



# جریان‌های برگشتی، نوک هلالی‌های بزرگ و تپه‌های ساحلی فرسایشی

تورنتون، ای، بی، مک ماهان، جی و سالنجر، ای، اچ

مترجم: دکتر مریم جابری

دکتری ژئومورفولوژی دانشگاه تربیت مدرس

## چکیده

تپه‌های ماسه‌ای در محدوده نوک هلالی‌های بسیار بزرگ ساحلی (۲۰۰ متر در طول ساحل) در حال فرسایش هستند که عامل ایجاد آن فعالیت جریان‌های برگشتی در این منطقه می‌باشد. ساحل در محدوده نوک هلالی‌های بسیار بزرگ به باریک‌ترین حد خود می‌رسد. این مسئله به امواج پیشرو ناشی از طوفان‌های بزرگ و مدهای بلند امکان رسیدن به پنجه تپه‌های ساحلی و زیر پری آنها را فراهم ساخته که این عمل در نهایت موجب فرسایش تپه‌های ساحلی می‌شود. اندازه‌گیری‌ها و مشاهدات میدانی تلماسه‌ها، ساحل شنی و مورفولوژی جریان‌های برگشتی در طول ۱۸ کیلومتر از خط ساحلی خلیج مونتری در کالیفرنیا انجام گرفته است. این بخش از خط ساحل ماسه‌ای خلیج، بر اثر گسترش تلماسه‌ها بیش از ۴۰ متر بالا آمدگی پیدا کرده است. ارتفاع امواج در زیر دماغه به سمت مرکز خلیج، جایی که همگرایی امواج به دلیل شکست آنها بر روی کانپون زیردریایی خلیج مونتری صورت می‌گیرد، افزایش چشمگیری می‌یابد. گرادیان بزرگ ارتفاع موج در طول ساحل باعث ایجاد یک گرادیان ممتد و پیوسته در مقیاس مورفودینامیکی می‌شود. در نتیجه بخاطر قدرتمند بودن امواج برگشتی و نیز دهانه باریک خلیج در نزدیکی محل برخورد طبیعی امواج، سبب توسعه جریان‌های برگشتی در تمام طول ساحل گشته است.

تغییرات طولی ساحل ناشی از حجم تپه‌های در حال فرسایش با نوسانات طولی ساحل ناشی از نوک هلالی‌های خط ساحل دارای همبستگی قابل توجهی و در سطح اطمینان ۹۵٪ می‌باشد. همچنین تغییرات طولی ساحل ناشی از نوک هلالی‌های خط ساحلی همبستگی بسیار زیادی با نوسانات طولی ساحل در محدوده جریان‌های برگشتی دارد که در سطح اطمینان ۹۵٪ می‌باشد. بنابراین، می‌توان اظهار داشت که نوک هلالی‌های بسیار بزرگ در ارتباط با جریان‌های برگشتی بوده و موقعیت تپه‌های در حال فرسایش نیز مرتبط با محدوده نوک هلالی‌های بسیار بزرگ می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: جریان‌های برگشتی، نوک هلالی‌های بزرگ، تپه‌های ساحلی در حال فرسایش، امواج، مورفودینامیک، نقاط داغ.

## ۱- مقدمه

خط ساحل جنوب خلیج مونتری<sup>۱</sup> (کالیفرنیا) یکی از بهترین مثال‌های

جهانی از سیستم نسبتاً پایدار جریان‌های برگشتی است که این امر به دلیل وجود منبع غنی ماسه و در عین حال نزدیکی به محل تلاقی امواج طبیعی دریا می‌باشد. کانال‌های برگشتی عوارض مورفولوژیک دائمی هستند، و همانگونه که در نگاره شماره ۱ مشخص است بر روی تپه‌هایی با ارتفاع بیش از ۳۵ متر در امتداد خط ساحل در جنوب خلیج مونتری واقع شده‌اند. همچنین نوک هلالی‌های بزرگ ساحل شنی، به اصطلاح نوک هلالی‌های بسیار بزرگ<sup>۲</sup>، با طول تقریباً ۲۰۰ متر در امتداد طول ساحل بوضوح مشاهده می‌شوند.

یک روش مورفودینامیکی مناسب جهت مطالعه توسط Wright (۱۹۸۴) Short و تپه گردید. آنها با استفاده از سرعت سقوط بی بعد  $(W=Hb/Tws)$ ، که در اینجا  $Hb$  ارتفاع شکست موج،  $T$  دوره تناوب امواج دریا و  $ws$  شدت سقوط رسوب است، ویژگی سواحل شنی را مشخص کردند، که با انرژی زیادی شروع شده و سپس بر روی ساحل پخش می‌شود  $(W>6)$ ، تا سطح متوسط ادامه می‌یابد  $(W>2<5)$  و در نهایت با انرژی کمتر که انعکاسی از سواحل است، خاتمه می‌یابد.  $(w>1)$  در گستره طبیعی  $(8\ 16\ T)$ ،  $(Hb\ 1\ 4\ m)$  و اندازه ذرات  $(mm\ 1/0\ 0/2)$  اکثر سواحل شنی تحت شرایط عادی قرار دارند که به قسمتهای جزئی‌تر مانند ساحل سدی فرو افتاده، ساحل سدی منظم، ساحل سدی ماسه‌ای عرضی و تراس‌های جذر و مدی پست ساحلی تقسیم می‌شود. میزان دامنه  $W$  در خلیج مونتری از ۰/۵ تا ۵ است که این امر سبب افزایش ارتفاع امواج و اندازه ذرات از جنوب به شمال شده و بدین ترتیب حالت‌های مختلفی را در سراسر طول ساحل ایجاد نموده‌اند. اکثر مورفولوژی سواحل در این قسمت‌ها شامل: ۱- تراس‌های جذر و مدی پست که توسط جریان‌های برگشتی<sup>۳</sup> بریده شده و ناهموار گشته‌اند، ۲) سدهای ماسه‌ای عرضی که بوسیله کانال‌های برگشتی بوجود آمده‌اند و ۳) هلالی‌ها یا سدهای ماسه و یا سواحل شنی پیوسته.

Wright (۱۹۸۰) و Short and Hesp (۱۹۸۲) مشاهده کردند که اکثر فرسایش سواحل شنی طبقه میانی توسط جریان‌های برگشتی صورت می‌گیرد که با ایجاد حداکثر فرسایش در پشت جریان‌های برگشتی، نوک هلالی‌های غول پیکری را در این محدوده بوجود می‌آورند. اگر نوک هلالی‌های بزرگ از اشکال فرسایشی جریان‌های برگشتی باشند، این مسئله به ذهن خطور می‌کند که جریان‌های برگشتی، ایجادکننده مورفولوژی ساحل و تعیین‌کننده مقیاس طولی آن هستند. بنابراین، درک مقیاس طولی نوک هلالی‌های غول پیکر واقع



در طول خط ساحل، مستلزم شناختن مکانیزم جریانات برگشتی می‌باشد.

شدن کانال‌ها در زمان طوفانی شدن دریا توسط حمل و جابجایی رسوبات ساحلی می‌باشد.

یک جریان برگشتی کامل که در جنوب خلیج مونتری مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته، ریپکس<sup>۶</sup> است که پویایی و حرکات<sup>۷</sup> آنها اندازه‌گیری شده است (McMahan و همکاران ۲۰۰۴، ۲۰۰۵، ۲۰۰۶). بدین ترتیب در زمان مطالعه جریان‌های برگشتی مشاهده گردید که نوک هلالی‌های خط ساحلی و تپه‌های فرسایشی دارای اندازه طولی مشابهی با کانال‌های برگشتی هستند و رفتار مشابهی در پاسخ به اقلیم موج دارند. عکس‌های هوایی موزائیک شده از ۱۸ کیلومتر خط ساحلی مونتری تا رودخانه سالیناس<sup>۸</sup> نشان داد که همه جریان‌های برگشتی تمام طول ساحل با افزایش فضای طولی ساحل به سمت شمال همراه است (نگاره ۲). جزئیات عکس هوایی (نگاره ۳) نشان می‌دهد که نوک هلالی‌های خط ساحلی و کانال‌های برگشتی<sup>۹</sup> عمدتاً در مرکز محدوده نوک هلالی‌های بسیار بزرگ واقع شده‌اند. اساس این مشاهده کیفی این فرضیه است که فرسایش تپه‌های ساحلی در محدوده (۲۰۰ متری) نوک هلالی‌های بزرگ صورت می‌گیرد. (Komar, 1994, Revell و همکاران 2002) بر این باورند که آنها اشکال فرسایشی جریان‌های برگشتی هستند.

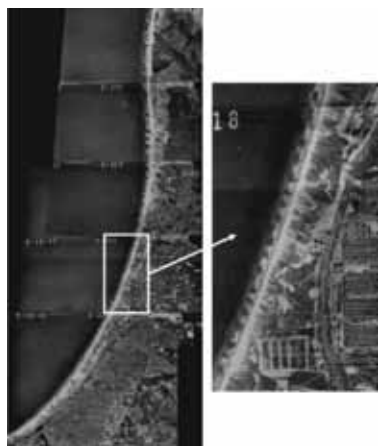


**نگاره ۱: منظره شمال قله تپه‌های شنی در Fort Ord که نشانگر نوک هلالی‌های بزرگ خط ساحل با مقیاس تقریبی ۲۰۰ متر به همراه جریان‌های برگشتی می‌باشد (با فلش مشخص شده‌اند) که در مرکز محدوده‌شان توسط تپه‌های ساحلی مرتفع (بیش از ۴۰ متر) برآمده شده و توسط گیاهان یخی (ice planet) پوشیده شده‌اند.**

فضای شبه دوره‌ای جریانات برگشتی کانالی در مناطق متعددی از جهان مشاهده می‌شود. Short و Brander (۱۹۹۹) مشاهداتشان از فضای برگشتی را در مناطق مختلفی از جهان از قبیل استرالیا، اروپا، ایالات متحده، ژاپن، جنوب آفریقا و نیوزلند با هم ترکیب کردند. آنها دریافتند که میانگین تعداد جریانات برگشتی در هر کیلومتر در حدود ۲ تا ۱۳ عدد است که تعدادی از آنها با افزایش ارتفاع و زمان تناوب امواج دریا، کاهش پیدا می‌کنند. الگوی امواج در حال شکستن، در عکس‌های هوایی و تصاویر دوربین‌های ویدئویی برای تشخیص کانال‌های برگشتی قابل مشاهده است. شکست امواج تابع عمق است (Thornton & Guza, 1981).

