

## تغییر ساحل به علت افزایش سطح دریا و فروپاشی زمین ناشی از افزایش موج انتقال از

### طریق موج شکن آب زیرزمینی

#### چکیده

ساحل‌های ماسه‌ای حفاظت شده با موج شکن‌های مستغرق، که تاج آنها زیر سطح آب است به نظر می‌رسد که در برابر افزایش سطح دریا (SLR) نسبی آسیب‌پذیر باشند. در این تحقیق تغییر خط ساحلی به خاطر تغییر سطح دریا و فرونشست زمین در طول ساحل غربی نیگاتا در ژاپن که با موج شکن‌های مستغرق محافظت می‌شود، با استفاده از داده‌های میدانی و مدل پیش‌بینی یک خط ساحل با فرض ایجاد تغییر خط ساحلی توسط جابجایی رسوبات ساحلی بررسی شد. در طول 10 سال گذشته جابجایی خط ساحلی مستقیماً به دلیل تغییر سطح دریا و فرونشست زمین نبود. با این وجود، طبق پیش‌بینی مدل ما در 100 سال آینده، خط ساحلی برای افزایش شار انرژی موج‌های ورودی روی موج شکن‌ها که توسط افزایش سطح دریا و فرونشست زمین ایجاد شده است، 60 متر عقب نشینی خواهد داشت. این نتایج نشان می‌دهد که سایر ساحل‌های ماسه‌ای حفاظت شده با موج شکن‌های کم ارتفاع و نیز ساحل‌های پشت صخره‌های مرجانی که موج شکن‌های مستغرق طبیعی محسوب می‌شوند، فرسایش‌های غیرقابل چشم‌پوشی را که توسط SLR نسبی در آینده ایجاد می‌شوند، تجربه خواهد کرد. ( M.

(Y. Kuriyama Banno

#### 1. مقدمه

بسیاری از ساحل‌های ماسه‌ای در دنیا به دلایل متفاوت طبیعی و انسانی شامل تامین رسوب کمتر از رودخانه‌ها و نرخ جریان موازی ساحل غیرمتعادل در حوالی سازه‌های ساحلی در حال فرسایش هستند. اقدامات متقابل برای فرسایش سواحل به راه‌حل‌های نرم، که شامل تغذیه ساحل و میانبر ماسه‌ای، و راه‌حل‌های سخت، که شامل گروین‌ها، موج شکن‌های منفصل و موج شکن‌های مستغرق هستند، دسته‌بندی می‌شوند

برخلاف موج شکن‌های منفصل ، موج شکن‌های مستغرق با نمای افق از ساحل تداخل ندارند. بنابراین در جاییکه دسترسی به رسوبات برای تغذیه محدود است و گردشگری در رونق است، موج شکن‌های مستغرق گاه‌ها ساخته می‌شوند. با این وجود، به دلیل اینکه تاج موج شکن‌های مستغرق زیر آب است، افزایش پیش بینی شده سطح دریا و فرونشست زمین منجر به تلفات کاهش یافته انرژی موج توسط موج شکن‌های مستغرق خواهد شد، که موجب ایجاد بی ثباتی در سواحل ماسه‌ای می‌شود. بنابراین، سواحل ماسه‌ای پشت موج شکن‌های مستغرق در برابر SLR و فرونشست زمین آسیب پذیر هستند.

علاوه بر این، بر اساس قانون برون فارغ از این که ساحل شنی با سازه های ساحلی محافظت می شود یا خیر، انتظار می رود که خط ساحلی به سمت جابجایی رسوبات دریایی که ناشی از حرکت رو به بالا و به سمت ساحل نیمرخ ساحل متعادل به دلیل SLR نسبی است عقب نشینی کند

در حالی که تعدادی از مطالعات تأثیر SLR را روی سواحل طبیعی مورد بررسی قرار داده‌اند، تحقیقات در مورد اثر SLR روی سواحل محافظت شده توسط سازه های ساحلی از جمله موج شکن های مستغرق نادر است. با این وجود حتی زمانی که سازه های ساحلی با موفقیت از ساحل پشت سر آنها محافظت می کردند، این ساحل هایی که در گذشته در معرض فرسایش بودند، ممکن است هنوز در معرض خطر فرسایش باشند. از این رو، بررسی تغییرات خط ساحلی ناشی از SLR نسبی در یک ساحل شنی حفاظت شده توسط موج شکنان مستغرق می تواند اطلاعات مهمی را برای راهبردهای محافظت از ساحل فراهم کند. علاوه بر این، نتایج تحقیقات ممکن است برای حفظ سواحل سالم در پشت صخره های مرجانی نیز، که موج شکن های طبیعی غرق شده را تشکیل می دهند، مفید باشد.

#### اهداف:

هدف از این مطالعه پیش بینی تغییرات آتی خط ساحلی ناشی از SLR و فرونشست زمین در ساحل غربی Niigata در ژاپن است که توسط موج شکن های مستغرق محافظت می شود و در حال حاضر در معرض فرونشست زمین قرار دارد. اولاً تأثیر تغییرات سطح دریا و فرونشست زمینی روی تغییر خط ساحلی در طول دوره 10 ساله از 2001 تا

2011 مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس، تغییر آتی خط ساحلی آینده در طول دوره 100 ساله از 2011 تا 2111 با استفاده از مدل پیش بینی خط ساحلی پیش بینی می‌شود.

## 2. سایت مورد مطالعه:

### نمای کلی از ساحل غربی نیگاتا

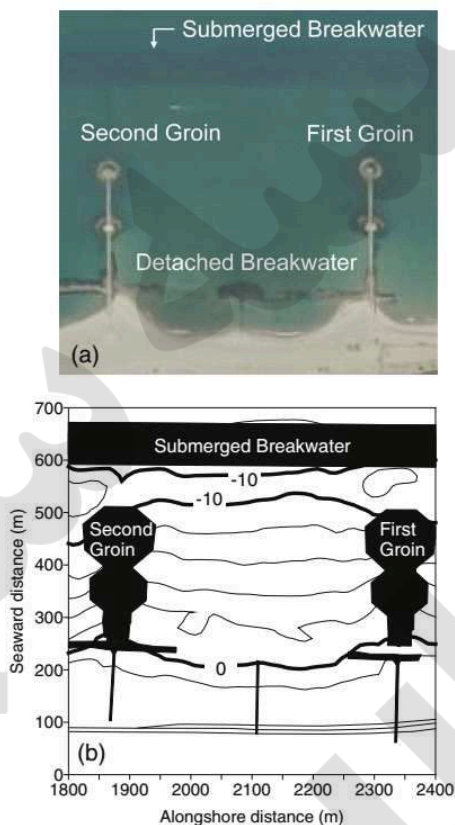
ساحل غربی نیگاتا در مرکز ژاپن واقع شده و روبروی دریای ژاپن است (شکل 1). این سواحل توسط رسوب‌هایی که از رودخانه Shinano تخلیه شدند و توسط جریان غالب در امتداد ساحل به سمت غرب حمل شدند، ایجاد شد. با توجه به کاهش تخلیه رسوبات و اختلال در جریان موازی ساحل ناشی از ارتقاء رودخانه، ساخت اسکله و افتتاح کانال‌های انحرافی ساحل مورد مطالعه و همچنین سواحل غربی از سایت مورد مطالعه ساحل از دهه 1910 از فرسایش ساحلی رنج می‌برند. در تلاش برای جلوگیری از فرسایش، موج شکن‌های منفصل از دهه 1950 ساخته شد. اگرچه آنها سواحل پشت سرشان را حفظ کرده‌اند، فرسایش دریایی موج شکن‌ها ادامه یافت.



