



Analysis of Factors Influencing Urban Environmental Pollution in Coastal Areas (Bandar Anzali, Rezvanshahr, and Astara) Using AHP and RF Models

Zahra Pourmoghaddam ^{ID}¹, Mojtaba Yamani ^{ID}^{2*}, Mansour Jafar Bigloo ^{ID}³

¹ Graduate of Environmental Hazards, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

² Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Associate Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 01 March 2025

Revised: 10 May 2025

Accepted: 19 May 2025

Available Online: 19 May 2025

Keywords:

Caspian Sea

Coastal Environmental

Pollution

Random Forest Algorithm

Analytic Hierarchy Process (AHP)

Pollution Risk Zoning

ABSTRACT

Urban environmental pollution in coastal areas significantly impacts water and soil quality, biodiversity, public health, and tourism activities. This study aims to identify and map pollution risk zones along the coasts of Anzali, Rezvanshahr, and Astara using a hybrid approach combining the Analytical Hierarchy Process (AHP) and the Random Forest (RF) machine learning algorithm. Fourteen critical criteria—including urban wastewater, population, human activity, coastal degradation, natural attractions, and tourism infrastructure—were selected from an initial set of 24 indicators through comparative analysis. Using expert judgment, the relative weights of each factor were calculated in Expert Choice software, and GIS-based spatial layers were generated in ArcGIS Pro. The pollution risk map was created by integrating the weighted layers. The RF model was trained using 70% of the high-risk zones as training data and 30% for testing. Model validation using ROC–AUC analysis showed excellent accuracy for the RF model (AUC = 0.97). The results revealed that Anzali County had the highest proportion of very high-risk zones, while Rezvanshahr and Astara also exhibited significant high-risk areas. The findings highlight the combined impact of human and natural drivers on coastal pollution and offer valuable insights for environmental management, spatial planning, and policy interventions to mitigate future risks.

* Corresponding author: Dr. Mojtaba Yamani

E-mail address: myamani@ut.ac.ir

How to cite this article: Pourmoghaddam, Z., Yamani, M., & Jafar Bigloo, M. (2025). Analysis of Factors Affecting Urban Environmental Pollution in Coastal Areas (Bandar Anzali, Rezvanshahr and Astara) Using (AHP and RF) Models. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(3), 211-234. <https://doi.org/10.22067/geoe.2025.92413.1554>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Coastal areas require special attention due to the vulnerability of ecosystems and the dependence of human activities on them. Today, beaches have become one of the most popular destinations for tourists, and the presence of various coastal features creates diverse potentials for attracting visitors. Tourism, as a rapidly growing phenomenon, has become one of the largest industries in the world. The development of tourism and related recreational activities has a significant impact on the development patterns of regions and helps provide direct and indirect economic, social, cultural, and environmental benefits to host communities. However, at the same time, this development raises concerns and threats regarding environmental degradation and the destruction of the natural, historical, and cultural heritage of local residents. In fact, mass tourism does not equate to cleanliness or environmental sustainability. In this regard, some of the most significant impacts of tourism-related activities on the physical coastal environment include soil erosion, landslides, water quality degradation, shoreline alteration, and litter pollution. Litter pollution has become an undeniable threat to the sustainability of coastal ecosystems, and the threat posed by non-biodegradable plastic waste to coastal environments is increasingly evident. Pollution in the Caspian Sea poses a serious threat to aquatic life and human health. Unfortunately, coastal zones and estuaries are highly exposed to pollution, and this process endangers the survival of marine species. Urban environmental pollution in coastal areas can lead to a decline in water and soil quality, a reduction in biodiversity, health problems, and negative impacts on tourism and recreational activities.

Material and Methods

The main objective of this study is to identify and zone the coastal areas of the three counties of Anzali, Rezvanshahr, and Astara in terms of urban environmental pollution risk using the Analytic Hierarchy Process (AHP) and the Random Forest (RF) machine learning algorithm. In this regard, effective criteria were first identified. From an initial set of 24 criteria, 14 were selected: natural attractiveness, coastal degradation, river, road, human activity, urban drainage, population, urban waste, protection and management, facilities, security, natural landscapes, hotels, and the influence of tourism on population. Information layers for these were prepared in the ArcGIS Pro environment. Using the AHP method, the relative impact of each criterion was determined, and 70% of the high-risk areas were used as training data and 30% as test data for training the Random Forest algorithm. The predictive accuracy of the model results was evaluated using the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve and the Area Under the Curve (AUC).

Results and Discussion

The results of validating the zoning maps using test data showed that the accuracy of the analytic hierarchy process and random forest models was 0.812 and 0.97, respectively. These results show that the random forest model has high accuracy in zoning coastal pollution. The results also show that the security criterion is the most significant in training the machine learning algorithm.

The results of coastal zone pollution zoning in the analytic hierarchy process and random forest model showed that in Anzali County, 0.82% and 10.10% were in the very low-risk class, 0.55% and 16.55% in the low-risk class, 0.6% and 0.36% in the medium-risk class, 73.89% and 27.35% in the high-risk class, and 20.6% and 24.9% in the very high-risk class. In Rezvanshahr County, 0.57% and 12.55% were in the very low-risk class, 7.09% and 28.71% in the low-risk class, 21.27% and 22.68% in the medium-risk class, 66.64% and 98% in the high-risk class, and 0.45% and 0% in the very high-risk class. In Astara County, 0.02% and 26.73% were in the very low-risk class, 6.30% and 23.21% in the low-risk class, 23.87% and 31.20% in the medium-risk class, and 6.44% and 16.51% in the high-risk class.

Conclusion

Pollution from industrial and domestic wastewater entering the coastal waters is one of the major challenges on the northern coasts of Iran. In Bandar Anzali, this problem has been exacerbated due to the lack of adequate wastewater management infrastructure and poor enforcement of environmental laws. The general conclusion for the three cities of Astara, Bandar Anzali, and Rezvanshahr shows that all three regions face specific environmental pollution challenges caused by a combination of natural and human factors. Managers and planners can effectively reduce the risks of pollution in coastal areas by using the results of this research. Furthermore, these results will help facilitate the development and implementation of practical solutions.



تحلیل عوامل مؤثر بر آلودگی محیط زیست شهری در مناطق ساحلی (بندرانزلی، رضوانشهر و آستارا) با استفاده از مدل‌های (AHP و RF)

زهرا پورمقدم^۱، مجتبی یمانی^{۲*}، منصور جعفر بیگلر^۳

^۱ دانش آموخته مخاطرات محیطی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران

^{۲*} استاد گروه جغرافیا طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران

^۳ دانشیار گروه جغرافیا طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
آلودگی محیط زیست شهری در نواحی ساحلی تأثیرات مخربی بر کیفیت آب و خاک، تنوع زیستی، سلامت عمومی و فعالیت‌های گردشگری دارد. این پژوهش با هدف شناسایی و پهنه‌بندی نواحی پرخطر آلودگی در سواحل شهرستان‌های بندرانزلی، رضوانشهر و آستارا با استفاده از ترکیب دو روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و الگوریتم یادگیری ماشین- جنگل تصادفی (Random Forest) انجام شد. از میان ۲۴ شاخص اولیه، ۱۴ معیار کلیدی از جمله پسماند شهری، جمعیت، فعالیت انسانی، تخریب ساحل، جذابیت طبیعی و زیرساخت‌های گردشگری انتخاب و وزن‌دهی شدند. لایه‌های اطلاعاتی در محیط Arc GIS Pro تهیه و تلفیق شدند. داده‌های آموزشی (۷۰٪) و آزمایشی (۳۰٪) برای آموزش مدل RF استفاده شد. ارزیابی مدل با منحنی ROC نشان‌دهنده دقت بسیار بالای مدل RF با AUC برابر با ۰/۹۷ بود. نتایج نشان داد که شهرستان بندرانزلی بیشترین سطح نواحی با خطر بسیار زیاد را دارد، در حالی که رضوانشهر و آستارا نیز در طبقات خطر بالا قرار می‌گیرند. این مطالعه، نشان‌دهنده نقش تلفیقی عوامل طبیعی و انسانی در تشدید آلودگی ساحلی است و می‌تواند ابزاری مؤثر برای برنامه‌ریزی محیط‌زیستی و مدیریت ریسک در مناطق ساحلی محسوب شود.	تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹ کلمات کلیدی: آلودگی زیست‌محیطی نواحی ساحلی الگوریتم جنگل تصادفی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) پهنه‌بندی خطر آلودگی

مقدمه

مسائل زیست‌محیطی به یکی از محورهای اصلی توجه در سال‌های اخیر تبدیل شده‌اند و به اشکال مختلف در کانون توجه قرار گرفته‌اند (Janparvar, Taghizadeh Sarokalaei & Mazloom, 2016). مناطق ساحلی به دلیل آسیب‌پذیری اکوسیستم‌ها و وابستگی فعالیت‌های انسانی به آنها، نیازمند توجه ویژه‌ای هستند. این مناطق، که زیستگاه‌های حساسی برای گونه‌های مختلف گیاهی و جانوری به شمار می‌روند، دارای منابع ارزشمند معدنی و تفریحی نیز بوده و پشتوانه‌ای حیاتی برای معیشت، شیلات و صنایع حمل‌ونقل محسوب می‌شوند (Yaghoubzadeh, Danehkar, Haghighat, Mashhadi Rafiee & Lotfikhah, 2022).

ساحل به‌عنوان سیستمی باز و پهنه‌ای بسیار پویا در مباحث ژئومورفولوژی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این سیستم همواره از دو جهت شامل حرکات آب دریا مانند امواج، جریان‌های ساحلی و پدیده‌های جزرومد (کشنده) و از سوی دیگر، فرآیندهای محیط پس‌کرانه و خشکی شامل فعالیت‌های انسانی، جریان‌های رودخانه‌ای و دینامیک باد تحت تأثیر و تغییر قرار می‌گیرد (Salari Sardari, Arabzadeh, Teymuri & Jam, 2016). آلودگی دریای خزر، تهدیدی جدی برای حیات آبریان و سلامت انسان است. متأسفانه، سواحل و مصب رودخانه‌ها به‌شدت در معرض آلودگی قرار دارند و این روند، بقای گونه‌های دریایی را به خطر می‌اندازد. آلودگی آب به معنی ورود مواد مضر به آب است که باعث تغییر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی یا بیولوژیکی آن می‌شود. این آلودگی می‌تواند برای انسان، حیوانات و فعالیت‌های کشاورزی خطرناک باشد. منابع آلودگی به چهار دسته اصلی تقسیم می‌شوند: فاضلاب‌های شهری و روستایی که حاوی مواد آلی و میکروب‌های بیماری‌زا هستند، پساب‌های صنعتی که شامل مواد معلق و فلزات سنگین می‌شوند، پساب‌های کشاورزی که ناشی از مصرف بی‌رویه کودها و سموم شیمیایی است. آلودگی‌های نفتی و هیدروکربنی که تهدیدی جدی برای اکوسیستم‌های دریایی محسوب می‌شوند.

این آلودگی‌ها به‌صورت شیمیایی، میکروبی و فیزیکی ظاهر می‌شوند که عمدتاً ناشی از افزایش جمعیت، توسعه صنعتی و فعالیت‌های کشاورزی ناپایدار هستند. همچنین از دیگر عوامل تخریب‌کننده می‌توان به افزایش جمعیت شهرها، توسعه صنایع و ورود حجم زیادی از آلاینده‌ها به محیط‌های آبی اشاره کرد که در نهایت منجر به آلودگی شدید دریای خزر می‌شود (Fathalipour, 2023).

فاضلاب یکی از راه‌های ورود مستقیم آلودگی به محیط‌های دریایی است. رودخانه‌ها با انتقال فاضلاب‌های صنعتی، کشاورزی و خانگی به دریاها، باعث آلودگی شدید زندگی آبریان می‌شوند. این آلودگی نه‌تنها سلامت موجودات دریایی را به خطر می‌اندازد، بلکه با کاهش سطح اکسیژن آب، بقای جانداران و گیاهان دریایی را نیز با مشکل روبرو می‌کند (Abirami, 2024).

گردشگری به‌عنوان یک پدیده‌ای با رشد سریع، امروزه به یکی از بزرگترین صنایع جهان تبدیل شده است. توسعه گردشگری و فعالیت‌های تفریحی وابسته به آن، تأثیر زیادی بر الگوی توسعه مناطق دارد این صنعت با تأمین مزایای اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی و زیست‌محیط چه به صورت مستقیم و چه غیرمستقیم می‌تواند به رشد جوامع میزبان کمک شایانی کند. با این حال، گسترش گردشگری همواره نگرانی‌ها و پیامدهایی دارد که می‌توان به تخریب محیط‌زیست، کاهش منابع طبیعی و آسیب به میراث تاریخی و فرهنگی جوامع محلی اشاره کرد. در حقیقت، صنعت گردشگری علیرغم تصور رایج همیشه یک فعالیت کاملاً پاک و بدون پیامدهای منفی نیست (Salehi, Ghadami & Hemmati Gouyomi, 2012). حدود ۴۰ درصد از جمعیت جهان در ساحل یا در منطقه ساحلی زندگی می‌کنند (Ghosh, 2011).

