edilir.
- Kaldırma kuvvetinin kontrol yüzeylerinde hıza bağlı olarak doğrusal (kanat teorisi), direncin ise hızın karesi ile değiştiği kabul edilir.

Ayrıca doğrusal/açısal ivmelenmeye bağlı birinci dereceden büyük tüm terimler ile tüm hız-ivme, ivme-ivme ve dümen açılarının bağlaşik terimlerinin tamamının sonuca olan etkilerinin ihmal edilebilir olduğu kabul edilmiştir. Bu varsayımlar altında herhangi bir serbestlik derecesinde cisme etkileyen kuvvet/momentin Taylor serisi açılımı Denklem (10)'da gösterildiği gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned}
 X = X_0 &+ (uX_u + vX_v + wX_w + pX_p + qX_q + rX_r) \\
 &+ \frac{1}{2}(u^2X_{uu} + v^2X_{vv} + w^2X_{ww} + p^2X_{pp} + q^2X_{qq} + r^2X_{rr}) \\
 &+ (\dot{u}X_{\dot{u}} + \dot{v}X_{\dot{v}} + \dot{w}X_{\dot{w}} + \dot{p}X_{\dot{p}} + \dot{q}X_{\dot{q}} + \dot{r}X_{\dot{r}}) \\
 &+ (uvX_{uv} + uwX_{uw} + upX_{up} + uqX_{uq} + urX_{ur} + vwX_{vw} \\
 &+ vpX_{vp} + vqX_{vq} + vrX_{vr} + wpX_{wp} + wqX_{wq} + wrX_{wr} + pqX_{pq} \\
 &+ prX_{pr}) + (X_{\delta_B}\delta_B + X_{\delta_S}\delta_S + X_{\delta_R}\delta_R + X_{\delta_B\delta_B}\delta_B^2 + X_{\delta_S\delta_S}\delta_S^2 \\
 &+ X_{\delta_R\delta_R}\delta_R^2 + X_{\delta_Bu}\delta_Bu + X_{\delta_Bv}\delta_Bv + X_{\delta_Bw}\delta_Bw + X_{\delta_Bp}\delta_Bp \\
 &+ X_{\delta_Bq}\delta_Bq + X_{\delta_Br}\delta_Br + X_{\delta_Su}\delta_Su + X_{\delta_Sv}\delta_Sv + X_{\delta_Sw}\delta_Sw \\
 &+ X_{\delta_Sp}\delta_Sp + X_{\delta_Sq}\delta_Sq + X_{\delta_Sr}\delta_Sr + X_{\delta_Ru}\delta_Ru + X_{\delta_Rv}\delta_Rv \\
 &+ X_{\delta_Rw}\delta_Rw + X_{\delta_Rp}\delta_Rp + X_{\delta_Rq}\delta_Rq + X_{\delta_Rr}\delta_Rr)
 \end{aligned} \quad (10)$$

4.2. Matematiksel modelleme

Doğrusal olmayan hareket denklemlerinde eşitliğin sol tarafındaki terimlerden benzer özellikte olanlar (ek su kütlesi terimleri, koryolis ve merkezci terimler, viskoz sönümlenme terimleri, kontrol yüzeyi terimleri vb.) Denklem (11)'de gösterildiği gibi gruplandırılabilir. Bu terim grupları doğrusal olmayan hareket denklemlerinden türetilen manevra modellerinde farklı kabuller altında farklı şekillerde temsil edilirler.

$$\begin{aligned}
 \{f\} &= \{f_H\} + \{f_c\} \\
 \{f_H\} &= \{f_I\} + \{f_R\}
 \end{aligned} \quad (11)$$

Burada $\{f_H\}$ hidrodinamik (ideal akış $\{f_I\}$ ve viskoz akış $\{f_R\}$ kaynaklı hidrodinamik etkilerin toplamı) ve $\{f_C\}$ de kontrol yüzeyi etkilerini temsil etmektedir. Akışın ideal kısmından kaynaklanan hidrodinamik etkiler ek su kütlesi, koryolis ve merkezci etkiler olarak adlandırılır. Bu etkilerden ek su kütlesi etkileri Denklem (10)'da ivmeye ($\dot{u}X_{\dot{u}}$ vb.) bağlı terimlerle, koryolis ve merkezci etkiler ise hızların bağlaşıklık terimleri (uvX_{uv} vb.) ile temsil edilirler. Bu terimlerin tensör notasyonunda topluca gösterimi Denklem (12)'de verilmiştir (Techet, 2005).

$$F_j = - \underbrace{\dot{U}_i m_{ij}}_{\text{Ek su kütlesi}} - \underbrace{\varepsilon_{jkl} U_i \Omega_k m_{li}}_{\text{Koriyolis/Merkezcil}} \quad (12)$$

$$M_j = - \underbrace{\dot{U}_i m_{j+3,i}}_{\text{Ek su kütlesi}} - \underbrace{\varepsilon_{jkl} U_i \Omega_k m_{l+3,i} - \varepsilon_{jkl} U_k U_i m_{li}}_{\text{Koriyolis/Merkezcil}}$$

Burada F ve M kuvvet ve momentleri, U ve Ω doğrusal ve açısal hızları, m ek su kütlesi matrisini temsil etmekte olup ε_{jkl} Levi-Civita sembolüdür. Ek su kütlesi matrisi $m_{6 \times 6}$ 'lık simetrik bir matris olması nedeniyle gerçekte belirlenmesi gereken 21 adet katsayı (ideal akış varsayımı ile) içerir. Ancak bu sayı geometrinin bir veya birden fazla eksene göre simetrik olması durumunda azalacaktır. (Imlay, 1961) x-z düzleminde simetriye sahip tipik bir su altı aracı geometrisine gösterdiği benzerliğe dikkat çekerek kanatçıklı küremsi cismin (finned spheroid) ek su kütlesi matrisinin aşağıdaki gibi sadeleşeceğini belirtmiştir.

$$m_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & Y_{\dot{p}} & 0 & Y_{\dot{r}} \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & Z_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & K_{\dot{v}} & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & K_{\dot{r}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & N_{\dot{v}} & 0 & N_{\dot{p}} & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Sadeleşmiş matris Denklem (12)'de yerine yazılırsa ilerleme yönündeki kuvvetin örnek olarak seçildiği Denklem (10)'daki seri açılımında $X_{\dot{u}}$ hariç diğer tüm ivmeye bağlı türevler ile vrX_{vr} , wqX_{wq} , prX_{pr} haricindeki tüm bağlaşıklık hız terimleri sıfıra eşit olur. Ayrıca q^2X_{qq} ve r^2X_{rr} de sıfırdan farklı diğer terimlerdir. Buna göre akışın ideal kısmından kaynaklanan ilerleme yönündeki hidrodinamik kuvvet bileşeni Denklem (14)'te verilmiştir.

$$\{f_I\}'_x = \dot{u}X_{\dot{u}}' + q^2X_{qq}' + r^2X_{rr}' + vrX_{vr}' + wqX_{wq}' + prX_{pr}' \quad (14)$$

Kontrol yüzeyi kuvvetlerinin manevra modelinde temsili ise yukarıda kontrol yüzeyleri üzerinde kaldırma kuvvetinin ve direncin hız ile ilişkisini tanımlayan varsayıma dayanılarak yapılır. Buna göre ilerleme yönünde kontrol yüzeylerinin yalnızca direnç bileşeni söz konusu olduğundan Denklem (10)'da yer alan kontrol yüzeyi açısına bağlı türevlerden yalnızca ikinci dereceden olanların sıfırdan farklı olduğu sonucuna varılabilir. İlerleme yönündeki kontrol yüzeyi kuvvetleri Denklem (15)'te verilmiştir.

$$\{f_C\}'_x = X_{\delta_B \delta_B}' \delta_B^2 + X_{\delta_S \delta_S}' \delta_S^2 + X_{\delta_R \delta_R}' \delta_R^2 \quad (15)$$

Manevra modellerinin matematiksel modelleme anlamında birbirlerinden en çok farklılaştıkları kuvvet bileşeninin akışın viskoz kısmından kaynaklanan kuvvet bileşeni $\{f_R\}$ olduğu söylenebilir. Bunun nedeni

viskoz bileşenin manevra modellerinde temsil edilmesinin görece zor ve tecrübeye (deneysel/hesaplamalı verilere) dayalı olmasıdır. İlerleme yönünde viskoz kuvvetler basitçe itme ve direnç kuvvetlerinin farkıdır ve hızın ikinci dereceden terimleri ile Denklem (16)'daki gibi modellenilebilir (Sen, 2000).

$$\{f_R\}_x' = (T' - R') = X_{uu}'u^2 + X_{vv}'v^2 + X_{ww}'w^2 \quad (16)$$

Sonuç olarak ilerleme yönündeki kuvvet modeli Denklem (17)'de gösterildiği gibi elde edilir.

$$X' = \dot{u}X_{\dot{u}}' + q^2X_{qq}' + r^2X_{rr}' + vrX_{vr}' + wqX_{wq}' + prX_{pr}' + X_{uu}'u^2 + X_{vv}'v^2 + X_{ww}'w^2 + X_{\delta_B\delta_B}'\delta_B^2 + X_{\delta_S\delta_S}'\delta_S^2 + X_{\delta_R\delta_R}'\delta_R^2 \quad (17)$$

İncelenen geometrinin simetri özellikleri ve modelden beklenen doğruluk/hassasiyet dikkate alınarak (Prestero, 2001), (McFarland & Whitcomb, 2013), (Coe, 2013) ve (Fossen, 2011) gibi birçok araştırmacı tarafından viskoz kuvvet/moment bileşeni farklı şekillerde modellenmiştir. Örneğin (Fossen, 2020) dikdörtgen prizması şeklindeki ROV'lar için serbestlik dereceleri arasında bağlaşıklık olmayan hareket varsayımıyla bu kuvvet bileşenini Denklem (18)'de gösterilen şekilde modellenmesini önermiştir.

$$\{f_R\} = \text{diag}([X_u + Y_v + Z_w + K_p + M_q + N_r])v + |v|^T \text{diag}([X_{u|u}| + Y_{v|v}| + Z_{w|w}| + K_{p|p}| + M_{q|q}| + N_{r|r}|])v \quad (18)$$

$$v = [u, v, w, p, q, r]$$

(Coe, 2013) ise x-z düzleminde simetriye sahip su altı araçları için Denklem (19)'da gösterilen daha genel bir viskoz kuvvet modeli önermiştir.

$$\{f_R\} = C_{vv^*} \dot{v} + C_{v|v|^*} \text{diag}(|v|)v \quad (19)$$

Burada C_{vv^*} ve $C_{v|v|^*}$ sırasıyla Denklem (20)'de verilmiştir.

$$C_{vv^*} = \begin{bmatrix} X_{uu} & X_{vv} & X_{ww} & X_{pp} & X_{qq} & X_{rr} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{uu} & Z_{vv} & Z_{ww} & Z_{pp} & Z_{qq} & Z_{rr} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_{uu} & M_{vv} & M_{ww} & M_{pp} & M_{qq} & M_{rr} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C_{v|v|^*} = \begin{bmatrix} X_{u|u}| & X_{v|v}| & X_{w|w}| & X_{p|p}| & X_{q|q}| & X_{r|r}| \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{u|u}| & Z_{v|v}| & Z_{w|w}| & Z_{p|p}| & Z_{q|q}| & Z_{r|r}| \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_{u|u}| & M_{v|v}| & M_{w|w}| & M_{p|p}| & M_{q|q}| & M_{r|r}| \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Denklem (19)'da hıza bağlı ikinci dereceden türevlerde daha gelişmiş manevra modellerinde (Gertler & Hagen, 1967) olduğu gibi mutlak değer ifadelerine yer verildiği görülmektedir. Bunun durum incelenen serbestlik derecesindeki kuvvet/moment ve hareket denklemlerindeki bağlı değişkenler arasındaki ilişki ile açıklanabilir. Kuvvet ve momentler bir bağlı değişkenin tek veya çift fonksiyonu olabilirler (SNAME, 1989). Mutlak değerli ifadelerinin kullanılmaması durumunda azami ikinci dereceden türev ifadelerini içeren manevra modellerinde (su altı araçları için kullanılanlarda olduğu gibi) bağlı değişkenlerin tek fonksiyonu olan kuvvet/momentlerin yalnızca Taylor serisinin doğrusal terimiyle temsil edilmeleri gerekir. Literatürde mevcut manevra modellerinin çoğu söz konusu

kuvvet/moment-bağlı değişken ilişkisi için de doğrusal olmayan etkileri daha yüksek dereceden Taylor serisi terimlerini modele dahil etmeksizin dikkate almak için bu yolu benimsemişlerdir.

4.3. Manevra modelleri

Manevra modeli; bir su altı aracına hareketi nedeniyle etkiyen kuvvet ve momentleri aracın geometrisinin ve akışkan özelliklerinin bir fonksiyonu olan bir seri katsayı vasıtası ile hesaplamaya yarayan matematik modeldir. Bu anlamda değerlendirildiğinde aşağıda verilen Morrison denkleminin en basit manevra modeli olduğu söylenebilir (Morrison & Yoerger, 1993).

$$F = (1 + C_M)mU + 0.5\rho AC_D U|U| \quad (21)$$

Burada;

C_M : Ek su kütlesi katsayısını,

C_D : Direnç katsayısını,

m : Cismin kütlesini,

U : Cismin hızını,

ρ : Akışkan yoğunluğunu,

A : Referans Alanı (Akışa karşı gösterilen kesit alanı),

Akışkan içerisinde yalnızca bir boyutta hareket serbestliğine sahip ivmelenen cisimlere etkiyen kuvveti hesaplamak için kullanılan bu yarı ampirik model deneysel/hesaplamalı/teorik yöntemler kullanılarak belirlenmesi gereken iki adet katsayıya (C_M ve C_D) sahiptir.

Cismin doğrusal ve açısal hareket serbestliğine sahip olduğu boyut sayısı arttıkça; bahse konu boyutlardaki hareketleri nedeniyle maruz kaldığı kuvvet ve momentleri ve bu boyutlar arası karşılıklı etkileşimi tanımlamak için daha fazla sayıda katsayı içeren daha karmaşık manevra modellerine ihtiyaç duyulmaktadır. Buna göre manevraları esnasında altı serbestlik derecesinin tamamında hareket edebilen su altı araçlarının maruz kaldıkları kuvvet ve momentleri hesaplamak için literatürdeki en karmaşık ve düzlemler (yatay ve düşey) arası karşılıklı etkileşimleri de barındıran manevra modellerine ihtiyaç vardır.

Bu modeller ise bölüm 0'de detayları anlatılan doğrusal olmayan hareket denklemlerinden türetilirler. Kuvvet ve momentlerin hız, ivme ve kontrol parametrelerine göre Taylor serisine açılmasına dayanan bu işlem neticesinde ortaya çıkan ifade sabit katsayılar ile çarpım halinde olduğundan matematik modeller katsayı tabanlı modeller olarak da adlandırılırlar. Literatürde su altı araçlarının manevra analizi için genel kabul görmüş modeller aşağıda sıralanmıştır.

4.3.1. Gertler ve Hagen (1967) modeli

DTMB bünyesinde su altı araçları ile yapılan analizler için bir standart oluşturmak amacıyla (Gertler & Hagen, 1967) tarafından geliştirilen standart denklemler (Humphreys, 1976)'in modelindeki doğrusallaştırma ve basitleştirmeleri içermediğinden (ikinci dereceden terimler de dahil edilmiştir.) yazarlar modelin standart olmayan keskin manevraların temsil edilmesi için de kullanılabileceğini ve modelin geçerliliğinin su altı aracının dalmış durumda ileri ve sıfır hızda karşılaşılabileceği tüm hareket modlarına genişletilebileceğini savunmuşlardır. Model geliştirilirken her bir kuvvet/moment bileşeninin nasıl modellendiğine ilişkin kullanılan kabuller ve deneysel veriler literatürde mevcut değildir. Dolayısı ile modelde yer alan terimlerin kuvvet bileşenlerinin hangisinden/hangilerinden kaynaklandığı açık değildir. Bu nedenle bölüm 0'de yapıldığı gibi modeli farklı kuvvet/moment bileşenlerinin etkilerinin ayrı ayrı incelendiği bir toplam olarak ifade etmek çok zordur (McCarter, 2014). Bu türden modeller literatürde toplu (lumped) model adlandırılır.

Her ne kadar model geliştirilirken incelenen manevralar esnasında kontrol yüzeylerinde yüzeyin kritik bir hücum açısından sonra kaldırma kuvvetinin kaybedilmesi (stall) olayı gözlemlenmese de modelin kontrol yüzeyi hareketleri için bu durumu da dikkate alan bir modül içermemesi yukarıdaki iddianın geçerliliğini zorlayıcı manevralar için sorgulanabilir hale getirmektedir. Bu husus bu türden manevraları analiz eden güncel çalışmalarda da vurgulanmıştır (Bettle, 2013). Bettle; Gertler ve Hagen'ın modelinin doğrusal olmayan ve karşılıklı etkileşimli terimleri de barındırması itibarı ile 18° kadar olan hücum/sürüklenme açılarında geçerli olduğunu ve yüksek derecede zamana bağlı manevraların bu katsayı tabanlı yarı kararlı (quasi-steady) modelin zayıf noktası olduğunu ifade etmiştir.

4.3.2. Feldman (1979) modeli

Uygulama kolaylığı ve literatürde elde edilen sonuçlarla kıyaslanabilirlik/tutarlılık açısından değerlendirildiğinde, literatürde en sık kullanılan model olan Gertler ve Hagen modelinin revize edilmesi ilgili değişikliğin önemli bir avantaj/gelişme sağlaması şartına bağlanmıştır (Gertler & Hagen, 1967). Hücum açısı arttıkça veya ani manevralar için su altı aracı etrafındaki akışın giderek artan oranda zamana bağlı hale geldiği bilinmektedir. Ancak yapısı gereği yarı kararlı olan katsayı tabanlı modellerin bu etkiyi analizlere yansıtması olanaksızdır.

