জাহাঙ্গীরনগর বিশ্ববিদ্যালয় ভূগোল ও পরিবেশ সমীক্ষণ ৪৩:২০২৪ (পৃ. ১১-২২)
Jahangirnagar Bishwavidyalay Bhugol O Paribesh Samikkhan 43:2024 (pp 11-22) ISSN 1027-8567

সেন্ট মার্টিন দ্বীপের উপকূলরেখার গতিশীলতা এবং ভাঙন রূপ: বহু-কালিক স্যাটেলাইট চিত্র ব্যবহার করে একটি ভূস্থানিক বিশ্লেষণ

মারিয়া বিনতে মালেক[১], মোঃ মাহমুদুল হাসান শাহেদ[২], খালেদ জুবায়ের শাবাব[৩], মোঃ আশরাফুল হাবীব[৪], মোঃ শাহেদুর রশিদ[৫]

[১-৩] স্নাতকোত্তর গবেষক, ভূগোল ও পরিবেশ বিভাগ, জাহাঙ্গীরনগর বিশ্ববিদ্যালয়, সাভার, ঢাকা-১৩৪২
[৪] প্রভাষক, ভূগোল ও পরিবেশ বিভাগ, জাহাঙ্গীরনগর বিশ্ববিদ্যালয়, সাভার, ঢাকা-১৩৪২
[৫] অধ্যাপক, ভূগোল ও পরিবেশ বিভাগ, জাহাঙ্গীরনগর বিশ্ববিদ্যালয়, সাভার, ঢাকা-১৩৪২

সারসংক্ষেপ : এই গবেষণায় ১৯৯৪ থেকে ২০২৪ সালের মধ্যে বাংলাদেশের সেন্ট মার্টিন দ্বীপের উপকূলরেখার পরিবর্তন মূল্যায়ন করা হয়েছে, যেখানে বহুকালিক স্যাটেলাইট চিত্র ও Digital Shoreline Analysis System (DSAS)/ ডিজিটাল উপকূলরেখা বিশ্লেষণ পদ্ধতি ব্যবহার করে ক্ষয় ও সঞ্চয়ের ধরণ বিশ্লেষণ করা হয়েছে। গবেষণার ফলাফল দেখায় যে, দ্বীপটি প্রাকৃতিক প্রক্রিয়া যেমন সমুদ্রপৃষ্ঠের উচ্চতা বৃদ্ধি, ঝড়ের জলোচ্ছ্বাস এবং মানবিক কার্যক্রমের কারণে উল্লেখযোগ্যভাবে ক্ষতিগ্রস্ত হচ্ছে। অধিকাংশ এলাকায় ক্ষয় প্রবল, বিশেষ করে পশ্চিম পাড়া, উত্তর পাড়া এবং গলাচিপায় তটরেখার পিছু হটার হার সর্বোচ্চ, যেখানে পূর্ব পাড়া ও মাঝের পাড়া তুলনামূলকভাবে স্থিতিশীল রয়েছে। নীট তটরেখার পরিবর্তন (NSM) বিশ্লেষণ অনুযায়ী, উপকূলরেখার গড় পরিবর্তনের হার ছিল -২০.৬২ মিটার, যা দ্বীপের ব্যাপক ভূমি ক্ষয় নির্দেশ করে। তটরেখার পরিবর্তনে স্থানভেদে পার্থক্য লক্ষ্য করা গেছে, যা উপকূল ব্যবস্থাপনার জন্য অঞ্চলভিত্তিক পরিকল্পনার প্রয়োজনীয়তা নির্দেশ করে। ভূ-উপগ্রহ চিত্র ও ভূস্থানিক বিশ্লেষণ উপকূলীয় পরিবর্তন পর্যবেক্ষণের জন্য অত্যন্ত কার্যকর, যা ঝুঁকিপূর্ণ এলাকাগুলো চিহ্নিত করতে সহায়তা করে। ক্ষয় রোধে টেকসই ব্যবস্থা যেমন ম্যানগ্রোভ পুনরুদ্ধার ও উপকূল সুরক্ষা কাঠামো গ্রহণের সুপারিশ করা হয়েছে। গবেষণাটি নীতিনির্ধারক ও সংশ্লিষ্ট কর্তৃপক্ষের জন্য গুরুত্বপূর্ণ তথ্য সরবরাহ করে, যা উপকূল সংরক্ষণ ও দীর্ঘমেয়াদি পরিকল্পনা গ্রহণে সহায়ক হবে।

মূলশব্দঃ উপকূলরেখার গতিশীলতা, ডিজিটাল উপকূলরেখা বিশ্লেষণ পদ্ধতি, সেন্ট মার্টিন দ্বীপ, রিমোট সেন্সিং, ভূস্থানিক বিশ্লেষণ

ভূমিকা

উপকূলীয় অঞ্চলগুলি দ্রুত পরিবর্তনশীল, যেখানে প্রাকৃতিক প্রক্রিয়া ও মানবিক কার্যক্রমের কারণে তটরেখার পরিবর্তন অব্যাহত থাকে। ভূমি ক্ষয় (erosion) ও ভূমি সঞ্চয় (accretion) – এই দুটি প্রক্রিয়ার মাধ্যমে উপকূলীয় অবস্থা ও স্থিতিশীলতা নির্ধারন করা যায়। এই পরিবর্তনগুলোর বিশদ বিশ্লেষণ উপকূল ব্যবস্থাপনার জন্য অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ, বিশেষত সেন্ট মার্টিন দ্বীপের মতো অঞ্চলে, যেখানে প্রাকৃতিক ও মানবসৃষ্ট প্রভাব মিলিতভাবে তটরেখার গতিশীলতা নির্ধারণ করে। তটরেখার পরিবর্তন বিভিন্ন প্রাকৃতিক ও মানবসৃষ্ট কারণ দ্বারা প্রভাবিত হয়, যেমন ঢেউয়ের ক্রিয়া, জোয়ার-ভাটা, জলবায়ু পরিবর্তন, সমুদ্রপৃষ্ঠের উচ্চতা বৃদ্ধি এবং স্থানীয় মানবিক কার্যকলাপ (Balakrishnan et al., 2023; Mentaschi et al., 2018)। মানবসৃষ্ট কার্যক্রম অনেক ক্ষেত্রে প্রাকৃতিক ক্ষয়প্রক্রিয়াকে ত্বরান্বিত করতে পারে, যার ফলে ঝুঁকিপূর্ণ এলাকাগুলোতে তটরেখার পশ্চাদপসরণ আরও দ্রুততর হয় (Rangoonwala et al., 2016)। এসব প্রভাব উপকূলীয় পরিবেশে ধারাবাহিক পরিবর্তন ঘটায় এবং সামাজিক, অর্থনৈতিক ও পরিবেশগত ক্ষেত্রে সুদূরপ্রসারী প্রভাব ফেলে (Duvat et al., 2019; Rey et al., 2019)।

তটরেখার পরিবর্তন পর্যবেক্ষণে ঐতিহাসিকভাবে বিভিন্ন পদ্ধতি ব্যবহৃত হয়েছে, যার মধ্যে মাঠ পর্যায়ের জরিপ, এরিয়াল ফটোগ্রাফি এবং স্যাটেলাইট চিত্র বিশ্লেষণ অন্যতম (Rahman et al., 2022)। সাম্প্রতিককালে রিমোট সেন্সিং প্রযুক্তির অগ্রগতির ফলে বড় ভূখণ্ড জুড়ে উচ্চ-রেজল্যুশন তথ্য সংগ্রহ সহজ হয়েছে, যা তটরেখার পরিবর্তন আরো নিখুঁতভাবে পর্যবেক্ষণের সুযোগ সৃষ্টি করেছে (Benhur, 2024; Duru, 2017; Rahman et al., 2022; Utama, 2024)। উদাহরণস্বরূপ, উপকূলীয় জলাভূমিতে উচ্চ-রেজল্যুশন স্যাটেলাইট চিত্র ব্যবহার করে ক্ষয় ও সঞ্চয়ের ধরণ চিহ্নিত করা সম্ভব হয়েছে, যেখানে বায়ুপ্রবাহ ও তরঙ্গক্রিয়ার মতো জলবিদ্যুতিক