امروزه سواحل به یکی از محبوب‌ترین مقاصد گردشگری در جهان تبدیل شده‌اند. جاذبه‌های طبیعی و تنوع زیستی سواحل، پتانسیل بالایی برای جذب گردشگران ایجاد می‌کند. با این حال، توسعه فعالیت‌های گردشگری در این مناطق می‌تواند پیامدهای نامطلوبی بر محیط‌زیست ساحلی داشته باشد. از جمله مهمترین این آثار می‌توان به فرسایش خاک، رانش زمین، کاهش کیفیت آب‌های ساحلی، تغییرات در خط ساحلی و آلودگی ناشی از تجمع زباله‌ها اشاره کرد (Ziari, Rezvani & Ferdowsi, 2020). تجمع

زباله‌ها به ویژه پلاستیک‌های تجزیه‌ناپذیر، امروزه به خطری جدی برای ثبات و پایداری اکوسیستم‌های ساحلی تبدیل شده‌اند (Lasaiba, 2024). براساس آمار سازمان جهانی گردشگری، بخش گردشگری ساحلی بیشترین تعداد مسافران جهانی را به خود اختصاص داده است. محبوبیت همیشگی سواحل و افزایش تقاضا برای این مناطق، برنامه‌ریزان را به توجه بیشتر به توسعه پایدار در این نواحی وا داشته است. هدف از این تلاش‌ها، حفظ منافع اقتصادی، ارتقای گردشگری و حفاظت از منابع محیط‌زیست است. نوارهای ساحلی به‌عنوان مکان‌هایی با تجمع بالای فعالیت‌های انسانی مانند بازرگانی، انرژی، مهاجرت، سکونت و گردشگری، تحت فشارهای ناشی از فعالیت‌های انسانی قرار دارند که می‌تواند تأثیرات منفی بر کیفیت محیط‌زیست بگذارد. بنابراین، ارزیابی و نظارت بر توسعه کاربری‌ها و فعالیت‌ها در این مناطق ساحلی بیش از پیش ضروری است. توسعه پایدار به‌عنوان یک فرآیند مستمر در تغییرات اقتصادی، اجتماعی و محیطی، به ارتقای رفاه و بهبود کیفیت زندگی در طولانی مدت کمک می‌کند (Darvishi, Rezaei & Shams-Aldini, 2018). پایداری طولانی مدت گردشگری به حفظ و ارتقای محیط زیست آن بستگی دارد (Arabadzhyan et al., 2021). بر اساس گزارش سازمان جهانی گردشگری (UNWTO) از هر دو گردشگر، یک نفر برای گردشگری به مناطق ساحلی سفر می‌کند. گذشته از جنبه‌های مثبت گردشگری ساحلی، مانند اهمیت بسیار زیاد آن و تأثیر آن بر اقتصاد جهانی، پیامدهای منفی به خصوص از نظر شرایط محیطی نیز به همراه دارد اثرات منفی گردشگری در اکوسیستم مناطق ساحلی به آلودگی آب، ساحل و فرسایش خط ساحلی، سوءاستفاده و تخریب صخره‌های مرجانی، تخریب زیستگاه، انقراض برخی گونه‌ها، تخریب گیاهان و جانوران، افزایش ضایعات پلاستیکی، افزایش فشار بر منابع مختلف انرژی و جابه‌جایی فیزیکی و اقتصادی جوامع محلی اشاره کرد (Kabil, Priatmoko, Magda & Denes-david, 2021). پژوهشگران در این پژوهش به دنبال پاسخ این سؤالات بودند که چه عواملی باعث آلودگی پهنه‌های ساحلی سه شهرستان می‌شود؟ همچنین، تحقیق به کندوکاو این نکته پرداخته که آیا شدت آلودگی از جلگه به سمت سواحل در این شهرستان‌ها افزایش می‌یابد یا خیر؟

در خصوص آلودگی محیطی ناشی از گردشگری، ابراهیمی و رضانی پور (Ebrahimi & Ramezanipour, 2018) در پژوهشی تحت عنوان سنجش میزان مسئولیت‌پذیری زیست‌محیطی گردشگران با استفاده از روش پرسشنامه‌ای انجام داده‌اند که جامعه آماری آنها گردشگرانی بوده‌اند که در فصل تابستان از شهرستان رامسر بازدید کرده بودند. این پژوهش بر مبنای فرمول کوکران تعداد ۳۸۴ نفر را به‌عنوان حجم نمونه انتخاب و به این نتیجه رسیدند که میزان تحصیلات و سن گردشگران می‌تواند تأثیر مثبتی بر مسئولیت‌پذیری زیست‌محیطی آنان داشته باشد. در عمومی‌ترین حالت، افراد با سطح تحصیلات بالاتر و سن بزرگ‌تر ممکن است بیشتر از اهمیت حفظ محیط‌زیست آگاهی داشته و مسئولیت‌پذیری بیشتری نسبت به آنان از خود نشان دهند.

بانسال (Bancal, 2017) در پژوهشی تحت عنوان توسعه صنعتی و چالش‌های آلودگی آب در مناطق ساحلی مورد سورات، هند به این نتیجه رسیدند که صنعتی شدن نقش مهمی در توسعه اقتصادی یک کشور دارد. و تخلیه پساب‌های تصفیه‌شده یا نیمه تصفیه شده باعث وخامت در کیفیت منابع آب سطحی بوده است و چالش‌های پیش روی شهر و آموخته‌ها می‌تواند منجر به اتخاذ سیاست‌های ابتکاری و اقدامات دیگری که می‌تواند به‌طور مؤثر به رفع این چالش‌ها کمک کند.

جورگنسن و همکاران (Jorgensen, Krasny & Baztan, 2021) در پژوهشی تحت عنوان پاک‌سازی داوطلبانه ساحل، محیط‌زیست مدنی مدیریت مبارزه با آلودگی پلاستیکی جهانی به این نتیجه رسیدند که زباله‌های دریایی، به‌ویژه آن‌هایی که از پلاستیک تشکیل شده‌اند، یکی از چالش‌های اصلی زیست‌محیطی در سطح جهانی به شمار می‌روند. این معضل نه تنها به سواحل و اکوسیستم‌های دریایی آسیب می‌زند، بلکه بر سلامت بشر و تنوع زیستی نیز تأثیر می‌گذارد. جوامع ساحلی به‌عنوان پاسخ به این چالش، به فعالیت‌های داوطلبانه پاک‌سازی سواحل روی آورده‌اند که فراتر از یک عمل محلی، می‌تواند تأثیرات گسترده‌تری در سطح جهانی داشته باشد. و با استفاده از روش‌های نظارت بر محیط‌زیست و بوم‌شناسی مدنی، تحلیل محتوا از ۵۰ گروه فعال در این زمینه انجام شده است.

گارسز آردونز و همکاران (Garcés-Ordóñez, Díaz, Cardoso & Muniz, 2020) در پژوهشی تحت عنوان تأثیر گردشگری بر آلودگی زباله‌های دریایی در سواحل سانتا مارتا، کرائیب کلمبیا به این نتیجه رسیدند که در فصول توریستی بالا، تعداد گردشگران و آلودگی ماکرولیت‌ر به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در این فصل، پلاستیک‌ها بین ۳۰ تا ۷۷ درصد از کل ماکرولیت‌رها را تشکیل می‌دهند. همچنین، غلظت میکروپلاستیک‌ها نیز از ۱ تا ۳۵۵ در متر متغیر بود. در بازخورد نظرسنجی‌ها، گردشگران به‌عنوان منبع اصلی زباله‌ها شناسایی شدند و پلاستیک به‌عنوان رایج‌ترین نوع زباله گزارش شد.

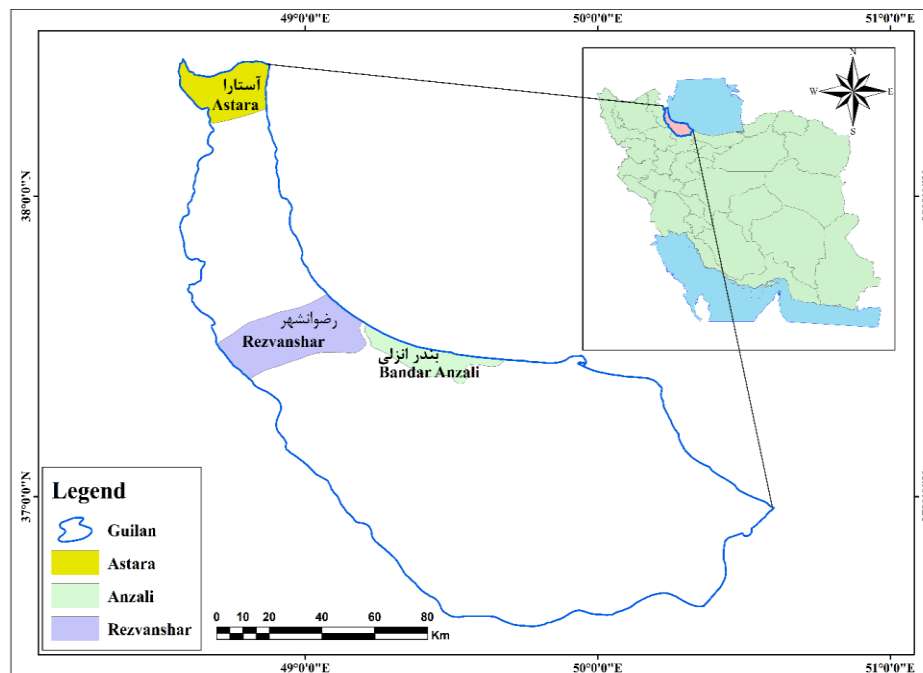
بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات انجام شده به بررسی نقش گردشگران در آلودگی مناطق ساحلی و چالش‌های زیست محیطی سواحل اشاره داشته‌اند مطالعات کمتری به بررسی نقش سایر عوامل مؤثر در آلودگی مناطق ساحلی و تعیین و شناسایی پهنه‌های آلودگی پرداخته‌اند. در این پژوهش با به کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی به‌عنوان ابزاری قدرتمند جهت تهیه و آماده‌سازی عوامل مؤثر و تجزیه و تحلیل آنها استفاده گردید. از نوآوری این پژوهش می‌توان از به کارگیری و مقایسه روش‌های تحلیل سلسله مراتبی و جنگل تصادفی در پهنه‌بندی آلودگی مناطق ساحلی و تعیین مهمترین عوامل از کارشناسان خبره نام برد.

