



Evaluating the effect of river discharge and meteorological parameters on the expansion of dry land in delta areas; (case study: Wax Lake Delta, US)

Mohsen Khatibzadeh¹ | Amirmahdi Gohari²

1. Corresponding Author, Department of Environmental Engineering-Coastal, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: Mohsenkhatibzadeh@ut.ac.ir

2. Department of Environmental Engineering-Coastal, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mahdi_gohari@ut.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Research Article</p> <p>Article history:</p> <p>Received: Jan. 30, 2024</p> <p>Revised: Apr. 3, 2024</p> <p>Accepted: Apr. 15, 2024</p> <p>Published online: July. 2024</p> <p>Keywords: Cold Front, Hydroperiod Pattern, Low-Lying Delta, Storm, Three-Dimensional Model.</p>	<p>The fluctuations in the extent of the dry area have profound implications for the delta's ecology, sediment transport, and overall geomorphological development. This study aims to elucidate the effects of various factors, including storms and cold fronts, as well as river discharge, on the dry area of the Wax Lake Delta (WLD), US. Utilizing the Delft3D hydrodynamic model, a series of simulations covering from August to September 2021 was performed to quantify these influences. The model was calibrated and validated using measured water level data, ensuring the reliability of the simulations. Results indicate that the average dry area of the WLD for September 2021 is approximately 25.1 km², which largely depends on meteorological forces and river discharge. Specifically, extreme storms have the potential to submerge the delta, resulting in prolonged periods of inundation. Moreover, the passage of a cold front can lead to a submersion of up to 48% of the delta's area during the pre-frontal phase, followed by an 80% increase in the dry area in the subsequent post-frontal phase, illustrating the transient but significant impact of such events. The study also determines that river discharge has an inverse relationship with the dry area of the delta; an increase in discharge corresponds to a decrease in the dry area, and conversely, a decrease in discharge leads to an expansion of the dry area. The insights gained from this research underscore the importance of integrating meteorological and hydrological data in the management and conservation strategies of deltaic environments.</p>
<p>Cite this article: Khatibzadeh, M., & Gohari, A. (2024) Evaluating the effect of river discharge and meteorological parameters on the expansion of dry land in delta areas; (case study: Wax Lake Delta, US), <i>Iranian Journal of Soil and Water Research</i>, 55 (5), 799-814. https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.371816.669658</p> <p>© The Author(s). Publisher: The University of Tehran Press.</p> <p>DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.371816.669658</p>	



ارزیابی تأثیر دبی رودخانه و پارامترهای هواشناسی بر گسترش خشکی در نواحی دلتا (منطقه مطالعاتی دلتای واکس لیک، آمریکا)

محسن خطیب‌زاده^۱ | امیرمهدی گوهری^۲^۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی محیط‌زیست-سواحل، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mohsenkhatibzadeh@ut.ac.ir^۲. گروه مهندسی محیط‌زیست-سواحل، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mahdi_gohari@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	تغییرات در میزان وسعت خشکی یک دلتا تأثیرات بسیار مهمی بر اکولوژی، حمل رسوب و توسعه ژئومورفولوژیکی دلتا دارد. هدف از این مطالعه روشن ساختن اثرات عوامل مختلف از جمله طوفان‌ها و عبور جبهه هوای سرد، و همچنین دبی رودخانه بر وسعت خشکی دلتای واکس لیک در ایالات متحده آمریکا است. با استفاده از مدل هیدرودینامیکی Delft3D، یک سری از شبیه‌سازی‌ها از ماه آگوست تا سپتامبر ۲۰۲۱ به منظور کمی‌سازی تأثیرات این عوامل انجام شد. مدل با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده سطح آب، کالیبره و صحت سنجی شد تا اطمینان لازم نسبت به شبیه‌سازی‌های مدل فراهم شود. نتایج نشان می‌دهند که میانگین وسعت خشکی این دلتا برای ماه سپتامبر ۲۰۲۱ تقریباً ۲۵٫۱ کیلومتر مربع بوده است که تا حد زیادی به نیروهای جوی و دبی رودخانه بستگی دارد. به طور خاص، طوفان‌های شدید پتانسیل زیر آب بردن تمامی مناطق خشک دلتا و آبگرفتگی برای دوره‌های طولانی را دارند. علاوه بر این، عبور یک جبهه هوای سرد می‌تواند تا ۴۸ درصد از مناطق خشک دلتا را در فاز پیش جبهه زیر آب ببرد و در ادامه این مقدار می‌تواند به ۸۰ درصد در فاز پسا جبهه افزایش یابد که تأثیر قابل توجه عبور جبهه هوای سرد را نشان می‌دهد. همچنین، مطالعه رابطه عکس دبی رودخانه با وسعت خشکی دلتا را روشن می‌سازد؛ افزایش دبی با کاهش در وسعت خشکی همراه است، و بالعکس، کاهش دبی منجر به گسترش وسعت منطقه خشک می‌شود. دیدگاه‌های به دست آمده از این تحقیق اهمیت یکپارچه‌سازی داده‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در استراتژی‌های مدیریت و حفاظت از محیط‌های دلتایی را تأکید می‌کند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۰	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱/۱۵	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱/۲۷	
تاریخ انتشار: مرداد ۱۴۰۳	
واژه‌های کلیدی: الگوی دوره هیدرولوژیک، جبهه هوای سرد، دلتای کم ارتفاع، طوفان، مدل‌سازی سه بعدی.	

استناد: خطیب‌زاده؛ محسن، گوهری؛ امیرمهدی، (۱۴۰۳) ارزیابی تأثیر دبی رودخانه و پارامترهای هواشناسی بر گسترش خشکی در نواحی دلتا (منطقه مطالعاتی دلتای

واکس لیک، آمریکا)، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۵ (۵)، ۸۱۴-۷۹۹. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.371816.669658>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.371816.669658>

مقدمه

ساحل لوئیزیانا در آمریکا، با جمعیتی معادل ۲/۳ میلیون نفر، از اهمیت ویژه‌ای در چندین جنبه از جمله صنعت، اقتصاد و تفریح برخوردار است (NOAA, 2019). از آنجایی که سواحل این منطقه حدود ۴۰٪ از تالابها و خورهای ایالات متحده را در بر می‌گیرد، ازین رو ساختار جغرافیایی و توپوگرافی آن منطقه را بسیار حائز اهمیت و مهم جلوه می‌نماید. علاوه بر این، دلتاهای ساحلی به عنوان زیستگاه‌هایی حیاتی برای انواع جوامع زیست محیطی مانند جنگل‌های حرا، مرداب‌های شور^۱، مناطق لب‌شور^۲ و مرداب‌های آب شیرین^۳ عمل می‌کنند (Day et al., 2008).

مناطق ساحلی لوئیزیانا با نرخ ۸۰٪ فرسایش مناطق ساحلی، در صدر فرسایش ساحلی و نابودی تالاب‌های آمریکا قرار دارد (Penland et al., 1990). مطالعات پیشین نشان می‌دهند که تهدیدهای وارد بر این تالاب‌های ساحلی از منابع مختلفی مانند دخالت انسانی و خطرات طبیعی مانند تغییرات اقلیمی، افزایش سطح دریا، فرورنشست محلی، افزایش بار مواد مغذی و کاهش تأمین رسوب ناشی می‌شوند (Constantinescu et al., 2023; Engle, 2011; Rabalais et al., 2002; Wurtsbaugh et al., 2019). میزان این تهدیدات در مناطق ساحلی قرار گرفته در شمال خلیج مکزیک نسبت به سواحل شرقی و غربی ایالات متحده بیشتر است (Feizabadi, Rafati, et al., 2022; Oelsner & Stets, 2019; Yin et al., 2009). این تأثیرات منجر به از دست رفتن تنوع زیستی و کاهش بهره‌وری در این مناطق تالابی شده است (Schuerch et al., 2018). بنابراین می‌توان اینگونه تصور کرد که تغییرات الگوهای اکولوژیکی ارتباط نزدیکی با تعدد آب‌گرفتگی مناطق خشک دارد که مهمترین عامل هیدرولوژیکی مؤثر بر این نوع اکوسیستم‌ها می‌باشد (Coleman et al., 2015; Liu et al., 2020). در نتیجه، درک توزیع مکانی و تغییرات زمانی فرکانس آب‌گرفتگی مناطق ساحلی، برای ارزیابی جامع بر تنوع و پایداری اکوسیستم تالاب ضروری است.

در منطقه ساحلی لوئیزیانا که دارای یکی از بالاترین نرخ‌های فرسایش و نابودی زمین در جهان است (Day et al., 2000)، دلتای واکس لیک به عنوان یک دلتای درحال توسعه و فعال در دهانه کانال واکس لیک^۴، توجه زیادی را به خود جلب کرده است (شکل ۱.a). به همین دلیل تحقیقات متعددی در مورد شرایط هیدرودینامیکی و ژئومورفولوژیکی این دلتا و عوامل تاثیرگذار بر روی آنها انجام شده است (Feizabadi, Li, et al., 2022; Knights et al., 2020; Olliver et al., 2020; Shaw et al., 2013). دبی رودخانه و رویدادهای آب و هوایی دوره‌ای و رایج در این منطقه مانند طوفان‌ها و عبور جبهه‌های سرد در تغییر تراز آب و کنترل تبادل آب و حمل رسوب بین کانال‌های اصلی و دشت‌های سیلابی^۵ در این سیستم دلتایی را نشان داده‌اند (Christensen et al., 2020; Morton & Barras, 2011; Feizabadi et al., 2023; Hiatt & Passalacqua, 2015). عبور جبهه هوای سرد، یک رویداد پرتکرار در سواحل شمال خلیج مکزیک است و یک تحلیل آماری گسترده بر روی داده‌های ۴۰ سال اخیر نشان داده است که به طور متوسط 5 ± 41 جبهه هوای سرد با فواصل زمانی بین ۳ تا ۷ روز سالانه در این منطقه رخ می‌دهد (C. Li et al., 2020). دینامیک عبور جبهه هوای سرد در خلیج مکزیک را می‌توان به ۲ فاز مختلف شامل پیش جبهه^۶ و پسا جبهه^۷ تقسیم بندی کرد. در فاز پیش جبهه، بادهای جنوبی و شرقی آب خلیج را به سمت خشکی برده و این امر باعث هجوم آب به بخش‌های ساحلی می‌شود. در ادامه در فاز پسا جبهه، جریان‌های باد تغییر مسیر داده و جریان‌های بسیار قوی از سمت شمال و شمال غربی وزیده که آب را از نوار ساحلی به سمت خلیج تخلیه می‌کنند. مطالعات پیشین نشان دادند که عبور یک جبهه هوای سرد می‌تواند موجب افزایش نوسان تراز آب تا بیش از یک متر، تغییر الگوی جریان و انتقال آب در دلتای واکس لیک شود (Feizabadi et al., 2023; Walker & Hammack, 2000). بزرگی و مدت زمان این تغییرات شدید هیدرودینامیکی در این منطقه کم عمق (۱-۳ متر) تأثیرات چشمگیری برانتقال رسوب، توسعه دلتاها و شرایط زیست محیطی دارد (Hiatt et al., 2018; Shaw et al., 2013).

