

KIYI VE LİMANLARDAKİ LAGRANGE SÜRÜKLENMESİNİN SEYREK DOĞRUSAL OLMAYAN DİNAMİK SİSTEM ALGORİTMASIYLA BELİRLENMESİ

Ali Rıza ALAN *^{ID}
Cihan BAYINDIR **^{ID}

Alınma: 03.04.2024; düzeltme: 08.08.2024; kabul: 25.09.2024

Öz: Bu çalışmada, doğrusal olmayan dinamiklerin seyrek tanımlanması veya SINDy (sparse identification of nonlinear dynamics) olarak bilinen yaklaşımın, kıyı ve liman hidrodinamik süreçlerini kontrol eden mekanizmaların benzeşimi için uygulanabilirliği incelenmiştir. SINDy yaklaşımının temel amacı, hesaplamalı veya ölçüm teknikleriyle belirlenen parçacıkların ve nesnelerin sürüklenme rotalarını açıklamak için mümkün olan en az seyrek bileşenli adi diferansiyel denklemleri (ADD) kullanmaktır. Atlas Okyanusu'nda Karayip Denizi'nde yüzen bir şamandıra kullanılarak elde edilen Lagrange sürüklenme cihazı verilerinden yararlanılarak, sürüklenme rotası ve zaman serilerinin SINDy algoritmasının trigonometrik bileşenlerinin hem olması hem de olmaması durumlarında kıyı ve liman hidrodinamiğindeki hidrodinamik etkileri modellemek için olası kullanımı araştırılmıştır. SINDy ile Lagrange sürüklenicisi denklemlerinin verilerden geriçatılabileceği gösterilmiştir. Belirlenen türden olay ve afetlerde, SINDy tabanlı algoritmik tekniğin, bir bölgeye özgü kıyı ve liman hidrodinamiği denklemlerini güvenilir ve hızlı bir şekilde tahmin edebileceği önerilmiştir. Ayrıca bulgularımızın olası çalışma alanları, kullanım konuları ve pratik uygulamalarına ilişkin bir değerlendirmeye de yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hesaplamalı seyrek sistemler, Kıyı hidrodinamiği, SINDy, Lagrangian-SINDy

Identification of Lagrangian Drifting by Sparse Nonlinear Dynamic System Algorithm

Abstract: In this study, the applicability of the approach known as sparse identification of nonlinear dynamics (SINDy) for the simulation of the mechanisms controlling coastal and harbor hydrodynamic processes was examined. The main goal of the SINDy approach is to use ordinary differential equations (ODEs) with as few sparse components as possible to describe the drift trajectories of particles and objects determined by computational or measurement techniques. Using Lagrangian drift device data obtained using a floating buoy in the Caribbean Sea in the Atlantic Ocean, the possible use of the drift route and time series of the SINDy algorithm with and without trigonometric terms to model hydrodynamic effects in coastal and harbor hydrodynamics is investigated. It has been shown that Lagrangian drifter equations can be reconstructed from data with SINDy. It has been suggested that, for specified types of events and disasters, the SINDy-based algorithmic technique can reliably and quickly estimate the coastal and harbor hydrodynamic equations specific to a region. An evaluation of possible study areas, usage areas, and practical applications of our findings is also included.

Keywords: Computational sparse systems, Coastal hydrodynamics, SINDy, Lagrangian-SINDy

* İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Sarıyer, İstanbul, Türkiye

** İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Sarıyer, İstanbul, Türkiye
İletişim Yazarı: Ali Rıza ALAN (alan21@itu.edu.tr)

1. GİRİŞ

Kıyı ve liman alanlarında gözlenen dalga, akıntı, türbülans, Lagrange sirkülasyonu gibi hidrodinamik etkilerin modellenmesi, kıyı erozyonu, kirlilik, müsülaj yayılması gibi çeşitli olayların mekanizmalarının anlaşılması ve tahminlerde bulunulması için deniz ortamının karmaşıklığının kavranması gerekir. Bu amaçla kullanılan birçok yöntem büyük miktarda veriye dayansa da sürekli değişen kıyı ve deniz koşullarına yavaş yavaş uyum sağlama eğilimindedir.

