

تشخیص آنومالی در سری‌های زمانی کلروفیل در محدوده مکانی و زمانی زلزله‌های بزرگ ساحلی با روش جنگل تصادفی

معصومه ندری^۱، مهدی آخوندزاده هنزائی^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد مهندسی سنجش‌ازدور - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های

فنی - دانشگاه تهران

masoume.nadri@ut.ac.ir

^۲ استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

makhonz@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت اردیبهشت ۱۳۹۸، تاریخ تصویب آذر ۱۳۹۹)

چکیده

زلزله یکی از مخرب‌ترین بلایای طبیعی است که به طور جامع پیش بینی آن تاکنون محقق نگشته است. تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که کمک داده‌های سنجش از دور می‌تواند به اطلاعاتی دسترسی پیدا کرد که نشان‌دهنده رابطه‌ای معنادار بین وقوع ناهنجاری در تغییرات برخی پارامترهای فیزیکی و شیمیایی با وقوع زلزله هستند. این پارامترهای فیزیکی و شیمیایی همان پیش‌نشانگرهای زلزله هستند. یکی از پیش‌نشانگرهایی که ارتباط آن با زلزله‌های ساحلی در سال‌های اخیر مورد مطالعه برخی از پژوهشگران واقع شده، میزان کلروفیل موجود در سطح آب است. پارامتر کلروفیل-آ از طریق روش‌های مختلفی از جمله روش‌های آزمایشگاهی طیف سنجی، اندازه‌گیری فلورسانس کلروفیل و یا از طریق داده‌های ماهواره‌ای و با بکارگیری الگوریتم‌های شاخص رنگ (CI) و نسبت باندربلی (OCX) و غیره بدست می‌آید. با بررسی سری‌های زمانی کلروفیل پنج زلزله بزرگ حاصل از محصولات سنجنده مودیس (MODIS) بر روی سکوه‌های آکوا (Aqua) و ترا (Terra) و با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی مشاهده شد که انتشار انرژی حرارتی و گازهای متصاعد زمین بر اثر فعالیت‌های صفحات تکتونیکی و یا دیگر فعالیت‌های فیزیکی و شیمیایی پوسته زمین قبل، هنگام و بعد از وقوع زلزله‌های ساحلی و نزدیک به ساحل می‌تواند به تغییر در میزان کلروفیل سطح آب منجر شود و این پارامتر می‌تواند به عنوان یک پیش‌نشانگر زلزله در تحقیقات بعدی مورد بررسی قرار گیرد.

واژگان کلیدی: زلزله، کلروفیل، جنگل تصادفی، مودیس، ناهنجاری

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

زلزله یکی از مخرب ترین بلایای طبیعی است که به طور جامع پیش بینی آن تاکنون محقق نگشته است. طبق مطالعاتی که از سال ۱۹۰۰ تا کنون صورت گرفته هرساله نزدیک به ۱۳۰۰ زلزله بالای ۲ ریشتر ثبت می شود و حدود ۱۵۰ زلزله از کل زلزله های سالانه مربوط به زلزله هایی با قدرت بیشتر از ۶ ریشتر بوده و یک زلزله با قدرت ۸ ریشتر و یا حتی بالاتر رخ می دهد که تا امروز افراد بی شماری در همین زلزله ها جان خود را از دست داده اند. [۱]

پارامترهای زیادی وجود دارند که با وقوع زلزله تغییرات غیرعادی در آنها رخ می دهد که تحت عنوان پیش نشانگرهای زلزله معرفی شده اند، مانند تغییرات در آب و هوا، تشکیل ابرهای زلزله، تغییر در پارامترهای اتمسفری و یونسفری، تغییر دمای سطح زمین و ... تحقیقات نشان داده اند که کمک داده های سنسور از دور می توان تغییرات بسیاری از این پیش نشانگرها را به صورت سری های زمانی یک و چند بعدی نمایش داد و در صورت وقوع رفتارهای غیر عادی در آنها، رابطه ای احتمالی آن ها با زلزله ی به وقوع پیوسته را تحلیل کرد. [۲] تاکنون ده ها پیش نشانگر مختلف زمین لرزه، شناسایی شده اند که با اندازه گیری آن ها با روش های مختلف می توان از آن ها به منظور هشدار و نجات مردم در آینده استفاده نمود.

علیرغم پیشرفت های صورت گرفته باید اذعان نمود که ماهیت پیش نشانگرهای زلزله به صورتی است که همه آن ها در تمامی زلزله ها وجود ندارند و لذا نمی توان با تمرکز بر یک پیش نشانگر، درباره وقوع یا عدم وقوع زلزله در یک منطقه مشخص یا محدوده زمانی مشخص اظهار نظر نمود. اما هر چه تعداد پیش نشانگرها قبل از وقوع یک زلزله بیشتر باشد می توان با اطمینان بیشتری پارامترهای آن زلزله را برآورد نمود. [۲] یکی از پیش نشانگرهایی که ارتباط آن با زلزله در سال های اخیر مورد توجه پژوهشگران واقع شده، میزان کلروفیل موجود در آب است. از آنجایی که بیش از ۷۰ درصد سطح کره ی زمین را آب پوشانده است و بسیاری از گسل های فعال لرزه ای در کمربندهای ساحلی قاره ها واقع شده اند بررسی رفتار پارامترهای مرتبط با زلزله در اقیانوس ها از قبیل دمای سطح آب و شار گرمای نهان^۱

شوری، شاخص بالا آمدگی آب و غلظت کلروفیل از اهمیت ویژه ای برخوردار است. [۳-۴]

