



## یک روش ژئودتیک برای تعیین مختصات محل سقوط آذرگوی مطالعه خاص: تعیین محل برخورد شهاب سنگ در غرب زنجان در تاریخ ۸ مرداد ۹۴

سید قاسم رستمی<sup>۱\*</sup> و سبحان حیاتی<sup>۲</sup>

- ۱- عضو هیات علمی مرتبی، گروه مهندسی عمران نقشه برداری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران  
۲- دانش آموخته کارشناس ارشد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بولوی سینا همدان، ایران

### چکیده:

آذرگوی ها، شهاب های بسیار بزرگ و نورانی هستند که می توان آنها را از فاصله ۵۰۰ کیلومتری مشاهده کرد. در این مقاله از مشاهدات گزارش شده ارتفاع و آریمومت نقطه شروع و پایان مسیر حرکت آذرگوی (در سیستم مختصات محلی نجومی) از چند نقطه در فاصله مناسب از محل وقوع استفاده شده است. ابتدا معادلات این دو مشاهده (ارتفاع و آریمومت) بر حسب مختصات آذرگوی در سیستم مختصات زمین مرکزی به دست آمده و سپس با استفاده از روش برآورد کمترین مربعات، مختصات نقطه شروع و پایان مسیر حرکت در سیستم زمین مرکزی و سپس در سیستم مختصات محلی نجومی همراه با دقت های مربوطه به دست خواهد آمد. در ادامه این مقاله، یک مطالعه خاص بر روی آذرگوی و شهاب سنگی که در تاریخ ۳۰ تیر ۱۳۹۴ در غرب شهر زنجان سقوط کرد، انجام شده است. نتایج این مطالعه با وجود خطای ۵ درجه برای ارتفاع و آریمومت مشاهده شده از ۷ شهر، دایره ای به شعاع ۶/۱۵ کیلومتر با احتمال وقوع ۳۹ درصد برای مختصات محل سقوط شهاب سنگ روی زمین به دست آورد. بر طبق گزارشات، تکه هایی از این شهاب سنگ، در همین محدوده (مزارع روستای حصار و مشمبا) نیز پیدا شده است.

واژه های کلیدی: آذرگوی، شهاب سنگ، سیستم مختصات LA، سیستم مختصات CTS، برآورد کمترین مربعات.

## ۱- مقدمه

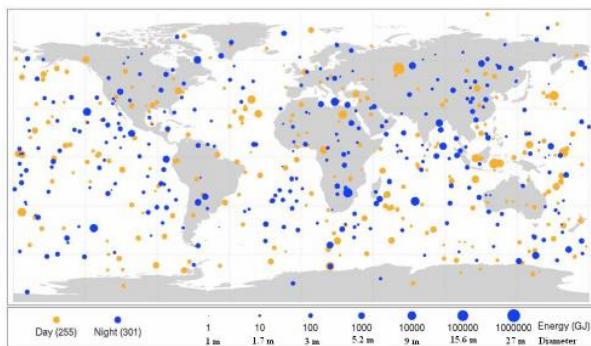
شهاب واره یا تیر شهاب (Meteor) به خطوط نورانی گفته می‌شود که ناگهان در آسمان دیده می‌شوند. منشأ شهاب واره ها می‌تواند از اجرام جامد بسیار ریز (به اندازه دانه های شن) که اکثر آنها حاصل از ذرات دنباله سرده شده ستارگان دنباله دار (Comet) باشد و یا حاصل از سیارک ها (Asteroid) با ابعاد یک متر تا چند کیلومتر که مدار آنها جو زمین را قطع می کند، می باشد [۳]. از نظر نجومی به شهاب های با قدر بیشتر از ۳- (روشن تر از سیارات مشتری و زهره) که حاصل از برخورد سیارک با جو زمین می باشد، آذرگوی (Fireballs) می گویند. آن دسته از آذرگوی های بسیار بزرگ و نورانی که در نزدیکی سطح زمین منفجر می شوند را شهاب سنگ های انفجاری یا بولید می نامند. کلمه بولید از واژه یونانی بولیز (Bolis) به معنی موشک گرفته شده است. بولید ها تا وقتی در آسمان هستند، سنگ آسمانی (Meteoroid) بوده و زمانیکه به زمین می رساند، شهاب سنگ (Meteorite) نامیده می شوند [۲].

آذرگوی ها از ارتفاع حدود ۱۲۰ کیلومتری زمین ظاهر می شوند و ممکن است تا ارتفاع ۲۰ کیلومتری از سطح زمین نزدیک شوند که در این حالت احتمال برخورد با زمین وجود دارد [۲]. اجرام با قطر کمتر از ۲۵ متر، آسیب بسیار زیادی به زمین نمی زند. زیرا اکثر جرم آنها در جو زمین می سوزد. اما اجرام با قطر بزرگتر از ۲۵ متر می تواند بسیار خطرناک بوده و گودال های بزرگ تا حد چند کیلومتر را روی زمین ایجاد کنند [۶]. با سقوط آزاد این نوع اجرام در میدان گرانش زمین و همچین سرعت حرکت انتقالی زمین در فضا که برابر با ۳۰ کیلومتر بر ثانیه است، سرعت نهایی آنها وابسته به اندازه و سرعت اولیه جرم، زاویه ورود به جو زمین و سرعت باد و چگالی تروپوسفر جو، می تواند بین ۱۱ تا ۷۲ کیلومتر بر ثانیه باشد. اما سرعت های ۱۷ تا ۵۱ کیلومتر بر ثانیه به طور معمول اتفاق افتاده است [۱۰].