در بررسی دلتای واکس لیک، Olliver and Edmonds (2017) از تکنیک‌های سنجش از دور برای ثبت نرخ رشد دلتا از سال ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۶ استفاده کردند. تحقیقات آنها شامل طبقه‌بندی انواع پوشش زمین به آب، رسوب و پوشش گیاهی بود. نتایج نشان داده است

1. Salt marshes
2. Brackish areas
3. Freshwater marshes
4. Wax Lake Outlet
5. Floodplains
6. Pre-frontal phase
7. Post-frontal phase

که در شرایط حداکثر پویایی پوشش گیاهی، افزایش مساحت جزایر دلتایی به حدود ۴۹/۵ کیلومتر مربع رسیده است. از نظر ترکیب، این جزایر عمدتاً پوشیده از پوشش گیاهی بودند، به طوری که پوشش گیاهی، آب و رسوب به ترتیب حدود ۵۵٪، ۳۵٪ و ۹/۵٪ از مساحت را به خود اختصاص دادند. علاوه بر این، Shaw et al. (2016) گزارش کرده‌اند که مساحت دلتا همراه با نواحی مستغرق حدود ۸۲ کیلومتر مربع بوده است.

علی‌رغم اهمیت تراز آب برای فرآیندهای بیولوژیکی، اکولوژیکی، و انتقال رسوب در مناطق ساحلی، تحقیقات قبلی بدون اینکه تمایزی بین مناطق آبگرفته و غیرآبگرفته (خشک) قائل شوند، بیشتر بر ویژگی‌های پوشش زمین در دلتای واکس لیک و تاثیر عوامل مختلف بر شرایط هیدرودینامیکی این منطقه تمرکز داشته‌اند (D. Li et al., 2022; Mazhar et al., 2022; Olliver et al., 2020). این موضوع نشان‌دهنده یک خلا عمده در درک و بررسی تاثیر پارامترهای هواشناسی و هیدرولوژیکی بر تغییرات مکانی و زمانی وسعت خشکی در سراسر دشت‌های سیلابی مختلف در دلتای واکس لیک است. به عبارت دیگر، تاثیر پارامترهای هواشناسی مختلف، بخصوص جبهه هوای سرد به عنوان یک رویداد رایج، تحت دبی‌های متفاوت بر استغراق مناطق ساحلی واقع در شمال خلیج مکزیک مورد بررسی و ارزیابی قرار نگرفته است. بنابراین، هدف اصلی این تحقیق تحلیل تغییرات مکانی و زمانی میزان وسعت خشکی و درک تأثیر دبی رودخانه‌ای، طوفان‌ها و جبهه‌های سرد بر آب‌گرفتگی دلتای واکس لیک است، که پیش از این به آن پرداخته نشده بود. درک این تغییرات برای بهبود نظارت بر سلامت اکوسیستم و ارتقاء شیوه‌های مدیریت ساحلی حیاتی است.

روش‌شناسی پژوهش

در پژوهش حاضر تا منتهی شدن به هدف اصلی، مراحل مختلفی از جمله مدل‌سازی، انتخاب داده جهت کالیبراسیون و صحت‌سنجی، شبیه‌سازی سناریوهای مختلف، تحلیل و بررسی داده‌ها انجام شده است. در ادامه پس از شرح و توصیف منطقه مطالعاتی، تمامی مراحل که در طول تحقیق طی شده است به صورت مبسوط شرح داده خواهد شد.

منطقه مطالعاتی

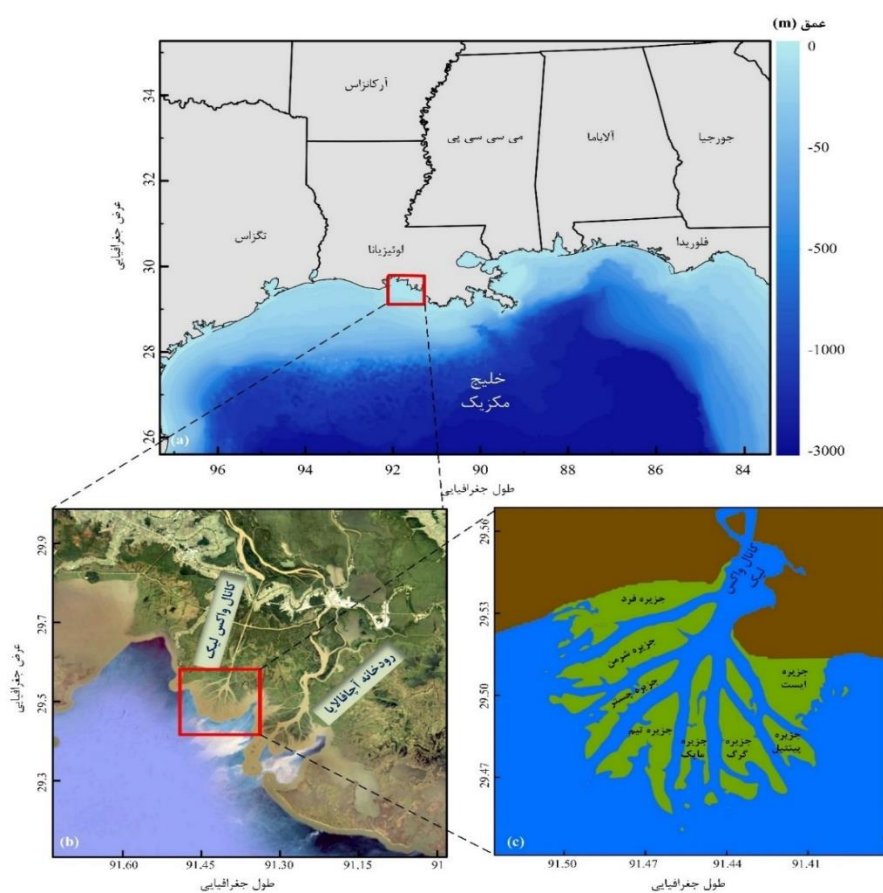
دلتای واکس لیک به عنوان یک دلتای رودخانه‌ای^۱ در تلاقی خروجی دریاچه واکس و خلیج آچافالایا^۲، در منطقه ساحلی لوئیزیانا، ایالات متحده آمریکا واقع شده است (شکل ۱.۰b). این خلیج با عمق کم، انرژی پایین، محیط میکروجزر و مدی، با دامنه جزر و مدی تقریباً ۰٫۳۵ متر، و متوسط ارتفاع موج حدود ۰٫۵ متر شناخته می‌شود (Rosen & Xu, 2013). کانال دریاچه واکس در سال ۱۹۴۱ به منظور محافظت از منطقه در برابر سیلاب‌های ناشی از بارندگی زیاد و طوفان احداث شده است. دلتای واکس لیک اکنون حدود ۳۰ تا ۴۰٪ از کل آب و رسوب خروجی رودخانه آچافالایا را به خود اختصاص می‌دهد (Rosen & Xu, 2013)، که تقریباً برابر با ۱۰٪-۱۲٪ از دبی ترکیبی از رودخانه‌های می‌سی‌سی‌پی^۳ و رد^۴ است. این کانال دارای دبی متوسط سالانه‌ی ۲،۵۰۰ متر مکعب بر ثانیه است، که در زمان سیل نرخ جریان معمولاً به بالاتر از ۵،۰۰۰ متر مکعب بر ثانیه می‌رسد (Hiatt & Passalacqua, 2015). کانال دریاچه واکس برای حمل ۷۷۸۸ متر مکعب بر ثانیه در طول سیل‌های شدید طراحی شده (Van Beek, 1979)، اما در اوج سیلاب در ماه می ۲۰۱۱، ۹۱۴۶ متر مکعب بر ثانیه را حمل کرده است (USGS, 2023).

از ابتدا، اکثر رسوبات منتقل شده به دلتای واکس لیک از نوع سیلت^۵ ریز بوده است، اما پس از ۱۹۶۰، یک دلتای مستغرق^۶ در دهانه خروجی دریاچه واکس شکل گرفته و در سال ۱۹۷۳ با ظهور چندین دشت سیلابی دلتایی بالاتر از متوسط تراز آب^۷ نمایان شد. این رشد به دنبال وقوع سیلاب‌های شدید در اوایل دهه ۱۹۷۰ به شدت تسریع شد و منجر به افزایش قابل توجه بار رسوبی شده است (Cratsley, 1975; Roberts et al., 1980). Parker and Sequeiros (2006) نرخ سالانه‌ی گسترش زمین در دلتای واکس لیک را حدود ۰٫۳ کیلومتر مربع تخمین زده‌اند، در حالی که نرخ افزایش عمودی ارتفاع در دوره ۱۹۸۱ تا ۱۹۹۴ حدود ۲/۷ سانتی‌متر در سال تعیین شده است

1. River-dominated
2. Atchafalaya bay
3. Mississippi river
4. Red river
5. Silt
6. Subaqueous delta
7. Subaerial delta

(Majersky et al., 1997). دشت‌های سیلابی پس از ظهور در دلتا، به سرعت توسط گونه‌های مختلف گیاهی پوشانده شده که منجر به پایداری بیشتر و افزایش رسوب‌گذاری در این مناطق شده است. نوع پوشش گیاهی این مناطق با توجه به ارتفاع آب متفاوت است؛ نواحی مرتفع توسط سالیکس نیگرا^۱، نواحی پایین‌تر توسط انواع گیاهان علفی^۲ و پایین‌ترین نواحی که غالباً مستغرق هستند، توسط گونه‌های نوظهور و شناور پوشیده شده‌اند (Carle, 2013).