کلروفیل رنگدانه سبز موجود در همه گیاهان است که به جذب نور خورشید و تبدیل آن به انرژی کمک می کند. کلروفیل انواع مختلفی دارد که از این میان کلروفیل-آ در همه ی انواع فیتوپلانکتون ها، موجودات بسیار ریز موجود در سطح اقیانوس ها، یافت می شود. [۵] تحقیقات نشان داده اند که عوامل متعددی از جمله نوسانات فصلی و تغییر در پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب چون دما، شوری، سطح مواد غذایی، منبع نیتروژن و اکسیژن محیط، عناصر سنگین، پرتوهای UV، PH و سایر عوامل تنش زای محیطی و یا ترکیبی از آن ها بر رشد و بلوغ فیتوپلانکتون ها اثرگذار است و انتشار انرژی حرارتی و تاثیرات فیزیکی و شیمیایی ناشی از انتقال انرژی در بازه ی زمانی قبل و بعد از وقوع زلزله های ساحلی و نزدیک به ساحل، می تواند به تغییر برخی از این پارامترها و در نتیجه میزان کلروفیل موجود در سطح آب منجر شود. [۵-۶]

رامش و همکارانش در سال ۲۰۰۶ با استفاده از داده های سنسور از دوری مناطق ساحلی اقیانوسی نزدیک به مرکز چهار زلزله بزرگ، تغییرات غلظت کلروفیل-آ و شار گرمای نهان سطح را برای این زلزله ها بررسی کردند و تغییرات قابل توجهی را در آن ها پیش از وقوع زلزله مشاهده کردند. آن ها جهت شناسایی آنامولی در سری های زمانی به یافتن پیشینه های مطلق بسنده کردند که می توان آن را به عنوان نقطه ضعف کار پژوهشی شان بیان کرد. [۳] هم چنین در سال ۲۰۱۲ والی زاده و همکاران به بررسی چهار پارامتر غلظت کلروفیل-آ، دمای سطح آب (SST)، شار گرمای نهان سطح و شاخص بالا آمدگی آب برای سه زلزله ایالت کالیفرنیا در بین سال های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ پرداختند. آن ها با استفاده از مقادیر میانگین و انحراف معیار داده ها در بازه ی زمانی مورد مطالعه توانستند آنامولی های معنی داری را در هر چهار پارامتر قبل و بعد از وقوع زلزله ها کشف کنند اما به دلیل توان تفکیک مکانی پایین داده های شار گرمای نهان سطح و شاخص بالا آمدگی آب آنامولی های دیده شده در این پارامترها می تواند از هر منبع دیگری نشأت گرفته باشد و قابل استناد نیست. [۴]

در این مقاله با تکیه بر قابلیت های داده های ماهواره ی مودیس، هدف بررسی رفتار تغییرات غلظت کلروفیل-آ به

^۱ Surface Latent Heat Flux

مکعب برقرار می‌کند که ضرایب آن برای سنجنده‌های مختلف از روش‌های نیمه تحلیلی و تجربی بر اساس داده‌های ۹۱۹ نقطه برداشت شده از دریاها و اقیانوس‌ها در پروژه جهانی EABASS محاسبه و کالیبره شده‌اند.

$$\log_{10}(chl-a) = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i \times R^i \quad (1)$$

برای سنجنده ی مودیس R در رابطه ی بالا به صورت زیر تعریف می شود.

$$R = \log_{10} \left(\frac{R(\lambda_{blue})}{R(\lambda_{green})} \right) \quad (2)$$

$$R(\lambda_{blue}) = \max(Rrs(443), Rrs(488))$$

ضرایب a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 به ترتیب برابر است با $۰/۲۵۱۵, -۲/۷۴۲۳, ۱/۸۰۱۷, ۰/۰۰۱۵$ و $-۱/۲۲۸۰$ اگر مقدار بازتابش باند ۴۴۳ نانومتر بزرگتر از باند ۴۸۸ نانومتر باشد و $۰/۲۵, -۲/۴۷۵۲, ۱/۴۰۰۱, -۲/۸۲۳۳$ و $۰/۵۴۰۴$ اگر خلاف آن صادق باشد.

روش شاخص رنگ نیز در سال ۲۰۱۲ توسط هیو معرفی شد. [۸] این روش بر پایه اختلاف بازتابش باندهای سبز و آبی و یک ضریب مرجع خطی به دست آمده از اختلاف بازتابش باندهای قرمز و آبی است. (رابطه ۳)

$$chl_a = 10^{-0.4909 + 191/659 \times CI} \quad (3)$$

$$CI = R_{rs}(green) - [R_{rs}(blue) + \dots \dots \frac{(\lambda_{green} - \lambda_{blue})}{(\lambda_{red} - \lambda_{blue})} \times (R_{rs}(red) - R_{rs}(blue))]$$

محصولات سنجنده مودیس با استفاده از تلفیق هر دو روش معرفی شده توسط ریلی و هیو تهیه شده‌اند. چرا که مقایسه‌ی نتایج حاصل از هر دو روش با ایستگاه‌های زمینی نشان داده است که هر کدام از آن‌ها در برآورد مقادیر کلروفیل-آ مربوط به یک دامنه محدود بهتر عمل می‌کنند و استفاده از ترکیب وزن دار آن‌ها به بهبود نتایج حاصل کمک شایانی خواهد کرد.

در این پژوهش نیز از داده‌های کلروفیل-آ روزانه مربوط به این سنجنده در بازه‌های زمانی حدوداً ۸۰ روزه برای تهیه سری زمانی مربوط پنج زلزله بزرگ سال‌های اخیر با قدرتی بیشتر از ۷ ریشتر استفاده شده است. (جدول ۱) شکل‌های (۱) تا (۵) سری‌های زمانی متوسط روزانه غلظت کلروفیل-

منظور کشف ناهنجاری در بازه‌ی زمانی زلزله‌های بزرگ ساحلی و نزدیک به ساحل می‌باشد. به منظور کشف رفتار غیر عادی کلروفیل-آ بعد از تهیه سری‌های زمانی این پارامتر با استفاده از محصولات سنجنده مودیس بر روی سکوها ترا و آکوا در محدوده‌ی زمانی پنج زمین لرزه‌ی بزرگ دنیا در سال‌های اخیر، از یکی از روش‌های نوین تصمیم‌گیری جمعی، جنگل تصادفی، استفاده شده است. در صورتی که این ناهنجاری‌ها در داده‌های ماهواره مودیس قابل مشاهده باشد، این پارامتر می‌تواند در کنار سایر پیش‌نشانگرها در کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی زلزله کمک شایانی نماید.

