



Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>

Original Article



Estimation of production and carbon stock of Gowatr mangrove forests, Gulf of Oman using PnET-CN model

Matin Khaleghi ^{1*}, Ahmad Savari ², Alireza Safahieh ², Mohsen Hamidian Pour ³, Sadroddin Ghaemmaghami ²

1. Department of Marine Biology, Faculty of Marine Science, Chabahar University of Maritime and Marine Science, Chabahar, Iran.

2. Department of Marine Biology, Faculty of Marine Science and Oceanography, Khorramshahr University of Marine Sciences and Technology, Khorramshahr, Iran.

3. Department of Physical Geography, Faculty of Geography and Environmental Planning, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

* Corresponding Author E-mail: matinkhaleghi@yahoo.com

Received: 26 January 2020

Revise Date: 10 March 2020

Accepted: 15 March 2020

DOI: 10.22113/jmst.2020.217237.2346

Abstract

This study was carried out in the Gowatr mangrove forests in Gulf of Oman, on September 2017 and May 2018 during high tide with the aim of quantifying production, biomass carbon stocks of *Avicennia marina* and introduce of PnET-CN model. The results were showed that the mean of aboveground biomass was 28.09 ± 4.52 and 28.51 ± 4.49 t/ha, moreover, the mean of aboveground carbon stock was 11.22 ± 1.83 and 11.34 ± 1.7 t/ha, and the mean of primary production was 219.251 and 238.171 gC/m².mo in September 2017 and May 2018, respectively. The estimated of the production and biomass carbon stocks using PnET-CN model was showed that the mean of production was 289.051 and 291.487 gC/m².mo and the mean of aboveground biomass carbon was 12.29 and 12.76 t/ha in September 2017 and May 2018, respectively. The PnET-CN model could predict the effects of simultaneous changes in several environmental variables on the interactions among several ecosystem processes and it could estimate the amount of tree carbon stock and primary production with proper validation. PnET-CN model shown ecosystem models extended our understanding of the forest carbon cycle spatially and temporally and generated additional information about carbon stocks and fluxes.

Keywords: *Avicennia marina*, Gulf of Oman, Climate change, Modeling.

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



1. INTRODUCTION

Mangrove forest ecosystem is known to possess various benefits including high carbon sequestration rates and storage. Deforestation or disturbance of these ecosystems results in large emissions of CO₂ to the atmosphere. Therefore, it is suggested that mangrove forests are an important component in reducing the emissions of greenhouse gases resulting from deforestation and climate change, and consequently require scrupulous quantification of ecosystem carbon stocks to monitor temporal carbon sequestration and emissions. However, little is known about the carbon stocks of these ecosystems.

2. MATERIALS AND METHODS

This study was carried out in the mangrove forests of Gowatr Bay, Gulf of Oman, with the aim of quantifying carbon stocks of all components of this forest, including live and dead trees, soil, pneumatophores, herbaceous, and litter in three stations. Overall, 27 plots, each of which has an area of 154 m² were evaluated in September 2017 and May 2018. The estimation of carbon stock in this ecosystem was done using the PnET-CN model.

3. RESULTS

The mean of aboveground biomass was 28.09 ± 4.52 and 28.51 ± 4.49 t/ha in September 2017 and May 2018, respectively. The mean of aboveground carbon stock was 11.22 ± 1.83 and 11.34 ± 1.7 t/ha in September 2017 and May 2018, respectively. The mean of primary production was 219.251 and 238.171 gC/m².mo in September 2017 and May 2018, respectively.

The result of the PnET-CN model showed that the mean aboveground carbon stock was 12.29 and 12.77t/ha in September 2017 and May 2018, respectively. The mean primary production was 289.051 and 291.487 gC/m².mo in September 2017 and May 2018, respectively.

4. DISCUSSION AND CONCLUSION

This reveals that Gowatr mangrove forest stores substantial amount of atmospheric carbon, and therefore needs to be conserved and sustainably managed. Also, the development of models was conducted for all components of tree instead of the direct measurement of tree biomass and carbon stock in the future, which are costly, time-consuming, damaging, and sometimes unavailable.

The estimation of the biomass and carbon stocks was carried out using the PnET-CN model to predict the effects of simultaneous changes in several environmental variables on the interactions of several critical ecosystem processes. Moreover, it could estimate the amount of tree carbon stock and primary production with proper validation. PnET-CN model showed that ecosystem models extended our understanding of the forest carbon cycle spatially and temporally and generated additional information about carbon stocks and fluxes.

5. REFERENCES

- Xu, B., Pan, Y., Plante, A.F., Johnson, A., Cole, J. and Birdsey, R., 2016. Decadal change of forest biomass carbon stocks and tree demography in the Delaware River Basin. *Forest Ecology and Management*, 374, pp.1-10. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.045>
- Xu, B., Pan, Y., Plante, A.F., McCullough, K. and Birdsey, R., 2017. Modeling forest carbon cycle using long-term carbon stock field measurement in the Delaware River Basin. *Ecosphere*, 8(5), p.e01802. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1802>



مقاله پژوهشی

Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>



تخمین تولید و ذخیره کربن جنگل های مانگرو گواتر؛ خلیج عمان با استفاده از مدل PnET-CN

متین خالقی^{۱*}، احمد سواری^۲، علیرضا صفاهیه^۲، محسن حمیدیان پور^۳، صدرالدین قائم مقامی^۲

۱. گروه زیست شناسی دریا، دانشکده علوم دریایی، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار، ایران.
۲. گروه زیست شناسی دریا، دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران.
۳. گروه جغرافیا طبیعی-اقلیم شناسی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

نویسنده مسئول، پست الکترونیک: matinkhaleghi@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۰۶

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22113/jmst.2020.217237.2346

چکیده

این مطالعه در جنگل های مانگرو گواتر در خلیج عمان در شهریور ۹۶ و اردیبهشت ۹۷ در جزر کامل با هدف تعیین کمیت تولید و ذخایر کربن زی توده گونه *Avicennia marina* و معرفی مدل PnET-CN صورت گرفته است. نتایج حاصل از این مطالعه در جنگل های مانگرو گواتر نشان داد میزان زی توده بالای زمین به ترتیب در شهریور ۹۶ و اردیبهشت ۹۷ مقدار $4/52 \pm 28/09$ و $4/49 \pm 28/51$ تن در هکتار به دست آمده است. میزان ذخیره کربن بالای زمین در شهریور ۹۶ و اردیبهشت ۹۷ به ترتیب میزان $1/83 \pm 11/22$ و $1/7 \pm 11/34$ تن در هکتار محاسبه شده است. میزان تولید اولیه برای شهریور ۹۶ و اردیبهشت ۹۷ به ترتیب میزان $219/251$ و $238/171$ گرم کربن بر مترمربع در ماه به دست آمده است. میزان تولید و ذخیره کربن با استفاده از مدل PnET-CN در شهریور ۹۶ و اردیبهشت ۹۷ به ترتیب میزان $289/051$ و $291/487$ گرم کربن بر مترمربع در ماه و میزان $12/77$ تن در هکتار به دست آمد. مدل PnET-CN توانست اثرات تغییرات همزمان چندین متغیر زیست محیطی بر روابط بین فرآیندهای اکوسیستمی را پیش بینی کند و برآورد میزان ذخایر کربن درخت و تولید اولیه با اعتبارسنجی مناسب صورت گرفت. این مدل نشان داد مدل های اکوسیستمی، درک ما را از چرخه کربن جنگل بصورت مکانی و زمانی گسترش می دهند و اطلاعات اضافی درباره جریان و ذخیره کربن تولید می کنند.