شکل 1: نقشه ژاپن که موقعیت سایت مورد تحقیق را نشان می‌دهد

برای جلوگیری از فرسایش دور از ساحل، از سال 1989 موج شکن‌های مستغرق حدود 350 متر دورتر از موج شکن‌های منفصل ساخته شدند (شکل 2). عرض مقطع موج شکن‌های مستغرق 40 متر است و ارتفاع تاج حدود

2.5 متر پایینتر از سطح آب پایین است. علاوه بر موج شکن‌های مستغرق، گروین‌ها از سال 1988 به منظور کاهش سرعت جریان در امتداد ساحل به سمت موج شکن‌های مستغرق ساخته شدند.



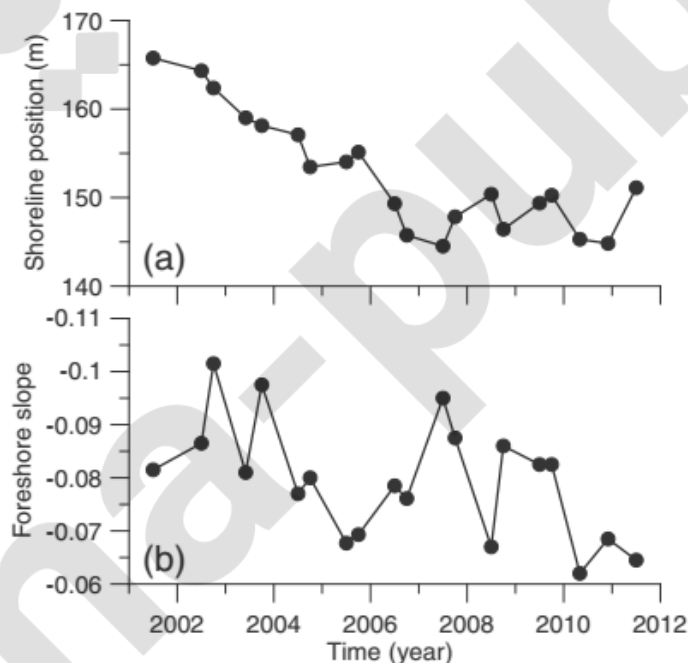
شکل 2: (a) عکس هوایی که در نوامبر 2007 گرفته شد و (b) مورفولوژی در ژوئیه 2011 در منطقه تحقیقاتی.

خطوط (m) در فواصل 2 متری در پانل (b) کشیده می شوند.

ناحیه تحقیق بین دو گروین‌ها در شکل 2 نشان داده شده است. در سال‌های 1995 و 1996، در مجموع 200 متر از موج شکن‌های منفصل قبلاً ساخته شده تخریب شد. در سال 1996، یک گروین مستغرق با ارتفاع تاج 4.9 متر زیر سطح پایین آب بین نوک گروین دوم و موج شکن مستغرق ساخته شد. با توجه به مطالعات میدانی بر روی سازه‌های رسوبات، که سالی یکبار از سال 2003 تا 2011 انجام می‌شد، قطر رسوبات متوسط در محدوده دریایی ناحیه مورد مطالعه بین 0.15-0.3 میلیمتر بود.

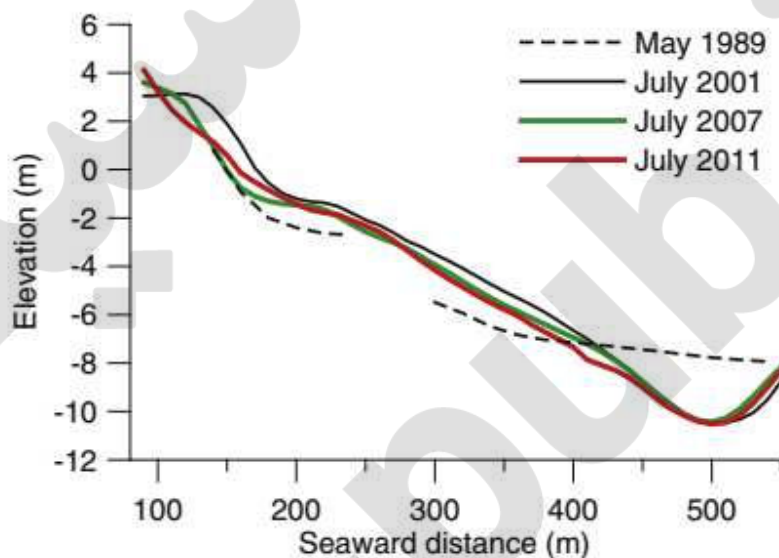
## 2-2 تغییرات مورفولوژیکی

بر اساس داده‌های مورفولوژیکی که تقریباً دو بار در سال به دست آمده، موقعیت خط ساحلی که در  $Z = 0.5$  متر تعریف شده است (Z ارتفاع با توجه به سطح پایه است)، که در امتداد ساحل در وسط ناحیه مورد مطالعه است، از سال 2001 تا 2007 به سمت ساحل حرکت کرد و از سال 2007 پایدار ماند (شکل 3 (a)). از آنجا که محوطه تحقیق توسط دو گروین که به سمت جایی که ارتفاع آن حدود 10 متر بود کشیده شده بودند، احاطه شده بود (شکل 2 (ب))، تغییرات خط ساحلی عمدتاً بوسیله جابجایی رسوبات ساحلی صورت گرفت.