Lagrange sürüklenicisi okyanus çalışmaları bu tür çalışmalar için kritik öneme sahiptir (Davis, 1991). Dünya üzerindeki okyanuslar boyunca farklı zamansal ve uzaysal çözünürlüklere sahip oşinografik parametreleri ölçmek için birçok farklı sürüklenme cihazı devamlı olarak kullanılmaktadır (Elipot ve diğ., 2016; Lin ve diğ., 2017; Liu ve Weisberg, 2011). Sörf bölgesi akıntıları (MacMahan ve diğ., 2009; Spydell ve diğ., 2007) ve burun bölgesi çeken akıntıları (McCarroll ve diğ., 2014) dahil olmak üzere pek çok farklı tehlike ve olay türü Lagrange sürüklenme cihazları tarafından ölçülmektedir.

Bu makale, Lagrange sürüklenme dinamiğinin ve temel ADD kümelerinin oluşturulmasında doğrusal olmayan dinamiklerin seyrek tanımlanması (SINDy) algoritmasının kullanımını tanıtmayı ve araştırmayı amaçlamaktadır (Brunton ve diğ., 2016a). Dinamik bir sistemin bir dizi anlık görüntüsü ve buna karşılık gelen zaman türevleri verildiğinde, SINDy, bünye denklemleri bulmak için türevlere karşı anlık görüntülerin doğrusal olmayan aday fonksiyonlarından oluşan bir kitaplık üzerinde seyrekliği teşvik eden bir regresyon gerçekleştirir. Bu prosedür, uygun şekilde seçilmiş bir koordinat sistemi ve kaliteli veri setleri analiz edildiğinde, çoğu fiziksel sistemin yalnızca dinamikleri belirleyen birkaç baskın terime sahip olduğu varsayımına dayanır (Brunton ve diğ., 2016a; Brunton ve diğ., 2016b). SINDy biyolojik ağlar gibi diğer karmaşık dinamik sistemlerin yanı sıra, uygun ortogonal ayırmaya dayalı olarak akışkanların dinamiklerini tanımlamak, KdV ve Schrödinger gibi denklemlerle modellenen süreçlerin ve kaos denklemlerinin belirlenmesi vb. birçok dinamik sistemin analizinde kullanılmıştır (Brunton ve diğ., 2016a; Brunton ve diğ., 2016b).

Bu motivasyonla, yüzey sürüklenme şamandırası kullanılarak elde edilen bir veri setine SINDy algoritması uygulanmış ve onun yörünge dinamikleri SINDy algoritmasıyla hem trigonometrik bileşenlerin olması hem de olmaması durumlarında oluşturulmuştur. Sonrasında çalışmanın potansiyel kullanımları ve gelecekteki araştırma yönleri tartışılmıştır.

2. METODOLOJİ

2.1. Doğrusal Olmayan Dinamiklerin Seyrek Tanımlanması (SINDy) Algoritması

Bu bölümde, ilk olarak Brunton ve diğ. (2016a) tarafından tanıtılan SINDy algoritmasının kısa bir incelemesi sunulmaktadır. Dinamik bir sistem formu Denklem 1'de verilmiştir.

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x(t)) \quad (1)$$

Hareket dinamiklerinin çoğunluğu doğada bu formda tanımlanabilir (Brunton ve diğ., 2016a). Burada $x(t)$ bir sistemin t anındaki durumunu göstermektedir (Brunton ve diğ., 2016a). $f(x(t))$ fonksiyonu ele alınan sistemin hareket denklemini tanımlamaktadır (Brunton ve diğ., 2016a). SINDy algoritması, f için geniş bir potansiyel aday fonksiyonlar kümesi oluşturmakta, ardından bu aday fonksiyonlar arasındaki baskın terimleri belirlemek için seyrekliği teşvik eden bir l_1 -düzenlenmiş regresyon kullanmaktadır (Brunton ve diğ., 2016a). Verileri kullanarak f 'yi belirlemek için $x(t)$ durumunun bir zaman serisi kullanılabilir (Brunton ve diğ., 2016a).

