

### چکیده

زلزله یکی از مخرب ترین سوانح طبیعی است که پیش بینی آن به طور جامع، محقق نگشته است. به کمک داده های سنجش از دور می توان به اطلاعاتی دسترسی پیدا کرد که رابطه ی نزدیکی با وقوع زلزله دارند. این اطلاعات همان پیش نشانگرهای زلزله هستند. ضخامت نوری هواویز<sup>۱</sup> (AOD) پارامتری است که در این مقاله به بررسی ارتباط آن با وقوع چند زلزله ی بزرگ پرداخته می شود. پارامتر هواویز از طریق روش های مختلفی مانند ایستگاه های زمینی شبکه ی رباتیک هواویز<sup>۲</sup> و یا از طریق داده های ماهواره ای با به کارگیری الگوریتم های اهداف تیره<sup>۳</sup> (DDV)، روش SYNTAM<sup>۴</sup> و غیره به دست می آید. با بررسی سری های زمانی AOD حاصل از محصولات سنجنده ی مودیس بر روی سکوی تراه، برای پنج زلزله ی بزرگ در ایران، ناهنجاری هایی قبل و بعد از وقوع زلزله مشاهده شد. نتایج نشان می دهند که بین وقوع زلزله های بزرگ و تغییرات غیر عادی پارامتر ضخامت نوری هواویز رابطه ی معناداری وجود دارد و ضخامت نوری هواویز به عنوان یک پیش نشانگر زلزله می تواند در تحقیقات بعدی مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد.

**واژگان کلیدی:** هواویز، زلزله، سنجش از دور، ناهنجاری، مودیس

## مشاهده ی آنومالی در سری زمانی هواویزها قبل از وقوع زلزله های بزرگ با تصاویر مودیس

### فاطمه جهانی

دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور دانشکده مهندسی  
نقشه برداری و اطلاعات مکانی دانشگاه تهران

### مهدی آخوندزاده هنزائی (نویسنده مسئول)

استادیار گروه سنجش از دور دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات  
مکانی دانشگاه تهران،  
makhonz@ut.ac.ir

### ۱- مقدمه

همچنان به صورت چالش مانده است ولی مطالعات اخیر نشان می دهند که پارامترهای فیزیکی و ژئوشیمیایی رابطه ی بسیار نزدیکی با زلزله دارند [۴-۶].

زلزله یک پدیده ی پویاست و معمولاً به خاطر حرکت پوسته ی زمین اتفاق می افتد. هنگامی که زلزله رخ می دهد انرژی آزاد می شود و بین محیط و منبع منتقل می شود. انرژی آزاد شده می تواند تأثیرات فیزیکی و شیمیایی بر روی لیتوسفر، اتمسفر و یونسفر ایجاد کند. پارامترهای مختلف لیتوسفر، اتمسفر و یونسفری قبل از وقوع زلزله، به عنوان پیش نشانگرهای زلزله شناخته می شوند که به احتمال بودن وقوع زلزله اشاره می کنند [۷].

مطالعات نشان داده است که پارامترهای زیادی وجود دارند که با وقوع زلزله تغییرات غیر عادی در آنها رخ می دهد، مانند تغییرات در آب و هوا، تشکیل ابرهای زلزله، تغییر در رفتار حیوانات، تغییر در درون زمین، پیش لرزه ها، تغییر دمای سطح زمین و غیره. آنچه امروزه حائز اهمیت است استفاده از داده های سنجش

زمین لرزه یکی از سوانح طبیعی است که در پی وقوع آن خسارات مالی و جانی زیادی به بار می آید. با پیش بینی زلزله می توان از این خسارات جلوگیری کرد.

امر پیش بینی زلزله به یکی از مهم ترین مسائل برای علم قرن ۲۱ تبدیل شده تا گره از این راز بزرگ باز کند. اولین پیش بینی موفقیت آمیز زلزله های بزرگ در سال ۱۹۷۵ بود که دانشمندان توانستند زلزله قوی هایچنگ در چین را پیش بینی کنند [۱-۲]. اما یک سال بعد دانشمندان دیگر نتوانستند زلزله تانگ شان را که زلزله ی بزرگی بود، پیش بینی کنند و این زلزله ۲۵۰۰۰۰ کشته و ۱۶۴۰۰۰ مجروح بر جای گذاشت [۳].

تا به امروز روش ها و الگوریتم های بسیار متعددی برای پیش بینی زلزله در نقاط مختلف جهان بیان شده است، اما الگوریتمی وجود ندارد که بتواند به طور جامع عمل پیش بینی را برای تمام نقاط جهان ارائه دهد و هنوز پیش بینی زلزله یک مسئله ی حل نشده باقی مانده است. اگر چه پیش بینی زلزله

گزارش های علمی متعددی وجود دارند که نشان می دهند مقدار هواویز در فواصل مختلف زمانی قبل و بعد از وقوع زلزله های بزرگ رفتار غیر عادی از خود نشان می دهد [۱۰-۱۱]. اوکادا و همکارانش در سال ۲۰۰۴ [۱۲] پارامترهای هواویز (ضخامت نوری هواویز و ضرایب معادله ی انگستروم) را از داده های سنجنده سیویفز (SeaWiFS) به دست آوردند که این داده ها برای قبل و بعد از وقوع زلزله گجرات که در ۲۶ ژانویه ۲۰۰۱ به وقوع پیوست جمع آوری شده بود، مقادیر مختلف پارامترهای هواویز تغییرات قابل توجهی را بعد از زلزله ی گجرات نشان می دهند.

انگستروم برای ارزیابی ضخامت نوری هواویزها یک فرمول پیشنهاد داده است که به فرمول انگستروم (معادله ۱) معروف است. این معادله دارای دو ضریب مجهول  $\alpha$  و  $\beta$  می باشد در صورت به دست آوردن مقدار این دو ضریب طبق معادله (۱) میزان ضخامت نوری هواویز مشخص می شود.