(hydrodynamic) প্রভাব তটরেখার পরিবর্তনে গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা রাখে (Smith et al., 2021)। বিশেষত Landsat স্যাটেলাইট চিত্র ব্যবহার করে বিভিন্ন জলাভূমি ও উপকূলীয় পরিবেশের তটরেখা পরিবর্তন চিহ্নিত করা হয়েছে (Vos et al., 2020)। আরও উন্নত পরিমাপের জন্য Geographic Information Systems (GIS) প্রযুক্তি ও স্যাটেলাইট ডেটার সংমিশ্রণ ভূমি ক্ষয় ও সঞ্চয়ের হার নির্ধারণে সহায়ক (Smith et al., 2021; Vos et al., 2020)। Digital Shoreline Analysis System (DSAS) বর্তমানে তটরেখার পরিবর্তন পরিমাপে বহুল ব্যবহৃত একটি পদ্ধতি, যা অতীতের তটরেখার অবস্থান তুলনা করে ক্ষয় ও সঞ্চয়ের হার নির্ণয় করতে ব্যবহৃত হয় (Sutikno et al., 2015; Quang et al., 2021)। ভৌগোলিক অবস্থানের কারণে সমুদ্রপৃষ্ঠের উচ্চতা বৃদ্ধি ও ঘন ঘন প্রবল ঝড় সেন্ট মার্টিন দ্বীপের উপকূলীয় স্থিতিশীলতার জন্য বড় হুমকি হিসেবে দেখা দিয়েছে (Mentaschi et al., 2018)। সেন্ট মার্টিন দ্বীপের তটরেখার গতিশীলতা বোঝার গুরুত্ব দ্বীপটির পরিবেশগত তাৎপর্য ও জলবায়ু পরিবর্তনের প্রতি সংবেদনশীলতার কারণে আরও বৃদ্ধি পেয়েছে। দ্বীপটির উপকূলীয় বাস্তুতন্ত্র, যেমন ম্যানগ্রোভ বন ও প্রবাল প্রাচীর, সামুদ্রিক জীববৈচিত্র্যের আবাসস্থল হিসেবে কাজ করে, ঝড়ের ঢেউ প্রতিরোধ করে এবং কার্বন সংগ্রহে সহায়তা করে (McAllister et al., 2022; Sayre et al., 2018)। কিন্তু প্রাকৃতিক ও মানবসৃষ্ট কারণগুলোর কারণে এই বাস্তুতন্ত্রগুলি ক্রমাগত হুমকির মুখে পড়ছে। বিগত কয়েক দশকে দ্বীপটির বিভিন্ন অংশে ভূমি ক্ষয় ও ভূমি সঞ্চয় উভয় প্রক্রিয়াই লক্ষ্য করা গেছে। উদাহরণস্বরূপ, ২০১৭ সালে ঘূর্ণিঝড় মোরার পর সেন্ট মার্টিন দ্বীপের পুনরুদ্ধার প্রক্রিয়া উপকূলীয় সম্প্রদায়ের দুর্বলতাকে প্রকাশ করেছে (Al Jazeera, 2017; Foyjonnesa et al., 2019; UNICEF Bangladesh, 2017)। ঘূর্ণিঝড়টি দ্বীপের অবকাঠামো ও বাস্তুতন্ত্রের ব্যাপক ক্ষতি সাধন করে, যা উপকূলীয় ব্যবস্থাপনা কৌশল পুনর্বিবেচনার প্রয়োজনীয়তা সৃষ্টি করেছে। গবেষণায় দেখা গেছে, মানবসৃষ্ট পরিবর্তনের শিকার উপকূলীয় এলাকা প্রাকৃতিক দুর্যোগে বেশি ক্ষতির সম্মুখীন হয়েছে (Duvat et al., 2019; Rey et al., 2019)।

দ্বীপটির স্থানীয় অর্থনীতি মূলত পর্যটন ও মৎস্যখাতের ওপর নির্ভরশীল, যা উপকূলীয় পরিবেশ ও বাস্তুতন্ত্রের সঙ্গে সরাসরি সম্পর্কিত (Kayum et al., 2022)। দ্রুত জনসংখ্যা বৃদ্ধি ও অবকাঠামোগত প্রসার উপকূলীয় ব্যবস্থাপনার চ্যালেঞ্জকে আরও বাড়িয়ে তুলছে। বিগত কয়েক দশকে দ্বীপটিতে পর্যটন ও বাণিজ্যের প্রসারের কারণে ব্যাপক নির্মাণকাজ ও উন্নয়ন প্রকল্প বাস্তবায়িত হয়েছে, যা ট্যাক্স প্রণোদনা ও পর্যটন শিল্পের বিকাশ দ্বারা চালিত (Jouannic et al., 2020)। এই বৃদ্ধির ফলে উপকূলীয় সম্পদের ওপর ব্যাপক চাপ সৃষ্টি হয়েছে, যা দীর্ঘমেয়াদে টেকসই উন্নয়ন পরিকল্পনার প্রয়োজনীয়তা তুলে ধরছে।

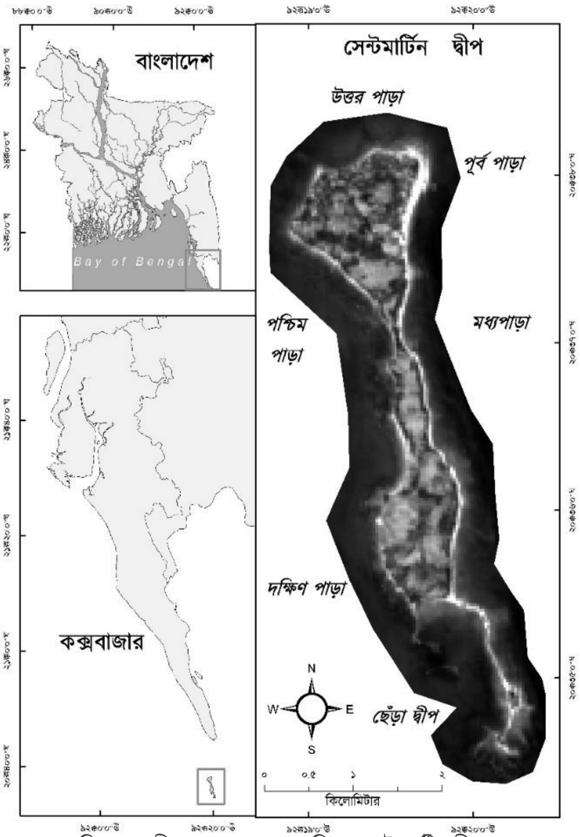
জলবায়ু পরিবর্তন তটরেখার পরিবর্তনের অন্যতম প্রধান চালিকাশক্তি, যা সমুদ্রপৃষ্ঠের উচ্চতা বৃদ্ধি ও চরম আবহাওয়ার ঘটনা বৃদ্ধির মাধ্যমে উপকূলীয় স্থিতিশীলতাকে প্রভাবিত করে (Rahman, 2023)। গবেষণায় দেখা গেছে, সমুদ্রপৃষ্ঠের উচ্চতা বৃদ্ধি নিম্নাঞ্চলীয় উপকূলীয় এলাকাগুলোর ভূমি ক্ষয়ের হার বাড়িয়ে দিচ্ছে, যা সেন্ট মার্টিন দ্বীপের মতো অঞ্চলগুলোর জন্য বড় হুমকি। পাশাপাশি, দ্বীপের জীববৈচিত্র্য ও সামুদ্রিক বাস্তুতন্ত্রও ক্রমাগত ঝুঁকির মধ্যে রয়েছে (Rahman, 2023)। তাই, জলবায়ু পরিবর্তন ও তটরেখার পরিবর্তনের পারস্পরিক সম্পর্ক বোঝা জরুরি, যাতে ভবিষ্যতে অভিযোজনমূলক উপকূলীয় ব্যবস্থাপনা পরিকল্পনা গ্রহণ করা যায়।

এই গবেষণার মূল লক্ষ্য হলো বহুকালিক স্যাটেলাইট চিত্র ও ভূস্থানিক বিশ্লেষণ পদ্ধতি ব্যবহার করে সেন্ট মার্টিন দ্বীপের তটরেখার পরিবর্তন পর্যবেক্ষণ করা এবং এর পেছনের কারণগুলো বিশ্লেষণ করা এবং দুটি প্রধান উদ্দেশ্য হলোঃ বহুকালিক স্যাটেলাইট চিত্র ও DSAS পদ্ধতি ব্যবহার করে সেন্ট মার্টিন দ্বীপের তটরেখার পরিবর্তন চিহ্নিত ও বিশ্লেষণ করা এবং এই পরিবর্তনের মূল কারণগুলো নির্ধারণ করা এবং টেকসই উপকূল ব্যবস্থাপনার জন্য সম্ভাব্য করণীয় নির্ধারণ করা। এই গবেষণার মাধ্যমে সেন্ট মার্টিন দ্বীপের উপকূলীয় পরিবর্তন সম্পর্কে আরও স্পষ্ট ধারণা পাওয়া যাবে, যা স্থানীয় নীতিনির্ধারক ও উপকূল ব্যবস্থাপনার সংশ্লিষ্টদের জন্য কার্যকর সিদ্ধান্ত গ্রহণে সহায়ক হবে।

সমীক্ষা এলাকা

সেন্ট মার্টিন দ্বীপ বঙ্গোপসাগরের উত্তর-পূর্ব অংশে অবস্থিত এবং এটি বাংলাদেশের একটি পরিবেশগতভাবে সমৃদ্ধ ক্ষুদ্র দ্বীপ। এটি বাংলাদেশের দক্ষিণ-পূর্ব কোণে, চট্টগ্রাম বিভাগের কক্সবাজার জেলার অন্তর্গত এবং চট্টগ্রাম শহর থেকে প্রায় ৩২০ কিলোমিটার দক্ষিণ-পূর্বে অবস্থিত এবং মিয়ানমারের সীমান্ত থেকে প্রায় ৯ কিলোমিটার দূরে অবস্থিত (Rahman, 2023).। দ্বীপটি সমুদ্রপৃষ্ঠ থেকে প্রায় ৩.৬ মিটার উচ্চতায় সমতল এবং প্রস্থে প্রায় ৮ কিলোমিটার বিস্তৃত; তবে, জোয়ারের সময় এটি সংকুচিত হয়ে প্রায় ৫ বর্গকিলোমিটারে নেমে আসে (Hossen & Sultana, 2023)। দ্বীপটির উপকূলীয় পরিবেশ