واژگان کلیدی: *Avicennia marina*، خلیج عمان، تغییر اقلیم، مدل سازی.

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



۱. مقدمه

می‌شود. عملکرد مدل با توجه به مقدار معادله خطای نرمال شده ریشه میانگین مربعات (NRMSE: Normalized Root Mean Square Error) ارزیابی می‌گردد (Thorn et al., 2015; Xu et al., 2017).

با توجه به شرایط باتلاقی و ماندابی مانگروها و محدودیت‌های فصلی که امکان نمونه‌برداری میدانی و اندازه‌گیری درختان را به سادگی امکان‌پذیر نمی‌سازد، استفاده از این مدل اکولوژیک اقدام موثری جهت ارزیابی این اکوسیستم است.

متأسفانه علی‌رغم اهمیت ویژه جنگل‌های مانگرو در حیطه‌های مختلف اکولوژیکی، بیولوژیکی، اقتصادی، شیلاتی، پزشکی و دارویی تاکنون مطالعه‌ای در زمینه تولید و ذخیره کربن و وضعیت سلامت آن‌ها در خلیج گواتر (سیستان و بلوچستان) صورت نپذیرفته و این تحقیق برای اولین بار در این منطقه انجام شده است. هدف از این مطالعه، تخمین میزان تولید و ذخیره کربن درختان مانگرو و ارائه مدل مناسب غیرتخریبی با دقت و سرعت بالاتر و هزینه کمتر، جهت این برآورد بوده است.

۲. مواد و روش‌ها

خلیج گواتر در جنوب‌شرقی‌ترین منطقه ایران در ۸۵ کیلومتری شهر چابهار واقع شده است. این خلیج در عرض جغرافیایی $25^{\circ} 12'$ تا $25^{\circ} 12'$ و طول جغرافیایی $61^{\circ} 34'$ تا $61^{\circ} 47'$ قرار گرفته است. $69/4$ درصد از آن متعلق به کشور پاکستان و $30/6$ درصد وسعت آن در ایران قرار دارد (Rafiei and Danekar, 2006). خلیج گواتر شامل مجموعه‌ای از سیستم‌های آبی از جمله رودخانه‌ها، مارش‌ها، خورها می‌باشد. مساحت آن حدود 75000 هکتار است که در میان 25 تالاب بین‌المللی ایران در لیست تالاب‌های بین‌المللی رامسر (Frazier, 1999) قرار گرفته است و به دلیل داشتن جنگل‌های مانگرو و جریان‌های آبی بسیار مهم است (Moradi et al., 2019). میانگین بارش این محدوده برابر با 114 میلی‌متر و متوسط دمای سالانه 26 درجه سانتی‌گراد تعیین شده است. متوسط سالانه حداکثر مطلق حرارت و برودت در این حوزه به ترتیب $30/1$ و $22/3$ درجه سانتی‌گراد تعیین شده که حداکثر دما در ماه‌های اردیبهشت تا تیر و حداقل دما در ماه‌های آذر تا بهمن رخ می‌دهد (Iran Meteorological Organization, 2006). اجتماعات مانگرو در منطقه مورد مطالعه به طور خالص از گونه درختی و درختچه‌ای حرا (*A. marina*) تشکیل شده است که با دو گونه هالوفیت علفی همراهی می‌شوند (Erfani et al., 2012). مساحت جنگل‌های

جنگل‌های مانگرو در مناطق جزرومدی نواحی گرمسیری و نیمه‌گرمسیری قرار گرفته‌اند. این اکوسیستم‌ها با نرخ تولید اولیه خالص $280 - 92$ TgC/yr بسیار پرتولید هستند و 15% کربن در کل رسوبات دریایی متعلق به آنان است و بنابراین یکی از اکوسیستم‌های غنی از کربن در مناطق استوایی هستند. ذخیره مقادیر بالایی از کربن آلی در زی‌توده گیاهی و رسوب، این اکوسیستم‌ها را به یک استخر کربن طبیعی مبدل نموده است (Kusumaningtyasa et al., 2019).

مدت زمان طولانی است که رویشگاه‌های مانگرو بعنوان یک اکوسیستم پرتولید که در آن چرخش کربن به سرعت انجام می‌شود، شناخته شده‌اند. اما مانگروها در سراسر جهان به دلایل طبیعی همچون آلودگی در رتبه اول و پس از آن طوفان و باران اسیدی در رتبه‌های بعدی در معرض تهدید قرار دارند (Hossein Zadeh et al., 2018). همچنین، عوامل انسانی از جمله جنگل‌زدایی، تغییر کاربری زمین، پرورش میگو، توسعه سواحل و استفاده برای چوب بیش از چند دهه است که کاهش شدید این جنگل‌ها را در پی داشته‌اند. از طرفی اثرات این کاهش به‌ویژه قطع درختان، از دست دادن تنوع ژنتیکی را در پی داشته است (Ghanavati et al., 2015). مهم‌ترین عملکرد جنگل‌های مانگرو نقش موثر آن‌ها در کاهش تغییر اقلیم و گرمایش جهانی به واسطه ترسیب گاز دی-اکسید کربن می‌باشد. اما تاکنون برآورد دقیقی از میزان کربنی که این اکوسیستم می‌تواند جذب کند، وجود نداشته است. فقدان داده‌ها و اطلاعات از مشکلات ما در مدیریت اکوسیستم‌های مانگرو است (Khairuddin et al., 2016). بررسی تغییرات کمی استخرهای کربن مانگروها، اقدامی مهم جهت پایش سلامت مانگروها و آنالیز روند تغییر اقلیم جهانی و عواقب آن بر جمعیت‌های انسانی است (Hoelzer, 2014; Siteo et al., 2014).

ارائه مدل‌هایی بر پایه فرایند امکان پایش درازمدت متغیرهای زیست‌محیطی را فراهم می‌کند و نقش این اکوسیستم‌ها را در کاهش آلاینده‌های جو (به‌خصوص CO_2) نشان می‌دهند. با تکیه بر این مدل‌ها مدیریت پایدار اکوسیستم‌های مانگرو امکان‌پذیر خواهد بود. مدل PnE-CN شامل مجموعه‌ای از نسخه‌های شبیه‌سازی فرآیندهای عمده کربن، نیتروژن و چرخه آب جنگل است. این مدل تعامل بین چرخه‌های نیتروژن، کربن و همچنین صفات برگ را با فرآیندهای فیزیولوژیک در سطح اکوسیستم ارتباط می‌دهد (Xu et al., 2017). برای اعتبارسنجی مدل از نمونه‌برداری میدانی استفاده

مانگرو خلیج گواتر در خور گواتر ۱۵۹/۳۳ می‌باشد (Daneshkar et al., 2012).