۲- داده‌ها

پارامتر کلروفیل-آ از طریق روش‌های مختلفی از جمله روش‌های آزمایشگاهی طیف سنجی، فلورسانس کلروفیل و یا از طریق داده‌های ماهواره‌ای و با بکارگیری الگوریتم‌های شاخص کلروفیل (CI) و نسبت باند ریلی (OCX) و غیره بدست می‌آید. خصوصیت طیفی کلروفیل-آ بدین صورت است که در محدوده طول موج‌های آبی و قرمز عمل جذب و در محدوده طول موج سبز عمل انعکاس را انجام می‌دهد، بطوریکه به هنگام افزایش غلظت کلروفیل-آ در آب رنگ آبی به سبز متمایل می‌شود. از این رو سنجش‌ازدور تکنیک ارزشمندی در ارزیابی مقادیر غلظت کلروفیل-آ محسوب می‌گردد. [۷-۸]

سنجنده مودیس دارای حساسیت رادیومتریکی بالای ۱۲ بیتی و ۳۶ باند طیفی است. دامنه طیفی آن در باندهای ۱ تا ۱۹ از طول موج‌های ۶۲۰ تا ۹۴۵ نانومتر و در باندهای ۲۰ تا ۳۶ از طول موج‌های ۳۷۵۰ تا ۱۴۲۳۵ نانومتر می‌باشد که همین امر نشان‌دهنده کاربردهای وسیع داده‌های این سنجنده در فرایندهای لیتوسفری، اتمسفری و یونسفری می‌باشد. تاکنون الگوریتم‌ها و روش‌های مختلفی جهت استخراج این پارامتر از داده‌های این سنجنده پیشنهاد شده است. از این میان تلفیق الگوریتم‌های شاخص رنگ و نسبت باند ریلی بهترین نتایج را بر روی سنجنده مودیس نشان داده‌اند. [۸-۱۰] الگوریتم نسبت باند ریلی در سال ۱۹۹۸ توسط ریلی و همکارانش معرفی شد. [۱۱]

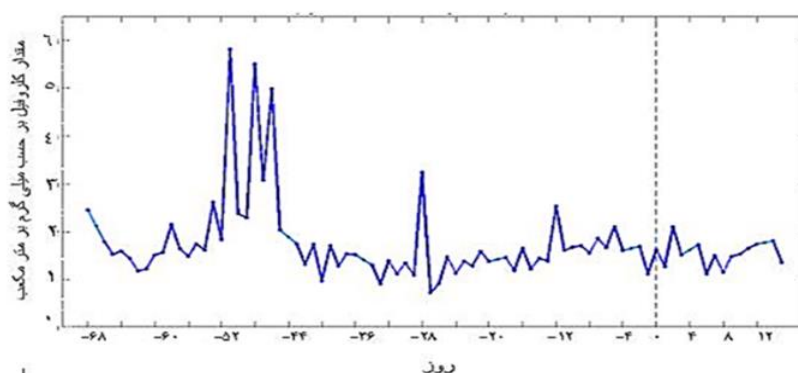
این الگوریتم (رابطه ۱) یک رابطه‌ی چند جمله‌ای درجه چهارم بین نسبت بازتابش (Reflectance) باندهای آبی به سبز و مقدار لگاریتمی کلروفیل-آ بر حسب میلی گرم بر متر

آ در بازه‌ی زمانی قبل و بعد از زلزله‌های مربوط به جدول (۱) را نشان می‌دهند. خط نقطه چین عمودی روز زلزله را نشان می‌دهد. محور x روزهای قبل و بعد از وقوع زلزله و محور y نمایانگر مقدار غلظت کلروفیل برحسب میلی گرم بر مترمکعب می‌باشد. همانطور که گفته شد سری‌های

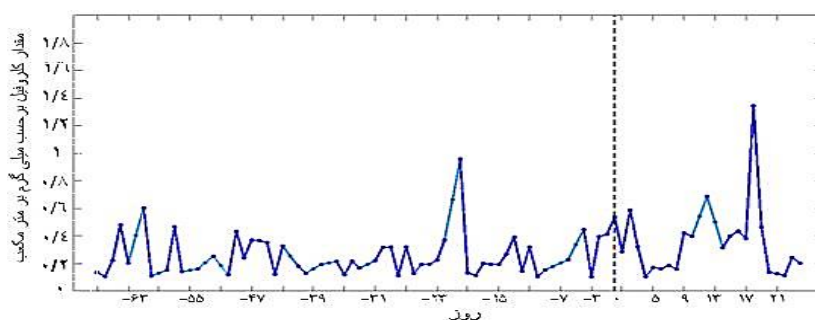
زمانی از داده‌های کلروفیل روزانه سنجنده مودیس بر روی سکوی ترا و آکوا موجود در سایت ناسا (NASA) تهیه شده‌اند [۱۲].

جدول ۱- لیست زلزله‌هایی که برای مطالعه‌ی موردی انتخاب شده‌اند. داده‌ها از سایت <http://earthquake.usgs.gov> دریافت شده‌اند.