(Feldman, 1979) -manevra esnasında ortaya çıkan düzlem dışı etkilerin de kaynağı olan- yelken etrafında oluşan at nalı girdabın, yüksek hücum açılarında su altı aracının rüzgaraltı kısmında oluşan çapraz akış ve takıntılar ile etkileşime girmesinin oluşturduğu zamana bağlı etkileri manevra modelinde temsil edebilmek ve modelin geçerliliğini artırabilmek için Gertler ve Hagen'ın modelini revize etmiştir. Ancak Feldman'ın önerdiği düzeltmelerin uygulamasının güç olması (Bettle, 2013) bu modelin literatürde Gertler ve Hagen modeli kadar uygulama alanı bulamamasına neden olmuştur (Bettle et al., 2009).

4.3.3. Watt (2007) manevra modeli:

Acil satha geliş manevrasını analiz ettiği çalışmasında (Watt, 2007) bu türden manevraların analizlerinde kullanılmak üzere bir de manevra modeli önermiştir. Watt'ın modeli temel olarak (Feldman, 1979) çalışmasına dayansa da ek su kütlesi terimleri için farklı bir hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca modele deneysel veriler kullanılarak türetilen ve hücum açısının bir fonksiyonu olan itki gücü alt modülü ile takıntı/pervane aktivasyonu için bir alt modül eklenmiştir. Bu modelin geliştirilmesindeki ana amaç diğer yarı kararlı manevra modelleri ile doğru bir şekilde modellenemeyen satha geliş esnasında su altı aracının yalpa serbestlik derecesindeki kararsızlık fenomenini analiz etmektir. Modelin geliştirilmesinin diğer bir amacı ise yüksek açılı manevraların daha doğru bir şekilde temsil edilmesine olanak sağlamaktır. Bunun yanında diğer kabul görmüş modellere kıyasla daha yeni bir model olması nedeniyle bu modelin henüz yeterince test edilmediği söylenebilir.

5. Manevra Problemine Matematiksel (Dolaylı) Yaklaşımlar

Bu başlık altında incelenen yöntemlerin tamamı rijit cisim hareket denklemlerinden matematiksel olarak elde edilen bir manevra modelinin katsayılarını hesaplamak üzere geliştirilmişlerdir. Bu yöntemler akışkan ile cismin hareket denklemleri arasında mevcut zaman boyutundaki karşılıklı etkileşimi dikkate almaksızın manevra analizi yapılmasına ve aracın yörüngesinin belirlenmesine izin verirler. Bu hususun analizlerin yapılması için gerekli kaynaklara olan ihtiyacı azaltması bu kategoride

çok çeşitli yöntemlerin geliştirilmesi sonucunu doğurmuştur. Su altı araçlarının manevra analizlerinde kullanılan bu yöntemler alt başlıklarda detaylandırılmıştır.

5.1. Deneysel yöntemler

Manevra problemine matematiksel yaklaşım yöntemlerinin deneysel ayağını kısıtlanmış model deney yöntemleri oluşturmaktadır. Bu yöntemler su altı aracının ölçekli bir modelinin bir hareket mekanizmasına bağlanması ve önceden belirlenmiş hareketleri yapmak için zorlanmasını esas alırlar. Zorlanmış hareket nedeniyle oluşan reaksiyon kuvvetleri ve bunlara bağlı momentlerin analizi ise tüm matematiksel yöntemlerinin ortak çıktısı olan hidrodinamik katsayıları verir. Kısıtlanmış model deney yöntemleri ile belirlenebilecek katsayıların sayısı ve niteliği (doğrusal, doğrusal olmayan, etkileşimli vb.) hareket mekanizmasının aşağıda sıralanan özelliklerine bağlıdır:

- Daimi/Dinamik
- Düzlemsel/Düzlem Dışı
- Serbestlik Derecesi Sayısı

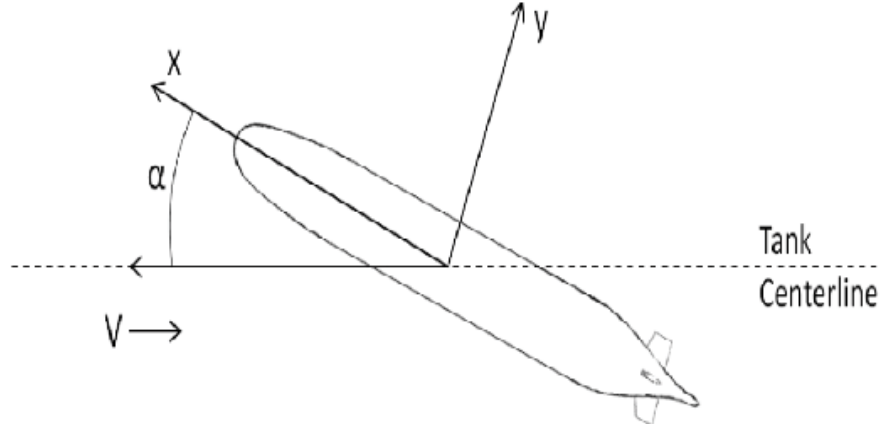
Su altı araçlarının manevra analizlerinde kullanılan kısıtlanmış model deney yöntemleri bu özelliklere göre Tablo 5'te sınıflandırılmış olup, her bir yöneme ilişkin detaylı açıklama alt başlıklarda verilmiştir.

Tablo 5. Kısıtlanmış model deneylerinin sınıflandırılması.

Test Yöntemi	Sınıflandırma			
	Düzlemsel-Düzlem Dışı	Daimi-Dinamik	Serbestlik Derecesi Sayısı	Tespit Edebileceği Katsayılar
Statik Sürüklenme Deneyleri	Düzlemsel	Daimi	1	• Statik Stabilite
Düzlemsel Hareket Mekanizması	Düzlemsel	Dinamik (Periyodik)	3	• Statik Stabilite • Rotasyonel • Ek su kütlesi
Döner Kol Mekanizması	Düzlemsel	Daimi	1	• Rotasyonel • Statik Stabilite (Dolaylı)
Deforme Model Deneyleri	Düzlemsel	Daimi	1	• Rotasyonel (doğrusal) • Statik Stabilite (Dolaylı)
Dinamik Dalma-Yunuslama-Yalpa Mekanizması	Düzlem Dışı	Dinamik (Rastgele)	3	• Dinamik etkiler
Konik Hareket Mekanizması	Düzlem Dışı	Dinamik (Periyodik)	3	• Yalpa hareketine bağlı katsayılar
MDTF	Düzlem Dışı	Dinamik (Rastgele)	6	• Tüm katsayılar

5.1.1. Statik sürüklenme deneyleri

Statik sürüklenme deneyleri bir su altı aracının statik stabilite türevleri olarak da bilinen doğrusal hız bileşenlerine bağlı hidrodinamik katsayılarının doğrudan tespit edilebilmesi için, modelin yatay ve düşey düzlemde bir hücum/sürüklenme açısına sahip olacak şekilde çekme arabasına bağlanması ve çekme işlemi sırasında doğrusal hızlara bağlı kuvvet ve moment verisinin kaydedilmesi aşamalarını içerir. Statik sürüklenme deneylerinin yapılışı Şekil 13'te şematik olarak gösterilmiştir.

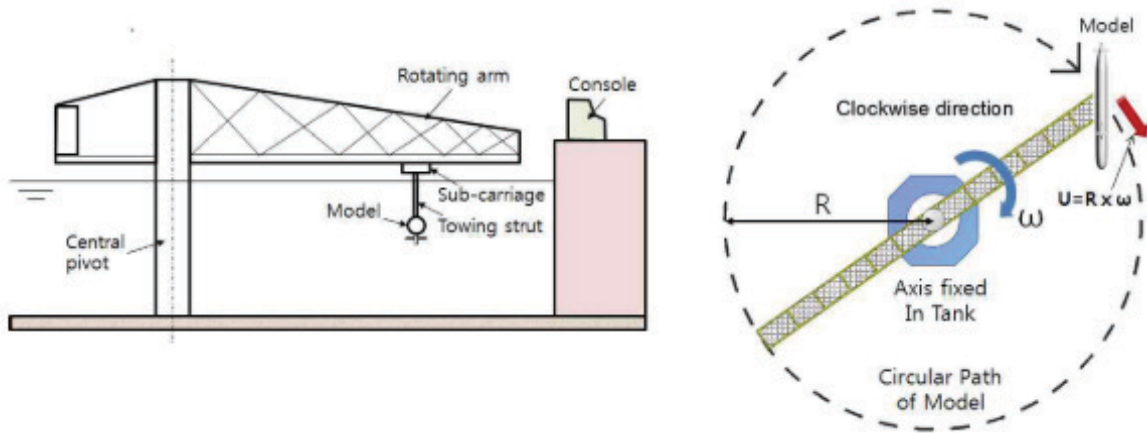


Şekil 13. Statik sürüklenme deneyleri (Can, 2014).

Çekme arabası dışında herhangi bir özel hareket sağlayan mekanizmaya ihtiyaç duymaması ve statik stabilite analizlerinin geliştirilen prototipin manevra karakteristiklerini doğrulamanın ilk fazı olması nedeniyle statik sürüklenme deneyleri su altı araçlarının deneysel manevra analizleri için en temel deney yöntemidir. Statik sürüklenme yöntemi zamandan bağımsız ve düzlemsel bir yöntemdir.

5.1.2. Döner kol mekanizması deneyleri

Bir başka düzlemsel ve zamandan bağımsız yöntem ise su altı araçlarını rotasyonel katsayılarının doğrudan elde edilmesine imkân sağlayan döner kol mekanizması tekniğidir. Bu teknikte modele mekanizma merkezindeki ekipman adacığında bulunan tahrik shaftı tarafından istenilen bir sabit açısal hız değeri ve değişik yarıçaplı dairesel yörüngelerde rotasyonel hareket yaptırılır. Model mekanizmaya istenilen açısal oryantasyonda bağlanarak kuvvet ve momentler yörünge yarıçapının bir fonksiyonu olacak şekilde kaydedilir (Goodman, 1960). Böylece statik sürüklenme deneylerinde kullanılan tüm parametre değişimlerine ilave olarak yörünge yarıçapı da değiştirilebilir (Burcher, 1972). Bu mekanizma ile doğrusal rotasyonel katsayıların yanı sıra doğrusal olmayanların da ölçülmesi mümkündür. Döner kol mekanizması Şekil 14'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 14. Döner kol mekanizmasının şematik gösterimi (Han et al., 2017).

Bu yöntemin önemi şu şekilde açıklanabilir; örneğin yanal öteleme kuvvetinin sürüklenme açısı ve dönme yarıçapına göre değişimi incelenirse herhangi bir sürüklenme açısı ve dönüş dairesi için kuvvetin değişiminin doğrusal olmadığı görülebilir. Bunun anlamı yalnızca doğrusal katsayıların söz konusu

kuvvet değerini hareket parametrelerinin tüm opsiyonları için temsil etmekte yetersiz olduğudur. Kuvvetin hareketin tüm varyasyonlarında doğru temsil edilebilmesi için daha yüksek mertebeden katsayılara ihtiyaç vardır.

Döner kol mekanizmasının en belirgin kısıtı testlerin mekanizmanın bir turuna yakın dönüşler için yapılması zorunluluğudur. Bunun nedeni modelin kendi iz bölgesinden geçmesini engelleyerek iz bölgesinin kuvvet ve moment ölçümlerine getireceği belirsizliklerin önüne geçmektir. Bir diğer kısıtlama ise tesisin fiziksel sınırları ile ilgilidir. Tesisin duvarlarının girişim etkisi olmaksızın -model boyutunun da bir fonksiyonu olarak- test yapılabilecek azami ve asgari test yarıçapları mevcuttur (Gertler & Hagen, 1967).

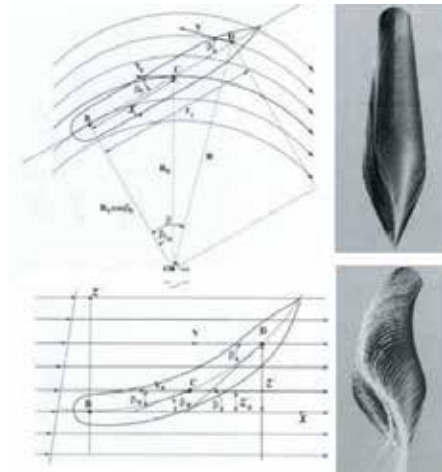
Rotasyonel katsayıların yanında dolaylı da olsa statik stabilite türevleri de döner kol mekanizması kullanılarak belirlenebilir. Bu işlem elde edilen datanın sonsuz dönme dairesi yarıçapına ekstrapolasyonu ile yapılır ve belirsizlik ve hatalara açıktır.

5.1.3. Deforme modeller ile yapılan deneyler

Su altı araçlarının zamandan bağımsız (daimi) dönüş manevrasının deneysel analizi için döner kol mekanizmasına bir diğer alternatif ise deforme edilmiş modellerin kullanımınıdır. Koordinat dönüşümü yöntemi kullanılarak döner kol deneylerindeki klasik model dairesel yörünge kombinasyonu ile model üzerinde oluşan yerel hücum açıları deforme model ve doğrusal yörünge kombinasyonu kullanarak elde etmeyi hedefleyen bu teknik aynı zamanda döner kol mekanizmasının;

- Modelin kendi izinden geçmemesi için yalnızca bir dönüş ile sınırlandırılması,
- Akışın görselleştirilmesindeki zorluklar

gibi kısıtlamalarının da aşılmasına imkan sağlamaktadır. Bu tekniğin Von Karman tarafından hava gemileri için kullanıldığı bilinmektedir. Tekniğin etkinliğini göstermek için (Gregory et al., 2004) bu deney tekniğini HAD ortamında simüle ederek analizler yapmış ve her iki tekniğinde birbirinin yerine kullanılabileceği sonucuna varmıştır. Sürekli dönme manevrası esnasında normal ve deforme model etrafında oluşan akış sahalarının karşılaştırılması Şekil 15'te verilmiştir.



Şekil 15. Sürekli dönme manevrası esnasında normal ve deforme model etrafında oluşan akış sahalarının karşılaştırması (Gregory et al., 2004).

5.1.4. Düzlemsel hareket mekanizması deneyleri

Manevra denklemlerinde su altı aracına etkiyen hidrodinamik kuvvetlerin bir ifadesi olarak yer alan ve aracın farklı hız/ivme bileşenlerinin bir fonksiyonu olan katsayı gruplarının tümünün tek bir deney düzeneği kullanılarak bir seferde ve doğrudan belirlenebilmesi deneysel analizler açısından arzu edilen bir durumdur (Goodman, 1960). Deneysel literatürde bu şekilde çok yönlü bir mekanizmaya olan ihtiyacı ekonomik olarak karşılamak üzere geliştirilen ve salınımlı deney tekniğine dayanan düzlemsel hareket mekanizması ilk defa DTMB'de denizaltı modellerini test etmek için kullanılmıştır.

Elektromekanik bir cihaz olan ve çekme tankı arabasına bağlanarak kullanılan düzlemsel hareket mekanizması bir modele çekme tankında önceden programlanmış sinüzoidal hareketleri yaptırmak üzere tasarlanmıştır (Millan & Thorburn, 2010). Söz konusu sinüzoidal hareketler modeli düzeneğe irtibatlayan iki çubuk tipi destek vasıtası ile bağlantı noktalarına uygulanan kuvvetlere tepki olarak oluşur ve düşey düzlemde modelin çekme arabası ile sabit bir hızda çekildiği doğrultu etrafında gerçekleşir. Bu sinüzoidal hareket destek çubuklarına hidrolik pistonlar vasıtası ile uygulanan kuvvetler arasındaki faz farkına göre yalın dalıp çıkma veya yalın yunuslama olabilir.

Salınımlı yörünge izlerken su altı aracı hem doğrusal hem de açısal ivmelenmeye maruz kaldığından doğrusal, rotasyonel ve ivmelenme etkilerinin tamamını hisseder. Bu açıdan değerlendirildiğinde doğrusal hareket mekanizması ivmeye bağlı türevleri verebilen deneysel mekanizmalarından biridir.

Yalın dalıp çıkma modunda su altı aracının pruvası daima çekme arabasının hareket yönündedir. Dolayısı ile testlerde yunuslama ve rotasyonel etkiler söz konusu değildir. Modelin her bir parçası yalın salınım halindedir ve yalnızca dalıp çıkma hızı ve ivmesi söz konusudur. Yalın yunuslama modunda ise hem model hem de pruva aynı frekansta salınım halindedir. Hareketin geometrisi pruvanın her zaman hareketin yörüngesine teğet olmasını sağlayacak şekilde seçilmiştir. Dolayısı ile model dalıp çıkma yönünde yer değiştirmeye (hız ve ivme) maruz kalmaz, sadece yunuslama hızı ve ivmesinin etkisi altındadır. Bu iki hareket modunun herhangi bir kombinasyonu da arzu edilirse modele yaptırılabilir. Düzlemsel hareket mekanizmasının hareket modları Şekil 16'da gösterilmiştir.

Yalın Dalıp Çıkma



Yalın Yunuslama



Şekil 16. Düzlemsel hareket mekanizmasının hareket modları (Can, 2014).

Hareketin sinüzoidal olması hareketin yarattığı kuvvetin de sinüzoidal olması sonucunu doğurur. Ancak aynı frekans değerine sahip olan hareket ve kuvvet arasında bir faz kayması oluşur. Bu nedenle ölçülen kuvvet hareket ile aynı fazda ve 90° faz farkı olan iki bileşene ayrılabilir. Düzlemsel hareket mekanizması bu iki kuvvet bileşenini ayrı ayrı ölçmek üzere tasarlanmıştır. Kuvvetin hareket ile aynı fazdaki bileşeni ivmeyi, 90° faz farkına sahip bileşeni ise hıza bağlılığın ifadesidir. Buradan yola çıkarak aynı çekme

arabası hızında farklı frekans (ω) ve genlik (a_0) değerlerinde bir seri test sonucunda ölçülen kuvvet bileşenlerinin hız ($a_0\omega$) ve ivmeye ($a_0\omega^2$) bağlı türevleri bulunabilir.

Bu iki salınımlı hareket modunda bulunan katsayıları ilave olarak statik sürüklenme testleri ile elde edilen statik katsayılar da dikkate alındığında hareket denklemleri tarafından yörünge hesaplamak için gerekli olan tüm katsayılar bu mekanizma ile elde edilmiş olur. Ancak katsayıların belirlenmesi için deney datasının işlenmesinin gerekli olması ve bu sırada yapılan eş zamanlı denklem çözümü değişik katsayıların mertebeleri arasındaki büyük farklar nedeniyle hatalara sebep olabilir (Goodman, 1960).