$$\tau_A^\lambda = \beta \times \lambda^{-\alpha} \quad (1)$$

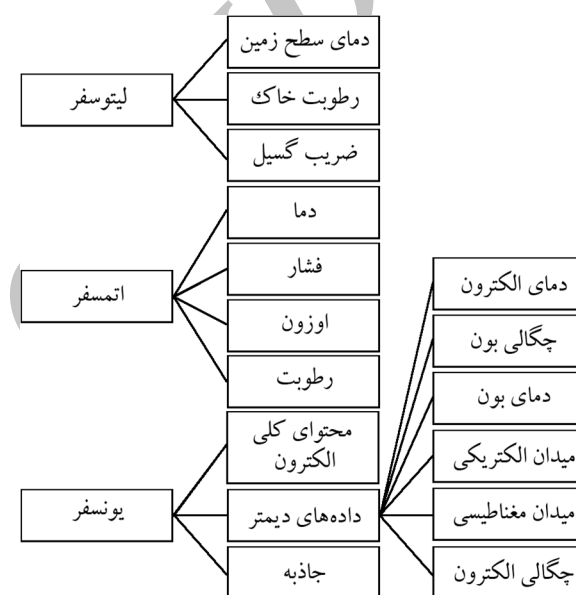
که در این رابطه  $\tau_A^\lambda$  ضخامت نوری هواویز،  $\beta$  ضریب تیرگی انگستروم و  $\alpha$  توان طول موج نامیده می شود و به طور کلی این دو ضریب را، ضرایب انگستروم می نامند. شین و همکارانش در سال ۲۰۱۴ [۱۳] با استفاده از داده های AOD نشان دادند که هفت روز قبل از زلزله ونچاون که در ۱۲ می سال ۲۰۰۸ رخ داد، تغییر محسوسی دیده می شود. آنها نتایج خود را با سایر آنومالی های اتمسفری و یونسفری که به وسیله ی مطالعات دیگر به دست آمده بود، مقایسه کردند و در نهایت تلاش آنها منجر به مدلسازی سازوکار لیتوسفر- اتمسفر- یونسفر<sup>۶</sup> (LAI) شد.

در این مقاله با بررسی های انجام شده بر روی موارد مطالعاتی انتخاب شده، مشخص شده است که مقدار هواویزها قبل و بعد از وقوع زلزله تغییرات ناگهانی می کنند؛ بنابراین هواویز می تواند به عنوان یکی از پیش نشانگرهای زلزله معرفی شود.

## ۲- داده ها

پارامترهای هواویزها از طریق روش های مختلفی مانند

از دور برای نمایش سری زمانی پیش نشانگرهای زلزله است. داده های سنجنش از دور نشان داده اند که ارتباط نزدیکی با وقوع زلزله دارند و پارامترهایی در این داده ها وجود دارند که در هنگام وقوع زلزله تغییرات غیر عادی<sup>۵</sup> در آنها رخ می دهد، بنابراین با بررسی زمان وقوع این تغییرات غیر عادی می توان زمان تقریبی وقوع زلزله را پیش بینی کرد و رابطه ی بین این پیش نشانگرها را با زلزله یافت. مهم ترین پیش نشانگرهای زلزله که توسط داده های سنجنش از دور قابل استخراج می باشند در شکل (۱) آمده اند.



شکل (۱): پیش نشانگرهای زلزله.

ضخامت نوری هواویز (AOD) یک عدد بدون واحد است که نمایانگر میزان هواویز در یک ستون عمودی از اتمسفر بالای منطقه ی مورد مطالعه می باشد. ضخامت نوری هواویز به وسیله ی اندازه گیری جذب نور در طول موج خاصی از طیف مرئی محاسبه می شود. برای استفاده های گسترده ای از ضخامت نوری هواویز جذب در طول موج ۵۵۰ nm پیشنهاد می شود [۸]. مقادیر بالای AOD نشان دهنده ی مقدار زیادی هواویز است که در نتیجه ی آن مقدار قابل توجهی جذب و پخش اتفاق می افتد، از طرفی مقدار کم AOD نشان دهنده ی هوای صاف و هواویز کمتر است و در این حالت انتقال تابش افزایش می یابد [۹].

جغرافیایی، تاریخ و ساعت، بزرگی و عمق هر زلزله بیان شده است. در شکل‌های (۲) تا (۶) سری زمانی متوسط روزانه AOD برای پنج زلزله‌ی مورد بررسی، آورده شده است. خط نقطه‌چین عمودی نمایانگر میزان AOD در روز وقوع زلزله است، محور X روزهای قبل و بعد زلزله و محور Y میزان AOD را نشان می‌دهند.

### ۳- روش تحقیق

ویژگی‌های اپتیکی هواپز (مثل ضخامت اپتیکی) را می‌توان به کمک تصاویر ماهواره‌هایی مانند رادار پیشرفته با وضوح بسیار بالا<sup>۸</sup> (AVHRR)، مودیس، سیویفز، پولدر<sup>۹</sup>، تامز<sup>۱۰</sup>، میسر<sup>۱۱</sup> به دست آورد. تاکنون الگوریتم‌های فراوانی برای به دست آوردن ضخامت نوری هواپزها معرفی شده‌اند که از جمله‌ی آنها می‌توان الگوریتم‌های اهداف تیره (DDV) و SYNTAM را نام برد.

ایستگاه‌های زمینی، استفاده از الگوریتم‌های مشخصی همچون الگوریتم اهداف تیره (DDV) [۱۴]، الگوریتم طیف آبی<sup>۷</sup> و الگوریتم تلفیق داده‌های سنجنده‌ی مودیس از سکوها‌ی آکوا و ترا SYNTAM [۱۵] و یا با استفاده از محصولات سنجنده‌های ماهواره‌ای، به دست می‌آیند.

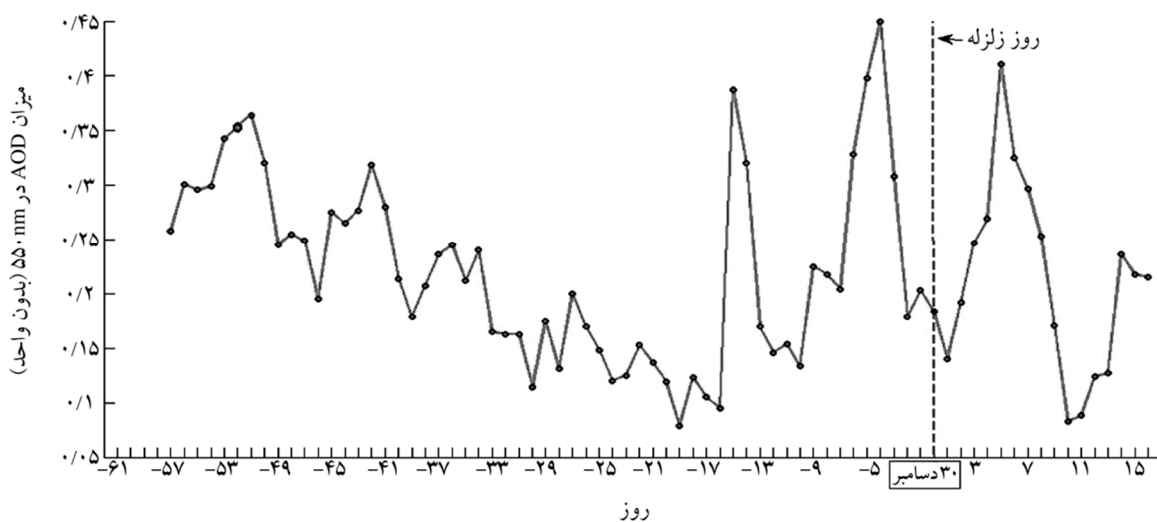
در این مقاله تغییرات AOD به کمک داده‌های روزانه‌ی سنجنده‌ی مودیس بر روی دو سکوی آکوا و ترا مورد بررسی قرار می‌گیرند. این داده‌ها با نام «ضخامت نوری هواپز در 550nm» در سایت NASA قابل دسترسی هستند [۱۶].