منطقه مورد مطالعه

بندر انزلی اولین و بزرگترین بندر سواحل جنوبی دریای خزر در منطقه جلگه‌ای و ساحلی استان گیلان در طول شرقی ۴۹ درجه و ۲۸ دقیقه و عرض شمالی ۳۷ درجه و ۲۸ دقیقه واقع شده است. بخش مهمی از محیط زیست طبیعی این شهرستان را دریا (۴۰ کیلومتر نوار ساحلی) و بخش مهم دیگر را اکوسیستم ارزشمند تالاب انزلی با مساحتی بالغ بر ۲۷۵ کیلومترمربع تشکیل می‌دهد که ۳۳ کیلومترمربع آن به مساحت شهری اختصاص یافته و دارای بافتی خطی است (Pourshikhian, Amar & Ebrahimi, 2012). شهرستان رضوانشهر یکی از شهرستان‌های مهم در شمال غربی استان گیلان می‌باشد که بین سواحل دریای خزر و رشته کوه‌های تالش قرار دارد این شهرستان از دو بخش جلگه‌ای و کوهستانی تشکیل شده است. شهرستان رضوانشهر در طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۷ دقیقه و در عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۳۳ دقیقه و ارتفاع ۵ متر از سطح دریا واقع است. شهرستان آستارا با توجه به نقشه جغرافیایی، این شهرستان در ۴۸ درجه و ۵۲ دقیقه و ۳۰ ثانیه طول شرقی و در ۳۸ درجه و ۲۶ دقیقه عرض شمالی جغرافیایی از خط استوا شده است (Haji Amiri, Asghari, Amar & Poursheykhian, 2023). مساحت این شهرستان بالغ بر ۳۳۰ کیلومترمربع است (Movahedi & Rostami, 2021). شکل ۱، موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

مواد و روش‌ها

با توجه به اینکه هدف از این پژوهش پهنه‌بندی آلودگی محیط زیستی شهری در مناطق شهری می‌باشد؛ در همین راستا ابتدا جمع‌آوری اطلاعات به‌صورت مطالعات کتابخانه‌ای و سپس میدانی انجام شد که از منابع مختلف مانند سازمان محیط‌زیست گیلان (آمار پسماندهای شهری و فاضلاب‌های شهری سه شهرستان) و سازمان میراث فرهنگی گیلان (آمار ورود گردشگران در سه شهرستان) گردآوری شدند. بر اساس پیشینه پژوهش ابتدا ۲۴ معیار به‌منظور بررسی آلودگی محیط زیست شهری انتخاب شد (جدول ۱). در ادامه ۱۴ معیار شامل: امکانات، هتل‌ها، امنیت، مناظر طبیعی، حفاظت و مراقبت، جاده‌ها، رودخانه‌ها، ارجحیت گردشگری بر جمعیت، فعالیت انسانی، تخریب ساحل، جذابیت طبیعی، پسماند شهری، فاضلاب شهری و جمعیت در مناطق مورد مطالعه، تعریف و در محیط نرم‌افزار Arc GIS Pro آماده‌سازی شد. قابل ذکر است داده‌های هر معیار شامل داده‌های اولیه از طریق بازدید میدانی، مشاهده و پرسشنامه حاصل شد و داده‌های ثانویه از منابع مختلفی چون سازمان محیط‌زیست گیلان و سازمان میراث فرهنگی گیلان، پایگاه OSM و سایت آمار دریافت شد و در محیط Arc GIS Pro رقومی‌سازی شد. همچنین از نرم‌افزار Google Earth جهت شناخت بهتر معیارها و برداشت معیارها در مناطق مورد مطالعه، استفاده شد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

Fig.1. Geographical location of the study area

بعد از تعریف و آماده‌سازی معیارهای ۱۴ گانه جهت محاسبه وزن و ضریب اهمیت هر یک از معیارهای پژوهش از روش AHP استفاده گردید. روش‌های مختلفی جهت محاسبه وزن معیارها در تحلیل سلسله مراتبی AHP وجود دارد که در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice محاسبه انجام گرفت (شکل ۲). این متغیرها با رجوع به دستگاه‌ها و ادارات از قبیل سازمان محیط زیست، سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری، شهرداری، سازمان آب و فاضلاب، سازمان جهاد کشاورزی و سایر ارگان‌های مرتبط در اختیار قرار گرفته شد که با توجه به موضوع و هدف تحقیق از پرسشنامه و نظرات کارشناسان خبره (۳۰ نفر از کارشناسان حوزه‌های ذکر شده) استفاده و سپس به صورت مستقل ماتریس مقایسه زوجی تشکیل شد و در نهایت با میانگین وزن نهایی معیارها محاسبه شد، همچنین میزان نرخ ناسازگاری در تمامی پرسشنامه‌ها کمتر از ۰/۱ بوده است. بعد از تهیه نقشه‌های وزن‌دهی شده و تحلیل معیارها، اقدام به همپوشانی نقشه‌های تولیدشده در محیط نرم‌افزار Arc GIS Pro گردید و نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر آلودگی پهنه‌های ساحلی ارائه شد.

مدل فرایند تحلیل سلسله مراتبی AHP یک روش چند معیاره مؤثر و قابل انعطاف به شمار می‌آید. این روش در تعیین اولویت‌ها و اتخاذ بهترین تصمیم‌ها در شرایطی که نیاز به ارزیابی جنبه‌های کمی و کیفی یک تصمیم وجود دارد، یاری می‌کند (Maghsoudi, Mohammad Khan & Gholami, 2023). روند کلی پژوهش در شکل ۳، نمایش داده شده است.

الگوریتم جنگل تصادفی

بخش دوم روش پژوهش این مطالعه پهنه‌بندی آلودگی محیط زیست شهری در مناطق شهری با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی می‌باشد. الگوریتم ذکر شده از نوع روش یادگیری نظارت شده است که از تلفیق درخت وایازی و طبقه‌بندی حاصل می‌شود و تا به امروز یکی از بهترین و کاربر پسندترین الگوریتم‌های یادگیری ماشین است (Breiman, 2001). در این مدل، نمونه‌گیری تصادفی از اطلاعات و متغیرها، به صورت خودکار و تکرارشونده به منظور تولید انبوهی از درختان رگرسیونی انجام خواهد شد. برای

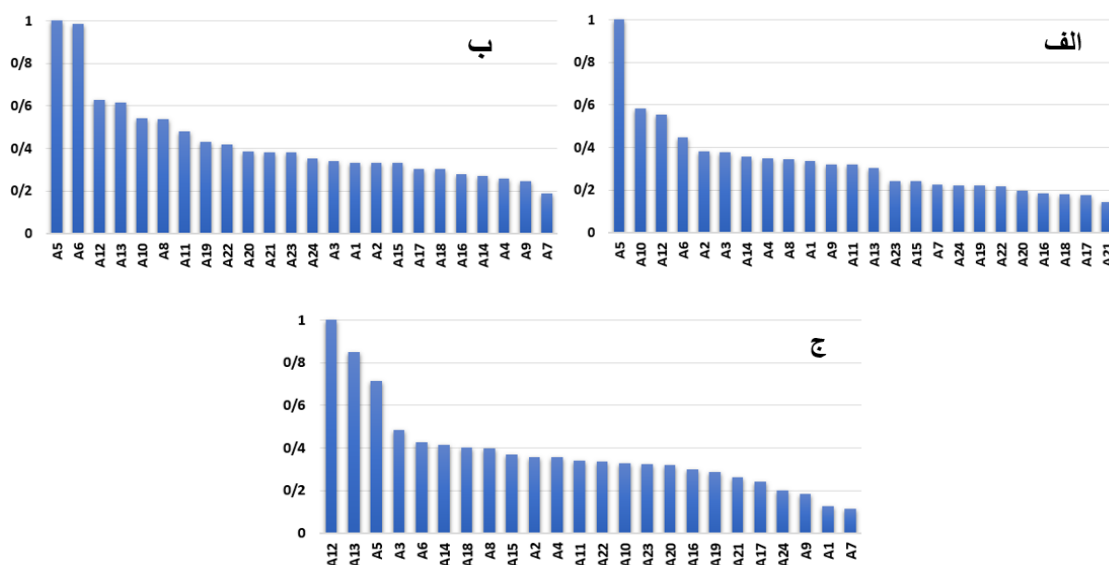
تعیین تعداد درختان بهینه، ابتدا یک تعداد درخت اولیه برای تولید منحنی تغییرات میانگین مربعات خطا (MSE) در مقابل تعداد مشخصی از درختان نمونه آموزشی و ارزیابی ایجاد می‌شود (Karnejadi, Ownegh, Pourghasemi, Bahremand & Motamedi, 2019).

در این پژوهش به منظور به کارگیری این الگوریتم در ارزیابی آلودگی محیط زیست شهری، به زبان پایتون و کتابخانه Scikit Learn و پکیج Platform Zpyder استفاده شد. در همین راستا این الگوریتم نیازمند نمونه‌های آموزشی با تعداد و توزیع کافی و به صورت پراکنده در سطح مناطق می‌باشد نمونه‌های مربوط به مناطق آلوده ساحلی با بازدیدهای میدانی شناسایی و در سطح مناطق برداشت شد که ۷۰٪ از نمونه‌ها جهت آموزش مدل و ۳۰٪ باقیمانده برای اعتبار سنجی نتایج مدل استفاده شد. علاوه بر نمونه‌های آموزشی، معیارهای مؤثر بر آلودگی مناطق ساحلی به عنوان فاکتور مستقل در پهنه‌بندی به کار گرفته خواهد شد.

جدول ۱- شاخص‌های مؤثر در پهنه‌بندی آلودگی سواحل مناطق مورد مطالعه

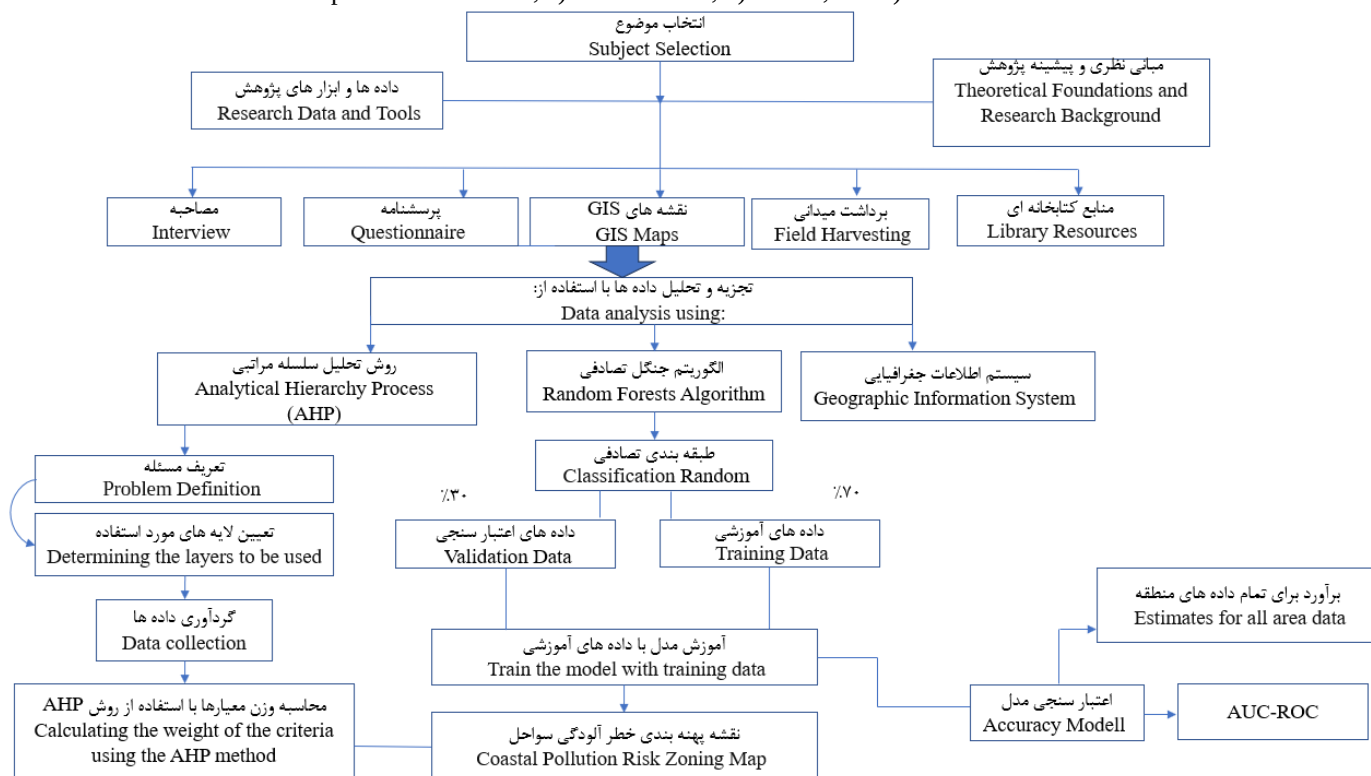
Table 1- Effective indicators in coastal pollution zoning of the studied areas

شماره	معیار	شماره	معیار
Number	Criteria	Number	Criteria
	درجه استفاده بی‌رویه از منابع آبی در ساحل توسط گردشگران	A13	میزان غلظت مواد آلاینده در آب و خاک
	Degree of excessive use of water resources on the coast by tourists		Concentration of pollutants in water and soil
	تأثیر گردشگری بر جمعیت محلی و فرهنگ محلی ساحل	A14	درجه آلودگی سطح آب و خاک
	The impact of tourism on the local population and local culture of the coast		Degree of contamination of water and soil surfaces
	تعداد بازدیدکنندگان	A15	اندازه تراکم جمعیت
	Number of visitors		Population density size
	درآمد از گردشگری	A16	مقدار استفاده از پهنه ساحلی
	Income from tourism		Amount of coastal zone use
	تعداد هتل‌ها و امکانات اقامتی	A17	پسماندهای خانگی و صنایع آلوده‌ساز
	Number of hotels and accommodation facilities		Household waste and polluting industries
	تنوع فعالیت‌های گردشگری	A18	میزان حفاظت و مراقبت
	Diversity of tourism activities		The level of protection and care
	امکانات و خدمات عمومی	A19	تنوع زیستی
	Public facilities and services		Biodiversity
	امنیت	A20	فعالیت‌های انسانی
	Security		Human activities
	جاذبیت طبیعی	A21	ارزش مناظر طبیعی
	Natural charm		The value of natural landscapes
	فرهنگ و تاریخچه	A23	مقدار تولید زباله توسط گردشگران
	Culture and history		Amount of waste produced by tourists
	دسترسی و حمل و نقل	A24	میزان آلودگی آب دریا به دلیل فاضلاب گردشگران
	Access and transportation		The level of seawater pollution due to tourist sewage
			تخریب و تغییر در محیط طبیعی ساحل به دلیل تمرکز گردشگران
			Destruction and change in the natural environment of the beach due to the concentration of tourists
			A12