জোয়ার-ভাটা, ঢেউয়ের ক্রিয়া এবং মৌসুমি বর্ষার মতো প্রাকৃতিক প্রক্রিয়ার দ্বারা প্রভাবিত হয়, যা দ্বীপটির তটরেখাকে সময়ের সঙ্গে পরিবর্তিত করে (Rahman et al., 2022; Rangoonwala et al., 2016)।



চিত্র ১: সমীক্ষণ এলাকার মানচিত্র (সেন্ট মার্টিন দ্বীপ)।

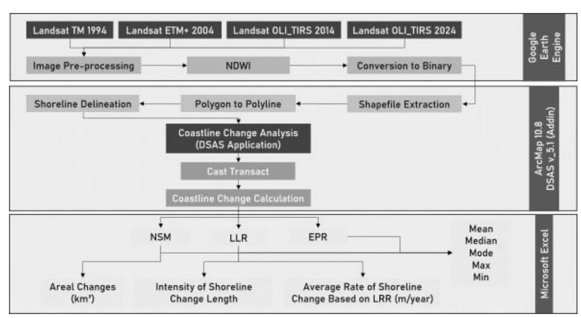
[উৎসঃ লেখকের প্রস্তুতকৃত, ২০২৫]

সেন্ট মার্টিন দ্বীপের জলবায়ু মৌসুমি, গড় তাপমাত্রা প্রায় ২৬-২৮°C। এর পাশাপাশি, দ্বীপটি বঙ্গোপসাগরের ঝড় এবং সাইক্লোন থেকে প্রভাবিত হয়, বিশেষ করে মৌসুমি ঝড় এবং ঘূর্ণিঝড়গুলোর দ্বারা (Mentaschi et al., 2018)। দ্বীপটির জলবায়ু পরিবর্তনের প্রভাব স্পষ্টভাবে দেখা যায় এবং সেন্ট মার্টিনের উপকূলীয় ক্ষয়ের জন্য এর প্রভাব অপরিহার্য।

সেন্ট মার্টিন দ্বীপের অর্থনীতি মূলত পর্যটন এবং মৎস্য খাত-এর উপর নির্ভরশীল। দ্বীপটি একটি জনপ্রিয় পর্যটন গন্তব্য, যেখানে স্থানীয় জনগণ পণ্য এবং সেবা সরবরাহ করে। এছাড়া, মৎস্যজীবীরা স্থানীয়ভাবে মাছ ধরে এবং এর মাধ্যমে তাদের জীবিকা নির্বাহ করে। দ্বীপে মাঝারি আয় রয়েছে এবং অধিকাংশ বাসিন্দার জীবিকা নদী ও সমুদ্রের মাধ্যমে। দ্বীপের জনসংখ্যা প্রায় ৮,০০০-১০,০০০ (স্থানীয় পরিসংখ্যান অনুযায়ী), তবে পর্যটন ঋতুতে জনসংখ্যা সাময়িকভাবে বৃদ্ধি পায় (Hossen & Sultana, 2023)।

উপাত্ত ও গবেষণা পদ্ধতি

এই গবেষণায় বাংলাদেশের সেন্ট মার্টিন দ্বীপের উপকূলরেখার পরিবর্তন বিশ্লেষণের জন্য ভৌগোলিক তথ্য ব্যবস্থা (GIS) এবং ডিজিটাল শোরলাইন অ্যানালাইসিস সিস্টেম (DSAS) ব্যবহার করা হয়েছে। উপকূলরেখার সময়গত পরিবর্তন বিশ্লেষণের জন্য ১৯৯৪, ২০০৪, ২০১৪ এবং ২০২৪ সালের চারটি ল্যান্ডস্যাট স্যাটেলাইট ইমেজ ব্যবহার করা হয়েছে। উপকূলরেখা নির্ধারণের জন্য Google Earth Engine-এ Normalized Difference Water Index (NDWI) প্রয়োগ করা হয় এবং নির্ভুলতা নিশ্চিত করার জন্য ArcMap-এ হাতেকলমে পরিমার্জনা করা হয়। দ্বীপের উপকূল বরাবর একটি ভিত্তি রেখা (baseline) নির্ধারণ করা হয়, যা ট্রান্সেক্ট তৈরির মাধ্যমে উপকূলরেখার পরিবর্তন বিশ্লেষণে সহায়তা করে। সমস্ত ডেটাসেটের সামঞ্জস্য বজায় রাখতে Universal Transverse Mercator (UTM) Zone 46 Northern Hemisphere প্রক্ষেপণ পদ্ধতি ব্যবহার করা হয়েছে এবং পরিমাপগুলো মিটারে নির্ধারণ করা হয়, যেখানে স্থানিক রেজোলিউশন ছিল ৩০ মিটার।



চিত্র ২: গবেষণা পদ্ধতির প্রবাহ চিত্র

DSAS এক্সটেনশনের মাধ্যমে Shoreline Change Envelope (SCE), Net Shoreline Movem 4ent (NSM), End Point Rate (EPR) এবং

Linear Regression Rate (LRR) এর মতো প্রধান সূচকসমূহ নির্ধারণ করা হয়েছে, যা উপকূলরেখার পরিবর্তনের পরিমাণ নির্ধারণের পাশাপাশি ক্ষয় (erosion) ও বর্ধনের (accretion) হার বিশ্লেষণ করতে সহায়তা করেছে। স্যাটেলাইট ইমেজের রেজোলিউশন এবং গুগল আর্থ প্রো ব্যাবহার করে ম্যানুয়াল ডিজিটাইজেশন প্রক্রিয়া বিবেচনা করে স্থানিক অনিশ্চয়তা ১.৪৬ মিটার নির্ধারণ করা হয়েছে।

উপকূলরেখার গড় পরিবর্তনের হার নির্ধারণের জন্য Linear Regression Rate (LRR) ব্যবহার করা হয়েছে, যা পর্যবেক্ষণের সময়কাল এবং উপকূলরেখার অবস্থানের মধ্যকার সম্পর্ক বিশ্লেষণ করে দীর্ঘমেয়াদী পরিবর্তনের দিক ও মাত্রা নির্ধারণ করে। LRR গণনার জন্য নিম্নলিখিত সমীকরণ ব্যবহার করা হয়েছে (Baig, Ahmad, Shahfahad, Tayyab, & Rahman, 2020):

$$LRR = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots [1]$$

এই সমীকরণে, x_i নির্দিষ্ট বছরের পর্যবেক্ষণের সময়কে নির্দেশ করে, যেখানে y_i উপকূলরেখার অবস্থান (মিটারে) বোঝায়। এছাড়া, $\bar{x}$ পর্যবেক্ষণের গড় সময় এবং $\bar{y}$ উপকূলরেখার গড় অবস্থানকে প্রতিনিধিত্ব করে।

উপকূলরেখার পরিবর্তনের তীব্রতা নির্ধারণ করা হয় ভূমি ক্ষয় (erosion) বা ভূমি সঞ্চয় (accretion) ফলে উল্লেখযোগ্য পরিবর্তনের শিকার হওয়া উপকূলরেখার অংশের অনুপাতে। এটি নিম্নলিখিত সমীকরণ ব্যবহার করে গণনা করা হয় (Abd Wahid, Osman, & Setumin, 2023):

$$Intensity\ of\ Shoreline\ Change = \left(\frac{L_{change}}{L_{Total}}\right) \times 100 \ldots\ldots\ldots\ldots [2]$$

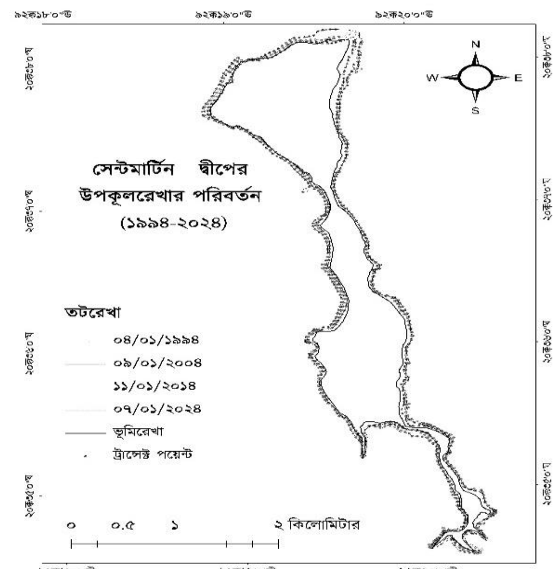
এখানে, L_{change} হলো ক্ষয় বা সঞ্চয় দ্বারা প্রভাবিত উপকূলরেখার মোট দৈর্ঘ্য (মিটারে) এবং L_{total} হলো সম্পূর্ণ উপকূলরেখার দৈর্ঘ্য। এই শতকরা মান উপকূলরেখার পরিবর্তনের স্থানিক ব্যাপ্তি পরিমাপ করে।

উপকূলরেখার গতিবিধির ফলে ভূমির মোট ক্ষয় বা বৃদ্ধিকে নির্দেশ করতে ক্ষেত্রফল পরিবর্তন (Areal Change) নির্ণয় করা হয়েছে, যা Net Shoreline Movement (NSM) ডেটার ভিত্তিতে গণনা করা হয়। সামগ্রিক ক্ষেত্রফল পরিবর্তন নির্ধারণের জন্য নিম্নলিখিত সমীকরণ ব্যবহার করা হয়েছে (Khedher et al., 2022):

$$Areal\ Change = \sum(NSM \times Transect\ Length) \times 10^{-6} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots [3]$$

