

افزایش تراز دریاها در اثر گرم شدن جهانی (مروری بر کارهای گذشته)

سید حامد آل محمدⁱ; رضا اردکانیانⁱⁱ

چکیده

افزایش تراز آب دریاها در دهه گذشته روند رو به رشدی داشته است. اطلاعات تراز آب دریاها امروزه به کمک اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای دقت بسیار بالایی دارد. اندازه‌گیری‌های انجام شده در ایستگاه‌های ساحلی روند افزایشی $3/1 \pm 0/4$ میلی‌متر در سال را در ۵۰ سال گذشته برای تراز آب دریاها نشان می‌دهند در حالی که اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط ماهواره‌های TOPEX/Poseidon و Jason-1 مقدار $3/1 \pm 0/4$ میلی‌متر در سال را برای سال‌های ۱۹۹۳ به بعد گزارش می‌دهند. در این مقاله به بررسی مقدار افزایش تراز آب دریاها و همچنین علل آن با توجه به پژوهش‌های انجام شده پرداخته خواهد شد.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، افزایش تراز آب دریا، انبساط گرمایی، ذوب یخ، ذخیره زمینی آب

// :

// :

ⁱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، خیابان آزادی، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی عمران، alemohammad@mehr.sharif.edu

ⁱⁱ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، خیابان آزادی، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی عمران، ardakanian@sharif.edu

۱- مقدمه

حقیقت آب و هوا آن‌چیزی است که در حال رخ دادن است یا در آینده‌ای بسیار نزدیک (به طور مثال چند روز) رخ خواهد داد. از سوی دیگر اقلیم شرایط عمومی آب و هوا می‌باشد. به بیان دیگر اقلیم شرایط متوسط آب و هوا در یک منطقه است.

روند رو به رشد استفاده از سوخت‌های فسیلی پس از انقلاب صنعتی (سال ۱۸۵۰ میلادی) و رشد فزاینده این روند در چند دهه اخیر باعث افزایش بیش از حد تولید گازهای گلخانه‌ای به ویژه دی‌اکسیدکربن شده است. این عامل باعث سرعت بخشیدن به پدیده‌ی "گرم شدن

برای بیان شرایط "آب و هوا"^۳ در یک زمان و مکان مشخص و همچنین برای تعیین "اقلیم"^۴ یک منطقه پارامترهایی مانند دما، هوا، میزان بارش، سرعت باد، میزان ابری بودن هوا، فشار هوا و ... بیان می‌شود. ولی بین "آب و هوا" و "اقلیم" تفاوت وجود دارد [1]. آب و هوا شرایط فعلی جوی است که شامل دما، بارش، باد، میزان ابری بودن و میزان رطوبت در یک مکان مشخص می‌شود. در

³ Weather

⁴ Climate

جهانی^۱ شده است. از تبعات این پدیده برهم خوردن ایستایی روند متغیرهای اقلیمی در سطح زمین می‌باشد که به آن "تغییر اقلیم"^۲ می‌گویند.

این پدیده اثرات زیادی بر کشاورزی، سیستم‌های منابع آب، محیط زیست، صنعت و ... خواهد داشت که لزوم مطالعه و بررسی دقیق‌تر آن را آشکار می‌سازد.

در سال ۱۹۸۸ میلادی هیئتی با نام شورای بین‌الدول تغییر اقلیم^۳ (IPCC) با همکاری دو ارگان سازمان ملل متحد یعنی سازمان جهانی هواشناسی^۴ (WMO) و برنامه محیط‌زیست سازمان ملل متحد^۵ (UNEP) تشکیل شد. یکی از اهداف اصلی این شورا تحقیق و بررسی در رابطه با مقوله‌های علمی و فنی و خطرات بالقوه تغییرات آب و هوا و همچنین اثرات آن در سطح جهان و تعیین سیاست‌های مقابله با آن می‌باشد. این شورا در سال ۱۹۹۰ میلادی اولین گزارش ارزیابی خود را در رابطه با تغییر اقلیم منتشر کرد. آخرین و چهارمین گزارش آن نیز در سال ۲۰۰۷ میلادی منتشر شده است.