شکل ۲ - وزن نهایی معیارهای مؤثر در آلودگی پهنه‌های ساحلی، مقایسه زوجی متغیرهای پژوهش توسط خبرگان در سه شهرستان، الف) رضوانشهر، ب) آستارا و ج) بندرانزلی

Fig.2. Final weight of effective criteria in coastal zone pollution, pairwise comparison of research variables by experts in three cities, a) Rezvanshahr, b) Astara, and c) Bandar Anzali



شکل ۳ - مراحل و روند کلی پژوهش

Fig.3. General Research Steps and Process



شکل ۴- الف) انباشت زباله‌ها توسط گردشگران در جنگل گیسوم رضوانشهر ب) انباشت زباله‌ها توسط گردشگران در اطراف رودخانه مرداب آستارا ج) انباشت زباله‌ها توسط گردشگران بلوار مقابل ساحل آستارا د) انباشت زباله در بلوار منتهی به ساحل کاسپین بندرانزلی

Fig.4. A): Garbage accumulation by tourists in the Gisom forest of Rezvanshahr B): Garbage accumulation by tourists around the Mardab River in Astara C): Garbage accumulation by tourists on the boulevard in front of the Astara beach D): Garbage accumulation on the boulevard leading to the Caspian coast in Bandar Anzali

ارزیابی کارایی مدل‌ها

به منظور ارزیابی صحت نقشه‌های نهایی مدل‌ها از منحنی ویژگی عملکرد نسبی ROC استفاده شد. سطح زیر منحنی AUC نام دارد. این منحنی مشخصه عملکرد نسبی هر مدل را نشان می‌دهد و نموداری است که در آن نسبت پیکسل‌هایی که وقوع یا عدم وقوع آلودگی به وسیله مدل به درستی پیش‌بینی شده روی محور افقی (مثبت درست یا Specificity) در برابر مقدار مکمل آن یعنی نسبت پیکسل‌هایی که نادرست پیش‌بینی شده‌اند (مثبت غلط یا Sensitivity) روی محور عمودی ترسیم می‌شود. در این پژوهش این منحنی در نرم‌افزار GIS Pro با استفاده از افزونه Arc SDM و تابع ROC رسم شد. نتایج AUC بین ۰/۵ تا ۱ متغیر است. مقادیر عدد ۰/۵ به معنی ضعیف بودن نتایج و مقادیر عدد نزدیک به ۱ نشان‌دهنده نتایج مطلوب صحت مدل می‌باشد (Chen et al., 2020).

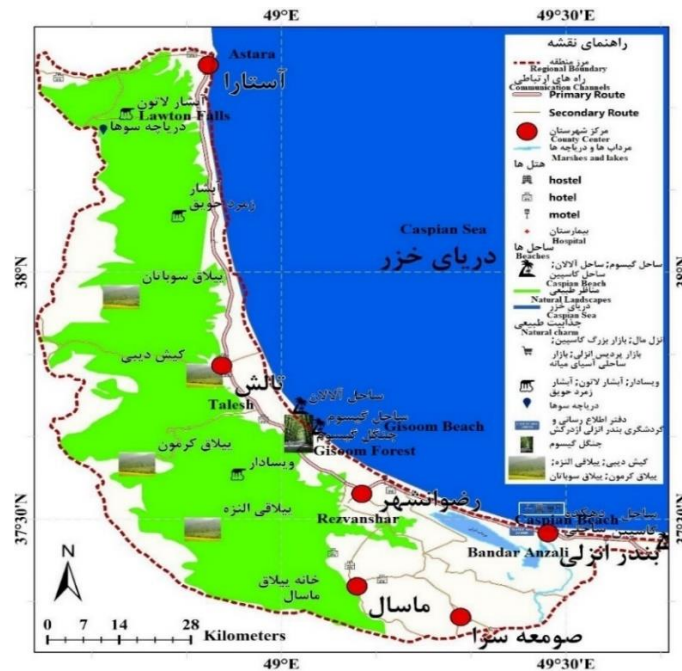
نتایج و بحث

نقشه گردشگری

نقشه گردشگری به عنوان یک ابزار تحلیلی و کارآمد، به شناسایی و ارزیابی جاذبه‌های گردشگری خاص، به ویژه در نواحی ساحلی پرداخته است. این نقشه با استفاده از فناوری‌های نوین، اطلاعات مکانی و داده‌های مرتبط را به گونه‌ای یکپارچه‌سازی می‌کند که امکان تحلیل دقیق ویژگی‌ها و پتانسیل‌های گردشگری مناطق ساحلی را فراهم می‌کند (شکل ۵).

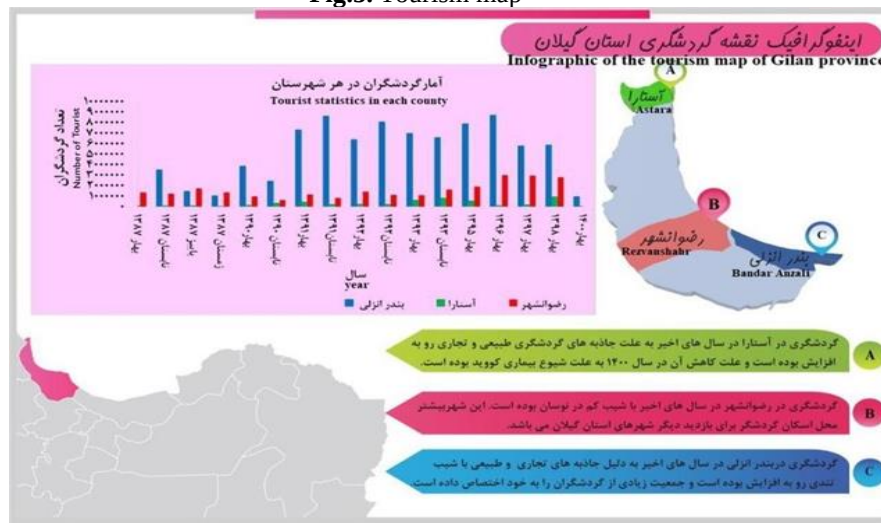
آمار گردشگران مناطق مورد مطالعه در شکل ۶، نمایش داده شده است. این آمار بر اساس ورود گردشگران به شهرستان‌های مورد مطالعه، در سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۴۰۰ از سازمان میراث فرهنگی و سایت آمار دریافت شد. با توجه به نمودار آمار گردشگران مناطق مورد مطالعه، تعداد گردشگران در شهرستان‌های مختلف بسته به جاذبه‌ها و امکانات با فراز و نشیب روبه‌رو بوده است. لذا طبق آمار

دریافتی از سازمان میراث فرهنگی تعداد گردشگران در مناطق مورد مطالعه متغیر بوده است. قابل ذکر است به غیر از سال ۱۴۰۰ که کشور درگیر بیماری کوئید ۱۹ بوده در دیگر سال‌ها آمار گردشگران با شیب ملایمی رو به رشد بوده است. شهرستان بندرانزلی و رضوان شهر از آمار گردشگران بالاتری نسبت به شهرستان آستارا برخوردار هستند. شهرستان آستارا بر اساس مصاحبه‌های انجام شده و مشاهدات میدانی به دلیل بعد مسافت از حجم گردشگران کمتر و اقامت طولانی مدت آنها برخوردار است.



شکل ۵- نقشه گردشگری

Fig.5. Tourism map



شکل ۶- اینفوگرافیک آمار گردشگران مناطق مطالعاتی (سازمان میراث فرهنگی)

Fig.6. Infographic of tourist statistics in the study areas (Cultural Heritage Organization)

ارجحیت متغیرهای مورد بررسی

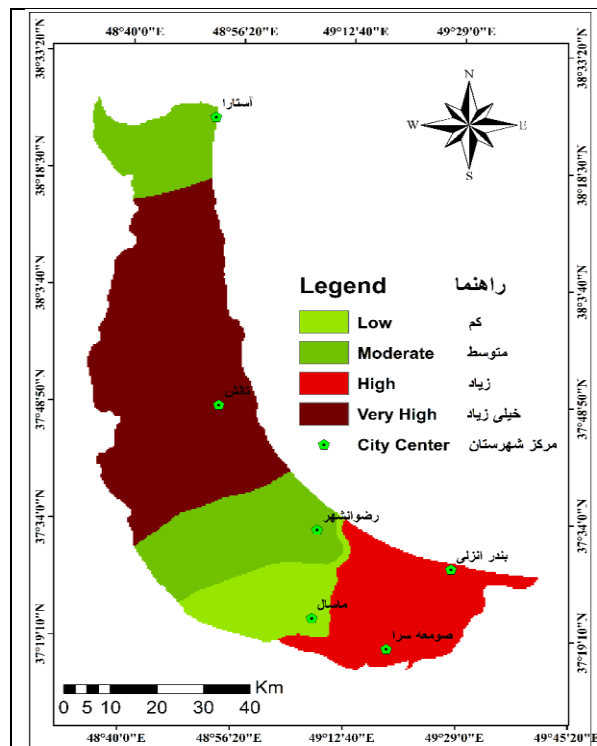
پسماند شهری: معیار پسماند شهری، یکی از مهمترین عناصر در آلوده شدن سواحل در شهرستان‌های جلگه‌ای می‌باشد. نقشه این معیار در شکل ۷، نمایش داده شده است در این نقشه، هر چقدر از طبقه کم به سمت طبقه خیلی زیاد پیش می‌رویم میزان پسماند افزایش می‌یابد. به طوری که شهرستان بندرانزلی به عنوان یک شهر بندری و گردشگرپذیر با جمعیت بالای بومی و گردشگران، پسماند زیادی تولید می‌کند. با وجودی که گردشگران در شهرستان رضوان شهر بیشتر هستند اما اقامت آنها به صورت موقت می‌باشد این امر در بازدیدهای میدانی نیز مشاهده شد به همین دلیل کمترین پسماند را دارد. اما شهرستان آستارا به دلیل موقعیت بندری خود موجب اقامت طولانی تر گردشگران و آشنایی ساکنان محلی با محیط زیست، امتیاز بالاتری در تولید پسماند دارد.

فاضلاب شهری: مسئله فاضلاب شهری، یکی از چالش‌های مهم در بسیاری از مناطق شهری، خصوصاً در سواحل شمالی ایران است. نقشه این معیار در شکل ۸، نمایش داده شده است در این نقشه، هر چقدر از طبقه کم به سمت طبقه خیلی زیاد پیش می‌رویم میزان فاضلاب افزایش می‌یابد. به طوری که شهرستان بندرانزلی به عنوان یکی از مهم ترین بنادر شمال ایران و شهری با جمعیت بالا با افزایش فاضلاب شهری روبه‌رو است. توسعه صنعتی و جمعیت زیاد در این منطقه، منجر به تولید فاضلاب بیشتر می‌شود شهرستان آستارا به دلیل موقعیت مرزی و جمعیت زیادی که دارد از نظر زیرساخت‌های گردشگری مانند هتل‌ها، رستوران‌ها و امکانات تفریحی کمتر توسعه یافته است این موضوع می‌تواند مانع از جذب گردشگران شود. در مقابل، شهرستان رضوان شهر به دلیل داشتن امکانات بهتر و جاذبه‌های گردشگری متنوع تر، موفق به جلب بیشتر گردشگران و باعث افزایش میزان تولید فاضلاب شهری شده است و این شهرستان‌ها به دلیل عدم داشتن سیستم تصفیه فاضلاب به صورت نامطلوب و بدون تصفیه به رودخانه‌ها و در نهایت به دریا تخلیه می‌شود.

فعالیت انسانی: سواحل بندرانزلی و رضوان شهر به عنوان نقاط مهم گردشگری و اقتصادی در استان گیلان، فعالیت‌های متنوعی را تجربه می‌کنند. نقشه این معیار در شکل ۹، نمایش داده شده است در این نقشه، هر چقدر از طبقه خیلی کم تا خیلی زیاد پیش می‌رویم میزان فعالیت انسانی افزایش می‌یابد. به طوری که شهرستان رضوان شهر با سواحل زیبا، مقصد محبوب گردشگری است، در حالی که بندرانزلی به عنوان یک بندر تجاری و حمل و نقل کالا شناخته می‌شود. برعکس، آستارا به عنوان یک شهر مرزی با سواحل زیبا، از نظر فعالیت‌های انسانی کمتر توسعه یافته است.