امواج در حال عبور از مناطق کم عمق به آب‌های کم عمق‌تر می‌شکنند که این مسئله در عکس‌های هوایی و تصاویر ویدئویی خودش را بصورت کف و حباب‌های تولید شده در حین شکست نشان می‌دهد. شکست امواج در کانال‌های برگشتی عمیق‌تر با تأخیر اتفاق می‌افتد که خودش را بصورت مناطق تیره‌تر و عدم وجود امواج شکسته شده نشان می‌دهد. نظارت بلند مدت (مونیتورینگ) بر مورفولوژی نزدیک ساحل، با استفاده از تصاویر ویدئویی امکان‌پذیر است (Lippmann and Holman, 1990). ویدئو time stacks به عنوان ابزاری مفید جهت بررسی تحول تدریجی مورفولوژی و کانال‌های برگشتی اثبات شده است. (Holland, 1997 Van Ekenvort 2004)

Symonds و Ranasinghe (۲۰۰۰)، از میانگین زمانی حجم پیکسل‌های خط ساحلی در منطقه خیزاب<sup>۱۰</sup> برای تشخیص مجاری کانال‌های برگشتی به مانند فاصله میان دو موج، استفاده کردند. Holman و همکاران (۲۰۰۶) به مدت ۴ سال تصاویر میانگین روزانه را مورد بررسی قرار دادند. ویژگی خاص این پدیده‌ها زمانی است که کانال‌های برگشتی تخریب شده و مجدداً تولید می‌شوند (به اصطلاح بازآفرینی می‌شوند).<sup>۱۱</sup> عمر میانگین کانال‌های برگشتی برای این بخش از ساحل شنی ۴۶ روز است. بازآفرینی فرضیه‌ای برای پر



**نگاره ۲: ۱۵ کیلومتر خط ساحلی جنوب خلیج مونتری بر روی عکس هوایی موزائیک شده که کانال‌های برگشتی را نشان می‌دهد (مناطق تیره بین سفیدها امواج شکسته شده هستند) که از شمال به جنوب افزایش می‌یابد.**

در محدوده نوک هلالی‌های بزرگ درست در جایی که یک بافر طبیعی توسط فرسایش موجب کاهش ساحل شده است، ساحل به باریکترین حد خود می‌رسد. این مسئله سبب آبشویی و فرسایش ساحل بر اثر امواج طوفانی بزرگ به همراه مدهای مرتفع شده و بدین ترتیب امواج طوفانی و آب بالا آمده بر اثر مد سهولت بیشتری برای امواج پیشرو برای رسیدن به پنجه دامنه تپه‌های ماسه‌ای فراهم ساخته، در نتیجه آنها شروع به زیر بری تپه‌های ماسه‌ای می‌کند که این کار موجب فروریختن این تپه‌ها بر روی ساحل می‌شود. این فرضیه با تحلیل اندازه‌گیری‌های میدانی کانال‌های برگشتی، سواحل و تپه‌های ساحلی با استفاده از تکنیک‌های نقشه‌برداری و داده‌های جهت امواج در طی یک دوره زمانی یکسان، مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- محیط پژوهش

خلیج مونتری با ۴۸ کیلومتر طول، خلیج کشیده‌ای است که از نقطه سانتاکروز<sup>۱۲</sup> در شمال تا نقطه پایناس<sup>۱۱</sup> در جنوب امتداد دارد. شکل عمقی

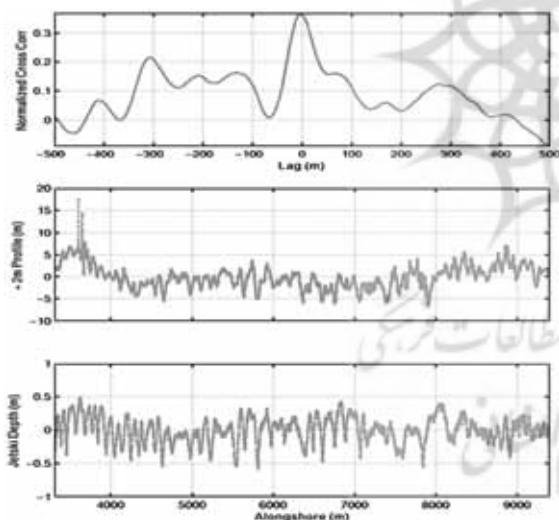


مشخص<sup>۱۲</sup> داخل خلیج، کانیون زیردریایی خلیج مونتری بوده که بزرگترین کانیون در نیمکره غربی و همچنین دلتای قدیمی پسرکانه رود سالیانس<sup>۱۳</sup> می‌باشند (نگاره ۴). غالباً جهت امواج آب‌های عمیق از غرب به سمت شمال غربی است. امواج در زمانی که به ساحل می‌رسند به دلیل تنگ‌شدگی دهانه بوسیله دماغه‌های شمالی و جنوبی با همدیگر برخورد نموده، بنابراین یک شکست قوی در عرض کانیون صورت می‌گیرد. بدین ترتیب یک تغییر مسیر و انحراف در جهت جریان در طول تاریخ (در مقیاس زمین‌شناسی) در خط ساحل در واکنش به اقلیم موج اتفاق می‌افتد. برخورد تقریباً طبیعی امواج به خط ساحل منجر به توسعه مجاری جریان برگشتی می‌شود.

خلیج توسط کانیون زیر دریایی که تا دهانه الکورن سلوت<sup>۱۴</sup> در موث لندینگ<sup>۱۵</sup> گسترش یافته است، به سلول‌های ساحلی شمالی و جنوبی تقسیم می‌شود. کانیون زیردریایی غالباً مانع دریفت‌های ساحلی که از جنوب می‌آیند، می‌شود و آنها را به سمت پائین کانیون منحرف می‌کند. آنالیز شکست امواج توسط مهندسان نیروی زمینی ارتش ایالات متحده (۱۹۸۵) در بالای برآمدگی منحنی‌های عمق سنجی در محدوده دلتای قدیمی رودخانه سالیانس نشان می‌دهد که ساحل در شمال و جنوب رودخانه جابجایی داشته که این امر سبب تقسیم سلول ساحلی جنوبی به دو سلول در دهانه رودخانه شده است.

### ۳- اندازه‌گیری‌های میدانی ۳-۱- مورفولوژی

مورفولوژی کانال‌های کنشندی / نواحی کم عمق، نوک هلالی‌های خط ساحل و تپه‌های ساحلی فرسایشی توسط تکنیک‌های متنوعی اندازه‌گیری می‌شوند. اندازه‌گیری عمق توسط دستگاه‌های صوتی (سونار) که بر روی قایق‌ها و شناورهای خصوصی و شخصی نصب می‌شود (pwc) انجام و با استفاده از Kinematic Differential GPS (KDGPS) هدایت می‌شود، خطای rms آن برای تمام جهات تقریباً ۵ سانتیمتر است (McMahan, 2000). در روزهایی که موج پایین است (ارتفاع موج در حدود ۵۰ سانتیمتر است)، واتر کرافت خصوصی در امتداد خط ثابتی تقریباً با فاصله ۲۵ متر از ساحل حرکت می‌کند. نتیجه اندازه‌گیری‌ها، سدهای ماسه‌ای کم عمق و کانال‌های کنشندی برگشتی را در طول ساحل مشخص می‌کند (نگاره ۵، پانل زیرین) در نتیجه می‌توان فضای کانال‌های برگشتی را تعیین کرد.



نگاره ۴: خط ساحل و عمق سنجی خلیج مونتری. منطقه نقشه‌برداری شده از رودخانه سالیانس تا مونتری (فاصله به کیلومتر است)



در این مطالعه، تمرکز بر روی سلول ساحلی به طول ۱۸ کیلومتر است که از مونتری (نقطه مبدأ و صفر کیلومتر) تا رودخانه سالیانس (۱۸ کیلومتر) انجام گرفته است (نگاره ۴). خط ساحل ماسه‌ای با گسترش تپه‌های ساحلی پشته دار شده است، بین شهر سند<sup>۱۶</sup> و مارینا<sup>۱۷</sup> بالا آمده و ارتفاعی متجاوز از ۴۰ متر پیدا کرده است. خط ساحلی و تپه‌ها از نظر فرسایش در حالت معمولی با میانگین ۰/۵ تا ۲ متر در سال قرار دارند. (Thornton, 2006) فرسایش پدیده‌ای اتفاقی بوده و تنها در حین همزمانی جذر و مدهای بلند و امواج طوفانی ممتد رخ می‌دهد. جذر و مد دو مرتبه در روز با دامنه میانگین ۱/۶ متر می‌باشد. قطر ذرات ماسه در طول ساحل متفاوت بوده و بستگی به ارتفاع امواج دارد. بزرگترین اندازه متوسط ذرات در سطح ساحل دامنه‌ای از ۰/۶ تا ۱ میلی‌متر دارد که در بین رودخانه سالیانس و فورت ارد<sup>۱۸</sup> جایی که انرژی امواج خیلی زیاد است؛ دیده می‌شود و در ادامه به سمت مونتری کاهش پیدا می‌کند (Reiss & Dingler 2001). اندازه ذرات و شواهد سنگ‌شناسی نشان می‌دهند که سهم رسوباتی که بوسیله رودخانه سالیانس به سمت جنوب در طی سیلاب‌های اصلی آورده می‌شوند کم و محدود به ۷ کیلومتری دهانه رودخانه می‌باشند (Clark, Osborn 1982) ... بنابراین،

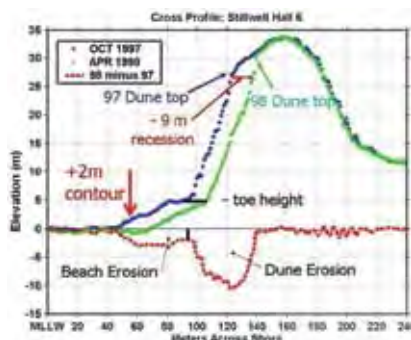
نگاره ۵: تغییرات منحنی‌های میزان +۲ متری از میانگین خط ساحل در نتیجه فاصله گرفتن از ساحل را نشان می‌دهد، ۸ اگوست ۲۰۰۳ (پانل وسط)، عمق سنجی موازی ساحل کانال‌های برگشتی و کم عمق رادر طول ساحل در ۱۸ جولای ۲۰۰۳ نشان می‌دهد (پانل زیرین)، و همبستگی عرضی بین هر دو (پانل بالایی).