دلتای واکس لیک شامل هشت دشت سیلابی متمایز است، که این مناطق با عنوان جزایر نامگذاری شده‌اند، که شامل جزیره فرد^۳، جزیره شرم^۴، جزیره چستر^۵، جزیره تیم^۶، جزیره مایک^۷، جزیره گرگ^۸، جزیره پینتیل^۹ و جزیره ایست^{۱۰} می‌شوند (شکل ۱. b). در مناطق ساحلی واقع شده در شمال خلیج مکزیک همراهِ با نرخ بالای فرسایش و نابودی زمین، دلتای واکس لیک به عنوان منطقه‌ای که شاهد افزایش و گسترش زمین است، فرصتی منحصر به فرد برای مطالعه فرایندهای طبیعی گسترش دلتا فراهم آورده است. علاوه بر این، به دلیل حداقل فعالیت‌های مستقیم انسانی در این منطقه، این دلتا مکانی ایده‌آل برای مشاهده تعاملات بین فرآیندهای ژئومورفولوژیکی، هیدرودینامیکی، انتقال رسوب و اکولوژیکی در محیط ساحلی در حال تغییر است.



شکل ۱. توپوگرافی شمال خلیج مکزیک (a)، موقعیت مکانی رودخانه‌ی آچافالایا و کانال واکس لیک در ایالت لوئیزیانا (b)، موقعیت نام ۸ دشت سیلابی اصلی در دلتای واکس لیک (c).

- ۱ Salix nigra
- ۲ herbaceous plants
- ۳ Fred Island
- ۴ Sherman Island
- ۵ Chester Island
- ۶ Tim Island
- ۷ Mike Island
- ۸ Greg Island
- ۹ Pintail Island
- ۱۰ East Island

توضیحات و پیکربندی مدل

در این مطالعه، با توجه به اینکه عبور جبهه‌های سرد قدرتمند در منطقه از ماه آگوست آغاز شده و تا آپریل ادامه می‌یابد (Feizabadi et al., 2023; C. Li et al., 2020)، پژوهش مورد نظر دوره زمانی دو ماهه از آگوست تا سپتامبر را برای اجرای شبیه‌سازی‌ها انتخاب کرده است تا بتوانیم شرایطی را که شامل چندین جبهه سرد و همچنین طوفان نیکولاس است را پوشش دهد. در ادامه اطلاعات و جزئیات بیشتری در مورد مدل‌سازی عددی، داده‌های استفاده شده و کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل ارائه شده است.

توصیف مدل عددی

در این مطالعه، شبیه‌سازی هیدرودینامیکی با استفاده از مدل Delft-3D Flow انجام شده است. این مدل به منظور انجام شبیه‌سازی‌های هیدرودینامیکی مجموعه‌ای از معادلات از جمله معادلات مربوط به اندازه حرکت، پیوستگی، انتقال و آشفتگی را حل می‌کند. این مدل با استفاده از روش تفاضل محدود^۱ در یک شبکه منحنی، معادلات ناویر-استوکس^۲ را برای یک سیال تراکم‌ناپذیر، تحت فرض آب کم عمق و شرایط بوسینسک حل می‌کند (Deltares, 2022). معادلات بقای جرم و اندازه حرکت را برای مناطق کم عمق و به صورت دو بعدی می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (hu) = 0 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = -g\nabla\zeta + \frac{1}{h}\nabla \cdot (h\nu(\nabla u + \nabla u^T)) + \frac{\tau}{h} + fu^+ \quad \text{رابطه (۲)}$$

که ζ نشان دهنده سطح آب است، h نشان دهنده عمق آب، $u = (u_x, u_y)^T$ بردار سرعت است (با مولفه‌های u_x و u_y)، g شتاب گرانشی، ν ویسکوزیته، τ نشان دهنده بستر است. اصطکاک، f ضریب کوریولیس و $u^+ = (-u_y, u_x)$ است.

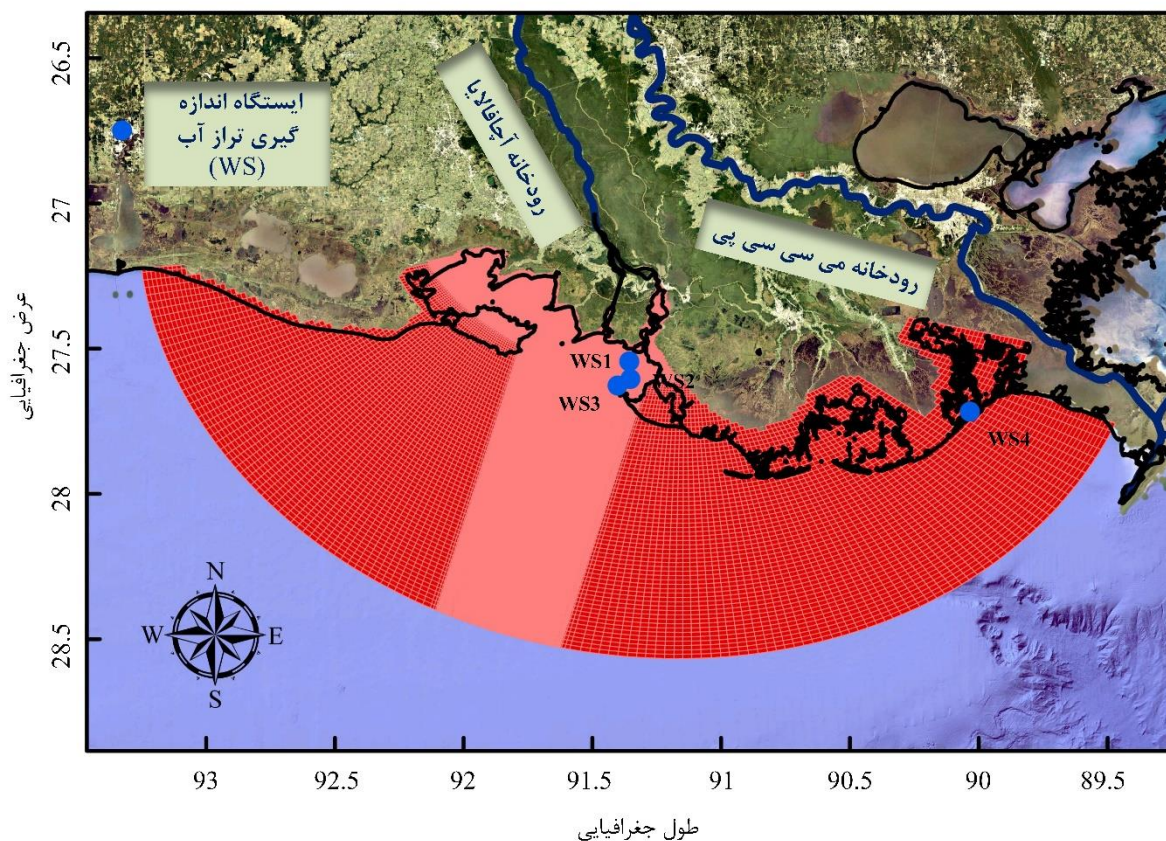
در این مطالعه، از یک شبکه متعامد منحنی با ۱۲ لایه عمودی استفاده شده، که به طور خاص برای افزایش وضوح عمودی نزدیک به لایه‌های مرزی بین کف و سطح آب طراحی شده است (شکل ۲). هدف از این رویکرد، دستیابی به وضوح بیشتر در دشت‌های سیلابی دلتا بوده است. حوزه محاسباتی مطالعه از غرب رودخانه می‌سی‌سی‌پی تا ایالت تگزاس را پوشش می‌دهد. مدل از شبکه افقی با ابعاد ۴۵۶*۲۵۹، با وضوح‌های متغیر از ۴۵ متر تا ۲ کیلومتر عمود بر خط ساحلی و ۴۵ متر تا ۴ کیلومتر در راستای خط ساحلی استفاده می‌کند. این تنظیم شبکه برای نمایش دقیق کانال‌های کم عمق پیچیده و مناطق شیب‌دار در بخش‌های بالایی دلتای واکس لیک و دلتای اچافالایا طراحی شده است. برای شبیه‌سازی‌ها، مدل از گام زمانی ۱۲ ثانیه‌ای برای انجام محاسبات استفاده می‌کند. بدون شک عوامل متفاوتی شامل نوع و تراکم پوشش گیاهی، میزان رسوب‌گذاری و فرسایش، بر میزان و گستره سطح خشکی در مناطق دلتایی تأثیرگذار هستند. با این حال، عبور جبهه‌های سرد در لویزیانا در فصول پاییز و زمستان باعث کاهش چشمگیر در پوشش گیاهی در مناطق ساحلی می‌شود (Olliver & Edmonds, 2017). علاوه بر این، توزیع ناهمگون پوشش گیاهی در سطح دشت‌های سیلابی، پاسخ‌های متفاوت هر دشت را به عواملی چون تغییرات در دبی و پارامترهای متغیر آب و هوایی به همراه دارد و به این ترتیب، پیچیدگی مدل‌سازی را افزایش می‌دهد. همچنین، انتقال رسوب از کانال‌های اصلی به دشت‌های سیلابی، بر مورفودینامیک منطقه و در نتیجه بر گسترش سطح خشکی در این دلتاها در بلندمدت تأثیری غیرقابل انکار دارد، اگرچه در کوتاه‌مدت، تأثیر آن نادیده گرفته می‌شود. بنابراین، این مطالعه به منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر تغییرات دبی و پارامترهای آب و هوایی بر روی گستره سطح خشکی در دلتای واکس لیک، از تأثیرات پوشش گیاهی و رسوب‌گذاری صرف نظر کرده است.

داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه، داده‌های توپوگرافی از بررسی‌های انجام شده در پاییز ۲۰۱۶ تحت پروژه دلتا-یکس^۳ با وضوح ۱۰ متر، که توسط ناسا پشتیبانی شده (Denbina et al., 2020)، بدست آمده است (شکل ۱.a). برای تعریف شرایط مرزی باز^۴، از دامنه و فاز انواع مختلف جزر و

1. Finite difference
2. Navier-Stokes
۱ Delta-X
۲ Open boundary

مد استفاده شده است. شبیه‌سازی جزرومد مدل شامل هشت جزء جزر و مدی: چهار جز روزانه^۱ (O1, K1, P1, O1)، سه جز نیمه‌روزانه^۲ (M2, N2, S2)، و دو جزء آب کم عمق (M4, M2) می‌شود. مدل از داده‌های دبی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های کانال دریاچه واکس در کالومت^۳ (USGS 07381590) و رودخانه آچافالایا پایین‌تر در شهر مورگان^۴ (USGS 07381600) برای تعیین جریان‌های مرزی کانال دریاچه واکس و رودخانه آچافالایا استفاده می‌کند. برای شبیه‌سازی طوفان، عبور جبهه هوای سرد، و جریان‌های باد، از داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی باد در هر ۶ دقیقه در جزیره یوجین^۵ (WS3) استفاده شده است.



شکل ۲. شبکه‌بندی مدل همراه با موقعیت مکانی ایستگاه‌های اندازه‌گیری سطح آب (WS)

کالیبراسیون و صحت سنجی مدل

برای ارزیابی صحت شبیه‌سازی هیدرودینامیکی مدل، در مرحله‌ی کالیبراسیون، تراز آب شبیه‌سازی شده با داده‌های اندازه‌گیری شده در چهار ایستگاه در ماه آگوست ۲۰۲۱ مقایسه شدند. در ادامه در مرحله‌ی صحت سنجی به منظور تایید صحت شبیه‌سازی، داده‌های شبیه‌سازی شده برای سپتامبر ۲۰۲۱ با داده‌های اندازه‌گیری شده از همان دوره مقایسه گردیده‌اند. مقایسه بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در پنج ایستگاه مختلف شامل (WS1) LAWMA، دهانه رودخانه آچافالایا^۶ (WS2)، جزیره یوجین (WS3)، و گرند آیل^۷ (WS4) برای سنجش دقت پیش‌بینی‌های سطح آب توسط مدل استفاده شده‌اند (شکل ۳). عملکرد مدل با استفاده از ضریب همبستگی، skill، و RMSE به عنوان شاخص‌های اصلی ارزیابی به صورت کمی ارزیابی گردیده است.

شاخص skill، که برای کمی‌سازی همبستگی بین سری زمانی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده طراحی شده، به صورت زیر توسط

ویلموت در سال ۱۹۸۱ تعریف شده است (Willmott, 1981):

$$Skill = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |m_i - o_i|^2}{\sum_{i=1}^N (|m_i - \bar{o}| + |o_i - \bar{o}|)^2} \quad \text{(رابطه ۳)}$$

^۲ Diurnal

^۴ Semi-diurnal

^۵ Calumet

^۶ Morgan

^۷ Eugene Island

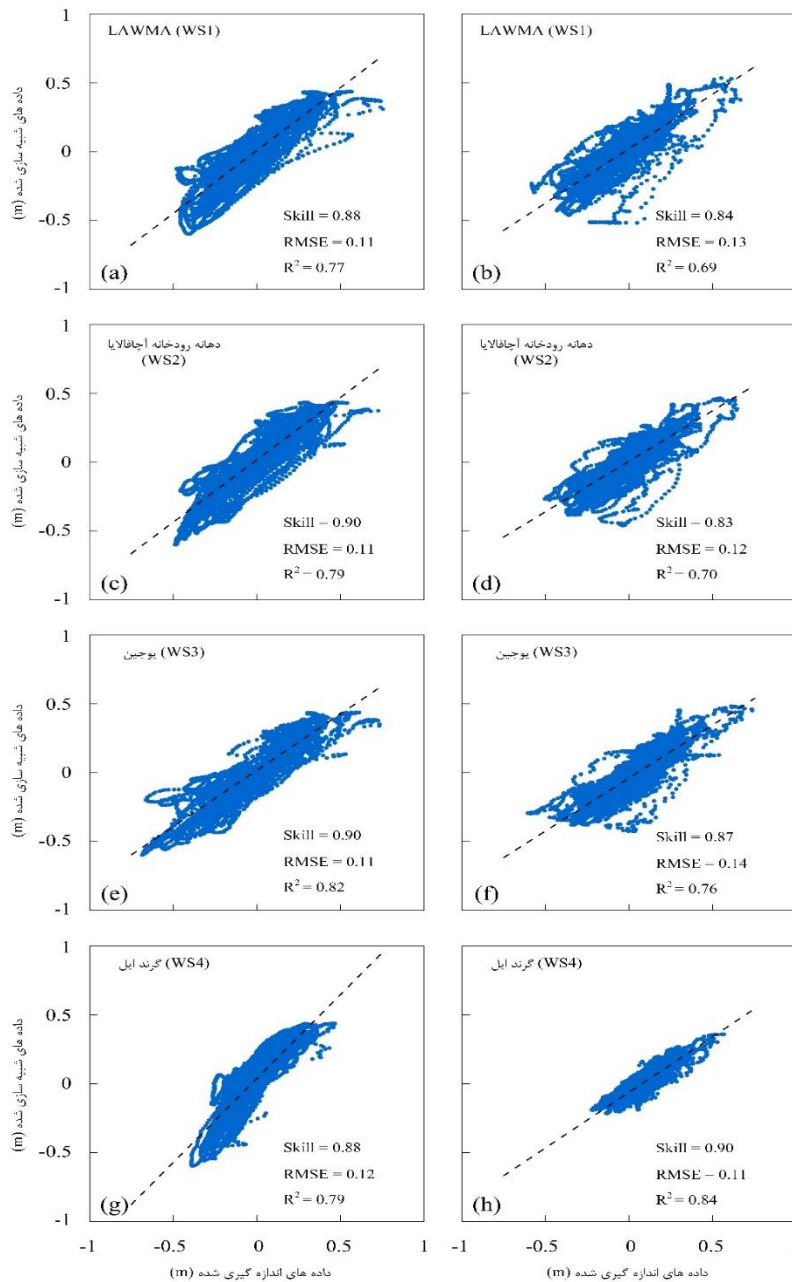
^۱ Mouth of Atchafalaya

^۲ Grand Isle

که در آن m_i و o_i به ترتیب آمارین مقادیر پیش بینی و اندازه گیری شده، \bar{o} میانگین مقدار اندازه گیری شده و N تعداد کل داده‌ها است. محاسبه $RMSE$ ، یک معیار آماری که برای ارزیابی تفاوت‌های بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده استفاده می‌شود، به صورت زیر مشخص شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (m_i - o_i)^2}{N}} \quad \text{رابطه ۴}$$

مطابقت داده‌های سطح آب پیش‌بینی شده با داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های WS1، WS2، WS3 و WS4 برای ماه‌های آگوست و سپتامبر ۲۰۲۱، دقت بالای مدل در شبیه‌سازی هیدرودینامیکی را نشان می‌دهد (شکل ۳). این تطابق با نتایج قابل قبول ضرایب آماری چون ضریب همبستگی، skill، و $RMSE$ تأیید می‌شود.

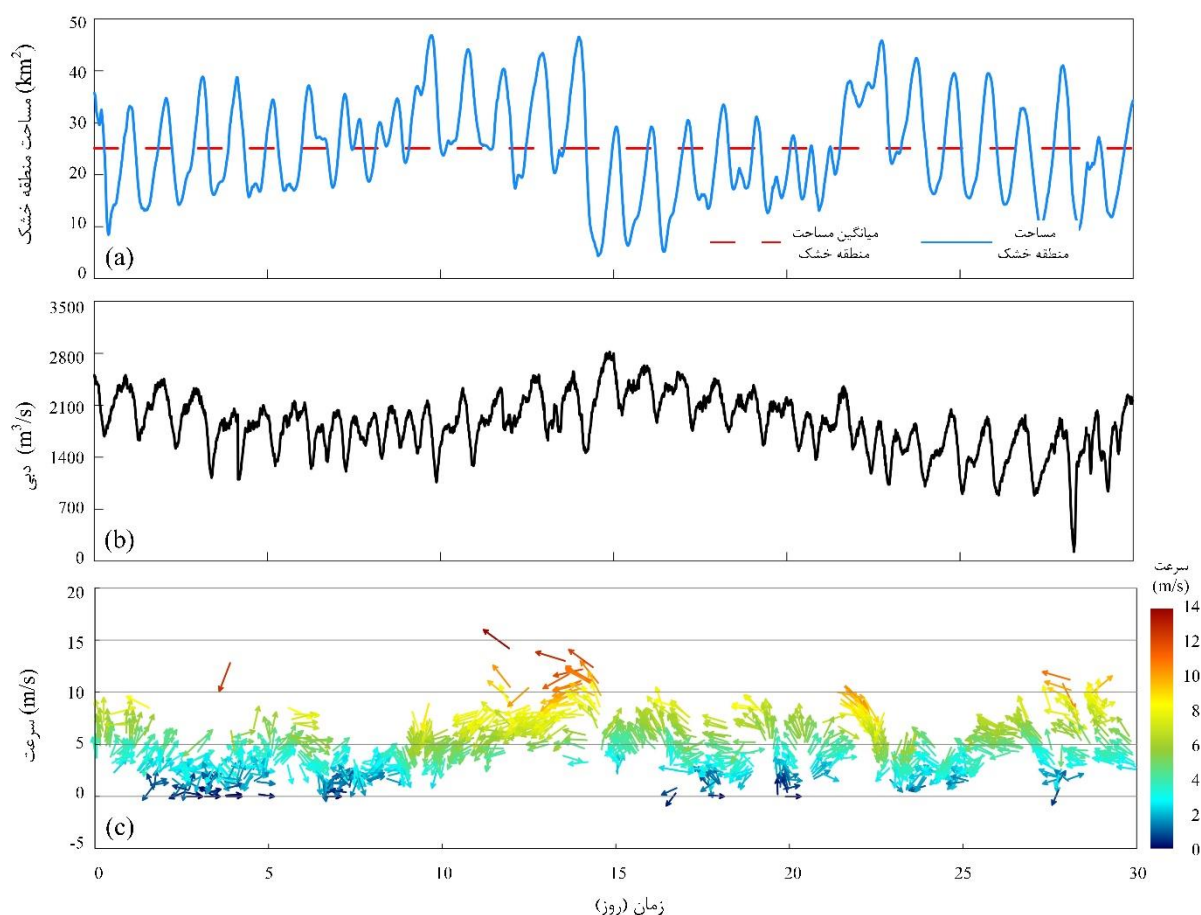


شکل ۳. مقایسه‌ی داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده‌ی ارتفاع سطح آب در ایستگاه‌های LAWMA (a و b)، دهانه رودخانه آچافالایا (c و d)، یوجین (e و f)، و گرنده ایل (g و h). پانل‌های چپ و راست به ترتیب کالیبراسیون و صحت سنجی مدل را نشان می‌دهند.