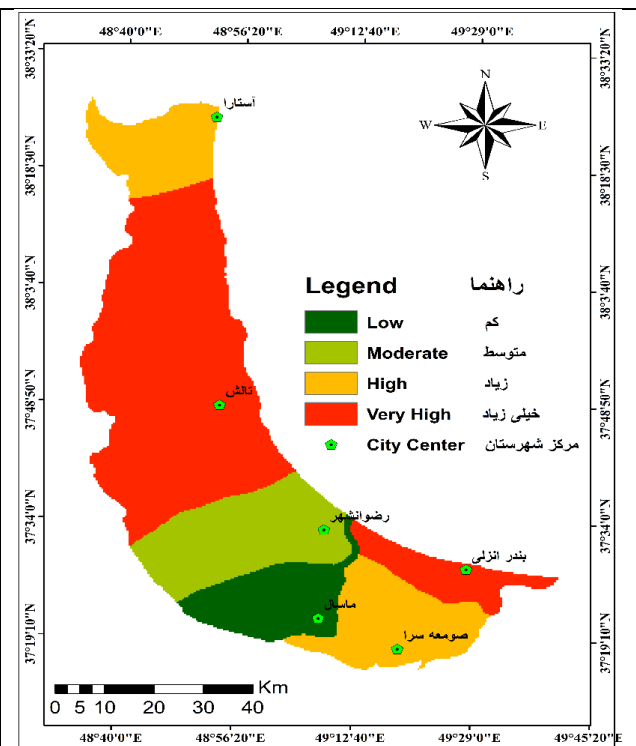
حفاظت و مراقبت: نقشه حفاظت و مراقبت در مدیریت محیط زیست نقش کلیدی در کاهش آلودگی و حفظ اکوسیستم ساحلی دارد. نقشه این معیار در شکل ۱۰، در دو کلاس مناطق حفاظت شده و حفاظت نشده با رنگ سبز و رنگ صورتی نمایش داده شده است. در آستارا، سواحل و تالاب استیل تحت حفاظت بوده و به جذب گردشگران و بهبود صنعت گردشگری کمک می‌کند، در حالی که بندر انزلی فعالیت مؤثری در حفاظت محیط زیست ندارد و این امر به آلودگی بیشتر و تغییر چشم انداز کمک کرده است. همچنین، رضوان شهر در مقایسه با دو شهرستان دیگر از نظر حفاظت سواحل در موقعیت پایین تری قرار دارد.

تخریب ساحل: شهرستان‌های ساحلی به دلیل ظرفیت‌های گردشگری، در حال توسعه تأسیسات جدیدی مانند هتل‌ها و رستوران‌ها هستند، اما این توسعه بدون نظارت می‌تواند اکوسیستم‌های طبیعی را تحت تأثیر قرار دهد. نقشه این معیار در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نمایش داده شده است. در این نقشه هر چقدر از طبقه خیلی کم به سمت خیلی زیاد پیش می‌رویم میزان تخریب افزایش می‌یابد. به طوری که بندرانزلی و رضوان شهر به دلیل ورود بالای گردشگران و ساخت و سازهای غیرقانونی با مشکلات زیست محیطی بیشتری مواجه هستند و آستارا با اجرای پروژه‌های حفاظتی، تخریب کمتری را تجربه کرده است. افزایش جمعیت و گردشگران بدون برنامه ریزی منجر به تولید فاضلاب بیشتر و تخریب محیط زیست ساحلی می‌شود.



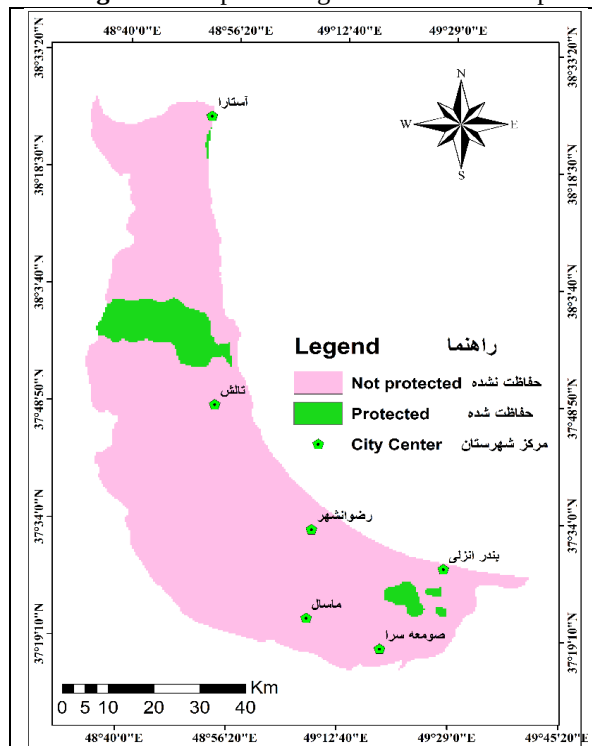
شکل ۸- نقشه طبقه‌بندی شده فاضلاب شهری

Fig.8. Municipal Sewage Classification Map



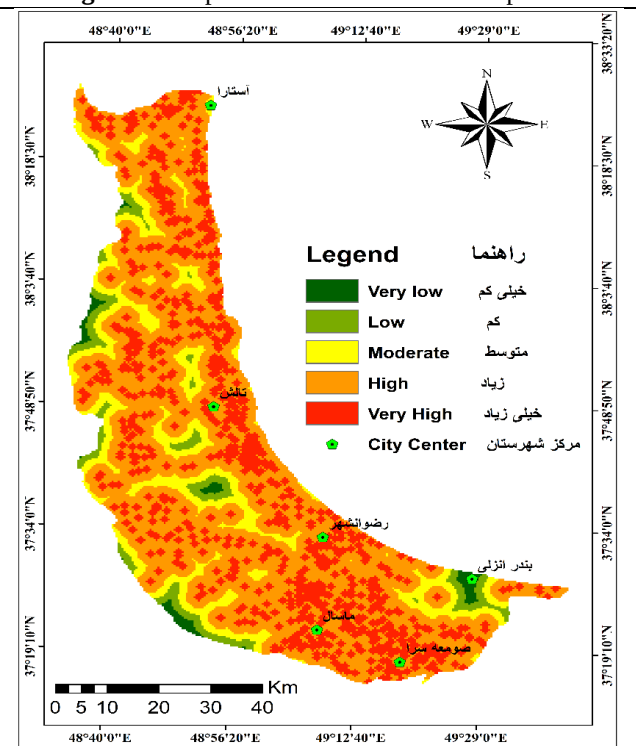
شکل ۷- نقشه طبقه‌بندی شده پسماند شهری

Fig.7. Municipal Waste Classification Map



شکل ۱۰- نقشه طبقه‌بندی شده حفاظت و مراقبت

Fig.10. Protection and Care Classified Map



شکل ۹- نقشه طبقه‌بندی شده فعالیت انسانی

Fig.9. Human Activity Classified Map



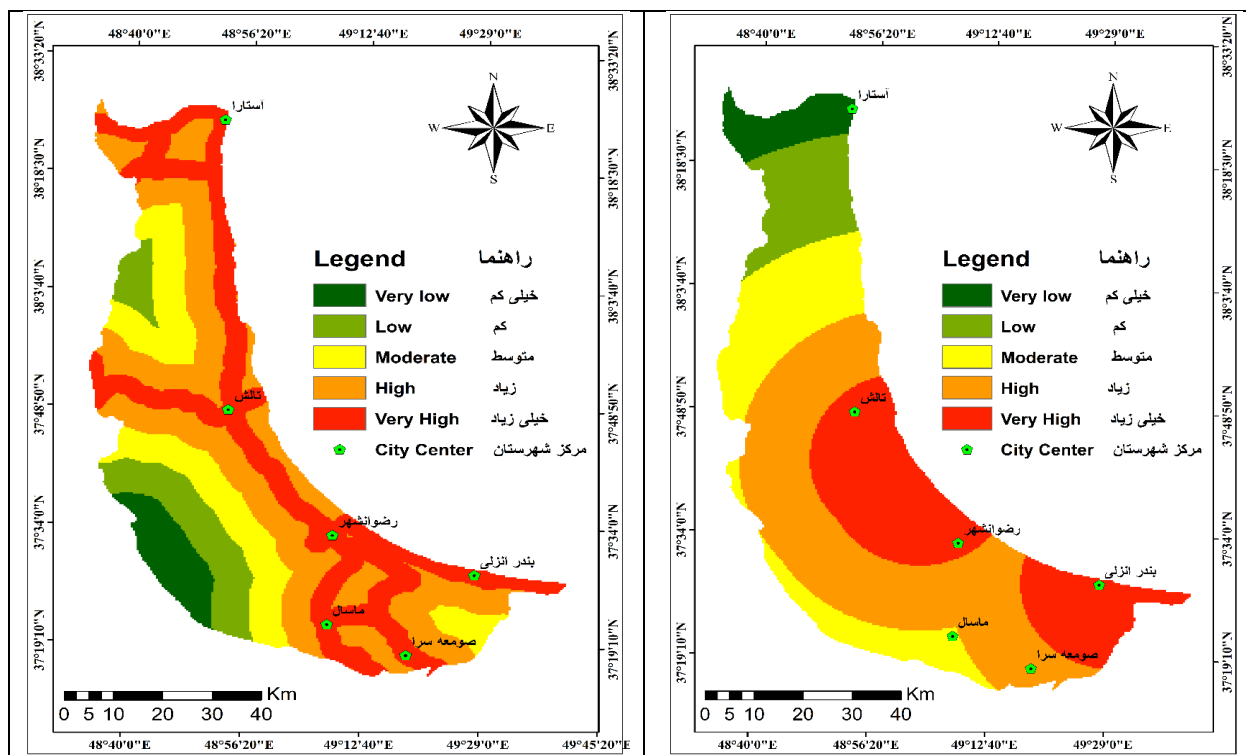
شکل ۱۱- الف) ساحل محصور در ساحل آستارا ب) شروع ساخت و سازها در ساحل

Fig.11. A) Enclosed beach on Astara coast, B) Construction begins on the beach

دسترسی و حمل و نقل (جاده): دسترسی یکی از عوامل اصلی افزایش گردشگر در یک منطقه می باشد. نقشه این معیار در شکل ۱۳، نمایش داده شده است. در این نقشه، هر چقدر از طبقه خیلی کم به سمت خیلی زیاد پیش می رویم میزان دسترسی افزایش می یابد. شهرستان بندرانزلی به عنوان یکی از مقاصد اصلی گردشگری با جاده های دسترسی مناسب به سواحل، شاهد افزایش جمعیت گردشگران و در نتیجه تولید پسماند و آلودگی است. در مقابل، شهرستان رضوان شهر به دلیل عدم وجود جاده نزدیک به سواحل، نتوانسته به خوبی از پتانسیل های گردشگری خود بهره برداری کند. شهرستان آستارا نیز با وجود چالش های مشابه در زمینه آلودگی، با تجمع گردشگران و عدم مدیریت مناسب پسماندها، به یکی از معضلات اصلی خود تبدیل شده است.

جاذبیت طبیعی: جاذبه های طبیعی از جمله آبشارها باعث جذب گردشگر در یک منطقه می شود. نقشه این معیار در شکل ۱۴، نمایش داده شده است. در این نقشه هر چقدر از طبقه خیلی کم به سمت خیلی زیاد پیش می رویم جاذبیت طبیعی مناطق مورد مطالعه افزایش می یابد. نواحی نزدیک به سواحل شهرستان بندرانزلی به دلیل جاذبیت های ساحلی، استقبال بالایی از گردشگران دارند، در حالی که آستارا با وجود کمبود گردشگر در سواحل، جاذبه های طبیعی خوبی دارد. آستارا با چالش های آلودگی ناشی از پسماندهای خانگی و صنایع و نواحی ساحلی اش با آلودگی کمتر مواجه است، در حالی که بندرانزلی با تخریب محیط طبیعی و ظرفیت محدود به دلیل جمعیت بالای گردشگران روبه رو است. شهرستان رضوان شهر نیز با تولید زباله از سوی گردشگران آلوده است، اما تردد موقت آن ها باعث کاهش پسماند می شود.

جمعیت: جمعیت و رشد آن نقش مهمی در افزایش آلودگی سواحل مناطق شمالی دارد. در مناطق مورد مطالعه بندرانزلی به عنوان یکی از مقاصد گردشگری محبوب در گیلان، جمعیتی بیشتر از آستارا و رضوان شهر دارد، اما مساحت کمتری دارد که نشان دهنده تمرکز بالای جمعیت در این منطقه است. شهرستان رضوان شهر با مساحت بیشتر و زمین های کشاورزی، به رغم توسعه شهری بیشتر، جمعیت کمتری نسبت به بندرانزلی دارد. آستارا نیز با جمعیتی متعادل و مساحتی مناسب، توانسته است امکانات زیستی و اقتصادی خوبی برای ساکنان خود فراهم کند (شکل ۱۵).