نوک هلالی‌های خط ساحل با اندازه‌گیری منحنی میزان‌های +۲ متری توسط وسیله تمام زمینی (ATV) که بوسیله KDGPS هدایت می‌شود، تعیین می‌گردند. در حالت جذر دریا از ساحل فاصله گرفته و به سوی دریا رانده می‌شود و در حالت مد بر گردانده می‌شود. منحنی ۲ متری از اطلاعات

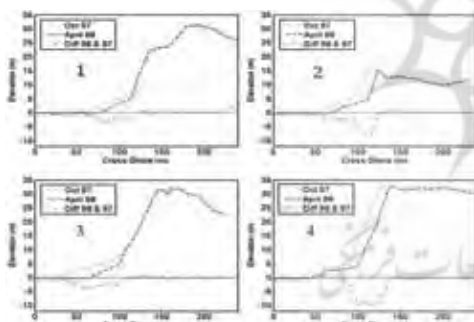




از داده لیدار بصورت تصادفی نمونه برداری شد، اندازه گیری ها به شبکه منظمی در مختصات متعامد با استفاده از درون یابی مثلثی دلانی<sup>۲۲</sup> تبدیل شده و پروفیل عرضی ساحل در هر ۲۵ متر طول ساحل محاسبه گردید. فرسایش ساحل و تپه های ساحلی بوسیله کم کردن پروفیل عرضی ساحل از آوریل تا اکتبر تعیین گردید (نگاره ۷). ارتفاع پنجه تپه ساحلی، از جایی که اینها تغییرات زیادی در شیب پروفیل داشتند، تعیین و ساحل را از پروفیل تپه ساحلی جدا کرد.



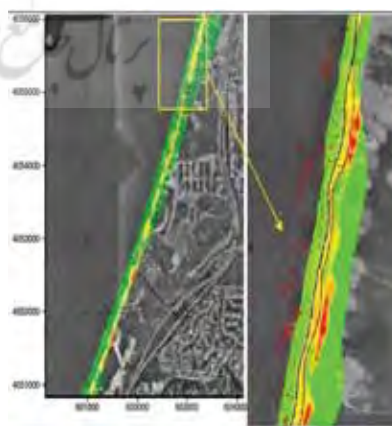
نگاره ۷: پروفیل عرضی ساحل که بوسیله اندازه گیری لیدار برای اکتبر ۱۹۷۷ و آوریل ۱۹۹۸ اندازه گیری شده است. فرسایش ساحل و تپه های ساحلی توسط ارتفاع پنجه جدا شده و از اختلاف دو پروفیل تعیین گردیدند. منحنی ۲ متری از این پروفیل تعیین گردید.



نگاره ۸: پروفیل عرضی ساحل در فضای تقریباً ۱۰۰ متری در طول ساحل که از اندازه گیری های لیدار بدست آمده و بیانگر تغییرات زیاد در طول ساحل به سبب فرسایش ساحل و تپه های ماسه ای ساحلی می باشد.

میزان وحجم تغییرپذیری فرسایش خط ساحلی و تپه های ماسه ای با مقایسه ۴ پروفیل عرضی ساحلی لیدار برای سال های ۱۹۹۷ و ۱۹۹۸ در فاصله تقریباً ۱۰۰ متری به طور جداگانه ای بررسی شده که در موقعیت ۱۱/۵ کیلومتری طول ساحل شروع گردیده و به سمت شمال پیشروی کرده است (نگاره ۸). اولین نمودار هیچگونه فرسایشی را در پروفیل های ساحل تپه های ماسه ای نشان نمی دهد. اما ۱۰۰ متر بطرف شمال، فرسایش هم در خط ساحل و هم تپه ساحلی انجام گرفته و تپه های ساحلی حدود ۱۴ متر عقب نشینی و پسروی داشته است. و باز ۱۰۰ متر جلوتر بطرف شمال، تپه

موقعیت دو خط درون یابی می شود. کنتور ۲ متری بدست آمده شامل نوک هلالی های های کلاسیک (صفر ۳۰ تا متر) است که در حال حاضر در زیر میانگین سطح دریا<sup>۱۹</sup> (MSL) قرار نداشته و در پشت ساحل هم ایجاد نمی شوند. منحنی ۲ متری بلندتر از میانگین تراز بالای آب<sup>۲۰</sup> (MHHW) با ارتفاع +۰/۸ متر نسبت به MSL است. انحنا میانگین خط ساحلی از نمونه های اندازه گیری کم شد. یک میانگین از اندازه گیری خط ساحلی در طول ۱۸ کیلومتر از خط ساحل در ۷ ژانویه ۲۰۰۴ با استفاده از پیوستگی شش مورد مناسب از حداقل مربع کوادراتیک بدست آمد که بوسیله انطباق محل تقاطع ها و دامنه ها به هم متصل شدند. این میانگین خط ساحل از تمام اندازه گیری های حاصل از نقشه برداری ساحل کم شد (نگاره ۵، پانل میانی). اندازه گیری های ساحل در جولای ۲۰۰۳ آغاز گردید ولی تنها بصورت دوره ای و تا فوریه ۲۰۰۴ ادامه پیدا کرد، بعد از اینکه این اندازه گیری ها منظم گردید (هر ۲ هفته یکبار) زمان سیر تکاملی نوک هلالی های بزرگ و عظیم بدست آمد. خط ساحلی خلیج مونتری با استفاده از تصاویر لیدار<sup>۲۱</sup> (LIDAR) قبل از اکتبر و بعد از آوریل ۱۹۹۸-۱۹۹۷ در ال نینو زمستانی اندازه گیری شد، درست در زمانی که فرسایش خط ساحل و تپه های شنی به صورت عمده اتفاق افتاد (بیش از ۱۵ متر تپه ها پسروی داشتند). اندازه گیری توپوگرافی سطح زمین توسط تصاویر لیدار از ساحل و تپه های ساحلی با قدرت تفکیک افقی ۱-۲ متر بیش از ۱۵ سانتیمتر دقت عمودی انجام گرفت (Sallenger et al, 2003). میزان فرسایش از تفاوت در دو زمان نقشه برداری مشخص گردید. تغییرات زیاد طول ساحل ناشی از فرسایش تپه های ماسه ای بود که مورد بررسی و اندازه گیری قرار گرفت (نگاره ۶) و به عنوان نقاط داغ با مقیاس طولی ۵۰۰-۲۰۰ متر نشان داده شده است. منحنی میزان +۲ متری ساحل بوسیله لیدار برای قبل و بعد از ال نینو اندازه گیری شد. همانگونه که در نگاره شماره ۶ مشخص گردیده، اشکال نوک هلالی بزرگی را نشان می دهد که همگی مانند نقاط داغ تپه های ساحلی، مقیاس طولی ۵۰۰-۲۰۰ متری دارند. فرسایش تپه ها غالباً در پشت محدوده نوک هلالی های بسیار بزرگ، در جایی که پهنای ساحل بسیار باریک می شود، رخ می دهد.

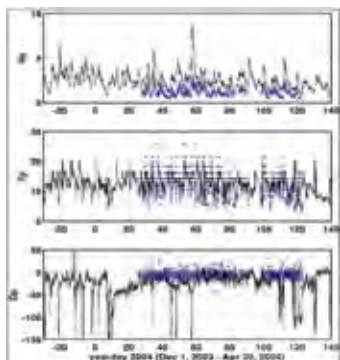


نگاره ۶: تفاوت ارتفاعی بین اندازه گیری های بدست آمده از تصویر لیدار در اکتبر ۱۹۹۷ و آوریل ۱۹۸۸ در امتداد ۴ کیلومتر خط ساحل که نشانگر نقاط داغ از نظر فرسایش (رنگ قرمز) در فضای ۴۰۰-۱۰۰ متری طول ساحل می باشد. عکس بزرگ شده منحنی های ۲ + متری ساحل را از اکتبر

۱۹۹۷ (مشکی) و آوریل ۱۹۸۸ (قرمز) را نشان می دهد. نقاط داغ در محدوده نوک هلالی های بزرگ رخ داده است.



کاهش می یابد. در طی این زمان عمدتاً از غرب (شمال غرب) به جنوب است (از جهت خط ساحلی ۳۱۳ درجه کاسته شده است). به دلیل انکسار موج، میانگین مسیر فرود موج در آب کم عمق تقریباً حالت نرمال پیدا می کند. انرژی موج در داخل خلیج، عناصر برجسته و بزرگ از طیف موج مانند امواج بازگشتی، دهانه باریک فیلتر دماغه ها و فرکانس بیشتر که مربوط به نسیم روزانه دریا است را نمایان می سازد.