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}(t_1) \ \mathbf{x}(t_2) \ \dots \ \mathbf{x}(t_m)]^T \quad (2)$$

Burada T terimi devrik işlemi ifade etmektedir. m zaman içindeki gözlemlerin sayısını temsil etmektedir. n ise \mathbf{x} durumunun boyutudur. \mathbf{x} gözlemler yapıldıktan sonra türev matrisi

$$\dot{\mathbf{X}} = [\dot{\mathbf{x}}(t_1) \ \dot{\mathbf{x}}(t_2) \ \dots \ \dot{\mathbf{x}}(t_m)]^T \quad (3)$$

birçok basit yaklaşımla kolayca hesaplanabildiği gibi doğrudan da ölçülebilir. Daha sonra, aşağıdaki formdaki olası bir doğrusal olmayan fonksiyon kümesi

$$\Theta(\mathbf{X}) = [\mathbf{1} \ \mathbf{X} \ \mathbf{X}^2 \ \dots \ \mathbf{X}^d \ \dots \ \sin(\mathbf{X}) \ \dots] \quad (4)$$

\mathbf{X} hesaba katılarak oluşturulur. Burada d polinomların derecesini belirtmektedir. $\sin(\mathbf{X})$ terimi ise $\sin(\mathbf{X})$, $\sin(2\mathbf{X})$ gibi trigonometrik fonksiyonları temsil etmektedir. Zamana göre türevleri aday doğrusal olmayan fonksiyonlarla ilişkilendirerek Denklem 5 yazılabilir:

$$\dot{\mathbf{X}} = \Theta(\mathbf{X})\mathbf{\Xi} \quad (5)$$

Burada $\mathbf{\Xi}$, ξ_k sütun vektörlerini içeren matristir. Bu ξ_k seyrek katsayı vektörlerini tanımlayarak Denklem 6 yazılabilir:

$$\dot{x}_k = \Theta(\mathbf{x})\xi_k \quad (6)$$

SINDy, seyrekliği teşvik eden l_1 -düzenlenmiş regresyon olarak en az mutlak küçültme ve seçim operatörünü (least absolute shrinkage and selection operator LASSO) kullanır. Dolayısıyla regresyon problemi şu şekilde formüle edilebilir:

$$\xi_k = \arg_{\xi_k'} \min \|\dot{\mathbf{X}}_k - \Theta(\mathbf{X})\xi_k'\|_2 + \lambda \|\xi_k'\|_1 \quad (7)$$

Burada λ düzenleme parametresidir ve tüm olası ξ_k' adaylar arasından seyrek ξ_k vektörleri tanımlanır (Brunton ve diğ., 2016a). SINDy algoritmasının daha kapsamlı bir tartışması için okuyucu Brunton ve diğ. (2016a) referansına yönlendirilmektedir. Ek olarak, SINDY algoritmasının, kontrollü SINDy (SINDy-C) (Brunton ve diğ., 2016b), sınır değeri problemleri için SINDy (SINDy-BVP) (Shea ve diğ., 2021) ve Lagrange fonksiyoneli belirlenmesi için SINDY (xL- SINDy) (Purnomo ve Hayashibe, 2023) dahil olmak üzere birçok uzantısı literatürde mevcuttur. SINDy algoritmalarının bazı uygulamaları ve hidrodinamik üzerindeki uzantıları da literatürde tartışılmaktadır (Fukami ve diğ., 2021). Bu çalışmada, deniz vb. hidrodinamik ortamlardaki Lagrange sürüklenmelerinin hareketini tanımlayan dinamik ADD'lerin belirlenmesinde SINDy algoritmasının olası kullanımını araştırılmaktadır. Bu kısa girişin ardından, sonuçlar ve tartışma kısmında, Lagrange sürüklenme cihazı gözlemleri incelenmekte ve bunların dinamiklerinin SINDy akıllı algoritması aracılığıyla elde edilmesi tartışılmaktadır. Çıkarımlar kısmında bulgularımız, olası kullanım alanları ve sınırlamalar tartışılmaktadır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. Çalışma Alanı ve Lagrange Sürüklenme Cihazı Verisi