Yöntemin bir diğer dezavantajı ise ekonomik olması için var olan çekme tankı imkânlarını kullanmak zorunda olması ile ilişkilidir. Mekanizmanın azami hareket genliği ve dolayısıyla frekansı çekme tankının -yan duvarları ile girişim etkisine neden olmayacak bir emniyet mesafesi bırakmak kaydı ile- yarı genişliği ile sınırlıdır. Bu durum hareketin genliğinin küçük olmasına, ortaya çıkan hareketin gerçekçi bir hareket olmamasına ve bu mekanizma kullanılarak yapılan analizlerin akışkan kuvvetlerinin teorik temellerine dayanmasına neden olur.

Düzlemsel hareket mekanizmasının düşük genlikli hareketi nedeniyle aracın gerçek manevra tepkisinden uzaklaşması, beraberinde gerçek manevra koşullarında (deniz tecrübeleri veya serbest hareketli model deneyleri) gözlemlenmeyen "Wagner" (hafıza) etkisinin oluşması sonucunu doğurur (Grim et al., 1976). Bu noktada ölçülen kuvvete ilişkin Wagner etkisinden bağımsızlık varsayımı ise kuvvetin $a_0\omega$ (hız) ve $a_0\omega^2$ (ivme)'nin doğrusal bir fonksiyonu (doğrunun eğimi ilgili değişkene bağlı hidrodinamik katsayıyı vermektedir.) olması anlamına gelir. Fakat gerçekte doğrusal olmayan bu ilişki nedeniyle aynı hız ve ivme değerlerini veren farklı frekans ve genlik değerleri için ölçülen kuvvet değeri ile farklı bir ilişki tespit edilebilir. Bunun anlamı düzlemsel hareket mekanizması ile ölçülen kuvvetlerin özellikle küçük genlikli (yüksek frekanslı) sinüzoidal hareketlerde mekanizmanın çalışma frekansına bağlı olarak değişmesi ve sağlıklı deney sonuçları üretilememesidir (Burcher, 1972). Bu soruna çözüm olarak (Booth, 1973) "salınımlı katsayılar" yaklaşımının önerildiğini ancak bu katsayıların da hafıza etkilerini dikkate almamaları sebebiyle literatürde genel kabul görmediklerini belirtmiştir.



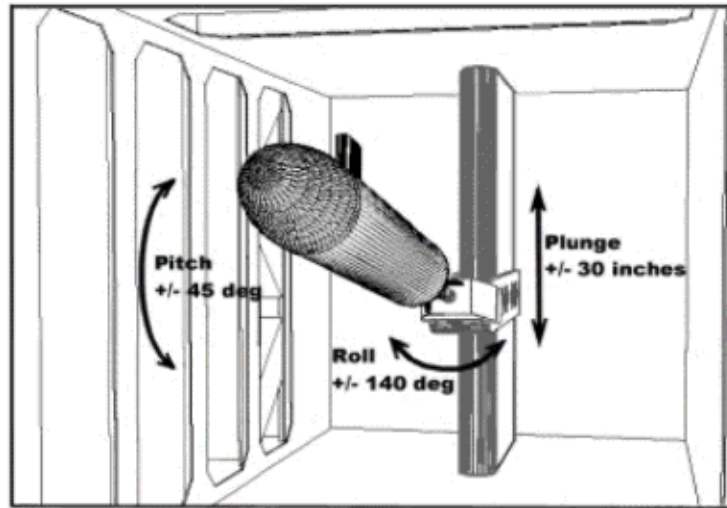
Şekil 17. Denizaltı modelinin düzlemsel hareket mekanizması kullanılarak test edilişi (Renilson, 2018).

Tüm bu etkilerin önüne geçmek için literatürde bu problemi ilk kez fark eden (Leeuwen, 1969) mekanizmanın frekansının mümkün olduğunca küçük, genliğinin ise bu küçük frekans değerinde ölçülebilecek seviyede kuvvet oluşumu için mümkün olduğunca yüksek seçilmesini önermiştir. Ayrıca yüksek genlikli hareket su altı aracının gerçek hareket tepkisini daha doğru simüle edebilir ve doğrusal olmayan etkilerin de deneysel analiz sonuçlarında temsil edilmesini sağlayarak sonuçların doğruluk seviyesini artırabilir. (Grim et al., 1976) böyle bir mekanizmanın varlığının zorlayıcı manevraları da analiz edebilecek daha iyi bir matematik modelin geliştirilebilmesi için bir ön şart olduğunu dile getirmişlerdir. Bir denizaltı modelinin DHM kullanılarak test edildiği Şekil 17'de gösterilmiştir.

5.1.5. DyPPiR mekanizması ile yapılan deneyler

Düzlemsel hareket mekanizması gibi dinamik yöntemler küçük genlikli sinüzoidal model hareketlerini esas aldıklarından aracın mevcut durumundan küçük sapmaları içeren manevraları yüksek doğrulukla temsil etmek için yeterli olsalar da yüksek sapma miktarına sahip manevralar için bu durum sorgulanabilir. Bir su altı aracının sahip olduğu hıza kıyasla oryantasyonunda yapacağı hızlı değişimleri içeren manevralar aynı koşullarda yapacağı yavaş değişimlerden akışkanlar mekaniği disiplininin ilgi alanı açısından tamamen farklı sonuçlara neden olur ve zamana bağlı dinamik akış fenomeninin ortaya çıkması ile sonuçlanır. Hücum açısının hızlı değişimi nedeniyle aerofoillerde görülen dinamik kaldırma kuvveti kaybı (dinamik stall) fenomeni bu duruma örnek teşkil eder (Ahn et al., 1989).

Bu dinamik etkilerin yeterince iyi anlaşılabilmesi için dinamik olarak hareket ettirilebilen modellerle rüzgâr tüneli testlerinin yapılmasına ihtiyaç vardır. Bu ihtiyaç literatürde ilk defa (Galloway & Osborn, 1985) tarafından dile getirilmiş olup, bahse konu işlevi yerine getiren bir mekanizma DyPPiR adıyla (Ahn et al., 1989). Virginia Politeknik Enstitüsünde bulunan rüzgâr tüneline kullanılmak üzere geliştirilmiştir. DyPPiR mekanizması Şekil 18'de şematik olarak gösterilmiştir.



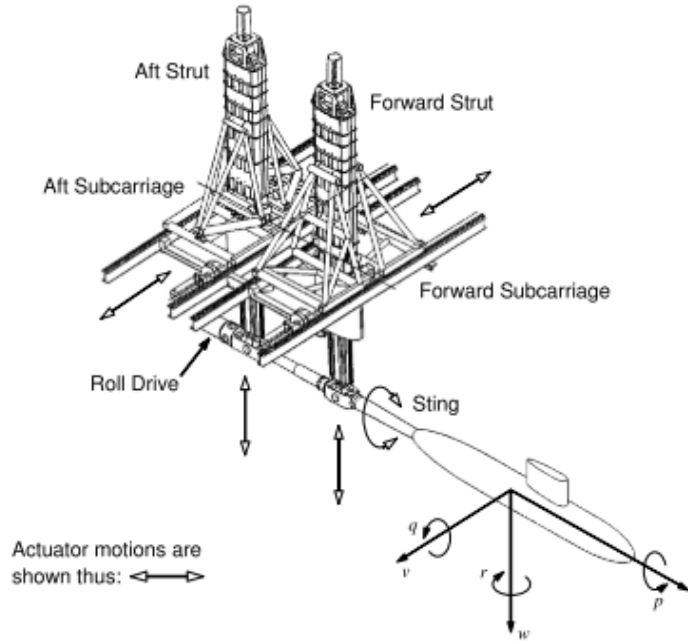
Şekil 18. DyPPiR mekanizmasının şematik gösterimi (Whitfield, 1999).

Mekanizmaya bağlanan modellere dalıp çıkma (1,5 m), yalpa (+-140°) ve yunuslama (+-45°) serbestlik derecelerinde hareketler yaptırmak mümkündür. DyPPiR mekanizması bu serbestlik dereceleri için verilen aralıklarda modele rastgele veya periyodik hareketler yaptırmaya yöntemlerini kullanarak zamana bağlı kuvvet ve moment ölçümü ile daha önce DHM gibi periyodik düzeneklerle çok sık yapılmayan zamana bağlı akışın görselleştirilmesi için kullanılmaktadır. Özellikle zamana bağlı hareket icra eden model yüzeyinde görülen çapraz akış ayrılması olayının doğasının anlaşılması ve zamandan bağımsız

durumdan farklarının ortaya konabilmesi açısından bu mekanizmanın kullanımı önemlidir. (Wetzel & Simpson, 1996) bu mekanizmayı kullanarak literatürde ilk defa kuvvet ve momentlerin büyüklükleri ile çapraz akış ayrılmasının zamana bağlı yerini doğru olarak ölçmeyi başarmışlardır.

5.1.6. MDTF mekanizması ile yapılan deneyler

Su altı aracı modellerine KHM ve DyPPiR gibi yalpa serbestlik derecesinde hareket yaptırabilen bir diğer deney düzeneği de MDTF'dir. Bu düzeneğe dalmış veya yarı dalmış bir modele yalın dalıp çıkma, yunuslama, yanal öteleme, savrulma, yalpa ve ilerleme hareketleri ile bu hareketlerin kombinasyonu olan herhangi bir hareketi kontrollü olarak yaptırabilir (Mackay et al., 2007). Düzeneğin büyük ölçekte model kullanımına izin vermesi gerek ölçek etkileri nedeniyle oluşacak hataları azaltırken gerekse de küçük insansız su altı araçlarının doğrudan test edilmesine imkân sağlar. Düzeneğe bağlanan modele yalpa hareketi iğne tipi destekle verilirken, ilerleme hareketi çekme arabası tarafından diğer serbestlik derecelerindeki hareketler ise çubuk tipi destekler tarafından verilir. MDTF mekanizmasının genel görünüşü Şekil 19'da verilmiştir.



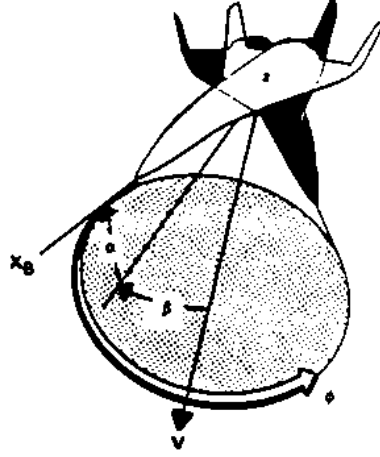
Şekil 19. MDTF mekanizmasının genel görünüşü (Mackay et al., 2007).

5.1.7. Konik hareket mekanizması ile yapılan deneyler

Bir su altı aracının akışkan içerisindeki hareketi altı serbestlik derecesinde de etkileşim halindedir. Döner kol ve düzlemsel hareket mekanizması gibi düzlemsel teknikler temel olarak; aracın manevra karakteristiklerinin yatay ve düşey düzlemler için manevranın doğasına aykırı bir biçimde söz konusu etkileşimleri yok sayarak ayrı ayrı analiz edilmesi yaklaşımına dayanırlar. Hareketin doğasındaki bu eksiklikler düzlemsel olmayan çapraz akış etkileri ve hareketin yalpa yönündeki bileşeni incelendiğinde anlaşılabilir. Su altı araçlarının gerçek operasyon şartlarındaki genel hareketinin düzlemsel olmayan doğasını analiz etmek için bu tekniklerin dışında tekniklere ihtiyaç vardır.

Konik hareketin (aracın ana ekseninin araca gelen akışın yön vektörüne göre daimi yalpa hareketi yapması durumu) su altı araçları gibi altı serbestlik derecesinin tümünde hareket edebilen araçların manevrasının düzlemsel olmayan doğasını temsil etmedeki üstünlüğünü dikkate alan (Johnson, 1989)

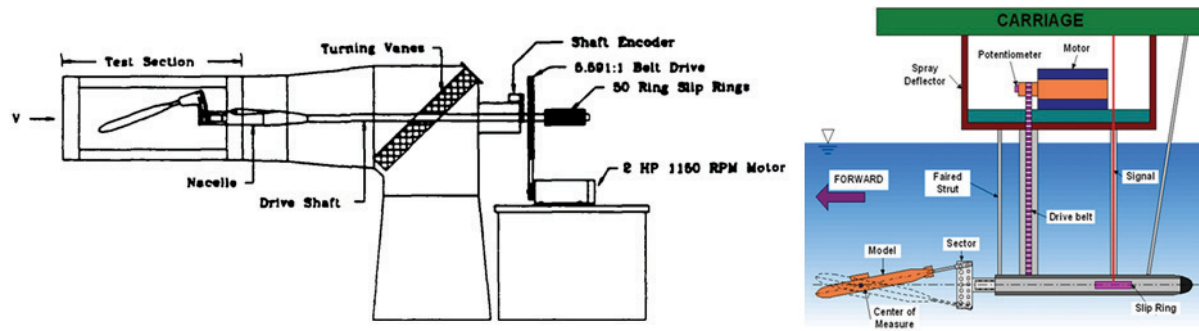
havacılık alanında uzun bir süredir kullanılmakta olan konik hareket mekanizmasını su altı araçlarının manevra karakteristiklerinin belirlenmesi için literatürde ilk defa kullanmıştır. Konik hareket Şekil 20’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 20. Konik Hareket (Johnson, 1989).

Su altı aracına manevrası sırasında etkiyen hidrodinamik kuvvetlerin katsayı tabanlı yöntemde analizi; manevra modelleri bölümünde anlatıldığı gibi bu kuvvetlerin aracın durum değişkenlerinin bir fonksiyonu olduğu varsayımına dayanmakta ve hareket denklemlerinin aracın bir denge durumu (sabit süratte ilerleme) etrafında Taylor serisine açılması işlemine dayanmaktadır. Bu seriye açma işlemi yalpa hareketine bağlı birçok hidrodinamik katsayı üretir. Düzlemsel harekete dayalı deneysel yöntemler ile tespiti olanak dışı olan bu katsayılar geçmişte genellikle ihmal edilmişlerdir.

Bu mekanizma kullanılarak su altı aracı modellerinin yalın yalpa ve eş zamanlı olarak yalpa-savrulma veya yalpa-yunuslama hareketlerini yapması sağlanarak manevra denklemlerinde yer alan yukarıdaki serbestlik derecesi çiftleri arasındaki etkileşime dayanan -ve daha önce ihmal edilen- terimlerin belirlenebilmesi için gerekli olan düzlemsel olmayan çapraz akış koşullarının yaratılması hedeflenmektedir. Bahse konu çapraz etkileşimli terimlerin varlığı ise altı serbestlik derecesine sahip genel hareketi tanımlamak için bir ön şarttır. Mekanizmanın kavitasyon tüneli ve çekme tankında kullanılan versiyonları Şekil 21’de gösterilmiştir.



Şekil 21. Konik hareket mekanizmasının çeşitli versiyonları (Johnson, 1989; Park et al., 2015).

Özellikle yelken gibi yatay düzlemde simetriyi bozan takıntıların varlığı nedeniyle yalpa hareketinin genliğinin bazı manevralar için çok yüksek mertebelere ulaşması ve su altı araçlarının düşük BG mesafesi nedeniyle küçük doğrultma momentlerine sahip olmaları (Park et al., 2015) bu manevralar

için yalpa serbestlik derecesinin de yan öteleme ve savrulma hareketleri ile birlikte analiz edilmesini zorunlu kılar. (Rhee et al., 2000) yelken yüksekliği için bir kriter belirlemeyi hedeflediği çalışmada bu yüksekliğin su altı aracının yatay düzlem asimetrisine kumanda etmesi sebebiyle aracın manevra karakteristikleri de dikkate alınarak belirlenmesi gerektiğini savunmuş ve bu işlemin ön şartı olan yalpa hareketinin deneysel analizini konik hareket mekanizması kullanarak yapmıştır.

5.2. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri

Manevra problemine matematiksel yaklaşım kapsamında kullanılan yöntemlerden bir diğeri de analizler için hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemlerini kullanmaktır. Hidrodinamik katsayıların HAD yöntemleri kullanılarak belirlenmesi işlemi temelde hareketi kısıtlanmış model deney mekanizmalarının su altı aracı modeline yaptırdıkları hareketin bilgisayar ortamında simüle edilmesi işleminden ibarettir. Bu işlemin herhangi bir ölçeklendirmeye ihtiyaç duymaksızın su altı aracının gerçek boyutta analiz edilmesine imkân tanınması ve deney mekanizmalarının girişim etkisi (destek çubuklarının etkisi vb.) gibi sınırlandırmaları ortadan kaldırması sebebi ile HAD yöntemleri giderek artan oranda model deneyleri yerine kullanılmaktadır. Ayrıca hesaplamalı analizlerde kullanılan türbülans modeli ve algoritmaların gelişimi ile hesaplama kapasitesindeki artışların son yıllarda bu analizlerin hata seviyelerini deneysel yöntemlerin belirsizlik seviyeleri mertebesine indirmesi de hesaplamalı analizlerin giderek artan oranda kullanılmasının bir diğer nedenidir.

Şekil 22’de dairesel dönüş manevrası için bir örneği gösterilen yöntemin esasını her ne kadar deneysel analizlerin taklit edilmesi oluştursa da hesaplamalı analizler kullanılan hesaplama algoritmaları, türbülans modelleri, sınır koşulları, ağ örgüsünün yapısı gibi birçok detay ve dolayısı ile farklı inceleme konuları içerirler. HAD yöntemlerinin su altı araçlarının manevra probleminde kullanılmaya başlandığı tarihten itibaren bu alanda oluşan geniş çaplı literatür bu çalışmanın genel akışını bozmamak ve hacmini makul bir seviyede tutmak açısından çalışmanın devamı niteliğinde olan ayrı bir bölüm kapsamında incelenecektir.