এখানে, NSM নির্দেশ করে উপকূলরেখার নিট স্থানান্তর (মিটারে) এবং Transect Length প্রতি ট্রান্সেক্টের দৈর্ঘ্যকে বোঝায়, যা মিটারে পরিমাপ করা হয়। এই সমীকরণটি ক্ষেত্রফল পরিবর্তনকে বর্গকিলোমিটারে রূপান্তর করে, যা উপকূলরেখার পরিবর্তনের ফলে ভূমির ক্ষয় বা বৃদ্ধির পরিমাণ প্রকাশ করে।

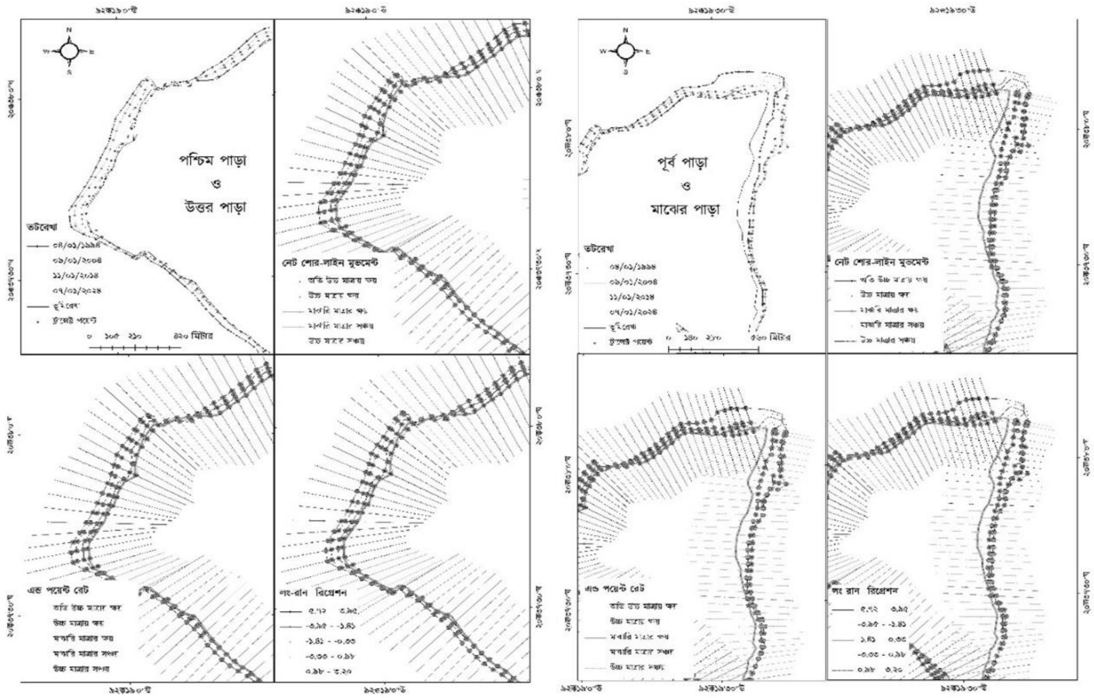
ভূমি ক্ষয় এবং সঞ্চয় মাত্রা মূল্যায়নের জন্য NSM মান বিশ্লেষণ করা হয়েছে, যেখানে ঋণাত্মক মান (negative values) ক্ষয় নির্দেশ করে এবং ধনাত্মক মান (positive values) সঞ্চয় নির্দেশ করে। ক্ষয় বা সঞ্চয় ট্রান্সেক্টের শতকরা হার গণনার জন্য নিম্নলিখিত সমীকরণ ব্যবহার করা হয়েছে (Hossen & Sultana, 2023):



চিত্র ৩: সেন্ট মার্টিন দ্বীপের উপকূলরেখা গতিশীলতা ১৯৯৪ থেকে ২০২৪

[উৎস: লেখকের প্রস্তুতকৃত]

$$Eroded\ or\ Accreted\ Transects\ (\%) = \left(\frac{Number\ of\ Eroded\ or\ Accreted\ Transects}{Total\ Number\ of\ Transects}\right) \times 100 \ldots\ldots\ldots\ldots [4]$$



চিত্র ৪: পশ্চিম ও উত্তর পাড়ার ট্রান্সেক্ট পয়েন্ট (বাম) এবং পূর্ব ও মজের পাড়ার ট্রান্সেক্ট পয়েন্ট (ডান) উপকূলরেখার কালানুক্রমিক পরিবর্তন এবং NSM, EPR ও LRR এর পার্থক্য প্রদর্শন করছে।

এছাড়াও, গড় ক্ষয় বা সঞ্চয়ের হার নির্ণয়ের জন্য মোট ক্ষয় বা সঞ্চয় সংশ্লিষ্ট ট্রান্সেক্টের সংখ্যার দ্বারা ভাগ করা হয়েছে (Hossen & Sultana, 2023):

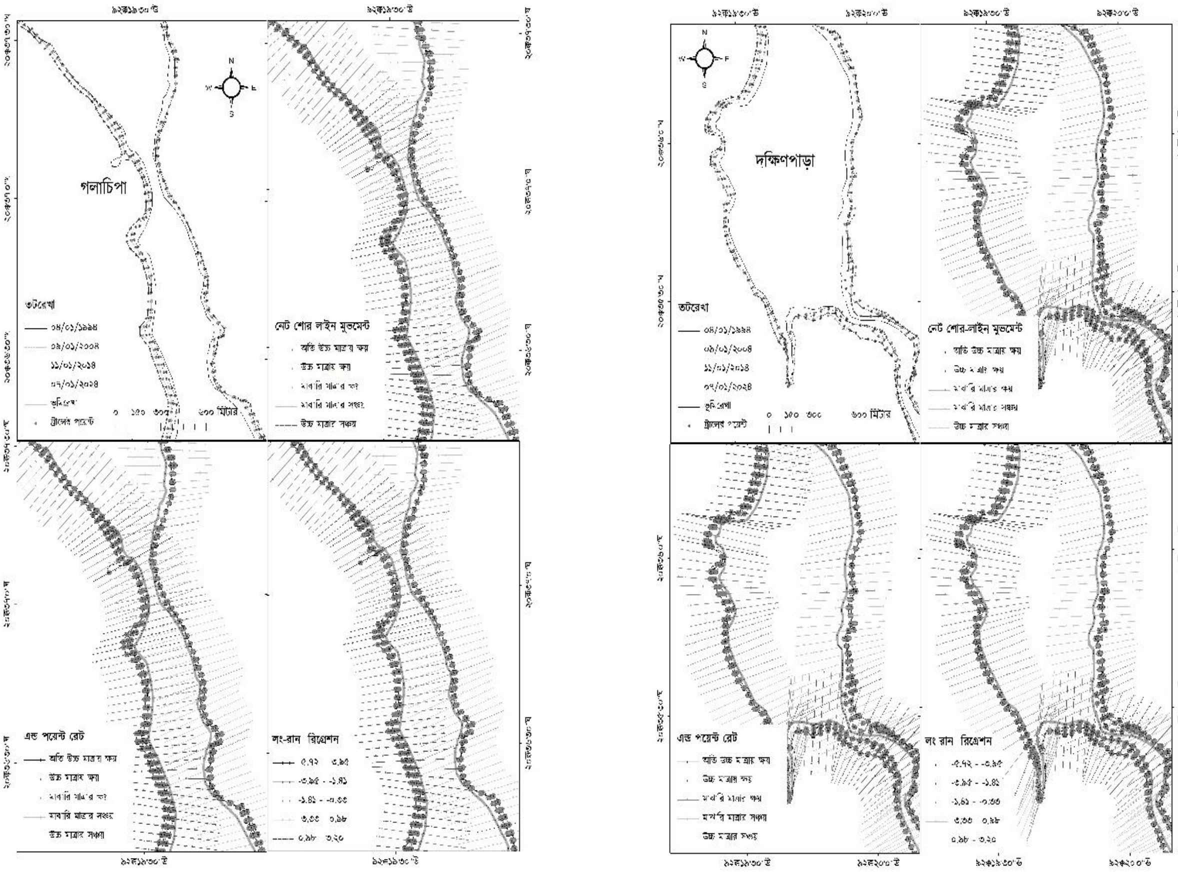
$$Average\ Erosion\ or\ Accretion = \frac{Total\ Erosion\ or\ Accretion}{Number\ of\ Eroded\ or\ Accreted\ Transects} \ldots\ldots\ldots [5]$$

এই পদ্ধতিগুলোর মাধ্যমে সেন্ট মার্টিন দ্বীপের ক্ষয় ও বর্ধনের মূল প্রভাবিত এলাকা চিহ্নিত করা সম্ভব হয়েছে, যা দ্বীপের ভূ-প্রাকৃতিক পরিবর্তনসমূহ বোঝার জন্য গুরুত্বপূর্ণ তথ্য প্রদান করে। গবেষণার ফলাফল উপকূলরেখার পরিবর্তনের চলমান প্রবণতা মোকাবিলায় টেকসই উপকূল ব্যবস্থাপনা কৌশল গ্রহণের প্রয়োজনীয়তা নির্দেশ করে।