در چهارمین گزارش این شورا [2] آمده است که متوسط دمای سطح زمین در طی دوره ۱۰۰ ساله ۱۹۰۶ تا ۲۰۰۵ به میزان $0.74/100$ سانتی‌گراد با خطای ± 0.18 سانتی‌گراد افزایش یافته است و این در حالی است که افزایش دما در ۵۰ سال دوم این دوره نسبت به ۵۰ سال اول آن دو برابر بوده است. همچنین تغییرات مقادیر اکسترمم دما با گرم شدن اقلیم سازگار است؛ یعنی افزایش مقادیر ماکزیمم دما با کاهش تعداد روزهای یخبندان، افزایش تعداد روزهای با گرمای شدید و کاهش تعداد روزهای با سرمای شدید در ۷۰ تا ۷۵ درصد مناطق سطح زمین، که داده آن در دسترس بوده است، تطابق دارد. از این مقایسه، نتیجه شده است که تغییری که در اقلیم مناطق مختلف مورد بررسی، رخ داده است، در اثر پدیده گرم‌شدن جهانی می‌باشد و این تبعات و تغییرات، تغییر اقلیم نامیده شده است. از جمله شواهد تغییر اقلیم که در دو دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است، تغییرات تراز آب دریاها می‌باشد. اجزا

متعددی در سیستم کره زمین به صورت غیرخطی در تغییرات تراز آب دریاها اثر گذار هستند که شناسایی و درک هر یک از آنها یک اقدام مؤثر در شناسایی هر چه بیشتر تغییر اقلیم می‌باشد.

در فصل پنجم گزارش چهارم کارگروه ۱ شورای بین‌الدول تغییر اقلیم در رابطه با تغییرات تراز آب دریاها آمده است: "امروزه تغییرات تراز آب دریا از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است چون این موضوع می‌تواند اثرات زیادی بر جوامع ساکن در مناطق ساحلی و جزایر داشته باشد."

نظر به اهمیت موضوع تراز آب دریاها و تبعاتی که کاهش یا افزایش این تراز در بر خواهد داشت در این مقاله به ارائه مروری بر دانش موجود در زمینه تغییر تراز آب دریاها و کارهای انجام شده در این زمینه پرداخته خواهد شد.

۲- تغییرات مشاهده شده در تراز آب دریاها

تا قبل از سال ۱۹۹۰ اطلاعات تراز آب دریاها توسط ایستگاه‌های ساحلی^۶ اندازه‌گیری می‌شد. طول اطلاعات موجود در این بازه در اکثر ایستگاه‌ها به حداکثر ۵۰ سال می‌رسد و معدود ایستگاه‌هایی هستند که اطلاعات بیشتر از ۵۰ سال داشته باشند. مطالعات Douglas و Peltier نشان داد که با استفاده از اطلاعات ایستگاه‌های با داده‌ی بیش از ۵۰ سال مقدار تغییرات تراز آب دریاها در قرن بیستم برابر با $1/84 \pm 0.35$ میلیمتر در سال بدست می‌آید [3,4]. این مقدار بسیار بیشتر از مقداری است که برای دوره قبل از انقلاب صنعتی (قبل از ۱۸۵۰ میلادی) از روی رسوبات اقیانوس‌ها بدست آمده است (۱ میلیمتر در سال) [5].

مطالعات دیگری که توسط افرادی چون Holgate و Woodworth [6] و همچنین Church و همکاران [7] انجام شده است مقدار افزایش تراز آب را $1/8$ میلیمتر در سال برای بازه ۱۹۵۰ تا ۲۰۰۰ نشان می‌دهد که با مقدار بدست آمده توسط Douglas و Peltier هم‌خوانی دارد.