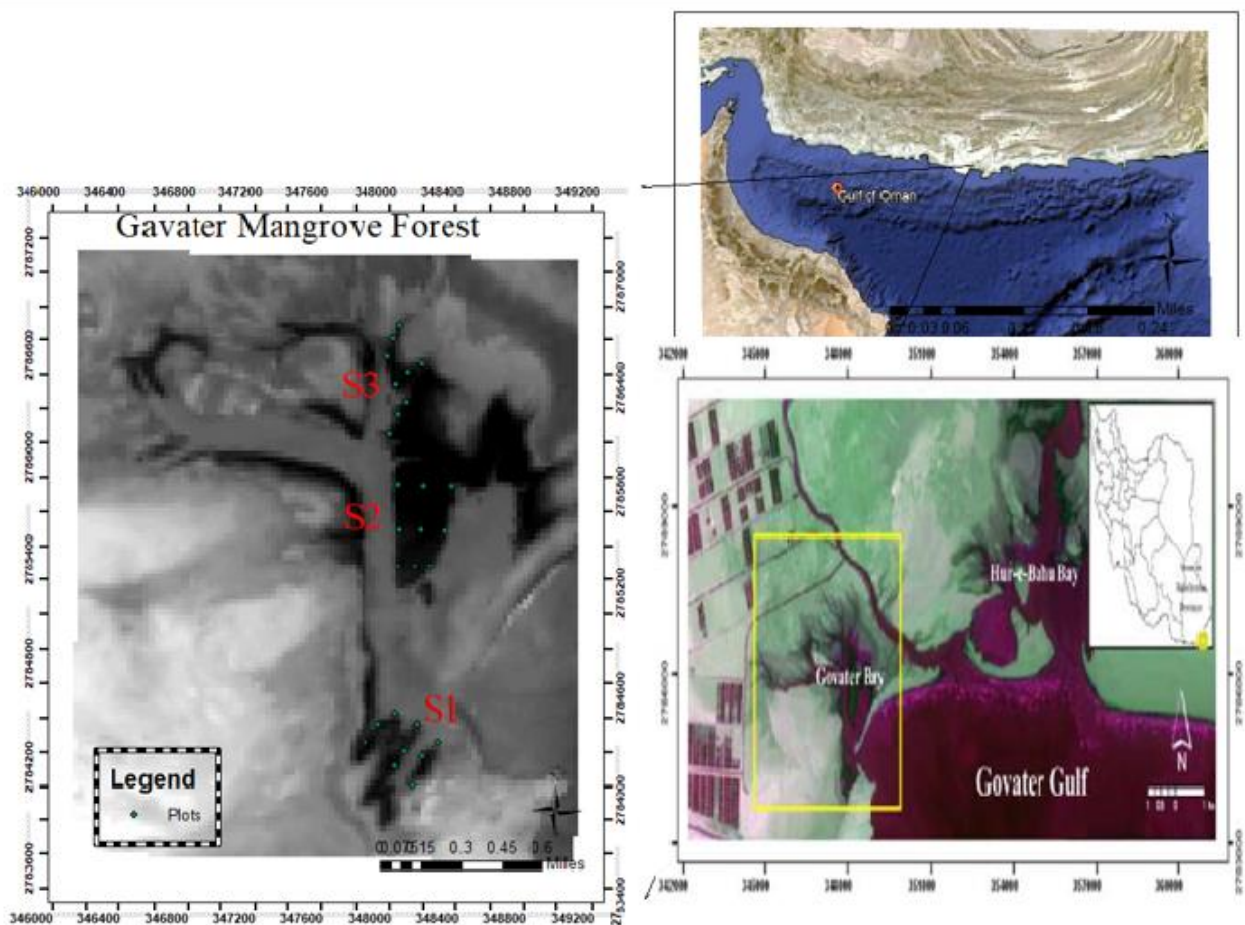
نمونه‌برداری دو بار در شهریور ۹۶ و اردیبهشت ۹۷ در هنگام جزر حداکثر، در ۳ ایستگاه صورت پذیرفت. هر ایستگاه از سه ترانسکت تشکیل شده و در هر ترانسکت ۳ پلات دایره‌ای (۱۵۴ مترمربع) و در مجموع ۲۷ پلات در نظر گرفته شد (شکل ۱). ایستگاه اول در قسمت بالای جزر و مدی در مجاورت مزارع پرورش میگو قرار داشت. ایستگاه دوم در قسمت میانی جزر و مدی در منطقه انبوه واقع شده بود. ایستگاه سوم در قسمت پایین جزر و مدی در مجاورت دریا و اسکله ماهیگیری قرار داشت. مختصات جغرافیایی هر پلات در جدول (۱) آورده شده است.

با توجه به مطالعات انجام شده در مانگروهایی سایر نقاط جهان (Donato et al., 2011; Kauffman and Donato, 2012; Kauffman et al., 2014; Siteo et al., 2014; Adame et

al., 2012).

از یک دریل شاززی برای جمع‌آوری نمونه‌های چوب ساقه استفاده کرده و طول نمونه جمع‌آوری شده (طول مته دریل) و وزن آن ثبت گردید. سپس خرده‌های چوب را در آن با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته تا خشک شده و به وزن ثابت برسد (Abhijit Mitra et al., 2011; Ray et al., 2011; Mitra and Zaman, 2014). حجم نمونه‌ی تازه به‌وسیله‌ی طول اندازه‌گیری شده و قطر مته با استفاده از حجم استوانه به‌دست آمد. چگالی چوب هر نمونه از رابطه (۱) محاسبه شد؛ که در آن m برابر با وزن نمونه خشک شده در آن و V برابر با حجم نمونه تازه است.

با توجه به مطالعات انجام شده در مانگروهایی سایر نقاط جهان (Donato et al., 2011; Kauffman and Donato, 2012; Kauffman et al., 2014; Siteo et al., 2014; Adame et



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه

Fig. 1- Location of the sampling stations in the study site.

جدول ۱- مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های نمونه‌برداری

Table. 1- Geographical coordinates of the sampling stations

Stations	X	Y	Z
S1 T1 P1	347991.641881427	2786496.63596227	4
S1 T1 P2	348024.167462304	2786600.88751323	4
S1 T1 P3	348059.323073503	2786690.03263636	3
S1 T2 P1	348037.207845480	2786340.43210176	3
S1 T2 P2	348112.448294821	2786408.82050980	4
S1 T2 P3	348193.339491597	2786456.83824301	3
S1 T3 P1	348003.418872764	2786048.50127178	2
S1 T3 P2	348050.374195791	2786166.12974093	2
S1 T3 P3	348102.683955061	2786236.92888543	4
S2 T1 P1	348051.645903692	2785754.72864807	2
S2 T1 P2	348206.164794141	2785751.46047324	5
S2 T1 P3	348383.964741012	2785751.93388230	4
S2 T2 P1	348059.694287993	2785498.32954504	3
S2 T2 P2	348188.155538896	2785493.19931181	6
S2 T2 P3	348331.461600000	2785488.51974208	4
S2 T3 P1	348051.120065750	2785282.73224016	3
S2 T3 P2	348152.167304480	2785279.75495679	6
S2 T3 P3	348235.655795409	2785284.05174461	5
S3 T1 P1	347852.003123231	2784255.41992702	6
S3 T1 P2	347934.395480942	2784361.26639348	6
S3 T1 P3	348029.221498606	2784427.28163534	6
S3 T2 P1	348166.817898333	2784361.74169831	6
S3 T2 P2	348087.264	2784209.093	6
S3 T2 P3	348029.151016070	2784120.81984827	6
S3 T3 P1	348138.430168526	2784051.90452892	6
S3 T3 P2	348195.005888776	2784178.04134893	6
S3 T3 P3	348284.905425105	2784254.26731928	6

