

İnsansız Deniz Araçları İçin Hız Geri Beslemeli İtiş Denetimi

Buğra Alkan, Ünver Özkol, M. İ. Can Dede

Makine Mühendisliği Bölümü

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Urla İzmir

bugraalkan@iyte.edu.tr, unverozkol@iyte.edu.tr, candede@iyte.edu.tr

Özetçe

Deniz araçlarının manevra ve enerji tüketimi özelliklerinin iyileştirilebilmesi için, hassas itiş modeline sahip denetleyicilere sahip olmaları gerekir. Operasyon koşullarında çevresel akış etkileri, araç hidrodinamiği, pervane ve motor karakteristikleri gibi faktörler, itiş performansı ve üretilen itme kuvveti üzerinde büyük etkiler yapmaktadırlar. Bu nedenle çevresel akışın itici sistem üzerinde olan etkilerinin ve sistem karakteristiklerinin incelenebileceği bir açık su deney düzeneği tasarlanmıştır. Bu deney düzeneği vasıtasıyla düşük operasyon hızlarında faaliyet gösterecek pervaneli bir test iticisinin çeşitli çevresel akış koşullarında sergilediği tepkiler gözlenmiş, boyutsuz pervane parametrelerinin ve motor karakteristiğinin çıkarılması çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda hız geri beslemeli itme kuvveti denetimi geliştirilmiş olup, çeşitli akış senaryolarında testler yapılarak sonuçlar tartışılmıştır.

1. Giriş

Günümüz dünyasında, sivil ve askeri alanda can kurtarma, keşif, gözetleme gibi birçok değişik görevde kullanılabilen insansız deniz araçlarına verilen önem giderek artmaktadır. Bu artan ilgi göze alındığında araştırmacılar bu tür deniz araçlarının denetimi ve benzetimi konusunda ciddi çalışmalar ortaya koymaktadırlar. Araç kontrolü söz konusu olduğunda, gerek aracın enerji tüketiminin optimizasyonunda, gerekse performans ve manevra kabiliyetinin geliştirilmesinde, sistemin en temel girdisini oluşturan aracın itici sisteminin denetlenmesi büyük önem arz etmektedir. İnsansız deniz araçlarında itiş gücü, genellikle elektrik motorları tarafından sürülen pervaneler vasıtasıyla üretilmektedir. Buna bağlı olarak itiş gücü, sistem karakteristikleri ve hidrodinamik etkiler gibi çeşitli parametrelere bağlı olarak değişmektedir [1]. Bu değişkenler nedeniyle zorlaşan itiş sisteminin modellenmesi, çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiş ve farklı itiş modelleri geliştirilmiştir.

1990 yılında D. R. Yoerger ve ekibi [2] tarafından hazırlanan makalede, insansız denizaltı araçları için motor karakteristiğini de içeren yeni bir itiş gücü modeli geliştirilmiştir. Sonraki yıllarda araştırmacılar mevcut itiş modeline çevresel su akışının etkisini de katarak iki evrelili yeni bir model oluşturmuşlardır [3]. 1999 yılında iki yeni model tabanlı itiş gücü denetimi geliştirilmiş ve bu kontrolleri mevcut kontrollerle karşılaştıran deneyler yapılmıştır [4]. Bir yıl sonra yayınlanan çalışmada [5], araç hızının itiş gücüne olan etkilerini boyutsuz pervane parametreleri yardımıyla araştırılarak, bulunan sonuçlar ışığında yeni bir itiş denetimi

geliştirilmiştir. Fakat çevresel akış etkilerini içermeyen bu denetim yaklaşımıyla elde edilen deney sonuçları araştırmacılar tarafından yeterli bulunmamıştır ve çevresel akış etkilerini içeren çalışmalar yapılmaya devam etmiştir. İtiş denetiminde çok önem arz eden çevresel akış etkilerini de içeren yeni bir sistem denetleyicisi 2006 yılında geliştirilmiştir [6]. Araştırmacılar çalışmalarında üç farklı eksensel su akışı sınıflandırması yaparak, çevresel akış hızını, araç ve pervane shaft hızının lineer bir bağıntısı olarak tanımlamayı başarmışlardır. Bu çalışmalar dışında frekans yaklaşımlı itiş modelini [7] ve orta ve büyük ölçekli deniz araçlarının itişlerinin denetlenmesini [8] içeren çeşitli çalışmalar bulunmaktadır.