ফলাফল এবং আলোচনা

সেন্ট মার্টিন দ্বীপের উপকূলীয় গতিশীলতার বিশ্লেষণ, যা নর্মালাইজড শোরলাইন মুভমেন্ট (NSM), ইরোশন পটেনশিয়াল রেট (EPR), এবং লং-টার্ম রেট অব ইরোশন (LRR) এর মতো মেট্রিক্স ব্যবহার করে করা হয়েছে, দ্বীপের বিভিন্ন অঞ্চলের মধ্যে ক্ষয় এবং সঞ্চয়ের প্রবণতায় উল্লেখযোগ্য স্থানিক বৈচিত্র্য প্রকাশ করেছে। চিত্র ৩-এ ১৯৯৪ থেকে ২০২৪ পর্যন্ত শোরলাইন গতিশীলতা প্রদর্শিত হয়েছে, যা কিছু এলাকায় ব্যাপক ক্ষয় তুলে ধরেছে।

চিত্র ৪, পশ্চিম পাড়া (পশ্চিম এলাকা) এবং উত্তর পাড়া (উত্তর এলাকা) (বাম দিকে) এবং পূর্ব পাড়া (পূর্ব এলাকা) এবং মাঝের পাড়া (ডান দিকে) এর ট্রান্সেক্ট পয়েন্টগুলো চিত্রিত করে, ক্ষয়ের প্রবণতাগুলি বিশেষভাবে লক্ষ্যণীয়। পশ্চিম এবং উত্তর অংশ, বিশেষ করে পশ্চিম পাড়া এবং উত্তর পাড়া, সময়ের সাথে উপকূলরেখার অবস্থানে উল্লেখযোগ্য পরিবর্তন দেখাচ্ছে। LRR এবং NSM মান অনুযায়ী, এই এলাকাগুলোতে উচ্চ ক্ষয়ের হার লক্ষনীয়। EPR মানও উল্লেখযোগ্যভাবে বেশি, যা নির্দেশ করছে যে এই অঞ্চলের উপকূলরেখা অন্যান্য অংশের তুলনায় দ্রুত ক্ষয়ের ঝুঁকিতে রয়েছে। বিশেষ করে উত্তর পাড়া, যা খোলামেলা সাগরের দিকে অবস্থিত, সেখানে তরঙ্গের ধারা এবং ঝড়ের কারণে প্রায়ই ক্ষয় ঘটে, যা এর ক্ষয় হারকে তরান্বিত করে।

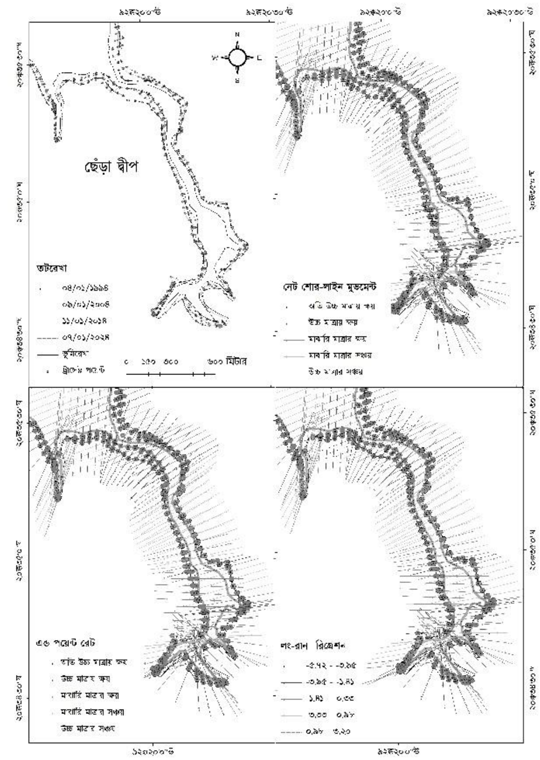


চিত্র ৫: গালাচিপা (বাম) এবং দক্ষিণ পাড়ার (ডান) ট্রান্সেক্ট পয়েন্ট উপকূলরেখার কালানুক্রমিক পরিবর্তন এবং NSM, EPR ও LRR এর পার্থক্য প্রদর্শন করছে। [উৎস: লেখকের প্রস্তুতকৃত]

একইভাবে, পশ্চিম পাড়া, যা তুলনামূলকভাবে বেশি সুরক্ষিত অবস্থানে থাকলেও, ধীরে ধীরে ক্ষয়ের সম্মুখীন হচ্ছে, যা নেতিবাচক EPR এবং LRR মান দ্বারা নির্দেশিত।

অন্যদিকে, চিত্র ৪ এর ডানদিকে প্রদর্শিত পূর্ব পাড়া এবং মাঝের পাড়া তুলনামূলকভাবে আরও স্থিতিশীল উপকূলরেখা প্রদর্শন করে, যেখানে LRR এবং NSM ফলাফল অনুযায়ী কম ক্ষয় দেখা যায়। যদিও এই অঞ্চলগুলো পুরোপুরি ক্ষয় মুক্ত নয়, তাদের EPR এবং LRR মান কম, যা নির্দেশ করছে যে এই অঞ্চলগুলো পশ্চিম এবং উত্তর অংশের তুলনায় উপকূলরেখার ক্ষয়ের ঝুঁকি তুলনামূলকভাবে কম। EPR এবং NSM এর পরিবর্তন দেখায় যে এই এলাকাগুলোতে উপকূলরেখায় স্থানীয়ভাবে পর্যায়ে পরিবর্তন ঘটেছে।

চিত্র ৫ থেকে গালাচিপা (বাম) এবং দক্ষিণ পাড়া (ডান) এর বিষয়ে কিছু ধারণা পাওয়া যায়। এই চিত্র থেকে স্পষ্টভাবে বোঝা যায় যে, দক্ষিণ-পূর্ব দিকে অবস্থিত গালাচিপা উপকূলীয় ক্ষয়ে ব্যাপকভাবে প্রভাবিত হয়েছে, যেখানে নেতিবাচক LRR এবং EPR মান দ্বারা উচ্চ ক্ষয় হার নির্দেশিত হয়েছে। অন্যদিকে, দক্ষিণ পাড়া সামান্য বেশি মৃদু ক্ষয় হার প্রদর্শন করছে, যদিও এটি এখনও সময়ে সময়ে ক্ষয়ের শিকার হচ্ছে, যেমন এর NSM এবং LRR ডেটা থেকে দেখা যায়। এই অঞ্চলটি দক্ষিণ-পশ্চিম মৌসুমি বাতাস এবং ঝড়ের সরাসরি প্রভাবের কারণে জোয়ারবাঁধের কারণে উপকূলরেখার পরিবর্তন সহ নানা চ্যালেঞ্জের সম্মুখীন।



চিত্র ৬: ছেঁড়া দ্বীপের ট্রান্সেক্ট পয়েন্টগুলো সময়ের সাথে উপকূলরেখার পরিবর্তন প্রদর্শন করছে। [উৎস: লেখকের প্রস্তুতকৃত]

চিত্র ৬-এ ছেঁড়া দ্বীপের ট্রান্সেক্ট পয়েন্টগুলো দেখানো হয়েছে, যা দ্বীপের বাইরের অংশে তীব্র ক্ষয়ের চিত্র তুলে ধরে। ছোট এবং খোলামেলা হওয়ায়, ছেঁড়া দ্বীপের উপকূলরেখা দ্রুত পেছাচ্ছে, যার প্রমাণ অত্যন্ত নেতিবাচক EPR এবং LRR মান। এই দ্বীপে দীর্ঘদিন ধরে চলমান ক্ষয় বেশ উদ্বেগজনক, কারণ পর্যবেক্ষিত এলাকাগুলোর মধ্যে এখানকার ক্ষয়ের হার সবচেয়ে বেশি। প্রবল ঢেউয়ের ধাক্কা এবং ভৌগোলিক অবস্থানের কারণে এটি ক্রমাগত ঝুঁকির মুখে পড়ছে।

উপাত্ত বিশ্লেষণ করলে স্পষ্ট বোঝা যায়, পশ্চিম পাড়া, উত্তর পাড়া এবং গালাচিপা সবচেয়ে বেশি ক্ষয়ের সম্মুখীন। এখানে LRR ও EPR-এর মান বেশ উচ্চ, যা নির্দেশ করে যে উপকূলরেখা দ্রুত সরে যাচ্ছে। এর ফলে ভবিষ্যতে এই অঞ্চল আরও বেশি ক্ষতির মুখে পড়তে পারে এবং পরিবেশগত ভারসাম্য নষ্ট হওয়ার আশঙ্কা রয়েছে। অন্যদিকে, পূর্ব পাড়া, মাঝের পাড়া এবং দক্ষিণ পাড়ায় উপকূলের পরিবর্তন তুলনামূলকভাবে স্থিতিশীল, যেখানে ক্ষয়ের হারও অপেক্ষাকৃত কম। তবে ছেঁড়া দ্বীপের ক্ষেত্রে, অতিরিক্ত উন্মুক্ত অবস্থানের কারণে এখানকার ক্ষয় অনেক বেশি, যা নিয়ন্ত্রণ করা না গেলে ভবিষ্যতে এই জায়গাটির অস্তিত্ব হুমকির মুখে পড়তে পারে।

উপকূলরেখা পরিবর্তন সূচক

সারণী ১: ১৯৯৪ থেকে ২০২৪ সালের মধ্যে সেন্ট মার্টিন দ্বীপের উপকূলরেখা পরিবর্তন বিশ্লেষণ এবং স্থানিক ভূমি পরিবর্তন (ধনাত্মক মান ক্ষয় নির্দেশ করে, এবং ঋণাত্মক মান জমাট বাঁধাকে বোঝায়) ।