اینک با داشتن حجم تنه‌ی درخت و چگالی آن، زی‌توده تنه درخت از رابطه (۳) محاسبه شد (Abhijit Mitra et al., 2011; Kauffman and Donato, 2012; Mitra and Zaman, 2014; Patil et al., 2014)، که در آن m نمایانگر زی‌توده تنه، ρ نشان دهنده چگالی تنه و V برابر با حجم تنه است.

برای اندازه‌گیری حجم تنه‌ی درخت از فرمول نیوتن (رابطه ۲) استفاده گردید (Abhijit Mitra et al., 2011; Mitra and Zaman, 2014; Patil et al., 2014) که در آن h برابر با ارتفاع تنه درخت، db ، dm ، dt برابر با به ترتیب قطر در پایه (b)، وسط (m) و بالای تنه درخت (t)، است.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$V = \frac{(db + 4dm + dt)}{6} \times H \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$m = \rho \cdot v \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$n_i bw_i \quad B_{db} = n_1 bw_1 + n_2 bw_2 + n_3 bw_3 = \Sigma \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$L_{db} = n_1 \times Lw_1 + n_2 \times Lw_2 + \dots + n_i \times Lw_i \quad \text{رابطه (۵)}$$

سولفور و اکسیژن در ماتریس‌های آلی و دیگر انواع مواد است (Abhijit Mitra et al., 2011; Mitra and Zaman, 2014; Patil et al., 2014; Kauffman et al., 2014). جهت آنالیز و تعیین درصد کربن اجزای مختلف درخت نمونه‌های آون-خشک شده را آسیاب و الک نموده و مقدار ۰/۰۷ گرم از آن‌ها برای تعیین میزان کربن هر بخش به آزمایشگاه مجهز به دستگاه آنالیز عنصری CHN منتقل گردید (Mitra and Zaman, 2014; Patil et al., 2014). استخراج کربن زی‌توده به وسیله‌ی ضرب زی‌توده هر یک از اجزا در درصد غلظت کربن ویژه‌ی آن‌ها مشخص شدند.

برای محاسبه تولید اولیه تقریبی خالص گیاه از فرمول Karmaker (2006) استفاده شد (رابطه ۶): که در آن $P_N =$ فتوسنتز تقریبی خالص کل کانوپی گیاه بالای سطح زمین، $A =$ نرخ فتوسنتز برای همه برگ‌های کانوپی، $d =$ طول روز برحسب ساعت، $LAI =$ شاخص سطح برگ (مترمربع در متر مربع) است.

مدل PnET-CN دارای داده‌های ورودی از قبیل داده‌های هواشناسی، داده‌های فتوسنتز، داده‌های کانوپی گیاه، داده‌های نیتروژن، داده‌های زی‌توده، داده‌های کربن و داده‌های رسوب است. داده‌های هواشناسی شامل داده‌های تاریخی منطقه به مدت سی سال از سال ۱۳۶۷ تا سال ۱۳۹۷ است، از جمله: حداکثر و حداقل دما، بارش، تشعشع فعال فتوسنتزی، ازن، دی‌اکسیدکربن.

داده‌های تاریخی مربوط به دما و بارش از ایستگاه سینوپتیک چابهار گرفته شد. داده‌های مربوط به تشعشع فعال فتوسنتزی از سایت ECMWF.int به فرمت Net.cdf گرفته شد و سپس در نرم افزار Grads به اکسل تبدیل شده و بر اساس طول و عرض جغرافیایی داده شده، میزان تشعشع فعال فتوسنتزی برای هر ماه در سی سال استخراج شد، ولی داده بر اساس واحد ژول بر متر مربع بود که بایستی به وات بر مترمربع در ثانیه تبدیل می‌شد. داده‌های ازن نیز از همین سایت برای سی سال در هر ماه اخذ شد و توسط نرم افزار گردس به اکسل تبدیل شد که واحد آن ppb بود. داده‌های دی‌اکسیدکربن از سایت (www.co2.earth/historical-co2-datasets) گرفته شد که متعلق به ناسا است. اطلاعات و داده‌های زیست‌توده، ذخیره کربن، نیتروژن و رسوب از داده‌های میدانی استخراج گردید و سایر اطلاعات هم با استفاده از بانک‌های

برای اندازه‌گیری زی‌توده شاخه‌ها، تعداد کل شاخه‌ها بر اساس قطر پایه به سه گروه تقسیم‌بندی شدند:

(۱) کمتر از ۶ سانتی‌متر

(۲) بین ۶-۱۰ سانتی‌متر

(۳) بیشتر از ۱۰ سانتی‌متر.

سپس با در نظر گرفتن اندازه آن‌ها در هر یک از درختان نمونه-برداری شده، شمارش شدند. در هر پلات برای جلوگیری از قطع تمامی شاخه‌ها، شاخه‌های نماینده گروه‌های مختلف (بر اساس قطر پایه)، با کمک اهر دستی بریده شده و به همراه برگ‌هایشان در کیسه‌های مخصوص جمع‌آوری قرار گرفتند و بلافاصله خارج از جنگل مانگرو برگ‌ها با دست جدا شد و با استفاده از ترازو، وزن تر هر شاخه ثبت گردید و جهت برآورد وزن خشک به آزمایشگاه منتقل شدند. در آزمایشگاه، نمونه‌های شاخه‌ها به مدت یک شب در آون $70^\circ C$ به منظور حذف رطوبت قرار گرفت تا به وزن ثابت برسند و پس از محاسبه وزن خشک کل هر شاخه، زی‌توده شاخه‌های خشک هر درخت با استفاده از رابطه ۴ برآورد گردید (Abhijit Mitra et al., 2011; Mitra and Zaman, 2014; Siteo et al., 2014) که در آن B_{db} برابر با زی‌توده شاخه‌های هر درخت، $i = 1, 2, 3$ و n_i نشان دهنده گروه‌های شاخه‌ها، n_i برابر با تعداد شاخه‌ها در گروه شاخه‌ی i ام، bw_i نشان دهنده ی وزن متوسط شاخه‌ها در گروه i ام است.