**نگاره ۱۰: ارتفاع امواج اصلی،  $H_s$ ، بویه واقع در عمق ۱۲ متری پسرکانه سندسیتی، کالیفرنیا، اوج زمان تناوب امواج دریا در عمق ۱۲ متری،  $T_p$ ، میانگین جهت اوج دوره و  $D_p$ ، بویه پس کرانه (خطوط سیاه) در عمق ۱۲ متری (نقطه چین های آبی) نسبت به ساحل معمولی.**

#### ۴- تحلیل و بررسی داده ها

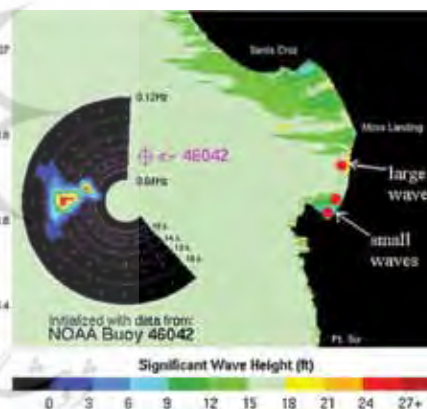
تغییرات زمانی و فضایی طول ساحل مجرای برگشتی، نوک هلالی های بزرگ و فضای پسروی تپه های ماسه ای ساحلی دارای یک همبستگی عرضی<sup>۲۶</sup> با یکدیگر جهت آزمون فرضیه هستند. بدست آوردن اطلاعات اجمالی از مجرای برگشتی، نوک هلالی های خطوط ساحلی و فرسایش تپه های ماسه ای به دلیل اتفاقی بودن فرسایش تپه های ماسه ای غیر ممکن بود. سالیان زیادی در اینجا تپه ها فرسایشی نداشته است. فرسایش تپه ها در طی زمستان های ال نینو شدت داشته که امواج طوفانی با شدتی بیش از میانگین، مدام اتفاق می افتد. زمستان های ال نینو بطور متوسط هر ۷ سال یکبار رخ می دهد. اما از زمان نقشه برداری از ساحل هیچ موج طوفانی اتفاق نیفتاد. بدین ترتیب، نوسانات مجرای برگشتی از نقشه برداری که PWC بدست آورده بود؛ گرفته شد، زمانی که امواج پایین بودند نوک هلالی های خط ساحلی توسط تجهیزات KGPS بررسی گردیدند. سپس این نوک هلالی ها و تپه های فرسایشی توسط تصاویر لیدار اندازه گیری و در دوره های مختلف زمانی مقایسه گردیدند.

این فرضیه که نوک هلالی های بزرگ توسط جریان های برگشتی ایجاد می شوند، ابتدا با مشاهده همبستگی عرضی که از اندازه گیری های PWS به موازات ساحل که توسط باتیمتریک (عمق سنج) در ۸ اگوست انجام و با استفاده از منحنی میزان +۲ متری که با استفاده از نقشه برداری های ATV در ۱۸ جولای ۲۰۰۳ تعیین گردید (نگاره ۵)، مورد بررسی قرار گرفت. موقعیت

ماسه ای ساحلی حدود ۱۱ متر پسروی داشته، اما فرسایش در طول خط سال دیده نمی شود. چنانچه مشخص خواهد شد تغییرات زیاد در تپه های شنی در طول ساحل با نوک هلالی های ساحل مرتبط بوده که خود آن هم تحت تأثیر جریان های برگشتی می باشد.

#### ۳-۲- امواج

جهت طیفی موج بصورت منظم از بویه NOAA ۴۶۰۴۲ واقع در ۴۰ کیلومتری پسرکانه خلیج مونتری و موج های برگردانده شده به سمت ساحل، اندازه گیری شد (نگاره ۹) ارتفاع امواج در سراسر خلیج هر ۴ ساعت تهیه گردید. جهات طیف موج نزدیک ساحل بوسیله جریان داپلر صوتی و پروفیل های جاری که کابل های آن در ۱۲ کیلومتری پس کرانه و سندسیتی قرار داده شده و بویه سمت نگار که در ۱۷ کیلومتری پسرکانه مارینا قرار داده شده بود، اندازه گیری شد. در اینجا ارتفاع موج گرادیان زیادی در مقیاس کیلومتری دارد که ناشی از آمدن امواج کوچک مناطق کم عمق دماغه جنوبی به سمت قسمت های میانی خلیج در فورت-ارد و مارینا است، جایی که امواج برگردانده شده از کانیون زیر دریایی خلیج مونتری به هم می رسند، در نتیجه سبب افزایش ارتفاع موج می شود.

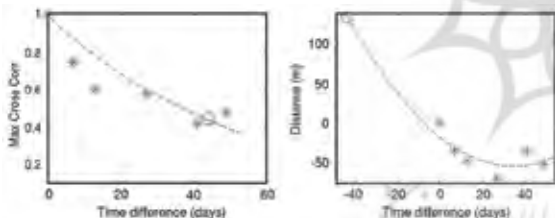


**نگاره ۹: طیف جهت امواج که توسط بویه NOAA ۴۶۰۴۲، در ۴۰ کیلومتری پسرکانه درون خلیج مونتری انکسار پیدا کرده است. نوسان زیاد در ارتفاع امواج در طول ساحل بر اثر بازگشت امواج از کانیون زیر دریایی خلیج مونتری و پناهگاه ایجاد شده توسط دماغه می باشد. موقعیت حسگرهای جهت یاب نزدیک ساحل بوسیله نقطه چین مشخص شده است.**

طیف فرکانس جهت امواج منتشر شده در قسمت های کم عمق، توسط سری های زمانی فشار و شتاب، شیب و جابجایی با استفاده از روش حداکثر انترپولی (Lygre and Krogstad, 1986) در هر ۲ ساعت محاسبه گردیده است. ارتفاع موج اصلی<sup>۲۳</sup> ( $H_s$ ) دوره اوج<sup>۲۴</sup> ( $T_p$ ) و میانگین دوره اوج جهت امواج ( $D_p$ ) در سندسیتی، در عمق ۱۲ متری، با اطلاعاتی که از بویه پس کرانه در ژانویه-آوریل ۲۰۰۴ (نگاره ۱۰) بدست آمده بود؛ مقایسه گردید.  $H_s$  در عمق ۱۲ متری بازتابی است از پسرکانه  $h_s$  که به مرور زمان ارتفاعش



عدم همبستگی با زمان برای تشریح عدم ارتباط بین نوک هلالی‌های بزرگ و مجاری برگشتی که در نگاره ۵ نشان داده شده است؛ استفاده می‌شود. اگر مورفولوژی مجرای برگشتی و خط ساحل در یک وضعیت مشابه زمانی عمل کنند (با هم همبستگی داشته باشند)، سپس همبستگی عرضی پیش بینی شده با جدا کردن زمان بکار رفته در عدم همبستگی با زمان اندازه‌گیری شده، باید بالای ۰/۶۵ باشد. اگر فرض شود که مورفولوژی مجرای برگشتی و خط ساحلی مستقل از زمان عمل می‌کنند؛ همبستگی عرضی مورد انتظار با کسر ۲۱ روز از زمان مورد استفاده در عدم همبستگی با در بر گرفتن ۶۵٪ زمان برابر مقدار ۰/۴، به صورت ثابت برای تمام اندازه‌گیری‌ها خواهد بود. میانگین نرخ حرکت نوک هلالی‌های بزرگ برای مقاطعی از ساحل توسط جابجایی همبستگی اوج با زمان تعیین گردیده است (نگاره ۱۲، پانل راست). برای محدوده حدود ۱۰-۴ کیلومتر از ساحل، سیستم نوک هلالی‌های بزرگ حدود ۳/۴ متر در روز برای مدت ۷۰ روز، از ۷ ژانویه تا ۱۸ مارس به سمت شمال جابجایی داشته است. پس از آنکه همبستگی خط ساحل و مجرای برگشتی از نظر باتیمتری (عمق سنجی) مشخص گردید، فرض بر این گذاشته شد که نوک هلالی‌های خط ساحل به دلیل فرسایش جریان‌های برگشتی است. با این حال می‌توان تشریح کرد که حرکت مجرای برگشتی نرخ یکسانی دارند. بر این اساس، می‌توان احتمال داد که تأخیر فضایی برای همبستگی عرضی آنها می‌تواند نزدیک صفر باشد، در نتیجه آنها با یکدیگر تقریباً با همان نرخ که در نگاره ۵ نشان داده شده است؛ حرکت کرده و جابجا می‌شوند.

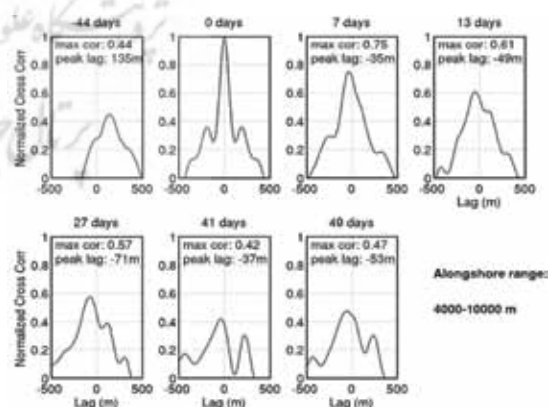


نگاره ۱۲: حداکثر همبستگی عرضی بین ۲۰ فوریه ۲۰۰۴ و نقشه برداری بعدی (\*) و قبلی (0) (پانل سمت چپ)، و جابجایی حداکثر همبستگی عرضی بین نقشه برداری‌های بعدی که حرکت خط ساحل (پانل سمت راست) را برای ۱۰-۴ کیلومتر، توصیف می‌کند.

برای مقطع ۱۵-۱۰ کیلومتری از خط ساحلی، زمان عدم همبستگی تغییرات تصاعدی تقریباً ۴۰ روز می‌باشد (نگاره ۱۳، پانل چپ). این بخش از ساحل بیشتر در معرض امواج بلندتر قرار داشته و همین ممکن است سبب ایجاد عدم همبستگی زمانی سریع‌تر در مقایسه با بخشی از خط ساحل بین ۴ و ۱۰ کیلومتر شود. جابجایی نوک هلالی‌های بسیار بزرگ به سمت شمال برای مدت ۷۰ روز، از ۷ ژانویه تا ۱۸ مارس در حدود ۳/۷ متر در سال است و سپس ثابت (بی حرکت) می‌شود (نگاره ۱۳، پانل سمت راست)، اما حرکت نوک هلالی‌های بزرگ بین ۴ و ۱۰ کیلومتر در سال است.