سالانه ۲۰ تا ۱۰۰ هزار تن گرد و غبار و اجرام در حد شن و ماسه از فضا به جو زمین اصابت می کنند. مطالعات تاریخی از روی حفره های ایجاد شده ناشی از برخورد سیارک ها با زمین نشان می دهد، هر ۲۰۰۰ سال یک جرم به اندازه یک زمین فوتbal با زمین برخورد کرده است. تقریباً هر ۱۰۰ سال یکبار، یک جرم با قطر در حد ۱۰۰ متر با زمین برخورد می کند. هر سال حداقل یک جرم با قطر حدود ۱۰ متر با زمین برخورد می کند. در هر هفته نیز، یک سیارک کوچک با قطر حدود یک متر با جو زمین برخورد می کند [۹].

ناسا در پروژه برنامه اجرام نزدیک (Near Earth Object) با هدف کامل کردن جامعه اجرام نزدیک به زمین، به بررسی و کنترل مدار حرکت اجرامی با فاصله ۵۰ میلیون کیلومتری از مدار زمین (در فاصله  $1/3$  واحد نجومی از خورشید) و بزرگی چند متر تا چند کیلومتر می پردازد. در این برنامه مرکز بر روی اجرام به بزرگی ۱۴۰ متر بیشتر است. زیرا تعداد آنها، ۲۵ برابر بیشتر از اجرام در حد چند کیلومتر تخمین زده شده است. تا کنون و با استفاده از مشاهدات تلسکوپی، حدود ۵۰۰ جرم (از ۲۰ میلیون جرم اطراف زمین) به قطر ۱۰ تا ۲۰ متر در اطراف زمین شناخته شده است که می تواند خطر جدی برای برخورد با زمین در سال های آتی داشته باشند [۸] اما دولت امریکا از طریق سنجنده های راداری مادون صوت در سراسر دنیا توانسته است در ۲۰ سال گذشته، حدود ۵۵۶ برخورد از این آذرگوی ها و بولیدها را به ثبت برساند (شکل (۱)). سازمان همکاری های آسیا و آقیانوسیه در پروژه مهم آپوسوس<sup>۱</sup> نیز برنامه مشابهی را با کمک چند کشور آسیایی از جمله ایران که رصد خانه هایی با تلسکوپ های بزرگ که قابلیت ردیابی اجرام با قدر ۱۷ تا ۲۲ را دارند، انجام می دهد (شکل (۲)). در این پروژه با هدف شناسایی اجرام در حد ۱۰ سانتیمتر در فاصله ۱۰۰۰ کیلومتر و ۲۰ سانتیمتر در فاصله ۲۰۰۰ کیلومتری زمین می باشد.

<sup>۱</sup>Asia Pacific ground base Optical space Satellite Observation System (APOSOS)



شکل ۱: محل های برخورد حدود ۶۰۰ شهاب سنگ از قطر یک ۲۰ متر در دوره ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۳



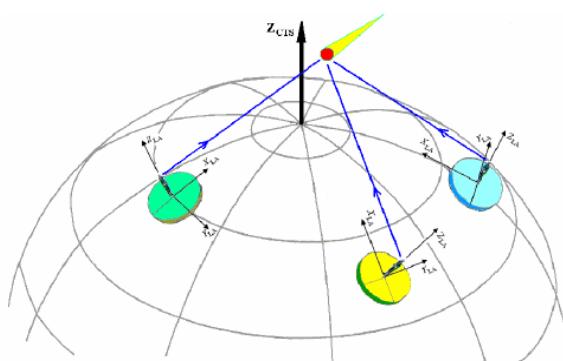
شکل ۲: رصد خانه های مورد استفاده در پروژه آپسوس برای بررسی و رصد اجرام نزدیک

بیشتر شهاب سنگ‌ها در مناطقی پیدا می‌شوند که مثل قاره اروپا و کشور هند، دارای جمیعت زیادی هستند. پایگاه داده‌های شهاب سنگ‌ها را کمیته نامگذاری انجمن بین‌المللی شهاب‌ها (The Nomenclature Committee of the Meteoritical Society) بر عهده دارد. این بولتن تا کنون حدود ۴۵ هزار مورد شهاب سنگ شناخته شده را ثبت کرده است [۱]. از این تعداد تا کنون ۱۱۲۳ آذرگوی با چشم دیده شده‌اند. بزرگترین حادثه آسمانی در این دوره ۲۰ ساله مربوط به برخورد ۱۵ فوریه ۲۰۱۳ (روز جمعه ۲۷ بهمن ۱۳۹۱ در ساعت ۰۳:۰۰ به وقت جهانی) در چلیابینسک (Chelyabinsk) روسیه است. این شهاب سنگ ۲۰ متری، توانسته است انرژی معادل ۴۴۰ هزار تن TNT را آزاد کند. سرعت این شهاب سنگ ۱۸/۶ کیلومتر بر ثانیه پرآورد شده است [۱۲ و ۷].