Bu çalışmada düşük hızlarda faaliyet gösterecek pervaneli bir itiş sisteminin motor ve pervane karakteristikleri incelenmiş, araç hızı ve itiş hidrodinamiğini içinde barındıran bir denetim sistemi geliştirilmiştir. Bildirinin ikinci bölümünde deney düzeneği detaylı bir biçimde ele alınmıştır. Ayrıca deneyler sırasında kullanılan cihazlar ve metodlar hakkında açıklamalara da yer verilmiştir. Üçüncü bölümde boyutsuz pervane parametreleri ile itme kuvveti yakınsama metodu açıklanmıştır. Bu metod ile değişken itme kuvveti isteklerine karşı sistemin verdiği tepkileri ölçmeyi amaçlayan bir takım testler ve sonuçlarına yer verilmiştir. Dördüncü bölümde sonuçlar ve gelecekte yapılması öngörülen çalışmalar özetlenmiştir.

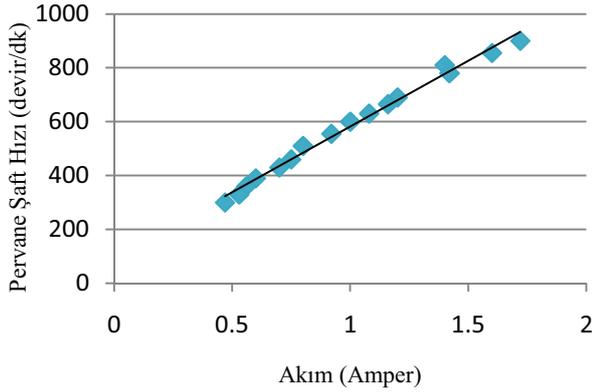
Tablo 1: Terminoloji

Sembol	Açıklama
n	Pervane shaft hızı (devir/sn)
T	İtme gücü (Newton)
T_i	İstenen itme gücü (Newton)
T_g	Gerçek itme gücü (Newton)
ρ	Su yoğunluğu (kg/m^3)
K_T	İtme katsayısı (-)
J	İlerleme katsayısı (-)
V	Voltaj kontrollü giriş (V)
i_g	Akım kontrollü giriş (A)
u_a	Çevresel akışkan hızı (m/sn)
u	Araç hızı (m/sn)
u_p	Pervane çıkışındaki akışkan hızı (m/sn)
k_t	Motor tork katsayısı (Nm/A)
k_s	Sürtünme katsayısı (Nm.sn/devir)
d	Pervane çapı (m)

Kaydedilen sonuçlar ve tank içi türbülans riski göz önüne alındığında çevresel akış hızı en yüksek 0,325 m/sn olacak şekilde sınırlandırılmıştır.

2.2. Şaft Hızının Bulunması

Pervane ve motor karakteristiklerinin belirlendiği açık su performans testlerinde şaft hızı, UGN 3113 Hall etkisi algılayıcısının veri aktarım arabirimine gönderdiği sinyaller sayesinde hesaplanabilmektedir. Sinyaller Matlab programında işlenerek, ardışık iki sinyal arasındaki zaman farkı ile devir tahmini gerçek zamanlı olarak yapılabilmektedir. Şekil 4'te 0,325 m/sn sıfır derece çevresel akış hızındaki, akım ve pervane şaft hızı grafiği verilmiştir.



Şekil 4: Pervane şaft hızı ve akım değerleri.