برای بررسی دقیق، پنج مطالعه‌ی موردی از زلزله‌های ۱۲ سال اخیر ایران با قدرتی بزرگ‌تر از ۶/۴ ریشتر انتخاب شده و بررسی روی آنها انجام گرفته است. در جدول (۱) اطلاعات زلزله‌های مورد بررسی، آمده است که در آن توضیحاتی راجع به مختصات

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

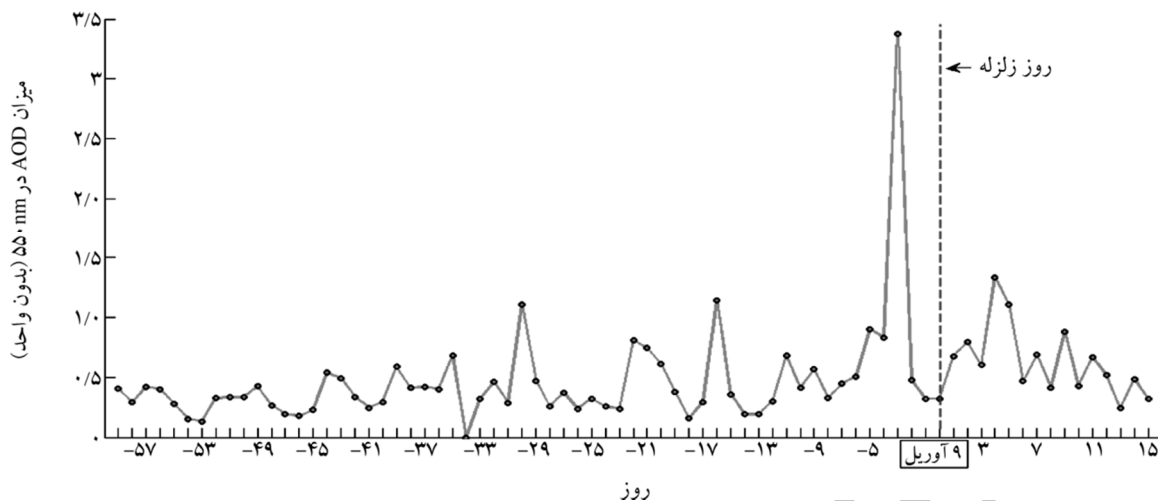
محل	تاریخ	ساعت (UTC)	طول و عرض جغرافیایی	بزرگا (ریشتر)	عمق (کیلومتر)
ایران- سیستان و بلوچستان	۲۰۱۰/۱۲/۲۰	۱۸:۴۱:۵۹	E 59.180° N 28.412°	۶/۷	۱۲
ایران- کاکلی بوشهر	۲۰۱۳/۰۴/۰۹	۱۱:۵۲:۴۹	E 51.593° N 28.428°	۶/۴	۱۲
ایران- بزم	۲۰۰۳/۱۲/۲۶	۰۱:۵۶:۵۲	E 58.311° N 28.995°	۶/۶	۱۰
ایران- ورزقان	۲۰۱۲/۰۸/۱۱	۱۲:۲۳:۱۸	E 46.826° N 38.329°	۶/۴	۱۱
ایران- سراوان	۲۰۱۳/۰۴/۱۶	۱۰:۴۴:۲۰	E 61.996° N 28.033°	۷/۷	۸۰

سری زمانی ضخامت نوری هواپز (ایران- سیستان و بلوچستان - ۲۰۱۰/۱۲/۲۰)



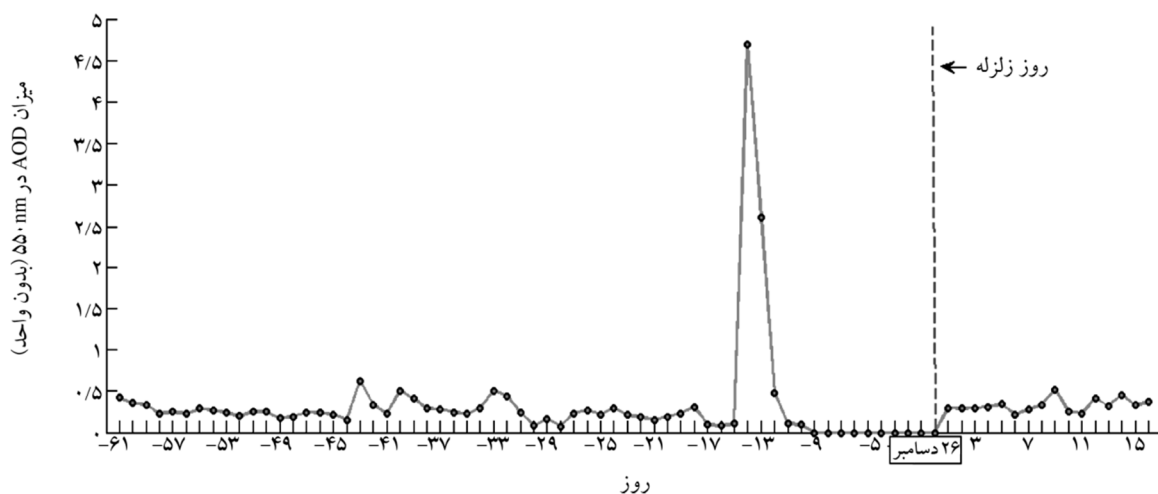
شکل (۲): سری زمانی متوسط روزانه AOD برای زلزله‌ی استان سیستان و بلوچستان ایران در تاریخ ۲۰۱۰/۱۲/۲۰.