آثار و تبعات برخورد شهاب سنگ به زمین تابع سرعت و جرم آن است. تغییرات ناشی از برخورد شهاب سنگ‌ها به سطح زمین در دمای حدود ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد و فشار بین ۱۰۰ تا ۱۰ کیلوبار انجام می‌شود. این دما و فشار به حدی است که به عقیده برخی محققین اگر در محل برخورد شهاب در سنگ‌های پوسته زمین، کرین به اندازه کافی وجود داشته باشد، این احتمال می‌رود که به علت دما و فشار شهاب، سنگ کرین دار در محل برخورد، تبدیل به الماس شود [۴]. یکی از اقداماتی که می‌تواند در پیدا کردن آثار برخورد شهاب سنگ‌ها با زمین به ما کمک کند، تحلیل و بررسی مشاهدات بصیری ناظران یک آذرگوی بزرگ از نقاط مختلفی بر روی کره زمین می‌باشد. سوابق نشان می‌دهد یک آذرگوی بزرگ با ارتفاع بالا می‌تواند از فاصله ۳۰۰ تا ۵۰۰ کیلومتری به راحتی دیده شود [۹]. از این رو با داشتن مشاهدات مختصات مسیر حرکت یک شهاب سنگ از چند نقطه در اطراف محل وقوع حادثه، می‌توان مختصات محل برخورد شهاب سنگ با سطح زمین را پیدا کرد [۲]. نحوه بررسی این موضوع تا کنون به روش‌های ژئوتیک انجام نشده است. در این مقاله روش سرشکنی کمترین مربعات و تبدیلات بین سیستم‌های مختصات سماوی، محلی و انجام نشده است. در این مقاله روش سرشکنی کمترین مربعات و تبدیلات بین سیستم‌های مختصات سماوی، محلی و جهانی، برای حل موضوع ارائه شده است. سپس با مطالعه خاص بر روی یک شهاب سنگی که اخیراً در غرب شهر زنجان با زمین برخورد کرده است، نتایج این روش را مورد ارزیابی قرار داده‌ایم.

## ۲-مراحل روش ژئودتیک برای تعیین مختصات مسیر آذرگوی

به منظور پیدا کردن مسیر حرکت شهاب سنگ، ابتدا فرض می کنیم مختصات شروع و پایان مسیر حرکت آذرگوی را در سیستم افقی نجومی (Horizontal Celestial coordinate System) از حداقل سه نقطه در فواصل مناسب (که ایجاد یک شبکه منظم و مستحکم از نظر هندسی بنماید)، داشته باشیم. به این ترتیب باید ناظران با دقت، ارتفاع و آزیموت نقطه شروع و پایان مسیر آذرگوی را گزارش نمایند. گاهی اوقات می توان به کمک عوارض موجود در محل ناظر، مثل کوه ها، ساختمان ها و امتداد خیابان ها، مختصات دقیق تری را برآورد کرد. در اینجا ارتفاع و آزیموت را به عنوان کمیت های مشاهداتی در برآورد کمترین مربعات در نظر می گیریم. مجھولات در این پردازش عبارتست از مختصات سه بعدی نقطه شروع و پایان مسیر آذرگوی در سیستم مختصات ژئوسنتریک قراردادی زمین (CTS) یا (COS) که به صورت سیستم مختصات دکارتی نسبت به استوای متواتر، نصف النهار متواتر گرینویچ (GMO) و قطب متواتر یا قراردادی (CIO) زمین بیان می شود [۵].



شکل ۳: جهت های مشاهده آذرگوی از سه نقطه از کره زمین برای تعیین مسیر حرکت آن در آسمان

برای این منظور باید روابط ارتفاع و آزیموت در سیستم افقی را بر حسب مختصات دکارتی در سیستم ژئوسنتریک به دست آورد. ابتدا رابطه تبدیل سیستم افقی به سیستم دکارتی آن را در سیستم محلی نجومی (LA) یا (Local Astronomy) می نویسیم:

$$\mathbf{r}_{LA} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d \cdot \cos a \cdot \cos A \\ d \cdot \cos a \cdot \sin A \\ d \cdot \sin a \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

در رابطه (۱-۲) کمیت  $a$ ، ارتفاع آذرگوی بر حسب درجه،  $A$ ، آزیموت آذرگوی بر حسب درجه و  $d$  فاصله ناظر تا آذرگوی بر حسب متر می باشد. اکنون رابطه تبدیل سیستم مختصات جهانی CTS به سیستم مختصات محلی نجومی LA را به صورت زیر می نویسیم:

$$\vec{r}_{LA} = P_2 \cdot R_2(\Phi - 90) \cdot R_3(\Lambda - 180) \cdot (\vec{r}_{CT} - \vec{r}_{0CT}) \quad (2-2)$$

در رابطه (۲-۲)، کمیت  $\Phi$ ، عرض نجومی ناظر بر حسب درجه و  $\Lambda$ ، طول نجومی ناظر بر حسب درجه و  $P_2$  ماتریس انعکاس محور دوم و  $\vec{r}_{0CT}$  مختصات ناظر در سیستم متواتر ژئوسنتریک CTS می باشد. در اینجا برای محاسبات ساده تر، طول و عرض نجومی را به طول جغرافیایی ( $\lambda$ ) و عرض جغرافیایی ( $\varphi$ ) و ارتفاع از کره (H) در سیستم مختصات کروی به شعاع R تبدیل کرده و سپس رابطه ماتریسی فوق را به یک فرمول بسته به صورت رابطه (۳-۲) تبدیل می کنیم که مراحل و نتایج از رابطه های (۴-۲)، (۵-۲) و (۶-۲) آمده است:

$$r_{LA} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\varphi - 90) & 0 & -\sin(\varphi - 90) \\ 0 & -1 & 0 \\ \sin(\varphi - 90) & 0 & \cos(\varphi - 90) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\lambda - 180) & \sin(\lambda - 180) & 0 \\ -\sin(\lambda - 180) & \cos(\lambda - 180) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \dots \quad (3-2)$$

$$\dots \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R + H) \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda \\ (R + H) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda \\ (R + H) \cdot \sin \varphi \end{bmatrix}$$

$$r_{LA} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi - 90) * \cos(\lambda - 180) & \cos(\varphi - 90) * \sin(\lambda - 180) & -\sin(\varphi - 90) \\ \sin(\lambda - 180) & -\cos(\lambda - 180) & 0 \\ \sin(\varphi - 90) * \cos(\lambda - 180) & \sin(\varphi - 90) * \sin(\lambda - 180) & \cos(\varphi - 90) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X - (R + H) \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda \\ Y - (R + H) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda \\ Z - (R + H) \cdot \sin \varphi \end{bmatrix}$$

$$x = d \cdot \cos a \cdot \cos A = \cos(\varphi - 90) \cos(\lambda - 180) (X - (R + H) \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda) + \dots$$

$$\dots \cos(\varphi - 90) \sin(\lambda - 180) (Y - (R + H) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda) - \dots$$

$$\dots \sin(\varphi - 90) (Z - (R + H) \cdot \sin \varphi) \quad (4-2)$$

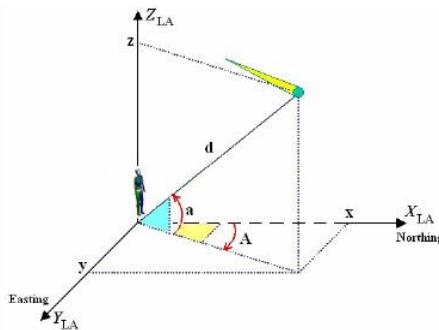
$$y = d \cdot \cos a \cdot \sin A = \sin(\lambda - 180) (X - (R + H) \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda) - \dots$$

$$\dots \cos(\lambda - 180) (Y - (R + H) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda) \quad (5-2)$$

$$z = d \cdot \sin a = \sin(\varphi - 90) \cos(\lambda - 180) (X - (R + H) \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda) + \dots$$

$$\dots \sin(\varphi - 90) \sin(\lambda - 180) (Y - (R + H) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda) + \dots$$

$$\dots \cos(\varphi - 90) (Z - (R + H) \cdot \sin \varphi) \quad (6-2)$$



شکل ۴: مختصات آذرگوی در سیستم افقی سماوی (با مرکز چشم ناظر) و سیستم محلی نجومی LA

لذا می توانیم از رابطه های (۴-۲، ۵-۲ و ۶-۲) برای تعیین ارتفاع و آزیموت آذرگوی به صورت زیر استفاده کنیم. در این روابط X, Y, Z به عنوان مختصات مجھول آذرگوی ( نقطه شروع و انتهای مسیر حرکت ) در سیستم مختصات ژئو سنتریک CTS در نظر گرفته می شود ( رابطه های (۷-۲، ۸-۲ و ۹-۲) ).

$$\tan A = \frac{y}{x} = \frac{\sin(\lambda - 180) (X - (R + H) \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda) - \cos(\lambda - 180) (Y - (R + H) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda)}{\cos(\varphi - 90) \cos(\lambda - 180) (X - (R + H) \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda) + \dots}$$

$$\dots \cos(\varphi - 90) \sin(\lambda - 180) (Y - (R + H) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda) - \sin(\varphi - 90) (Z - (R + H) \cdot \sin \varphi) \quad (7-2)$$

$$\tan a = \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{\dots \sin(\varphi - 90) \sin(\lambda - 180) (Y - (R + H) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda) + \cos(\varphi - 90) (Z - (R + H) \cdot \sin \varphi)}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (8-2)$$

$$d = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (9-2)$$

مرحله بعد در سرشکنی کمترین مربعات به روش معادلات مشاهدات (یا روش پارامتریک)، به دست آوردن مشتقات جزئی هر یک از مشاهدات نسبت به تک تک مجھولات برای خطی سازی معادلات غیر خطی به روش تقریب تیلور می باشد. لذا رابطه تغییرات ارتفاع و آریمومت آذرگوی را نسبت به تغییرات مختصات آن در سیستم ژئوسنتریک را به صورت روابط(۱۰-۲) به دست می آوریم [۶]:

$$\frac{\partial A}{\partial X} = \frac{x \sin(\lambda - 180) - y \cos(\varphi - 90) \cos(\lambda - 180)}{x^2 + y^2}$$

رابطه(۱۰-۲) این شماره برای کلیه روابط مشقات جزئی زیر است:

$$\frac{\partial A}{\partial Y} = \frac{-x \cos(\lambda - 180) - y \cos(\varphi - 90) \sin(\lambda - 180)}{x^2 + y^2} \quad \frac{\partial A}{\partial Z} = \frac{y \sin(\varphi - 90)}{x^2 + y^2}$$

$$\frac{\partial a}{\partial X} = \frac{\sqrt{x^2 + y^2} * \sin(\varphi - 90) \cos(\lambda - 180) - \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} (x \cos(\varphi - 90) \cos(\lambda - 180) + y \sin(\lambda - 180))}{x^2 + y^2 + z^2}$$

$$\frac{\partial a}{\partial Y} = \frac{\sqrt{x^2 + y^2} \sin(\varphi - 90) \sin(\lambda - 180) - \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} (x \cos(\varphi - 90) \sin(\lambda - 180) - y \cos(\lambda - 180))}{x^2 + y^2 + z^2}$$

$$\frac{\partial a}{\partial Z} = \frac{\sqrt{x^2 + y^2} \cos(\varphi - 90) + \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} x \sin(\varphi - 90)}{x^2 + y^2 + z^2}$$