جریان‌های برگشتی و نوک هلالی‌های بزرگ خط ساحل بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر در بیش از تقریباً ۶ کیلومتر از خط ساحل تغییر می‌کند. حداکثر میزان همبستگی عرضی بین مورفولوژی مجرای برگشتی و خط ساحلی ۰/۳۵ می‌باشد که سطح اطمینان آن با تأخیر زمانی فضایی نزدیک به صفر، حدود ۹۵٪ است. اصولاً فقدان همبستگی (ارزش > ۱) بین دو نمونه ثبت شده اتفاق می‌افتد زیرا که ۲۱ روز فاصله بین نمونه‌های برداشت شده است. این مسئله با محاسبه عدم همبستگی زمانی و نرخ جابجایی بر اساس همبستگی عرضی سری‌های فضایی خط ساحلی مشخص گردید. سری‌های فضایی خط ساحل برای فوریه-آوریل ۲۰۰۸، در هنگام اندازه‌گیری بطور منظم مورد استفاده قرار گرفت. یک منبع جهت منحنی ۲ متری خط ساحل در شروع سری‌ها، سپری شدن ۵۱ روز از سال و همبستگی عرضی که آن با ارزیابی‌های بعدی خط ساحلی داشت؛ می‌باشد. علاوه بر این، خط ساحلی ۴۴ روز قبل نقشه برداری و بررسی شده بود (۱۰ روز اول سال) که به ارزیابی همبستگی عرضی ارجاع داده شد (نگاره ۱۱).

از آنجایی که سری‌های خط ساحلی ناهمگن بودند (مقیاس متفاوت طول ساحل به دلیل گرادیان ارتفاع امواج)، همبستگی‌های عرضی برای مقاطعی از خط ساحل انجام شد. برای مثال، همبستگی عرضی برای خط ساحل بین ۴ و ۱۰ کیلومتر حاکی از کاهش همبستگی اوج با زمان و محل حداکثر تغییرات همبستگی در طول ساحل بوده و این بیانگر جابجایی نوک هلالی‌ها در طول ساحل است (نگاره ۱۲، پانل سمت چپ). اوج همبستگی به عنوان عملکرد زمان از آغاز بررسی اولیه با منحنی نمایه مفهوم حداقل مربع منطبق گردید (نگاره ۱۲، پانل چپ). سنجش زمان عدم همبستگی درست زمان تغییرات تصاعدی<sup>۳</sup> است. در ارزیابی‌های قبلی (بوسیله یک دایره مشخص شده) و همچنین در اندازه‌گیری‌های بعدی خط ساحلی (ستاره‌ها) ثابت می‌باشد. به طور طبیعی زمان تغییرات تصاعدی امواج در طول زمستان/بهار متجاوز از ۵۰ روز است.

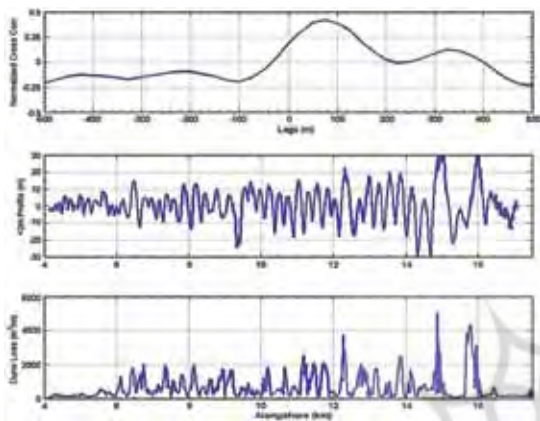


نگاره ۱۱: همبستگی‌های عرضی بین نقشه برداری منحنی میزان ۲ متری خط ساحل برای ۱۰-۴ کیلومتر در ۲۰ فوریه ۲۰۰۴ و نقشه برداری‌های بعدی. روزهای بین نقشه برداری و نقشه برداری ۲۰ فوریه ۲۰۰۴، در بالای هر پلات نوشته شده است.





نتیجه اختلاف بین موقعیت شاخ و محدوده عرض ساحلی) و هم طول نوک هلالی‌های بزرگ در طول ساحل، متفاوت است. برای مثال در طی برداشت تصاویر لیدار در آوریل ۱۹۹۸، پهنای نوک هلالی‌ها از ۱۰ متر به بیش از ۴۰ متر و طول آنها از ۱۸۰ متر به بیش از ۴۰۰ متر از جنوب به شمال افزایش پیدا کرد (نگاره ۱۵، پانل میانی). همچنین، حجم فرسایش تپه‌های ساحلی بطور قابل ملاحظه‌ای در طول ساحل متفاوت بوده (نگاره ۱۵، پانل پایینی) و به میزان پسروری و ارتفاع تپه بستگی دارد.



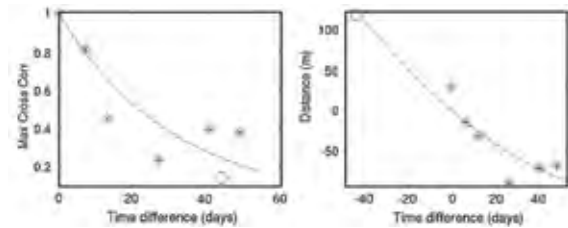
**نگاره ۱۵: همبستگی عرضی (پانل بالایی) بین منحنی ۲+متری از آوریل ۱۹۹۸ (پانل وسطی) و حجم فرسایش تپه در طول ساحل بین اکتبر ۱۹۹۷ و آوریل ۱۹۹۸ (پانل زیرین) شامل برداشت‌های تصاویر لیدار است.**

#### ۵- بحث

#### ۵-۱- تأخیر فضایی بین نوک هلالی‌های بزرگ و فرسایش تپه‌های ساحلی

از آنجایی که فرسایش تپه‌های ساحلی باقی مانده در موقعیت‌های مورد بررسی بعد از ال نینوی زمستان ۱۹۹۸-۱۹۷۷ افزایش یافته، تأخیر فضایی که بین تپه‌های فرسایش یافته و منحنی میزان ۲ متری اندازه‌گیری شده، ناشی از حرکت نوک هلالی‌ها بین زمان فرسایش تپه‌ها و اندازه‌گیری‌های خط ساحلی در آوریل می‌باشد. فرسایش تپه‌های ساحلی نقطه اوج پدیده طوفان‌های زمستانی است. اندازه‌گیری پتانسیل فرسایش باید زمانی باشد که حرکت سریع امواج پیشرو به پنجه تپه‌های ساحلی می‌رسد، لذا امواج پیشرو بشدت با تپه‌های ساحلی برخورد کرده و آنها را مورد فرسایش قرار می‌دهند. این روش توسط سالنجر و همکاران (۲۰۰۰) مورد استفاده قرار گرفت، سرعت بالا آمدن آب به طور متوسط بیشتر از ۰.۲٪ سرعت امواج است (Holman and Sallenger, 1985; Holman, 1986) که بر اساس ارتفاع موج و توالی امواج، که هر ۴ ساعت از بویه‌های NOAA تعیین جهت کننده موج آب‌های عمیق اندازه‌گیری شده بود، بصورت زیر محاسبه گردید:

$$R_{u=H_0} = \left( \frac{0.83 \tan \beta}{\sqrt{H_0/L_0}} + 0.2 \right) + \eta_{\text{tide}}$$



**نگاره ۱۳: حداکثر همبستگی عرضی بین نقشه‌برداری‌های ۲۰ فوریه ۲۰۰۴ و بعد (\*) و قبل از آن (O) (پانل سمت چپ) و و جابجایی حداکثر همبستگی عرضی بین نقشه‌برداری‌های بعدی که حرکت خط ساحل (پانل سمت راست) را برای ۱۰-۱۵ کیلومتر، نشان می‌دهد.**

عدم همبستگی‌های زمانی ۷۰-۴۰ روزه نشان می‌دهد که ارزیابی‌های دو ماه یکبار برای خودداری از تأثیر نامطلوب سری‌های زمانی و برای توصیف و بررسی فرایندها کافی است. به هر حال، در حین بررسی‌های خط ساحل از ۹ دسامبر ۲۰۰۳ تا ۷ ژانویه ۲۰۰۴، طوفان مهمی رخ داد (موج اصلی در پسرکانه در ۱۰ دسامبر طی زمان وقوع مد در حدود ۱۰ متر بالا آمد، نگاره شماره ۱۰ را مشاهده کنید). در هر حال زمان عدم همبستگی نسبت به زمان بین دو بررسی کمتر است (نگاره ۱۴). نکته قابل توجه این است که امواج بزرگتر زمستانی (بیش از ۸ متر) در اول مارس در طی جدر دریا رخ داده در حالی که هیچ فرسایشی صورت نگرفته و همبستگی خط ساحل حین بررسی‌ها تغییری نکرده است (نگاره ۱۳، پانل چپ).

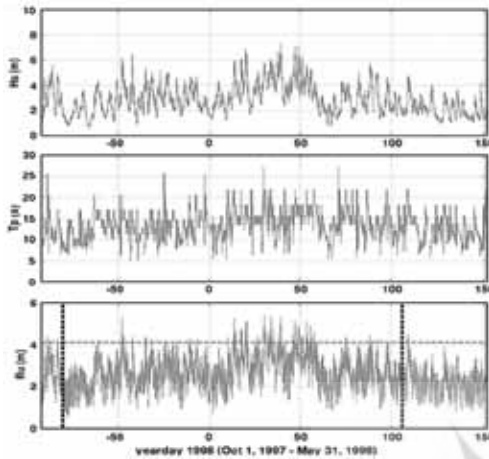
سیستم نقشه‌برداری ATV، طی نقشه‌برداری قبلی در آوریل تا نقشه‌برداری بعدی در اکتبر، در یک دوره ۱۹۰ روزه فعال نبود. با این حال، دو نقشه‌برداری با هم شباهت‌های زیادی را نشان می‌دهند. اما طی ماه‌های تابستان، زمانی که امواج کمترین گسترش را در مدت ۲۰۰ روز دارند، عدم همبستگی زمانی دارند (نگاره ۱۴).