2.3. Açık Su Performans Testleri ve Boyutsuz Parametreler Analizi

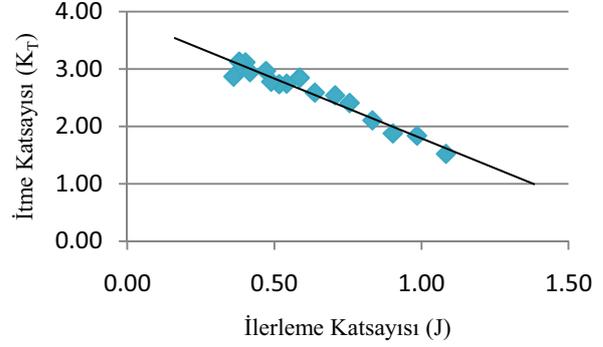
Değişken çevresel akış hızlarında, pervane aynı açısız hızda dönüyor olsa bile, üretilen itme kuvveti değerleri arasında farklılıklar olabilmektedir. Bu açıdan araştırmacılar, pervane uzunluğu, itme kuvveti, akışkan yoğunluğu, pervaneye giren akışkanın hızı, pervane açısız hızı, pervane torku gibi etkenleri içeren boyutsuz performans parametreleri ile pervane karakteristiklerini oluşturmayı amaçlamışlardır. Bunlardan en önemlileri denklem (1)'de verilen ilerleme katsayısı ve (2)'de verilen itme katsayısıdır.

$$J = \frac{u}{dn} \quad (1)$$

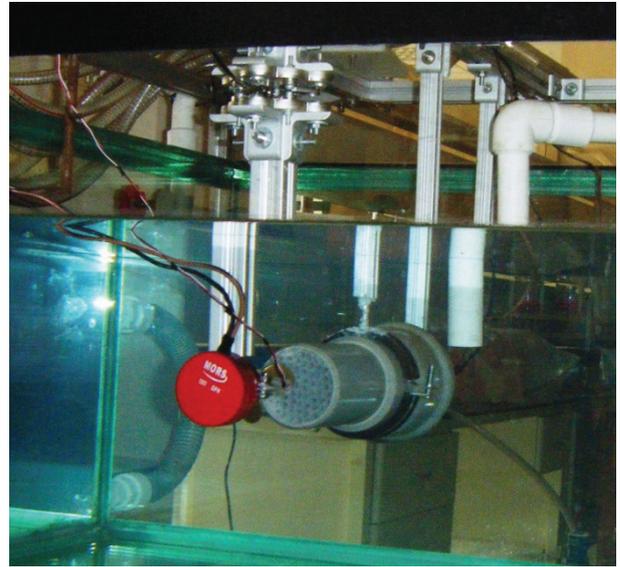
$$K_T = \frac{T}{\rho d^4 |n|n} \quad (2)$$

Bu parametreler açık su performans testlerinde, +0.325, +0.25 ve +0.15 m/sn çevresel akış hızlarında incelenmiş olup. Her farklı çevresel akış hızında, 300 ile 900 devir/dakika arasındaki pervane şaft hızları için, sistem durağan hale geçtikten sonra ortalama itme kuvveti, devir sayısı, çevresel akış hızı, elektriksel voltaj ve akım değerleri kayıt edilmiştir. Sonuçlarda ilerleme katsayısı ve itme katsayısı arasında (0 ve +1 ilerleme katsayısı aralığında) lineer bir bağlantı bulunmuştur. Bu bağlantının bulunması için şekil 5'teki

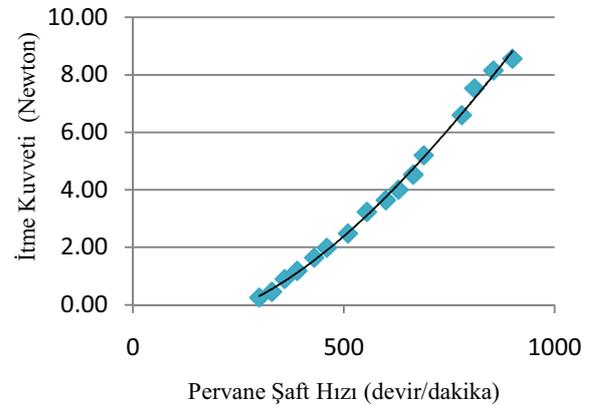
grafikten yararlanılmıştır. Deneylerde kuvvet algılayıcısından gelen gürültüyü gidermek adına Matlab programında 10 Hz'lik alçak geçiren filtre uygulanmıştır. Deney düzeneğinin genel görünümü ve 0.325 m/sn çevresel akış hızındaki itme kuvveti pervane şaft hızı grafiği şekil 6 ve 7'de verilmiştir.