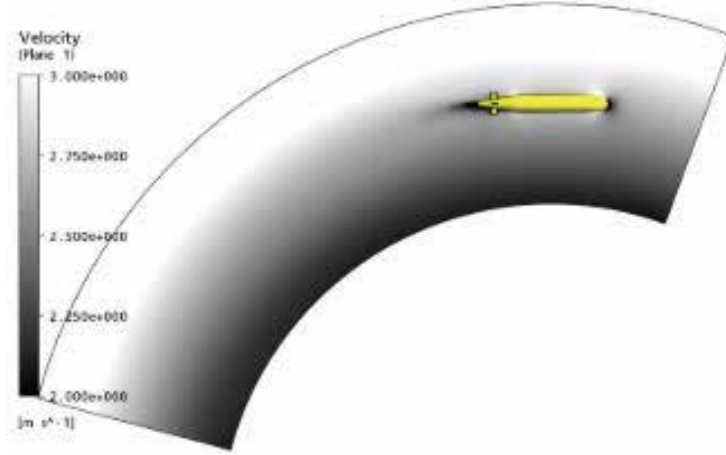
5.3. Ampirik yöntemler

Su altı araçlarının hidrodinamik katsayılarını belirlemek için kullanılan yöntemlerden biri de analitik-yarı ampirik (AYA) yöntemlerdir. Bu yöntemler tahmin tabanlı yöntemler olup; tasarımın erken aşamalarında aracın hidrodinamik özelliklerini tespit edebilmek (Jiang et al., 2013), kontrol yüzeylerinin geometrik özelliklerini ve konumlarını belirleyebilmek, kontrol stratejileri hakkında tasarımcıya fikir verebilmek (de Barros et al., 2008) ve bu tasarım aşamalarında sıklıkla yapılan hidrodinamik form değişikliklerinin etkilerini hızlı ve düşük maliyetle analiz edebilmek için kullanılmaları gereklidir.

Özellikle orta ve büyük ölçekli su altı araçları için bu yöntemlerin kullanımı genel kabul görmüş bir tasarım pratiğidir. AUV’ler gibi daha küçük ölçekli su altı araçlarının manevra analizleri daha çok prototipler ile yapılan deniz tecrübelerine dayansa da (Cardenas & de Barros, 2020) AYA yöntemlerinin bu araçların prototip geliştirme aşamalarında kullanımı gerek icra edecekleri farklı görevlere göre konfigürasyonları değiştirilebilen modern AUV’lerin her bir konfigürasyonu için deniz tecrübesi maliyetlerinin önüne geçmek, gerekse de öngörülemeyen etkenler nedeniyle prototipin deniz tecrübeleri esnasında kaybedilmesini engellemek için gereklidir (Nahon, 1996). Ayrıca bu yöntemlerin küçük su altı araçları gibi genellikle hidrodinamik açıdan formu optimize edilmiş geometriler için yüksek doğruluk derecesine sahip sonuçlar verdiği literatürde iyi bilinen bir konudur (Nahon, 1993, 1996).

Su altı araçlarının manevra analizlerinde yaygın olarak kullanılan AYA yöntemlerinin birçoğu havacılık disiplininden adapte edilmişlerdir (Jones et al., 2002). Başlangıçta hava gemileri ve uçak gövdeleri için

geliştirilen bu yöntemler daha sonra su altı araçlarına uygulanmışlardır. Hava ve su altı araçlarının içinde manevra yaptıkları akışkanın özellikleri ve bu araçların karakteristik hızlarındaki farklılıklar (yoğunluk, kinematik viskozite) her iki grup aracın Reynolds sayısının aynı mertebede olması sonucunu doğurmaktadır. Bu durum araç gruplarından birisi için geliştirilen yöntemlerin diğer gruptaki araçların manevra analizleri için kullanımına imkan sağlar (Nahon, 1993).



Şekil 22. Dairesel dönüş manevrasının HAD yöntemi ile sayısal benzetiminin yapılması (Phillips et al., 2016).

Ancak her iki grup araç arasındaki geometrik farklılıklar yöntemlerin su altı araçlarına uygulanmasını rutin ve basit bir işlem olmaktan çıkarmaktadır. (De Barros et al., 2006, 2008) AYA yöntemlerinin farklı geometrilere uygulanması için bir mühendislik öngörüsünün şart olduğunu savunmuşlardır.

Hava araçlarının su altı araçlarından farklı olarak silindirik formda bir gövdeye sahip olması ve su altı araçlarının küçük kontrol yüzeylerinin aksine bu silindirik gövde ile aynı mertebede boyutları olan kanat/kontrol yüzeylerine sahip olmaları kaldırma kuvvetinin asıl kaynağı olan geometri bileşeninin hava araçlarında kanatlar/kontrol yüzeyleri, su altı araçlarında ise araç gövdesi olması sonucunu doğurmaktadır. Ayrıca su altı araçlarında kontrol yüzeylerinin hava araçlarının aksine aracın boy doğrultusunda yayılmış olması da AYA yöntemlerinin uyarlanması konusunda problemlere neden olabilmektedir (Jones et al., 2002).

Su altı araçlarının karmaşık geometrisi ve her bir hidrodinamik katsayı grubunun (ek su kütlesi, statik vb. katsayılar) belirlenmesinde akışın farklı dinamiklerinin söz sahibi olması; literatürde bu problemlere yaklaşım yönteminin her bir geometri bileşeninin incelenen katsayı grubuna etkisinin o katsayı grubu için belirlenen yöntem ile hesaplanması ve sonuçların süperpozisyonuna dayanması sonucunu doğurmuştur. Bu yöntem literatürde bileşen inşa yöntemi (component build-up) olarak adlandırılmakta olup, bu alanın öncüsü Lamb'dır (Severholt, 2017). Lamb'ın elipsoitler için geliştirdiği ek su kütlesi hesaplama yöntemi geometriyi oluşturan bileşenlerin eşdeğer elipsoitlerinin hesaplanması yolu ile karmaşık geometrilere sahip su altı araçları için de kullanılabilir.

Bu yöntemin avantajı her bir geometri bileşeninin kendi iç simetrisinden faydalanarak hesaplama kaynaklarından tasarruf edilmesini sağlamak ve hesaplamaların yalnızca cismin referans durumu ve bu durumdan küçük sapmalar için geçerli olması problemini ortadan kaldırmasıdır (Severholt, 2017).

Su altı araçlarının kaldırma kuvveti yaratan yüzeylerinin gövdelerine göre oldukça küçük olması kaldırma yüzeyi ile gövde arasındaki etkileşimin baskın hale gelmesine yol açmaktadır (Nahon, 1993). Ayrıca büyük boyutlu takıntıların (yelken vb.) sebep olduğu viskoz etkileşimler su altı araçlarının

manevraları esnasında düzlem dışı kuvvetlere maruz kalmasına neden olmaktadır. Getirdiği hesaplama kolaylığının yanında bileşen inşa yöntemi, söz konusu etkileşimleri de analizlere yansıtacak ve ilave hesaplama yükü getirecek hesaplama rutinlerine ve/veya düzeltmelere sahip olmak zorundadır.

Ek su kütlesi terimlerini hesaplama konusunda yukarıda bahsedilen bileşen inşasına alternatif bir yöntem ise narin cisim sınıfına giren su altı araçları için dilim (strip) teorisini kullanmaktır. Bu yöntemde incelenen geometrinin birim uzunluğu başına düşen ek su kütlesi iki boyutlu geometriler için kullanılan yöntemlerle belirlenmekte ve daha sonra bu lokal büyüklükler cisim boyunca integre edilerek toplam ek su kütlesi hesaplanmaktadır. Her ne kadar görünüşte bu yöntemi kullanarak geometrik asimetrileri hesaplamalara dahil etmek mümkünmüş gibi gözükse de hesaplama sonuçlarının güvenilirliği narin cisim varsayımının geçerliliği ile sınırlı kalmaktadır.

(Watt, 1988) çalışmasında yukarıda açıklanan iki yaklaşımı kombine ederek ve geliştirdiği takıntı-gövde etkileşim modelini kullanarak ideal akış alanı içerisindeki bir su altı aracına ait ek su kütlesi terimlerini hesaplamıştır.

(Nahon, 1993) asıl olarak uçakların stabilite türevlerini elde etmek için (Finck & Hoak, 1978) tarafından geliştirilen USAF DATCOM yöntemini sıkıştırılamaz akışın özelliklerine göre basitleştirerek bir su altı aracının (ARCS AUV) stabilite türevlerini elde etmek için kullanmıştır. DATCOM yöntemi doğruluk analizleri rüzgâr tüneli test sonuçları ile karşılaştırmalı olarak yapılmış analitik ve ampirik yöntemlerin toplamı niteliğindedir. Bu yöntem yoğunluk, viskozite ve sıkıştırılabilirlik etkileri arasında bir ayrıma dayanmakta olup, bu etkilerin yöntem içerisinde ayrı ayrı değerlendirilmesi yöntemin gerek hava gerekse de su altı araçları için kullanılabilmesine imkân tanımaktadır.

Su altı araçlarının manevra karakteristiklerinin belirlenebilmesi için havacılık disiplininin devşirilen bir diğer yöntem ise "Roskam" yöntemidir. Bu yöntem uçaklar için stabilite türevlerini detaylı bir şekilde hesaplayabilmesi ile bilinmektedir. (Brayshaw, 1999) bu yöntemin detaylı bir analizini ve örneklerini göstermiştir (Jones et al., 2002).

Bileşen inşasına dayalı bir diğer yöntem olan UCL yöntemi ise diğer yöntemlerden farklı olarak doğrudan su altı araçları (tek pervaneli) için geliştirilmiştir. Her ne kadar bu yöntemin verdiği sonuçların güvenilirliği sorgulanabilir olsa da hidrodinamik form değişikliklerinin karşılaştırmalı analizi için kullanışlı bir yöntem olduğu kabul edilmektedir (Jones et al., 2002).

Ana akım yöntemler arasında sayılabilecek en son yöntem ise DSSP yöntemidir. Bu yöntem (Mackay, 2003) tarafından geliştirilmiş olup temelleri Allen ve Perkins ve Hooft'un çalışmalarına dayanmaktadır. Bu yöntemin 20°-30°'ye kadar hücum açılarında tatmin edici sonuçlar verdiği yazar tarafından raporlanmıştır. Ancak bu yöntemin de kendinden önce sayılanlarla birlikte en büyük eksikliği hidrodinamik katsayılardaki fiziksel kısıtları dikkate almamasıdır. Örneğin takıntılar için hücum açısının kritik değerinden sonra kaldırma kuvvetinin kaybı (stall) modelde dikkate alınmamıştır (Severholt, 2017).

Literatürde genel kabul görmüş yukarıdaki yöntemlerin haricinde torpidolara ait deney verilerine eğri uyurma yöntemi ile geliştirilmiş birçok AYA yöntemi mevcuttur. Yukarıda sayılan ana akım yöntemlerle birlikte tüm bu yöntemlerin ortak özelliği yalnızca belirli türde ve genelde konvansiyonel geometrilerde doğru sonuç vermeleridir. Oysaki bu yöntemlerden beklenen hesaplama prosedürlerinin rastgele geometrilerde uygulanabilir olmasıdır (Severholt, 2017).

Modern su altı araçlarının manevra özelliklerinin tespitinde güncel literatür yukarıda sayılan yöntemlerin ve yaklaşımların kombine edilerek kullanılması yöntemini benimsemektedir. (De Barros et al. 2006, 2008) MAYA AUV geometrisini analiz ettiği çalışmalarında eş değer elipsoit (ek su kütlesi katsayıları için) ve DATCOM (statik stabilite ve hıza bağlı katsayılar için) yaklaşımını birlikte kullanmıştır.

Analizler sonucunda hesaplanan dönüş dairesi çapı deniz tecrübeleri ve HAD sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Hesaplama maliyetleri ve doğruluk sevipleri arasındaki denge AYA yöntemlerinin kullanımını erken tasarım aşamaları için verimli kılsa da bu yöntemlerin neredeyse tamamı erken tasarım aşamalarında var olmayan su altı aracının geometrik detaylarını girdi olarak kullanmaktadır. Bu durum başlangıç geometrisinin seçilmesinde mühendislik öngörüsüne olan ihtiyacı artırmaktadır. (Brinati et al., 2013) geliştirdiği yöntemde model parametreleri; ve tekne ve takıntılarının ana boyutlarının, form katsayılarının (narinlik oranı, prizmatik katsayı, LCB vb.) bir fonksiyonu olarak ifade edilmişler ve böylece üç boyutlu bir geometri olmaksızın modelin tasarımın ilk aşamalarından itibaren kullanımına imkan sağlamışlardır. Benzer bir yaklaşım (Severholt, 2017) tarafından geliştirilmekte olan bir AUV geometrisinin ek su kütlesi terimlerini hesaplamak için geliştirilmiştir.

Hesaplama prosedürleri temel olarak ideal akış varsayımına dayanan AYA yöntemleri manevra esnasında oluşan ve ideal akış kabulü ile irdelenemeyecek olan etkileri (genelde viskozitesin sebep olduğu) bir seri düzeltme prosedürü (deneye dayalı) ile hesaplamalarına yansıtırlar. Bu düzeltmelerin sayısındaki artış her ne kadar modelin yetkinliği ve doğruluğunu artırsa da hesaplama prosedürünü karmaşıklaştırması ve geliştirme aşamasında deneysel veriye gereksinim duyması literatürde çoğu zaman ihmal edilmeleri sonucunu doğurmuştur. Örneğin DSSP yönteminin; hesaplamaların karmaşıklaşması pahasına, dönüş manevrası esnasında yelkenin yarattığı sirkülasyonun rüzgaraltı tarafta çapraz akış ile etkileşime girmesi (Magnus etkisi) nedeniyle su altı aracının maruz kaldığı düzlem dışı kuvvet ve momentleri bünyesinde bulunan sirkülasyon modeli ile etkin bir şekilde tahmin edebildiği (Mackay, 2004) tarafından gösterilmiştir.

AYA yöntemleri kullanarak su altı araçlarının hidrodinamik katsayılarının tahmine örnek olarak (Renilson, 2018)'un çalışması verilebilir. Bu çalışmada bileşen inşa yöntemi ve DARPA Suboff jenerik denizaltı geometrisinin değişik konfigürasyonları için hidrodinamik katsayılar Tablo 6'da gösterildiği gibi tahmin edilmiştir.

Tablo 6. DARPA Suboff jenerik denizaltısına ait hidrodinamik katsayılar.

Katsayılar [x 10 ⁻³]	Eksenel Simetrik Tekne	Takıntılar	Tekne		Tekne + Yelken		Tekne + Kontrol Y.	
			Tahmin	Deney	Tahmin	Deney	Tahmin	Deney
Y'_v	Z'_w	$S_a(C_{L\alpha} + C_D)/L^2$	-6.71	-5.95	-22.11	-23.01	-9.82	-10.49
N'_v	$-M'_w$	$l_{app}Y'_{v_{app}}/L$	-11.42	-12.8	-17.79	-15.53	-10.3	-11.25
Y'_r	0	$l_{app}Y'_{v_{app}}/L$	0	1.81	-6.37	-0.02	1.39	6.32
N'_r	0	$l_{app}^2Y'_{v_{app}}/L^2$	0	-1.60	-1.53	-2.38	-0.62	-3.06
$Y'_\dot{v}$	$-k_y m'$	$-m_{22}/0.5\rho L^3$	-17.20	-13.3	-17.54	-15.04	-17.32	-14.71
$N'_\dot{v}$	0	$l_{app}Y'_{\dot{v}}/L$	0	0.20	-0.08	0.01	0.05	0.42
Y'_r	0	$l_{app}Y'_{\dot{v}}/L$	0	0.06	-0.08	-0.20	0.05	0.47
N'_r	$-k_z I'_{zz}$	$l_{app}^2Y'_{\dot{v}}/L^2$	-3.49	-0.68	-3.51	-0.71	-3.51	-0.74
Z'_w	$[0.5(L/D) - 11] \times 10^{-3}$	$S_a(C_{L\alpha} + C_D)/L^2$	-6.71	-5.95	---	---	-9.82	-10.49
M'_w	$[-(L/D) + 20] \times 10^{-3}$	$-l_{app}Z'_{w_{app}}/L$	11.42	12.8	---	---	10.3	11.25
Z'_q	0	$l_{app}^2Z'_{w_{app}}/L^2$	0	1.81	---	---	1.39	6.32
M'_q	0	$l_{app}Z'_{w_{app}}/L$	0	-1.60	---	---	-0.62	-3.06
$Z'_\dot{w}$	$-k_z m'$	$-m_{33}/0.5\rho L^3$	-17.20	-13.3	---	---	-17.32	-14.71
$M'_\dot{w}$	0	$l_{app}Z'_{\dot{w}}/L$	0	-0.20	---	---	-0.05	0.42
Z'_q	0	$l_{app}Z'_{\dot{w}}/L$	0	0.06	---	---	0.05	0.47
M'_q	$-k_y I'_{yy}$	$l_{app}^2Z'_{\dot{w}}/L^2$	-3.49	-0.68	---	---	-3.51	-0.74

Eksenel simetrik tekne formu için k_x , k_y ve k_z sırasıyla x, y ve z eksenini yönündeki ek su kütlesi katsayıları olup tekne formunun eş değer elipsoidinin bulunması yöntemi hesaplanmıştır. I'_{yy} ve I'_{zz} ise y ve z eksenini yönündeki boyutsuz kütle atalet momenti katsayılarıdır ve yine eş değer elipsoide ait değerler hesaplamalarda kullanılmıştır. Eksenel simetri nedeniyle tekne için $k_y = k_z$ ve $I'_{yy} = I'_{zz}$ dir.

Tekne için Z'_w ve M'_w katsayılarını veren ifadeler (Praveen and Krishnankutty, 2013) ait deneysel veriye eğri uydurma yöntemi ile (Renilson, 2018) tarafından belirlenmiştir.

Takıntılar için ise $C_{L\alpha}$ ve C_D sırasıyla boyutsuz kaldırma kuvveti ve direnç katsayılarını, S_a takıntının kaldırma kuvveti oluşturduğu düzlemdeki kesit alanı, l_{app} ise takıntı ek su kütlesi merkezinin yatay konumunu ve L ise karakteristik boyu ifade etmektedir. Tablo 6'da takıntıların hidrodinamik katsayı ifadelerinde geçen ek su kütlesi terimleri (Dong, 1978) tarafından önerilen yöntem kullanılarak belirlenmiştir. Hesaplamalarda ayrıca tekne-takını etkileşimleri de yine yarı-ampirik formüller kullanılarak dikkate alınmıştır.