سری زمانی ضخامت نوری هواویز (ایران- بوشهر - ۲۰۱۳/۰۴/۰۹)



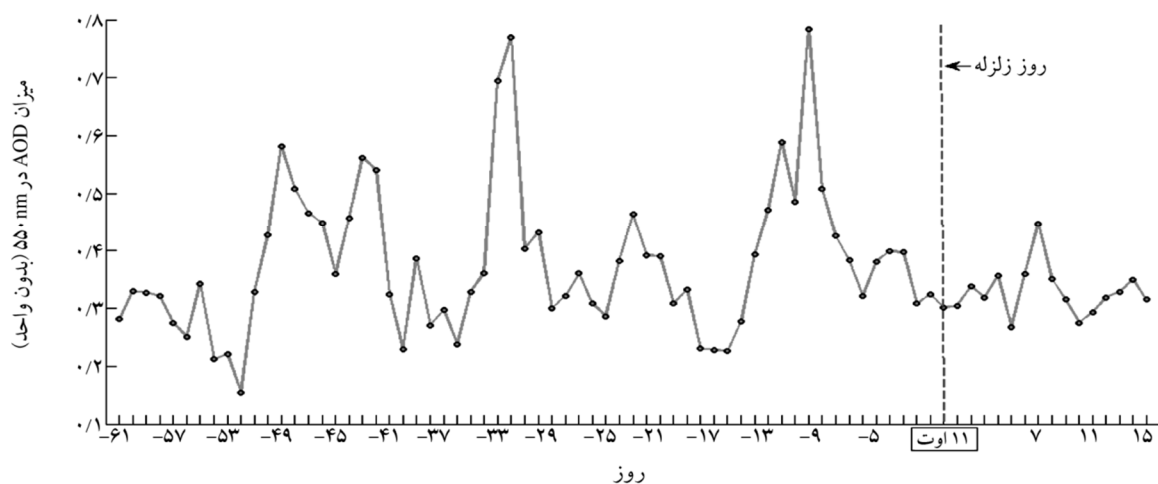
شکل (۳): سری زمانی متوسط روزانه AOD برای زلزله‌ی استان بوشهر ایران در تاریخ ۲۰۱۳/۰۴/۰۹.

سری زمانی ضخامت نوری هواویز (ایران- بزم - ۲۰۰۳/۱۲/۲۶)



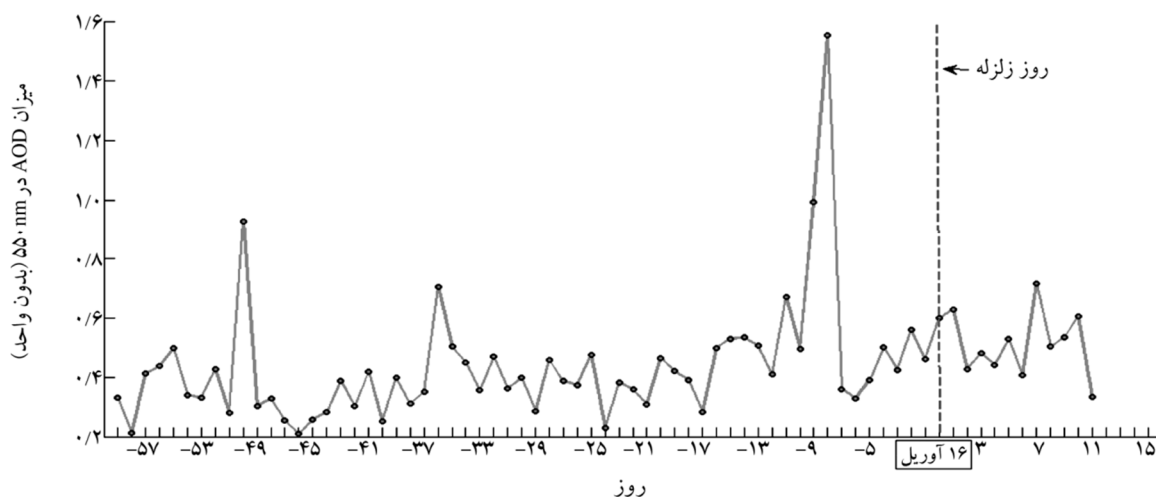
شکل (۴): سری زمانی متوسط روزانه AOD برای منطقه بزم ایران در تاریخ ۲۰۰۳/۱۲/۲۶.

سری زمانی ضخامت نوری هواویز (ایران- ورزقان - ۲۰۰۳/۱۲/۲۶)



شکل (۵): سری زمانی متوسط روزانه AOD برای زلزله‌ی استان آذربایجان شرقی ایران در تاریخ ۲۰۱۲/۰۸/۱۱.

سری زمانی ضخامت نوری هواپیز (ایران- سراوان- ۲۰۱۳/۰۴/۱۶)



شکل (۶): سری زمانی متوسط روزانه AOD برای زلزله‌ی استان سیستان و بلوچستان منطقه‌ی سراوان ایران در تاریخ ۲۰۱۳/۰۴/۱۶

سری زمانی AOD مقدار میانه و مقادیر چارک برای داده‌های زلزله‌ی مد نظر، به دست می‌آیند تا به کمک آنها محدوده‌ی بالا و پایین داده‌ها مشخص شود و طبق این محدوده، مقادیری که دارای تغییرات طبیعی نیستند مشخص می‌شوند. محدوده‌ی بالا و پایین به کمک معادله (۲) قابل حصول هستند.

$$x_{high} = M + k \times IQR$$

$$x_{low} = M - k \times IQR$$

(۲)

$$x_{low} < x < x_{high} \Rightarrow -k < \frac{x-M}{IQR} < +k, Dx = \frac{x-M}{IQR}$$

که در این معادلات  $x$  پارامتر مد نظر (در اینجا AOD) و  $x_{high}$  محدوده‌ی بالا،  $x_{low}$  محدوده‌ی پایین،  $M$  مقدار میانه،  $IQR$  مقدار چارک و  $Dx$  اختلاف پارامتر است. مقدار  $k$  ضریبی است که با اعمال در مقدار چارک محدوده‌ی مجاز تغییرات پارامتر مورد نظر را نشان می‌دهد. تحقیقات نشان داده است که مقدار  $k$  را می‌توان متناسب با بزرگای هر زلزله تعیین نمود.

اگر شرط  $(|Dx| > k)$  برقرار باشد آنگاه می‌توان گفت پارامتر مربوطه ( $x$ ) دارای تغییرات ناگهانی است.  $p$  که مقدار آن  $\rho = \pm 100 \times (|Dx| > k) / k$  می‌باشد، نشان‌دهنده‌ی درصد تغییر پارامتر از بازه‌ی تعریف شده است. بنابراین برای هر پارامتری ابتدا باید مقدار  $M$  و  $IQR$  آن در سری زمانی محاسبه شود و تغییرات ناگهانی آن پارامتر در سری زمانی موجود مشخص شود.