اکنون این مشتقات را با توجه به ترتیب مشاهدات و به ترتیب مجھولات مطابق با رابطه (۱۱-۲) در ماتریس A به نام ماتریس طرح (Design Matrix) قرار می دهیم. سپس با توجه به بردار مشاهدات L، یک ماتریس وزن (P) بر اساس دقت برآورد مختصات آذرگوی در سیستم افقی تشکیل دهیم. به عنوان مثال دقت ارتفاع آذرگوی را با  $\sigma_a$  و دقت آریمومت آذرگوی را با  $\sigma_A$  بر حسب رادیان نشان می دهیم به این ترتیب برای n نقطه که آذرگوی را به صورت همزمان مشاهده کرده اند، خواهیم داشت:

رابطه (۱۱-۲)

$$A_{2n \times 3} = \begin{bmatrix} \frac{\partial a_1}{\partial X} & \frac{\partial a_1}{\partial Y} & \frac{\partial a_1}{\partial Z} \\ \frac{\partial A_1}{\partial X} & \frac{\partial A_1}{\partial Y} & \frac{\partial A_1}{\partial Z} \\ \vdots & & \\ \frac{\partial a_n}{\partial X} & \frac{\partial a_n}{\partial Y} & \frac{\partial a_n}{\partial Z} \\ \frac{\partial A_n}{\partial X} & \frac{\partial A_n}{\partial Y} & \frac{\partial A_n}{\partial Z} \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} a_1 \\ A_1 \\ a_2 \\ A_2 \\ \vdots \\ a_n \\ A_n \end{bmatrix} \quad P_{2n \times 2n} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_{a1}^2} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{A1}^2} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_{a2}^2} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_{A2}^2} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\sigma_{an}^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \frac{1}{\sigma_{An}^2} \end{bmatrix}$$

با توجه به اینکه معادلات مشاهدات فوق غیر خطی هستند، باید یک مختصات تقریبی برای مجھولات (که برابر با متوسط مختصات ژئوسنتریک n نقطه مشاهده شده می باشد) در نظر گرفت. بر اساس این مختصات تقریبی، مشاهدات با روابط (۷-۲ و ۸) محاسبه و اختلاف هر مشاهده با مقدار متاظر محاسبه شده در بردار DL قرار می گیرد.

$$DL_{2n \times 1} = \begin{bmatrix} a_1 - \tan^{-1} \frac{z_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} \\ A_1 - \tan^{-1} \frac{y_1}{x_1} \\ . \\ . \end{bmatrix}$$

رابطه(۱۲-۲)

با این مقدمات، مختصات آذرگوی در سیستم ژئوسنتریک از طریق روش کمترین مربعات در مرحله اول به صورت زیر به دست می آید:

$$DX = (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot P \cdot DL \quad r_{CT} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + DX$$

رابطه(۱۳-۲)

با توجه به دقت مورد نیاز برای برآورد مختصات آذرگوی، مقدار مولفه های DX سنجیده می شوند. اگر قدر مطلق این مولفه ها، از یک مقدار مشخصی بزرگتر باشد، مجدداً مختصات به دست آمده را به عنوان مختصات تقریبی در مراحل قبل به کار برد و مجدداً پردازش با محاسبه بردار DL و ماتریس A انجام می شود. این فرآیند تکراری، نهایتاً به یک مقدار کوچک و قابل قبول (مثلای یک متر) برای مولفه های DX منجر خواهد شد. روش بیان شده قادر است دقت مختصات برآورده شده را از رابطه زیر تعیین کند:

$$CX = (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_X^2 & \sigma_{X,Y} & \sigma_{X,Z} \\ \sigma_{Y,X} & \sigma_Y^2 & \sigma_{Y,Z} \\ \sigma_{Z,X} & \sigma_{Z,Y} & \sigma_Z^2 \end{bmatrix}$$

رابطه(۱۴-۲)

قبل از هر گونه تفسیر بر روی نتایج، برای ارزیابی نتایج سرشکنی، می توان از تست فاکتور واریانس ثانویه استفاده کرد. در این تست ابتدا فاکتور واریانس ثانویه  $\hat{\sigma}_0^2$  به دست می آید. بر اساس توزیع خی دو، محدوده قابل پذیرش تست بر اساس یک مقدار سطح اطمینان  $(1-\alpha)$  و درجه آزادی به دست می آید:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{DL^T \cdot P \cdot DL}{2n-3} \quad \chi_{\frac{\alpha}{2}, 2n-3}^2 < \sigma_0^2 < \chi_{1-\frac{\alpha}{2}, 2n-3}^2$$

رابطه(۱۵-۲)

با پذیرفته شدن تست، مختصات و دقت صحیح سرشکنی بدست می آید. با توجه به اینکه مختصات در سیستم ژئوسنتریک هستند، می توان آنرا در حالت معکوس به سیستم مختصات محلی و سیستم افقی تبدیل کرد تا بتوان نتایج را روی سطح زمین مشاهده کرد. نتایج را می توان برای پیدا کردن مختصات شروع و انتهای مسیر حرکت بر روی نقشه و همچنین ترسیم بیضی خطای یا دامنه خطای برآورد مختصات هر نقطه استفاده کرد. دقت مختصات برآورده شده مستقیماً به چیدمان محل ناظران نسبت به محل وقوع حادثه و همچنین میزان دقت گزارش ارتفاع و آزیمут مسیر آذرگوی توسط ناظران بستگی دارد.