প্যারামিটার	উপকূলরেখা পরিসংখ্যান		মান
উপকূলরেখা পরিবর্তনের হার (মিটার/বছর) Rate of Shoreline Change (m/year)	LRR	গড় (Mean)	-0.67817942
		মধ্যমা (Median)	-0.56
		মোড (Mode)	-0.52
		সর্বনিম্ন (Min)	3.2
		সর্বাধিক (Max)	-5.72
		আদর্শ বিচ্যুতি (SD)	1.178095319
	EPR	গড় (Mean)	-0.681236842
		মধ্যমা (Median)	-0.61
		মোড (Mode)	0
		সর্বনিম্ন (Min)	3.72
		সর্বাধিক (Max)	-6.02
		আদর্শ বিচ্যুতি (SD)	1.235900875
নীট উপকূলরেখা পরিবর্তন (মিটার) Net Shoreline Change (m)	NSM	গড় (Mean)	-20.61552632
		মধ্যমা (Median)	-18.42
		মোড (Mode)	0
		সর্বনিম্ন (Min)	112.55
		সর্বাধিক (Max)	-182.23
		আদর্শ বিচ্যুতি (SD)	37.37701291
ক্ষয় (বর্গকিমি) Erosion (km^2)			-0.09
পরিবৃদ্ধি (বর্গকিমি) Accretion (km^2)			0.019
সার্বিক ফলাফল	LRR-এর ভিত্তিতে উপকূলরেখা পরিবর্তনের গড় হার (মি/বছর)		0.67
	উপকূলরেখা পরিবর্তনের দৈর্ঘ্যের তীব্রতা (%)		−19.12%
	ভূমির ক্ষেত্রফল পরিবর্তন (বর্গকিমি)		-4.70034

[উৎস: লেখকের প্রস্তুতকৃত]

সারণী-১ থেকে দেখা যায় যে, Shoreline Change Envelope (SCE) মানগুলি, যা উপকূলরেখার সর্বাধিক পর্যবেক্ষিত পরিবর্তনকে

প্রতিফলিত করে, সেগুলি সর্বনিম্ন ০.০৬ মিটার থেকে সর্বাধিক ২০৩.১৬ মিটার পর্যন্ত ছিল, যার গড় ছিল ৩৭.৩৯ মিটার এবং মান বিচ্যুতি ছিল ৩০.৪৯ মিটার। ল্যান্ডস্যাটের ৩০মি রেজোলিউশন সত্ত্বেও এই ভগ্নাংশমূলক মানগুলি গননা করা হয়েছে DSAS অ্যাড-ইন এর মাধ্যমে। কারণ SCE পরিমাপটি ৩৮১টি ট্রান্সেক্ট জুড়ে গড় পরিবর্তনের প্রতিনিধিত্ব করে এবং NDWI সূচক ও ম্যানুয়াল ডিজিটাইজেশনের মাধ্যমে সাব-পিক্সেল পর্যায়ে উপকূলরেখার সূক্ষ্ম অবস্থান শনাক্ত করা সম্ভব হয়েছে। গবেষণায় দেখা গেছে যে, যদিও প্রতিটি অধ্যয়নবর্ষের স্যাটেলাইট চিত্র একই ঋতুগত সময়সীমায় সংগ্রহ করা হয়েছিল, তবুও ম্যানুয়ালি ডিজিটাইজড শেপফাইলে উপকূলরেখার আন্তঃছেদ পরিলক্ষিত হয়েছে। এটি জোয়ার-ভাটার অপ্রত্যাশিত তারতম্যের কারণে ঘটে, যার ফলে একই স্থানে ভিন্ন ভিন্ন সময়ে শোরলাইনের অবস্থান পরিবর্তিত হয়। এই প্রাকৃতিক পরিবর্তনশীলতাই SCE-এর সর্বনিম্ন ও সর্বাধিক মানের মধ্যে ব্যাপক ব্যবধান সৃষ্টি করেছে, যা ArcMap-এর DSAS অ্যাড-ইন এর মাধ্যমে স্বয়ংক্রিয়ভাবে গণনা করা হয়েছে।

এই উচ্চ পরিবর্তনশীলতা উপকূলরেখার চলাচলের বৈচিত্র্যপূর্ণ বন্টনকে নির্দেশ করে, যেখানে কিছু এলাকায় উল্লেখযোগ্য পরিবর্তন হয়েছে, আবার কিছু এলাকায় তুলনামূলকভাবে স্থিতিশীল ছিল। SCE-এর মধ্যম মান ২৯.২৪ মিটার, যা গড় মানের চেয়ে কম, এটি একটি বক্র বন্টনকে নির্দেশ করে, যেখানে কিছু আউটলাইনার অতিরিক্ত মান তৈরি করেছে।

Net Shoreline Movement (NSM) পরিমাপটি এই পরিবর্তনগুলির দিকনির্দেশনা স্পষ্ট করে। NSM এর গড় মান -২০.৬২ মিটার, যা একটি নিট ক্ষয় প্রবণতা নির্দেশ করে, এবং এই প্রবণতাটি সমর্থিত হয়েছে ৩৮১টি ট্রান্সেক্টের মধ্যে ২৮৫টি (৭৪.৮%) ক্ষয় দেখানোর মাধ্যমে। এই গড় মানটি ল্যান্ডস্যাটের পিক্সেল আকারের চেয়ে কম হলেও স্বয়ংক্রিয়ভাবে গণনা করা সম্ভবপর হয়েছে DSAS অ্যাড-ইন ব্যাবহার করে। এখানে NSM হল ৩০ বছরের (১৯৯৪-২০২৪) ক্রমপুঞ্জিত পরিবর্তনের পরিসংখ্যানিক গড়, যেখানে দীর্ঘমেয়াদী রৈখিক প্রতিগমন (LRR) বিশ্লেষণ -০.৬৮ মি/বছর হার নির্দেশ করে। বিশেষভাবে, সর্বাধিক NSM ছিল ১১২.৫৫ মিটার, যা বিচ্ছিন্ন ট্রান্সেক্টে উল্লেখযোগ্য উপকূল বৃদ্ধি প্রদর্শন করে, আবার সর্বনিম্ন মান -১৮২.২৩ মিটার, যা তীব্র ক্ষয়কৃত এলাকাগুলির প্রতিনিধিত্ব করে - এই মানগুলি স্থানিক বৈচিত্র্যের প্রতিফলন, যেখানে ট্রান্সেক্ট ভিত্তিক বিশ্লেষণ পদ্ধতি প্রাধান্য পায়।

সময়গত প্রবণতা

End Point Rate (EPR) এবং Linear Regression Rate (LRR) পরিমাপগুলি, যা উপকূলরেখার পরিবর্তনের হার নির্দেশ করে, সেগুলির গড় ছিল -০.৬৮ মিটার প্রতি বছর। এই নেতিবাচক মানগুলি ৩০ বছরের গবেষণা সময়কালে ক্ষয়ের প্রাধান্যকে পুনর্ব্যক্ত করে। EPR এবং LRR এর মান বিচ্যুতি যথাক্রমে ১.২৪ এবং ১.১৮ মিটার/বছর ছিল, যা পরিবর্তনের হারের ক্ষেত্রে উল্লেখযোগ্য স্থানীয় বৈচিত্র্যকে নির্দেশ করে। সর্বাধিক EPR ছিল ৩.৭২ মিটার/বছর এবং সর্বাধিক LRR ছিল ৩.২০ মিটার/বছর, যা উপকূল বৃদ্ধির এলাকাগুলির মধ্যে ছিল, এর বিপরীতে সর্বনিম্ন মান ছিল -৬.০২ মিটার/বছর এবং -৫.৭২ মিটার/বছর, যা ক্ষয়প্রবণ অঞ্চলে ছিল।

ক্ষয় এবং জমির বৃদ্ধি

ক্ষয় ছিল দ্বীপের উপকূলরেখাকে প্রভাবিত করা প্রধান প্রক্রিয়া, যার মোট ক্ষয়কৃত দৈর্ঘ্য ছিল ৯৭৭২.১৬ মিটার এবং প্রতিটি ট্রান্সেক্টে গড় ক্ষয়ের হার ছিল -৩৪.২৯ মিটার। বিপরীতে, জমির বৃদ্ধি তুলনামূলকভাবে কম ছিল, মোট ১৯৩৮.২৬ মিটার জমি বৃদ্ধি পেয়েছে এবং প্রতিটি ট্রান্সেক্টে গড় জমির বৃদ্ধি হার ছিল ২১.৭৮ মিটার। এই ফলাফলগুলি একটি নিট ক্ষয়ের অসমতা নির্দেশ করে, যা সময়ের সাথে উল্লেখযোগ্য ভূমির ক্ষতি প্রদর্শন করে।

স্থানিক প্রভাব

ক্ষয়প্রবণ ট্রান্সেক্টের সংখ্যা (৭৪.৮%) ভূমি বৃদ্ধিপ্রাপ্ত ট্রান্সেক্টের সংখ্যার (২৩.৪%) তুলনায় উল্লেখযোগ্যভাবে বেশি, যা দ্বীপের উপকূলীয় ভূমি ক্ষয়ের তীব্রতা নির্দেশ করে। এই অসমতা আরও স্পষ্ট হয়েছে Shoreline Erosion Length (LSE)-এর মাধ্যমে, যেখানে সর্বোচ্চ মান ১১৫.৯৯ মিটার রেকর্ড করা হয়েছে, যা নির্দিষ্ট কিছু অঞ্চলে উপকূলরেখার ব্যাপক পশ্চাতপসরণের ইঙ্গিত দেয়।