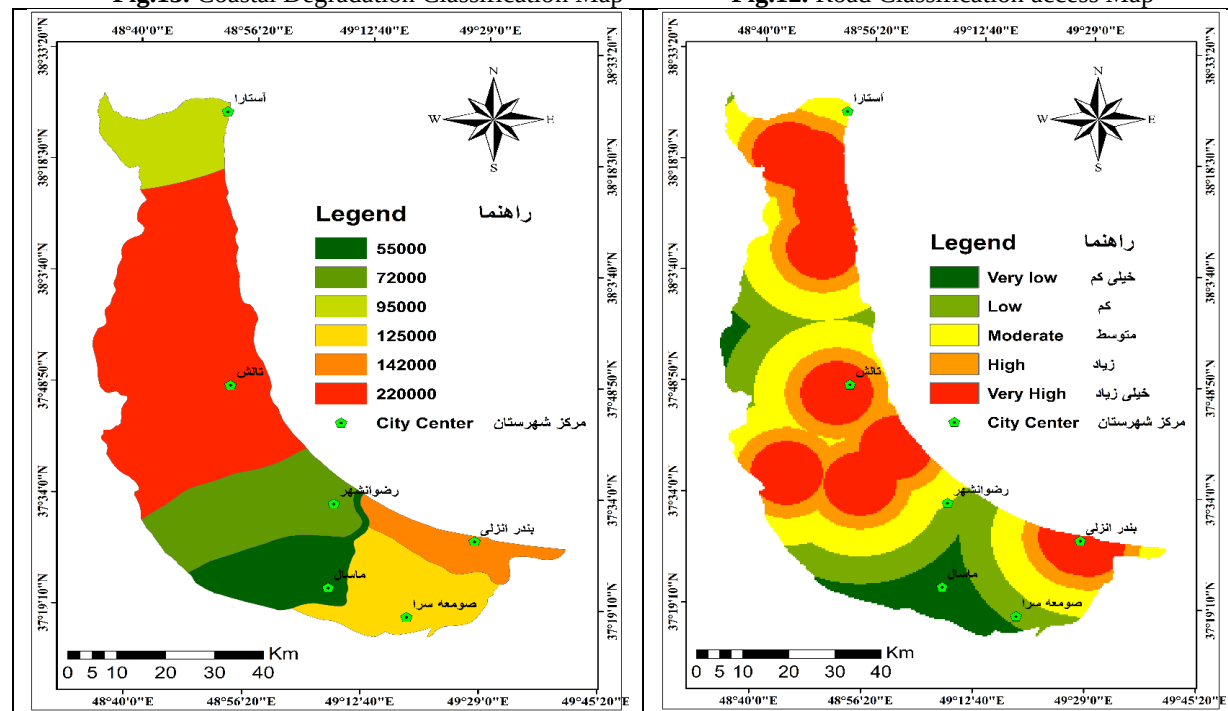


شکل ۱۳- نقشه طبقه‌بندی شده دسترسی به جاده

Fig.13. Coastal Degradation Classification Map

شکل ۱۲- نقشه طبقه‌بندی شده تخریب ساحل

Fig.12. Road Classification access Map



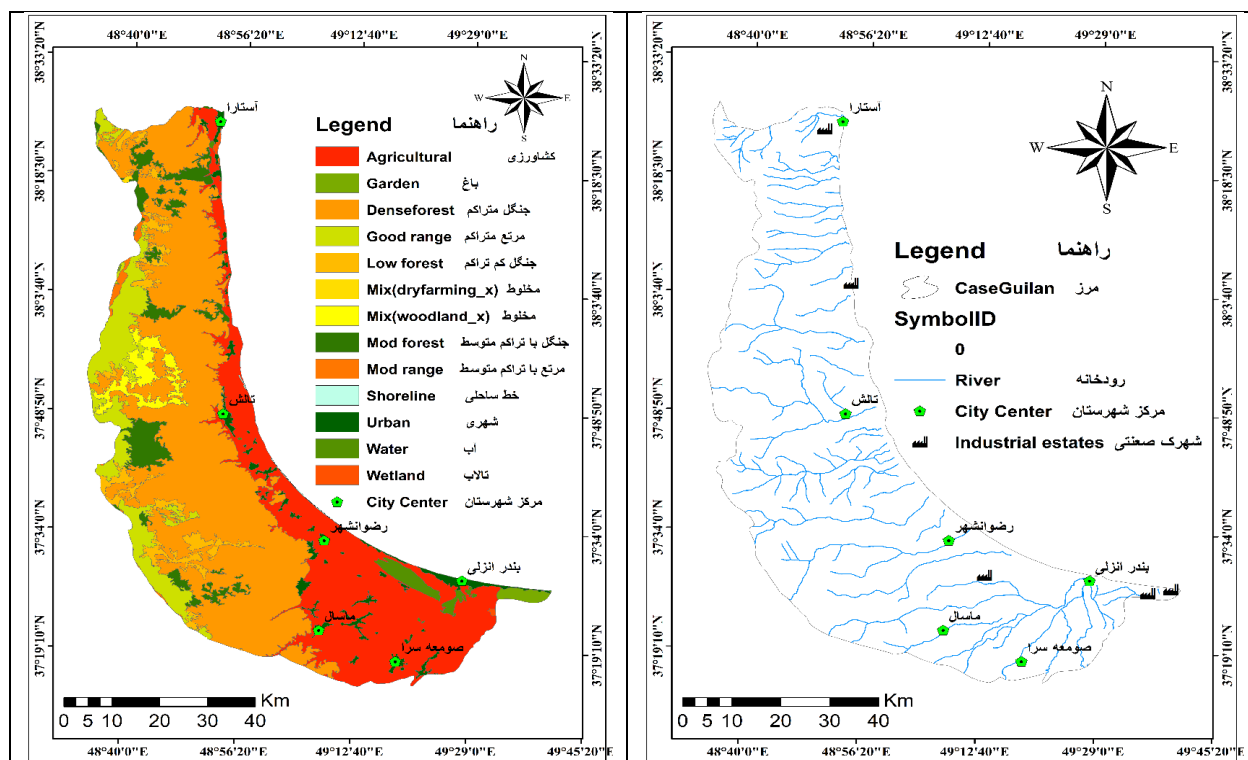
شکل ۱۵- نقشه طبقه‌بندی شده جمعیت

Fig.15. population classification

شکل ۱۴- نقشه طبقه‌بندی شده جذابیت طبیعی

Fig.14. Natural Attraction Classification Map

استقرار صنایع نزدیک رودخانه: استقرار صنایع در نزدیکی رودخانه‌های منتهی به سواحل شهرستان‌های بندر انزلی، رضوان‌شهر و آستارا نقش قابل توجهی در آلودگی این مناطق دارد. طبق نقشه صنایع در شهرستان بندرانزلی دو شهرک صنعتی مهم و نزدیک رودخانه وجود دارد. این دو شهرک صنعتی، بیشترین درصد آلودگی را داشته و پسماند خود را به‌طور مستقیم به ساحل و دریا تخلیه می‌کنند. نکته مهم دیگری که در این فرآیند تأثیرگذار است، شیب اندک سطح جلگه ساحلی است. این ویژگی موجب کندی جریان تخلیه آلاینده‌ها شده و آلودگی را در سطح وسیع‌تری توزیع می‌کند. نکته مهم، وجود اراضی کشاورزی در بخش پایین‌دست جلگه است. سموم و کودهای شیمیایی مورد استفاده در این اراضی توسط پساب‌های زهکشی به‌طور غیرمستقیم وارد رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی می‌شود. این مواد اثرات مخربی بر آلودگی محیط‌زیست بخش ساحلی، پس‌کرانه و محیط دریا دارند. از طرفی محدوده جلگه ساحلی در شهرستان رضوان‌شهر و آستارا نسبت به شهرستان بندرانزلی از شیب بیشتری برخوردار است. همچنین بخش کمتری از آنها زیر پوشش زمین‌های کشاورزی و بخش زیادی از جلگه ساحلی در قلمرو اراضی جنگلی و مراتع می‌باشد. از این رو بخش کمتری از این دو شهرستان تحت تأثیر فاضلاب و پسماندهای آلاینده قرار گرفته‌اند (شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸).



شکل ۱۷- نقشه کاربری اراضی

Fig.17. Land use map

شکل ۱۶- نقشه رودخانه‌ها و صنایع

Fig.16. Rivers and industries map



شکل ۱۸- بازدید میدانی از رودخانه مرداب نزدیک زمین کشاورزی، شهرستان آستارا

Fig.18. Field visit to the Mordab River near agricultural land, Astara city

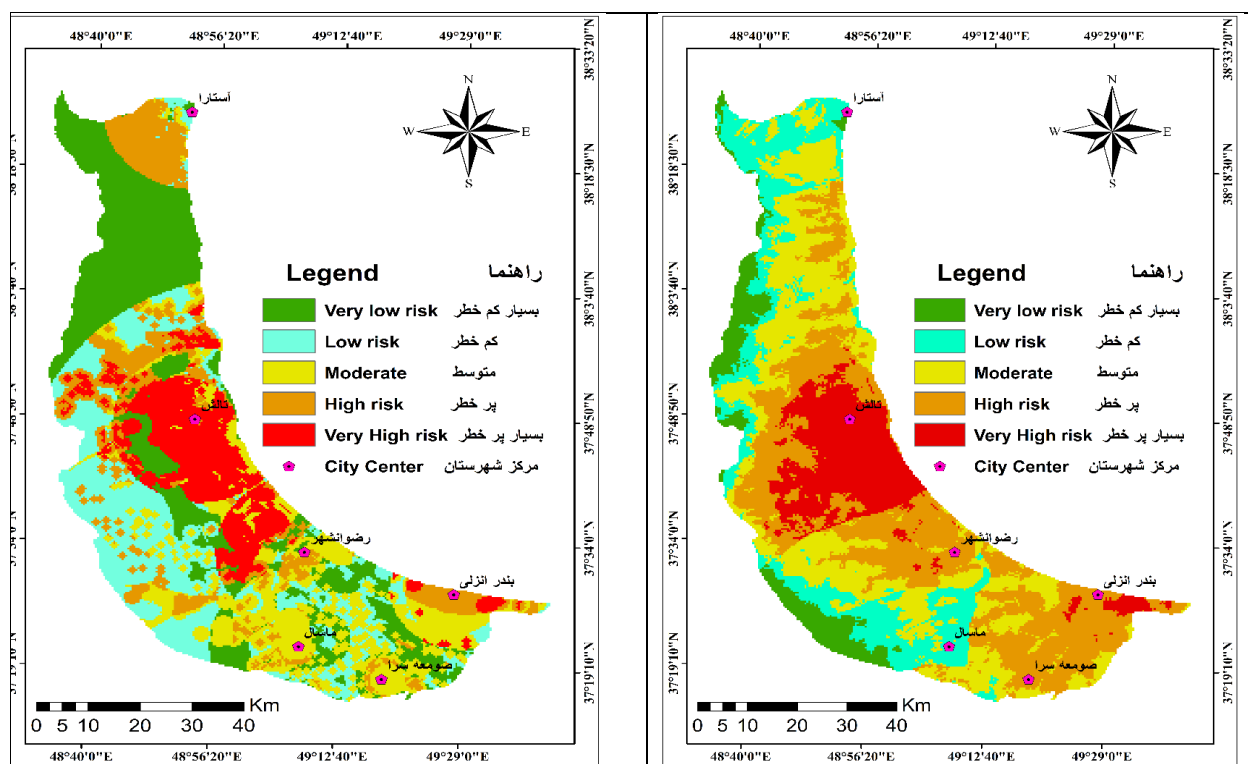
نقشه نهایی آلودگی سواحل مناطق مورد مطالعه با استفاده از مدل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و الگوریتم جنگل تصادفی

پهنه‌بندی آلودگی سواحل در شهرستان‌های بندر انزلی، رضوانشهر و آستارا در شمال ایران به دلیل تأثیرات محیطی و اقتصادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تلفیق تکنیک سنجش‌ازدور و GIS و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی برای برنامه‌ریزان این امکان را فراهم می‌سازد که با استفاده از توابع و تجزیه و تحلیل معیارها و رتبه‌بندی تحلیل‌ها مناسب‌ترین گزینه را که در این پژوهش پهنه‌بندی خطر آلودگی پهنه‌های ساحلی است، انتخاب نمایند. این روش با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و GIS و معیارهای وزن‌دار شده، مناطق بحرانی را شناسایی و اولویت‌بندی می‌کند.