در مطالعات انجام شده بر روی داده‌های ایستگاه‌های ساحلی هیچ‌گونه شتابی (روند افزایشی فزاینده) در

¹ Global Warming

² Climate Change

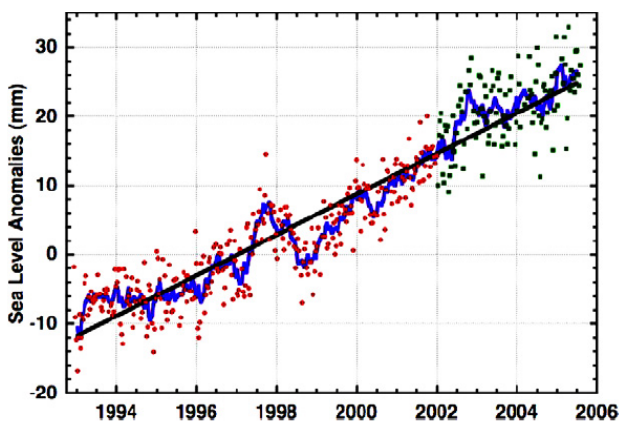
³ Intergovernmental Panel of Climate Change

⁴ World Meteorological Organization

⁵ United Nation Environmental Program

⁶ Tide Gauges

قطعیت‌هایی در این زمینه وجود دارد. تغییر تراز دریاها ناشی از مجموعه اجزا مختلفی در سیستم کره زمین است که هر یک به صورتی کاملاً غیرخطی در این تغییرات دخیل هستند، در نتیجه هر گونه تلاشی برای درک و کاهش عدم قطعیت‌ها در این عوامل از اهمیت خاصی برخوردار است. عوامل اصلی دخیل در تغییر تراز دریاها در اثر تغییر اقلیم را می‌توان در دو گروه (۱) انبساط گرمایی و (۲) تبادل آب بین اقیانوس‌ها و دیگر مخازن آبی (شامل توده‌های یخ، یخچال‌های طبیعی، مخازن آب احداث شده توسط بشر بر روی زمین و اتمسفر) طبقه‌بندی کرد که در ادامه هر یک از عوامل شرح داده می‌شوند [2].



شکل (۱): تراز متوسط آب دریا از روی اطلاعات TOPEX و Jason-1 نقاط نشان‌دهنده اطلاعات خام می‌باشد (قرمزها مربوط به TOPEX و سبزها مربوط به Jason-1) خط آبی رنگ، نمودار هموار اطلاعات تراز آب ۶۰ روزه می‌باشد. خط مشکی هم بهترین خط گذرا از داده‌ها به روش حداقل مربعات است. [9, 10]

۳-۱- انبساط گرمایی

تراز آب دریاها در اثر گرم شدن افزایش و در اثر سرد شدن کاهش خواهد یافت چون چگالی آب تغییر خواهد کرد. اگر افزایش دما ثابت بود، تغییر متوسط تراز دریای آزاد همسان با افزایش میزان گرمای دریاها بود. ولی از آنجایی که آب‌های گرم نسبت به آب‌های سرد با افزایش یکسان مقدار گرما، بیشتر پخش می‌شوند و همچنین آب در فشارهای بالا بیشتر از فشارهای کم پخش می‌شود، تغییر تراز متوسط آب‌های آزاد به توزیع سه‌بعدی تغییرات دمای اقیانوس‌ها وابسته است [2].

افزایش تراز آب دریاها در سال‌های پایانی قرن بیستم مشاهده نشده است ولی مطالعات White و Church بر روی داده‌های بازسازی شده تراز آب دریاها نشان داد که یک روند افزایشی $1/7$ میلیمتر در سال به ازای هر قرن در داده‌های وجود دارد [8].

در سال ۱۹۹۲ با ارسال ماهواره TOPEX/Poseidon به فضا اندازه‌گیری تراز آب دریاها با دقت بالا آغاز شد. در سال ۲۰۰۱ نیز ماهواره Jason-1 در ادامه مأموریت ماهواره TOPEX به فضا پرتاب شد و هم‌اکنون یک مجموعه داده ۱۶ ساله از تراز آب دریاها در اختیار می‌باشد. این ماهواره هر ۱۰ روز یکبار به طور کامل دور زمین می‌چرخد و در نتیجه، اطلاعات آن از تراز آب دریاها به صورت ۱۰ روز یکبار است. دقت اندازه‌گیری‌های آن در حدود ۴-۵ میلیمتر است. این اطلاعات تا سال ۲۰۰۶ یک افزایش $3/1 \pm 0/4$ میلیمتر در سال را برای تراز آب دریاها نشان می‌دهد که در شکل شماره ۱ نشان داده شده است [9, 10]. خطای این داده‌ها مربوط به خطای کالیبراسیون تجهیزات اندازه‌گیری داخل ماهواره است که توسط اطلاعات اندازه‌گیری شده با ایستگاه‌های ساحلی کالیبره شده است و خطای آن حذف شده است [11].