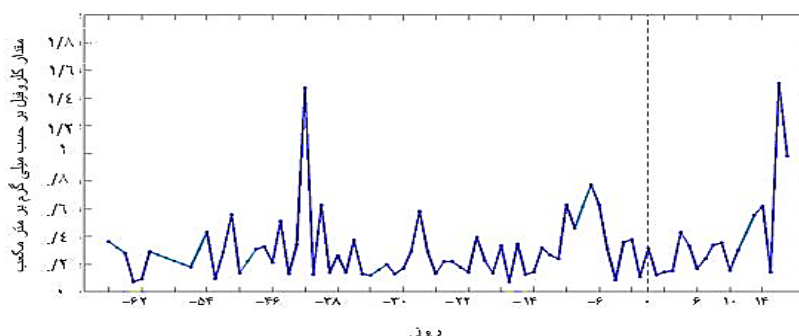
محل	تاریخ	طول و عرض جغرافیایی	بزرگا (ریشتر)	عمق (کیلومتر)
گجرات (هند)	۲۶ ژانویه ۲۰۰۱	N ۲۳/۴۱۹ و E ۷۰/۲۳۲	۷/۷	۱۶
سوماترا (اندونزی)	۲۶ دسامبر ۲۰۰۴	N ۳/۲۹۵ و E ۹۵/۹۸۲	۹/۱	۳۰
جاوا (اندونزی)	۲۶ می ۲۰۰۶	S ۷/۹۵۵ و E ۱۱۰/۴۳	۶/۳	۱۰
شیلی	۲۷ فوریه ۲۰۱۰	S ۳۶/۱۲۲ و W ۷۲/۸۹۸	۸/۸	۲۲/۹
مکزیک	۸ سپتامبر ۲۰۱۷	N ۱۵/۰۶۸ و W ۹۳/۷۱۵	۸/۱	۶۹/۷



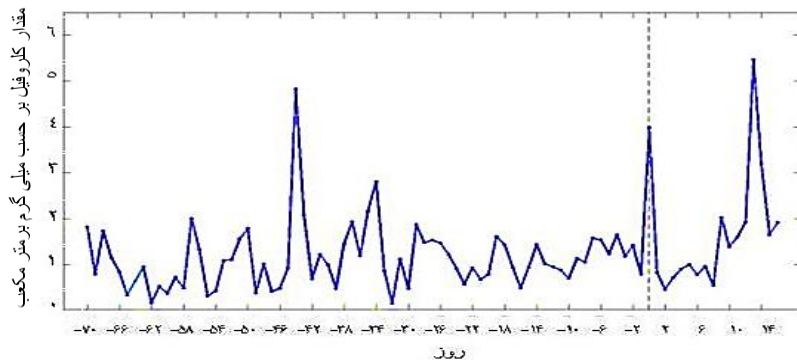
شکل ۱- سری زمانی متوسط روزانه کلروفیل-آ برای زلزله گجرات (هند) در تاریخ ۲۰۰۱/۰۱/۲۶



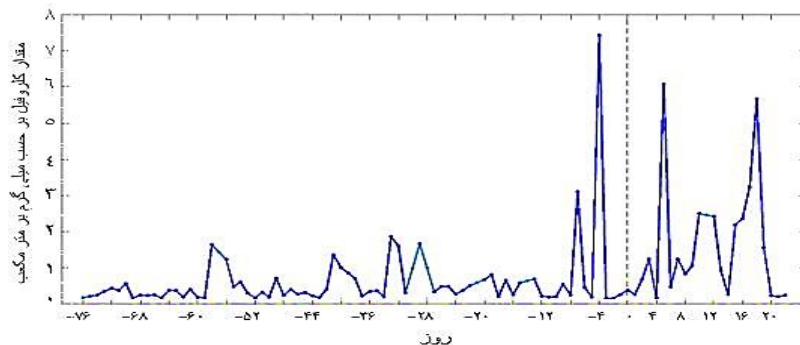
شکل ۲- سری زمانی متوسط روزانه کلروفیل-آ برای زلزله سوماترا (اندونزی) در تاریخ ۲۰۰۴/۱۲/۲۶



شکل ۳- سری زمانی متوسط روزانه کلروفیل-آ برای زلزله جاوا (اندونزی) در تاریخ ۲۰۰۶/۰۵/۲۶



شکل ۴- سری زمانی متوسط روزانه کلروفیل-آ برای زلزله شیلی در تاریخ ۲۰۱۰/۰۳/۲۷



شکل ۵- سری زمانی متوسط روزانه کلروفیل-آ برای زلزله مکزیک در تاریخ ۲۰۱۷/۰۹/۰۸

۳- روش تحقیق

پس از ایجاد سری زمانی، تشخیص آنامولی یکی از مراحل مهم و کلیدی برای بررسی امکان استفاده از یک پیش‌نشانگر می‌باشد. انتخاب روش‌های استخراج آنامولی به خطی یا غیرخطی بودن رفتار سری‌های زمانی بستگی دارد. زلزله مانند سایر پدیده‌های ژئوفیزیکی دارای فرآیندهای غیرمنظم و پیچیده است. این پدیده چنان پیچیده است که طی سالیان طولانی مطالعه درباره مکانیزم وقوع زلزله هنوز به نتایج قاطعی منجر نگردیده است [۱۳].

یکی از مهم‌ترین نکات مطرح در استفاده از روش‌های پیش‌بینی سری‌های زمانی که دارای رفتاری بسیار پیچیده و غیرخطی هستند، ناکارآمد بودن استفاده از یک الگوریتم پیش‌بینی به‌تنهایی است. از آنجا که هر الگوریتم براساس ویژگی‌های خاص نتایج متفاوتی را تولید می‌کند، استفاده همزمان از مجموعه‌ای از پیش‌بینی‌کننده‌ها امید بیشتری در ارائه یک نتیجه قابل اعتماد را می‌دهد. روش‌های مبتنی بر یادگیری جمعی با استفاده از مجموعه‌ای از چند روش یا جایگشت‌های مختلفی از داده‌ها، محاسبات را انجام داده و بعد از تلفیق نتایج این محاسبات، تصمیم نهایی را می‌گیرد.