یافته‌های پژوهش و بحث

این مطالعه تغییرات در وسعت منطقه‌ی خشک دلتای واکس لیک و تاثیر نیروهای هواشناسی بر روی آن را در ماه سپتامبر ۲۰۲۱ بررسی

می‌کند. در این ماه، دلتا شاهد یک طوفان به نام نیکولاس به همراه چندین جبهه سرد بوده است (HPC, 2023). شکل a. ۴ سری زمانی وسعت منطقه خشک را در دلتای واکس لیک در طول سپتامبر ۲۰۲۱ نشان می‌دهد. نوسانات قابل توجهی را در طول دوره شبیه‌سازی شده در نمودار می‌توان مشاهده کرد که نشان دهنده‌ی تاثیر جریان‌های جزر و مدی بر روی وسعت خشکی در دلتا می‌باشد. در بازه‌ی زمانی ۹ تا ۱۴ سپتامبر، افزایش قابل توجهی در مساحت منطقه خشک دلتا مشاهده می‌شود، به نحوی که سری زمانی مساحت منطقه خشک در این بازه فراتر از میانگین (نشان داده شده توسط خط قرمز) بوده و به حدود ۴۸ کیلومتر مربع می‌رسد. در ادامه‌ی این نوسان صعودی، مساحت منطقه خشک به طور چشمگیری در یک دوره از ۱۴ تا ۲۰ سپتامبر کاهش می‌یابد و به زیر میانگین می‌رسد. در این بازه مساحت خشکی به حدود ۵ کیلومتر مربع کاهش یافته است. با بررسی نمودارهای تغییرات دبی کانال واکس لیک و الگوی جریان باد و عدم وجود تغییرات قابل توجه در میزان دبی کانال در بازه‌ی ۹ تا ۲۰ سپتامبر، این تغییرات مساحت منطقه خشک می‌تواند ناشی از عبور طوفان نیکولاس از دلتا باشد.



شکل ۴. وسعت منطقه خشک دلتای واکس لیک (a)، میزان دبی خروجی کانال دریاچه واکس لیک (b)، بزرگی باد و جهت روی دلتا (c) در سپتامبر ۲۰۲۱.

علاوه بر این نتایج نشان می‌دهند که عبور یک جبهه سرد در ۲۱ سپتامبر که از سمت شمال غربی می‌وزد، تأثیر قابل توجهی بر وسعت منطقه خشک دلتای واکس لیک داشته است. بین ۲۰ و ۲۱ سپتامبر، بادهای قدرتمند از سمت جنوب آب را به سمت ساحل می‌رانند (فاز پیش جبهه) و سبب افزایش تراز آب در مناطق ساحلی می‌شود. در این فاز از جبهه هوای سرد، بخش وسیعی از دلتا زیر آب می‌رود. به طور مثال برای این جبهه هوای سرد وسعت منطقه‌ی خشک تا ۱۲ کیلومتر مربع کاهش یافته است (شکل ۴.a). در ادامه، تغییر جهت باد از سمت شمال منجر به تخلیه آب به سمت خلیج (فاز پسا جبهه) و کاهش ارتفاع تراز آب می‌گردد. در فاز پسا جبهه در بازه‌ی ۲۱ تا ۲۲ سپتامبر مساحت منطقه خشک تا حدود ۸۰٪ نسبت به میانگین افزایش یافته و به ۴۵ کیلومتر مربع رسیده است (شکل ۴.a). عبور جبهه‌های سرد به عنوان یک پدیده‌ی رایج در شمال خلیج مکزیک قادر به ایجاد نوسانات تراز آب در دلتای واکس لیک تا بیش از ۱ متر می‌باشد (Feizabadi et al., 2023; Walker & Hammack, 2000). بر اساس یافته‌ها، طوفان‌ها و عبور جبهه‌های سرد به عنوان نیروهای هواشناسی،

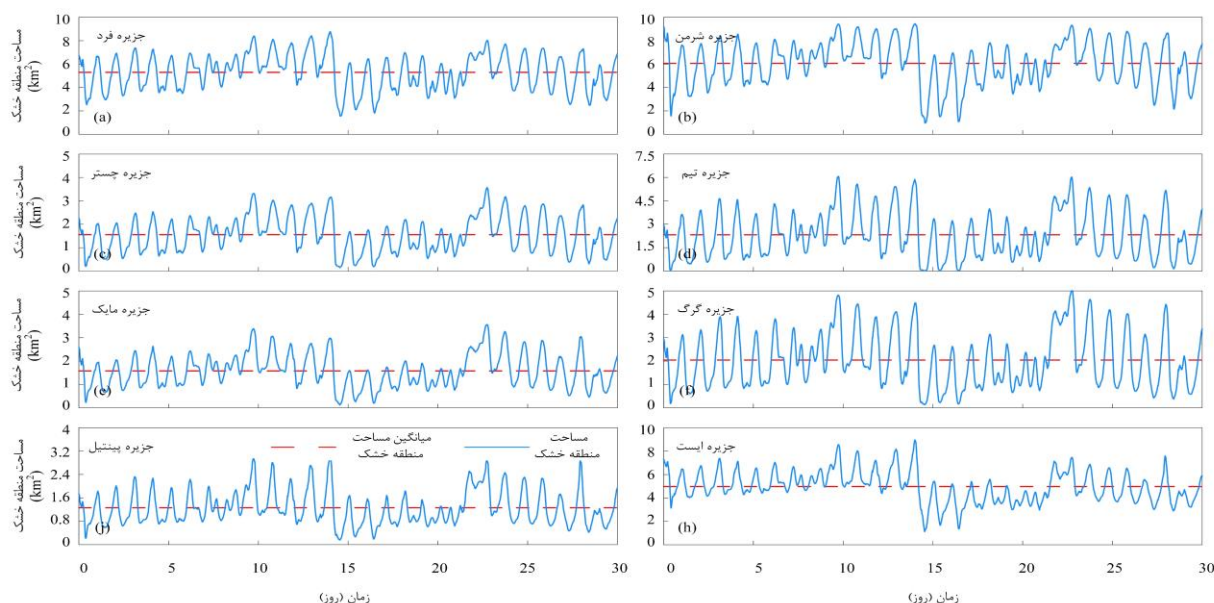
می‌تواند منجر به تغییرات سریع و قابل توجهی در تراز آب و در نتیجه وسعت منطقه‌ی خشک در دشت‌های سیلابی دلناها شود. جدول ۱ میانگین منطقه خشک برای دلتای واکس لیک و دشت‌های سیلابی آن در طول سپتامبر ۲۰۲۱ را نشان می‌دهد. علاوه بر این، درصد سهم هر دشت سیلابی در مقایسه با مساحت منطقه خشک دلنا نیز ذکر شده است. نتایج نشان می‌دهند که میانگین مساحت منطقه خشک دلتای واکس لیک در ماه سپتامبر حدود ۲۵٫۱ کیلومتر مربع بوده و توزیع آن در دشت‌های سیلابی به صورت یکسان نمی‌باشد. دشت‌های سیلابی مانند جزیره شرمین و جزیره فرد که تقریباً یک چهارم از مساحت خشک را به خود اختصاص می‌دهند، به ترتیب با ۲۴/۱٪ و ۲۱/۱٪، با میانگین مساحت خشک ۶/۱ و ۵/۳ کیلومتر مربع، بیشترین سهم از منطقه خشک را به خود اختصاص داده‌اند. در مقابل، دشت‌های سیلابی مانند چستر، مایک و پینتیل با درصد مشارکت بین ۵ و ۶/۳ کمترین وسعت منطقه خشک را دارند. درک سهم هر دشت سیلابی در کل منطقه خشک، برای پیش‌بینی تأثیر رویدادهای آب و هوایی آینده مانند طوفان، جبهه هوای سرد و بارندگی‌های طولانی مدت بر چشم‌انداز دلتا حیاتی است. تنوع در مشارکت نشان می‌دهد که بعضی مناطق ممکن است در برابر چنین رویدادهایی آسیب‌پذیرتر باشند و ممکن است برای اطمینان از انعطاف‌پذیری اکوسیستم به استراتژی‌های سازگارتر و متمرکزتری نیاز داشته باشند.

جدول ۱. میانگین وسعت منطقه خشک دلتای واکس لیک و هشت دشت سیلابی آن، همراه با درصد سهم هر دشت سیلابی در کل منطقه خشک برای سپتامبر ۲۰۲۱.