برای اندازه‌گیری زی‌توده برگ‌ها، همه‌ی برگ‌هایی که از شاخه‌های بریده شده جدا شده بودند، بر اساس سه گروه سبزی شاخه تفکیک گردیده و در آون $70^\circ C$ قرار گرفتند تا خشک شده و به وزن ثابت برسند. زی‌توده هر درخت به وسیله‌ی ضرب متوسط زی‌توده برگ‌های هر شاخه در تعداد شاخه‌های آن درخت محاسبه شد (رابطه ۵) (Abhijit Mitra et al., 2011; Mitra and Zaman, 2014)؛ که در آن $L_{db} =$ زی‌توده برگ هر درخت، $n_i =$ تعداد شاخه‌های هر درخت در هر گروه سبزی، $Lw_i =$ وزن متوسط برگ‌های جدا شده از هر شاخه است.

برای اندازه‌گیری ذخیره کربن از دستگاه آنالیز عنصری CHN استفاده گردید که یک وسیله برای تعیین کربن، هیدروژن، نیتروژن،

اطلاعاتی موجود، داده‌های ماهواره‌ای و تحقیقات گذشته به دست آمده است.

میزان زیست توده اندازه‌گیری شده، n برابر با تعداد کل پلات ها است.

خروجی‌های مدل ذخیره کربن زی‌توده و تولید اولیه خالص (NPP) است (Xu et al, 2017). برای ارزیابی عملکرد مدل از معادله خطای نرمال شده ریشه میانگین مربعات (NRMSE) استفاده شد که اختلاف بین میزان زی‌توده اندازه‌گیری شده توسط روش‌های میدانی (O) و میزان زی‌توده پیش‌بینی شده به وسیله مدل (P) را ارزیابی می‌کند و به صورت رابطه (7) است که در آن O_{max} نشان دهنده حداکثر میزان زیست توده اندازه‌گیری شده، O_{min} حداقل

مقدار NRMSE بین صفر تا صد در نظر گرفته شده است که هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده عملکرد بسیار مناسب مدل است و هر چه مقدار به 100 نزدیک‌تر باشد حاکی از عملکرد بسیار ضعیف مدل است (Thorn et al., 2015; Xu et al, 2017).
آنالیز آماری با استفاده از نرم افزار SPSS ورژن 23 و نمودارها در محیط اکسل 2016 انجام شد.

$$P_N = A * d * LAI \quad \text{رابطه (6)}$$

$$NRMSE = (O_{max} - O_{min})^{-1} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n ((P_i - O_i)^2) / n} \times 100 \quad \text{رابطه (7)}$$

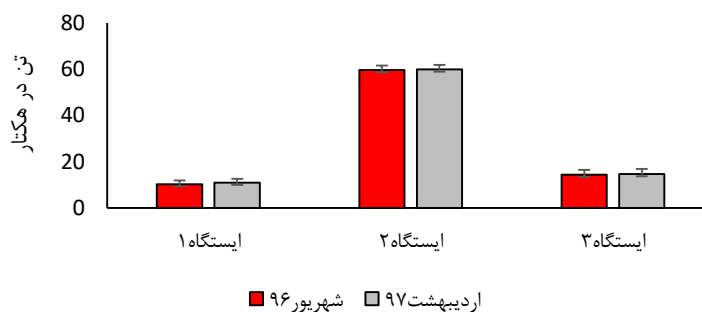
۳. نتایج

میانگین تولید اولیه برای شهریور 96 و اردیبهشت 97 به ترتیب میزان 7/0726 و 7/683 گرم کربن بر مترمربع در روز معادل 219/251 و 238/171 گرم کربن بر مترمربع در ماه به دست آمد. میانگین تولید اولیه گیاه در ایستگاه‌های مختلف در شهریور 96 و اردیبهشت 97 در شکل 4 نشان داده شده است.

میانگین زی‌توده بالای زمین درخت، به ترتیب در شهریور 96 و اردیبهشت 97 مقدار $28/09 \pm 4/52$ و $28/51 \pm 4/49$ تن در هکتار محاسبه شد (شکل 2).

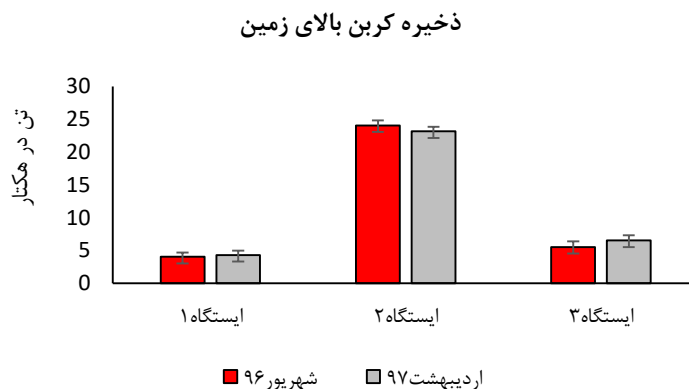
میانگین ذخیره کربن بالای زمین درخت در شهریور 96 و اردیبهشت 97 به ترتیب میزان $11/22 \pm 1/83$ و $11/34 \pm 1/7$ تن در هکتار به دست آمد (شکل 3).

زی توده بالای زمین



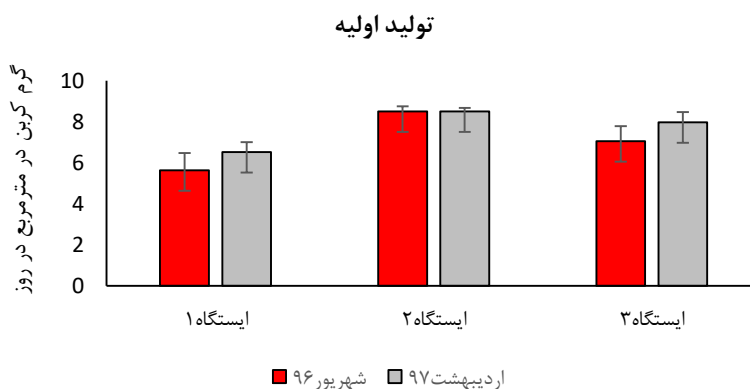
شکل ۲- میانگین زی‌توده بالای زمین در ایستگاه‌های مختلف نمونه‌برداری در شهریور ۹۶ و اردیبهشت ۹۷

Fig. 2- The average of aboveground biomass in different sampling stations during September 2017 and May 2018



شکل ۳- میانگین ذخیره کربن بالای زمین در ایستگاه‌های مختلف نمونه‌برداری در شهریور ۹۶ و اردیبهشت ۹۷

Fig. 3- The average of aboveground carbon stock in different sampling stations during September 2017 and May 2018



شکل ۴- میانگین مقادیر تولید اولیه گیاه A.marina در ایستگاه‌های مختلف نمونه‌برداری در شهریور ۹۶ و اردیبهشت ۹۷

Fig. 4- The average of primary production of A.marina in different sampling stations during September 2017 and May 2018