### ۳- مطالعه خاص: بررسی سقوط شهاب سنگ در غرب زنجان

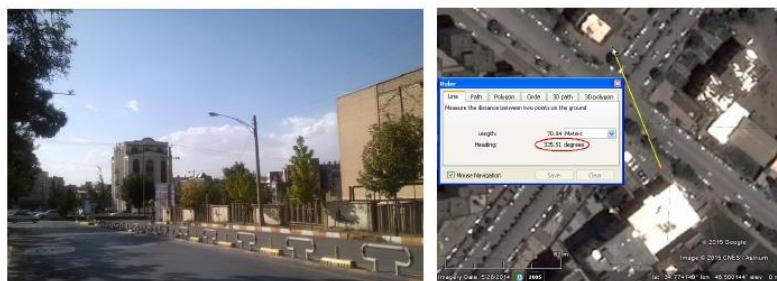
سابقه سقوط شهاب سنگ در استان همدان زیاد است. ۶ تیر ۱۳۹۴ در تویسرکان و ۶ تیر ۱۳۹۴ در فامنین دو نمونه از آنهاست که احتمالاً به بارش های شهری جُدی و دلی جنوبی مربوط می شود [۱]. واقعه اخیر در ساعت ۲۰:۱۵ روز پنجشنبه ۸ مرداد ۱۳۹۴، مقارن با غروب خورشید بود که یک آذرگوی بزرگ با قدر حدود ۱۲- در آسمان استان البرز، همدان، زنجان آذربایجان و ... رویت شد. بهدلیل بزرگی و ارتفاع مناسب، گزارش رویت از مناطق مختلفی وجود داشت. در فاصله ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلومتر از موقع حادثه، در شهرهای ارومیه، تبریز، اردبیل، لنگرود، تهران و کرج دیده شده است. در دورترین فاصله، از شهرهای ساری و قائم شهر در فاصله حدود ۴۵۰ کیلومتر نیز گزارش رویت وجود داشت. در اکثر شهرهای کمتر از ۲۰۰ کیلومتر، گزارش های زیادی وجود داشت که می توان به مراگه، تکاب، ملکان، تاکستان، همدان، زنجان، ابهر، اشتهرار، قزوین، رشت، لاهیجان، و ... اشاره کرد.

بعضی گزارشات خیلی دقیق نبودند. مثلا در تبریز گزارش حرکت مورب از جنوب به سمت شرق آسمان داده شده است. در اردبیل حرکت آذرگوی از آسمان به سمت زمین گزارش شد. در اتوبان رشت به قزوین، به سمت غرب در حرکت بوده است. در غرب استان البرز و شمال استان همدان و شرق استان زنجان، ناظران احتمال برخورد آذرگوی با کوههای غربی منطقه را محتمل می دانستند. رویت نورهای مختلف و شدید از جمله نور سیز هماه با صدای انفجار مهیب در مناطق نزدیک به محل وقوع مثل زنجان و تاکستان و همدان نیز گزارش شده است. مدت زمان رویت نیز بین ۳ تا ۵ ثانیه گزارش شده است. در مجموع گزارشات زیر به کمک بررسی در نرم افزار گوگل ارت توانست در تعیین مختصات نقطه شروع و انتهای مسیر آذرگوی مورد استفاده قرار گیرد:

- در اتوبان تهران به قم، نزدیک به فرودگاه امام خمینی، خانم شیوا غفاری توانست آذرگوی را در یک مسیر مورب از غرب به سمت محل غروب خورشید مشاهده نماید. محاسبات نشان می دهد آزمیوت غروب خورشید در این مکان برابر با ۲۹۴ درجه بوده است.
- در روستای نجم آباد اشتهرار آقای سجاد صابری پس از مصاحبه با ناظران متعدد، حرکت آذرگوی را از سمت جنوب غرب و ارتفاع حدود ۴۰ درجه به سمت زنجان توصیف کردند.
- آقای ایرج حیدری از تاکستان حرکت آذرگوی را از سمت روستای ضیاء آباد به سمت زنجان توصیف کرده است.
- در همدان با مصاحبه با آقای محمود رنگین کمان و در نظر گرفتن محل رویت در خیابان زلفی گل نزدیک به خیابان سعیدیه، مختصات مسیر حرکت از روی عکس ها و نقشه های به دست آمد.
- در ارومیه با مصاحبه با آقای سید هاتف طباطبایی، و در نظر گرفتن محل رویت در جنوب میدان ۱۴ شهید و در حاشیه رودخانه شهرچای، مختصات شروع و پایان مسیر آذرگوی به دست آمد.
- در زنجان آقای اسد الله قمری نژاد توانست دقایقی بعداز عبور آذرگوی، از رد باقی مانده از آن در امتداد یک کوچه در منطقه اعتمادیه نزدیک به پارک شهر، عکس بگیرد.
- در لنگرود استان گیلان، آقای علی عزتی توانسته است از آذرگوی عکس زیبایی تهیه کند که داده های خوبی را در اختیار قرار می دهد.