ট্রান্সেক্টগুলির মধ্যে উপকূলরেখার আচরণের বৈচিত্র্য উপকূলীয় প্রক্রিয়াগুলির বিভিন্ন ধরনের প্রভাবের প্রতিফলন, যেমন তরঙ্গের প্রভাব, জোয়ারবাঁধ এবং উপকূলীয় অববাহিকার স্থানান্তর নির্দেশ করে। মানববসতি এবং পরিকাঠামোর কাছে অবস্থিত অঞ্চলে সম্ভবত অতিরিক্ত ক্ষয় হয়েছে মানবসৃষ্ট কার্যক্রমের কারণে, তবে প্রাকৃতিক জমির বৃদ্ধি সম্ভবত আশ্রয়প্রাপ্ত এলাকায় বা যেখানে সমুদ্র থেকে পর্যাপ্ত তলা সরবরাহ আছে, সেখানে বেশি ঘটেছে।

আলোচনা এবং প্রভাব

গবেষণার ফলাফলগুলি ইঙ্গিত দেয় যে, সেন্ট মার্টিন দ্বীপে তটভূমির অনেক পরিবর্তন ঘটছে, যেখানে ক্ষয় অনেক বেশি পরিমাণে বৃদ্ধি পাচ্ছে। এই প্রবণতাগুলি প্রাকৃতিক কারণগুলির একটি সমন্বয়ে নির্ধারিত, যেমন সমুদ্রস্তরের উচ্চতা বৃদ্ধি, ঝড়ের ঢেউ এবং তরঙ্গগতির পরিবর্তন, পাশাপাশি মানবসৃষ্ট প্রভাবগুলিও যেমন পরিকল্পনাহীন পর্যটন উন্নয়ন এবং সম্পদ আহরণ।

NSM, EPR, এবং LRR পরিমাপগুলিতে উচ্চ মান বিচ্যুতি উপকূলরেখার প্রতিক্রিয়া মধ্যে স্থানীয় বৈচিত্র্যকে তুলে ধরে, যা লক্ষ্যযুক্ত ব্যবস্থাপনা উদ্যোগের প্রয়োজনীয়তাকে জোরালোভাবে নির্দেশ করে। যেসব এলাকায় চরম ক্ষয় হচ্ছে, যেমন সর্বনিম্ন NSM

এবং উচ্চ LSE মান দ্বারা চিহ্নিত করা হয়েছে, সেগুলিতে অবিলম্বে মনোযোগ দেওয়া প্রয়োজন যাতে আরও ভূমি হারানো থেকে রোধ করা যায় এবং স্থানীয় সম্প্রদায়গুলির জন্য ঝুঁকি কমানো যায়। অন্যদিকে, জমির বৃদ্ধি পাচ্ছে এমন এলাকাগুলি, যদিও সীমিত, পুনরুদ্ধার এবং সংরক্ষণ উদ্যোগের জন্য সুযোগ তৈরি করতে পারে। এই ফলাফলগুলি উপকূলীয় ব্যবস্থাপনা কাঠামোতে রিমোট সেন্সিং এবং ভূ-স্থল বিশ্লেষণের সংমিশ্রণের গুরুত্বকেও পুনর্ব্যক্ত করে, কারণ এই সরঞ্জামগুলি হস্তক্ষেপের জন্য অগ্রাধিকারের এলাকা চিহ্নিত করতে সক্ষম।

গবেষণার সীমাবদ্ধতা

এই গবেষণায় ব্যাপক বিশ্লেষণ করা হলেও, বেশ কয়েকটি সীমাবদ্ধতা রয়েছে। প্রধান সীমাবদ্ধতা হলো ব্যবহৃত ল্যান্ডস্যাট স্যাটেলাইট চিত্রের ৩০ মিটার স্থানিক রেজলিউশন, যা সূক্ষ্ম-স্কেলের উপকূলরেখার পরিবর্তন যথাযথভাবে ধরতে পারে না, বিশেষত জটিল উপকূলীয় বৈশিষ্ট্যের ক্ষেত্রে। দীর্ঘমেয়াদি ঐতিহাসিক চিত্রে স্যাটেলাইট প্রযুক্তি, প্রক্রিয়াকরণ পদ্ধতি ও মেঘের আচ্ছাদন পরিবর্তনের কারণে সঠিকতা ও মানের ভিন্নতা দেখা দিতে পারে।

এছাড়াও, এই গবেষণায় কিছু বাহ্যিক উপাদান, যেমন মানুষের কার্যক্রম, স্থানীয় নির্মাণকাজ এবং প্রাকৃতিক দুর্যোগ (ঘূর্ণিঝড় বা প্রবল ঝড়) বিবেচনায় নেওয়া হয়নি, যা উপকূলীয় ক্ষয়কে প্রভাবিত করতে পারে। এসব ভেরিয়েবল উপকূলরেখার পরিবর্তনে এমন প্রভাব ফেলতে পারে, যা স্যাটেলাইট চিত্রে প্রতিফলিত হয়নি। এর পাশাপাশি, গবেষণার সময়কালের সীমাবদ্ধ ছিল, যা স্থানীয় বা অস্থায়ী ঘটনাগুলির কারণে উপকূলরেখার গতিবিধিতে স্বল্পমেয়াদী পরিবর্তনগুলোকে উপেক্ষা করতে পারে।

উপসংহার

এই গবেষণাটি সেন্ট মার্টিন দ্বীপের বিভিন্ন অঞ্চলের উপকূলীয় ক্ষয় ও জমাট বাঁধার প্রবণতার ব্যাপক তথ্য প্রদান করেছে, যেখানে স্যাটেলাইট চিত্র ব্যবহার করে দীর্ঘমেয়াদি পরিবর্তনগুলি ট্র্যাক করা হয়েছে। গবেষণার ফলাফলগুলি বিভিন্ন অঞ্চলের মধ্যে ক্ষয়ের হারগুলির উল্লেখযোগ্য পার্থক্য তুলে ধরে, যেখানে পশ্চিম পাড়া, উত্তর পাড়া এবং গলাচিপা সবচেয়ে বেশি ক্ষয় হার প্রদর্শন করে।

এই ফলাফলগুলি নির্দেশ করে যে এই অঞ্চলগুলি আরো উপকূলীয় ভূমি হারানোর জন্য বিপজ্জনক, বিশেষত উচ্চ EPR এবং LRR মানের পরিপ্রেক্ষিতে। বিপরীতে, পুর্ব পাড়া, মাঝের পাড়া এবং দক্ষিণ পাড়া এমন এলাকাগুলি প্রদর্শন করে যেগুলির উপকূলীয় অবস্থান তুলনামূলকভাবে স্থিতিশীল, ক্ষয়ের হার কম, যা স্বল্পমেয়াদী ঝুঁকির কম হওয়ার ইঙ্গিত দেয়। ছেঁড়া দ্বীপ, যদিও ছোট, তা গুরুত্বপূর্ণ ক্ষয় প্রদর্শন করছে, যা উন্মুক্ত উপকূলীয় অঞ্চলের দুর্বলতাকে প্রদর্শন করে।

এই গবেষণার ফলাফলগুলি উচ্চ ঝুঁকির অঞ্চলে উপকূলীয় ব্যবস্থাপনা কৌশলগুলির প্রয়োজনীয়তার উপর গুরুত্ব আরোপ করে, যাতে ক্ষয় কমানো যায় এবং স্থানীয় জনগণ ও জীববৈচিত্র্যকে রক্ষা করা যায়। উপকূলীয় সুরক্ষা কাঠামো বাস্তবায়ন, ম্যানগ্রোভ বাস্তুতন্ত্র পুনরুদ্ধার এবং টেকসই পর্যটন প্রচারের মতো পদক্ষেপগুলি আরও ক্ষয় প্রতিরোধে অপরিহার্য। ভবিষ্যতে ক্ষয় প্রবণতায় জলবায়ু পরিবর্তনের প্রভাব বিবেচনা করা গুরুত্বপূর্ণ, কারণ সমুদ্রস্তরের বৃদ্ধি এবং ঝড়ের তীব্রতা বাড়ানো সম্ভবত বিদ্যমান দুর্বলতাগুলি আরও বাড়িয়ে তুলবে।

যদিও এই গবেষণাটি সেন্ট মার্টিন দ্বীপের ক্ষয় প্রবণতা সম্পর্কে মূল্যবান তথ্য প্রদান করেছে, তবুও স্থানিক রেজোলিউশন, মাটি যাচাইয়ের তথ্যের অভাব এবং সময়কালগত সীমাবদ্ধতার কারণে আরও গবেষণার প্রয়োজনীয়তা স্পষ্ট। ভবিষ্যত গবেষণাগুলি উচ্চ রেজোলিউশন চিত্র, মাঠ জরিপ এবং আরও ঘন মনিটরিং অন্তর্ভুক্ত করলে এলাকার পরিবর্তনশীল উপকূলীয় গতিবিধির একটি সঠিক চিত্র পাওয়া যেতে পারে। এছাড়াও, পুরো দ্বীপের গবেষণা সম্প্রসারণ এবং মানবিক কার্যক্রমের মতো বাহ্যিক উপাদানগুলোকে বিবেচনায় নিয়ে দ্বীপের উপকূলীয় পরিবেশের মুখোমুখি চ্যালেঞ্জগুলির একটি আরও ব্যাপক ধারণা পাওয়া যেতে পারে। সবশেষে, এই গবেষণা সেন্ট মার্টিন দ্বীপের উপকূলীয় পরিবর্তনের একটি মৌলিক ধারণা প্রদান করে, যা আরও কার্যকর এবং সচেতন উপকূলীয় ব্যবস্থাপনা নীতিগুলি প্রণয়নের পথ প্রশস্ত করে।

তথ্যসূত্র

Abd Wahid, M. Z. A., Osman, M. S., & Setumin, S. (2023). Comparative Analysis on Shoreline Changes in Kelantan, Malaysia Using Digital Shoreline Analysis System (DSAS). *ESTEEM Academic Journal*, 19(September), 109–117. https://doi.org/10.24191/esteem.v19iseptember.21031

Al Jazeera. (2017). Rohingya camps in Bangladesh were destroyed by Cyclone Mora. Retrieved from https://www.aljazeera.com/news/2017/5/31/rohingya-camps-in-bangladesh-destroyed-by-cyclone-mora.