5.4. Sistem/parametre tanımlama yöntemleri

Karmaşık dinamik sistemlerin dışarıdan gelen etkilere karşı sergileyecekleri davranışı belirlemede etkin olarak kullanılmaları, son yıllarda sistem/parametre tanımlama tekniklerinin su altı araçlarının manevra probleminin analiz edilmesinde diğer yöntemlere alternatif bir araç haline gelmelerini sağlamıştır. Sistem parametre tanımlama teknikleri başlığı altında toplanan bu çok çeşitli yöntemlerin ortak noktası; bilinen girdilere mevcut sistemin verdiği tepkilerin ölçülmesi ve bu bilginin ikisi arasındaki matematiksel ilişkinin tanımlanması için kullanılmasıdır (Tinker, 1982).

Bu tekniklerin en temel varsayımı yukarıda bahsedildiği gibi girdi ile dinamik sistemin tepkisi arasında belirli yapıya sahip bir matematiksel ilişkinin (modelin) varlığıdır (Ibrahim, 2000). Sistem dinamiklerini doğru ve tam olarak tanımlayan bir model biliniyorsa bu modelin bilinmeyen katsayıları sistemin bilinen girdilerle uyarılması ve oluşan tepkinin ölçülmesi yöntemi ile bulunabilir (Coxon, 1989).

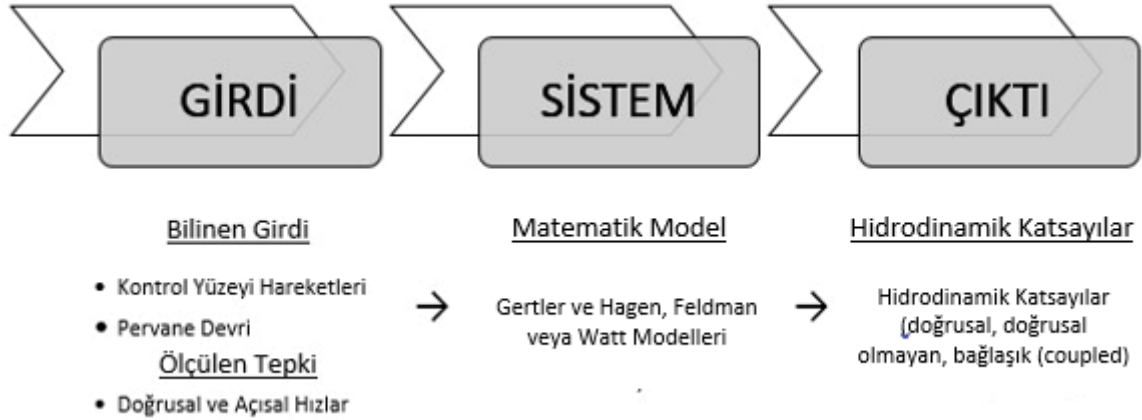
Su altı araçları özelinde bu girdiler kontrol yüzeyi hareketleri ve pervane devriyken; ölçülmesi gereken sistem tepkileri ise doğrusal ve açısız hızlardır (Tinker, 1982). Bu büyüklükler arasındaki ilişki ise matematiksel olarak (Gertler & Hagen, 1967), (Feldman, 1979) ve (Watt, 2007) tarafından geliştirilmiş olan manevra modelleridir.

Dinamik bir sistemde matematiksel araçlar ve fizik yasaları genelde bir matematik modelin bilinmeyen katsayılarını belirlemek için yeterli olsalar da su altı araçlarının manevrasını kontrol eden ve yukarıda örnekleri verilen karmaşık matematik modeller için birçok parametrenin/katsayının hidrodinamik teori ile hesaplanması mümkün değildir. Bu durum parametre tahmin yöntemlerini ile kullanılmak üzere deneysel çalışmaların yapılmasını (serbest hareketli model deneyleri) bir zorunluluk haline getirir. Sistem tanımlama tekniklerinin su altı araçları özelinde işleyişi Şekil 23'te gösterilmiştir.

Sistem tanımlama (ST) teknikleri çevrimiçi ve çevrimdışı yöntemler olarak iki ana kategoriye ayrılırlar. Çevrimdışı yöntemler tekrarlı yöntemler olup veri toplama ve değerlendirme fazı birbirinden bağımsızdır. Performansları genelde toplanan verinin çeşitlilik ve miktarına bağlıdır. Çevrimiçi yöntemlerde ise veri erişilebilir olduğu anda analiz edilir (Sabet et al., 2014). Literatürde su altı araçlarının manevra probleminin çözümünde kullanılan yöntemler genellikle birinci gruba ait yöntemlerdir (Sandman & Kelly, 1974).

Hem model hem de gemi ölçeğinde kullanılabilmelerinin yanında bu yöntemin başlıca avantajı birçok parametrenin aynı anda birkaç serbest hareketli model deney verisinin ve/veya deniz tecrübesi sonuçlarının analiz edilmesi ile elde edilebilmesi ve böylece diğer yöntemlere nazaran deneyler için

ayrılması gereken kaynakların önemli ölçüde azaltılabilmesidir (Tiano et al., 2007). ST tekniklerinin avantajları arasında sayılabilecek diğer hususlar şu şekildedir (Tinker, 1982);



Şekil 23. Sistem tanımlama tekniklerinin işleyişi.

- Model destek mekanizmasının girişim etkisinin ortadan kaldırılması (deneyler serbest hareketli model kullanılarak yapıldığından),
- PMM vb. periyodik hareket yapan deney düzeneklerinin izin verdiği daha yüksek frekanslardaki hareketin analizine imkân sağlaması (yüksek frekansta PMM sonuçlarının frekansa daha bağlı hale geldiği bilinmektedir.),
- ST tekniklerinin serbest hareketli model deneylerine dayanması, katsayıların gruplar halinde ölçümünü gerektiren ve dolayısı ile hata birikmesine açık kısıtlanmış model deneylerinin aksine icra edilen manevraların ve elde edilen sonuçların daha gerçekçi olması,
- Geometri değişikliği nedeniyle oluşan matematiksel model değişikliği ihtiyaçlarına HAD ve kısıtlanmış model deneylerinin aksine kolayca uyum sağlaması,
- Analitik yöntemler ile oldukça zor olan ve HAD analizleri ile yapılması durumunda hesaplama kaynaklarının aşırı kullanımını gerektirecek olan geometrik kusurlarda dahil olmak üzere çok farklı takıntı geometrilerinin ve bu geometrilerdeki değişikliklerin analizlerde dikkate alınabilmesi (Cardenas & de Barros, 2020),

Tekniğin dezavantajları ise şu şekilde sıralanabilir;

- Hesaplanan katsayıların fiziksel olarak doğruluğunun garanti edilememesi,
- Analiz edilen deney verisi aralığının dışında sonuç vermemesi,
- Sistemin/Hareketli Modelin/Prototipin inşa edilmiş olması zorunluluğu,
- Kullanılan deneysel verinin yeterince zengin ve temiz (GPS atlamaları vb. olmaması) olması zorunluluğu (Kim et al., 2008),
- Matematiksel model denklemlerindeki bilinmeyen sayısının ölçülebilen sistem tepkilerinin sayısından çok fazla (overparameterisation) olması neticesinde sonucun tekilliğinin sorgulanabilir duruma gelmesi (Coxon, 1989). (Matematik modele ait katsayıların üç ayrı durumu için (tamamen bilinmediği, kısmen bilindiği ve belirli bir hata miktarı ile tamamen bilindiği) yaptığı analizler sonucunda (Furlong et al., 2003) aynı yörüngeyi tahmin edebilen değişik katsayı setlerinin varlığını göstererek bu problemin varlığını ortaya koymuştur.)
- Sonucun tekilliği probleminin paralelinde iki katsayının ıraksaması durumunda bile bileşik etkilerin birbirini sönmemesi gibi problemlerin hatalara neden olması,

- Su altı aracının manevrası esnasında maruz kaldığı hidrodinamik kuvvet ve momentler büyük oranda aracın hızına bağlı olduklarından ST tekniklerinin matematik modelin katsayılarını ve dolayısı ile aracın yörüngesini doğru tahmin edebilmesi serbest hareketli model üzerinden yapılan hız ölçümlerinin hassasiyetine bağlı olması, başka bir deyişle güvenilir hız ölçümlerine model tanımlama aşamasından önce sahip olunması zorunluluğu (Hegrenæs et al., 2007), (Bu durumu destekleyen sonuçlara (Coxon, 1989) tarafından da ulaşılmıştır. Yazar ESSO OSAKA ve EXXON gemilerine ait gemi ölçeğindeki hız datasının, doğruluğu diğer yöntemlere göre nispeten yüksek olan doppler velocity log ile ölçülmesinin önem arz ettiğini savunmuştur.)

Tekniğin yukarıda sıralanan zayıf noktaları dikkate alındığında sonuçların validasyonu için ST teknikleri kullanılarak belirlenen katsayı setinin literatürde genel kabul gören aşağıdaki kriterleri sağlanması gereklidir.

- Katsayıların tamamının yaklaşık aynı zaman aralığında sabit bir değere yakınsaması,
- Belirgin katsayıların hidrodinamik açıdan tutarlı olması
- Bu katsayılar kullanılarak yapılan simülasyon sonuçlarının (yörünge) deniz tecrübelerinden elde edilen veri ile uyumluluğu,

Sistem tanımlama teknikleri ile bir su altı aracının manevra karakteristiklerinin belirlenmesine yönelik literatürde bilinen ilk çalışma (Tinker et al., 1979) tarafından yapılmıştır. Daha sonraki bir çalışmada (Tinker, 1982) ise yazar keskin manevraların bu teknikler kullanılarak analiz edilmesi için daha fazla sayıda ve çeşitte serbest hareketli model deney senaryosu ve deney verisine ihtiyaç duyulacağı sonucuna varmıştır. Bu sonuçlara paralel olarak (Coxon, 1989) ST teknikleri ile elde edilen katsayı setinin doğruluğunun bu katsayı setinin belirlenmesinde kullanılan deneysel verinin türüne bağlı olduğunu, bu verinin toplanması için icra edilen manevranın cinsinin sonuçların kalitesini doğrudan etkilediğini iddia etmiştir. Buna göre yazar zig-zag manevralarının doğası gereği sabit olmayan durum değişkenleri ve sıfırdan farklı durum ivmelerini sağlaması ST teknikleri açısından bu manevra icra edilirken toplanan verinin diğer manevralara kıyasla daha üstün olması sonucunu doğurduğunu savunmuştur. Bu çalışmanın literatür açısından bir diğer önemi daha ise daha sonraki çalışmalarda (Seong et al., 2002; Hegrenæs et al., 2007; Luque et al., 2009 ve Belanger, 2019) ağırlıklı olarak kullanılacak olan EKF'nin gemi ölçeğinde kullanıldığı ilk çalışma olmasıdır.

STT analizlerinin doğruluk derecesine artırılması için bir başka gayret de (Dantas et al., 2013) tarafından gösterilmiştir. Bir AUV'nin devamlı dönüş ve zig-zag manevralarına ait deney verisini kullandığı çalışmada araştırmacılar doğrusal olmayan etkileri de analiz edebilmek üzere, tüm manevralar için dümen açısı aralığını dümenin kaldırma kuvvetinin kaybedildiği kritik açığı (stall açısı) da kapsayacak şekilde seçmişlerdir. (Sabet et al., 2014) ise benzer bir amaca dayandırdığı çalışmada EKF gibi lineer filtrelerin hareket denklemleri yüksek oranda doğrusal olmayan etkiler içeren su altı aracının manevra problemini çözmekte yetersiz kalacağını iddia etmiş EKF ve UKF'nin performans karşılaştırmasını yaparak doğrusal olmayan tekniklerin daha başarılı olduğu sonucuna varmıştır. Daha sonraki bir çalışmada (Sabet et al., 2018) yazarlar özellikle modelleme hatalarının kaynağı olarak gördükleri viskoz sönümlenme, kaldırma kuvveti gibi katsayıları da içerecek şekilde bir AUV için altı serbestlik dereceli bir dinamik model oluşturmuşlardır. Araştırmacılar bu modele ait katsayıları belirlemek için çeşitli filtreler (EKF, CKF ve TUKF) kullanarak daha önce doğrusal olmayan filtrelere ilişkin elde ettikleri sonuçları doğrulamışlardır.

Sistem parametrelerini daha yüksek doğrulukla tanımlamak için yapay sinir ağları (ANN)'nden faydalandığı çalışmada (İbrahim, 2000) sinir ağlarını eğitmek için MDTF'de icra edilen model deney

sonuçlarını kullanmıştır. Yazar çalışmasında modelin ivmelenme senaryolarını da içeren konvansiyonel olmayan manevraları da analiz etmiştir.

(Cardenas & de Barros, 2020) ise çalışmalarında STT ile elde edilen sonuçların başlangıç koşuluna bağlılığını analiz etmeyi amaçlamışlardır. Yazarlar başlangıç koşulu olarak Pirajuba AUV geometrisinin AYA yöntemlerle elde edilen katsayılarını kullandıkları çalışmalarında -literatürde daha önce elde edilen sonuçların aksine- EKF'nin yakınsama hızının başlangıç koşullarının bir fonksiyonu olduğu sonucuna varmışlardır.

ST teknikleri aynı zamanda kontrol ve kumanda sistemlerinin tasarımında temel rol oynamaktadır (Tiano et al., 2007). Bu tekniklerle tahmin edilen katsayılar yalnızca matematik modele girdi olarak değil ayrıca su altı aracının otomatik pilotuna kontrolör olarak da kullanılırlar (Seong et al., 2002). Kontrol sisteminin başarısı sistemi tanımlayan matematik modelin katsayılarının doğruluk seviyesi ile yakından ilintili olup (Luque et al., 2009) ST teknikleri ile kontrol problemi arasındaki ilişkinin detayı başka bir çalışmanın konusudur.

6. Manevra Problemine Fiziksel (Doğrudan) Yaklaşımlar

Su altı araçlarının manevra probleminin analizi için geliştirilen yaklaşımlardan ikincisi fiziksel yaklaşımlardır. Fiziksel yaklaşım başlığı altında toplanan;

- Doğrudan simülasyon yöntemleri
- Serbest hareketli model deneyleri

Yöntemlerinin ortak amacı aracın belirli kontrol ve sevk sistemi (dümen/kontrol yüzeyi hareketleri, pervane devrindeki değişiklikler) ve çevresel (akıntı vb.) girdilere verdiği tepkiyi (yörünge) herhangi bir matematiksel ara işlem basamağı kullanmadan doğrudan analiz etmektir. Su altı araçlarının manevra problemine fiziksel yaklaşımı benimseyen çalışmaların sayısı gerek hesaplama altyapısı gerekse de otonom kontrol/kumanda sistemlerindeki gelişmeler nedeniyle son yıllarda artış göstermektedir. Fiziksel yaklaşıma dahil olan her bir yönteme ilişkin detaylı açıklama alt başlıklarda verilmiştir.

6.1. Doğrudan simülasyon yöntemleri

Manevra yapan aracın yörüngesinin hesaplanabilmesi için aracın (rijit cisim) ve akışkanın hareket denklemlerinin (N-S) eş zamanlı olarak çözülmesini gerektiren bu yaklaşım özetle; her bir zaman adımı için akışkanın hareket denklemlerinin çözülmesi ile elde edilen aracın yüzeyindeki viskoz ve basınç gerilmelerinin yüzey boyunca integrasyonu, integrasyon sonucunda elde edilen hidrodinamik kuvvetlerle aracın hareket denklemlerinin çözümü, bu çözümden gelen yer değiştirme bilgisi ile aracın uzaydaki yerinin güncellenmesi ve akışkanın hareket denklemlerinin aracın bu yeni pozisyonunda/oryantasyonunda çözülebilmesi için kontrol hacminin yeniden ayrıklaştırılması adımlarından oluşur.

Son yıllarda otonom su altı araçlarının kullanım konseptinin birçok aracın birlikte ve etkileşimli olarak kullanımına yönelik değişmesi, küçük araçların (AUV) daha büyük su altı araçlarından (denizaltı) atılıp toplanmalarına olan ihtiyaçların ortaya çıkması paralelinde toplama mekanizmasının akış üzerindeki girişim etkilerinin analizlere dahil edilmesi (Hydroid, 2012; Yan & Wu, 2007) ve genel olarak daha keskin manevraların icra edilmesine yönelik ihtiyacın artması bu araçların otopilot algoritmalarını daha

hassas eğitmek üzere manevra analizlerinin doğruluk seviyesinin ve geçerlilik aralıklarının artırılması gerekliliğini doğurmuştur.

Manevra probleminin iki ayağını oluşturan denklem sistemlerinin zaman boyutunda akuple edilmiş olmaları, zamansal ayrıklaştırmada her bir zaman adımı için yapılan çözümün problemin fiziğine uygun ve doğru olması anlamına gelir (Bettle, 2013). Bu durum ise yukarıda ifade edildiği gibi son yıllarda su altı araçlarının kabiliyetleri arasında olması giderek artan oranda istenen zamana bağlı manevraların ve ayrıca yüksek sadakatle modellenmesine ihtiyaç duyulan diğer senaryoların doğru bir şekilde analiz edilebilmesi için gerek şarttır.

Fizik temelli yöntemlerin geliştirilmesinden önce de diğer yaklaşımlar ile analiz edilemeyen zamana bağlı etkilerin dikkate alınabilmesine yönelik gayretler bulunmaktadır. Manevra esnasında tekne ve takıntıların iz bölgesinde ve bu ikisinin birleşim noktalarında oluşan girdapların pozisyonunun ve şiddetinin su altı aracının geçmişteki hareketinin bir fonksiyonu olduğunu (hafıza etkisi) dikkate alan ve herhangi bir anda araca etkileyen kuvvet ve momentleri araç etrafındaki akışın (girdapların) yapısına göre analiz edilebilmesine imkan tanıyan bir yöntem öneren (Lloyd, 1983)'un çalışması buna örnek olarak gösterilebilir. Lloyd'un önerdiği bu yöntemde girdapların nerelerden kaynaklandığının ve bu girdapların şiddetlerinin hareketin bir fonksiyonu olarak bilinmesi gerekir. Bu işlem ise yarı-ampirik ve deneysel yöntemlere dayanmaktadır. Genellikle aksel simetrik tekne ve akışa uyumlandırılmış hatlar ve geçişleri olan takıntılara sahip su altı araçlarının sınır tabaka ayrılmasını tetikleyecek keskin hatlara sahip olmamaları, sınır tabaka ayrılması ve girdap başlangıç noktalarının bahse konu yöntemler ile tahminini (Bettle, 2013) ve dolayısı ile yöntemin kullanımını zorlaştırmaktadır.