به وضوح قابل مشاهده است که اطلاعات ماهواره وجود یک روند افزایشی در تراز آب را اثبات می‌کنند اما سؤال این‌جاست که آیا این روند در سال‌های آتی هم ادامه خواهد داشت یا اینکه این یک پدیده کوتاه مدت می‌باشد.

نکته قابل توجه دیگر یکسان نبودن میزان تغییرات در مکان‌های مختلف است. درست است که بر طبق اطلاعات ماهواره‌ای تراز آب دریا به طور قابل ملاحظه‌ای روند افزایشی پیدا کرده است ولی بر طبق اطلاعات ایستگاه‌های ساحلی در بعضی مناطق مانند غرب اقیانوسیه مقدار افزایش تراز آب حدود ۵ برابر مقدار محاسبه شده توسط اطلاعات ماهواره‌ای می‌باشد و بر عکس در مناطقی چون شرق اقیانوسیه تراز آب دریا در مدت مشابه کاهش داشته است.

۳- طبقه‌بندی عوامل افزایش تراز آب دریاها

در راستای درک علل افزایش تراز آب دریاها تحقیقات و پژوهش‌های متعددی صورت گرفته ولی هنوز عدم

اطلاعات مربوط انبساط گرمایی اقیانوس‌ها از طریق اندازه‌گیری‌های عمق - دما که توسط کشتی‌ها انجام می‌شود بدست می‌آید. این اطلاعات نشان می‌دهد که در طول ۵۰ سال گذشته اقیانوس‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای ولی نه به طور یکنواخت گرم شده‌اند [12]. در مقیاس جهانی انبساط گرمایی باعث افزایش تراز دریا در حدود ۰/۴ میلیمتر در سال در ۵۰ سال گذشته شده است [13,14]. ولی بر طبق تحقیقات انجام شده در طول سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۶ میزان اثر انبساط گرمایی در افزایش تراز دریا در حدود ۱/۵ میلیمتر در سال بوده است [15,16,17]. اثر انبساط گرمایی نیز مشابه تغییر تراز آب دریاها در مکان‌های مختلف متفاوت است.

۳-۲- تبادل آب بین اقیانوس‌ها و دیگر مخازن آبی

تراز آب دریاها اگر آبی به آن‌ها اضافه شود افزایش می‌یابد و اگر آبی از آن‌ها کاسته شود، کاهش می‌یابد. در این بخش سه توده جرم اصلی یعنی اتمسفر، یخ‌ها و یخچال‌ها و ذخیره زمینی آب^۱ مورد بررسی قرار خواهند گرفت. میزان آب موجود در اتمسفر معادل ۳۵ میلیمتر از تراز آب دریاها می‌باشد و روند تغییر در این ذخیره آب (اتمسفر)، به میزان ۰/۰۴ میلیمتر در سال که در دهه‌های اخیر مشاهده شده است، در مقایسه با یخ‌های اقیانوس‌ها، یخچال‌های طبیعی و آب‌های ذخیره شده بر روی زمین ناچیز است [2]. اندازه‌گیری‌های مشاهداتی از یخچال‌های موجود بر روی سطح زمین بسیار محدود است و یک بخش بسیار کوچکی از آن‌ها به صورت مستمر پایش می‌شوند. ولی وقتی که مشاهدات این یخچال‌ها به کل سطح زمین و برای بقیه یخچال‌ها تعمیم داده می‌شود، نشان می‌دهد که حدود ۰/۵ میلیمتر در سال در ۴۰ سال گذشته در افزایش تراز دریاها مؤثر بوده‌اند [2]. این مقدار برای بازه ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۳ برابر با ۰/۸ میلیمتر در سال بوده است [18].