شکل 3: (a) موقعیت خط ساحلی و (b) شیب فورشور از سال 2001 تا 2012. موقعیت خط ساحلی در جهت دریا مثبت فرض شد. محور عمودی در پانل (b) معکوس می‌شود. شیب منفی ساحل نشان می‌دهد که با افزایش فاصله به سمت دریا عمق آب افزایش می‌یابد

تغییرات زمانی شیب فورشور که در  $z = 0-1$  متر شیب متوسط است، نشان می‌دهد که شیب فورشور از سال 2001 تا 2011 کاهش یافته است که تقریباً مربوط به تغییرات ساحلی است (شکل 3 (b)). در طول دوره ای از سال 2001 تا 2007، زمانی که خط ساحلی عقب نشینی کرد، منطقه ی به سمت دریای فورشور نیز فرسایش یافت (شکل 4). با این حال، در طول دوره زمانی 2007 تا 2011، زمانی که خط ساحلی پایدار بود، تغییرات مورفولوژیکی در این منطقه نسبتاً کوچک بود.

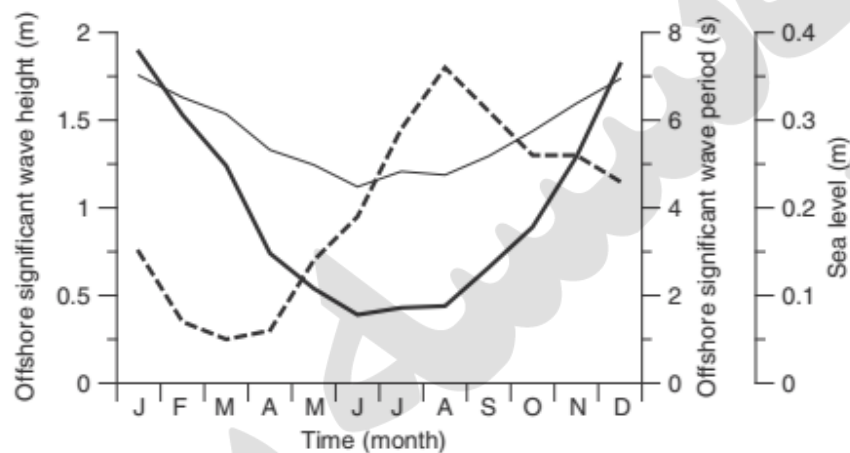


شکل 4: پروفیل های ساحلی متوسط در امتداد ساحل در ناحیه مطالعه در سال های 1989، 2001، 2007، و 2011. در فاصله زمانی پروفیل در سال 1989، جایی که فاصله به سمت دریا 250 تا 290 متر است، موج شکن های منفصل که پیشتر ساخته شده بودند مستقر بودند.

## 2-3 امواج

امواج دور از ساحل از سال 2001 تا 2011 در عمق 35 متری دور از بندر غربی Niigata مشاهده شد. هر گونه اطلاعات از دست رفته با استفاده از داده های به دست آمده از بندر Naoetsu واقع در 110 کیلومتری غرب بندر

غربی Niigata و ارتباط بین ارتفاع‌های مهم موج و تناوب‌های مهم موج در دو سایت، که با استفاده از داده‌ها از سال 2001 تا 2009 برآورد شد، جایگزین شد.



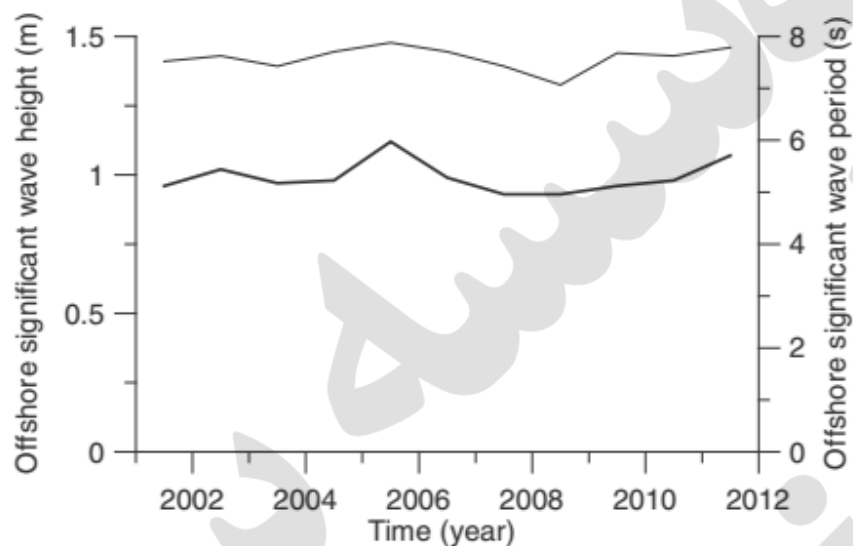
شکل 5: میانگین ماهانه ارتفاع موج شاخص دور از ساحل (خط ضخیم توپر) و تناوب (خط نازک توپر) و سطح دریا (نقطه چین)

تغییرات فصلی در ارتفاع و تناوب موج مهم دور از ساحل متوسط ماهانه، تغییرات قابل توجه در شرایط موج در طول سال را نشان می‌دهد (شکل 5). ارتفاع و تناوب موج از نوامبر تا مارس به ترتیب از 1.5 متر و 6 ثانیه بزرگ‌ترند، اما از ماه ژوئن تا اوت، کمتر از 0.5 متر و 5 ثانیه هستند. در مقایسه با تغییرات متوسط ماهانه ارتفاع و تناوب موج، مقادیر میانگین سالانه کوچک‌تر بودند (شکل 6). انحراف معیار در ارتفاع و تناوب موج متوسط سالانه به ترتیب 0.0543 متر و 0.160 ثانیه بود.

#### 4-2 سطح دریا

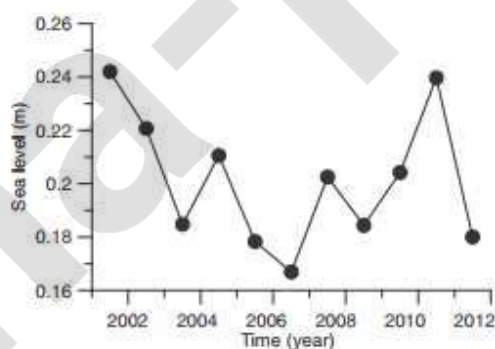
سطح دریا در بازه 2001-2011 در بندر غرب نیگاتا اندازه‌گیری شد. مقادیر فرونشست زمین (بخش 2.5) از مقادیر اندازه‌گیری حذف شد. سپس داده‌های از دست رفته با استفاده از جزر و مد نجومی با 60 مولفه جزر و مدی و ثابت هارمونیک جزر و مدی که توسط گارد ساحلی ژاپن (1992) برآورد شده بود جایگزین شد. از آنجا که سطح دریا با توجه به فشار جو، بادهای، امواج، و جریان‌های اقیانوسی، تغییر می‌کند و این اثرات در پیش‌بینی جزر و مد دخالت داده نمی‌شوند، مقادیر متوسط تفاوت‌ها بین سطوح آب دریای اندازه‌گیری شده و جزر و مد پیش‌بینی

متوسط به مدت 24 ساعت، قبل و بعد از دوره داده های از دست رفته، در جایگزینی به مقادیر پیش بینی شده اضافه شد.