الگوریتم اهداف تیره که توسط کافمن در سال ۱۹۹۷ ارائه شد امروزه یکی از مهم‌ترین الگوریتم‌ها برای بازیافت ضخامت نوری هواپیز است. این الگوریتم عملکرد خود را برای داده‌های مودیس به خوبی نشان داده است که بر اساس تعیین پیکسل‌های تاریک در باندهای مادون قرمز میانی و سپس برآورد بازتابندگی آن عمل می‌کند و به مقدار ضخامت نوری هواپیز می‌رسد. اما این روش دارای محدودیت‌هایی است مانند محدود بودن الگوریتم به پیکسل‌های تیره که این پیکسل‌ها را باید در مناطق مرطوب و یا دارای پوشش گیاهی و آب و یخ یافت.

روش SYNTAM در سال ۲۰۰۵ توسط تانگ و همکاران معرفی شد. این الگوریتم به کمک ادغام داده‌های سنجنده‌ی مودیس سکوه‌ای آکوا و ترا توانست محدودیت الگوریتم اهداف تیره را جبران کند و به عنوان روشی کارآمد برای به دست آوردن ضخامت نوری هواپیز معرفی شود. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از این روش با داده‌های حاصل از ایستگاه‌های زمینی نتایج خوبی را نشان داده است.

در این مقاله از داده‌های سنجنده‌ی مودیس بر روی سکوی ترا استفاده شده است. برای یافتن تغییرات غیر عادی سری زمانی AOD، روش‌های مختلفی مانند روش میانه چارکی، موجک‌ها، فیلترینگ کالمن و غیره وجود دارد.

در روش میانه چارکی برای یافتن تغییرات غیر عادی در

#### ۴- مشاهدات

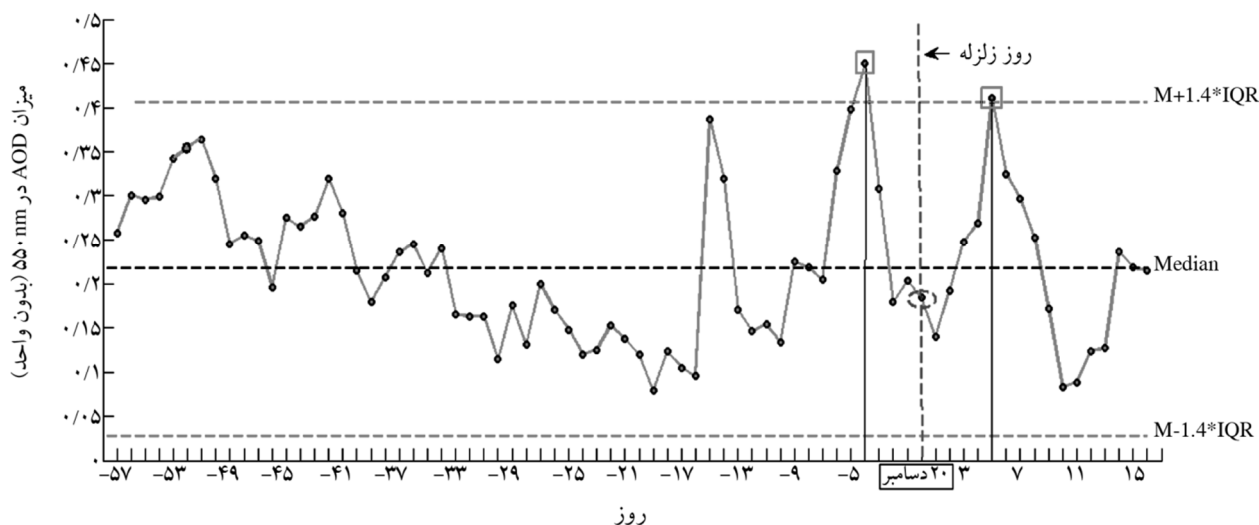
روش میانه چارکی برای یافتن تغییرات ناگهانی سری زمانی پنج زلزله‌ی معرفی شده در جدول (۱) پیاده‌سازی شده است. شکل‌های (۷) تا (۱۱) نشان‌دهنده‌ی روزهایی است که تغییرات ناگهانی برای میزان AOD در آنها رخ داده است.

شکل (۷) مربوط به زلزله‌ی سیستان و بلوچستان است که در تاریخ ۲۰ دسامبر ۲۰۱۰ به بزرگای ۶/۷ ریشتر و عمق ۱۲ کیلومتر رخ داده است. در این شکل با فرض  $K=1/4$ ، چهار روز قبل و پنج روز

بعد از وقوع زلزله تغییرات ناگهانی در میزان AOD مشاهده می‌شود.

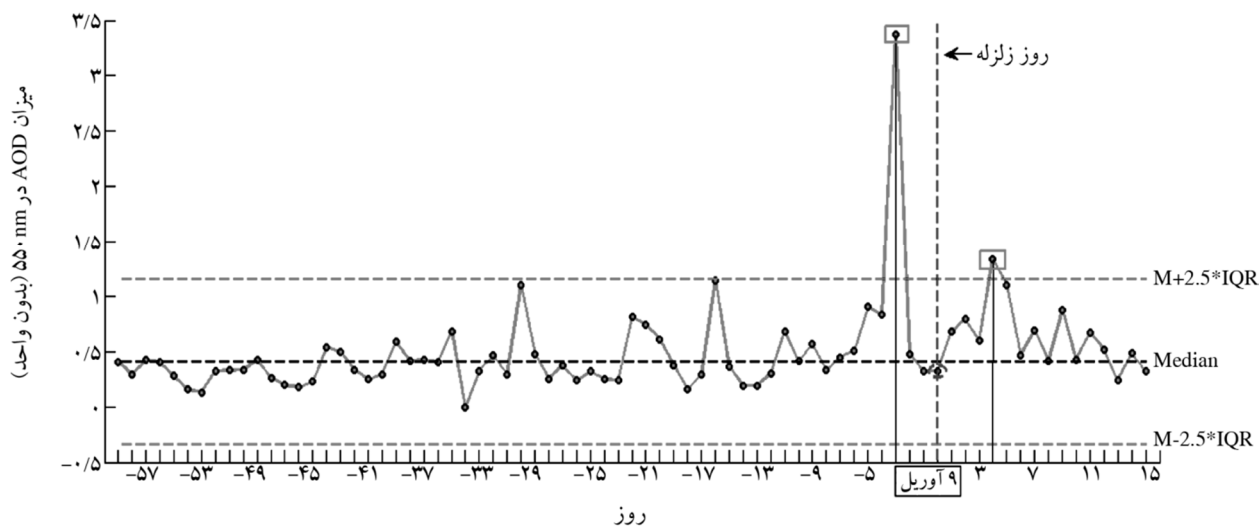
شکل (۸) مربوط به زلزله‌ی کاکلی بوشهر است که در تاریخ ۹ آوریل ۲۰۱۳ به بزرگای ۶/۴ ریشتر و عمق ۱۲ کیلومتر رخ داده است. در این زلزله، شهر کاکلی خسارت قابل توجهی ندید اما شهر کوچک شنبه و روستاهای تابع آن به شدت تخریب شدند که در نتیجه‌ی آن ۳۷ کشته و ۸۵۰ مجروح برجای ماند. در این شکل با فرض  $K=2/5$ ، سه روز قبل و چهار روز بعد از وقوع زلزله تغییرات ناگهانی در میزان AOD دیده می‌شود.