شکل ۵: آزیمут ۲۵۰ درجه برای امتداد تاکستان به روستای ضیاء آباد

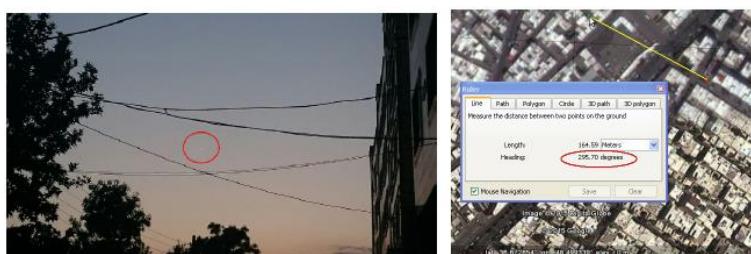


شکل ۶: آزیموت ۲۳۵ درجه برای امتداد شروع حرکت آذرگوی در ارتفاع ۵۵ درجه در همدان

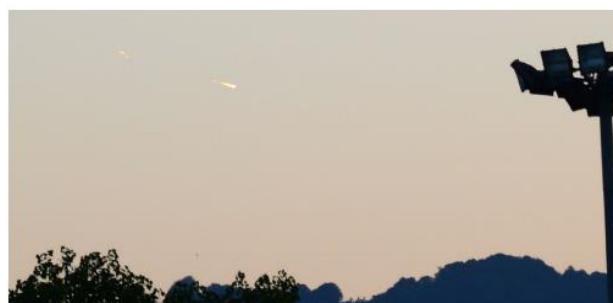
پس از بررسی جزئیات گزارشات فوق و به کمک نرم افزار گوگل ارث، مختصات نقاط شروع و انتهای مسیر آذرگوی با دقت حدود ۲ تا ۱۰ درجه به دست آمد که برای یکسان سازی برای کلیه مشاهدات، ۵ درجه در ارتفاع و آزیموت در نظر گرفته شد. نتایج این گزارش های به صورت نمودار و نقشه در شکل های (۱۰ و ۱۱) آمده است.



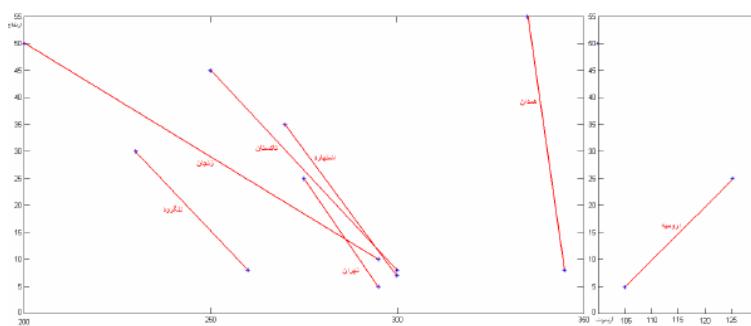
شکل ۷: آزیموت ۱۲۵ تا ۱۰۵ درجه برای امتداد مسیر حرکت آذرگوی در ارومیه



شکل ۸: آزیموت ۲۹۵ درجه برای انتهای مسیر حرکت آذرگوی در زنجان



شکل ۹: تنها عکس گرفته شده از آذرگوی توسط آقای علی عزتی از لنگرود استان گیلان



شکل ۱۰: نمودار مسیر حرکت آذرگوی در سیستم مختصات افقی نسبت به ۷ نقطه گزارش شده



شکل ۱۱: امتداد دید شروع (خطوط آبی) و امتداد دید پایان (خطوط قرمز) مسیر آذرگوی از هفت نقطه گزارش شده

با به کار بردن ۱۴ مشاهده ارتفاع و آزیمут از ۷ شهر، نتایج سرشکنی به شرح جدول (۱-۳) ارائه شده است. به دلایل مختلف از جمله عدم توانایی ناظران برای تعیین محل دقیق نقطه شروع حرکت شهاب سنگ و کم دقت بودن این مقادیر، تست فاکتور واریانس ثانویه برای برآورد نقطه شروع با مقدار بسیار نزدیکی در سطح اطمینان ۹۵ درصد رد می شود. اما در همین سطح اطمینان، برآورد نقطه پایان مسیر شهاب سنگ پذیرفته شده است.

جدول ۱-۳: مختصات سرشکن شده مسیر آذرگوی به کمک مشاهدات مختصات افقی در ۷ نقطه گزارش شده

کمیت ها	نقطه شروع		نقطه پایان	
	مختصات ژئودتیک	دقت تبدیل شده به فاصله (km)	مختصات ژئودتیک	دقت تبدیل شده به فاصله (km)
طول ژئودتیک	48.03541deg	7.51	47.64532 deg	6.64
عرض ژئودتیک	35.58546 deg	7.66	36.97986 deg	5.73
ارتفاع از بیضوی	158.201 km	7.59	22.715 km	6.17
فاکتور واریانس ثانویه	3.59		7.27	
نتیجه تست خی دو	رد شد		پذیرفته شد	

$$\chi^2_{0.025,11} = 3.82$$

$$\chi^2_{0.975,11} = 21.9$$

حد مجاز فاکتور واریانس ثانویه:



شکل ۱۲: محل شروع و پایان مسیر آذربایجان بر روی نقشه با دقت برآورد مختصات در سطح اطمینان ۳۹ و ۹۹ درصد



شکل ۱۳: نقشه سه بعدی مسیر حرکت آذربایجان بر فراز نقاط به دست آمده از دید ناظر ارومیه (راست) و تاکستان (چپ)

#### ۴-نتیجه گیری و پیشنهادات

این روش پردازش در مطالعه خاص نشان داد آذربایجان ۱۵۸ کیلومتری بالای سر روستای کهنه حصار واقع در بین مسیر همدان- بیجار ظاهر شده است. سپس بعد از حدود ۴ ثانیه خود را به ارتفاع حدود ۲۲ کیلومتری شمال ماه نشان در نزدیکی روستاهای حصار و مشمبا در غرب زنجان می رساند و در آنجا منفجر می شود. در این نقطه ابعاد بیضی خطا استاندارد با ۳۹ درصد احتمال وقوع، با شعاع تقریبی ۶/۱۵ کیلومتر و بیضی احتمال وقوع ۹۹ درصد، با شعاع تقریبی ۱۵/۵ کیلومتر به دست آمده است. این نتیجه از پردازش بعد از پیدا شدن تکه هایی از این شهاب سنگ در مزرعه ای در بین روستای حصار و مشمبا که در محدوده بیضی ۳۹ درصد قرار گرفته است، با فاصله کمی از مختصات برآورد شده می باشد. که خود نشان می دهد این روش می تواند با وجود خطای ۵ درجه در برآورد ارتفاع و آزمیوت آذربایجان، نتایج مطلوبی را به دنبال داشته باشد.



شکل ۱۵: محل پیدا شدن شهاب سنگ و نقطه برآورد شده برای پایان حرکت آذربایجان

طول مایل مسیر به دست آمده در آزمیوت ۳۴۸/۲۱ درجه، برابر با  $207/11$  کیلومتر بوده و در نتیجه سرعت متوسط شهاب سنگ برابر با  $51/7$  کیلومتر بر ثانیه برآورد می شود همچنین با توجه به مقادیر حداقل و حداکثر زمان رویت آذربایجان، سرعت ۴۱ تا ۶۹ کیلومتر بر ثانیه برای این شهاب سنگ به دست آمده است. این سرعت زیاد نشان می دهد

اصطکاک جوّ نتوانسته است به اندازه کافی بر روی کاهش سرعت آن تاثیر بگذارد که خود نشان دهنده بزرگ بودن جرم این آذرگوی و انفجاری بودن آن می‌باشد.

## مراجع

- [۱] پور خرسندي حامد و بهزاد قیاسوند، ۱۳۹۴، "شهاب سنگ فامنین، هدیه ای آسمانی، داستان سنگی که از آسمان افتاد". ماهنامه نجوم، شماره ۲۹۴ مرداد ۱۳۹۴ ص ۱۸ و ۱۹.
- [۲] حیدر زاده توفیق، ۱۳۷۰، "سنگ‌های سرگردان آسمان". ماهنامه نجوم، سال اول شماره دوم آبان ۱۳۷۰ ص ۹ تا ۱۴.
- [۳] خواجه پور، م. (مترجم)، دگانی، م. (مؤلف)، ۱۳۸۶، نجوم به زبان ساده، انتشارات مؤسسه جغرافیایی و کارتوگرافی گیتاشناسی، ۱۳۸۶، ص ۳۴۷ تا ۳۶۵.
- [۴] درویش زاده، ع.، ۱۳۸۲، سنگ شناسی دگرگونی، انتشارات دانشگاه پیام نور، ۲۶۳ ص.
- [۵] رستمی سید قاسم و حمید مهرابی، ۱۳۹۳، بررسی دقیق تعیین موقعیت با مشاهده زاویه مایل . مجموعه مقالات همایش ژئوماتیک ۹۳، سازمان نقشه برداری کشور.
- [۶] رستمی سید قاسم و حسن امامی، ۱۳۸۴، "ژئودزی و کارتوگرافی ریاضی". کتاب چاپ انتشارات آزاده، بهمن ۱۳۸۴، فصل دوم ص ۳۵ تا ۹۸.
- [7] Andronikov A.V, I.E.Andronikova, D.H. Hill, 2015, "Impact history of the Chelyabinsk meteorite: Electron microprobe and LA-ICP-MS study of sulfides and metals". Planetary and Space Science, Available online 17 April 2015.
- [8] Brown P.G, 2013, "A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors". Nature Vol. 503, 14 November 2013.
- [9] Brown P.G, 2002, "The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth". Nature, vol. 420, 21 Nov. 2002, pp. 294-296.
- [10] Hunt S.M, M.Oppenheim, S.Close, P.G.Brown, F.McKeen and M.Minardi 2004, "Determination of the meteoroid velocity distribution at the Earth using high-gain radar". ICARUS, Vol. 168, 2004, pp 34-42.
- [11] Melosh, H.J, 1991, "ATMOSPHERIC IMPACT PROCESSES" Adv. Space Res. Vol. II, No.6, 1991, pp. 87-93.
- [12] Seleznev V.S, A.V.Liseikin, A.A.Emanov, A.Yu.Belinskaya, 2014 "Geophysical observations during the flight of the Chelyabinsk meteoroid" Russian Geology and Geophysics, Vol. 55, Issue 3, March 2014, pp 405-410.