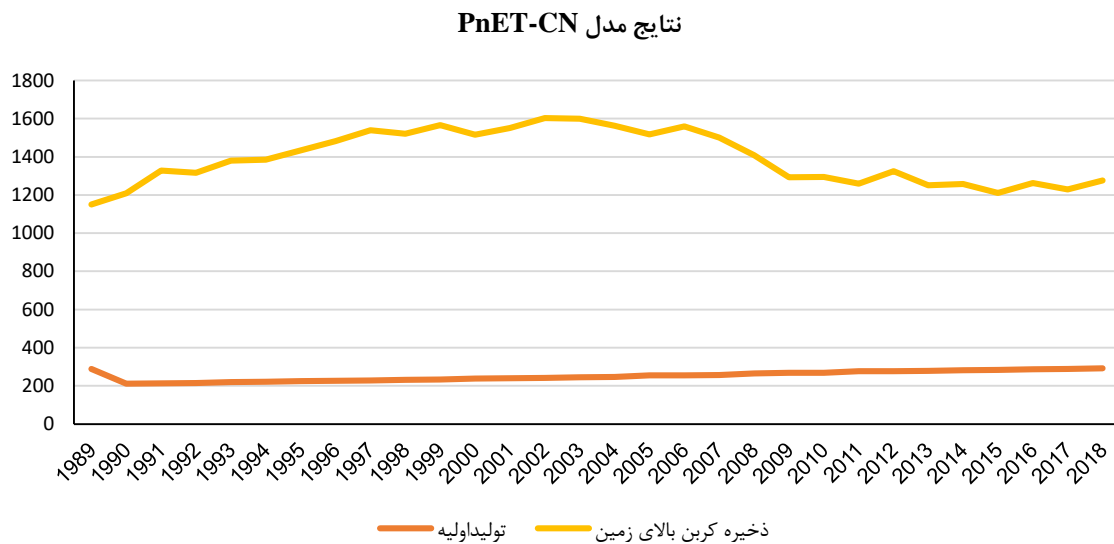
به ترتیب میزان $289/051$ و $291/487$ گرم کربن بر مترمربع در ماه به دست آمد (شکل ۵).

نتایج اعتبارسنجی بر اساس معادله خطای نرمال شده ریشه میانگین مربعات در جدول (۲) آورده شده است.

مقادیر NRMSE نشان می‌دهد که مدل عملکرد مناسبی دارد. بنابراین، نتایج اعتبارسنجی حاکی از صحت پیش‌بینی مدل PnET-CN برای جنگل‌های مانگرو است.

داده‌های ورودی مورد نیاز مدل در نرم افزار MATLAB 8.3 قرار گرفت که مدل PnET-CN به صورت افزونه روی آن نصب شده بود. سپس مدل اجرا گردیده و خروجی گرفته شد.

نتایج حاصل از مدل PnET-CN شامل ذخیره کربن زیست توده بالای زمین درخت و تولید اولیه است. میانگین ذخیره کربن بالای زمین درخت در شهریور ۹۶ و اردیبهشت ۹۷ به ترتیب میزان $12/29$ و $12/77$ تن در هکتار معادل 1229 و 1277 گرم بر مترمربع به دست آمد. میانگین تولید اولیه برای شهریور ۹۶ و اردیبهشت ۹۷



شکل ۵- نتایج مدل PnET-CN

Fig. 5- The results of PnET-CN model.

جدول ۲- نتایج اعتبارسنجی بر اساس NRMSE

Table.2- Validation results based on NRMSE.

Aboveground carbon stock	Primary Production	Validation(NRMSE)
4.48	27.81	شهریور ۹۶
6.37	28.33	اردیبهشت ۹۷

شدت تابش خورشیدی، میزان بارش و توپوگرافی می‌باشد (Istomo et al., 2017).

این مطالعه نشان می‌دهد که ذخایر کربن جنگل‌های مانگرو گواتر (شکل ۳) نسبتاً بیشتر از جنگل‌های مانگرو در ویتنام شمالی (Cuc et al., 2009)، جنوب چین (Chen et al., 2012) و تامل نادو در هند و تالاب مانگرو خلیج پالک در ساحل جنوب شرقی هند (Prasanna et al., 2017) است. در حالی که از میزان کربن در جنگل‌های مانگرو پالوان در فیلیپین (Abino et al., 2014)، چین (Fu and Wu, 2011) و بوهول در فیلیپین (Camacho et al., 2011)، جنگل‌های مانگرو سانداربانز در هند (Abhijit Mitra et al., 2011)، یاپ (Kauffman et al., 2011) و پورواکارتا در اندونزی (Dharmawan and Siregar, 2008) بسیار پایین‌تر است. علت بالا بودن ذخیره کربن در این مناطق، ورودی آب شیرین بیشتر نسبت به منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

میانگین زی‌توده بالای زمین در درختان جنگل‌های مانگرو گواتر (شکل ۲) با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط Abhijit Mitra et al. (2011) در جنگل‌های مانگرو بخش مرکزی سانداربانز در هند برابر بود. همچنین، میانگین زی‌توده بالای زمین در این مطالعه از مانگروهای ماهانادی در هند (Sahu et al., 2016)، بخش غربی مانگروهای سانداربانز در هند (Joshi and Ghose, 2014) پایین‌تر است زیرا در این مانگروها چند گونه مختلف مانگرو وجود داشت. میانگین زی‌توده بالای زمین جنگل‌های مانگرو گواتر بیشتر از جنگل‌های *A. marina* در تایوان (Kuei, 2008)، مانگروهای جنوب شرقی هند (Prasanna et al., 2017) و جنگل‌های مانگرو چین (Tam et al., 1995) بود. تفاوت محتوای زی‌توده در مناطق مختلف، تحت تأثیر مدل مدیریتی آن و عوامل اقلیمی نظیر دما،

حیاتی را پیش‌بینی کنند. دستیابی به این هدف مستلزم این است که مدل‌های بر پایه فرآیند به اندازه‌ای ساده باشند که بتواند دینامیک اساسی این فرآیندها را جذب کنند. همچنین، اطلاعات لازم برای اجرای مدل نیز در دسترس باشد.

کربن بالقوه که می‌تواند به وسیله جنگل‌زدایی به اتمسفر رها شود با ویژگی‌های عملکردی اکوسیستم و تغییر اقلیم در ارتباط است و ناشی از تغییرات زی‌توده منطقه‌ای می‌باشد. شرح دقیق پراکنش زی‌توده در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای تا جهانی نتایج بسیار مهمی دارد و باعث کاهش عدم قطعیت انتشار و ترسیب کربن، نقش آن‌ها در باروری خاک، تخریب یا بازسازی زمین و فهم نقش آن‌ها در فرآیندهای زیست‌محیطی و توسعه پایدار می‌شود (Lu et al., 2006). بنابراین، یک سیستم نظارت بلندمدت جنگل در ترکیب با مدل‌سازی می‌تواند عدم قطعیت‌ها را بشدت کاهش دهد و دقت تخمین ذخیره کربن جنگل را افزایش دهد (Xu et al., 2016).