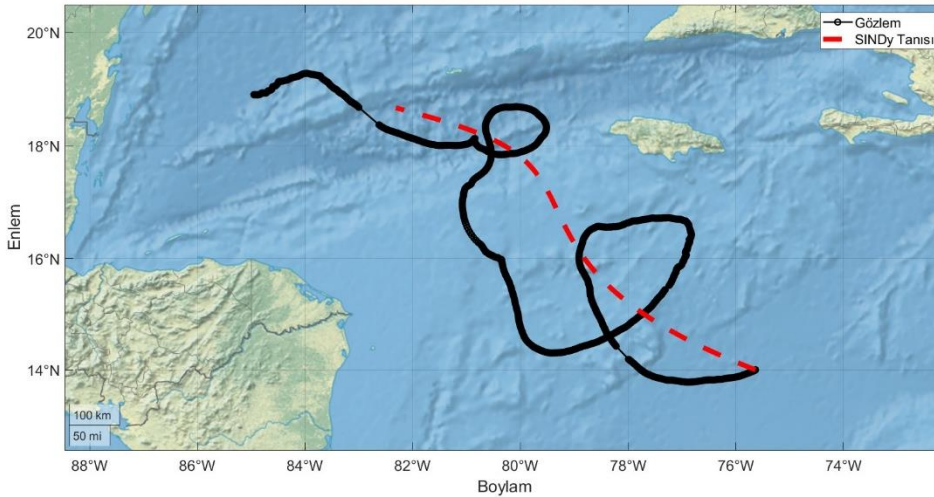
Bu makalede elde edilen Lagrange sürüklenme cihazı verileri, ABD Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi'nin (NOAA) Fiziksel Oşinografi Birimi'nin <https://www.aoml.noaa.gov/phod/gdp/real-time-data.php> adresinden erişilebilen web portalından alınmış olup kısıtlı bir süre veriye erişim bulunmaktadır. Sürüklenen cihazın Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) kimlik numarası 4102557 olup, bu cihaz bir sürüklenen şamandır. Cihaz sırasıyla 2024-02-22T01:00:00Z ve 2024-04-28T08:00:00Z başlangıç ve bitiş tarihleri arasında veri elde etmiştir. Sürüklenme cihazıyla elde edilen bu verinin yörüngesinin başlangıç koordinatları sırasıyla [Enlem: 14,002 Boylam: -75,6302] olup bitiş noktası olarak [Enlem: 18,9040 Boylam: -84,8257] noktası seçilerek SINDy algoritmasıyla analizi yapılmıştır. Yörünge boyunca örnekleme süresi 1 saattir.

3.2. Trigonometrik Terimler Olmadan SINDy Kullanılarak Lagrange Yörünge Tespiti

SINDy algoritmasını Lagrange sürüklenme cihazı verilerine uygulayarak, Denklem 8'de verilen $\mathbb{E}_{21 \times 2}$ seyrek katsayı matrisi elde edilir.

$$\mathbb{E}_{21 \times 2} = 10^3 \times \begin{bmatrix} 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 \\ -1,0339 & -3,1209 \\ -0,4008 & -1,3455 \\ -0,0375 & -0,1455 \\ 0,0000 & 0,0000 \\ \vdots & \vdots \\ 0,0000 & 0,0000 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Bu analizde olası doğrusal olmayan fonksiyonlar için 5. derece polinom kullanılmıştır, ancak hiçbir trigonometrik terim kullanılmamıştır. Ölçülen Lagrange sürüklenme cihazı yörüngesinin ve bunun SINDy algoritması aracılığıyla tanımlanmasının karşılaştırılması Şekil 1'de sunulmaktadır.

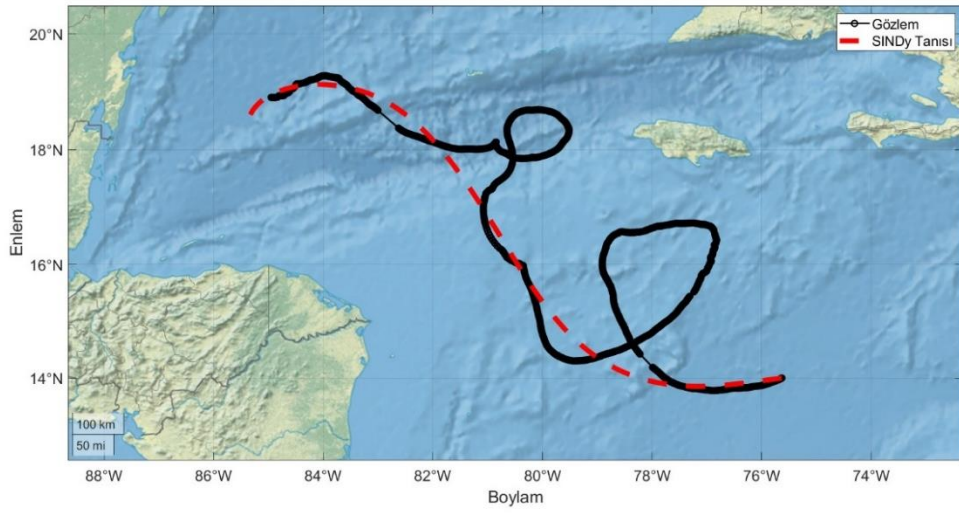


Şekil 1:
Trigonometrik terimler olmadan SINDy kullanılarak Lagrange yörünge tespiti

Şekil 1’de gösterildiği gibi, bir miktar uyumsuzluk gözlenmesine rağmen SINDy algoritması Lagrange sürüklenme cihazı yörüngesini belirlemede başarılıdır ve dolayısıyla sürüklenme cihazı konumlarını tahmin etmek ve geriye dönük tahmin yapmak için kullanılabilir. Deniz olaylarının, afetlerin ve kazaların yerini daha kısa sürede ve daha az tarama yaparak tespit etmek için kullanımı arama ve kurtarma çalışmalarının başarısının artırılmasında önemli katkı sağlayacaktır.