شکل 6: متوسط سالانه ارتفاع موج شاخص دور از ساحل (خط ضخیم) و تناوب (خط نازک)

سطوح بالا، متوسط، و کم آب بر اساس داده های جزر و مد در بازه 2006-2010 به ترتیب 0.422، 0.202، و 0.039- متر هستند. سطح اندازه گیری شده متوسط ماهانه دریا در ماه اوت بیشترین مقدار، 0.36 متر، و در ماه مارس کمترین مقدار، 0.05 متر است (شکل 5). میانگین نرخ تغییر سطح اندازه گیری شده متوسط سالانه دریا از 2001 تا 2011، که با استفاده از روش کمترین مربعات خطی برآورد شده بود، 0.0942 میلی متر در سال بود (شکل 7).

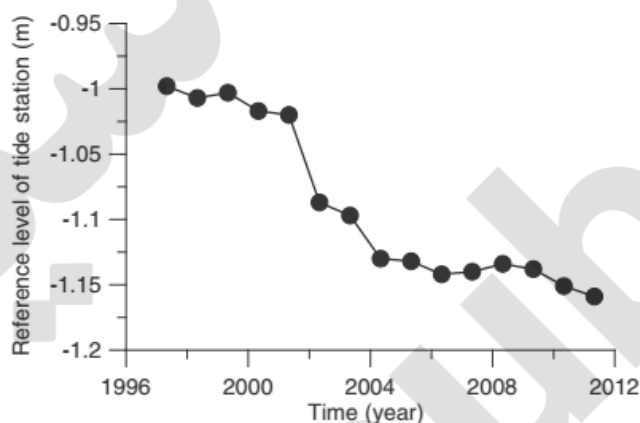




شکل 7: متوسط سالانه سطح دریا از 2001 تا 2012

### 5-2 فرونشست زمین

در طول دهه 1950، زمین در منطقه نیگاتا فرونشست شدیدی را تجربه کرد، با نرخ فرونشست حداکثر 0.54 متر در سال که عمدتاً به خاطر استخراج آبهای زیرزمینی بود. پس از اینکه قوانین آبهای زیرزمینی جدی تر پیگیری شد، نرخ فرونشست کاهش یافت، اما زمین در داخل و اطراف سایت تحقیق، هنوز در حال فرونشست است. مقدار فرونشست زمین در ساحل غربی نیگاتا با تغییر ارتفاع وسیله اندازه گیری جزر و مد در بندر غربی نیگاتا، که یک بار در سال از 1997 بررسی شده بود، تخمین زده شد. متوسط نرخ فرونشست زمین در طول 1997-2011، 13 میلی متر / سال بود (شکل 8).



شکل 8: سطح مرجع ایستگاه جزر و مد از 1997 تا 2012

### 3 روشها

#### 1-3 مدل شبیه سازی برای تغییرات خط ساحلی

مدل پیش بینی خط ساحلی مورد استفاده در این مطالعه بر اساس مدل های توسعه یافته توسط Kuriyama و همکاران است (2012، 2013)، که فرض می کند که تغییر خط ساحلی توسط انتقال رسوبات ساحلی ایجاد می شود و اینکه نرخ تغییر خط ساحلی تابعی از شار انرژی موج دور از ساحل

که در آن چگالی آب دریا،  $g$  شتاب گرانشی،  $H_1/3$  ارتفاع موج شاخص دور از ساحل، و  $C_g$  سرعت گروه منطبق با تناوب موج شاخص دور از ساحل هستند) با در نظر گرفتن اتلاف انرژی موج به دلیل موج شکن مستغرق است.

نرخ تغییر خط ساحلی فرض شد که به طور منفی با موقعیت خط ساحلی  $Y_s$  متناسب باشد. نرخ تغییر خط ساحلی به سمت دریا (نرخ پیشرفت خط ساحلی) با یک موقعیت خط ساحلی که بیشتر عقب نشینی کرده افزایش می یابد اما توسط یک خط ساحلی که پیشروی کرده متوقف می شود.

در مدل حاضر، نرخ تغییرات متوسط سطح دریا و فرونشست زمین در معادله 2 گنجانده شده است.

$$y_{s,i} = y_{s,0} + \sum_{j=1}^i \left( \frac{dy_s}{dt} \right)_j \Delta t \quad (1)$$

$$\left( \frac{dy_s}{dt} \right)_j = a_0 + a_1 + a_2 E_j^2 + a_3 E_j + a_4 y_{s,j-1} + a_5 \left( \frac{d\bar{\eta}_j}{dt} - \frac{dz_{r,j}}{dt} \right) \quad (2)$$

در معادله بالا  $t$ ، زمان است،  $a_0$  نرخ تغییر نرخ خط ساحلی هندسی به دلیل فرونشست زمین است، یعنی (شیب فورشور) / (مقدار فرونشست زمین)  $a_0 = 0$ ،  $a_1$  تا  $a_5$  ضرایب هستند،  $\eta$  میانگین زمانی سطح دریا است، و  $Z_r$  ارتفاع یک نقطه مرجع برای اندازه گیری میزان فرونشستگی زمین است. اندیس  $j$  تعداد مراحل زمانی را نشان می دهد. ارتفاع موج دور از ساحل که اثرات موج شکن مستغرق را در نظر می گیرد، از طریق محاسبه انتقال موج روی موج شکن مستغرق بر اساس مدل توسعه یافته توسط Kuriyama (2010) تخمین زده شد، که این مدل متغیر ساحلی مجذور متوسط مربع ارتفاع موج را با فرض اینکه تابع چگالی احتمال ارتفاع موج، دارای توزیع رایلی است برآورد می کند. جزئیات این مدل در ضمیمه الف تشریح شده است. ارتفاع موج شاخص 150 متر برآورد شده به سمت ساحل از موج شکن مستغرق ( $Z = -8.8$  متر) به مقادیر دور از ساحل با استفاده از ضرایب کم عمق بودن آب که با استفاده از عمق آب و طول موج برآورد شده بودند، انتقال داده شد. ارتفاع موج دور از ساحل که اثرات موج شکن مستغرق را در نظر می گرفت، به اندازه 13٪ کوچکتر از مقادیر اصلی برای همه امواج و 43٪ برای امواج بزرگتر از 2.0 متر به طور متوسط در طول دوره 2001 تا 2011 بود.