جزیره ایست	جزیره پینتیل	جزیره گرگ	جزیره مایک	جزیره تیم	جزیره چستر	جزیره شرمین	جزیره فرد	دلتای واکس لیک
۵	۱/۳	۲	۱/۶	۲/۳	۱/۶	۶/۱	۵/۳	۲۵/۱
سپتامبر ۲۰۲۱ (m ³ /s) ۳۸۰ ± ۱۸۵۰								
٪ ۱۹/۸	٪ ۵	٪ ۸/۱	٪ ۶/۳	٪ ۹/۳	٪ ۶/۳	٪ ۲۴/۱	٪ ۲۱/۱	-

شکل ۵ الگوهای نوسان مساحت منطقه خشک را در هشت دشت سیلابی مختلف در دلتای واکس لیک را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که منطقه خشک در هر دشت سیلابی به طور قابل توجهی تحت تأثیر جریان‌های جزر و مدی است. علاوه بر این می‌توان نتیجه گرفت که اگرچه الگوی تغییرات مساحت منطقه خشک ناشی از عبور طوفان و جبهه‌های سرد در دشت‌های سیلابی مشابه است، اما میزان تأثیر این رویدادهای هواشناسی می‌تواند در دشت‌های سیلابی مختلف متفاوت باشد. به عنوان مثال، یک رویداد شدید هواشناسی مانند طوفان‌های قدرتمند، که نیکولاس نمونه‌ای از آن است، این پتانسیل را دارد که به دلیل موج‌های ناشی از طوفان بخش‌های قابل توجهی از تمامی دشت‌های سیلابی را زیر آب ببرد. بعضی از دشت‌های سیلابی مانند جزیره تیم، جزیره چستر، جزیره مایک، جزیره گرگ و جزیره پینتیل تقریباً به طور کامل زیر آب می‌روند (شکل ۵، c, d, e, f, j). در مورد عبور جبهه هوای سرد، جبهه هوای سردی که در ۲۱ سپتامبر از منطقه عبور کرد به طور قابل توجهی منطقه خشک را در مرحله پسا جبهه گسترش داده است، و وسعت منطقه خشک را در دشت‌های سیلابی خاصی مانند تیم، مایک، گرگ و چستر بیش از دو برابر کرده است. به عنوان مثال، منطقه خشک در جزیره تیم به ۶ کیلومتر مربع و در جزیره گرگ به ۵ کیلومتر مربع افزایش یافته است که معادل با افزایش ۱۶۰٪ و ۱۵۰٪ می‌باشد (شکل ۵، d, f). این نشان می‌دهد اگرچه دشت‌های سیلابی دارای بعضی ویژگی‌های هیدرودینامیکی مشترکی هستند، اما عوامل تأثیرگذار دیگری مانند توپوگرافی، موقعیت در دشت سیلابی در دلتا یا جهت حرکت رویدادهای هواشناسی می‌توانند، برخی مناطق را نسبت به رویدادهای آب و هوایی آسیب‌پذیرتر کنند (Feizabadi, Li, et al., 2022; Hiatt et al., 2018; Olliver et al., 2020). این موضوع می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر روی نوسانات مناطق خشک در دشت‌های سیلابی داشته باشد.

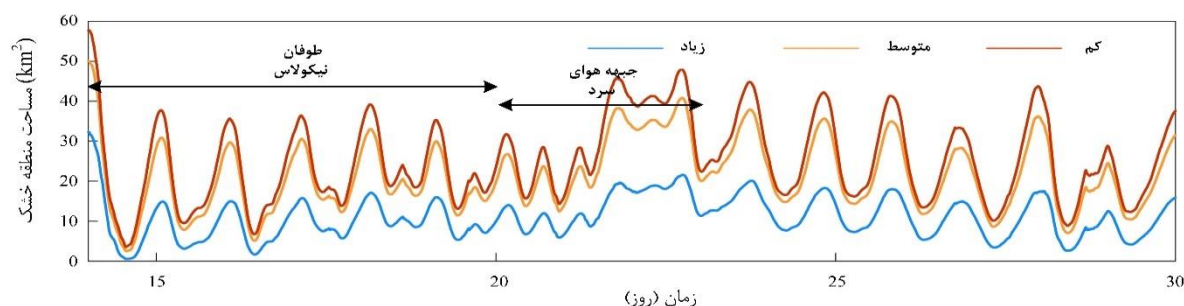
به منظور بررسی تأثیر شرایط هیدرولوژیکی متفاوت بر وسعت منطقه خشک در دلتای واکس لیک و ارزیابی پاسخ فردی هر دشت سیلابی به این شرایط، مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌ها انجام شده است. این شبیه‌سازی‌ها برای مدل‌سازی اثرات یک طوفان و یک جبهه سرد، تحت سه سناریوی مختلف دبی کانال واکس لیک طراحی گردیده‌اند؛ دبی کم (۱۲۵۰ متر مکعب بر ثانیه)، دبی متوسط (۲۵۰۰ متر مکعب بر ثانیه) و دبی زیاد (۶۰۰۰ متر مکعب بر ثانیه). این شبیه‌سازی‌ها بازه‌ی زمانی ۱۴ تا ۳۰ سپتامبر، دوره‌ای که شامل طوفان نیکولاس و یک جبهه هوای سرد است، را پوشش می‌دهند. از این طریق مطالعه سعی در روشن کردن دینامیک مناطق خشک دشت‌های سیلابی در پاسخ به رویدادهای هیدرولوژیکی متفاوت را دارد (شکل ۶).



شکل ۵. سری زمانی تغییرات در منطقه خشک برای ۸ دشت سیلابی اصلی دلتای واکس لیک در سپتامبر ۲۰۲۱ (a-h).

شکل ۶ مقایسه ای از تغییرات منطقه خشک در دلتای واکس لیک را در بازه زمانی ۱۴ تا ۳۰ سپتامبر تحت دبی‌های مختلف ارائه می‌دهد و نتایج نقش مهم و غیرقابل انکار دبی رودخانه را بر وسعت مناطق خشک دلتا را روشن ساخته است. همچنین نمودارها نشان می‌دهند که در شرایط دبی زیاد، مساحت منطقه‌ی خشک در طول دوره زمانی به طور مداوم در مقایسه با شرایط دبی متوسط و کم، کمتر است. این روند ارتباط مستقیمی را بین حجم آب تخلیه شده به دلتا و غرق شدن مناطق دشت سیلابی نشان می‌دهد. در طی طوفان نیکولاس، که منجر به کاهش شدید منطقه خشک در هر سه سناریو شده است، اما بیشترین کاهش در مساحت منطقه خشک در شرایط دبی زیاد مشاهده گردیده است، به طوری که تقریباً تمام دلتا زیر آب رفته است. این نشان‌دهنده تأثیر ترکیبی دبی جریان کانال و امواج طوفان بر دلتای واکس لیک است و نشان می‌دهد که در شرایط هیدرولوژیکی با دبی زیاد، آسیب‌پذیری نسبت به سیلاب ناشی از رویدادهای هواشناسی افزایش می‌یابد.

همچنین مقایسه‌ی سناریوها در بازه زمانی مشخص شده به عنوان "جبهه هوای سرد" در شکل ۶ نشان می‌دهد که میزان تغییرات وسعت منطقه خشک در فاز پسا جبهه (از ۲۱ تا ۲۲ سپتامبر) تحت دبی‌های مختلف یکسان نبوده و میزان نوسانات در سناریوی دبی کم، محسوس‌تر و بیشتر است. این نشان می‌دهد که تأثیر عبور جبهه هوای سرد بر نوسانات سطح آب و در ادامه بر وسعت ناحیه خشک، تا حد زیادی تحت تأثیر دبی رودخانه است. در شرایط هیدرولوژیکی با دبی کم، عمق کمتر آب منجر به بیشتر شدن غیرخطی بودن می‌شود که به نوبه خود تأثیر جریان‌های جزر و مدی و جبهه‌های سرد بر تغییرات در منطقه خشک را تقویت می‌کند (Feizabadi et al., 2024a). در تمام سناریوها، ماهیت نوسانی منطقه خشک پس از طوفان و جبهه‌های سرد نشان دهنده بازگشت به یک تعامل معمولی بین شرایط هیدرولوژیکی دلتا و تأثیرات جزر و مدی است، البته سرعت بازگشت بسته به میزان دبی متفاوت است.



شکل ۶. سری زمانی تغییرات در ناحیه خشک دلتا، شامل طوفان نیکولاس و جبهه سرد، تحت شرایط مختلف دبی کانال واکس لیک: زیاد، متوسط و کم از ۱۴ سپتامبر تا ۳۰ سپتامبر.

جدول ۲، میانگین مساحت منطقه خشک در دلتای واکس لیک و دشت‌های سیلابی تشکیل دهنده آن را برای بازه زمانی ۱۴ سپتامبر تا ۳۰ سپتامبر ۲۰۲۱ به همراه درصد تغییر در منطقه خشک تحت شرایط مختلف دبی کانال را نشان داده است. برای سناریوی واقعی، مساحت منطقه خشک برای کل دلتا حدود ۲۳/۱ کیلومتر مربع محاسبه گردیده است، که میزان مساحت دشت‌های سیلابی از ۱/۲ کیلومتر مربع برای جزیره پینتیل تا ۵/۷ کیلومتر مربع برای جزیره شرمن متفاوت می‌باشد. در طول دوره‌ی زمانی با دبی کم، همه دشت‌های سیلابی افزایش مناطق خشک را نسبت به شرایط واقعی تجربه کرده‌اند که این افزایش از حدود ۳ درصد برای جزیره فرد تا ۲۳ درصد برای جزیره مایک متفاوت است. در سناریو با دبی متوسط، ناحیه خشک در همه دشت‌های سیلابی از حدود ۵/۱-٪ برای جزیره فرد تا ۱۲/۷-٪ برای جزیره شرمن کاهش یافته است. کاهش یکپارچه در تمامی دشت‌های سیلابی نشان می‌دهد که افزایش دبی کانال تأثیر منفی یکسانی بر وسعت مناطق خشک در سراسر دلتا دارد. نتایج به دست آمده در سناریو با میزان دبی متوسط نشان می‌دهد که این شرایط نقطه عطفی است که در آن ورود آب منجر به غرق کردن زمین‌هایی می‌شود که در شرایط جریان کم، خشک باقی می‌مانند. در سناریوی دبی بالا، کاهش شدیدی در منطقه خشک برای تمام دشت‌های سیلابی مشاهده گردیده است. دشت‌های سیلابی چستر، تیم و گرگ کاهش‌های بیشتر از ۶۰٪ را تجربه کرده‌اند، که این مناطق را به طور ویژه‌ای در معرض خطر آبگرفتگی قرار می‌دهد. در سناریوی دبی کم، تمامی دشت‌های سیلابی می‌توانند میزان بیشتری از مناطق خود را خشک نگه دارند، که احتمالاً نتیجه کاهش انتقال آب از کانال‌های اصلی به دشت‌های سیلابی است. اما افزایش میزان دبی رودخانه، کاهش قابل توجه منطقه خشک در دشت‌های سیلابی را به همراه دارد، که این کاهش را می‌توان به افزایش سطح آب در کانال‌های اصلی، که منجر به نفوذ بیشتر آب به دشت‌های سیلابی می‌شود، نسبت داد (Christensen et al., 2020; Feizabadi et al., 2024b; Hiatt & Passalacqua, 2015).