[۱۴]

جنگل تصادفی یک مدل بهبودیافته از روش‌های مبتنی بر یادگیری جمعی است و علت نام‌گذاری آن به این دلیل است که از درخت‌های تصمیم ساخته می‌شود. یک جنگل تصادفی می‌تواند از درخت‌های تصمیم تکی ساخته شود که پارامترهای آموزشی مخصوص آن به طور تصادفی تغییر می‌کند. چنین پارامترهایی می‌توانند جایگذاری‌های بوت استرپ شده داده‌های آموزشی باشند درعین حال همانند روش‌های جایگذاری تصادفی، آن‌ها می‌توانند زیرمجموعه‌های ویژگی مختلف نیز باشند [۱۵]. سپس، روش‌های پیش‌بینی (رگرسیون) مختلف از یک نوع یکسان توسط هر زیرمجموعه، آموزش داده می‌شود. این پیش‌بینی‌کننده‌های تکی با به کارگیری یک روش میانگین‌گیری از تصمیماتشان با یکدیگر ترکیب می‌شوند. برای یک نمونه آزمایشی، مقدار پیش‌بینی برابر خواهد بود با مقداری که از میانگین‌گیری کلیه پیش‌بینی‌کننده‌ها بدست آمده است. جزییات بیشتر در [۱۶] قابل مشاهده است. جنگل تصادفی نسبت به سایر الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری جمعی در انتخاب ویژگی‌ها برای هر درخت متفاوت عمل می‌کند. با توجه به اینکه در روش جنگل تصادفی از ویژگی‌هایی یکسان در هر درخت استفاده نمی‌شود، لذا امکان اینکه پاسخ کلی مجموعه، پاسخی

۴- مشاهدات

طبق آنچه در قسمت روش تحقیق بیان شد، سری های زمانی مربوط به پنج زلزله معرفی شده در جدول (۱) با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی پیش بینی شده و اختلاف سری زمانی مشاهداتی و پیش بینی شده با استفاده از روش میانه چارکی بررسی شد. شکل های (۶) تا (۱۰) نشان دهنده ی روزهای هفتگانه که تغییرات غیرعادی در سری های زمانی مربوطه رخ داده است.

خط نقطه چین عمودی نشان دهنده ی روز وقوع زلزله و خطوط افقی حد آستانه های به دست آمده از روش میانه چارکی را نشان می دهند. محور x نشان دهنده ی روزهای قبل و بعد از زلزله و محور y ها نشان دهنده ی تغییرات غلظت کلروفیل آ نسبت به مقدار پیش بینی شده از روش جنگل تصادفی می باشند.

شکل (۶) مربوط به زلزله سال ۲۰۰۱ گجرات در کشور هند می باشد. این زمین لرزه به بزرگی ۷/۷ ریشتر و در عمق ۱۶ کیلومتری زمین رخ داد و بیشتر از ۲۰۰۰۰ نفر تلفات برجای گذاشت. همانطور که مشاهده می شود با فرض $k=3$ به ترتیب ۵۱، ۴۸، ۴۶، ۲۸ روز قبل از وقوع زلزله تغییرات ناگهانی در میزان تغییرات کلروفیل-آ مشاهده می شود.

در شکل (۷) سری زمانی تغییرات غلظت کلروفیل-آ برای زلزله ۱۶ دسامبر ۲۰۰۴ در منطقه سوماترا کشور اندونزی را نشان می دهد. این زمین لرزه که با بزرگی ۹/۱ ریشتر به عنوان سومین زمین لرزه ثبت شده دستگاهی قرن اخیر دنیا شناخته می شود که یک سری از سونامی های بسیار مخرب در امتداد سواحل در اطراف اقیانوس هند ایجاد کرد. زلزله و سونامی ۲۰۰۴ اندونزی، کشورهای اندونزی، سریلانکا، هند، تایلند، مالدیو و سومالی را به شدت تحت تاثیر قرار داد. این سانحه یکی از مرگبارترین سوانح طبیعی در دوران کنونی بوده است، به طوری که موجب مرگ ۲۳۰۰۰۰ نفر در ۱۴ کشور، زخمی شدن ۱۲۵۰۰۰ نفر، گم شدن ۴۵۷۵۱ نفر و بی خانمان شدن و مهاجرت بیش از ۶۰۰ هزار نفر شد. در این زلزله با فرض $k=2/8$ ، بیست روز قبل از زلزله و هجده روز پس از آن جهش غیر عادی در سری زمانی رخ داده است.

زلزله ۲۶ می ۲۰۰۶ منطقه جاوا در کشور اندونزی هر چند نسبت به دیگر زلزله های بررسی شده در این مطالعه

مطمئن تر و قابل اعتمادتر باشد، بیشتر است. سرعت بالا، دقت قابل ملاحظه، بار محاسباتی مناسب، ارائه نتایج قابل قبول در صورت وجود نویز و پارامترهای کم به منظور تنظیم، همگی از دلایل انتخاب روش جنگل تصادفی به عنوان الگوریتم اصلی در این پژوهش می باشد. [۱۵]

جهت شناسایی ناهنجاری در سری زمانی اختلاف مقادیر مشاهداتی و پیش بینی شده محاسبه می شود. (رابطه ۵)

اگر مقدار PE بیشتر از حد آستانه مجاز باشد آن نقطه به عنوان ناهنجاری شناخته می شود [۱۵].