Şekil 5: İlerleme ve itme katsayısı grafiği.



Şekil 6: Deney düzeneğinin genel görünümü.



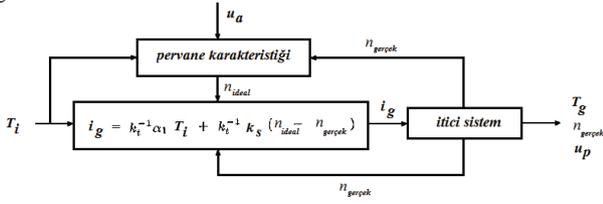
Şekil 7: Pervane şaft hızı ve itme kuvveti değerleri.

3. Hız Geri Beslemeli İtiş Denetimi ve Deney Sonuçları

İtıcıların arzu edilen itme kuvvetlerini tüm operasyon koşullarında sağlaması, aracın manevra kabiliyeti ve enerji tüketimi açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu yüzden bu bölümde içerisinde bir önceki bölümde anlatılan test düzeneği ve metotlar vasıtasıyla karakteristiği çıkarılan pervane dinamiğini de barındıran hız geri beslemeli itici sistem denetimi üzerinde durulmuştur.

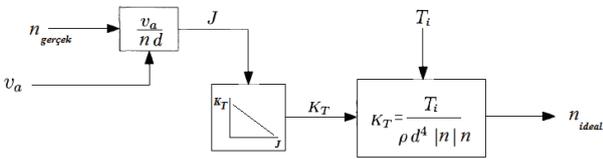
3.1. Hız Geri Beslemeli İtme Kuvveti Yakınsama

Bu yakınsama modelinde, itiş kontrolü iki farklı adımda gerçekleştirilmektedir. İlk adımda açık döngülü akım denetimi ile motor sürülmektedir. İkinci adımda ise akım denetimi ile sürülen pervaneden gelen hız bilgileri ile pervane karakteristiğinden elde edilen ideal hız karşılaştırılıp sürtünme kayıpları ve açık döngülü denetimden meydana gelen hatalar telafi edilmektedir. Şekil 8’de hız geri beslemeli itiş denetimi blok şeması verilmiştir. Bu şemada istenen itme kuvveti değeri (T_i) ve çevresel akış hızı (u_a), denetime gerçek zamanlı olarak iletilmektedir. Ayrıca Hall etkisi algılayıcıdan elde edilen pervane şaft hızı hem pervane karakteristiği hem de ana denetim bloğuna beslenerek, denklem (5)’te verilen hız geri beslemeli itiş denetimi formülü sayesinde iticiye gerekli akım gönderilmektedir.



Şekil 8: Hız geri beslemeli itme kuvveti kontrolü blok şeması.

Şekil 9’de ise gerçekleşen dönüş hızının ölçülmesi ile istenen itiş gücü için gerekli ideal pervane dönüş hızının, pervane karakteristiği yardımıyla hesaplanması anlatılmıştır. Hesaplama ilk önce çevresel akış hızı ve pervane şaftı devir sayısı ile değişebilen ilerleme katsayısı bulunmaktadır. Daha sonra ilerleme katsayısı – itme katsayısı grafiğinden, mevcut durumda sahip olunan itme katsayısı elde edilmektedir. Bu katsayı yardımıyla istenen itme kuvvetine ulaşmak için gerekli ideal dönüş hızı hesaplanarak denetime beslenmektedir.

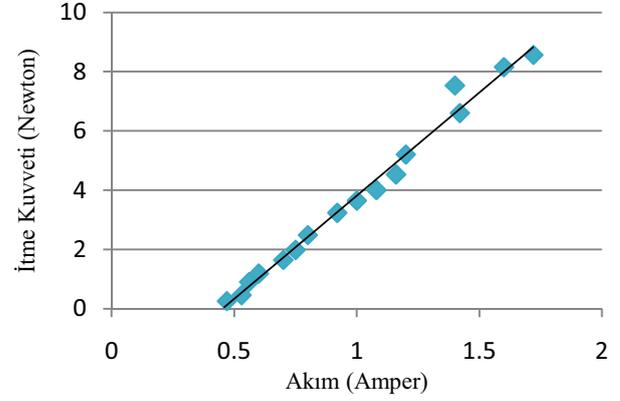


Şekil 9: Pervane karakteristiği blok şeması.