## مدل انتقال موج

## دورنمای مدل

مدل تغییرات ساحلی جذر متوسط مربع ارتفاع موج را تخمین می‌زند. فرض شد که تابع چگالی احتمال ارتفاع موج در کل دامنه محاسباتی از توزیع رایلی پیروی کند طبق (Thornton and Guza (1983). انرژی امواج با ارتفاع‌های بالاتر از ارتفاع موج شکننا مستهلک می‌شود.

ارتفاع موج شکننا با استفاده از معادله (A1)، همانطور که توسط (Seyama and Kimura (1988 پیشنهاد شده است، تخمین زده شد.

$$\frac{H_b}{h_b} = C_{br} \left[ 0.16 \frac{L_0}{h_b} \left\{ 1 - \exp \left[ -0.8\pi \frac{h_b}{L_0} (1 + 15 \tan^{4/3} \beta) \right] \right\} - 0.96 \tan \beta + 0.2 \right] \quad (A1)$$

$H_b$  ارتفاع موج شکننا،  $h_b$  عمق شکستن آب،  $C_{br}$  یک ضریب بدون بعد،  $L_0$  طول موج دور از ساحل، و  $\tan \beta$  شیب ساحل است. ضریب بدون بعد  $C_{br}$  توسط (Kuriyama (1996 برای هماهنگی معادله مبتنی بر داده تجربی (A1) با داده‌های میدانی معرفی شد. شیب ساحل برای عمق آب که به سمت دریا افزایش می‌یابد، مثبت در نظر گرفته شد و در یک منطقه به طول 10 متر که نقطه تعریف در مرکز آن قرار گرفته به عنوان شیب متوسط تخمین زده شد.

اتلاف انرژی موج با استفاده از مدل بور دوره ای پیشنهاد شده توسط (Thornton and Guza (1983 و 20 ارتفاع موج نماینده در طیف از  $H_b$  تا  $3H_b$  تخمین زده شد.

$$\frac{\partial E_w C_g \cos \theta}{\partial y} = \int_{H_b}^{\infty} P(H) B(H) dH \quad (A2)$$

$$B(H) = \frac{1}{4} \rho g T \frac{(B_w H)^3}{h}$$

در معادله بالا  $E_w$  انرژی موج است،  $\theta$  جهت موج،  $y$  فاصله به سمت دریا،  $P(H)$  چگالی احتمال ارتفاع موج،  $T$  تناوب موج،  $H$  ارتفاع موج،  $B_w$  یک پارامتر بدون بعد و  $h$  عمق آب است.

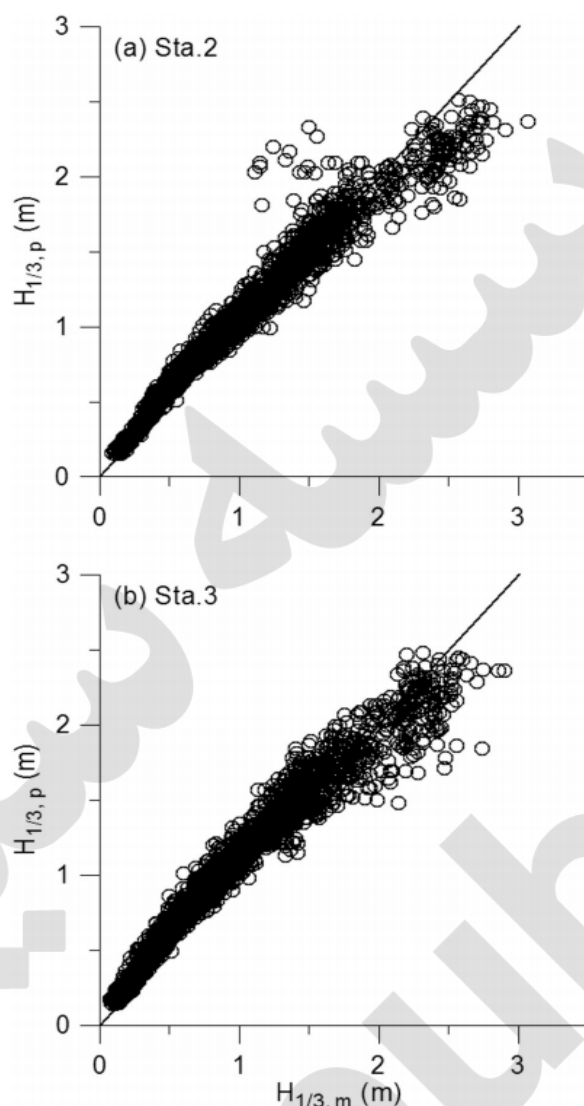
پارامتر  $B_w$  ، از معادله (A3) از Kuriyama and Ozaki (1996) با استفاده از داده‌های تجربی Seyama and Kimura (1988) بدست آمد.

$$B_w = C_B \{1.6 - 0.12 \ln(H_0/L_0) + 0.28 \ln(\tan \beta)\} \quad (A3)$$

در معادله بالا  $H_0$  ارتفاع موج دور از ساحل و  $C_B$  یک ضریب بدون بعد است.

این محاسبات از تناوب موج پیک به عنوان تناوب موج، پیرو (Grasmeijer and Ruessink (2003) استفاده کرده است. ارتفاع موج شاخص  $H_{1/3}$  به عنوان  $H_{1/3} = 1.416 H_{rms}$  تخمین زده شد. فرض شد که جهت موج به ساحل عمود است.

ضرایب بدون بعد  $C_{br}$  در معادله (A1) و  $C_B$  در معادله (A3) با استفاده از داده‌های موج به سمت دریا و به سمت ساحل بدست آمده از موج شکن مستغرق در امتداد برش عرضی فاصله 2100 متری در امتداد ساحل (شکل 2) هر 2 ساعت در طول دوره از 25 نوامبر 2008 تا 25 فوریه 2009 به دست آمد. ایستگاه اندازه‌گیری به سمت دریای موج شکن مستغرق Sta 1 ، در فاصله ساحلی 1270 متری ( $z = -12.5m$ ) و دو ایستگاه به سمت ساحل موج شکن مستغرق 3 , 2 ، به ترتیب در فاصله‌های ساحلی 500 متر و 375 متری ( $z = -8.8m$  و  $z = -4.6m$ ) واقع شده‌اند. مرز دور از ساحل در Sta 1 قرار داده شد و اندازه شبکه 5 متر بود.