جدول ۲. میانگین وسعت منطقه خشک دلتای واکس لیک و هشت دشت سیلابی، و درصد تغییر در منطقه خشک تحت شرایط دبی‌های مختلف کانال: کم، متوسط و زیاد از ۱۴ تا ۳۰ سپتامبر.

جزیره ایست	جزیره پینتیل	جزیره گرگ	جزیره مایک	جزیره تیم	جزیره چستر	جزیره شرمن	جزیره فرد	دلتای واکس لیک
۴/۴	۱/۲	۱/۹	۱/۵	۲/۱	۱/۴	۵/۷	۵	۲۳/۱
سپتامبر ۲۰۲۱ (m ³ /s) ۴۴۰ ± ۱۸۰۵								
٪ ۹/۱	٪ ۸/۷	٪ ۲۳	٪ ۱۳/۳	٪ ۱۵/۳	٪ ۲۰/۸	٪ ۲/۸	٪ ۹/۱	-
٪ ۷/۵	٪ ۱۰/۹	٪ ۱۲/۳	٪ ۶/۲	٪ ۷/۴	٪ ۱۲/۷	٪ ۵/۱	٪ ۷/۳	-
٪ ۶۴/۳	٪ ۶۶/۴	٪ ۷۴/۵	٪ ۶۷	٪ ۶۰/۳	٪ ۷۰	٪ ۲۷/۵	٪ ۵۲/۸	-

تغییرات در وسعت منطقه خشک دلتای واکس لیک تحت شرایط هیدرولوژیکی مختلف، تأثیرات قابل توجهی بر مدیریت دلتا، به ویژه در زمینه تغییرات آب و هوایی و افزایش انتظار برای رویدادهای شدید آب و هوایی دارد. از آنجایی که این مطالعه، نوسانات پیش‌بینی شده در دبی رودخانه و تأثیرات جزر و مد را در نظر گرفته است، داده‌های به دست آمده از این تحلیل می‌توانند در توسعه استراتژی‌های مدیریت انطباقی کاربرد داشته باشند. علاوه بر این، بینش‌های به دست آمده از این مطالعه می‌توانند در طراحی زیرساخت‌ها برای کاهش خطرات سیلاب و حفاظت از تنوع زیستی و عملکردهای اکولوژیکی دلتا، که ممکن است به دلیل تغییر شرایط محیطی بیشتر در معرض خطر باشند، مفید واقع گردند.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با استفاده از رویکرد مدل‌سازی عددی، بررسی عمیقی را در مورد تأثیر عوامل مختلف از جمله طوفان، جبهه‌های سرد و دبی رودخانه بر ناحیه خشک دلتای واکس لیک انجام داده است. تجزیه و تحلیل‌ها نشان می‌دهد که وسعت منطقه خشک این دلتا به طور قابل توجهی، بین ۱۱ تا ۲۵ کیلومتر مربع، در نوسان است و تا حد زیادی بستگی به دبی ورودی دارد. علاوه بر این، یافته‌ها نشان می‌دهند که طوفان‌های شدید، این پتانسیل را دارند که با توجه به شدت طوفان و جهت باد، یا به طور کامل دلتا را غرقاب کنند یا منطقه خشک را به میزان قابل توجهی گسترش دهند.

مطالعه تأثیر دینامیکی جبهه‌های سرد، پدیده‌ی هواشناسی رایج در سواحل شمالی خلیج مکزیک، بر دلتای واکس لیک نشان می‌دهد یک جبهه هوای سرد این پتانسیل را دارد که حدود ۴۸٪ از دلتا را در فاز پیش جبهه زیر آب ببرد و به دنبال آن وسعت منطقه خشک را به

طور قابل توجهی (حدود ۸۰٪) در فاز پسا جبهه افزایش دهد. با این حال، پاسخ دشت‌های سیلابی مختلف به عبور جبهه‌های سرد متفاوت است؛ برخی دشت‌های سیلابی ممکن است کاملاً زیر آب روند در حالی که برخی دیگر تنها بخشی از آن‌ها تحت تاثیر قرار گیرند، که این موضوع، تنوع ویژگی‌های هیدرودینامیکی در دلتا را نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده در این مطالعه همسو با مطالعات پیشین است که نشان داده است که تغییرات تراز آب در فازهای پیش و پسا جبهه، ۱۰ تا ۴۵٪ از کل انرژی هیدرولوژیکی در این دلتا را شامل می‌شوند و می‌تواند ۳۲ تا ۷۶٪ از کل جرم آب را در مدت زمان کوتاهی از سیستم خارج کند (Feng & Li, 2010; Zhang et al., 2022).

همچنین نتایج نشان داده است که تأثیر طوفان‌ها و جبهه‌های سرد بر گسترش منطقه خشک در شرایط دبی بالای رودخانه، کمتر محسوس است. در طرف مقابل، در شرایط دبی کم رودخانه این رویدادهای هواشناسی تأثیر قابل توجهی دارند. این موضوع مرتبط با تغییرات تراز آب می‌باشد که میزان نوسانات سطح آب در دبی‌های کم، بسیار بیشتر از شرایط مشابه با دبی زیاد است (Feizabadi et al., 2023)؛ زیرا در شرایط با دبی زیاد، نیرو و جریان آب ناشی از دبی، غالب بر نیروی ناشی از عبور جبهه هوای سرد است. این یافته‌ها تعامل پیچیده بین عوامل هیدرولوژیکی و هواشناسی بر انتقال آب بین کانال‌های اصلی و دشت‌های سیلابی را نشان می‌دهد که تاثیر بسیار زیادی بر انتقال مواد مغذی، بهره‌وری گیاهان، چرخه‌ی کربن، و انتقال رسوب در دلتای واکس لیک دارد (Hiatt et al., 2018).

این مطالعه نیاز به استراتژی‌های مدیریتی و حفاظتی مناسب که پاسخ‌های متفاوت دشت‌های سیلابی مختلف را به این عوامل محیطی در نظر می‌گیرند را برجسته می‌کند. تحقیقات آینده در ادامه ی این مطالعه، به منظور ارزیابی تأثیر نوع و تراکم پوشش گیاهی بر روی انتقال آب میان کانال‌های اصلی و دشت‌های سیلابی، دیدگاهی جامع و کامل‌تری در مورد نقش عوامل مختلف بر وسعت خشکی مناطق ساحلی ارائه می‌دهند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Carle, M. (2013). Spatial structure and dynamics of the plant communities in a pro-grading river delta: Wax Lake Delta, Atchafalaya Bay, Louisiana. Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College.
- Christensen, A., Twilley, R. R., Willson, C. S., & Castañeda-Moya, E. (2020). Simulating hydrological connectivity and water age within a coastal deltaic floodplain of the Mississippi River Delta. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 245, 106995.
- Coleman, A. M., Diefenderfer, H. L., Ward, D. L., & Borde, A. B. (2015). A spatially based area-time inundation index model developed to assess habitat opportunity in tidal-fluvial wetlands and restoration sites. *Ecological Engineering*, 82, 624–642.
- Constantinescu, A. M., Tyler, A. N., Stanica, A., Spyrakos, E., Hunter, P. D., Catianis, I., & Panin, N. (2023). A century of human interventions on sediment flux variations in the Danube-Black Sea transition zone. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1068065.
- Cratsley, D. W. (1975). *Recent deltaic sedimentation, Atchafalaya Bay, Louisiana*. Louisiana State University, Baton Rouge.
- Day, J. W., Britsch, L. D., Hawes, S. R., Shaffer, G. P., Reed, D. J., & Cahoon, D. (2000). Pattern and Process of Land Loss in the Mississippi Delta: A Spatial and Temporal Analysis of Wetland Habitat Change. *Estuaries*, 23(4), 425. <https://doi.org/10.2307/1353136>
- Day, J. W., Christian, R. R., Boesch, D. M., Yáñez-Arancibia, A., Morris, J., Twilley, R. R., Naylor, L., Schaffner, L., & Stevenson, C. (2008). Consequences of climate change on the ecogeomorphology of coastal wetlands. *Estuaries and Coasts*, 31, 477–491.
- Deltares. (2022). User Manual Delft3D-FLOW.
- Denbina, M. W., Simard, M., Pavelsky, T. M., Christensen, A. I., Liu, K., & Lyon, C. (2020). *Pre-Delta-X: Channel Bathymetry of the Atchafalaya Basin, LA, USA, 2016*. ORNL Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1807>
- Engle, V. D. (2011). Estimating the provision of ecosystem services by Gulf of Mexico coastal wetlands. *Wetlands*, 31(1), 179–193.
- Feizabadi, S., Li, C., & Hiatt, M. (2023). A numerical experiment of cold front induced circulation in Wax Lake Delta: evaluation of forcing factors. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1228446. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1228446>
- Feizabadi, S., Li, C., & Hiatt, M. (2024a). Non-linear Interaction between Cold Front Induced Storm Surge