تأثیر یخ‌های گروئینلند و قطب جنوب در افزایش تراز آب دریاها هنوز به طور کامل معلوم نشده است. ولی اندازه‌گیری‌هایی که به کمک سنجش از دور بر روی تراز یخ در سطح این دو توده در دو دهه اخیر انجام شده است نشان

می‌دهد که مقادیر یخ این دو توده در حال کاهش است و در حدود ۰/۱ تا ۰/۲ میلیمتر در سال (در ۲۰ سال اخیر) در افزایش تراز آب دریاها مؤثر بوده‌اند [19,20,21]. از سال ۲۰۰۲ که ماهواره^۲ GRACE به فضا پرتاب شده است امکان اندازه‌گیری تغییرات زمانی و مکانی در جرم‌های سیال و جامد در زیر و روی پوسته‌ی زمین فراهم شده است. در مقایسه با اندازه‌گیری‌های سنجش از دور گذشته که فقط تراز یخ را اندازه‌گیری می‌کردند و باید با استفاده از چگالی یخ مقدار آن تخمین زده می‌شد، ماهواره GRACE اطلاعات جرم یخ و تغییرات آن را مستقیماً اندازه‌گیری می‌کند. مشاهدات GRACE از گروئینلند مقادیر ارائه شده توسط اندازه‌گیری‌های قبلی را تأیید می‌کند. در قطب جنوب هم GRACE کاهش حجم یخ در ۳-۴ سال گذشته را نشان می‌دهد [22,23,24].

تغییرات در شوری آب دریاها می‌تواند معیاری از نوب شدن یخ‌های موجود در اقیانوس‌ها باشد ولی به دلیل نبود دقت کافی در تخمین حجم یخ‌های موجود در اقیانوس‌ها و همچنین تخمین تغییر شوری آب، خطای برآورد این تغییرات در آب دریاها بسیار بالا است. یکی دیگر از موارد مطرح در بحث تبادل آب بین دریاها و مخازن آبی دیگر، تبادل آب با ذخیره زمینی آب است که تغییرات در این ذخیره باعث تغییر در تراز آب دریاها می‌شود. ذخیره زمینی آب شامل تمامی مقدار آبی است که در سطح و زیر زمین موجود است. یعنی تمامی مخازن، دریاچه‌ها، رواناب سطحی، لایه‌های آبدار زیر زمین و ... را شامل می‌شود.

تغییرات در ذخایر زمینی آب در اثر دو عامل اقلیمی و انسانی اتفاق می‌افتد و در حقیقت این تغییرات از شرایط اقلیمی، اثرات مستقیم بشر در چرخه آب و تغییرات بشر در سطح زمین (مانند ساخت سد، ایجاد سیستم‌های آبیاری، حفر چاه‌های آب و ...) ناشی می‌شود. در مدل-سازی اثر فعالیت‌های بشر در تغییر ذخایر زمینی آب با توجه به در دسترس نبودن اطلاعات کافی تحقیقات زیادی انجام نشده است. ولی امروزه با فعالیت ماهواره‌های مختلف و جمع‌آوری اطلاعات تغییرات جرم آب در مناطق مختلف می‌توان این اثر را برآورد کرد.

Ramillien و همکاران در سال ۲۰۰۴ در یک پروژه

^۱ Land Water Storage

^۲ Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)

صورت یک مدل خطی برای هر یک از مخازن جرمی آب (شامل مخازن آب بر روی زمین، آب باقیمانده در داخل جو و ...) با استفاده از از ضرایب فوق بیان می‌شود. در پایان نیز اثر این تغییرات در افزایش تراز آب دریا محاسبه شده است. بر طبق این پژوهش تغییرات در ذخیره زمینی آب در این ۲۷ حوضه مورد بررسی، باعث افزایش ۰/۱۹ میلیمتر در سال (در بازه ۲۰۰۳-۲۰۰۶) در تراز آب دریا شده است. دقت این محاسبه $\pm 0/06$ میلیمتر در سال است [28].