شکل 9: مقایسه بین ارتفاع موج شاخص اندازه گیری و پیش بینی شده ( $H_{1/3,p}$  و  $H_{1/3,m}$ ) در ایستگاه 2 (a) و ایستگاه 3 (b). خطوط پر نشان دهنده  $H_{1/3,p}$  و  $H_{1/3,m}$  هستند

ضرایب به دست آمده برابر  $C_{br} = 0.55$  و  $C_B = 0.50$  می باشند. اگر چه زمانیکه ارتفاع موج کوچکتر و بزرگتر از 1.5 متر بود، مدل مقادیر را به ترتیب کمی بیش از حد و کمتر از حد پیش بینی کرد، مدل با داده های اندازه گیری شده از ارتفاع های شاخص موج به سمت ساحل موج شکن مستغرق در هماهنگی است (شکل A1)؛ میانگین جذر متوسط مربع خطاهای مقادیر اندازه گیری شده و پیش بینی شده در Sta.2 و Sta.3، 0.151 متر بود.

### 2-3 اثرات افزایش سطح دریا و فرونشست زمین روی تغییر خط ساحلی

برای بررسی تأثیرات تغییر سطح دریا و فرونشست زمین روی تغییرات خط ساحلی در گذشته، دو مدل با و بدون اصطلاحات مربوط به دو عامل معادله (2)، ششم و هفتمین اصطلاح در سمت راست، به داده های تغییر خط ساحلی ژوئیه 2001 تا ژوئیه 2011 اعمال شد. از آنجا که امواج و سطح آب دریا دچار تغییرات فصلی شدیدی می شدند (شکل 5)، فاصله زمانی پیش بینی تغییرات خط ساحلی 3 ماهه با شروع از 1 ژوئن در نظر گرفته شد. برای پیش بینی، EF برای دوره های 3 ماهه : ژوئن-اوت، سپتامبر- نوامبر، دسامبر- فوریه و مارس تا می، میانگین گیری شد. مقادیر  $dn/dt$  با استفاده از دو مقدار  $\eta$  در ابتدا و انتهای هر بازه 3 ماهه تخمین زده شد، که برای 3 ماه میانگین گیری شده بود. مقادیر  $dz_r/dt$  بر اساس مقادیر  $Z_r$  در آغاز و پایان هر بازه 3 ماهه بودند. پروفایل ساحل که برای محاسبه انتقال موج از آن استفاده شد، بر اساس داده های میانگین گیری شده از سال 2001 تا 2008 بود.

برای قضاوت در مورد اینکه کدام مدل برای پیش بینی تغییر خط ساحلی در سایت مورد مطالعه مناسب تر است، مقادیر AIC (Akaike, 1973) تخمین زده شده و مقایسه شد. یک مقدار AIC، تخمینی از میانگین مورد انتظار لگاریتم تابع درست نمایی از یک مود است (Akaike, 1973; Sakamoto et al, 1986). مدل با مقدار AIC مینیمم، مناسب ترین مدل نظر گرفته می شود. مقادیر پارامتر آزاد،  $a_1$  تا  $a_5$ ، با استفاده از داده های میدانی ذکر شده در بالا در طول دوره 2001-2011 و الگوریتم the SCE-UA (Duan et al, 1993) تعیین شد، به طوری که خطای بین موقعیت خط ساحلی اندازه گیری شده و پیش بینی شده حداقل شود. مقادیر پیش بینی شده، زمانی که توپوگرافی اندازه گیری شد، به وسیله درونیابی مقادیر فواصل زمانی سه ماهه برآورد شد.

### 3-3 پیش بینی تغییرات آینده خط ساحلی با افزایش سطح دریا و فرو نشست زمین

تغییرات خط ساحلی در طول یک دوره 100 ساله از ژوئیه 2011 تا ژوئن 2111، به کمک مناسب ترین مدل با SLR و فرونشست زمین، تنها با فرونشست زمین و بدون SLR و فروپاشی زمین پیش بینی شد. سطوح دریا مورد استفاده در پیش بینی، به عنوان مجموع تغییرات بلند مدت و کوتاه مدت تغییرات سطح دریا برآورد شد. تغییرات کوتاه مدت با حذف مقادیر حرکت متوسط 1 ساله از سطوح اندازه گیری شده دریا از جولای 2001 تا ژوئن 2011 تخمین زده شد و 10 بار در طول دوره پیش بینی 100 ساله تکرار شد.

تغییرات درازمدت به عنوان یک عامل درجه دوم زمان فرض شد. مقدار اولیه 0.198 متر قرار داده شد، که میانگین سطح دریا طی سال های 2001 تا 2011 بود. میزان افزایش سطح دریا طی دوره 100 ساله، 0.74 متر تعیین شد که برابر با مقدار پیش بینی شده افزایش سطح دریا از سال های 1986-2005 تا سال 2100 تحت سناریوی RCP8.5 (Church et al. 2013) بود. نرخ تغییر اولیه افزایش سطح دریا به میزان 3.55 میلی متر در سال در نظر گرفته شد، که مقدار متوسط در سواحل ژاپن در امتداد دریای ژاپن است که بر اساس سطوح اندازه گیری شده دریا در سال های 2003-2010 تخمین زده شده بود (Miura and Kawamoto, 2013)

میزان فرونشست 13.0 میلی متر در سال تعیین شد که مقدار متوسط سال های 2001-2011 چنانچه در بخش 2.5 به آن اشاره شد، بود.

ارتفاع موج دور از ساحل که اتلاف انرژی موج را به خاطر موج شکن مستغرق در نظر می گیرد، با استفاده از مدل انتقال موج ذکر شده در بخش 3.1، با ارتفاع موج شاخص دور از ساحل و تناوب های اندازه گیری شده از 2001-2011 که 10 بار در طول دوره پیش بینی تکرار شد، و مقادیر پیش بینی شده سطح دریا و فرونشست زمین تخمین زده شد. اول، مقادیر از طریق شبیه سازی های عددی هر 2 ساعت تخمین زده شدند، و سپس مقادیر متوسط 3 ماهه، که داده های ورودی برای پیش بینی تغییر خط ساحلی بودند، برآورد زده شد. پروفایل ساحلی مشابه آنچه که در بخش 3.2 استفاده شد بود.

با توجه به افزایش شدت طوفان گرمسیری ناشی از تغییرات اقلیمی جهانی، انتظار می رود که شرایط جوی موج دچار تغییر شود. گرچه اثرات تغییرات جوی موج روی تغییرات باتیمتری (عمق سنجی) مورد بررسی قرار گرفت، انتظار می رود که تغییرات ارتفاع موج های متوسط و شدید در طی 100 سال آینده در امتداد سواحل ژاپن رو به دریا ژاپن، که شامل سایت مورد مطالعه هست، کوچک باشد بنابراین تغییر جوی موج در این مطالعه در نظر گرفته نشده است.