$$X_{high} = M + K.IQR \quad (۴)$$

$$X_{low} = M + K..IQR$$

$$X_{low} < \chi < X_{high}$$

$$\Rightarrow -k < \frac{\chi - M}{IQR} < k$$

$$; D_x = \frac{\chi - M}{IQR}$$

$$p = \pm 100 \times (|D_x| - k) / k \quad (۵)$$

در این روابط، $IQR, M, x_{low}, x_{high}$ و D_x به ترتیب مقدار پارامتر، مرز بالایی، مرز پایینی، مقدار میانه و دامنه بین چارکی و انحراف پارامتر x می باشند. مطابق با رابطه (۴) اگر مقدار مطلق D_x بزرگتر از k باشد، رفتار پارامتر موردنظر (x) غیرعادی تشخیص داده می شود. هم چنین بر اساس رابطه (۴) درصد انحراف پارامتر از وضعیت عادی مشخص می شود. با فرض اینکه داده ها دارای توزیع نرمال با میانگین μ و انحراف معیار σ باشند، مقادیر میانه و دامنه بین چارکی به ترتیب برابر μ و $\sigma \times 1/34$ است [۲]. اگر مقدار پارامتر مشاهده شده بیرون محدوده بالایی و یا پایینی قرار گیرد، با سطح اطمینان ۸۰ تا ۸۵ درصد می توان بیان کرد که مقدار غیر عادی پارامتر تشخیص داده شده است. [۱۷] مقدار پارامتر k در این رابطه با توجه به بزرگای زلزله، محل جغرافیایی آن، ساختار ژئوفیزیکی و بسیاری پارامترهای دیگر بدست می آید.

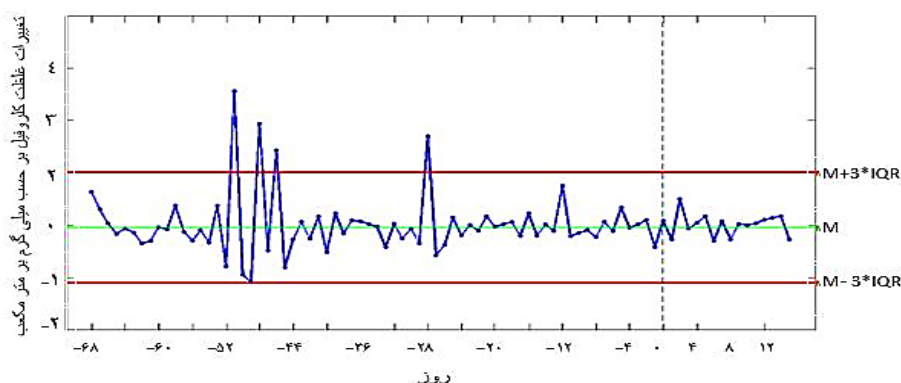
وقوع زلزله رخ داده است. و بالاخره شکل (۱۰) سری زمانی زلزله ۸/۱ ریشتری مکزیک در ۸ سپتامبر ۲۰۱۷ را نشان می دهد. این زمین لرزه که قوی ترین زمین لرزه در قرن اخیر در مکزیک بوده است بیش از ۹۰ کشته بر جای گذاشت. سازمان زمین شناسی آمریکا (USGS) بیشتر از ۳۵۰۰ پس لرزه با قدرت های حداکثر ۶ ریشتری را برای این زلزله ثبت کرد. [۱۸]

در این زلزله با فرض $k=3$ چهار و هفت روز قبل از زلزله و پنج و هفده روز پس از زلزله تغییرات غیر عادی در سری زمانی کلروفیل-آ مشاهده شد.

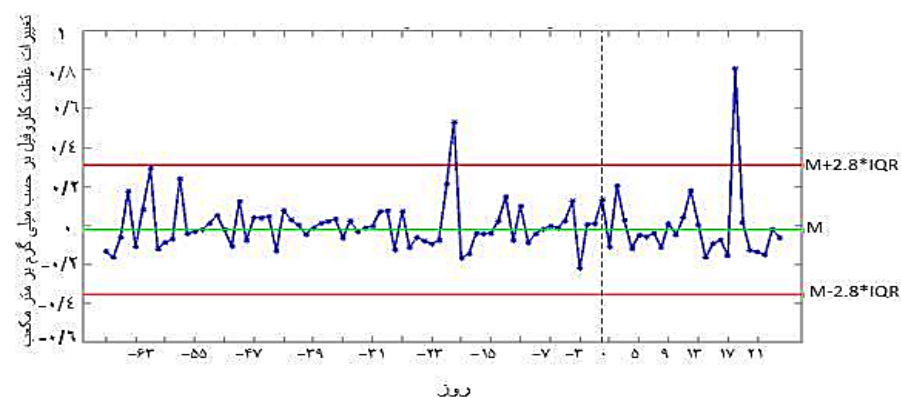
دارای شدت کمتری بود اما به دلیل عمق خیلی پایین زلزله ۴۵۰۰ کشته بر جای گذاشت.

شکل (۸) مربوط به این زلزله است که ۴۲ روز قبل از وقوع زلزله و ۱۵ و ۱۶ روز پس از زلزله تغییرات غیر عادی را نشان می دهد. مقدار k در این زلزله برابر با ۲/۸ در نظر گرفته شده است.