- and Tides in a Shallow Bayhead Delta. *Authorea Preprints*.
- Feizabadi, S., Li, C., & Hiatt, M. R. (2022). A Numerical Experiment of Cold Front Induced Circulation in Wax Lake Delta: Effect of the Frontal Orientation. *AGU Fall Meeting Abstracts, 2022*, H32C-07.
- Feizabadi, S., Li, C., & Hiatt, M. R. (2024b). Evaluating the Effect of River Discharge on Cold Front Induced Water Transport in the Wax Lake Delta, Louisiana. *Ocean Sciences Meeting*.
- Feizabadi, S., Rafati, Y., Ghodsian, M., Akbar Salehi Neyshabouri, A., Abdolapour, M., & Mazyak, A. R. (2022). Potential sea-level rise effects on the hydrodynamics and transport processes in Hudson–Raritan Estuary, NY–NJ. *Ocean Dynamics*, 72(6), 421–442. <https://doi.org/10.1007/s10236-022-01512-0>
- Feng, Z., & Li, C. (2010). Cold-front-induced flushing of the Louisiana Bays. *Journal of Marine Systems*, 82(4), 252–264.
- Hiatt, M., Castañeda-Moya, E., Twilley, R., Hodges, B. R., & Passalacqua, P. (2018). Channel-island connectivity affects water exposure time distributions in a coastal river delta. *Water Resources Research*, 54(3), 2212–2232.
- Hiatt, M., & Passalacqua, P. (2015). Hydrological connectivity in river deltas: The first-order importance of channel-island exchange. *Water Resources Research*, 51(4), 2264–2282. <https://doi.org/10.1002/2014WR016149>
- HPC. (2023). NOAA's Hydrometeorological Prediction Center. <https://www.wpc.ncep.noaa.gov/index.shtml#page=ovw>
- Knights, D., Sawyer, A. H., Barnes, R. T., Piliouras, A., Schwenk, J., Edmonds, D. A., & Brown, A. M. (2020). Nitrate removal across ecogeomorphic zones in Wax Lake Delta, Louisiana (USA). *Water Resources Research*, 56(8), e2019WR026867.
- Li, C., Huang, W., Wu, R., & Sheremet, A. (2020). Weather induced quasi-periodic motions in estuaries and bays: Meteorological tide. *China Ocean Engineering*, 34(3), 299–313.
- Li, D., Li, Y., Xie, Y., Cui, B., Ning, Z., Zhang, S., Bi, Z., Fu, S., & Che, C. (2022). Effects of ecological restoration on soil biogenic elements and their ecological stoichiometry in the Yellow River Delta, China. *Frontiers in Marine Science*, 9, 993202.
- Liu, Z., Fagherazzi, S., She, X., Ma, X., Xie, C., & Cui, B. (2020). Efficient tidal channel networks alleviate the drought-induced die-off of salt marshes: Implications for coastal restoration and management. *Science of The Total Environment*, 749, 141493.
- Majersky, S., Roberts, H. H., Cunningham, R., Kemp, G. P., & John, C. J. (1997). Facies development in the Wax Lake Outlet Delta: Present and future trends. *Basin Research Institute Bulletin*, 7(1), 50–66.
- Mazhar, S., Pellegrini, E., Contin, M., Bravo, C., & De Nobili, M. (2022). Impacts of salinization caused by sea level rise on the biological processes of coastal soils-A review. *Frontiers in Environmental Science*, 1212.
- Morton, R. A., & Barras, J. A. (2011). Hurricane impacts on coastal wetlands: A half-century record of storm-generated features from southern Louisiana. *Journal of Coastal Research*, 27(6A), 27–43.
- NOAA. (2019). American Community Survey Five-Year Estimates. <https://coast.noaa.gov/digitalcoast/data/acs.html>
- Oelsner, G. P., & Stets, E. G. (2019). Recent trends in nutrient and sediment loading to coastal areas of the conterminous US: Insights and global context. *Science of the Total Environment*, 654, 1225–1240.
- Olliver, E. A., & Edmonds, D. A. (2017). Defining the ecogeomorphic succession of land building for freshwater, intertidal wetlands in Wax Lake Delta, Louisiana. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 196, 45–57. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.06.009>
- Olliver, E. A., Edmonds, D. A., & Shaw, J. B. (2020). Influence of Floods, Tides, and Vegetation on Sediment Retention in Wax Lake Delta, Louisiana, USA. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125(1), e2019JF005316. <https://doi.org/10.1029/2019JF005316>
- Parker, G., & Sequeiros, O. (2006). Large scale river morphodynamics: Application to the Mississippi Delta. *River Flow 2006: Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics*, 3–11.
- Penland, S., Roberts, H. H., Williams, S. J., Sallenger Jr, A. H., Cahoon, D. R., Davis, D. W., & Groat, C. G. (1990). *Coastal land loss in Louisiana*.
- Rabalais, N. N., Turner, R. E., & Wiseman Jr, W. J. (2002). Gulf of Mexico hypoxia, aka “The dead zone.” *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33(1), 235–263.
- Roberts, H. H., Adams, R. D., & Cunningham, R. H. W. (1980). Evolution of sand-dominant subaerial phase, Atchafalaya Delta, Louisiana. *AAPG Bulletin*, 64(2), 264–279.
- Rosen, T., & Xu, Y. J. (2013). Recent decadal growth of the Atchafalaya River Delta complex: Effects of variable riverine sediment input and vegetation succession. *Geomorphology*, 194, 108–120.

- Schuerch, M., Spencer, T., Temmerman, S., Kirwan, M. L., Wolff, C., Lincke, D., McOwen, C. J., Pickering, M. D., Reef, R., & Vafeidis, A. T. (2018). Future response of global coastal wetlands to sea-level rise. *Nature*, 561(7722), 231–234.
- Shaw, J. B., Ayoub, F., Jones, C. E., Lamb, M. P., Holt, B., Wagner, R. W., Coffey, T. S., Chadwick, J. A., & Mohrig, D. (2016). Airborne radar imaging of subaqueous channel evolution in Wax Lake Delta, Louisiana, USA. *Geophysical Research Letters*, 43(10), 5035–5042.
- Shaw, J. B., Mohrig, D., & Whitman, S. K. (2013). The morphology and evolution of channels on the Wax Lake Delta, Louisiana, USA. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(3), 1562–1584.
- USGS. (2023). *National Water Information System: Web Interface*. http://waterdata.usgs.gov/nwis/measurements/?site_no=07381590
- Walker, N. D., & Hammack, A. B. (2000). Impacts of winter storms on circulation and sediment transport: Atchafalaya-Vermilion Bay region, Louisiana, USA. *Journal of Coastal Research*, 996–1010.
- Willmott, C. J. (1981). ON THE VALIDATION OF MODELS. *Physical Geography*, 2(2), 184–194. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>
- Wurtsbaugh, W. A., Paerl, H. W., & Dodds, W. K. (2019). Nutrients, eutrophication and harmful algal blooms along the freshwater to marine continuum. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 6(5), e1373.
- Yin, J., Schlesinger, M. E., & Stouffer, R. J. (2009). Model projections of rapid sea-level rise on the northeast coast of the United States. *Nature Geoscience*, 2(4), 262–266.
- Zhang, Q., Li, C., Huang, W., Lin, J., Hiatt, M., & Rivera-Monroy, V. H. (2022). Water Circulation Driven by Cold Fronts in the Wax Lake Delta (Louisiana, USA). *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(3), 415.



Evaluating the Effect of River Discharge and Meteorological Parameters on the Expansion of Dry Land in Delta Areas; (Case Study: Wax Lake Delta, US)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Louisiana's coastal zone, encompassing 40% of the U.S. coastal and estuarine wetlands, faces significant environmental challenges, including a high rate of coastal erosion and wetland loss. The Wax Lake Delta (WLD) in this region is notable for its active expansion and plays a key role in the area's ecology, sediment transport, and geomorphology. Since fluctuations in water levels and the subsequent changes in the dry area have profound implications for these aspects, this study aims to examine the spatial variations in the WLD's inundation area and understand the impacts of riverine discharge, storms, and cold fronts on these dynamics. This research is crucial for enhancing ecosystem health monitoring and improving coastal management practices, addressing a gap in previous studies.

Material and Methods

The hydrodynamic simulation in this study was conducted using the Delft3D-FLOW model, employing a grid model with a horizontally curvilinear orthogonal grid of 12 vertical layers and a 456 by 259 horizontal grid. The model's capability to simulate hydrodynamics was evaluated by comparing predicted water levels with actual field data from four stations in August 2021, serving as the calibration phase. This process was followed by validating the model, where simulated data for September 2021 was compared against actual measurements to ensure accuracy and reliability of the model's performance. Furthermore, a series of detailed simulations were carried out to meticulously evaluate the impact of varying hydrological conditions on the dry area within the WLD. These simulations were conducted under three distinct river discharge scenarios - low (1250 m³/s), moderate (2500 m³/s), and high (5000 m³/s) - to find how different levels of water flow affect the dry regions of the delta.

Results and Discussion

The results for September 2021 revealed significant dynamics in the WLD dry area due to meteorological forces, including the Nicholas storm and various cold fronts. It revealed significant changes in the dry area, with a total average of 25.1 km². During the storm, the dry area surged to approximately 48 km² and then decreased to around 5 km² as wind directions shifted. The passing of cold fronts also plays significant role variations of the dry area. A northwesterly cold front further reduced the dry area to 12 km² during pre-frontal phase, later increasing it to about 45 km² in the post-frontal one. Furthermore, the study highlighted uneven distribution across floodplains in the WLD. Sherman and Fred Island are significant contributors, accounting for about 24.1% and 21.1% of the dry area, respectively. In contrast, floodplains such as Chester's, Mike, and Pintail contribute less to the overall dry area, ranging between 5% and 6.3%.

In terms of River discharge, this study indicated a clear relationship between river discharge rates and the dry area in the WLD. High discharge conditions consistently result in a reduced dry area compared to moderate and low discharge conditions. This pattern highlights a direct link between the volume of water discharged and the flooding of floodplain areas. Additionally, the combined effects of high river flow and meteorological forces significantly increase the delta's vulnerability to flooding, emphasizing the importance of considering these factors in flood risk management and ecological conservation strategies.

Conclusion

The conclusion of the study on the Wax Lake Delta (WLD) emphasizes significant variability in the delta's dry area, mainly influenced by the discharge from the Wax Lake Outlet and varying between 11 and 25 km². It highlights the substantial impact of severe storms, which can either inundate the delta or significantly expand the dry area, depending on factors like the storm's intensity and wind direction. Cold fronts also have notable effects, with the potential to submerge large portions of the delta, followed by substantial dry area expansion. This study underscores the diverse responses of individual floodplains to meteorological events, revealing the intricate interplay between hydrological and meteorological factors in shaping the delta's landscape. The findings also suggest that high river discharge conditions can mitigate the effects of storms and cold fronts on the delta's dry area, whereas low discharge conditions enhance these impacts, reflecting the complex dynamics governing the WLD's environment.

Keywords: Cold Front, Hydroperiod Pattern, Low-Lying Delta, Storm, Three-Dimensional Model.