Baig, M. R. I., Ahmad, I. A., Shahfahad, Tayyab, M., & Rahman, A. (2020). Analysis of shoreline changes in Vishakhapatnam coastal tract of Andhra Pradesh, India: an application of digital shoreline analysis system (DSAS). *Annals of GIS*, 1–16. https://doi.org/10.1080/19475683.2020.1815839

Balakrishnan, P., Abulibdeh, A., & Kabir, T. (2023). Assessment of the impact of anthropogenic evolution and natural processes on shoreline dynamics using multi-temporal satellite images and statistical analysis. *Water*, 15(8), 1440. https://doi.org/10.3390/w15081440

Benhur, J. (2024). Coastal resilience and shoreline dynamics: assessing the impact of a hybrid beach restoration strategy in Puducherry, India. *Frontiers in Marine Science*, 11. https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1426627 15

Duru, U. (2017). Shoreline change assessment using multi-temporal satellite images: a Lake Sapanca, NW Turkey case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(8). https://doi.org/10.1007/s10661-017-6112-2

Duvat, V., Pillet, V., Volto, N., Krien, Y., Cécé, R., & Bernard, D. (2019). High human influence on beach response to tropical cyclones in small islands: Saint-Martin Island, Lesser Antilles. *Geomorphology*, 325, 70-91. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.09.029

Foyjonnesa, Irfan Raju, Farhana Zannat Eti, Md. Mahabub Alam, Gour Chandra Paul. (2019). Impact assessment of tropical cyclone MORA along the coast of Bangladesh and recovery measures. *International Journal of Scientific & Engineering Research, 10*(4). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/332979980_Impact_assessment_of_tropical_cyclone_MORA_along_the_coast_of_Bangladesh_and_recovery_measures.

Hossen, Md. F., & Sultana, N. (2023). Shoreline change detection using DSAS technique: Case of Saint Martin Island, Bangladesh. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 100943. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100943

Jouannic, G., Ameline, A., Pasquon, K., Navarro, Ó., Minh, C., Boudoukha, A., … & Guéro, P. (2020). Recovery of the island of Saint Martin after Hurricane Irma: an interdisciplinary perspective. *Sustainability*, 12(20), 8585. https://doi.org/10.3390/su12208585

Kayum, S., Shimatani, Y., & Minagawa, T. (2022). Evaluation of pandanus trees as a means of eco-dry against storm surge wave on Saint Martin's Island, Bangladesh. *Water*, 14(11), 1781. https://doi.org/10.3390/w14111781

Khedher, K. M., Abu-Taweel, G. M., Al-Fifi, Z., Qoradi, M. D., Al-Khafaji, Z., Halder, B., … Yaseen, Z. M. (2022). Farasan Island of Saudi Arabia has confronted the measurable impacts of global warming over the past 45 years. *Scientific Reports*, 12(1). https://doi.org/10.1038/s41598-022-18225-5

McAllister, E., Payo, A., Novellino, A., Dolphin, T., & Medina-López, E. (2022). Multispectral satellite imagery and machine learning for the extraction of shoreline indicators. *Coastal Engineering*, 174, 104102. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104102

Mentaschi, L., Vousdoukas, M., Pekel, J., Voukouvalas, E., & Feyen, L. (2018). Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Scientific Reports*, 8(1). https://doi.org/10.1038/s41598-018-30904-w

Quang, D., Ngan, V., Tam, H., Viet, N., Tinh, N., & Tanaka, H. (2021). Long-term shoreline evolution using DSAS technique: a Quang Nam province, Vietnam case study. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(10), 1124. https://doi.org/10.3390/jmse9101124

Rahman, M. (2023). Impact of climate change on Saint Martin's Island of Bangladesh. *SSRN Electronic Journal*. https://doi.org/10.2139/ssrn.4397578

Rahman, M., Crawford, T., & Islam, S. (2022). Shoreline change analysis along rivers and deltas: a systematic review and bibliometric analysis of the shoreline study literature from 2000 to 2021. *Geosciences*, 12(11), 410. https://doi.org/10.3390/geosciences12110410 16

Rangoonwala, A., Jones, C., & Ramsey, E. (2016). Wetland shoreline recession in the Mississippi River Delta is attributed to petroleum oiling and cyclonic storms. *Geophysical Research Letters*, 43(22). https://doi.org/10.1002/2016gl070624

Rey, T., Leone, F., Candela, T., Belmadani, A., Palany, P., Krien, Y., … & Zahibo, N. (2019). Coastal processes and influence on damage to urban structures during Hurricane Irma (St-Martin & St-Barthélemy, French West Indies). *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(7), 215. https://doi.org/10.3390/jmse7070215

Sayre, R., Noble, S., Hamann, S., Smith, R., Wright, D., Breyer, S., … & Reed, A. (2018). A new 30-meter resolution global shoreline vector and associated global islands database for developing standardized ecological coastal units. *Journal of Operational Oceanography*, 12(sup2), S47-S56. https://doi.org/10.1080/1755876x.2018.15297 14

Smith, K., Terrano, J., Pitchford, J., & Archer, M. (2021). Coastal wetland shoreline change monitoring: comparing shorelines from high-resolution WorldView satellite imagery, aerial imagery, and field surveys. *Remote Sensing*, 13(15), 3030. https://doi.org/10.3390/rs13153030

Sutikno, S., Murakami, K., Handoyo, D., & Fauzi, M. (2015). Calibration of a numerical model for shoreline change prediction using satellite imagery data. *Makara Journal of Technology*, 19(3), 113. https://doi.org/10.7454/mst.v19i3.3219

UNICEF Bangladesh. (2017). Cyclone Mora Humanitarian Situation Report No. 1. Retrieved from https://reliefweb.int/report/bangladesh/unicef-bangladesh-cyclone-mora-humanitarian-situation-report-no1-30-may-2017.

Utama, I. (2024). Assessing lake shoreline change and prediction for 2030 by physical drivers: a case study from Lake Batur, Batur UNESCO Global Geopark, Bali. *International Journal of Environment and Geosciences*, 5(1), 14. https://doi.org/10.24843/ijeg.2024.v05.i01.p02

Vos, K., Harley, M., Splinter, K., Walker, A., & Turner, I. (2020). Beach slopes from satellite-derived shorelines. *Geophysical Research Letters*, 47(14).

জাহাঙ্গীরনগর বিশ্ববিদ্যালয় ভূগোল ও পরিবেশ সমীক্ষণ ৪৩:২০২৪ (পৃ. ১১-২২)
Jahangirnagar Bishwavidyalay Bhugol O Paribesh Samikkhan 43:2024 (pp 11-22) *ISSN 1027-8567*

Shoreline Dynamics and Erosional Variability of Saint Martin Island: A Geospatial Analysis Using Multi-Temporal Satellite Imagery

Maria Binta Malek[1], MD. Mahmudul Hasan Shahed[2], Khaled Jubair Shabab[3], Md. Ashraful Habib[4], Md. Shahedur Rashid[5]

[1-3] Postgraduate Researcher, Department of Geography and Environment, Jahangirnagar University, Savar, Dhaka-1342
[4] Lecturer, Department of Geography and Environment, Jahangirnagar University, Savar, Dhaka-1342
[5] Professor, Department of Geography and Environment, Jahangirnagar University, Savar, Dhaka-1342

Abstract: This study examines shoreline dynamics on Saint Martin Island, Bangladesh, using multi-temporal satellite imagery (1994-2024) and the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) to assess erosion and accretion patterns. The research highlights the island's vulnerability to natural processes like rising sea levels, storm surges, and human activities, revealing significant shoreline changes over the past 30 years. Key findings show that erosion dominates, with areas such as Pashchim Para, Uttar Para, and Galachipa experiencing the highest retreat rates, while Purba Para and Majer Para remain relatively stable. The Net Shoreline Movement (NSM) analysis revealed a mean shoreline change rate of -20.62 meters, indicating a predominant loss of land across the island. The study identifies spatial variability in shoreline behavior, emphasizing the need for targeted coastal management strategies. The results underscore the importance of integrating remote sensing and geospatial tools for monitoring shoreline changes and prioritizing intervention areas. Sustainable measures, such as mangrove restoration and coastal protection, are recommended to mitigate erosion and enhance resilience. This research provides critical insights for policymakers and stakeholders, contributing to understanding shoreline dynamics and supporting effective coastal planning and conservation efforts.

Keywords: Shoreline dynamics, Digital Shoreline Analysis System, Saint Martin Island, Remote sensing, Geospatial analysis