Rodell, Famiglietti در سال ۲۰۰۱ به تحلیل تغییرات ذخیره زمینی آب در ایلینویز با استفاده از اطلاعات GRACE پرداختند که البته اطلاعات آنان واقعی نبود چون هنوز ماهواره در مدار خود قرار نگرفته بود و داده-ای ارسال نشده بود [29]. همچنین Schmidt و همکاران در سال ۲۰۰۵ به بررسی تغییرات حجم آب قاره‌ای با استفاده از مشاهدات ماهواره GRACE پرداختند [30].

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

درک و فهم از تغییرات تراز آب دریاها در دو دهه اخیر به کمک استفاده از روش‌های سنجش از دور و به خصوص استفاده از ماهواره‌ها افزایش یافته است. اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط ماهواره‌ها یک روند افزایشی در تراز آب دریاها را در قرن بیستم نشان داده است ولی آن چیزی که هنوز نامعین مانده این است که آیا این روند در آینده هم همین‌گونه خواهد بود، روند پرشتاب‌تری خواهد داشت یا اینکه کندتر خواهد شد. استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای در چند سال اخیر کمک کرده تا بتوان اثر تغییر در ذخیره زمینی آب را در افزایش تراز آب دریاها محاسبه کرد. البته این زمینه جای کار و بحث بیشتر دارد و ولی آنچه که کمتر مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته اثر تغییر در یخ-های قطب جنوب و گروئینلند در افزایش تراز دریاهاست که امید است با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای موجود این مجهول نیز تا حدودی معلوم شود. همانطور اشاره شد ماهواره GRACE اطلاعات بسیار مناسبی را برای انجام پژوهش در این زمینه فراهم آورده است.

تحقیقاتی با استفاده از یک روش جدید بر پایه روش‌های معکوس خطی به جداسازی اثر هر یک از مخازن سیال (شامل: اقیانوس‌ها، جو و کل ذخیره زمینی آب شامل: برف، رطوبت خاک، آب زیر زمینی و یخ‌ها) با استفاده از اطلاعات ماهانه ماهواره GRACE پرداخته‌اند. جهت مقایسه نتایج این مدل با واقعیت نیز از یک مدل هیدرولوژیکی جهانی در سطح ۷۱ حوضه آبریز استفاده شده و نشان داده شده است که استفاده از مدل طراحی شده در این پژوهش می‌تواند در بازسازی تغییرات جرم آب به صورت ماهانه با دقت ۱ سانتی‌متر مؤثر باشد [25]. Ramillien و همکاران در سال ۲۰۰۵ با استفاده از اطلاعات واقعی ۲ ساله ماهواره GRACE و همچنین مدلی که در پژوهش قبلی خود آن را طراحی کرده بودند توانستند تغییرات ذخیره آب قاره‌ای را در یک بازه ۲ ساله بررسی کنند. همچنین در این‌جا آنان به تخمین مقدار تبخیر و تعرق در هر حوضه با استفاده از معادله بیلان آب که تغییرات زمانی حجم آب را به بارش، تبخیر و تعرق و رواناب مرتبط می‌کند، پرداختند [26].

Ngo-Duc و همکاران در سال ۲۰۰۷ به مقایسه نتایج بدست آمده توسط Ramillien و همکاران در سال ۲۰۰۵ با نتایج مدل^۱ ORCHIDEE پرداخته‌اند. در این پژوهش با اصلاح مدل موجود ORCHIDEE نتایج بهتری که قابل قیاس با نتایج بدست آمده از GRACE در تحقیقات Ramillien و همکاران است، بدست آمده است. تصحیح صورت گرفته در این مدل، ساخت یک الگوی محاسبه مقدار آب زهکش شده و اضافه کردن آن به میزان ذخیره زمینی آب، بوده است [27].