این فرضیه که فرسایش تپه‌های ساحلی در محدوده نوک هلالی‌های بزرگ رخ می‌دهد، بوسیله همبستگی عرضی تغییرات فرسایش تپه‌ها در طول ساحل توسط منحنی‌های ۲ متری ساحل بررسی شد. حجم فرسایش تپه‌ها بوسیله تفاوت بین پروفیل عرضی ساحل در هر ۲۵ متر با اندازه‌گیری تصاویر لیدار ۱۹۹۷ و ۱۹۹۸ تعیین گردید. نوک هلالی‌های خط ساحل با اندازه‌گیری‌های منحنی ۲ متری از پروفیل‌های عرض ساحل از هر ۲۵ متر با استفاده از اندازه‌گیری‌های تصاویر لیدار مشخص گردیدند.

فرسایش تپه‌ها و تغییرات در طول منحنی میزان ۲ متری خط ساحلی قابل توجه بوده و مقدار همبستگی آن در حدود ۰.۹۵ است (نگاره ۱۵، پانل بالایی). از آنجایی که فرسایش تپه‌های ساحلی بطور قابل توجهی با پهنای ساحل ارتباط دارد، بنابراین انتظار می‌رود میزان فرسایش در محدوده نوک هلالی‌ها، جایی که ساحل باریکتر می‌شود، در مرحله خط ساحلی بوده و با تأخیر فضایی صفر صورت گیرد. به هر حال، یک تأخیر فضایی مشخص قریب به ۷۵ متر بین حجم فرسایش تپه‌های ساحلی و نوک هلالی‌های بزرگ قابل توجه است، که در بخش بعدی در مورد آن بحث می‌شود. هم پهنای عرض ساحل در نوک هلالی‌های بزرگ (اندازه‌گیری شده در



نسبت به نواحی مجاور خود می‌باشند. ممکن است شماری از فرآیندها مسئول ایجاد این نقاط داغ باشند اما تنها تعدادی از آنها شناخته شده هستند (از قبیل آنهایی که بوسیله موج در اطراف چاله‌های پسرکانه یا مناطق کم عمق متمرکز می‌شوند).



**نگاره ۱۶: ارتفاع موج اصلی،  $H_s$ ، نقطه اوج زمان تناوب امواج دریا،  $T_p$ ، بویه‌های واقع در پسرکانه، و مرز بالا آمدن آب محاسبه شده که به ارتفاع مد اضافه گردیده (خط نقطه چین میانگین ارتفاع از پنجه تپه‌های ساحلی است). خطوط عمودی در این نمودار زمان‌های برداشت لیدار است.**

List و Farris (۱۹۹۹)، از تجهیزات GPS مدل ATV برای اندازه‌گیری تغییرات میانگین ارتفاع آب موقعیت خط ساحلی در امتداد ۷۰ کیلومتری بخشی از خط ساحلی کوثر بانکز<sup>۲۸</sup> در شمال کارولینا و ۴۵ کیلومتری کپ گاد<sup>۲۹</sup> در ماساچوست استفاده کردند. آنها دریافتند که نقاط داغ طوفان برگشتی و شکسته شده، مناطقی هستند که فرسایش طوفان‌های بزرگ و اصلی به صورت متناوب در مقیاس فضایی ۱۰-۲ کیلومتر عمل می‌کند، بنابراین بخش‌هایی از ساحل دارای فرسایش کم و یا بدون فرسایش هستند. در طی طوفان‌های بعدی هوای بدون ابر، نقاط داغ فرسایش طوفان، بوسیله حجم زیادی از شن و ماسه‌های تجمع یافته به سرعت تغییر پیدا می‌کند در حالیکه مناطق حائل بدون تغییر باقی می‌مانند. علت ایجاد این نقاط داغ هنوز شناخته نشده است. نقاط داغ مشاهده شده در خلیج مونتری برگشت‌ناپذیر هستند. کاهش تپه‌های ساحلی پدیده‌ای دائمی هست چرا که در حال حاضر در این منطقه مکانیسم طبیعی برای ترمیم سطح تپه‌های ساحلی مشاهده نمی‌شود. تحلیل‌های حاضر بر این اساس است که نقاط داغ، ناشی از باریک شدن ساحل در محدوده نوک هلالی‌های بزرگ بوده که همراه جریان‌های برگشتی، موقعیت تپه‌های ساحلی را در مقابل زیربری و آشنویی امواج در طی برخورد مدهای بلند و امواج طوفانی، بسیار آسیب پذیر می‌سازند.

از نظر فضایی، فرسایش ناپایدار ایجاد شده در اطراف این نقاط داغ، سبب افزایش نرخ فرسایش می‌شود این امر با مقایسه خط ساحلی یکنواخت

جایی که  $H_o$  است، ارتفاع موج در آب عمیق قابل ملاحظه است.  $L_o$  طول موج آب عمیق است که با استفاده از تئوری خطی موج، دوره آن محاسبه شده،  $\tan \beta$  شیب ساحل و  $\eta_{tide}$  ارتفاع مد اندازه‌گیری شده در خلیج مونتری در زمان اندازه‌گیری موج است.

موج بویه NOAA ۶۶۰۴۲ واقع در پسرکانه خلیج مونتری در ۲۷ اکتبر ۱۹۹۷ در اثر امواج بلند شکسته و تا ژوئن ۱۹۹۸ تعمیر نشد. بنابراین این داده‌ها در طی این زمان در دسترس نبود. در واقع، اندازه‌گیری امواج بوسیله موج بویه NOAA ۶۶۰۲۶ سانفرانسیسکو واقع در ۱۱۰ کیلومتری شمال در طی ۱۹۹۷ و همچنین زمانی که قبل از ژانویه ۱۹۹۸ شکسته بشود موج بویه NOAA ۶۶۰۱۴ مندوسین در ۳۱۰ کیلومتری شمال، مورد استفاده قرار گرفت. ارتباط ارتفاع و دوره امواج اندازه‌گیری شده بوسیله بویه‌های شمالی با داده بویه مونتری با استفاده از منحنی رگرسیون خطی بین بویه‌های محاسبه شده برای یک دوره ۱۳۰ روزه (۱۹ ژوئن تا ۲۶ اکتبر ۱۹۹۷) تطبیق داده شد.

داده‌های مونتری در طی این دوره زمانی ۱/۱۴ ساعت بیشتر از سانفرانسیسکو ولی ۰/۹۴ ساعت کمتر از مندوسین بود. میانگین دوره قله موج مونتری ۲٪ بیشتر از سانفرانسیسکو و ۸٪ بیشتر از مندوسین بود. ارتفاع و زمان تناوب امواج دریا در آب‌های عمیق خلیج مونتری و میزان بالا آمدن آب (run-up) در خلال بررسی لیدار که در نگاره ۱۶ نشان داده شده، محاسبه گردید. خط افقی نقطه چین، میانگین ارتفاع پنجه تپه ساحلی است. خطوط عمودی ثابت، بیانگر روزهایی هستند که اندازه‌گیری‌ها توسط لیدار انجام می‌گرفت. فاصله زمانی بین بررسی‌های لیدار، میزان بالا آمدن آب (run-up) بر دامنه پای تپه که برای زمان ۴۰ روزه به ۹۰ روز قبل‌تر در بررسی‌های آوریل محاسبه شده بود، موقع پیش بینی فرسایش اهمیت پیدا کرد. میانگین نرخ حرکت نوک هلالی‌ها در طی بررسی‌های ۲۰۰۴ دامنه‌ای از ۰ تا ۳/۵ متر در سال داشته و برای نوک هلالی‌های بسیار بزرگ، بین زمانی که فرسایش اتفاق می‌افتد و اندازه‌گیری‌های لیدار از منحنی میزان ۲ متری خط ساحل، به آسانی می‌توان ۷۵ متر جابجایی را مشاهده نمود.

عدم همبستگی (< ۱) بین تغییرات تپه‌های فرسایشی و منحنی میزان ۲ متری در طول ساحل به طور عمده ناشی از تفاوت زمانی تقریباً ۴۵ روزه بین بیشترین میزان فرسایش در تپه‌های ساحلی (حداقل زمانی که جریان آب بالا آمده به پنجه تپه‌های ساحلی برسد (نگاره ۱۶) و زمانی که اندازه‌گیری منحنی میزان ۲ متری انجام می‌گرفته، می‌باشد. فرض بر این است که جابجایی خط ساحلی بعنوان عملی مستقل بعد از ایجاد فرسایش در تپه‌های ساحلی رخ داده و از عملکرد همبستگی به دست آمده بین موقعیت مجراهای برگشتی و منحنی میزان ۲ متری جهت مقایسه استفاده شده است. (نگاره‌های ۱۲ و ۱۳، پانل راستی). حداکثر همبستگی پیش‌بینی شده تقریباً ۰/۴ است که با مقادیر اندازه‌گیری شده قابل مقایسه است (نگاره ۱۵، پانل پائینی).

## ۵-۲- نقاط داغ

کاملاً واضح است که فرسایش بصورت یکسان رخ نمی‌دهد. ولی تشخیص نقاط داغ فرسایش، به دلیل نوسان و ناپایداری در آن بسیار سخت است. نقاط داغ بخشی از ساحل هستند که دارای نرخ بالاتری از فرسایش





جابجایی ماسه‌های ساحلی سبب حرکت جریان‌های برگشتی شده ولی در یک زمان دیگری، آنها با پر کردن کانال‌های برگشتی سبب نابودی‌شان می‌گردند. جریان‌های طولی ساحل در جنوب خلیج مونتری ضعیف هستند چرا که نزدیک محل برخورد امواج در حالت طبیعی می‌باشند (میدان‌های برگشت‌های دائمی).