عوامل مؤثر بر خطر آلودگی پهنه‌های ساحلی مناطق مورد بررسی با استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدور و ابزارهای GIS در قالب لایه‌های مختلف اطلاعاتی آماده‌سازی و بر اساس اهمیت با استفاده از مدل‌های فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و جنگل تصادفی تلفیق و پهنه‌بندی شد و در نهایت نقشه خروجی به ۵ کلاس در پهنه‌های خطر بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی گردید. شکل ۱۹ و ۲۰ نقشه میزان آلودگی را با استفاده از روش فرآیند تحلیل مراتبی و الگوریتم جنگل تصادفی را نشان می‌دهد.

بعد از تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی میزان مساحت و درصد هر کدام از طبقات در مناطق مورد مطالعه محاسبه شد (جدول ۲). یافته‌های حاصل از نقشه‌های پهنه‌بندی آلودگی سواحل شهرستان‌های انزلی، رضوانشهر و آستارا با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی AHP و جنگل تصادفی را نشان می‌دهد که ۶/۲۰ درصد از مساحت شهرستان انزلی در کلاس خطر بسیار زیاد؛ ۰/۴۵ درصد مساحت شهرستان رضوانشهر در کلاس خطر بسیار زیاد و ۰/۵۷ درصد در کلاس خطر بسیار کم؛ ۶/۴۴ درصد مساحت شهرستان آستارا دارای خطر زیاد و ۰/۰۲ درصد دارای خطر بسیار کم می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در الگوریتم جنگل تصادفی ۹/۲۴ درصد از مساحت شهرستان انزلی دارای خطر بسیار زیاد و ۱۰/۸۲ درصد دارای خطر بسیار کم، ۱۶/۹۸ درصد مساحت شهرستان رضوانشهر دارای خطر زیاد و ۱۲/۵۵ درصد دارای خطر بسیار کم و ۱۶/۵۱ درصد مساحت شهرستان آستارا دارای خطر زیاد و ۲۶/۷۳ درصد دارای خطر بسیار کم می‌باشد. نتایج فوق نشان می‌دهد که در روش تحلیل سلسله مراتبی به دلیل اینکه متکی بر قضاوت‌های ذهنی کارشناسان است بیشتر پهنه‌های آلودگی در کلاس‌های خطر متوسط و زیاد قرار دارند به طوری که ۸۹/۷۳

درصد شهرستان انزلی به دلیل تأکید AHP بر عوامل انسانی در کلاس خطر زیاد آلودگی ساحلی قرار دارد. قابل ذکر است که معیارهای پسماندهای خانگی - صنایع آلوده ساز، زباله و تخریب و تغییر در محیط طبیعی ساحل به دلیل تمرکز گردشگران بیشترین میزان اهمیت یا وزن را داشته‌اند و از این نظر تأثیر بیشتری در نقشه پهنه‌بندی آلودگی ساحلی دارند. بر اساس نتایج به دست آمده مدل جنگل تصادفی توزیع متعادل‌تر خطر در تمام طبقات را داشته است. همچنین تفاوت‌های چشمگیر در نتایج دو مدل AHP و RF مستقیماً ناشی از تفاوت‌های بنیادین در روش‌شناسی این دو رویکرد است. با توجه به روش تحقیق تفاوت‌های به دست آمده در نتایج این پژوهش به ترتیب در مدل‌های فرآیند تحلیل سلسله مراتبی AHP و جنگل تصادفی مبتنی بر محورهای روش‌شناسی (روش AHP تکیه بر نظرات کارشناسی - روش RF مبتنی بر نمونه‌های آموزشی)، داده (نظرات کارشناسی - داده‌های عینی محیطی) و حساسیت، روش AHP وابسته به دقت وزن‌دهی کارشناسی - روش RF به خطاهای فردی حساسیت کمتری دارد.



شکل ۲۰ - نقشه خطر آلودگی با مدل جنگل تصادفی

Fig.20. Pollution Risk Map with Random Forest Model

شکل ۱۹ - نقشه خطر آلودگی با مدل (AHP)

Fig.19. Pollution Risk Map with (AHP) Model

جدول ۲- مساحت و درصد مساحت طبقه آلودگی

Table 2- Area and Percentage of area of Pollution Class

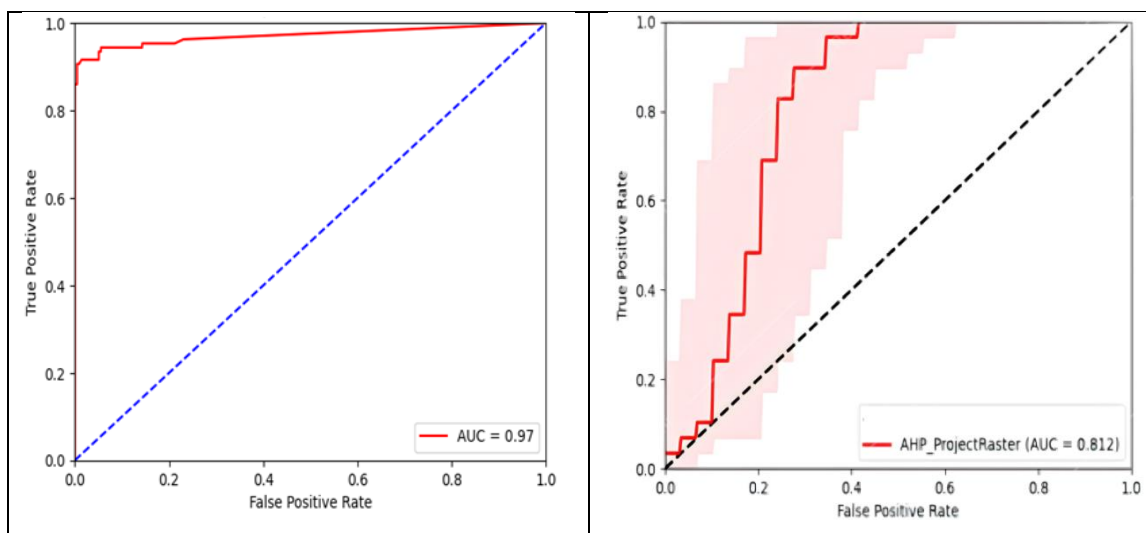
مدل	طبقات	مساحت (کیلومتر مربع)						درصد %
Model	Classes	Area (KM ²)						Percentage
		انزلی	رضوانشهر	آستارا	انزلی	رضوانشهر	آستارا	
		Anzali	Razvanshahr	Astara	Anzali	Razvanshahr	Astara	
	بسیار کم خطر	-	4/23	0/07	-	0/57	0/02	آستارا
	کم خطر	-	52/48	25/74	-	7/09	6/30	رضوانشهر
مدل تحلیل	متوسط	11/44	201/33	356/01	4/06	27/21	87/23	انزلی
سلسله مراتبی (AHP)	خطر زیاد	252/43	478/34	26/31	89/73	64/66	6/44	رضوانشهر
	خطر بسیار زیاد	17/44	3/34	-	6/20	0/45	-	انزلی
	بسیار کم خطر	30/43	92/81	30/43	10/82	12/55	26/73	رضوانشهر
	کم خطر	46/55	212/32	46/55	16/55	28/71	21/23	انزلی
	متوسط	101/32	167/70	101/32	36/02	22/68	20/31	رضوانشهر
مدل جنگل تصادفی RF	خطر زیاد	76/93	125/57	76/93	27/35	16/98	16/51	انزلی
	خطر بسیار زیاد	26/00	140/99	26/00	9/24	-	-	رضوانشهر

اعتبارسنجی مدل های تحلیل سلسله مراتبی و جنگل تصادفی

شکل های ۲۱ و ۲۲، نتایج ارزیابی صحت نقشه های پهنه بندی مناطق مورد مطالعه را با داده های صحت سنجی را نشان می دهد. مدل های تحلیل سلسله مراتبی و جنگل تصادفی به ترتیب ۰/۸۱۲ و ۰/۹۷ می باشد. نتایج نشان می دهد که مدل جنگل تصادفی دقت مناسبی در پهنه بندی آلودگی ساحلی دارد. از دلایل برتری دقت مدل جنگل تصادفی به تحلیل سلسله مراتبی می توان به تفاوت های بین این دو مدل اشاره کرد به طوری که روش تحلیل سلسله مراتبی متکی به وزن دهی کارشناسی می باشد و احتمال وقوع اشتباه وجود دارد و از سویی در این مدل تعامل پیچیده بین عوامل وجود دارد و همچنین ارزیابی اهمیت متغیر به کاربر متکی است، اما روش جنگل تصادفی با استفاده از روش بگینگ^۱ و ترکیب نتایج تعداد زیادی درخت تصمیم، اثر داده های پرت را کاهش می دهد و دقت مدل افزایش می یابد. همچنین مهمترین متغیرها و تعامل بین آنها را شناسایی می کند.

همچنین از مهمترین نتایج حاصل از مدل جنگل تصادفی می توان به اولویت بندی متغیرهای مستقل (معیارهای موثر بر آلودگی محیط زیست شهری در مناطق ساحلی اشاره کرد. براساس شکل ۲۳، معیارهای امنیت، جمعیت و فاضلاب شهری بیشترین اهمیت و معیار حفاظت و مراقبت کمترین اهمیت را در آلودگی مناطق ساحلی مورد مطالعه داشته اند.

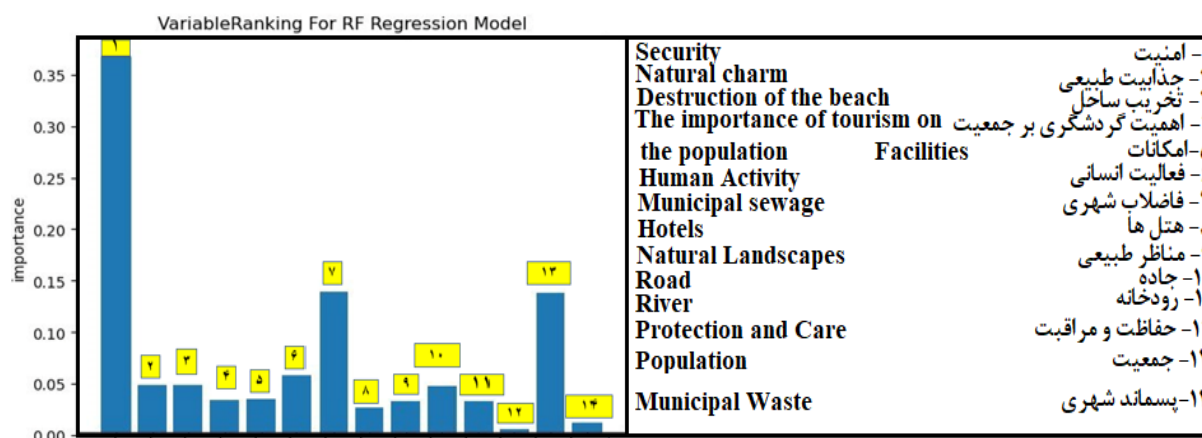
1- Bagging



شکل ۲۱- منحنی ارزیابی کارایی ROC مدل تحلیل سلسله مراتبی شکل ۲۲- منحنی ارزیابی کارایی ROC الگوریتم جنگل تصادفی

Fig.21. ROC Performance Evaluation Curve of the Analytic Hierarchy Model

Fig.22. ROC Performance Evaluation Curve of the Random Forest Algorithm



شکل ۲۳- اولویت بندی عوامل مؤثر در آلودگی پهنه های ساحلی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی

Fig.23. Prioritizing factors affecting coastal zone pollution using the random forest algorithm

نتیجه گیری

امروزه سواحل از مهمترین و مستعدترین اکوسیستم ها جهت رشد و توسعه تعاملات انسانی و جذب جمعیت شناخته شده اند. با افزایش جمعیت در مناطق ساحلی فعالیت های اقتصادی- اجتماعی نیز در این مناطق بیشتر می شود و از سویی رجوع گردشگران به این مناطق سبب افزایش مخاطره های زیست محیطی ساحلی خواهد شد. عدم توجه به این مخاطرات اثرات نامطلوبی را بر اکوسیستم ساحلی به جا می گذارد که بعضاً جبران آن ممکن نخواهد بود. شناخت مناطق تحت تأثیر مخاطره های زیست محیطی در مناطق ساحلی یکی از موضوعات مهم در مدیریت محیط زیست، برنامه ریزی شهری و توسعه پایدار است. در همین راستا این پژوهش به تعیین مناطق آسیب پذیر آلودگی ساحلی در شهرستان های بندرانزلی، رضوان شهر و آستارا با استفاده از مدل های AHP