Su altı robotlarının itiş kontrolünde sıklıkla kullanılan açık döngülü akım denetimi için kaynaklarda bulunan çalışmalarda da [4] belirtildiği gibi hesaplanmaktadır. Açık döngülü itme denetleyicisi çıkış akımı (i_a), istenilen itme kuvveti (T_i), motor tork katsayısının (k_t) çarpımına göre tersi ve deneysel olarak en uygun sonucu veren sabit bir katsayının (α) çarpımına

denklem (3)’te gözükten şekilde eşitlenmiştir. Şekil 10’da verilen elektriksel akım - itme kuvveti grafiğinde görüldüğü üzere akım - kuvvet bağıntısı doğrusal kabul edilmiştir. Bu bağıntı yardımıyla α katsayısı hesaplanmıştır.

$$i_a = k_t^{-1} \alpha T_i \quad (3)$$



Şekil 10: İtme kuvveti – elektriksel akım grafiği.

Hız geri beslemesi bölümü ise, kaynak [4]’te yapılan hız geri beslemeli itme denetiminde yapılan sürtünme kayıplarının telafisinin geliştirilmiş bir sürümüdür. Bu bildiriye sunulan çalışmada, değişken ilerleme katsayısı ve itme kuvveti isteğini sürekli değerlendirerek sisteme değişik itme katsayıları gönderen, bu sayede sistemin hassasiyetini arttıran sürekli pervane karakteristiği hesaplaması kullanılmaktadır. Buna göre, denetleyici, bilinen araç ve pervane dönüş hızında ulaşılan ilerleme katsayısını hesaplayarak (J), lineer olan J - K_T bağıntısından itme katsayısını (K_T) bulmaktadır. Daha sonra mevcut ilerleme katsayısında, istenen ve üretilen itme kuvvetlerini karşılaştırmak adına, istenilen itme kuvvetini itme katsayısı bloğuna gönderip istenen itme kuvvetinin sağlanabileceği ideal devir sayısı elde edilmektedir. İdeal dönüş hızının hesaplanmasından sonra bu hız, gerçek hız ile kıyaslanarak, hız kayıpları elde edilir ve bu kayıplar deneysel olarak bulunan bir sürtünme katsayısıyla (k_s) ve motor tork katsayısının çarpımına göre tersiyle çarpılarak akıma eklenir (4). Bu sayede sürtünmeden ve açık uçlu akım kontrolünden meydana gelen kayıplar ve hatalar telafi edilmeye çalışılarak sistem hassasiyeti artırılmıştır.

$$i_s = k_t^{-1} k_s (n_{ideal} - n_{gerçek}) \quad (4)$$

$$i_g = k_t^{-1} \alpha T_i + k_t^{-1} k_s (n_{ideal} - n_{gerçek}) \quad (5)$$

Denklem (5)’te verilen giriş akımı formülüyle, kayıplardan meydana gelen ideal ve gerçek devir arasındaki fark giderilerek, hassas itme kuvveti girdisi izlenmesi için gerekli denklem elde edilmiştir.

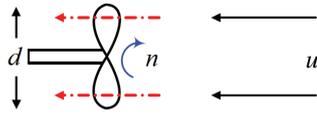
3.2. İlk Deneyler ve Sonuçları

İlk deneyler iki iticinin aynı yönlü su akımı yarattığı koşullarda yapılan itme kuvveti denetimi testlerini

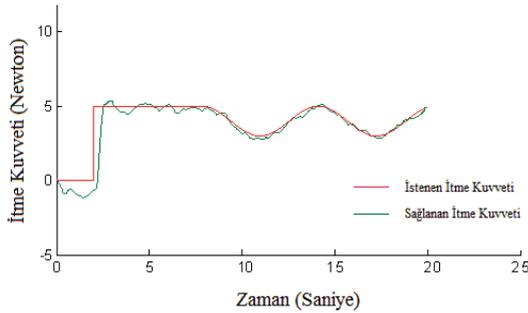
içermektedir. Arka iticinin sağladığı doğrusal su akışının hızı 0.325 m/sn olarak sabitlenmiş olup, yapılan kabuller aşağıda belirtilmiştir.