سری زمانی ضخامت نوری هواویز (ایران- سیستان و بلوچستان - ۲۰/۱۲/۲۰)



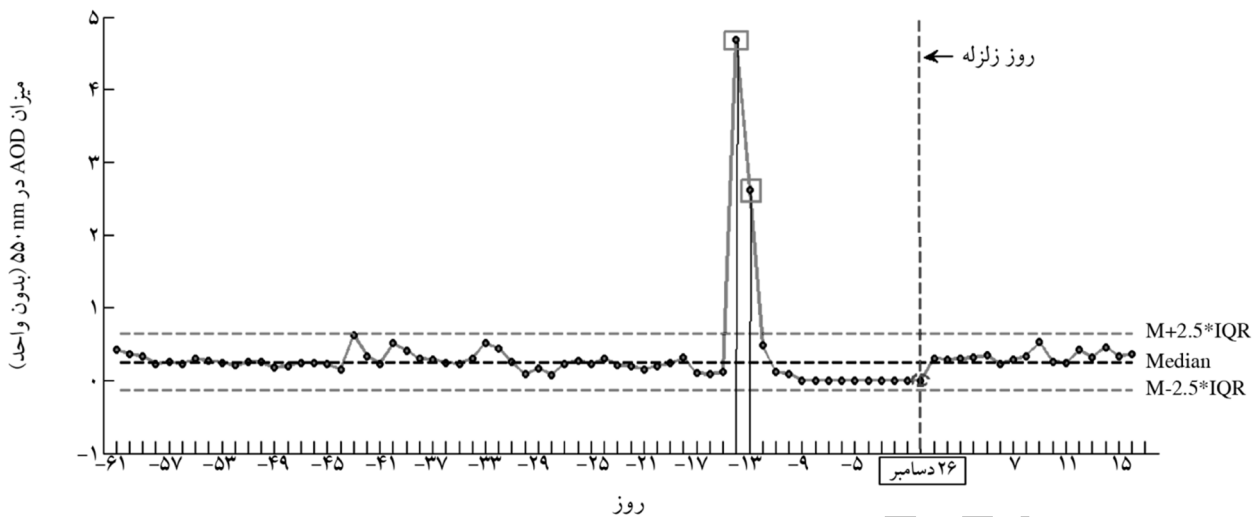
شکل (۷): زلزله‌ی سیستان و بلوچستان در تاریخ ۲۰ دسامبر ۲۰۱۰، چهار روز قبل و پنج روز بعد از وقوع زلزله تغییرات ناگهانی در میزان AOD مشاهده می‌شود.

سری زمانی ضخامت نوری هواویز (ایران- بوشهر - ۲۰۱۳/۰۴/۰۹)



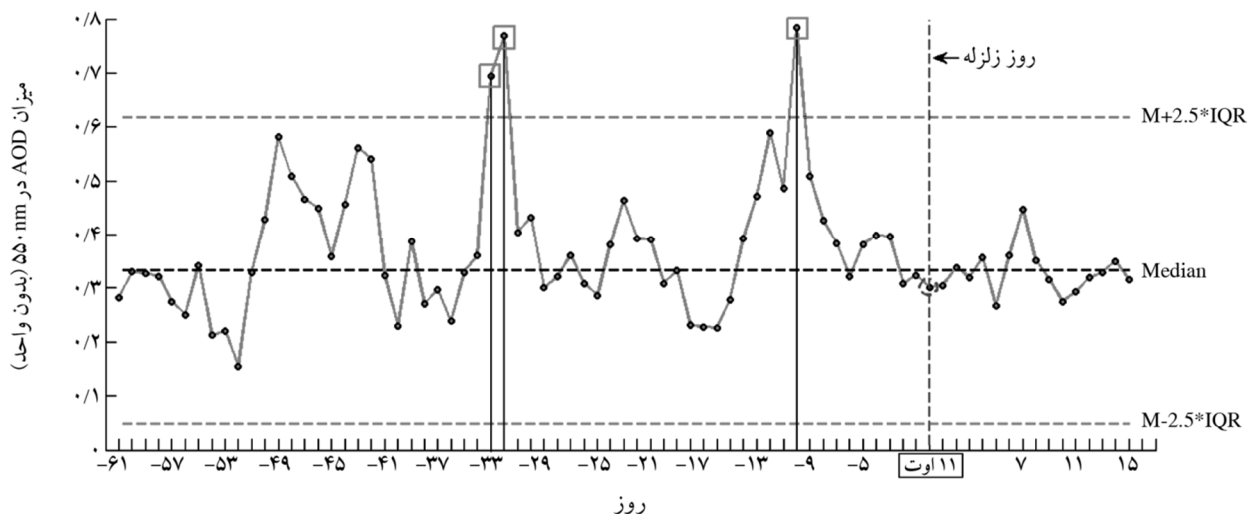
شکل (۸): زلزله‌ی کاکلی بوشهر در تاریخ ۹ آوریل ۲۰۱۳، سه روز قبل و چهار روز بعد از وقوع زلزله تغییرات ناگهانی در میزان AOD مشاهده می‌شود.

سری زمانی ضخامت نوری هواپیز (ایران-بم- ۲۶/۱۲/۲۰۰۳)



شکل (۹): زلزله‌ی بم کرمان است که در تاریخ ۲۶ دسامبر ۲۰۰۳، ۱۳ و ۱۴ روز قبل از وقوع زلزله تغییرات ناگهانی در میزان AOD مشاهده می‌شود.