و RF و تحلیل عوامل مؤثر بر آلودگی محیط زیست شهری در مناطق ساحلی پرداخته است. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که در آلودگی مناطق ساحلی معیارهای پسماندهای خانگی - صنایع آلوده ساز، زباله، تخریب و تغییر در محیط طبیعی ساحل به دلیل تمرکز گردشگران بیشترین میزان اهمیت را داشته‌اند همچنین در روش جنگل تصادفی معیارهای امنیت، جمعیت و فاضلاب شهری بیشترین اهمیت و معیار حفاظت و مراقبت کمترین اهمیت را در آلودگی مناطق ساحلی مورد مطالعه داشته‌اند. همچنین نتایج نشان داد که نقشه پهنه‌بندی آلودگی ساحلی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی دقت بالاتری (۰/۹۷) را نسبت به مدل تحلیل سلسله مراتبی (۰/۸۱۲) داشته است، که دلیل آن در تفاوت‌های بین دو روش می‌باشد. یافته‌های حاصل از نقشه‌های پهنه‌بندی آلودگی سواحل شهرستان‌های انزلی، رضوان‌شهر و آستارا با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و جنگل تصادفی نشان می‌دهد که ۶/۲۰ و ۲۷/۳۵ درصد از مساحت شهرستان انزلی در کلاس خطر زیاد و ۹/۲۴ درصد در کلاس بسیار زیاد قرار دارد. شهرستان بندر انزلی به دلیل جمعیت زیاد، بندر و منطقه آزاد بودن، دسترسی و فراهم بودن زیرساخت‌ها، وجود صنایع و به دلیل جذابیت‌های ساحلی، بیشترین آلودگی را داشته است. شهرستان بندرانزلی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نقاط ساحلی شمال ایران، به دلیل فعالیت‌های صنعتی و تجاری گسترده و زیر ساخت‌های مناسب گردشگری، آلودگی بیشتری نسبت به دو شهرستان رضوان‌شهر و آستارا دارد. این شهرستان به‌عنوان بندر اصلی شمال کشور، روزانه با حجم بالای تردد کشتی‌ها و ورود و خروج کالاها مواجه است. نشست مواد نفتی از کشتی‌ها و آلودگی ناشی از بارگیری و تخلیه بار، به‌شدت بر کیفیت آب و محیط‌زیست این منطقه تأثیر گذاشته است. افزون بر این، فعالیت‌های کشاورزی و تولید فاضلاب‌های خانگی نیز در بندرانزلی سبب افزایش آلودگی شده است. همچنین شهرستان رضوان‌شهر ۶۴/۶۶ و ۰/۴۵ درصد در کلاس خطر زیاد و ۱۶/۹۸ درصد در کلاس بسیار زیاد قرار دارد. سواحل رضوانشهر نیز با زباله‌های رها شده و فشار ناشی از استفاده ناپایدار از منابع طبیعی روبه‌رو هستند. این شهرستان به دلیل جاذبه‌های گردشگری متنوع‌تر، موفق به جلب بیشتر گردشگران و باعث افزایش میزان تولید فاضلاب شهری شده است و همین امر باعث تخریب سواحل می‌گردد. همچنین از سطح شهرستان آستارا ۶/۴۴ و ۱۶/۵۱ درصد در کلاس خطر زیاد قرار دارد. آستارا از نظر آلودگی وضعیت بهتری دارد. به دلیل فعالیت‌های صنعتی کمتر، وجود مناظر طبیعی و رشد و توسعه کمتر زیرساخت‌های گردشگری، آلودگی در این شهرستان به مراتب کمتر از رضوان‌شهر و بندر انزلی است. به‌طور کلی، این سه شهرستان به علت تفاوت‌های مشغله‌های صنعتی، جذب گردشگر و مدیریت پسماند، شاهد سطوح مختلف آلودگی هستند. حکیمی و خانجانی (Hakimi & Khanjani, 2014) در پژوهشی اثرات زیست محیطی گردشگری را بر نوار ساحلی استان گیلان با استفاده از نرم افزار GIS بررسی کردند. محققین بیان نمودند که گردشگری در نوار ساحلی اگرچه سبب رشد اقتصادی منطقه می‌شود اما با این وجود به دلیل عدم توجه مسئولین به حفظ محیط زیست و پایین بودن سطح آگاهی گردشگران و ساکنین بومی در این زمینه باعث بروز آلودگی‌های مختلفی مانند آلودگی آب، آلودگی بصری، آلودگی صوتی، آلودگی هوا و کاهش گونه‌های آبی خواهد شد. زاکری مینابی و همکاران (Zakeri, Minabi, Zarei & Derakhshan, 2024) در پژوهشی به شناسایی و سطح‌بندی تهدید آلودگی مناطق حساس ساحلی در شرق تنگه هرمز (محدوده مورد مطالعه: شهرستان سیریک) پرداختند. محققین بیان نمودند که در محدوده ساحلی شهرستان سیریک، آلودگی‌های ایجاد شده پهنه وسیعی از این سواحل را در حالت تهدید قرار داده است. بنابراین شناخت عوامل تهدید آلودگی می‌تواند در مدیریت مناطق ساحلی مؤثر باشد. با توجه به مطالب گفته شده نتایج این پژوهش با نتایج محققین دیگر مبنی بر آلوده شدن سواحل کشور مطابقت دارد. داور و همکاران (Davar, Azizi Jalilian, Rafiei & Danehkar, 2014) نیز در پژوهشی بیان داشتند که جنوب شرقی خلیج چابهار تا امتداد آن به سمت شرق مهم‌ترین پهنه آسیب‌پذیری ساحلی است. به صورت کلی نتایج پژوهش نشان می‌دهد که ارتباط زیادی بین گردشگری و آلودگی محیط زیست وجود دارد. به همین دلیل، جهت حفظ محیط زیست و همسو شدن با توسعه و گردشگری پایدار نیاز است برنامه‌های اجرایی در مناطق گردشگرپذیر انجام شود.

References

- Abirami, A. (2024). Marine pollution and waste management, Law and legal research development. *Journal of Law and Legal Research Development*, 1(2), 20-24. <https://doi.org/10.69662/jllrd.v1i2.10>
- Arabadzhyan, A., Figini, P., García, C., González, M. M., Lam-González, Y. E., & León, C. J. (2021). Climate change, coastal tourism, and impact chains—a literature review. *Current Issues in Tourism*, 24(16), 2233-2268. <https://doi.org/10.1080/13683500.2020.1825351>
- Bancal, N. (2017). Industrial Development and Challenges of Water Pollution in Coastal Areas: The Case of Surat, India. OP conference series Earth and Environmental science, 120, (012001). <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/120/1/012001>
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Chen, W., Li, y., Xue, W., Shahabi, H., Li, S., & Hong, H. (2020). Modeling flood susceptibility using data-driven approaches of naïve Bayes tree, alternating decision tree and random forest methods. *Science of the Total Environment*. 701, 134979. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134979>
- Darvishi, R., Rezaei, M. R., & Shams-Aldini, A. (2018). Investigating the role of coastal tourism in economic development from the perspective of citizens. *Quarterly Scientific-Research Journal of Geography (Regional Planning)*, 8(4), 411-426. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22286462.1397.8.4.24.7>
- Davar, L., Azizi Jalilian, M., Rafiei, R., & Danehkar, A. (2014). Vulnerability zoning of the coastal strip of Sistan and Baluchestan province based on threat foci. *Journal of Natural Environment*, 67(3), 289-300. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jne.2014.52728>
- Ebrahimi, M., & Ramezanipour, M. (2018). Measuring the level of environmental responsibility of tourists. *Geography and Human Relations*, 1(2), 835-849. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26453851.1397.1.2.52.5>
- Fathalipour, M. (2023). Investigation of water polluting sources on the southern coast of the Caspian Sea in Gilan Province. Paper presented at the Proceedings of the 3th International Conference on New Technologies in Science, Amol, 3-4. [In Persian] <https://civilica.com/doc/1753787>
- Garcés-Ordóñez, O., Díaz, L. F. E., Cardoso, R. P., & Muniz, M. C. (2020). The impact of tourism on marine litter pollution on Santa Marta beaches, Colombian Caribbean. *Marine Pollution Bulletin*, 160, 111558. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111558>
- Ghosh, T. (2011). Coastal tourism: opportunity and sustainability. *Journal of Sustainable Developmen*, 4(6), 67. <https://doi.org/10.5539/jsd.v4n6p67>
- Haji Amiri, R., Asghari, H., Amar, T., & Poursheykhian, A. (2023). Necessity of analysis of solid municipal wastes from origin to destination with emphasis on Astara city (West of Gilan province). *Geographical Engineering of Territory*, 7(2), 477-494. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.25381490.1402.7.2.17.3>
- Hakimi, F., & Khanjani, F. (2014). Environmental impacts of tourism on the coastal strip of Gilan using software GIS. Paper presented at the Proceedings of the 2th National Conference on Tourism, Geography and Sustainable Environment. [In Persian] <https://civilica.com/doc/329164>
- Janparvar, M., Taghizadeh Sarokalaei, A., & Mazloom, Z. (2016). Politics, Technology and Environment (A Different Perspective on Environmental Issues in Guilan). Paper presented at the Proceedings of the Conference on Land Planning, the Position of the Caspian Sea and the Development Prospects of Gilan. [In Persian] <https://civilica.com/doc/584777>
- Jorgensen, B., Krasny, M., & Baztan, J. (2021) Volunteer beach cleanups: civic Environmental stewardship combating global plastic pollution. *Sustainability Science*, 16(1), 153-167. <https://hal.science/hal-02919775v1>
- Kabil, M., Priatmoko, S., Magda, R., & Denes-david, L. (2021). Blue Economy and Coastal Tourism: A Comprehensive Visualization Bibliometric Analysis. *Sustainability*, 13(7), 3650. <https://doi.org/10.3390/su13073650>

- Karnejadi, A., Ownegh, M., Pourghasemi, H., Bahremand, A., & Motamedi, M. (2019). Landslide susceptibility prediction using combined Mahalanobis distance and machine learning models (Case study: Oghan watershed, Golestan province). *Earth Science Research*, 11(42), 1-18. [In Persian] <https://doi.org/10.52547/esrj.11.2.1>
- Lasaiba, M. (2024). Mitigation of Waste Pollution in Coastal Ecosystems and Mangrove Forests in Coastal Areas. *Jurnal Pengabdian Arumbai*, 2(1), 1-13. <https://doi.org/10.30598/arumbai.vol2.iss1.pp1-13>
- Maghsoudi, M., Mohammad Khan, Sh., & Gholami, F. (2023). The role of natural factors in the settlement of ancient sites in the Payab basin of Seymareh 2 using the AHP model. *Physical Geography*, 16(62), 1-15. [In Persian] https://journals.iau.ir/article_709111.html
- Movahedi, S., & Rostami, A. (2021). Investigating the potential for the development of cross-border cultural tourism in Guilan Province. *Journal of Urban Studies on Space and Place*, 4(14). [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.25386050.1399.1399.14.2.6>
- Pourshikhian, A., Amar, T., & Ebrahimi, S. A. (2012). Analysis on the topology criteria for hygienic curative centers in Anzali Port city. *Journal of Studies of Human Settlements Planning*, 21(7), 88-100. [In Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.25385968.1391.7.21.8.8>
- Salari Sardari, F. A., Arabzadeh, S., Teymuri, S., & Jam, M. (2016). Analysis and Evaluation of the Role of Human Activities in the Persian Gulf. *Persian Gulf Studies*, 2(2), 65-77. [In Persian] https://persiangulf.iranology.ir/file/65_25_full.pdf
- Salehi, S., Ghadami, M., & Hemmati Gouyomi, Z. (2012). A study of Environmental Behaviors among Coastal Tourists (A case Study of Coastal Tourists in Bushehr City during New Year Holiday). *Journal of Tourism Planning and Development*, 1(1), 35-58. [In Persian] https://tourismpd.journals.umz.ac.ir/article_295.html
- Yaghoubzadeh, M., Danehkar, A., Haghighat, M., Mashhadi Rafiee, M., & Lotfikhah, S. (2022). Coastal Zoning of Sistan and Baluchestan Base on Environmental Sensitivity. *Journal of Natural Environment*, 75(1), 49-63. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jne.2022.336323.2360>
- Zakeri Minabi, E., Zarei, M., & Derakhshan, A. (2024). Identification and leveling of pollution threat in sensitive coastal areas in the east of the Strait of Hormuz (Study area: Sirik County). *Journal of Marine Medicine*, 6(3), 185-193. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.30491/6.3.185>
- Ziari, K., Rezvani, M. R., & Ferdowsi, S. (2020). Determination of Physical-Ecological Carrying Capacity of Coastal Tourism and its Effectiveness of Satisfaction of Tourists (Case Study: Bandar Gaz). *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(6), 189-202. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.22034/JEST.2019.24324.3332>