- Akışkan sürtünme kayıpları ihmal edilmiştir
- Akışkan sıkıştırılmaz kabul edilmiştir.
- Akışkan, itici giriş ve çıkışında paralel ve çevre basıncındadır.
- Arka iticiden gönderilen su akımı, kontrol iticisine sıfır derece açıyla girmektedir. (Şekil 11)
- Arka iticiden gönderilen su akımının hızı, sanal araç hızına eşittir.

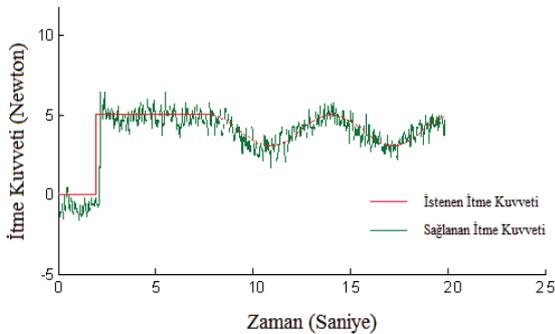
Deneylerde ilk saniyede arka itici çalıştırılmaya başlanmış kontrol iticisine 2. saniyede 5 Newton'luk bir istek gönderilmiştir. 8. saniye sonuna kadar 5N'luk itme kuvveti isteği devam edip, 8 ve 20. saniyeler arasında iticiye 5 ve 3N'luk kuvvetler arasında değişen bir sinüs sinyali gönderilmiştir. Bu sayede sistemin ani değişken, sabit ve sürekli değişken itme kuvveti isteklerine verdiği yanıtlar gözlemlenebilmiştir.



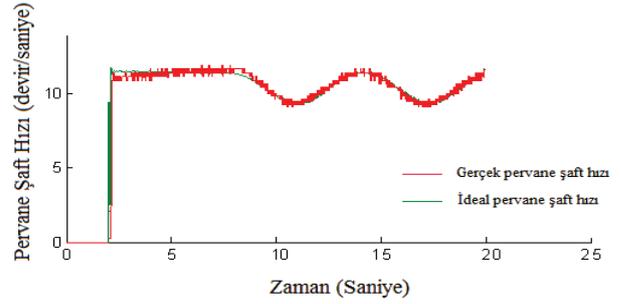
Şekil 11: Akış yönü şeması.



Şekil 12: İtme kuvveti yakınsama modeli ile deneysel itici sistem kontrolü. (10 Hz alçak geçiren filtrelidir)



Şekil 13: İtme kuvveti yakınsama modeli ile deneysel itici sistem kontrolü. (filtresiz)



Şekil 14: İdeal ve gerçek pervane şaft hızı karşılaştırması.

Şekil 12 ve 13'te gözlemlenebileceği gibi 0 ve 2. saniyeler arasında kontrol iticisi çalışmamakta fakat arka itici, denetlenen iticinin pervanesine su akışı göndermektedir. Bu su akımının yarattığı negatif itme kuvveti yüzünden kontrol iticisi çalışana kadar geçen zaman dilimi içinde negatif bir itme kuvveti oluşmuştur.

Denetleyici testlerinin sonunda ilk deneylerde istenen ani itme kuvveti isteği önemli miktarda yükselme olmadan hızlı bir şekilde karşılanmıştır. Devamında gelen sabit itme kuvveti isteği belirli tolerans aralığındaki salınımlarla gerçekleştirilmiştir. Deneyin son kısmındaki sinüs profil isteği de Şekil 12 ve 13'te gözlemlenebileceği gibi belirli tolerans aralığındaki salınımlarla gerçekleştirilmiştir. Şekil 14'te ideal pervane dönüşü ile ölçülen pervane dönüşü karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonunda, denetleyicinin pervane dönüşü için kabul edilebilir bir takip sağladığına karar verilmiştir.