Hesaplama altyapısının kapasitesindeki gelişmeler ile yakın zamanda mümkün hale gelen rotasyonel bir pervane ve hareketli kontrol yüzeylerine (ve kontrol yüzeyi boşluklarına) sahip bir model konfigürasyonu ile altı serbestlik dereceli analizler literatürde ilk defa (Zierke et al., 1997) tarafından yapılmış olup aracın ve akışın hareket denklemlerinin eş zamanlı olarak çözümünün "fizik temelli" yaklaşım olarak adlandırılması da bilindiği kadarıyla bu çalışmaya dayanmaktadır. Araştırmacıların bu yöntemi geliştirmelerindeki motivasyon;

- Katsayı tabanlı modellerin katsayılarının ölçümünde ve bu katsayılar arasındaki etkileşimin belirlenmesi süreçlerindeki belirsizliklerin giderilmesi,
- Katsayı tabanlı modellerin aracın zamana bağlı manevrasını yeterince iyi temsil edip edemeyeceği konusunun netleştirilmesi,
- Araç ölçeğinde analiz yapma imkânı kazanarak ölçek etkisinin getirdiği belirsizliklerin önüne geçilmesi,
- Ölçeklendirilemeyen veya ölçeklendirme yasaları henüz bilinmeyen zamana bağlı akış fenomenlerinin doğrudan su altı aracı ölçeğinde (tam ölçek) çalışabilme imkânı kazanılması,
- Deneysel analizlerin yapılabildiği rejim dışında sonuç elde edebilme imkanına sahip olunması,
- Sevk sistemini (pervane) analizlere dahil ederek araç-sevk sistemi arasındaki karşılıklı etkileşimlerin doğrudan analiz edilebilmesi,
- Deneysel analizlerde yapay olarak tetiklenen laminer-türbülans geçişinin zamana bağlı manevralar esnasında gelişecek akış olaylarının doğal seyrini değiştirmesinin önüne geçilmesidir.

Yukarıda sıralanan faktörlerden zamana bağlı manevraların yeterince iyi temsil edilip edilmediği sorunu yöntemin en temel motivasyonunu oluşturmaktadır. Özellikle viskoz etkiler nedeniyle oluşan sınır tabaka ayrılması ve buna paralel olarak girdapsı yapıların yüzeyi terk ederek takıntı/pervane vb. gibi

rüzgaraltı yapılarla girdikleri etkileşimler gibi olayların mekanizmaları arasında sıradan ve zamana bağlı manevralar arasında farklar mevcuttur. Sınır tabaka ayrılma gecikmesi, yelken etrafında oluşan at nalı girdapların rüzgaraltı tarafa doğru farklı difüzyon mekanizmalarına sahip olması gibi farklılıklar akışın hafıza etkisinden kaynaklanmaktadır (Wetzel & Simpson, 1996). Bu farklılıklar araç gövdesi ve takıntıları üzerindeki normal ve aksel yönlerdeki gerilme dağılımlarında değişikliğe sebep olmaktadır. Bu değişiklik ise söz konusu büyüklüklerin yüzey boyunca integrasyonu ile elde edilen hidrodinamik kuvvet/momentlerin de değişimini beraberinde getirmekte ve manevra probleminin diğer yöntemlerin doğrudan ele alamayacağı bir şekilde değişmesine sebep olmaktadır (Zierke et al., 1997).

Ayrıca, su altı araçlarının sahip olduğu kontrol yüzeylerinin boyutunun gövdelerine kıyasla küçük olması manevra için ihtiyaç duyulan kuvvet/momentleri oluşturmak üzere kullanıldıklarında (açısal oryantasyonları değiştirildiğinde) baskın tekne-kontrol yüzeyi etkileşimleri oluşturmakta ve bu bölgedeki akışın yapısı ile kontrol yüzeyi geometrisinin (hydrofoil) direnç-kaldırma kuvveti (dolayısı ile stall) karakteristiğini güçlü bir şekilde etkilemekte ve düzlem dışı kuvvet/momentlerin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu durum ise aracın manevra özelliklerinin kararlı (steady) veya yarı kararlı (quasi-steady) yöntemlerle tahmin edilmesini yüksek/hücum sürüklenme açılı (dolayısı ile yüksek kontrol yüzeyi açılı) manevralar için oldukça zorlaştıran bir başka faktördür (Taylor et al., 1998).

Tüm bu etkilere ilave olarak fizik temelli yaklaşımın pervane geometrisinin ve rotasyonel hareketinin de doğrudan modellenmesine imkan tanınması (Kim et al., 2015) aracın takıntılar nedeniyle düzgün olmayan iz bölgesinde çalışan pervanenin itme ve tork değerlerinde değişiklikler ile bu iz bölgesinin sebep olduğu düzlem dışı kuvvetlerin (pervanenin araç üzerindeki konumu dikkate alındığında dolayısı ile çok büyük momentlerin) ve ayrıca pervane arkasındaki izin de analizlere dahil edilebilmesi anlamına gelecektir. Bu durum zamana bağlı manevralar için analizlerin doğruluk seviyesi ile manevra özelliklerinin tespitine yönelik gösterilen gayretlerin seviyesinin de artmasına sebep olacaktır.

Sonuç olarak tekne, hareketli takıntılar ve rotasyonel pervanenin sebep olduğu akış sahalarının etkileşimi çok karmaşık ve doğası gereği zamana bağlı bir akış sisteminin oluşmasına sebep olur (Taylor et al., 1998). Bu sistemin son yıllarda artan bir şekilde daha hızlı ve keskin manevralar yapması istenen su altı araçları için tatmin edici doğrulukta çözümü ise fizik temelli yaklaşımla mümkündür.

Bu yaklaşımın bir diğer avantajı ise yukarıda ifade edildiği gibi her bir zaman adımı için çözümün problemin fiziğine uygun olması nedeniyle çözüm sürecinde deneysel yöntemlerle elde edilebilecek olandan çok daha zengin bir datanın toplanabilecek olmasıdır.

Bunun yanında geometrideki küçük değişikliklerin belirli bir manevra üzerine etkisinin fizik temelli yöntemler ile analiz edilmesi katsayı temelli yöntemlere göre çok daha ekonomiktir (Pankajakshan et al., 2002). (Dubbioso et al., 2016)'nın Joubert BB2 geometrisinin "+" ve "x" dümen konfigürasyonlarına sahip versiyonlarını manevra performansları yönünden değerlendirdikleri çalışmaları buna örnek gösterilebilir. Katsayı tabanlı yöntemlerle analiz edilmeleri durumunda farklı manevra modellerinin kullanımı ile bu modellerdeki katsayıların belirlenebilmesi için bir seri analiz sonucuna ihtiyaç duyan bu karşılaştırmanın fizik temelli yöntemlerle yapılması çok daha ekonomiktir.

Fizik temelli analizler her ne kadar karmaşık manevraların yüksek doğrulukla simüle edilmesini sağlasa da manevra probleminin matematiksel kökenine ilişkin bir perspektif sunamazlar. Bu bağlamda bu türden analizlere ait veriden düzeltici yönde sonuç çıkarmak oldukça zordur (Taylor et al., 1998).

Akışkanın ve rijit cismin hareketini yöneten denklemlerin zaman boyutunda eş zamanlı çözülmesi her iki hareketin fiziğinin de analizlere yeterince yansıtılabilmesi için problemin içerdiği en küçük zaman ölçeğinin kullanımını zorunlu kılar. Rotasyonel bir pervanenin mevcut olduğu durumda bu zaman ölçeğini pervane akışı belirler. Pervanenin her bir dönüşünün yeterince yüksek çözünürlükte

ayrıklaştırılması zorunluluğu çok küçük zaman adımlarının (dt) kullanımı anlamına gelir (Venkatesan & Clark, 2007). Bu durum ise aracın (boy ölçeğinin kumanda ettiği) yörüngesinin tamamlanabilmesi için her iki denklem sistemi arasında başlangıçta anlatılan döngünün yüzlerce kez tekrarlanması anlamına gelecek ve hesaplama maliyetinin artmasına sebep olacaktır.

Bir pervane devri için gereken zamanın 36'ya bölüdüğü (Venkatesan & Clark, 2007)'in çalışmasının örnek alınması ve denizaltı pervaneleri için karakteristik rpm değerinin 150-200 devir/dakika aralığında olduğu gerçeğinden yola çıkarak fizik temelli analizler için gerekli olan azami “ dt ” değeri saniye cinsinden Denklem (22)'de gösterildiği gibi hesaplanabilir.

$$dt = \frac{60}{200} \cdot \frac{1}{36} = 0.00833 \text{ s.} \quad (22)$$

Fizik temelli analizlerin zaman adımına getirdiği bu kısıtlama manevra probleminin içerdiği çok geniş aralığa dağılmış (türbülanslı sınır tabaka kalınlığından su altı aracının boyuna kadar) uzunluk ölçekleri (Venkatesan & Clark, 2007) ile birlikte değerlendirildiğinde hesaplamalı analizlerinin (açık-explicit) stabilite kriterinin (CFL şartı) Denklem (23)'te gösterildiği gibi sağlanması çok küçük zaman adımlarının yanında çok yoğun ağ yapılarının da kullanılması anlamına gelir.

$$C = \alpha \cdot \frac{dt}{dx} \leq 1 \quad (23)$$

Bu durum ise çok uzun simülasyon süreleri ve dolayısı ile yüksek hesaplama maliyetleri anlamına gelir (Venkatesan & Clark, 2007). Ayrıca tam donanımlı, kendinden tahrikli ve hareket edebilen gerçekçi boşluklara sahip kontrol yüzeyleri olan su altı araçlarının geometrik karmaşıklığı (ve geometriyi oluşturan bileşenlerin birbirlerine göre rölatif hareketlerinin ağ yapısının elleçlenmesine getirdiği zorluklar) da bu maliyeti olumsuz yönde etkileyen hususlardandır.

Fizik temelli analizlerin hesaplama yükünü artıran bir diğer özelliği ise HAD algoritmalarına getirdikleri daha yüksek doğruluk seviyesi şartıdır. Buna göre zamana bağlı simülasyonlarda her bir zaman adımındaki hataların kümülatif olarak birikmesi ve sonucu zaman ilerledikçe fiziksel gerçeklikten uzaklaştırması nedeniyle algoritmaların doğruluk mertebeleri, laminer-türbülans geçişi, türbülans modeli ve ağ çözünürlüğü faktörlerine özellikle önem verilmelidir (Pankajakshan et al., 2002).

Fizik temelli yaklaşımla analiz edilebilecek en temel manevra problemi bir serbestlik derecesine sahip su altı aracının kendinden tahrikli sevk analizleridir. Bu manevra hesaplamalı analizlerde daha fazla serbestlik derecesi ile icra edilen diğer manevralar için başlangıç koşulu olarak kullanılması yönü ile ayrıca önemlidir.

Literatürde bu türden analizler hesaplama kaynakları ile ilgili kısıtlamalardan dolayı genelde pervanenin doğrudan modellenmesi yerine pervanenin yarattığı itme ve torkun radyal yönde dağılımını basitleştirilmiş pervane geometrisi (sonsuz kanatlı pervaneyi temsilen disk) üzerine dağıtılan momentum kaynakları vasıtası ile modellenmesine dayanmaktadır (Coe & Neu, 2011). Aktüatör disk modeli olarak adlandırılan bu yöntemle analizlerde daha büyük zaman adımları ve daha seyrek ağ örgüsü kullanmak mümkün olduğundan hesaplama için harcanan gayreti önemli ölçüde azaltmak mümkündür. Pervanenin doğrudan modellenmesi durumunda oluşturduğu akışın analizi için iz bölgesinin yüksek çözünürlükte ayrıklaştırılması ve bu ağın pervanenin rotasyonel hareketine göre zamana bağlı olarak deforme edilmesine olan ihtiyaç böylece ortadan kaldırılmış olur. Pervane kaynaklı etkileri basitleştirerek modellenmesini hedefleyen bu yaklaşımlar daha yüksek serbestlik dereceli

manevra analizlerinde de kullanıldığından bu çalışma kapsamında incelenmeye değer bulunmuştur. Ancak bu basitleştirmeler yapılırken göz önünde bulundurulması gereken bir diğer husus da pervanenin doğrudan modellenmesi ile elde edilen tekne-pervane etkileşimi ve iz bilgisinin kaybıdır. (Delen et al., 2017) ve (Sezen et al., 2018)'in takıntılı/takıntısız DARPA Suboff formları ile yaptıkları çalışmaları aktüatör disk modelinin su altı araçlarında kullanımının yakın zamanda literatüre girmiş örneklerindedir.

Bu probleme bir diğer yaklaşım ise pervane akışlarında etkinliği kanıtlanmış sınır eleman yöntemi (BEM)'ni esas alan pervane kodlarının HAD kodları ile akuple kullanılmasına yöneliktir. (Chase et al., 2013) çalışmalarında takıntılı ve takıntısız (bare hull) INSEAN E1619 pervanesine sahip DARPA Suboff geometrileri için farklı türbülans modellemesi teknikleri kullandığı HAD analizlerini BEM tabanlı bir pervane kodu ile pervane düzleminde hız bilgisi ile haberleşecek şekilde akuple ederek hesaplama kaynaklarının asgari seviyede kullanımını hedeflemiştir.

Nihai olarak pervane ve hareketinin doğrudan modellendiği çalışmalarda ise (Venkatesan & Clark, 2007; Sezen et al., 2018; Kim et al., 2015; Chase, 2012; Chase & Carrica, 2013) su altı aracının hareketinin “manevra” kategorisinde değerlendirilebilecek kısmı olan ivmelenme fazı analizlerin genelde sevk odaklı olması sebebiyle yapay bir şekilde (aracın ataletinin azaltılarak istenilen hızı çıkmasının çabuklaştırılması suretiyle hızlandırılmıştır. (Wu et al., 2020) ise çalışmasında aracın ivmelenme fazını da gerçekçi bir şekilde modellemiş ve bu fazın sabit hızlı fazdan yapısal olarak çok farklı olduğu sonucuna varmıştır.

Fizik temelli analizleri basitleştirmek için kullanılan bir diğer yöntem de kontrol yüzeyi hareketlerinden doğacak kuvvetlerin harici bir bünye kuvveti olarak modellenmesidir. Manevranın giriş safhasında kontrol yüzeylerinin açisal oryantasyonunda meydana gelen değişimler karşılığında ağ yapısının da deforme olması gerektireceğinden hesaplama kaynaklarının kullanımı oldukça maliyetlidir. Bu maliyetin karşılanmasının tercih edilmediği durumlarda bünye kuvvet modeli kullanılabilir ancak bu yöntemin kullanımı kontrol yüzeylerinin açisal oryantasyonundan kaynaklanan akışın zamana bağlı değişiminin etkilerinin (sınır tabaka ayrılması, ilave direnç vb.) analizlere yansıtılmaması ve akışa ait bir kısım bilginin kaybedilmesi anlamına gelir (Coe & Neu, 2011). (Venkatesan & Clark, 2007) ONR Body-1 geometrisi ile yatay düzlemde 10°/30° overshoot manevrasını çalıştıkları analizlerinde kontrol yüzeyi hareketleri olmaksızın deneysel veriler ile tutarlı sonuçlara ulaşmışlardır. Yazarlar ayrıca kış kontrol yüzeyi hareketlerini modellemenin analizlerin doğruluk seviyesini artıracığına değinmişlerdir.

Analizlerin akışa, dolayısı ile manevranın zamana bağlı doğasına ait veri kaybı olmaksızın yapılabilmesi pervaneye ve kontrol yüzeylerine ait geometri ve hareketlerin HAD ortamında doğrudan modellenmesi ile mümkündür. (Taylor et al., 1998) bu alandaki öncü çalışmasında DTMB P5168 pervanesine ile hareket ettirilebilir ve boşluklu kontrol yüzeylerine sahip AFF-8 geometrisi ile düz rotada bir başlangıç analizi yapmıştır.

(Pankajakshan et al., 2000, 2001) çalışmalarında (Taylor et al., 1998) çalışmasındaki geometriyi kullanarak sırasıyla 10° dümen açısının tetiklediği dönme manevrası ile baş ufki dümenler ile tetiklenen satha geliş manevrasını; daha sonraki bir çalışmaları ile de (Pankajakshan et al., 2002) ONR Body-1 geometrisinin biri düşey üçü yatay düzlemde olmak üzere 10° dümen açıları ile tetiklenen toplam dört adet Kempf (overshoot) manevrasını analiz etmişlerdir. Tüm bu çalışmalardan elde edilen genel sonuçlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Hareket ettirilebilir kontrol yüzeylerini içeren analiz senaryoları yüzey ile gövde arasındaki boşlukların da modellenmesini gerektireceğinden ağ sıklığı ve hücre sayısını ve dolayısı ile hesaplamaların karmaşıklığını artırmaktadırlar.
- Baş ufki dümenler ile icra edilen manevralarda pervane etkisi küçük olduğu için pervanenin bünye kuvveti olarak modellenmesi manevranın zamana bağlı gelişimi açısından ihmal edilebilir seviyede veri kaybına yol açmaktadır.

Her ne kadar doğası gereği zamana bağlı olsalar da viskoz etkilerin rol oynamadığı daha baskın akış fenomenleri içeren manevralarda fizik temelli bir yaklaşım kullanmanın katsayı tabanlı yöntemle kıyasla belirgin bir avantajı olmayabilir. Acil satır manevrası esnasında yalpa stabilitesinin kaybı fenomenini konu alan çalışmada (Bettle, 2013) bu doğrultuda bir sonuca ulaşılmıştır. Buna göre yelkenin varlığı (kaldırma kuvveti) nedeniyle oluşan yalpa stabilitesinin kaybı fenomeni akışı domine ettiğinden ve bu etki viskozite ile doğrudan ilintili olmadığından bu manevra için katsayı tabanlı yöntemlerin yetkinliği fizik temelli yöntemlerin seviyesine ulaşmaktadır.

Sonuç olarak fizik temelli yöntemler ihtiyaç duyulan güçlü hesaplama kaynaklarına erişimin olduğu, incelenen manevra problemi özelinde katsayılı yöntemlere kıyasla belirgin bir avantaj sağladığı veya sunduğu doğruluk seviyesine hesaplama kaynaklarının aşırı kullanımına rağmen ihtiyaç duyulduğu durumlarda kullanılmalıdır.