بر اساس مشاهدات موج سواران محلی (شکایت‌ها)، کانال‌های برگشتی در طی طوفان‌های بزرگ پر می‌شوند (بنابراین، قله موج برای موج سواران کوتاه می‌شود). از سوی دیگر Dinger و همکارانش برای یک دوره ۱۷ ساله به صورت متناوب بر روی پروفیل‌های ساحلی خلیج مونتری مطالعه کردند (Dingler & Reiss, 2001). آنها مشاهده نمودند که کانال‌های برگشتی، توسط امواج ضعیف و طولانی مدت تابستانی که ماسه را به سمت دریا حمل می‌کنند، پر می‌شوند. همچنین این فرآیند توسط Short و Brander یک کار میدانی کوتاه مدت مشاهده شده است (۲۰۰۱). این فرآیند ناشناخته باقی مانده و امید است داده‌های ویدئویی بلند مدت جواب ابهامات را فراهم کند.

امواج پیشرو ایجاد شده توسط امواج طوفانی، باعث زیربری تپه‌های ساحلی در مدهای بلند هستند. امواج پیشرو، نتیجه برخورد امواج شکسته شده می‌باشند. اثر متقابل برخورد امواج و جریان‌های برگشتی می‌تواند سبب شکسته شدن امواج شود که این خود موجب کاهش امواج پیشرو می‌گردد. موج ایجاد شده (امواج پیشرو) در کانال‌های برگشتی در آزمایشگاه بوسیله Haller و همکاران اندازه‌گیری شده است (۲۰۰۲). آنها به این نتیجه رسیدند که ایجاد موج مرتفع، بستگی به چگونگی شکست موج در داخل کانال‌های برگشتی دارد. حداکثر ارتفاع، زمانی اتفاق افتاد که امواج هنوز در کانال‌های برگشتی شکسته نشدند، اما در نزدیکی خط ساحلی شکسته شدند. هیچ داده میدانی از امواج پیشرو در پشت جریان‌های برگشتی در دسترس نبوده و تنها به داده‌های آزمایشگاهی موجود بسنده شد.

بنابراین، مکانیسمی که مسئول فرسایش تپه‌های ساحلی در پشت جریان‌های برگشتی در محدوده نوک هلالی‌های بزرگ است، هنوز بخوبی شناخته نشده است. Haller (۲۰۰۲) و Macmahon (۲۰۰۶) دریافتند که یک منحنی بسته و مدور در پشت جریان‌های برگشتی و نزدیک به ساحل وجود دارد که بوسیله گرادیان فشار مخالف مانند امواج شکسته شده در نزدیکی ساحل ایجاد شده است.

روند منحنی احتمالاً در چگونگی فرسایش در محدوده نوک هلالی‌ها در پشت جریان‌های برگشتی نقش بسیار مهمی دارد.

به نظر نوک هلالی‌های کلاسیک ساحل (با طول موج تقریباً ۳۰ متر) در مسیر افزایش انرژی امواج بسیار گسترش یافته‌اند. Short (۱۹۹۹) بیان داشت که نوک هلالی‌های ساحلی در شاخ هلال‌های بزرگ، جایی که ساحل پر شیب فرسایش یافته و دانه‌های ماسه در دسترس می‌باشند، ایجاد می‌شوند. اشکال بزرگ این مطالعه آن است که اطلاعات به صورت سینوپتیکی بدست نیامد.

تپه‌های فرسایشی و نوک هلالی‌های خط ساحل توسط لیدار اندازه‌گیری شدند و همبستگی بین آنها مشخص گردید. متأسفانه عکس‌های هوایی

و دارای پهنای یکسان به دست آمد. برای ساحل یکنواخت، درصد کوچکتري از امواج پیشرو، توانایی رسیدن به پنجه تپه‌های ساحلی را دارند. در این محدوده پهنای ساحل بزرگتر با ساحل باریکتر مورد مقایسه قرار گرفت. بدین ترتیب با کم بودن پدیده‌های فرسایشی، کاهش چشمگیری در فرسایش رخ می‌دهد.

موقعیت این نقاط داغ نمی‌تواند ثابت باشند. هر چند در نهایت حفره‌های قابل توجهی را در تپه‌های ساحلی ایجاد می‌کنند. تپه‌های مورد بررسی پسروی تقریباً یکسانی را در بلند مدت نشان می‌دهند. بنابراین، موقعیت مجراهای برگشتی، نوک هلالی‌های بزرگ و تپه‌های فرسایشی هر کدام که جابجا شده باشند، یا در حالت سکون باشند و یا مجدداً ایجاد شده باشند، در طول خط ساحل به صورت اتفاقی قرار می‌گیرند. منبع اولیه رسوب سلول ساحلی قسمت‌های جنوبی خلیج مونتری، با فرسایش تپه‌های ماسه ساحلی و فرو ریزش آنها فراهم می‌شود. تپه‌های فروریخته در ساحل می‌تواند با فراهم نمودن ذخایر زیادی از ماسه، نوک هلالی‌های بزرگ خط ساحلی و مجاری برگشتی را در غیاب جریان‌های طولی ساحل پر نموده و بصورت یک پسخورند منفی عمل کند.

یادآوری این که فرسایش تپه‌های ساحلی بصورت اتفاقی رخ می‌دهد و پدیده‌ای نیست که در همه زمستان‌ها اتفاق بیفتد، حائز اهمیت می‌باشد. فرسایش شدید در طی ال نینو ۱۹۹۸-۱۹۹۷ اتفاق افتاد سالی که امواج طوفانی در مدت زمان نسبتاً طولانی در این منطقه وجود داشت (نگاره ۱۶). ال نینو ۱۹۹۸-۱۹۹۷ به همراه طوفان ۱۹۸۳-۱۹۸۲ شدیدترین طوفان‌های قرن بیستم بودند (Seymour, 1998) و ال نینو ۱۹۹۸-۱۹۹۷ سبب فرسایش شدیدی در بخش‌های جنوبی خلیج مونتری شد. تکرار طوفان‌ها باعث کاهش ساحل شنی شده و تپه‌های ساحلی را در برابر طوفان‌های بعدی بسیار آسیب پذیر می‌سازد. محاسبه‌هایی از حجم فرسایش تپه‌های ساحلی در بیش از ۱۸ کیلومتر از خط ساحل در طی ال نینو ۱۹۹۸-۱۹۹۷، ۱,۸۲۰,۰۰۰ متر مکعب برآورد شد که تقریباً ۷ برابر میانگین سالیانه دوره تاریخی فرسایش تپه‌های ساحلی ۲۷۰,۰۰۰ متر مکعب در سال می‌باشد (Thornton 2006 و همکاران). نقاط داغ در تصمیم‌گیری مدیریت مناطق ساحلی بسیار مهم می‌باشند. در پسروی‌های زیاد، تشخیص تغییرات مهم ایجاد شده از اهمیت زیادی برخوردار است. هم در زمان و هم در فضا، میانگین نرخ فرسایش با پتانسیل نقاط داغ در ارتباط است. نقاط داغ غالباً سبب وحشت مالکین و تلاش برای حفظ زمین‌هایشان می‌شود. در جنوب خلیج مونتری، نقاط داغ یک نقطه برای سال بعد قابل پیش‌بینی نیست.

جالب توجه است که بازگشت دوره‌ای و سیکلی نقاط داغ تنها برای خط سواحل شرقی ایالات متحده ثبت شده است. نوک هلالی‌های خط ساحلی که در ارتباط با جریان‌های برگشتی غالباً غربی و سواحل خلیج مکزیک‌اند، احتمالاً توسط اقلیم موج متفاوت ایجاد شده‌اند.

### ۳-۵- مورفودینامیک

حرکت مجراهای برگشتی و مقیاس زمانی‌شان هنوز ناشناخته باقی مانده است. مشخصاً، در برخی از مکان‌های طولی ساحل، جریان‌ها، حمل و



جریان برگشتی و اندازه نوک هلالی‌های بزرگ یکسان هستند. تغییرات طولی ساحل ناشی از نوک هلالی‌های خط ساحلی با تغییرات طولی ساحل در فضای برگشت‌ها در سطح اطمینان ۹۵٪ ارتباط دارد. بنابراین، نتیجه گرفته می‌شود که نوک هلالی‌های بزرگ با جریان‌های برگشتی در ارتباط است. نوک هلالی‌های خط ساحلی بوسیله طوفان و فرسایش شاخ‌ها محو می‌شوند (صاف می‌شوند) و محدوده را پر می‌کنند. مواد فروریخته ناشی از عقب‌نشینی تپه‌ها، منبع اصلی ماسه سواحل می‌باشد. این منبع از ماسه برای ساختن نوک هلالی‌های بزرگ قابل استفاده می‌باشد.

## منابع

- 1- Bowen, A.J., Inman, D.L., 1969. Rip currents, 2: laboratory and field observations. *J. Geophys. Res.* 74, 5479 5490.
- 2- Brander, R.W., Short, A.D., 2001. Flow kinematics of low-energy rip current systems. *J. Coast. Res.* 17 (2), 468 481.
- 3- Clark, R.A., Osborne, R.H., 1982. Contribution of Salinas River sand to the beaches of Monterey Bay, California, during the 1978 flood period: Fourier grain-shape analysis. *J. Sediment. Petrol.* 52 (3), 807 822.
- 4- Dinger, J.R., Reiss, T.E., 2001. Changes to Monterey Bay beaches from the end of the 1982 83 El Niño through the 1997 98 El Niño. *Mar. Geol.* 3029, 1 15.
- 5- Haller, M.C., Dalrymple, R.A., Svendsen, I.A., 2002. Experimental study of nearshore dynamics on a barred beach with rip currents. *J. Geophys. Res.* 107 (C6). doi:10.1029/2001JC000955 14-1-21.
- 6- Holland, K.T., Holman, R.A., Lippmann, T.C., Stanley, J., Plant, N., 1997. Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies. *IEEE J. Oceanic Eng.* 22 (1), 81 92.
- 7- Holman, R.A., 1986. Extreme value statistics for wave runup on a natural beach. *Coast. Eng.* 9, 527 544.
- 8- Holman, R.A., Sallenger, A.H., 1985. Setup and swash on a natural beach. *J. Geophys. Res.* 90, 945 953.
- 9- Holman, R.A., Symonds, G., Thornton, E.B., Ranasinghe, R., 2006. Rip spacing and persistence on an embayed beach. *J. Geophys. Res.* 111, C01006. doi:10.1029/2005JC002965.
- 10- Komar, P.D., 1971. Nearshore cell circulation of the formation of giant cusps. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 82, 2643 2650.
- 11- Lippmann, T.C., Holman, R.A., 1990. The spatial and temporal variability of sand bar morphology. *J. Geophys. Res.* 95 (C7), 11,575 11,590.
- 12- List, J.H., Farris, A.S., 1999. Large-scale shoreline response to storms and fair weather. *Proceed. Coastal Sediments '99*, Amer. Soc. Civil Eng., Reston, VA, pp. 1324 1338.
- 13- Lygre, A., Krogstad, H.E., 1986. Maximum entropy estimation of the directional distribution in ocean wave spectra. *J. Phys. Oceanogr.* 16 (12), 2052 2060.
- 14- MacMahan, J., 2000. Hydrographic surveying from a personal watercraft. *J. Surv. Eng.* 127 (1), 12 24.