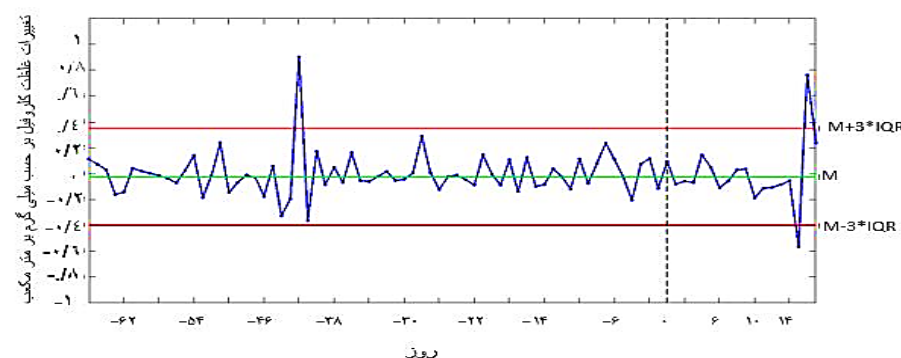
شکل (۹) مربوط به زلزله سال ۲۰۱۰ شیلی است. این زلزله که در ۲۷ فوریه ۲۰۱۰ رخ داد حدوداً ۷۰۰ کشته بر جای گذاشت. در این شکل با فرض $k=2/8$ تغییراتی غیر عادی ۴۴ و ۳۴ روز قبل و ۱۳ روز بعد و همچنین در روز



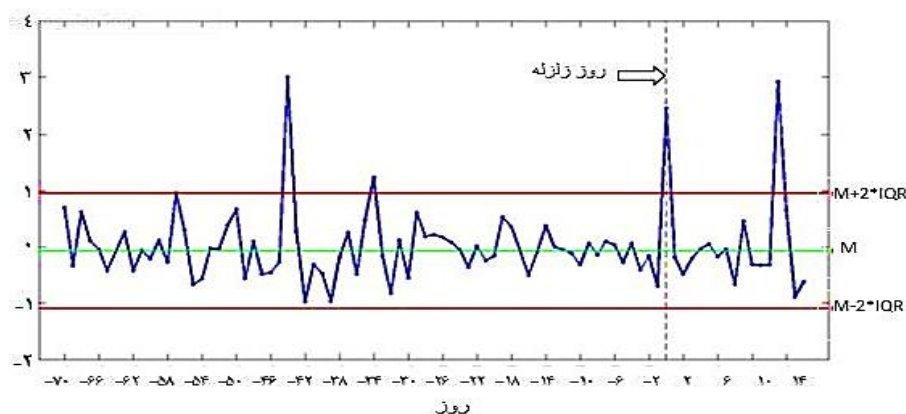
شکل ۶- نمودار تغییرات غلظت کلروفیل بر حسب میلی گرم بر متر مکعب مربوط به زلزله گجرات



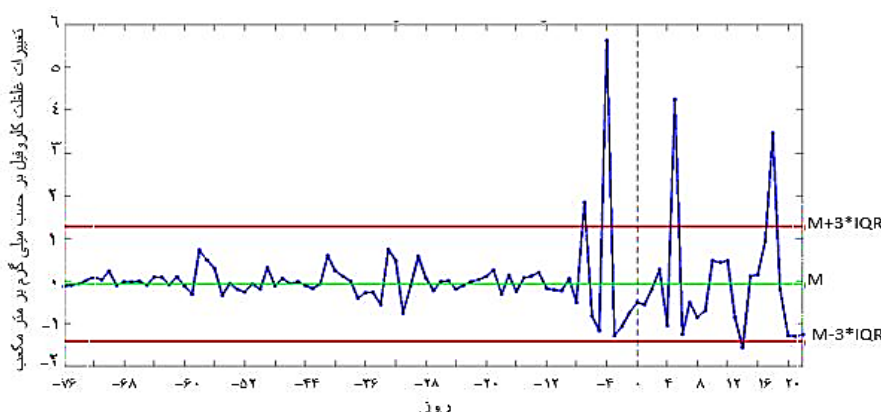
شکل ۷- نمودار تغییرات غلظت کلروفیل بر حسب میلی گرم بر متر مکعب مربوط به زلزله سوماترا



شکل ۸- نمودار تغییرات غلظت کلروفیل بر حسب میلی گرم بر متر مکعب مربوط به زلزله جاوا



شکل ۹- نمودار تغییرات غلظت کلروفیل بر حسب میلی گرم بر متر مکعب مربوط به زلزله شیلی



شکل ۱۰- نمودار تغییرات غلظت کلروفیل بر حسب میلی گرم بر متر مکعب مربوط به زلزله مکزیک

۵- نتیجه گیری

تا به امروز مطالعات بسیار محدودی راجع به بررسی کلروفیل-آ به عنوان یک پیش نشانگر زلزله انجام شده است. در این مقاله سعی شد تا این پارامتر با دقت بالا و روش های نوین و قابل اعتماد و با استفاده از موارد مطالعاتی متعدد مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به بررسی سری زمانی مربوط به پنج زلزله با قدرت بالا مشخص شد که قبل و بعد از وقوع زلزله ناهنجاری هایی در این پارامتر دیده می شود. نتایج نشان داد که میزان کلروفیل-آ به ترتیب ۵۱، ۴۸، ۴۶ و ۲۸ روز قبل از زلزله گجرات ۸۵، ۴۵، ۱۵ و ۳۵ درصد از حد مجاز بالایی عبور کرده است. در زلزله ی سوماترا سال ۲۰۰۴ نیز در ۲۰ روز قبل و ۱۸ روز بعد از زلزله درصد عبور پارامتر کلروفیل-آ از مرز مجاز بالایی به ترتیب ۱۱۰ و ۱۹۰ بوده است. در زلزله ۲۰۰۶ جاوا نیز ۴۲ روز قبل و ۱۵ و ۱۶ روز بعد از زلزله مقدار کلروفیل-آ دچار تغییر ناگهانی به مقدار ۱۳۶/۸۴ و ۵۲/۶۳ و ۱۰۷/۸۹ درصد از حد آستانه مجاز شده است. در دو مورد مطالعاتی دیگر هم این مقدار به ترتیب برابر ۱۹۹/۸۷، ۲۵، ۱۵۰ و ۱۹۰ درصد