## 4. نتایج

## 4-1 اثرات تغییر سطح دریا و فرونشست زمین روی تغییر خط ساحلی

دو مدل برای آزمایش استفاده شد. یک مدل اثرات مستقیم تغییر سطح دریا و فرونشست زمینی بر تغییرات خط ساحلی در نظر می‌گیرد و مدل دیگری این اثرات را در نظر نمی‌گیرد. تفاوت بین مقادیر AIC برای دو مدل 0.3 است (جدول 1). طبق Sakamoto و همکاران (1986)، تفاوت AIC بیش از 1 قابل توجه است. این نشان می‌دهد که تفاوت بین دو مدل قابل توجه نیست. موقعیت‌های خط ساحلی برآورد شده با استفاده از دو مدل مطابق بود با مقادیر اندازه‌گیری شده، که در بازه 2007-2001 عقب نشینی کرد، اما در بازه 2007-2011 ثابت بود (شکل 9). طبق Kuriyama و همکاران (2013)، که آنالیز تابع متعامد تجربی و یک مدل پیش بینی خط ساحلی را بدون جملات مرتبط با تغییر سطح دریا و فرونشست زمین به همین مجموعه داده‌هایی که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت اعمال کردند، سهم تغییرات خط ساحلی ناشی از شار انرژی موج دور از ساحل و موقعیت‌های خط ساحلی، به ترتیب تقریباً 70٪ و 10٪ فرض شد.

اگر چه همانطور که در بالا اشاره شد تفاوت بین دو مدل چشمگیر نیست، مقدار AIC برای مدل بدون جملات مربوط به دو عامل معادله (2)، کمی کمتر از مدل با در نظر گرفتن این جملات است (جدول 1). بنابراین، تغییر آتی خط ساحل با استفاده از مدل بدون جملات پیش بینی شد. تأثیر مستقیم تغییر سطح دریا و فرونشست زمینی روی تغییر خط ساحلی بعداً مورد بحث قرار خواهد گرفت.

## 4-2 پیش بینی تغییرات آتی خط ساحل متأثر از افزایش سطح دریا و فرونشست زمین

میانگین‌ها و انحراف معیارهای موقعیت پیش بینی شده خط ساحلی در طی 10 دوره 10 ساله در شکل 10 نشان می‌دهد که خط ساحلی تا سال 2111 با SLR و فروپاشی زمین، 61 متر عقب نشینی خواهد کرد و انحراف معیارها افزایش خواهد یافت. بدون SLR و فروپاشی زمینی، خط ساحلی تنها 10 متر عقب نشینی کرده و ثابت می‌شود؛ در صورتی که تنها فروپاشی زمین در محل اتفاق افتد، خط ساحلی 42 متری عقب نشینی می‌کند.



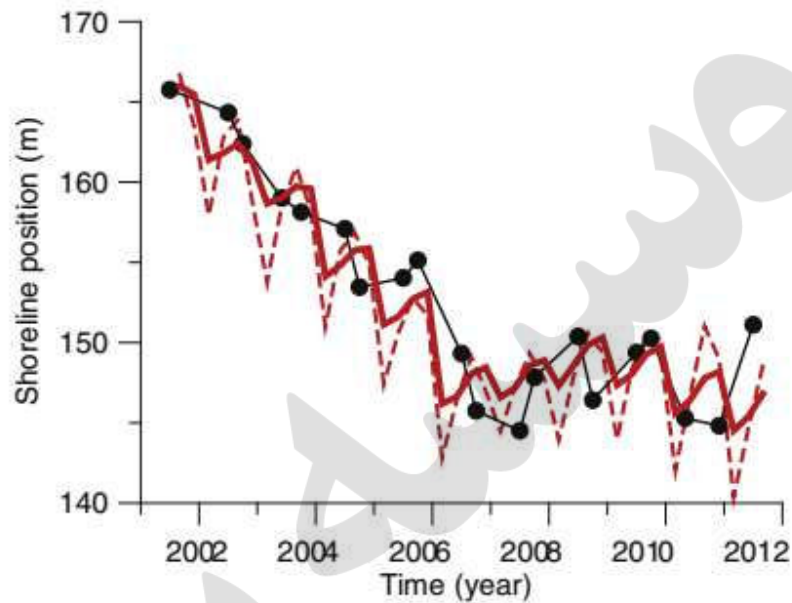
جدول 1: AIC و بهترین مقادیر پارامترها برای معادله (2) با و بدون جملات مربوط به SLR و فرونشست زمین.

	AIC	$a_1$ (m/day)	$a_2$ (s <sup>2</sup> m)/(N <sup>2</sup> day)	$a_3$ (sm)/(Nday)	$a_4$ (1/day)	$a_5$
Eq. (2) with the terms	94.1	$9.63 \times 10^{-2}$	$-1.28 \times 10^{-9}$	$-2.66 \times 10^{-11}$	$-5.64 \times 10^{-4}$	20.2
Eq. (2) without the terms	93.8	$8.75 \times 10^{-2}$	$-1.40 \times 10^{-9}$	$-2.45 \times 10^{-11}$	$-4.90 \times 10^{-4}$	-

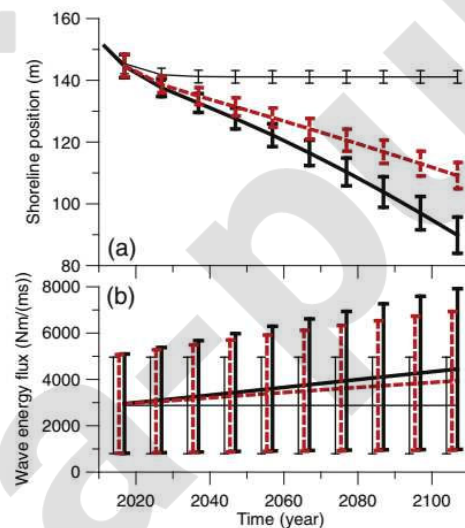
موقعیت های خط ساحلی نشان داده شده در شکل 10، موقعیت های خط تراز در  $Z = 0.5$  متر هستند. موقعیت خط ساحلی فعلی (واقعی) متناظر با افزایش سطح دریا در سال 2111 که با SLR و فرونشست زمین پیش بینی شده ، در 11 متری موقعیت های پیش بینی شده خط ساحلی به سمت خشکی در شکل 10 است که SLR را 0.74 متر و شیب ساحل را 1:15 در نظر می گیرد.

