

## اکتشاف سازه‌های مدفون با روش‌های سیگنال تحلیلی - اویلر و بلکلی بر پایه داده‌های گرانشی

توحید عبدالرزاق زاده<sup>۱</sup>، محمدرضا سیف<sup>۲\*</sup>، حسین پرنیان<sup>۳</sup>

۱ و ۳- کارشناس ارشد، دانشگاه تهران، ۲- پژوهشگر، دانشگاه امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۶/۰۶/۳۱، پذیرش: ۹۶/۱۲/۱۲)

### چکیده

تعیین موقعیت، لبه‌ها و ابعاد تونل‌های زیرزمینی همواره یکی از مباحث پیچیده و ضروری در حفاظت از سازه‌های مدفون بوده است. در این مقاله از روش گرانش‌سنجی به منظور شناسایی حفرات و سازه‌های مدفون استفاده شده است. روش گرانش‌سنجی به دلیل چگالی کمتر فضاهای تهی نسبت به محیط اطراف، حفره‌ها را به صورت آنومالی منفی در نقشه گرانش نشان می‌دهد. پس از معرفی روش بیان‌شده، داده‌های جاذبی به صورت پیش‌رو با استفاده از فیلتر مشتقات افقی و الگوریتم بلکلی برای امکان‌سنجی اکتشاف تونل زیرزمینی مدل‌سازی می‌شود؛ به طوری که دو مدل تک مکعبی و چند مکعبی مورد بحث قرار می‌گیرد. پس از تعیین مرزها و گوشه‌های مدل‌های ساختگی، با استفاده از روش سیگنال تحلیلی-اویلر عمق بی‌هنجاری‌های مورد نظر تخمین زده می‌شود. مدل چند مکعبی به صورت چند سازه با عمق‌های متفاوت شبیه‌سازی می‌شود تا توانایی روش گرانش‌سنجی در اکتشاف سازه‌ها در اعماق مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد. سپس جهت بررسی قابلیت اکتشاف به صورت هواپرد، مدل چند مکعبی در ارتفاعات مختلف شبیه‌سازی می‌شود. پردازش و تحلیل داده‌ها با استفاده از برنامه نوشته‌شده در نرم‌افزار ژئوسافت انجام شده و فیلترهای مختلف برای شناسایی مرزها استفاده گردیده است. در نهایت با بررسی نتایج شبیه‌سازی انجام گرفته، راهکارهای مناسبی جهت کاهش احتمال اکتشاف و افزایش احتمال استتار سازه‌های مدفون ارائه شده است.

**کلیدواژه‌ها:** تونل زیرزمینی، گرانش‌سنجی، الگوریتم بلکلی، روش سیگنال تحلیلی-اویلر

## Underground Structures Detection with An-Euler and Blakely Methods Based on Gravity Data

T. Abdolrazag Zad, M. R. Seif\*, H. Parnian

Tehran University

(Received: 22/09/2017; Accepted: 03/03/2018)

### Abstract

Determining the position, edges and dimensions of underground tunnels has always been the challenging issues in protecting underground structures. In this paper, the gravity method is used to identify buried cavities and structures. After introducing the method, the gravity data is modeled directly using the horizontal derivatives filter and the Blakely algorithm. After determining the boundaries and corners of the fabricated models, the depth of the anomalies is estimated using the Analytic Signal-Euler (An-Euler) method. A multi-cube model is simulated in multistructure with different depths to evaluate the ability of the gravity method in exploration of structures at different depths. Then, to explore airborne capability, a multi-cube model is simulated at different altitudes. Finally, by exploring the results of this simulation, appropriate solutions have been proposed to reduce the probability of exploration and increase the probability of camouflage of buried structures.