این مطالعه، به بررسی وضعیت کنونی جنگل مانگرو گواتر با استفاده از اطلاعات میدانی و مدل PnET-CN پرداخته و ضرورت حفاظت و بازسازی این اکوسیستم‌ها، نقش آن‌ها در ذخیره کربن و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه بهبود اقلیم را نشان می‌دهد و اینکه با استفاده از مدل‌سازی نیازی به نمونه‌برداری‌های تخریبی میدانی با هزینه‌های گزاف، وقت‌گیر و دقت پایین نیست. با کمک مدل PnET-CN می‌توان برآورد قابل قبولی از تولید و ذخیره کربن درختان مانگرو داشت و اثرات زیست محیطی و تغییر استفاده زمین را بررسی نمود. با توجه به دشواری اندازه‌گیری مستقیم متغیرهای اکولوژیک فوق در مانگروها، انجام تحقیقاتی همانند پژوهش‌هایی که منجر به ارائه مدل برای برآورد متغیرهای اکولوژیکی مختلف می‌شود، از اهمیت فراوانی برخوردار است و نتایج حاصل از این تحقیق، اطلاعات ارزشمند کمی برای مدیریت پایدار اکوسیستم‌های مانگرو در خلیج گواتر برای برنامه‌ریزان می‌تواند فراهم کند.

میزان تولید اولیه محاسبه شده نشان داد که جنگل‌های مانگرو گواتر در مقایسه با سایر جنگل‌های مانگرو جهان (Alongi and Mukhopadhyay, 2015) پرتولید بوده است (شکل ۴). با توجه به نتایج مدل (شکل ۵) در سال‌های اخیر کاهش ذخیره کربن زی‌توده مشاهده می‌گردد ولی مقدار تولید اولیه تغییر چندانی نکرده است. اثرات ترکیبی فاکتورهای زیست‌محیطی باعث می‌شود که میزان تولید اولیه در این جنگل‌ها ثابت باقی بماند زیرا قبلاً رشد کرده‌اند (Xu et al., 2017).

در این مطالعه، ذخیره کربن جنگل‌های مانگرو گواتر که به صورت میدانی اندازه‌گیری شده بود بعنوان معیار کلیدی در فرآیند اعتبارسنجی مدل بکار رفته است و صحت نتایج مدل را تعیین نمود. ارزیابی عملکرد مدل PnET-CN (جدول ۲) نشان داد که این مدل نتایج مناسبی جهت تخمین تولید و ذخیره کربن جنگل‌های مانگرو ارائه می‌کند. تاکنون مطالعه‌ای در مورد تخمین تولید و ذخیره کربن با استفاده از مدل PnET-CN در جنگل‌های مانگرو صورت نگرفته و مطالعات انجام شده مربوط به جنگل‌های خشکی می‌باشد (Xu et al., 2017).

مدل‌های بر پایه فرآیند یک وسیله مفید برای تعیین کمیت تغییرات زیست محیطی فراهم می‌کنند که به وسیله مشاهدات و اندازه‌گیری‌های میدانی به تنهایی شناسایی نمی‌شوند (Richardson et al., 2010). نظر به این که طی قرن آینده، تغییرات سریع و همزمان در دما، بارش و غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر پیش‌بینی می‌شود، لزوم استفاده از مدل‌های اکولوژیک که به خوبی اعتبارسنجی شده اند، برای پیش‌بینی اثرات این تغییرات عملکرد اکوسیستم‌ها اجتناب‌ناپذیر می‌باشند. مدل PnET-CN در جنگل‌های سراسر آمریکا و اروپا بکار رفته تا اثرات تنوع اقلیم، افزایش دی‌اکسیدکربن اتمسفری، آلودگی ازن و آشفستگی فرآیندهای اکوسیستم و عملکرد اکوسیستم را شبیه‌سازی کند. در حقیقت، یکی از اهداف تحقیقات جهانی، توسعه مدل‌هایی است که می‌توانند اثرات تغییرات همزمان چندین متغیر زیست‌محیطی بر روابط بین چندین فرآیند اکوسیستمی

References:

- Abhijit Mitra, A.M., Kasturi Sengupta, K.S. and Kakoli Banerjee, K.B., 2011. Standing biomass and carbon storage of above-ground structures in dominant mangrove trees in the Sundarbans. DOI:10.1016/j.foreco.2011.01.012
- Abino, A.C., Castillo, J.A.A. and Lee, Y.J., 2014. Species diversity, biomass, and carbon stock assessments of a natural mangrove forest in

Palawan, Philippines. *Pakistan Journal of Botany*, 46(6), pp.1955-1962.

- Adame, M.F., Santini, N.S., Tovilla, C., Vázquez-Lule, A., Castro, L. and Guevara, M., 2015. Carbon stocks and soil sequestration rates of tropical riverine wetlands. *Biogeosciences*, 12, PP.3805-3818. <https://doi.org/10.5194/bg-12-3805-2015>

- Alongi, D.M. and Mukhopadhyay, S.K., 2015. Contribution of mangrove to coastal carbon cycling in low latitude seas. *Agricultural and Forest Meteorology*, 213, PP.266-272. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.10.005>
- Camacho, L.D., Gevaña, D.T., Carandang, A.P., Camacho, S.C., Combalicer, E.A., Rebugio, L.L. and Youn, Y.C., 2011. Tree biomass and carbon stock of a community managed mangrove forest in Bohol, Philippines. *Forest Science and Technology*, 7, PP.161-167. <https://doi.org/10.1080/21580103.2011.621377>
- Chen, L., Zeng, X., Tam, N.F., Lu, W., Luo, Z., Du, X. and Wang, J., 2012. Comparing carbon sequestration and stand structure of monoculture and mixed mangrove plantations of *Sonneratia caseolaris* and *S. apetala* in Southern China. *Forest ecology and Management*, 284, pp.222-229. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.06.058>
- Cuc, N.T.K., Ninomiya, I., Long, N.T., Tri, N.H., Tuan, M.S. and Hong, P.N., 2009. Belowground carbon accumulation in young *Kandelia candel* (L.) Blanco plantations in Thai Binh River Mouth, Northern Vietnam. *International Journal of Ecology & Development*, 12(W09), pp.107-117.
- Danehkar, A., Erfani, M., Nori, G.H., Aghighi, H., Marvi Mohajer, M.R. and Ardakani, T., 2012. Detection of mangrove vegetation area changes at Govater Creek in Sistan & Baluchestan province. *Iranian Journal of Forest*, 4(3), PP.197-207. In Persian. URL: <http://www.sid.ir/en/ViewPaper.asp?ID=273106&varStr=2;DANEHKAR A.,ERFANI M.,NORI G.R.,AGHIGHI H.,MARVI MOHAJER M.R.,ARDAKANI T.;IRANIAN JOURNAL OF FOREST;FALL 2012;4;3;197;207>
- Dharmawan, I.W.S. and Siregar, C.A., 2008. Soil carbon and carbon estimation of *Avicennia marina* (Forsk) Vierh in Ciasem, Purwakarta. *Journal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam*, 5(4), PP.317-328.
- Erfani, M., Nouri, Gh.R., Danekar, A., Marvi Mohajer, M.R., and Ardakani, T. 2012. Detection of mangrove vegetation area changes at Govater Creek in Sistan and Baluchestan province. *Iranian Journal of Forest*, 4(3): 197-207. In Persian.
- Frazier, S., 1999. *Directory of wetlands of international importance*.
- Fu, W. and Wu, Y., 2011. Estimation of aboveground biomass of different mangrove trees based on canopy diameter and tree height. *Procedia Environmental Sciences*, 10, PP.2189-2194. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.343>
- Hoelzer, V., 2014. Strategies and tools of mangrove health monitoring-an approach for the Bay Island Roatán, Honduras. *International Studies of Aquatic Tropical Ecology (ISATEC) 3rd semester*.
- Hosseini Zadeh, O., Hajjarian, M., Khezri Dashkasan, S. and KhayatiNejad Aq gonbad, S. 2018. Identifying and ranking of mangrove forests deforestation causes using Promethee II. *Journal of Marine Science and Technology*. 17(3), P.12. <https://doi.org/10.22113/jms t.2017.42318>. (In Persian)
- Iran Meteorological Organization, 2006. Chabahar Station Data. Retrieved from <http://www.weather.ir>. On: 15 September 2006. (In Persian)
- Istomo, Kusmana, C. and Naibaho, B.D., 2017. Biomass potential on several mangrove planting models in Java Island, Indonesia. *AACL Bioflux*, 10(4), PP.54-767. <https://www.researchgate.net/publication/318700790>
- Joshi, H.G. and Ghose, M., 2014. Community structure, species diversity and above ground biomass of Sundarban mangrove swamps. *Tropical Ecology*. 55(3), PP.283-303. URL: <http://www.tropecol.com/journal/backvolume.htm>
- Karmaker, S., 2006. *Study of mangrove biomass, net primary production & species distribution using optical & microwave remote sensing data* (Doctoral dissertation, Indian Institute of Remote Sensing).
- Kauffman, J.B., Heider, C., Cole, T., Dwire, K.A., and Donato, D.C. 2011. Ecosystem Carbon stocks of Micronesian mangrove forests. *Wetlands*, 31, PP.343- 352.
- Kauffman, J.B. and Donato, D.C., 2012. *Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in*