بیش از حد مجاز در روز های ۴۴ و ۳۴ روز قبل ، روز زلزله و ۱۳ روز بعد از زلزله شیلی و ۳۲۱/۴۲، ۵۰ و ۱۶۰/۷۱ درصد بیش از حد مجاز ۷ و ۴ روز قبل و ۱۷ روز بعد از زلزله مکزیک بوده است. از آنامولی کشف شده ۵ روز بعد از زلزله مکزیک به دلیل مقدار جزئی آن صرف نظر شده است با استفاده از مشاهدات انجام شده می توان نتیجه گیری کرد که کلروفیل-آ پتانسیل مطالعه جدی تر در حیطه پیش بینی زلزله را داراست و میتوان آن را به عنوان یک پیش نشانگر زلزله معرفی کرد. اما همانطور که پیش از این گفته شد عوامل متعددی از جمله نوسانات فصلی و تغییر در پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب چون دما، شوری، سطح مواد غذایی، منبع نیتروژن و اکسیژن محیط، عناصر سنگین، پرتوهای UV، PH و سایر عوامل تنش زای محیطی و یا ترکیبی از آن ها بر رشد و بلوغ فیتوپلانکتون ها اثرگذار است و انتشار انرژی حرارتی و تاثیرات فیزیکی و شیمیایی ناشی از انتقال انرژی در بازه ی زمانی چند ماهه قبل و بعد از وقوع زلزله های ساحلی و

می‌توانند باعث ایجاد رفتار غیر عادی در تغییرات پیش نشانگرها شوند؛ بنابراین وجود هشدار خطا امری غیرقابل اجتناب در مطالعه‌ی پیش نشانگرها می‌باشد و کاهش آن مستلزم تجزیه و تحلیل آماری رفتار پیش نشانگرهای مختلف در مورد تعداد زیادی از زلزله‌های رخ داده است. افزایش دقت در برآورد ناهنجاری در سری‌های زمانی پیش نشانگرهای زلزله و استفاده همزمان از الگوریتم‌های تشخیص آناملولی جهت استخراج دقیق تر و با اطمینان بالاتر آناملولی‌ها، کاری است که در مطالعات آینده باید بدان پرداخت تا نتایجی با عدم قطعیت پایینتری حاصل شوند.

نزدیک به ساحل، می‌تواند به تغییر برخی از این پارامترها و در نتیجه میزان کلروفیل موجود در سطح آب منجر شود. لذا برای نتیجه‌گیری دقیق تر باید رفتار چند پیش نشانگر را به صورت هم‌زمان در مورد زلزله‌های متعدد مورد بررسی قرار داد تا بتوان در مورد منبع ایجاد ناهنجاری‌ها دقیق تر نظر داد.

زلزله پدیده‌ای بسیار پیچیده است و همه‌ی پیش نشانگرها در همه‌ی زلزله‌ها رخ نمی‌دهند و از طرفی پدیده‌های ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی متعددی مانند طوفان‌های خورشیدی، فعالیت‌های ژئومغناطیسی و غیره

مراجع

- [1] Earthquake Statistics. [Online]. Available <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/browse/stats.php> [2018,Dec 17].
- [2] Saradjian, M. R., and M.Akhoondzadeh (2011). "Prediction of the date, magnitude and affected area of impending strong earthquakes using integration of multi precursors earthquake parameters." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11.4: 1109-1119
- [3] Singh, R. P. (2006). "Anomalous increase of chlorophyll concentrations associated with earthquakes." *Advances in Space Research* 37.4: 671-680.
- [4] Alvan, H. V., Farid H. A. , and Husaini B. Omar (2012). "Chlorophyll concentration and surface temperature changes associated with earthquakes." *Natural hazards* 64.1: 691-706
- [5] Prakash, S. and Ramesh, R. (2007): " Is the Arabian Sea getting more productive? ", *Curr. Sci.* , 92, 667–670
- [6] Rhee, G. Y., & Gotham, I. J. (1981). The effect of environmental factors on phytoplankton growth: Temperature and the interactions of temperature with nutrient limitation 1. *Limnology and Oceanography*, 26(4), 635-648.
- [7] Morel, A., Maritorena, S. (2001). Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C4), 7163-7180
- [8] Hu, C., Lee, Z., & Franz, B. (2012). Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C1).
- [9] MODIS.[Online].Available: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php> [2018,Dec 17]
- [10] O'Reilly, J.E., & 24 co-authors (2000). SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3. NASA Tech. Memo. 2000-206892, Vol. 11, S.B. Hooker and E.R. Firestone, Eds., NASA Goddard Space Flight Center, 49 pp.
- [11] O'Reilly, J. E., Maritorena, S., Mitchell, B. G., Siegel, D. A., Carder, K. L., Garver, S. A., ... & McClain, C. (1998). Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C11), 24937-24953.
- [12] OceanColor Web.[Online].Available: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/l3> [2018,Dec 17].
- [13] Akhoondzadeh, M. (2011) Comparative Study of the Earthquake Precursors Obtained from Satellite Data. Ph.D. Thesis, University of Tehran, Surveying and Geomatics Engineering Department, Remote Sensing Division.
- [14] Shahrivand, M., Akhoondzadeh, M., & Jouybari, M. Y. (2017). Detection of gravity-field anomalies associated with great earthquakes in GRACE satellite data using ensemble methods, *Space and Earth Physics*
- [15] Akhoondzadeh, M. (2016). Decision Tree, Bagging and Random Forest methods detect TEC seismo-ionospheric anomalies around the time of the Chile,(Mw= 8.8) earthquake of 27 February 2010. *Advances in Space Research*, 57(12), 2464-2469.
- [16] Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45(1), 5-32.

- [17] Liu, J. Y., Chuo, Y. J., Shan, S. J., Tsai, Y. B., Chen, Y. I., Pulinets, S. A., & Yu, S. B. (2004, April). Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements. In *Annales Geophysicae* (Vol. 22, No. 5, pp. 1585-1593).
- [18] M 8.2 - 101km SSW of Tres Picos, Mexico.[Online].Available: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000ahv0/executive#executive> [2018,Dec 17]