Ramillien و همکاران در سال ۲۰۰۸ با استفاده از یک مدل حداقل مربعات و با تخمین چهار ضریب هارمونیک به صورت معادل ارتفاع آب به کمک اطلاعات ماهواره GRACE به تخمین تغییرات تراز آب دریا در ۲۷ حوضه آبریز بزرگ دنیا پرداخته‌اند. این چهار ضریب برای چهار حجم سیال شامل جو زمین، اقیانوس‌ها، آب داخل خاک و ذخایر برف محاسبه می‌شود. این اطلاعات در نهایت به

¹ Organizing Carbon and Hydrology in Dynamic Ecosystems

- S. Levitus; J.I. Antonov; T.P. Boyer, [۱۲]
 "Warming of the World Ocean, 1955–2003",
 Geophys. Res. Lett. 32 (L02604) (2005),
 doi:10.1029/2004GL021592.
- J. Antonov; S. Levitus; T.P. Boyer, [۱۳]
 "Thermosteric sea-level rise, 1955–2003",
 Geophys. Res. Lett. 32 (2005), doi:10.1029/
 2005GL023112.
- M. Ishii; M. Kimoto; K. Sakamoto; S.I.
 Iwasaki, "Steric sea level changes estimated
 from historical ocean subsurface temperature
 and salinity analyses", J. Oceanogr. 62 (2)
 (2006) 155–170. [۱۴]
- A. Lombard; A. Cazenave; S. Guinehut; P.-Y.
 Le Traon; C. Cabanes, "Perspectives on
 present-day sea level change", Ocean Dyn.
 (2006), doi:10.1007/s10236. [۱۵]
- A. Lombard; A. Cazenave; P.-Y. Le Traon;
 M. Ishii, "Contribution of thermal expansion
 to present-day sea-level rise revisited", Global
 Planet. Change 47 (2005) 1–16. [۱۶]
- J.K. Willis; D. Roemmich; B. Cornuelle,
 "Interannual variability in upper ocean heat
 content, temperature, and thermosteric
 expansion on globa [۱۷]
- M. Dyugero; M.F. Meier, "Glaciers and the
 Changing Earth System: A 2004 Snapshot,
 Institute of Arctic and Alpine Research",
 Boulder, Colorado, USA, 2005. [۱۸]
- W. Krabill; W. Abdalati; E. Frederick; S.
 Manizade; C. Martin; J. Sonntag; R. Swift; R.
 Thomas; W. Wright; J. Yungel, "Greenland
 ice sheet: High-elevation balance and
 peripheral thinning", Science 289 (2000)
 428–430. [۱۹]
- W. Krabill; E. Hanna; P. Huybrechts; W.
 Abdalati; J. Cappelen; B. Csatho; E.
 Frederick; S. Manizade; C. Martin; J.
 Sonntag; R. Swift; R. Thomas; J. Yungel,
 "Greenland Ice Sheet: Increased coastal
 thinning", Geophys. Res. Lett. 31 (2004),
 doi:10.1029/2004GL021533. [۲۰]
- E. Rignot; D. Braaten; S.P. Gogineni; W.B.
 Krabill; J.R. McConnell, "Rapid discharge
 from southeast Greenland glaciers", Geophys.
 Res. Lett. 31 (2004),
 doi:10.1029/2004GL019474. [۲۱]
- J.L. Chen; C.R. Wilson; B.D. Tapley,
 "Satellite gravity measurements confirm
 accelerated melting of the Greenland ice
 sheet", Science doi: 10.1126/science.1129007 [۲۲]
- I. Velicogna; J. Wahr, "Greenland mass
 balance from GRACE", Geophys. Res. Lett.
 32 (2005) L18505, doi:10.1029/
 2005GL023955. [۲۳]
- S. Henderson; S. Holman, and L. Mortensen [۱]
 (Eds.), Modified with permission from Global
 Climates - Past, Present, and Future, EPA
 Report No. EPA/600/R-93/126. U.S.
 Environmental Protection Agency, Office of
 Research and Development, Washington, DC,
 pp. 1 - 6.
- Solomon, S.; D. Qin; M. Manning; Z. Chen;
 M. Marquis; K.B. Averyt; M. Tignor and
 H.L. Miller (eds.), IPCC, 2007: Climate
 Change 2007: The Physical Science Basis.
 Contribution of Working Group I to the
 Fourth Assessment Report of the
 Intergovernmental Panel on Climate Change,
 Cambridge University Press, Cambridge,
 United Kingdom and New York, NY, USA,
 2007. [۲]
- B.C. Douglas, "Sea level change in the Era of
 the recording tide gauges", in: B.C. Douglas;
 M.S. Kearney; S.P. Leatherman (Eds.), Sea-
 Level Rise: History and Consequences, Int.
 Geophys. Ser., vol. 75, Academic Press, San
 Diego, CA, 2001, pp. 37–64. [۳]
- W.R. Peltier; "Global glacial isostatic
 adjustment and modern instrumental records
 of relative sea level history", in: B.C.
 Douglas; M.S. Kearney; S.P. Leatherman
 (Eds.), Sea-Level Rise: History and
 Consequences, Int. Geophys. Ser., vol. 75,
 Academic Press, San Diego, 2001, pp. 65–95. [۴]
- K.G. Miller, "The Phanerozoic record of
 global sea-level change", Science 310 (2005)
 1293–1298. [۵]
- S.J. Holgate; P.L. Woodworth, "Evidence for
 enhanced coastal sea-level rise during the
 1990s", Geophys. Res. Lett. 31 (L07305)
 (2004), doi: 10.1029/2004GL019626. [۶]
- J.A. Church; N.J. White; R. Coleman; K.
 Lambeck; J.X. Mitrovica, "Estimates of the
 regional distribution of sea-level rise over the
 1950 to 2000 period", J. Clim. 17 (13) (2004)
 2455–2474. [۷]
- J.A. Church; N.J. White, "A 20th-century
 acceleration in global sea-level rise",
 Geophys. Res. Lett. 33 (2006), doi:
 10.1029/2005GL024826. [۸]
- A. Cazenave; R.S. Nerem, "Present-day sea-
 level change: Observations and causes", Rev.
 Geophys. 42 (2004), doi:10.1029/
 2003RG000139. [۹]
- E.W. Leuliette; R.S. Nerem; G.T. Mitchum,
 "Results of TOPEX/Poseidon and Jason-1
 calibration to construct a continuous record of
 mean sea level", Mar. Geod. 27 (2004) 79–94. [۱۰]
- G.T. Mitchum, "An improved calibration of
 satellite altimetric heights using tide gauge
 sea levels with adjustment for land motion",
 Mar. Geod. 23 (2000) 145–166. [۱۱]