- mangrove forests* (Vol. 86). Bogor, Indonesia: Cifor.
- Kauffman, J.B., Heider, C., Norfolk, J. and Payton, F., 2014. Carbon stocks of intact mangroves and carbon emissions arising from their conversion in the Dominican Republic. *Ecological Applications*, 24(3), pp.518-527. <https://doi.org/10.1890/13-0640.1>
- Khairuddin, B., Yulianda, F. and Kusmana, C., 2016. Degradation Mangrove by Using Landsat 5 TM and Landsat 8 OLI Image in Mempawah Regency, West Kalimantan Province year 1989-2014. *Procedia Environmental Sciences*, 33, pp.460-464. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.097>
- Kuei, C.F., 2008. Population structure, allometry and above-ground biomass of *Avicennia marina* forest at the Chishui River Estuary, Tainan County, Taiwan. *J For Res*, 30(2), pp.1-16.
- Kusumaningtyas, M.A., Hutahaean, A.A., Fischer, H.W., Pérez-Mayo, M., Ransby, D. and Jennerjahn, T.C., 2019. Variability in the organic carbon stocks, sources, and accumulation rates of Indonesian mangrove ecosystems. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 218, pp.310-323. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.12.007>
- Lu, D., 2006. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International journal of remote sensing*, 27(7), pp.1297-1328. <https://doi.org/10.1080/01431160500486732>
- Mitra, A. and Zaman, S., 2014. *Carbon sequestration by coastal floral community*. Energy and Resources Institute.
- Moradi, S., Danehkar, A., Erfani, M., and Ardakani, T. 2019. Gastropods Diversity in Mangrove Forests of Govater Gulf in Sistan and Baluchestan. *Journal of Wildlife and Biodiversity*, 3(3), pp.36-43. DOI: 10.22120/jwb.2019.108517.1069. (In Persian)
- Patil, V., Singh, A., Naik, N. and Unnikrishnan, S., 2014. Estimation of carbon stocks in *Avicennia marina* stand using allometry, CHN analysis, and GIS methods. *Wetlands*, 34, pp.379-391. <https://doi.org/10.1007/s13157-013-0505-y>
- Prasanna, J., Anand, M., Vijayasekaran, D. and Kumaraguru, A.K., 2017. Allometric model for estimating above ground biomass and carbon storage in Karankadu mangrove swamp and Palk Bay, southeast coast of India. *Indian Journal of Geo Marine Sciences*. 46(08), PP.1682-1692.
- Prasanna, J., Anand, M., Vijayasekaran, D. and Kumaraguru, A.K., 2017. Allometric model for estimating above ground biomass and carbon storage in Karankadu mangrove swamp, Palk bay, Southeast coast of India. <https://nopr.niscpr.res.in/handle/123456789/42507>
- Ghanavati Mohammad Ghasemi, I., Zolgharnein, H. and Khaleidi, H., 2015. Study of genetic diversity of hara trees on the coast of Hormozgan Province using rapid molecular method. *Journal of Marine Science and Technology*, 13(4), pp.81-90. DOR: 20.1001.1.20088965.1393.13.4.9.6. (In Persian)
- Rafiei, G.R. and Danehkar, A., 2006. Identification and zonation of sensitive coastal areas in Sistan and Baluchistan province. *General Department of Natural Resources and Watershed Management of Sistan & Baluchestan Province*. P.258. (In Persian).
- Ray, R., Ganguly, D., Chowdhury, C., Dey, M., Das, S., Dutta, M.K., Mandal, S.K., Majumder, N., De, T.K., Mukhopadhyay, S.K. and Jana, T.K., 2011. Carbon sequestration and annual increase of carbon stock in a mangrove forest. *Atmospheric Environment*, 45(28), pp.5016-5024. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.04.074>
- Richardson, A.D., Williams, M., Hollinger, D.Y., Moore, D.J., Dail, D.B., Davidson, E.A., Scott, N.A., Evans, R.S., Hughes, H., Lee, J.T. and Rodrigues, C., 2010. Estimating parameters of a forest ecosystem C model with measurements of stocks and fluxes as joint constraints. *Oecologia*, 164, pp.25-40. <https://doi.org/10.1007/s00442-010-1628-y>
- Sahu, S.C., Kumar, M. and Ravindranath, N.H., 2016. Carbon stocks in natural and planted mangrove forests of Mahanadi Mangrove Wetland, East Coast of India. *Current Science*, pp.2253-2260.

- Sitoe, A.A., Comissario Mandlate, L.J. and Guedes, B.S., 2014. Biomass and carbon stocks of Sofala Bay mangrove forests. *Forests*, 5(8), pp.1967-1981.
<https://doi.org/10.3390/f5081967>
- Thorn, A.M., Xiao, J. and Ollinger, S.V., 2015. Generalization and evaluation of the process-based forest ecosystem model PnET-CN for other biomes. *Ecosphere*, 6(3), pp.1-27.
<https://doi.org/10.1890/ES14-00542.1>
- Xu, B., Pan, Y., Plante, A.F., Johnson, A., Cole, J. and Birdsey, R., 2016. Decadal change of forest biomass carbon stocks and tree demography in the Delaware River Basin. *Forest Ecology and Management*, 374, pp.1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.045>
- Xu, B., Pan, Y., Plante, A.F., McCullough, K. and Birdsey, R., 2017. Modeling forest carbon cycle using long-term carbon stock field measurement in the Delaware River Basin. *Ecosphere*, 8(5), p.e01802.
<https://doi.org/10.1002/ecs2.1802>