و تصاویر ویدئویی در زمان بررسی‌های لیدار جهت بررسی ارتباط بین تپه‌های فرسایشی، نوک هلالی‌های بزرگ و کانال‌های برگشتی در دسترس نبود. چهار دستگاه ویدئو تا آن زمان در امتداد خط ساحلی بین موتتری و مارینا نصب شده بود و بدین ترتیب در مطالعات بعدی سیر تکامل زمانی جریان‌های برگشتی، نوک هلالی‌های و تپه‌های در حال فرسایش می‌تواند مشخص گردد.

## ۶- خلاصه و نتیجه

خلیج موتتری یک آزمایشگاه طبیعی برای مطالعه جریان‌های برگشتی، نوک هلالی‌های خط ساحلی و تپه‌های ساحلی فرسایش یافته است. این بررسی شامل ۱۸ کیلومتر از خط ساحلی خلیج موتتری در کالیفرنیا است. این خلیج ترکیبی است از خط ساحلی پشته‌دار شده ماسه‌ای که بوسیله گسترش تپه‌های ساحلی که ارتفاعشان به بیش از ۴۰ متر می‌رسد، بالا آمده است.

خط ساحلی و تپه‌ها یک مکان عمومی از فرسایش است که میانگین نرخ فرسایش از ۰/۵ تا ۲ متر در سال تغییر می‌کند. در اینجا ارتفاع موجی که از سایه دماغه به مرکز خلیج پیش می‌رود، افزایش پیدا می‌کند. در آنجا موج‌های برگردانده شده توسط کانیون زیردریایی خلیج موتتری به هم می‌رسند که در نتیجه موجب ایجاد موج‌های مرتفع بزرگی می‌شوند. امواج با یک حالت تقریباً طبیعی به تمام طول ساحل برخورد می‌کنند، زیرا که باریکتر شدن دهانه بوسیله دماغه در شمال و جنوب، موجب شکسته شدن کامل موج در امتداد کانیون شده و تعیین جهت‌های تاریخی (مقیاس زمانی زمین‌شناسی) خط ساحلی در واکنش به اقلیم موج، ناشی از توسعه خوب جریان‌های برگشتی و در ارتباط با نوک هلالی‌های بزرگ (۲۰۰ متر) در امتداد تمام خط ساحل می‌باشد. گرادیان بزرگ طولی ساحل در اقلیم موج به دلیل پیوستگی گرادیان طولی ساحل در مقیاس مورفودینامیک است.

تپه‌های در حال فرسایش و مورفولوژی خط ساحل با استفاده از لیدار در مدت زمان حداکثر فرسایش (اکتبر ۱۹۹۷، آوریل ۱۹۹۸) اندازه‌گیری شد. مونیتورینگ زمانی از سطح ساحل هر دو هفته یکبار بوسیله ATV نصب شده بر روی ماشین به همراه KGPS برای تعیین کردن منحنی میزان ۲ متری خط ساحلی انجام شد. مجاری برگشتی بوسیله واترکرافت خصوصی مجهز به ردیاب صوتی و KGPS بررسی شد. طیف امواج جهت‌دار در آب‌های عمیق و در ۳ مکان در داخل جنوب خلیج موتتری اندازه‌گیری شد.

ارتفاع یافتن تپه‌های فرسایشی در محدوده نوک هلالی‌های بزرگ و در ارتباط با مجراهای برگشتی رخ داده است. ساحل در محدوده نوک هلالی‌های بزرگ بسیار باریک است. این مسئله به امواج پیشرو ناشی از امواج طوفان‌های بزرگ اجازه می‌دهد در طی مدهای بلند به پنجه تپه‌ها رسیده و با زیربری آنها سبب فروریختن تپه‌ها بر روی ساحل شود که در نتیجه آن تپه‌ها عقب‌نشینی می‌کنند. تغییرات طولی ساحل ناشی از حجم تپه‌های در حال فرسایش با تغییرات طولی ساحل ناشی از نوک هلالی‌های ساحل در سطح اطمینان ۹۵٪ ارتباط دارد. بنابراین، نتیجه گرفته می‌شود که موقعیت تپه‌های فرسایش یافته با محدوده نوک هلالی‌های بزرگ در ارتباط است.

جریان‌های برگشتی در مرکز نوک هلالی‌های بزرگ واقع شده‌اند. فضای



and beaches: a synthesis. *Mar. Geol.* 70, 251-285.

### پی نوشت

1- Monterey Bay

2- Mega-cusps

3- Rip current

4 - Surf zone

5- Termed resets

6- RIPEX

7- Kinematics

8- Salinas River

9- Rip channel

10- Santa Cruz

11- Piños

12- Bathymetric

13- Salinas River

14- Elkorn Slough

15- Moss Landing

16- Sand City

17- Marina

18- Fort Ord

19- Mean sea level

20- Mean high-high water

21- Light Detection and Ranging

22- Delany triangulation interpolation.

23- Significant wave height

24- Peak period

25- Mean wave direction of peak period

26- Cross-correlated

۲۷- **e-folding**: میزان تغییر تصاعدی به وسیله عامل  $e$  و یا یک روی  $e$  (یک آیم) به هنگامی که میزان تغییر تصاعدی  $e$  تا حدود ۱ برسد. زمان مورد نیاز برای تغییر و یا مقدار مسافتی که طی آن تغییر می کند،  $e$  برابر نامیده می شود. بنابراین زمان  $e$  برابر با فاصله  $e$  برابر گفته می شود. (مترجم)

28- Outer Banks

29- Cape Cod

15- MacMahan, J., Reniers, A.J.H.M., Thornton, E.B., Stanton, T.P., 2004. Infragravity rip-current pulsations. *J. Geophys. Res.* 109, C01033 doi:10.1029/2003JC002068.

16- MacMahan, J.H., Thornton, E.B., Stanton, T.P., Reniers, A.J.H.M., 2005. RIPEX observations of a rip current system. *Mar. Geol.* 218 (1 4), 113-134.

17- MacMahan, J., Thornton, E.B., Reniers, A.J.H.M., 2006. Rip current review. *J. Coast. Eng.* 53 (2 3), 191-208.

18- Revell, D.L., Komar, P.D., Sallenger, A.H., 2002. An application of LIDAR to analyses of El Nino erosion in the Netarts Littoral Cell, Oregon. *J. Coast. Res.* 18 (4), 792-801.

19- Sallenger, A.H., Stockdon, H., Haines, J., Krabill, W.B., Swift, R.N., Brock, J., 2000. Probabilistic assessment of beach and dune changes. *Proc. 27th Int'l Conf. Coastal Eng., Sidney.* ASCE, pp. 3035-3047.

20- Sallenger, A.H., Krabill, W.B., Swift, R.N., Brock, J., List, J., Hansen, M., Holman, R.A., Manizade, S., Sontag, J., Meredith, A., Morgan, K., Yunkel, J.K., Frederick, E.B., Stockdon, H., 2003.

21- Seymour, R.J., 1998. Effects of El Niños on the West Coast wave climate. *Shore Beach* 66 (3), 3-6.

22- Shih, S.M., Komar, P.D., 1994. Sediments, beach morphology and sea cliff erosion within an Oregon Coast Littoral Cell. *J. Coast. Res.* 10, 144-157.

23- Short, A.D., 1979. Three-dimensional beach stage model. *J. Geol.* 553, 571.

24- Short, A.D., 1999. *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics.* John Wiley and Sons, Ltd., New York, NY, p. 379.

25- Short, A.D., Brander, R.W., 1999. Regional variations in rip density. *J. Coast. Res.* 15 (3), 813-822.

26- Short, A.D., Hesp, P.A., 1982. Wave, beach and dune interactions in South Eastern Australia. *Mar. Geol.* 48, 259-284.

27- Symonds, G., Ranasinghe, R., 2000. On the formation of rip currents on a plane beach. *Proc. 27th Int'l Conf. Coastal Eng., Sidney.* ASCE, pp. 468-481.

28- Thornton, E.B., Guza, R.T., 1981. Energy saturation and phase speeds measured on a natural beach. *J. Geophys. Res.* 8, 9499-9508.

29- Thornton, E.B., Sallenger, A.H., Conforto Sesto, J., Egley, L.A., McGee, T., Parsons, A.R., 2006. Sand mining impacts on long-term erosion in southern Monterey Bay. *Mar. Geol.* 229 (1 2), 45.

30- U.S. Army Corps of Engineers 1985. *Geomorphology Framework Report Monterey Bay.* Prepared by Dingler, J.R., U.S. Geological Survey, CCSTWS 85-2.

31- Van Enckevort, I.M.J., Ruessink, B.G., Coco, G., Suzuki, K., Turner, I.L., Plant, N.G., Holman, R.A., 2004. Observations of nearshore crescentic sandbars. *J. Geophys. Res.* 109, C06028. doi:10.1029/2003JC002214.

32- Wright, L.D., 1980. Beach cut in relation to surf zone morphodynamics. *Proc. 17th International Conf. on Coastal Engineering.* ASCE, pp. 978-996.

33- Wright, L.D., Short, A.D., 1984. Morphodynamic variability of zones