6.2. Serbest hareketli model deneyleri

Manevra probleminde fiziksel yaklaşımın deneysel ayağını serbest hareketli model deneyleri oluşturur. Bu yöntemde de amaç fiziksel yaklaşımın hesaplamalı analizler kısmında olduğu gibi su altı aracının/modelin belirli kontrol ve çevresel girdilere verdiği tepkiyi (yörünge) doğrudan analiz etmektir.

Serbest hareketli model deneylerinin yapılabilmesi için su altı aracının geometrik olarak benzerinin bir ölçek dahilinde ve sevk sistemi ile kontrol yüzeyleri de (hareket, boşluklar vb.) dikkate alınarak inşa edilmesi gerekir. Ayrıca inşa edilen bu modelin su altında yatay ve düşey düzlemlerde istenilen manevrayı yapmasını sağlayan bir kontrol sistemine de sahip olması gereklidir. Geçmişte kullanılan kontrol sistemlerinin (kablolu veya radyo kontrollü) insan girdisine ihtiyaç duyması ve su altındaki bir nesne ile elektronik ve görsel olarak haberleşmedeki teknik zorluklar bu deney yönteminin özellikle düşey düzlemde yeterince iyi performans sergileyememesine yol açmıştır (Burcher, 1972).

Son yıllarda otonom kontrol sistemlerinin etkinliklerinin istenilen düzeye ulaşması bu eksikliği gidererek model testi alanındaki gelişmelerin ağırlıklı olarak serbest hareketli model testi tekniği başlığında olmasına yol açmıştır (Overpelt, 2014).

Serbest hareketli model deneyleri de hesaplamalı fizik temelli analizlerde olduğu gibi matematiksel yaklaşımdaki karşılıklarına kıyasla daha az sayıda işlem basamağına ihtiyaç duyarlar ve dolayısı ile daha hızlı sonuç verirler. Serbest hareketli model deneylerinde matematiksel yaklaşımda ihtiyaç duyulan;

- Model tasarımı
- Test matrisinin belirlenmesi
- Testin icrası
- Test sonuçlarının analiz edilmesi
- Hidrodinamik katsayıların belirlenmesi
- Manevra simülasyonlarının yapılması

yukarıdaki işlem basamaklarından dördüncü ve beşincisine ihtiyaç duyulmaz. Ara basamakların atlanması bu basamaklardan kaynaklanan olası hata ve belirsizliklerin önüne geçer. Böylece yöntem su altı araçlarının manevra karakteristiklerinin eksiksiz bir resmini verir. Ancak yine ara basamakların atlanması nedeniyle bahse konu karakteristiklerin matematiksel olarak tanımlanmasına imkan vermezler (Quadvlieg & Overpelt, 2009). Bu yöntem ile deney sonuçlarından su altı aracı tasarımının manevra performansı açısından geliştirilmesi yönünde geri besleme almak çok zordur.

Serbest hareketli model deneyleri daha çok su altı aracının manevra edilebilirliği üzerine hızlı bir kaniya varmak, değişik tasarım opsiyonlarını kıyaslamak, otopilot mekanizmasının etkinliğini kontrol etmek ve geliştirilen manevra modellerinin doğrulanması için kullanılırlar (Overpelt, 2014). Ayrıca genelde matematiksel modellemenin geçerlilik aralığı dışında kalan zamana bağlı keskin manevraların analizi içinde bahse konu teknik kullanılabilir.

Bu tekniğin bir diğer dezavantajı ise rüzgâr, gelgit ve dalga karakteristiklerinin kontrol edilebildiği büyük su alanlarına ve karmaşık/pahalı sevk kontrol ve navigasyon sistemleri içeren modellere ihtiyaç duymasındır. Bu karmaşıklık seviyesi serbest hareketli bir modelde olması gereken sistemleri tanımlayan (Jun et al., 2009; Lee et al., 2013; Renilson, 2018) çalışmalarından daha iyi anlaşılabilir. Ayrıca araç ve model ölçeği arasındaki farklar nedeniyle dinamik olayların da (dümen ve pervane hareketleri) modelin zaman ölçülerine göre yeniden kurgulanması gereklidir. Geçmişte insan kontrol girdisi ile birlikte çevre şartlarının da model ölçeğinde yeniden oluşturulamaması pahalı tesis ve modele duyulan ihtiyaç ile birlikte serbest hareketli model tekniğinin kullanımını sınırlandıran başlıca faktörler olmuştur.

Günümüzde su altı araçlarından beklenen görevlerin bu araçların tasarım limitlerini giderek matematiksel yaklaşımın geçerlilik aralığı dışına çıkartması bahse konu araçların zorlayıcı manevralar sırasındaki davranışını analiz edebilmek için fiziksel yöntemlere ve dolayısıyla serbest hareketli model deneylerine daha fazla başvurulması sonucunu doğurmuştur. Bu deneyler aynı zamanda hesaplamalı fizik temelli analizler için de bir doğrulama/gerçekleme aracıdır. Örneğin (Overpelt et al., 2015)'in BB2 ve MARIN S7371R pervane geometrisi ile yaptığı ve Şekil 12'de bir örneği gösterilen deneyler (Carrica et al., 2016; Kim et al., 2018; Wang et al., 2019)'in fizik temelli hesaplamalı analizleri için bir metrik teşkil etmiştir.

7. Sonuç

Çalışma kapsamında su altı araçlarının manevra probleminin çözümü için kullanılan tüm yöntemler aracın yörüngesini hesaplamakta kullandıkları işlem basamaklarının sayısı ve içeriğine göre matematiksel ve fiziksel yaklaşımlar olarak iki ana kategoriye ayrılmıştır. Bu ana kategorilere ait alt başlıkların yanında çalışmanın bütünlüğünün sağlanabilmesi için literatürde kullanılan; jenerik su altı aracı geometrileri, manevra modelleri ve standart manevralara da değinilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar özetle;

- Genellikle askeri amaçlarla tasarlanmaları nedeniyle su altı aracı projeleri yüksek gizliliğe sahiptirler. Bu durum bu alanda yapılan çalışmaların bilimsel bir yayın haline getirilememesi sonucunu doğurmuştur. HAD tekniklerinin ve hesaplama altyapısının ancak son 10 yıllık süreçte bu araç formlarını tüm detayları ile analiz etme yetkinliği kazandığı gerçeği de dikkate alındığında araştırmacıların bu alana ilgisi geçmişte sınırlı kalmıştır. Gelişen hesaplama altyapısı ile gizlilik faktöründen etkilenmeksizin akademik seviyede ilginin bu alana çekilebilmesi için jenerik geometriler geliştirilmiştir. Bu geometriler başlangıçta nükleer tahrikli süratli denizaltıların geometrik özelliklerini taklit edecek şekilde (süratlerinden dolayı bu

platformların manevrası daha kritik olduğundan) oluşturulsa da zamanla diğer sınıf araçlar (konvansiyonel denizaltılar) için de geliştirilmişlerdir.

- Ölçekli model deneyleri ve hesaplamaların sonuçlarını, su altı aracı ölçeğinde (tam ölçekte) deniz tecrübelerinin sonuçları ile insan girdisinden etkilenmeksizin karşılaştırabilmek için her iki ölçekte de icra edilebilen standart manevralara ihtiyaç duyulmuştur. Bu manevralar her biri aracın farklı bir manevra karakteristiğini gösterecek şekilde geliştirilmişlerdir.
- Altı serbestlik derecesinin tamamında hareket edebilen su altı araçlarının matematiksel yaklaşım kullanılarak manevra analizlerinin yapılabilmesi için karmaşık manevra modellerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak bu modeller geliştirilirken yapılan kabuller nedeniyle zorlayıcı manevralar modelin geçerlilik aralığı dışında kalmakta ve model üzerinde düzeltme yapılması veya yeni bir model geliştirilmesi elzem olmaktadır.
- Feldman'ın modeli her ne kadar yelken etrafında oluşan at nalı girdabın rüzgaraltı etkileşimleri için sahip olduğu düzeltmeler nedeniyle zorlayıcı manevralar için daha doğru sonuç verse de uygulamasının zor olması Gertler & Hagen modelinin literatürde daha sıklıkla kullanılması sonucunu doğurmuştur.
- Matematiksel yaklaşım başlığı altında kullanılan deneysel yöntemler serbestlik derecesi sayısı, düzlemsel/düzlemsel olmama, devamlı/salınımlı/dinamik olma ve tespit edebileceği katsayı türleri bazında sınıflandırılabilir.
- Her bir deney mekanizmasının doğrudan tespit edebildiği katsayıların haricinde dolaylı olarak da tespit edebildiği bir veya birkaç katsayı grubu olabilir. Bunun yanında mekanizma tespit edebildiği tüm katsayıları dolaylı olarak tespit edebilir.
- Düzlemler arası etkileşimlerin de hesaplamalara yansıtılabilmesi için çapraz etkileşimli katsayıların tespit edilmesi gereklidir. Bunun deneysel yolla yapılması DHM, DKM vb. düzlemsel hareket mekanizmalarına ilave olarak KHM, MDTF gibi düzlem dışı etkileri de analiz edebilen mekanizmaların geliştirilmesine neden olmuştur. Benzer şekilde dinamik etkiler için de DyPPiR gibi mekanizmalar ortaya çıkmıştır.
- Ampirik yöntemler genelde tasarımın erken aşamalarında yapılan geometrik değişikliklerin aracın manevra performansı üzerine olan etkisinin karşılaştırılmalı gösterimi için kullanılan nispeten düşük doğruluk dereceli yöntemlerdir. Bu yöntemleri bir araya getiren ve tasarım otoritelerince kullanılan ticari/özel yazılımlar (Paramarine, DSSP vb.) mevcuttur. Bu yöntem ve yazılımlardan bir kısmı havacılık disiplininin devşirilip kullanılmaktadır.
- Bilinen girdilere mevcut sistemin verdiği tepkilerin ölçülmesi ve bu bilginin bu ikisi arasındaki matematiksel ilişkinin tanımlanması için kullanılması şeklindeki yaklaşımların geneli sistem tanımlama teknikleri olarak adlandırılır ve son yıllarda su altı araçlarının manevra ve kontrol analizlerinde kullanım sıklıkları artmaktadır.
- Manevra problemine fiziksel yaklaşımlar ise aracın ve akışkanın hareket denklemlerinin zaman boyutunda akuple edilerek simultane çözülmesine dayalı fizik temelli hesaplamalı analizler ve aracın yörüngesinin doğrudan belirlendiği serbest hareketli model deneylerinden oluşur.
- Fiziksel yaklaşımı oluşturan yöntemler herhangi bir matematiksel ara işlem basamağı içermediklerinden doğruluk dereceleri daha yüksektir. Ancak bu yöntemlerle yapılan analizler tam da bu nedenle aracın manevra karakteristiklerine ilişkin herhangi bir matematiksel perspektif sunmazlar. Dolayısı ile bu analizlerin sonuçlarından aracın manevra karakteristiklerini düzeltici yöne herhangi bir çıkarım yapmak çok zordur.
- Fizik temelli hesaplamalı yöntem ile yapılan analizler her bir zaman adımı için akışın fiziğini yansıtacak şekilde doğru sonuç verir. Bu doğruluk seviyesinin simülasyon süresince sağlanabilmesi için matematiksel yaklaşımda kullanılanlara göre doğruluk derecesi daha

yüksek algoritmalara ihtiyaç duyarlar. Bunun nedeni her bir zaman adımındaki hataların sonucu kümülatif olarak etkilemesidir.

- Son yıllarda hesaplama altyapısındaki gelişmeler ile otonom kontrol/kumanda sistemlerindeki ilerlemeler manevra problemine fiziksel yaklaşımı oluşturan yöntemlerin su altı araçlarının manevra analizlerinde kullanım sıklığını artırmışlardır.
- Hesaplama kapasitesinin geldiği noktada tek bir manevraya ait yörüngenin belirlenebilmesi için fizik temelli hesaplamalı analizler hidrodinamik katsayıların belirlenmesi için yapılan hesaplamalı analizlerden daha ekonomik hale gelmiştir. Ancak aracın manevra emniyet zarfının belirlenmesi gibi çok sayıda manevranın incelenmesi gereken durumlarda matematiksel yöntemlerin kullanımı zorunludur.

Yukarıda sunulan tüm analiz yöntemleri ve elde edilen sonuçlar aracın dalmış durumu için geliştirilmiş olup, akışkan sınırlarına yakınlığın neden olduğu sapmalar bu çalışmanın ikinci bölümünü oluşturan ayrı bir başlık altında incelenmiştir. Ayrıca bu çalışmanın hacmini kabul edilebilir seviyede tutmak için matematiksel yaklaşımın bir ayağını oluşturan ve HAD analizlerini esas alan hesaplamalı yöntemlerin iç dinamikleri her iki bölümden bağımsız olarak incelenmiş ve çalışmanın üçüncü bölümünü oluşturmuştur.

8. Referanslar

Ahn, S., Choi K.-Y., & Simpson R. (1989). The design and development of a dynamic plunge-pitch-roll model mount. In 27th Aerospace Sciences Meeting. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/doi:10.2514/6.1989-48>

Barros, E. de, Pascoal, A., & Sa, E. de. (2006). Progress Towards a Method for Predicting AUV Derivatives. Proc. IFAC Manoeuvring Control Marine Crafts.

Belanger, F. (2019). System Identification of Submarine Motion Dynamics [Presentation]. Mari-Tech Conference, Ottawa, Canada.

Bettle, M. (2013). Unsteady Computational Fluid Dynamics Simulations of Six Degrees-of-Freedom Submarine Manoeuvres (Doctoral dissertation, University of New Brunswick, Canada). Retrieved from <https://unbscholar.lib.unb.ca/islandora/object/unbscholar%3A9381>

Bettle, M. C. (2018). Baseline Predictions of BB2 Submarine Hydrodynamics for the NATO AVT-301 Collaborative Exercise (Report No. DRDC-RDDC-2017-R200). Defence Research and Development Canada. Retrieved from https://cradpdf.drdc-rddc.gc.ca/PDFS/unc298/p806272_A1b.pdf

Bettle, M. C., Gerber, A. G., & Watt, G. D. (2009). Unsteady Analysis of the Six DOF Motion of a Buoyantly Rising Submarine. *Computers and Fluids*, 38(9), 1833–1849. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2009.04.003>

Boger, D., & Dreyer, J. (2006). Prediction of Hydrodynamic Forces and Moments for Underwater Vehicles Using Overset Grids. In 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2006-1148>

Booth, T. B. (1973). Oscillatory Testing of Ship Models. *Journal of Sound and Vibration*, 28(4), 687–698. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(73\)80143-9](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(73)80143-9)

Brayshaw, I. (1999). Hydrodynamic Coefficients of Underwater Vehicles [Student Report]. Aeronautical and Maritime Research Laboratories, DSTO.

Brinati, H., de Conti, M., Szajn bok, M., & Domiciano, V. (2013). First principles applied to submersible maneuvering. In *Developments in Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources*. <https://doi.org/10.1201/b15813-13>

Burcher, R. K. (1972). Paper 9. Model Testing. *Journal Mechanical Engineering Science*, 14(7), 62–69. https://doi.org/10.1243/JMES_JOUR_1972_014_064_02

Can, M. (2014). Numerical Simulation of Hydrodynamic Planar Motion (Master's thesis, Middle Eastern Technical University, Ankara, Turkey). Retrieved from <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12617938/index.pdf>

Cardenas, P., & de Barros, E. A. (2020). Estimation of AUV Hydrodynamic Coefficients Using Analytical and System Identification Approaches. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 45(4), 1157-1176. <https://doi.org/10.1109/JOE.2019.2930421>

Carrica, P. M., Kerkvliet, M., Quadvlieg, F., & Martin, J. E. (2016). CFD Simulations and Experiments of a Maneuvering Generic Submarine and Prognosis for Simulation of Near Surface Operation. In *Proceedings of the 31st Symposium on Naval Hydrodynamics* (pp. 11–16). Monterey, CA.

Chase, N. (2012). Simulations of the DARPA Suboff submarine including self-propulsion with the E1619 propeller (Master's thesis, University of Iowa, Iowa City, IA). <https://doi.org/10.17077/etd.ypvf3i4w>

Chase, N., & Carrica, P. M. (2013). Submarine Propeller Computations and Application to Self-Propulsion of DARPA Suboff. *Ocean Engineering*, 60, 68–80. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.12.029>

Chase, N., Michael, T., & Carrica, P. M. (2013). Overset Simulation of a Submarine and Propeller in Towed, Self-Propelled and Maneuvering Conditions. *International Shipbuilding Progress*, 60(1), 171–205. <https://doi.org/10.3233/ISP-130088>

Coe, R. G., & Neu, W. L. (2011). Vehicle Control in a CFD Environment. In *Proceedings of the 2011 Grand Challenges on Modeling and Simulation Conference* (pp. 370–374). Vista, CA: Society for Modeling & Simulation International.

Coe, R. G. (2013). Improved underwater vehicle control and maneuvering analysis with computational fluid dynamics simulations (Doctoral dissertation, Virginia Tech, Blacksburg, VA). Retrieved from <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/23777>

Coxon, P. J. (1989). System Identification of Submarine Hydrodynamic Coefficients from Simple Full Scale Trials (Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA). Retrieved from <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/14129/23881420-MIT.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Dantas, J. L. D., Caetano, W. S., Vale, R. T. S., & de Barros, E. A. (2013). Analysis of identification methods applied to free model tests of the Pirajuba AUV. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(33), 185–190, <https://doi.org/10.3182/20130918-4-JP-3022.00051>

De Barros, E. A., Pascoal, A., & De Sa, E. (2008). Investigation of a Method for Predicting AUV Derivatives. *Ocean Engineering*, 35(16), 1627–1636. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.08.008>

Delen, C., Sezen, S., & Bal, S. (2017). Computational Investigation of Self Propulsion Performance of DARPA SUBOFF Vehicle. *TAMAP Journal of Engineering*, 2017.