سری زمانی ضخامت نوری (ایران- ورزقان- ۱۱/۰۸/۲۰۱۲)



شکل (۱۰): زلزله‌ی ورزقان در تاریخ ۱۱ اوت ۲۰۱۲، ۱۰، ۳۲ و ۳۳ روز قبل از وقوع زلزله تغییرات ناگهانی در میزان AOD مشاهده می‌شود.

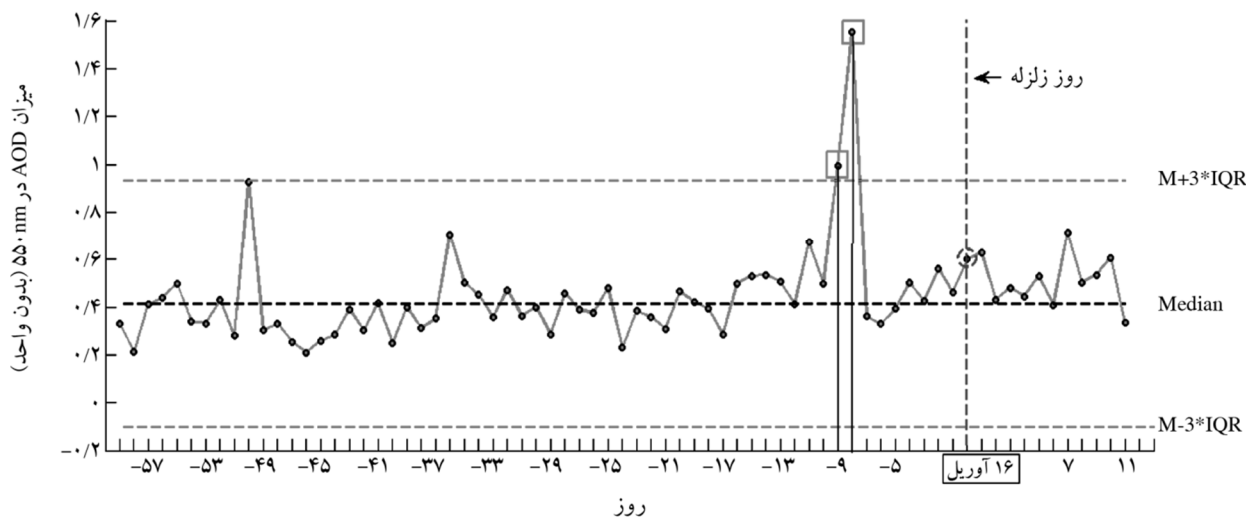
جای ماند. با توجه به این شکل و با فرض  $K=2/5$ ، ۱۰ و ۳۲ و ۳۳ روز قبل از وقوع زلزله تغییرات ناگهانی در میزان AOD مشاهده می‌شود.

شکل (۱۱) مربوط به زلزله‌ی سراوان استان سیستان و بلوچستان است که در تاریخ ۱۶ آوریل ۲۰۱۳ به بزرگای ۷/۷ ریشتر و عمق ۸۰ کیلومتر رخ داده است. در این زلزله ۱ کشته و ۱۲ مجروح بر جای ماند. با توجه به این شکل و با فرض  $K=3$ ، ۸ و ۹ روز قبل از وقوع زلزله تغییرات ناگهانی در میزان AOD مشاهده می‌شود.

شکل (۹) مربوط به زلزله‌ی بم کرمان است که در تاریخ ۲۶ دسامبر ۲۰۰۳ به بزرگای ۶/۶ ریشتر و عمق ۱۰ کیلومتر رخ داده است. در این زلزله ۲۶۲۷۱ کشته و ۳۰۰۰۰ مجروح بر جای ماند. با توجه به این شکل و با فرض  $K=2/5$ ، ۱۳ و ۱۴ روز قبل از وقوع زلزله تغییرات ناگهانی در میزان AOD مشاهده می‌شود.

شکل (۱۰) مربوط به زلزله‌ی ورزقان در استان آذربایجان شرقی است که در تاریخ ۱۱ اوت ۲۰۱۲ به بزرگای ۶/۴ ریشتر و عمق ۱۱ کیلومتر رخ داده است. در این زلزله ۳۰۶ کشته و ۴۳۲۲ مجروح بر

سری زمانی ضخامت نوری هواویز (ایران- سراوان- ۲۰۱۳/۰۴/۱۶)



شکل (۱۱): زلزله‌ی سراوان در تاریخ ۱۶ آوریل ۲۰۱۳، ۸ و ۹ روز قبل از وقوع زلزله تغییرات ناگهانی در میزان AOD مشاهده می‌شود.

پارامتر دیده می‌شود. نتایج نشان داد که میزان AOD چهار روز قبل از زلزله‌ی سیستان و بلوچستان (۲۰۱۰/۱۲/۲۰) به میزان ۲۳/۵۴ درصد از مرز مجاز بالایی عبور کرده است. سه روز قبل از زلزله‌ی کاکلی بوشهر (۲۰۱۳/۰۴/۰۹) میزان تغییرات غیر عادی پارامتر AOD از حد مجاز ۸۵/۹۹ درصد می‌باشد. در زلزله‌ی بم (۲۰۰۳/۱۲/۲۶) در ۱۳ و ۱۴ روز قبل از زلزله درصد عبور پارامتر AOD از مرز مجاز بالایی به ترتیب ۵۱۵/۹ و ۱۰۵۵/۷ درصد می‌باشد. در دو مورد مطالعاتی دیگر مقدار AOD به میزان ۵۸/۵۹ و ۱۲۰/۷۳ درصد به ترتیب در ۱۰ و ۸ روز قبل از زلزله‌های ورزقان (۲۰۱۲/۰۸/۱۱) و سراوان (۲۰۱۳/۰۴/۱۶) از مرز مجاز عبور کرده است. بنابراین این پارامتر می‌تواند به‌عنوان یک پیش‌نشانگر زلزله معرفی شود.

ناهنجاری‌های موجود در قبل از وقوع زلزله مربوط به پیش‌لرزه‌های خفیفی است که قبل از وقوع زلزله‌ی قوی رخ می‌دهد و این پیش‌لرزه‌ها با آزاد کردن انرژی و متصاعد کردن مولکول‌های گاز باعث افزایش میزان AOD می‌شوند. از طرفی ناهنجاری‌های بعد از وقوع زلزله‌ی قوی نیز باعث آزادسازی انرژی و ایجاد گردوغبار می‌شوند که به تبع آن میزان AOD افزایش می‌یابد.