Deney boyunca çevresel akış hızı, arka itici akımıyla bağlantılı olarak denetleyici içine beslenebilmektedir. Gerçek koşullarda ise bu denetim sistemi kullanılarak, araç hızı (araç hız düşme katsayısı biliniyor ise) gerçek zamanlı olarak sisteme beslenerek, ilerleme katsayısı ve itme kuvveti tahmini yapılabilir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada düşük hızlı operasyon koşullarında faaliyet gösterecek, pervaneli bir iticinin, hız geri beslemeli itme kuvveti denetimi ile açık su performans testleri sunulmuştur. İnsansız deniz araçlarının itiş sistemleri, değişken okyanus akıntıları, ventilasyon, bilinmeyen pervane ve motor karakteristikleri, araç hidrodinamiği gibi birçok etken yüzünden istenilen performanslarda çalışmamaktadırlar. Bu etkenlerin minimize edilerek itiş denetiminin daha sağlıklı hale getirilmesi için, sistem karakteristiklerinin ve çevresel faktörlerin itici üzerindeki etkilerinin çok detaylı bir biçimde incelenmesi gerekmektedir. Bildiride yer alan çalışmamızın ilk evresinde pervane ve motor karakteristikleri sadece ileri itiş geri çevresel akım hızı koşullarında incelenmiştir. Denetleyicinin tüm koşullarda sağlıklı sonuçlar vermesi adına çalışmamın ilerleyen safhalarında diğer operasyon koşullarının da gerçekleştirileceği deneyler ile sistem denetleyicisi tasarımı tamamlanacaktır. Ayrıca hâlihazırdaki test sisteminde kuvvet ölçüsü ile arka iticinin aynı bloğa bağlanması sonucunda

meydana gelen titreşim problemlerinin giderilmesi adına deney düzeneğinin arka itici bağlantı noktasına titreşim sönümleyiciler takılacaktır veya arka sönümleyicinin bağlantı noktası başka bir taşıyıcı bloğa taşınacaktır. Yapılan ilk test sonuçlarında görüldüğü gibi istenilen itme kuvvetini yakalama konusunda hız geri beslemeli itme kuvveti denetimi ani, sabit ve değişken itme kuvveti isteklerine kabul edilebilir tepkiler vermektedir.

5. Kaynakça

- [1] J.S. Carlton, "Marine Propellers and Propulsion," Butterworth Heinemann, 1994.
- [2] D.R. Yoerger, C.G. Cooke ve J.J.E. Slotine, "The Influence of Thruster Dynamics on Underwater Behavior and Their Incorporation Into Control System Design," *IEEE J. Oceanic Eng* Vol. 15, No.3 pp. 167-178, 1997.
- [3] A. J. Healey, S. M. Rock, S. Cody, D. Miles, ve J. P. Brown, "Toward an Improved Understanding of Thruster Dynamics for Underwater Vehicles," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 20, no. 4, pp. 354-361, 1995.
- [4] L. L. Whitcomb ve D. R. Yoerger, "Development, Comparison, and Preliminary Experimental Validation of Nonlinear Dynamic Thruster Models," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 24, no. 4, pp. 481-494, 1999.
- [5] M. Blanke, K.P. Lindegaard, ve T. I. Fossen, "Dynamic Model for Thrust Generation of Marine Propellers," *IFAC Conf. Maneuvering and Control of Marine Craft (MCMC'2000)*, 2000.
- [6] J. Kim, J. Han, W. K. Chung, J. Yuh, ve P.M. Lee, "Accurate and Practical Thruster Modeling for Underwater Vehicles," *IEEE International Conference on Robotics and Automation Orlando, Florida*, 2006.
- [7] Matthieu Vonnet, Nadia Air-Ahmed ve Luc Loron, "Marine Propeller Dynamics Modelling Using a Frequency Domain Approach," *5th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*, 2008.
- [8] Asgeir J. Sørensen, Øyvind Smogeli ve Eivind Ruth, "Propulsion Control Strategies for Fixed Pitch Propellers at Low Advance Speed," *First International Symposium on Marine Propulsors Smp'09, Trondheim, Norway*, 2009.