- Dong P.G. (1978). Effective mass and damping of submerged structures (Report No. UCRL-5234). University of California, Lawrence Livermore Laboratory, 2, CA.
- Dubbioso, G., Broglia, R., & Zaghi, S. (2017). CFD Analysis of Turning Abilities of a Submarine Model. *Ocean Engineering*, 129, 459–479. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.10.046>
- Feldman, J. (1979). DTNSRDC Revised Standard Submarine Equations of Motions (Report No. DTNSRDC/SPD-0393-09). David W. Taylor Naval Ship Research and Development Center. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a071804.pdf>
- Finck, R. D., & Hoak, D. E. (1978). USAF Stability and Control DATCOM (Report No. AFWAL-TR-83-3048). Flight Dynamics Laboratory, OH.
- Fossen, T. I. (2011). *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. John Wiley & Sons.
- Fu, T. C., Atsavapranee, P., & Hess, D. E. (2002). PIV Measurements of Cross-Flow Velocity Field Around a Turning Submarine Model (ONR Body-1) Part 1. Experimental Setup (Report No. NSWCCD-50-TR 2002/019). Carderock Division, Naval Surface Warfare Center. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a401545.pdf>
- Furlong, M. E., Hearn, G. E., Veres, S. M., & Rogers, E. (2003). Nonlinear system identification tools applied to the modelling of submarine dynamics. *IFAC Proceedings Volumes*, 36(4), 49–54. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)36656-9](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)36656-9)
- Gallaway, C. R., & Osborn, R. F. (1985). Aerodynamics Perspective of Supermaneuverability. In 3rd Applied Aerodynamics Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/doi:10.2514/6.1985-4068>.
- Gertler, M. (1950). Resistance Experiments On A Systematic Series Of Streamlined Bodies Of Revolution-For Application to the Design Of High-Speed Submarines (Report No. C-297). David Taylor Model Basin. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a800144.pdf>
- Gertler, M., & Hagen, G. R. (1967). *Standart Equations of Motion For Submarine Simulation*. Washington D.C.
- Goodman, A. (1960). *Experimental Techniques and Methods of Analysis Used in Submerged Body Research*.
- Gregory, P. A., Joubert, P. N., & Chong, M. S. (2004). Flow Over a Body of Revolution in a Steady Turn (Report No. DSTO-TR-1591). Defence Science and Technology Organization, Australia. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a429701.pdf>
- Grim, O., Oltmann, P., Sharma, S. D., & Wolf, K. (1976). CPMC-A Novel Facility for Planar Motion Testing of Ship Models. In 11th Symposium on Naval Hydrodynamics. London, UK.
- Groves, N. C., Huang, T. T., & Chang, M. S. (1989). Geometric characteristics of DARPA suboff models (DTRC Model Nos 5470 and 5471) (Report No. DTRC/SHD-1298-01). Ship Hydromechanics Department, David Taylor Research Center. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a210642.pdf>
- Han, J. H., Jeong, J. H., Lee S. B., Jang, K. Y., & Lee, S. K. (2017). Dynamic Stability Analysis of a Submarine by Changing Conning Tower Position and Control Planes. *Journal of navigation and port research*, 41(6), 389–394.
- Hegrenæs, Ø., Hallingstad, O., & Jalving, B. (2007). Comparison of mathematical models for the HUGIN

4500 AUV based on experimental data. In International Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies (pp. 558–567). IEEE. <https://doi.org/10.1109/UT.2007.370776>

Humphreys, D. E. (1976). Development of Equations of Motion and Transfer Functions for Underwater Vehicles (NCSL 287-76). Naval Coastal Systems Laboratory. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA033882.pdf>

Hydroid, a K. C. (2012). Underwater Mobile Docking of Autonomous Underwater Vehicles. In OCEANS. Hampton, VA. doi: 10.1109/OCEANS.2012.6405109.

Ibrahim, M. (2000). A Method for Analysis of the MDTF Data Using Neural Networks (Master's thesis, Memorial University of Newfoundland, Canada). Retrieved from https://research.library.mun.ca/1666/3/Ibrahim_Mohamed.pdf

Imlay, F. H. (1961). The Complete Expressions for Added Mass of a Rigid Body Moving in an Ideal Fluid (Report No. 1528). David Taylor Model Basin. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/263966.pdf>

Jiang, J., Shi, Y., & Pan, G. (2013). Computation of Hydrodynamic Coefficients of Portable Autonomous Underwater Vehicle. In APCOM & ISCM. Singapore.

Johnson, D. C. (1989). A Coning Motion Apparatus for Hydrodynamic Model Testing in a Non-Planar Cross-Flow (Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA) Retrieved from <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/40552>

Jones, D. A., Clarke, D. B., Brayshaw, I. . B., Barillon, J. L., & Anderson, B. (2002). The Calculation of Hydrodynamic Coefficients for Underwater Vehicles (Report No. DSTO-TR-1329). Defence Science and Technology Organization, Australia. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a414448.pdf>

Jun, B. H., Park, J. Y., Lee, F. Y., Lee, P. M., Lee, C. M., Kim, K., ... Oh, J. H. (2009). Development of the AUV "ISiMI" and a free running test in an Ocean Engineering Basin. *Ocean Engineering*, 36(1), 2–14. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.07.009>

Kim, H., Ranmuthugala, D., Leong, Z. Q., & Chin, C. (2018). Six-DOF Simulations of an Underwater Vehicle Undergoing Straight Line and Steady Turning Manoeuvres. *Ocean Engineering*, 150, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.12.048>

Kim, H., Leong, Z. Q., Ranmuthugala, D., Chin, C., & Forrest, A. (2015). Free Running Simulation of an Autonomous Underwater Vehicle Undergoing a Straight Line Manoeuvre via Computational Fluid Dynamics. In PACIFIC 2015 International Maritime Conference. Sydney, Australia.

Kim, J., Kim, K., Choi, H. S., Seong, W., & Lee, K.-Y. (2002). Estimation of Hydrodynamic Coefficients for an AUV Using Nonlinear Observers. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 27(4), 830-840. <https://doi.org/10.1109/JOE.2002.805098>

Kim, K., Turnock, S. R., Ando, J., Becchi, P., Minchev, A., Semionicheva, E. Y., ... Korkut, E. (2008). The Maneuvering Committee: final report and recommendations to the 25th ITTC. *Proceedings of 25th ITTC, I*, 143–208.

Lee, G. M., Park, J. Y., Kim, B., Baek, H., Park, S., Shim, H., ... Jeong, H. S. (2013). Development of an autonomous underwater vehicle ISiMI6000 for deep-sea observation. *Indian Journal of Marine*

Sciences, 42(8), 1034–1041.

Leeuwen, G. van. (1969). Some problems concerning the design of a horizontal oscillator (Report No. 225). Shipbuilding Laboratory, Technological University Delft

Lloyd, A. (1983). Progress towards a rational method of predicting submarine manoeuvres. In Royal Institution of Naval Architects symposium on naval submarines. London

Luque, J. C. C., Donha, D. C., & de Barros, E. A. (2009). AUV parameter identification. IFAC Proceedings Volumes, 42(18), 72–77. <https://doi.org/10.3182/20090916-3-BR-3001.0062>

Mackay, M. (2003). The Standard Submarine Model: A Survey of Static Hydrodynamic Experiments and Semiempirical Predictions (Report No. TR 2003-079). Defence Research & Development Canada. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.666.6710&rep=rep1&type=pdf>

Mackay, M., Williams, C. D., & Derradji-Aouat, A. (2007). Recent Model Submarine Experiments with the MDTF. In 8th Canadian Marine Hydromechanics and Structures Conference. St. John's NL, Canada.

Mackay, M. (2004). A Review of Submarine Out-of-Plane Normal Force and Pitching Moment (Report No. TM 2004-135). Defence Research & Development Canada. Retrieved from <https://cradpdf.drdc-rddc.gc.ca/PDFS/unc62/p522701.pdf>

McCarter, B. R. (2014). Experimental evaluation of viscous hydrodynamic force models for autonomous underwater vehicles (Mater's thesis, Virginia Tech, Blacksburg, VA) Retrieved from https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/50445/McCarter_BR_T_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y

McFarland, C. J., & Whitcomb, L. L. (2013). Comparative experimental evaluation of a new adaptive identifier for underwater vehicles. In 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (pp. 4614-4620). <https://doi.org/10.1109/ICRA.2013.6631233>

Millan, D., & Thorburn, P. (2010). A Planar Motion Mechanism (PMM) for Ocean Engineering Studies. In NECEC 2010: 18th Newfoundland Electrical and Computer Engineering Conference, St. John's, NL, Canada.

Moonesun, M. (2014). Introduction of Iranian hydrodynamic series of submarines (IHSS). Journal of Taiwan Society of Naval Architects and Marine Engineers. 33(3). 155-162.

Morrison, A. T., & Yoerger, D. R. (1993). Determination of the hydrodynamic parameters of an underwater vehicle during small scale, nonuniform, 1-dimensional translation. In Proceedings of OCEANS '93 (pp. II277-II282 vol.2). <https://doi.org/10.1109/OCEANS.1993.326105>

Mulvihill, L. P., & Yang, C. I. (2007). Numerical Simulation of Flow Over Fully Appended ONR body-1 with Overset Grid Scheme. In NSH 2007 - 9th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics. Ann Arbor, MI.

Myring, D. F. (1981). A Theoretical Study of the Effects of Body Shape and Mach Number on the Drag of Bodies of Revolution in Subcritical Axisymmetric Flow (Report No. 81005). Royal Aircraft Establishment. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA107999.pdf>

Nahon, M. (1993). Determination of Undersea Vehicle Hydrodynamic Derivatives Using the USAF Datcom. In OCEANS (pp. II283-II288 vol.2). <https://doi.org/10.1109/OCEANS.1993.326107>

Nahon, M. (1996). A Simplified Dynamics Model for Autonomous Underwater Vehicles. In Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology (pp. 373–379). <https://doi.org/10.1109/AUV.1996.532437>

Overpelt, B. (2014). Innovation in the Hydrodynamic Support for Design of Submarines. In 12th International Naval Engineering Conference and Exhibition (INEC). Amsterdam, Netherlands.

Overpelt, B., Nienhuis, B., & Anderson, B. (2015). Free Running Manoeuvring Model Tests On A Modern Generic SSK Class Submarine (BB2). In Pacific International Maritime Conference.

Pankajakshan, R., Remotigue, M. G., Taylor, L. K., Jiang, M., Briley, W. R., & Whitfield, D. L. (2002). Validation of Control Surface Induced Submarine Maneuvering Simulations Using UNCLE. In 24th Symposium on Naval Hydrodynamics (pp. 624–639). Fukuoka, Japan: The National Academies Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.17226/10834>

Pankajakshan, R., Taylor, L. K., Jiang, M., Remotigue, M. G., Briley, W. R., & Whitfield, D. L. (2000). Parallel Simulations for Control-Surface Induced Submarine Maneuvers. In 38th Aerospace Sciences Meeting Conference and Exhibit (p. 962).. Reno, NV. <https://doi.org/https://doi.org/10.2514/6.2000-962>

Pankajakshan, R., Taylor, L. K., Sheng, C., Jiang, M., Briley, W. R., & Whitfield, D. L. (2001). Parallel Efficiency in Implicit Multiblock, Multigrid Simulations with Application to Submarine Maneuvering. In 39th Aerospace Sciences Meeting Conference and Exhibit (p. 1093). Reno, NV. <https://doi.org/https://doi.org/10.2514/6.2001-1093>

Park, J.-Y., Kim, N., Rhee, K.-P., Yoon, H. K., Kim, C., Jung, C., ... Lee, S. (2015). Study on Coning Motion Test for Submerged Body. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(6), 436–444. <https://doi.org/10.5574/ksoe.2015.29.6.436>

Phillips, A., Furlong, M., & Turnock, S. R. (2016). The use of Computational Fluid Dynamics to Determine the Dynamic Stability of an Autonomous Underwater Vehicle, Paper presented at the 10th Numerical Towing Tank Symposium (NuTTS'07), Hamburg, Germany September 23-25, 2007.

Praveen PC, Krishnankutty P. (2013). Study on the effect of body length on the hydrodynamic performance of an axi-symmetric underwater vehicle. *Indian J Geo-Mar Sci* 42(8):1013–1022

Prestero, T. (2001). Development of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle. In *OCEANS* (pp. 450-455 vol.1), Honolulu, HI. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2001.968766>

Quadvlieg, B., & Overpelt, F. (2009). Free Running Model Tests Shed Light on the Elusive World of the Submarine (Report No. 95). MARIN. Retrived from <https://www.marin.nl/publications/free-running-model-tests-shed-light-on-the-elusive-world-of-the-submarine>

Racine, B. J., & Paterson, E. G. (2005). CFD-Based Method for Simulation of Marine-Vehicle Maneuvering. In 35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit (p. 4904). Toronto, Canada. <https://doi.org/https://doi.org/10.2514/6.2005-4904>

Renilson, Martin. (2018). "Submarine Hydrodynamics (2nd ed.)". Springer. <https://doi.org/10.3723/ut.33.137>

Sabet, M. T., Daniali, H. M., Fathi, A., & Alizadeh, E. (2018). Identification of an Autonomous Underwater Vehicle Hydrodynamic Model Using the Extended, Cubature, and Transformed Unscented Kalman Filter. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 43(2), 457–467. <https://doi.org/10.1109/JOE.2017.2694470>

Sabet, M. T., Sarhadi, P., & Zarini, M. (2014). Extended and Unscented Kalman filters for parameter estimation of an autonomous underwater vehicle. *Ocean Engineering*, 91, 329–339. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.09.013>

Sandman, B. E., & Kelly, J. G. (1974). Systems Identification: Application To Underwater Vehicle Dynamics. *Journal of Hydronautics*, 8(3), 94–99. <https://doi.org/10.2514/3.62985>

Sen, D. A Study on Sensitivity of Maneuverability Performance on the Hydrodynamic Coefficients for Submerged Bodies. *Journal of Ship Research* 44(03), 186–196.
doi: <https://doi.org/10.5957/jsr.2000.44.3.186>

Severholt, J. (2017). Generic 6-DOF Added Mass Formulation for Arbitrary Underwater Vehicles based on Existing Semi-Empirical Methods (Master's thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden). Retrieved from <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1127931/FULLTEXT01.pdf>

Sezen, S., Dogrul, A., Delen, C., & Bal, S. (2018). Investigation of Self-Propulsion of DARPA Suboff by RANS Method. *Ocean Engineering*, 150, 258–271. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.12.051>

Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME). (1950). Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid (Technical Research Bulletin No. 1-5) SNAME. Retrieved from <https://www.itk.ntnu.no/fag/TTK4190/papers/Sname%201950.PDF>

Society of Naval Architecture and Marine Engineers (SNAME), (1989). "Principles of Naval Architecture Vol III", SNAME.

Sukas, Ö.F., Kınacı, Ö. K., & Bal, Ş., (2017). Gemilerin Manevra Performans Tahminleri için Genel Bir Değerlendirme-I. *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, vol.23, 37-75.

Taylor, L., Pankajakshan, R., Jiang, M., Sheng, C., Briley, W., Whitfield, D., ... Al, E. (1998). Large-Scale Simulations for Maneuvering Submarines and Propulsors. In 29th AIAA, Plasmadynamics and Lasers Conference. Albuquerque, NM. <https://doi.org/doi:10.2514/6.1998-2930>

Techet, A.H. (2005). Hydrodynamics Lecture Notes, MIT. Retrieved from <https://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-016-hydrodynamics-13-012-fall-2005/download-course-materials/>

Thune, S. (2015). Simulation of Submarine Manoeuvring (Master's thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden). Retrieved from <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-185028>

Tiano, A., Sutton, R., Lozowicki, A., & Naeem, W. (2007). Observer Kalman filter identification of an autonomous underwater vehicle. *Control Engineering Practice*, 15(6), 727–739. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2006.08.004>

Tinker, S. J. (1982). Identification of submarine dynamics from free model tests. In Admiralty Marine Technology Establishment, UK, Proceedings of the DRG Seminar on Advanced Hydrodynamic Testing Facilities, Session 3, Paper 16, The Netherlands. Paper: P1982-1 Proceedings.

Tinker, S. J., Bowman, A. R., & Booth, T. B. (1979). Identifying Submersible Dynamics from Free Model Experiments. *Royal Institution of Naval Architects Supplementary Papers*, 121, 191–196.

Venkatesan, G., & Clark, W. B. (2007). Submarine Maneuvering Simulations of ONR Body 1. In 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (pp. 697–705). San Diego, CA: ASME. <https://doi.org/https://doi.org/10.1115/OMAE2007-29516>

Wang, Y., Liu, J., Liu, T., Jiang, Z., Tang, Y., & Huang, C. (2019). A Numerical and Experimental Study on the Hull-Propeller Interaction of A Long Range Autonomous Underwater Vehicle. *China Ocean Engineering*, 33(5), 573–582. <https://doi.org/10.1007/s13344-019-0055-z>

Watt, G. (1988). Estimates for the Added Mass of a Multi-Component Deeply Submerged Vehicle (Report No.88/213). Defence Research and Development Canada. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a203234.pdf>

Watt, G. D. (2007). Modelling and Simulating Unsteady Six Degrees-of-Freedom Submarine Rising Maneuvers (Report No. 2007-008). Defence Research and Development Canada. Retrieved from <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.466.3653&rep=rep1&type=pdf>

Wetzel, T. G., & Simpson, R. L. (1996). Unsteady Flow Over a 6: 1 Prolate Spheroid (Report No. VPI-AOE-232). Advanced Research Project Agency. Retrieved from https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/28502/LD5655.V856_1996.W489.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Whitfield, C. C. (1999). Steady and Unsteady Force and Moment Data on a DARPA2 (Master's thesis, Virginia Tech, Blacksburg, VA). Retrieved from <https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/34333/thesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Wu, L., Li, Y., Liu, K., Sun, X., Wang, S., Ai, X., ... Feng, X. (2020). Hydrodynamic Performance of AUV Free Running Pushed by a Rotating Propeller with Physics-Based Simulations. *Ships and Offshore Structures*, 1–13. <https://doi.org/10.1080/17445302.2020.1786237>

Yan, K. C., & Wu, L. H. (2007). A Survey on the key technologies for underwater AUV docking. *Robot*, 29(3), 267–273.

Zierke, W. C. (1997). A Physics-Based Means of Computing the Flow Around a Maneuvering Underwater Vehicle (Report No. TR 97-002). Applied Research Laboratory. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a322316.pdf>