## 5 بحث

تفاوت بین دو مدل (با و بدون تأثیر مستقیم تغییر سطح دریا و فرونشست زمینی روی تغییرات خط ساحلی) همانطور که در بخش 4.1 ذکر شد قابل توجه نیست. این نشان می دهد که تأثیرات تغییرات سطح دریا و فرونشست زمینی در تغییرات خط ساحلی کوچکتر از تأثیرات شار انرژی موج و موقعیت خط ساحلی است. علاوه بر این، مقدار  $a_5$  در معادله (2)، که ضریب جملات مرتبط با تغییر سطح دریا و فرونشست زمین است، مثبت بود که نشان می دهد با افزایش سطح دریا خط ساحلی پیشروی می کند. این نتیجه بر خلاف پیش بینی قانون برون است که در آن خط ساحلی با افزایش سطح دریا عقب نشینی می کند. تغییر خط ساحل ناشی از تفاوت بین سطح دریا و سطح آب زیرزمینی ، همانطور که توسط Duncan (1964) پیشنهاد شده ، نیز ممکن است تعیین کننده باشد ؛ Duncan (1964) نشان داد که خط ساحل در هنگام جزر و مد، زمانی که سطح دریا افزایش یافته و از سطح آب زیرزمینی با احتساب نفوذ آب بالاتر می رود ، پیشروی می کند ، و اینکه خط ساحلی در اب تایید به دلیل فرار تدریجی آب عقب نشینی می کند. با این حال، مقیاس زمانی مورد بحث در این مطالعه متفاوت از مطالعه Duncan (1964) است.



شکل 10: تغییر خط ساحلی اندازه‌گیری شده (دایره‌ها و خطوط توپر سیاه) و پیش‌بینی شده با استفاده از معادله (2) با (نقطه چین نازک قرمز) و بدون (خط قرمز توپر ضخیم) جملات مربوط به SLR و فرونشست زمین اثرات تغییر سطح دریا و فرونشست زمین نیاز است تا با استفاده از داده‌های بیشتری مجدداً بررسی شوند.



شکل 11: (a) تغییرات ساحلی به طور متوسط برای دوره‌های 10 ساله. خطوط ضخیم توپر سیاه، نقطه چین ضخیم قرمز، و خطوط نازک سیاه نازک به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر پیش‌بینی شده با SLR و فرونشست زمین،

تنها با فرونشست زمین و بدون هر دو هستند. خطوط عمودی نشان دهنده دامنه متوسط  $\pm 1$  انحراف معیار می باشد. (b) شار انرژی موج دور از ساحل برآورد شده شامل اثر موج شکن مستغرق. نمادها همانند پانل (a) هستند. عقب نشینی پیش بینی شده 61 متری خط ساحلی با SLR و فرونشست زمین، بوسیله افزایش شار انرژی امواج ورودی روی موج شکن‌های مستغرق، به علت SLR و فرونشست زمین ایجاد شد. با افزایش سطح دریا و نشست‌های زمین، فاصله بین سطح آب دریا و تاج موج شکن مستغرق افزایش می یابد و منجر به شکست موج کمتر و کاهش اتلاف انرژی موج می شود. افزایش فاصله بین سطح آب دریا و تاج موج شکن از 2.5 تا 4.5 متر در 100 سال باعث افزایش 55٪ در شار انرژی موج ورودی می شود. حتی زمانی که تنها فرونشست زمین در نظر گرفته می‌شود، فاصله از 2.5 به 3.8 متر افزایش می یابد و جریان انرژی موج 37 درصد رشد می‌کند که منجر به عقب نشینی 42 متری خط ساحل می‌شود.

تغییر خط ساحلی پشت یک موج شکن مستغرق به طرق مختلف به تغییر خط ساحلی پشت یک صخره مرجانی تشابه دارد. صخره های مرجانی، که انرژی موج را جذب می کنند و به عنوان موج شکن‌های مستغرق طبیعی نقش کاهش ریسک فاجعه را ایفا می‌کنند، با SLR به طور هماهنگ رشد می کنند. با این حال، نرخ رشد صخره های مرجانی لزوماً با نرخ SLR مطابقت در چنین شرایطی، ساحل پشت ممکن است فرسایش شدید ساحلی را تجربه کند.

## 6. نتیجه گیری

(1) اثرات تغییر سطح دریا و فرونشست زمین در تغییر خط ساحلی در ساحل غربی نیگاتا در ژاپن، که توسط موج شکن‌های مستغرق محافظت می شود، در طول دوره 10 ساله 2001-2011 با استفاده از مدل های پیش بینی خط ساحلی با و بدون جملات مرتبط با دو عامل فوق الذکر، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد که تأثیرات از لحاظ آماری معنی دار نبودند.

(2) قانون برون(فارغ از این که ساحل شنی با سازه های ساحلی محافظت می شود یا خیر، انتظار می رود که خط ساحلی به سمت جابجایی رسوبات دریایی که ناشی از حرکت رو به بالا و به سمت ساحل نیمرخ ساحل متعادل به دلیل SLR

نسبی است عقب نشینی کند) دارای هیچ قدرتی برای پیش بینی رفتار ساحلی در هنگام افزایش سطح دریا نیست و باید رها شود

(3) تغییر آتی خط ساحلی در طول دوره 100 ساله بین سال‌های 2011 تا 2111 با استفاده از مدل بدون جملات مرتبط با دو فاکتور، پیش بینی شد. اگر چه حرکت خط ساحلی به طور مستقیم توسط SLR و فرونشست زمین ایجاد نشد، افزایش شار انرژی موج‌های ورودی بر روی موج شکن مستغرق به علت SLR و فرونشست زمین منجر به عقب نشینی خط ساحلی در حدود 60 متر تا سال 2111 شد.

(4) یافته‌های این مطالعه بر اساس داده‌های یک ساحل شنی محافظت شده توسط موج شکن مستغرق به دست آمد. با این حال، اگر چه مقدار فرسایش ساحل ناشی از SLR و فرونشست زمین با توجه به اندازه دانه‌ها، ارتفاع تاج موج شکن مستغرق، و شرایط موج دور از ساحل تغییر می‌کند، یافته‌ها نشان می‌دهد که سواحل شنی در سراسر جهان که توسط موج شکن‌های کم ارتفاع و صخره‌های مرجانی حفاظت می‌شوند، ممکن است فرسایش ساحلی غیر قابل اغماضی را به دلیل SLR نسبی تجربه کنند، و اینکه اقدامات موثر برای کاهش خسارات فرسایش باید مورد بررسی قرار گیرد همانطور که توسط (Nicholls and Cazenave (2010 پیشنهاد شد.