3.3. Trigonometrik Terimlerle SINDy Kullanılarak Lagrange Yörünge Tespiti

Bu kısımda önceki analize benzer şekilde yine 5. derece polinom kullanılmış, ancak bu terimlere ek olarak trigonometrik terimlerle birlikte SINDy algoritması uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2:
Trigonometrik terimlerle SINDy kullanılarak Lagrange yörünge tespiti

Lagrange sürüklenme cihazı ADD kümesinin seyrek gösterimine karşılık gelen SINDy algoritması tarafından oluşturulan $\Xi_{61 \times 2}$ matrisi Denklem 9’da verilmiştir. Burada Ξ matrisinin boyutu, yeni trigonometrik aday fonksiyonlar nedeniyle önemli ölçüde artmaktadır.

$$\mathbb{E}_{61 \times 2} = 10^5 \times \begin{bmatrix} 0,0160 & -0,0222 \\ 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 \\ -0,0067 & 0,0248 \\ 0,0000 & 0,0000 \\ \vdots & \vdots \\ 0,0000 & 0,0000 \\ -6,0792 & 5,1207 \\ 2,6406 & -4,2059 \\ 0,0000 & 0,0000 \\ \vdots & \vdots \\ 0,0000 & 0,0000 \\ 3,6475 & -3,0724 \\ -1,5843 & 2,5234 \\ -0,0048 & 0,0043 \\ -0,0111 & 0,0179 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Daha önce olduğu gibi, SINDy algoritması Lagrange sürüklenme cihazı yörüngesini belirlemede başarılıdır. Önceki durumla karşılaştırıldığında, trigonometrik terimler kullanıldığında SINDy algoritması, sürüklenen yolun eğri davranışının mevcut olduğu yörüngede ortalama olarak ve yörüngenin sonuna doğru daha başarılı sonuçlar vermektedir. Bu durum kavislerin ve eğriliğin arttığı kısımlarda gözlenmektedir. Bulgularımız son derece umut vericidir. Çeken akıntıları, aşınan buzdağları, petrol sızıntıları ve sürüklenen arızalı gemiler dahil olmak üzere pek çok kıyı ve okyanus sirkülasyonlarının dinamiklerini tanımlayan denklemlerin belirlenmesinde SINDy ve benzeri algoritmaların kullanılabileceğini belirtmek mümkündür. Olayın ve afetin yerinin tespitinde yüksek başarı oranı ile kurtarma sürelerinin ve maliyetlerinin azaltılması açısından büyük avantajlar sağlayabilir.

4. ÇIKARIMLAR

Bu makalede Lagrange sürüklenme cihazı hareketini tanımlayan seyrek ADD'lerin belirlenmesinde SINDy algoritmasının olası kullanımı analiz edilmiştir. Böyle bir tanımlamada hem polinom hem de polinom-trigonometrik fonksiyonları test edilmiş ve her ikisinin de Lagrange yörüngelerinin oluşturulmasında başarılı olduğu gösterilmiştir. Sonuçlarımız ümit vericidir ve SINDy ve benzer algoritmaların kıyı ve okyanus sirkülasyonlarının, çeken akıntıların, aşınan buzdağlarının, petrol sızıntılarının ve sürüklenen arızalı gemilerin dinamiklerini tanımlayan denklemleri tanımlamak için kullanılabileceğini göstermektedir. Gelecekteki çalışmalarda, gürültü dahil olmak üzere farklı bileşenlere sahip doğrusal olmayan dalga denklemlerinin seyrek dinamiklerini tanımlamak için SINDy algoritmasını genişletmeyi amaçlıyoruz. Ek olarak Holland (1975) ve Goldberg (1989)'da açıklananlar gibi yapay zekâ yöntemleri, yukarıda tartışılan SINDy algoritması ve onun uzantılarına dahil edilebilir. Bayındır ve Namı (2021) ile Bayındır (2015)'teki hidrodinamik analizlere uygulanan sıkıştırılabilir algılama gibi akıllı ölçüm teknikleri de SINDy ve benzeri algoritmalar çerçevesinde yeniden incelenebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Türkiye Bilimler Akademisi (TÜBA)-Üstün Başarılı Genç Bilim İnsanlarını Ödüllendirme Programı (GEBİP) ve İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ)-Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Fonu tarafından MDA-2023-45117, FHD-2023-44985, MGA-2022-43528, MYL-2022-43642, MDK-2021-42849 proje kodlarıyla desteklenmektedir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Ali Rıza ALAN çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesinde, veri toplamada, makale taslağının oluşturulmasında, son onay ve tam sorumlulukta; Cihan BAYINDIR çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesinde ve süreçlerin yönetilmesinde, veri analizi ve yorumlamada, fiktisel içeriğin eleştirel incelenmesinde, son onay ve tam sorumlulukta katkı sağlamıştır.