البته باید توجه داشت که تمامی پیش‌نشانگرها قبل از همه‌ی

اختلال‌های قابل توجه به وجود آمده در سری زمانی مربوط به هر زلزله می‌تواند علت‌های گوناگونی از جمله بزرگی و قدرت زلزله، داشته باشد. به همین شکل فعالیت‌های آرام وابسته به جاذبه‌ی زمین در روزهای قبل و بعد از زلزله، ناهنجاری‌های به‌دست آمده را تغییر نمی‌دهد. زلزله‌های خفیف قبل از وقوع زلزله‌های قوی باعث ایجاد ناهنجاری قبل از وقوع زلزله با آزاد کردن انرژی و مولکول‌های گاز و ایجاد گردوغبار می‌شوند.

ناهنجاری‌های شناسایی شده مربوط به سری زمانی AOD برای روزهای بعد از زلزله، ممکن است مربوط به پس‌لرزه‌های قوی باشد که در پی این پس‌لرزه‌ها انرژی آزاد می‌شود و مولکول‌های گاز متصاعد می‌شوند. از طرفی گردوغبار تولید شده به علت وقوع زلزله‌ها می‌تواند باعث افزایش AOD گردد.

## ۵- نتیجه‌گیری

تا به امروز مطالعات بسیار محدودی راجع به بررسی AOD به‌عنوان یک پیش‌نشانگر زلزله انجام شده است. در این مقاله سعی شد تا این پارامتر با دقت بالا و با استفاده از موارد مطالعاتی متعدد مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به بررسی سری زمانی AOD مربوط به پنج زلزله با قدرت بالا در منطقه‌ی ایران، مشخص شد که قبل و بعد از وقوع زلزله ناهنجاری‌هایی در این



7. Saradjian, M.R. and Akhoondzadeh, M. (2011) Prediction of the date, magnitude and affected area of impending strong earthquakes using integration of multi precursors earthquake parameters. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **11**, 1109-1119.
8. Chu, D.A., Kaufman, Y.J., Ichoku, C., Remer, L.A., Tanre, D., and Holben, B.N. (2002) Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land. *Geophysical Research Letters*, **29**, <http://dx.doi.org/10.1029/2001GLO13205>.
9. Akhoondzadeh, M. (2015) Ant Colony Optimization detects anomalous aerosol variations associated with the Chile earthquake of 27 February 2010. *Science Direct*.
10. Pulinets, S.A. and Ouzounov, D. (2011) Lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling (LAIC) model - a unified concept for earthquake precursors validation. *Journal of Asian Earth Sciences*, **41**, 371-382.
11. Pulinets, S.A., Morozova, L.I., and Yudin, I.A. (2014) Synchronization of atmospheric indicators at the last stage of earthquake preparation cycle. *Res. Geophys.*, **4**, 45-50.
12. Okada, Y., Mukai, S., and Singh, R.P. (2004) Changes in atmospheric aerosol parameters after Gujarat earthquake of January 26. *Adv. Space Res.*, **33**(3), 254-258.
13. Qin, K., Wu, L.X., Zheng, S., Bai, Y., and Lv, X. (2014) Is there an abnormal enhancement of atmospheric aerosol before the 2008 Wenchuan earthquake. *Advances in Space Research Journal*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2014.04.025>.
14. Kaufman, Y.J., Tanri, D., Remer, L.A., Vermote, E.F., Chu, A., and Holben, B.N. (1997) Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **102**(D14), 17,051-17,067.
15. Tang, J., Xuea, Y., Yuc, T., and Guan, Y. (2005) Aerosol optical thickness determination by exploiting the synergy of TERRA and AQUA MODIS. *Remote Sensing of Environment*, **94**, 327-334.

زلزله‌های بزرگ رخ نمی‌دهند و به‌منظور کاهش عدم قطعیت لازم است که رفتار چند پیش‌نشانگر را به‌صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار داد. از طرفی پدیده‌های ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی متعددی مانند طوفان‌های خورشیدی، فعالیت‌های ژئومغناطیسی و غیره می‌توانند باعث ایجاد رفتار غیر عادی در تغییرات پیش‌نشانگرها شوند؛ بنابراین وجود هشدار خطا<sup>۱۱</sup> امری غیر قابل اجتناب در مطالعه‌ی پیش‌نشانگرها می‌باشد و کاهش آن مستلزم تجزیه و تحلیل آماری رفتار پیش‌نشانگرهای مختلف بر روی تعداد زیادی از زلزله‌های رخ داده است.

افزایش دقت در برآورد ناهنجاری در سری‌های زمانی پیش‌نشانگرهای زلزله، کاری است که در مطالعات آینده باید بدان پرداخت تا نتایجی با دقت بالا حاصل شوند.

#### مراجع

1. Wang, W., Cao, X., and Song, X. (2001) Estimation of the Earthquakes in Chinese Mainland by using artificial neural networks. *Chinese Journal of Earthquakes*, **3**(21), 10-14 (in Chinese).
2. Wang, K., Chen, Q., Sun, S., and Wang, A. (2006) Predicting the 1975 Haicheng earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96**, 757-795.
3. Alarifi, A.S.N., Alarifi, N.S.N., and Al-Humidan, S. (2011) Earthquakes magnitude predication using artificial neural network in northern Red Sea area. *Journal of King Saud University*.
4. Pulinets, S.A. and Boyarchuk, K.A. (2004) *Ionospheric Precursors of Earthquakes*. Springer, Berlin, p. 288.
5. Molchanov, O.A. and Hayakawa, M. (2008) *Seismo-Electromagnetics and Related Phenomena: History and Latest Results*. TERRAPUB, Tokyo, 190, ISBN: 978-4-88704-143-1.
6. 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.

16. NASA Data. [online]. Available: [http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daacbin/G3/gui.cgi?254instance\\_id=MODIS\\_DAILY\\_L3](http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daacbin/G3/gui.cgi?254instance_id=MODIS_DAILY_L3) [2016, April 1].

### واژه‌نامه

- ۱- ضخامت نوری هواویز Aerosol Optical Depth (AOD)
- ۲- شبکه رباتیک هواویز AERONET
- ۳- الگوریتم‌های اهداف تیره Dark Dense Vegetation (DDV)
- ۴- ادغام داده‌های آکوا و ترای SYnergy of Terra and Aqua Modis (SYNTAM)  
سنجنده مودیس
- ۵- غیرعادی Anomaly
- ۶- لیتوسفر- اتمسفر- یونسفر Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere (LAI)
- ۷- الگوریتم طیف آبی Deep Blue Algorithm
- ۸- رادار پیشرفته با وضوح Advanced Very High Resolution Radar (AVHRR)  
بسیار بالا
- ۹- پولدر POLDER
- ۱۰- تامز TOMS
- ۱۱- میسر MISR
- ۱۲- هشدار خطا False Alarm

Archive of SID