Change, 60, 2008, pp. 381-392.

Rodell, M. and Famiglietti, J.S., "An analysis of terrestrial water storage variations in Illinois with implications for the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)", *Water Resources Research*, 37, 2001, pp. 1327-1339.

Schmidt, R. and et.al, "GRACE observations of changes in continental water storage", *Global and Planetary Change*, 50, 2006, pp. 112-126.

[۲۹]

[۳۰]

I. Velicogna; J. Wahr, "Measurements of time-variable gravity show mass loss in Antarctica", *Scienceexpress* (2006), doi:10.1126/science.1123785.

Ramillien, G. and et.al, "Global time variations of hydrological signals from GRACE satellite gravimetry", *Geophys. J. Int.*, 158, 2004, pp. 813-826.

Ramillien, G. and et.al, "Time variations of land water storage from n inversion of 2 year of GRACE geoids", *Earth and Planetary Science Letters*, 235, 2005, pp. 283-301.

Ngo-Duc, T.; K. Laval; G. Ramillien; J. Polcher, and A. Cazenave, "Validation of the land water storage simulated by Organising Carbon and Hydrology in Dynamic Ecosystems (ORCHIDEE) with Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data", *Water Resour. Res.*, 43, W04427, 2007, doi:10.1029/2006WR004941.

Ramillien, G. and et.al, "Land water storage contribution to sea level from GRACE geoid data over 2003-2006", *Global and Planetary*

[۲۴]

[۲۵]

[۲۶]

[۲۷]

[۲۸]