KAYNAKLAR

1. Bayındır, C. ve Namlı, B. (2021) Efficient sensing of von Kármán vortices using compressive sensing, *Computers and Fluids*, 226(104975), 4195. doi: 10.1016/j.compfluid.2021.104975
2. Bayındır, C. (2015) Compressive split-step Fourier method, *TWMS Journal of Applied and Engineering Mathematics*, 52, 298-306.
3. Brunton, S. L., Proctor, J. L. ve Kutz, J. N. (2016a) Discovering governing equations from data by sparse identification of nonlinear dynamical systems, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(15), 3932-3937. doi: 10.1073/pnas.1517384113
4. Brunton, S. L., Proctor, J. L. ve Kutz, J. N. (2016b) Sparse identification of nonlinear dynamics with control (SINDYc), *IFAC-Online Papers*, 49(18), 710-715. doi: 10.1016/j.ifacol.2016.10.249
5. Davis, R. (1991) Lagrangian ocean studies, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23, 43-64.
6. Elipot, S., Lumpkin, R., Perez, R. C., Lilly, J. M., Early, J. J. ve Sykulski, A. M. (2016) A global surface drifter data set at hourly resolution, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(5), 2937-2966. doi: 10.1002/2016JC011716
7. Fukami, K., Murata, T., Zhang, K. ve Fukagata, K. (2021) Sparse identification of nonlinear dynamics with low-dimensionalized flow representations, *Journal of Fluid Mechanics*, 926, A10. doi: 10.1017/jfm.2021.697
8. Goldberg, D. E. (1989) *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, New York.
9. Holland, J. (1975) *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, MIT Press, Massachusetts.
10. Lin, L., Zhuang, W. ve Huang, Y. (2017) Lagrangian Statistics and Intermittency in Gulf of Mexico, *Scientific Reports*, 7, 17463. doi: 10.1038/s41598-017-17513-9
11. Liu, Y. ve Weisberg, R. H. (2011) Evaluation of trajectory modeling in different dynamic regions using normalized cumulative Lagrangian separation, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116, C9. doi: 10.1029/2010JC006837
12. MacMahan, J., Brown, J. ve Thornton, E. (2009) Low-cost handheld global positioning system for measuring surf-zone currents, *Journal of Coastal Research*, 25(3), 744-754. doi: 10.2112/08-1000.1
13. McCarroll, R. J., Brander, R. W., Turner, I. L., Power, H. E. ve Mortlock, T. R. (2014) Lagrangian observations of circulation on an embayed beach with headland rip currents, *Marine Geology*, 355, 173-188. doi: 10.1016/j.margeo.2014.05.020

14. Purnomo, A. ve Hayashibe, M. (2023) Sparse identification of Lagrangian for nonlinear dynamical systems via proximal gradient method, *Scientific Reports*, 13, 7919. doi: 10.1038/s41598-023-34931-0
15. Shea, D. E., Brunton, S. L. ve Kutz, J. N. (2021) SINDy-BVP: Sparse identification of nonlinear dynamics for boundary value problems, *Physical Review Research*, 3(2), 023255. doi: 10.1103/PhysRevResearch.3.023255
16. Spydell, M., Feddersen, F., Guza, R. T. ve Schmidt, W. E. (2007) Observing surf-zone dispersion with drifters, *Journal of Physical Oceanography*, 37(12), 2920-2939. doi: 10.1175/2007JPO3580.1