**Keywords:** Underground Tunnels, Gravity Method, Blakely Algorithm, Analytic Signal-Euler Method

## ۱. مقدمه

زیرزمینی باید چگالی هدف مدنظر تباین چشمگیری با محیط اطراف داشته باشد تا اینکه ژئوفیزیدانان بتوانند اطلاعات مناسبی در مورد هدف اکتشافی به دست بیاورند [۲]. امروزه در روش‌های ژئوفیزیک به خصوص روش گرانج‌سنجی پیشرفت‌های قابل توجهی با تلاش دانشمندان حاصل شده است به طوری که دستگاه‌های پیشرفته امروزی می‌توانند به عنوان یکی از ابزارهای موثر در شناسایی و آشکارسازی سازه‌ها و تونل‌های زیرزمینی و حتی تأسیسات صنعتی مدفون به صورت برداشت‌های هوابرد و فضاپایه بکار گرفته شوند. با توجه به تجربیات با ارزش حاصل از نتایج عملیات صحرایی گرانج‌سنجی هوابرد و زمینی می‌توان از این نتایج به عنوان سرنخی برای دیگر سنجنده‌های صوتی، حرارتی و رادیویی جهت شناسایی دقیق‌تر سازه‌های مدفون استفاده کرد [۳]. از جمله روش‌های ژئوفیزیک جهت شناسایی محل تونل‌های مدفون می‌توان به روش‌های الکترومغناطیس، مقاومت ویژه الکتریکی، قطبش القایی، لرزه‌ای شکستی، گرانج‌سنجی و رادار نفوذی زمین اشاره کرد [۴].

در تحقیقاتی توسط پژوهشگران استفاده از روش‌های گرانج‌سنجی و مقاومت ویژه الکتریکی جهت آشکارسازی تونل‌ها و غارهای زیرزمینی پیشنهاد شد به طوری که نتایج به دست آمده نشان دادند که داده‌های گرانجی و مقاومت ویژه مربوط به یک غار زیرسطحی به ترتیب یک بی‌هنجاری با گرانج کم و مقاومت ویژه زیاد را آشکار می‌سازند و در نهایت موفق به تعیین محل حفره مدفون شدند [۵]. روش واهم‌آمیخت اوپلر روشی مناسب و پرکاربرد جهت تخمین عمق و موقعیت تونل‌های مدفون قابل استفاده است به طوری که در یک تحقیقی با استفاده از مشاهدات مغناطیسی به کار گرفته شد [۶]. در پژوهشی دیگر شبیه‌سازی‌های مختلفی در اعماق مختلف جهت شناسایی سازه‌های مدفون با روش گرانج‌سنجی انجام شده است و هم نتایج قابل قبولی به دست آمده است [۷]. علاوه بر این، موارد در تحقیقی دیگر استفاده از روش‌های گوناگون ژئوفیزیک هم‌چون روش‌های لرزه‌ای شکستی، مقاومت ویژه الکتریکی، گرانج‌سنجی و الکترومغناطیس جهت تعیین مکان حفره‌های مدفون معرفی شدند و همچنین برای هر روش شبیه‌سازی‌های ساده‌ای ارائه شد [۸]. در این تحقیق برای مطالعه اثرات گرانجی سازه‌های مدفون در ابتدا با استفاده از نرم‌افزار مدل‌ویژن داده‌های گرانجی ساختگی یک تونل با تباین چگالی  $2\text{ gr/cm}^3$  مدل‌سازی می‌گردد و با توجه به اینکه در حالت نرمال چگالی زمینه در حدود  $2,67\text{ gr/cm}^3$  است، پس این سازه به دلیل چگالی کمتر نسبت به زمینه با شتاب گرانجی منفی مشاهده می‌گردد. در ادامه یک منطقه شامل چندین سازه در اعماق مختلف مدل‌سازی می‌گردد تا توانایی روش گرانج‌سنجی برای شناسایی سازه‌ها در اعماق

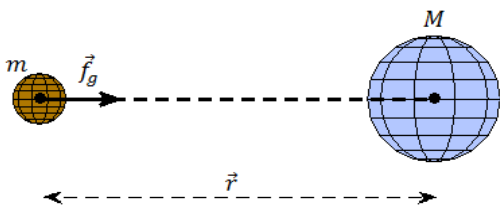
امروزه جهت شناسایی حفرات و سازه‌های زیرسطحی مدفون تلاش‌های زیادی صورت گرفته است. گرانج‌سنجی از جمله روش‌های ژئوفیزیک است که با اندازه‌گیری میدان گرانجی حاصل از بی‌هنجاری زیرسطحی به اکتشاف آن‌ها در زمین می‌پردازد. از اواسط قرن بیستم تا اکنون، توجه به ساخت تونل‌های زیرزمینی در جهت تقویت شرایط دفاعی ادامه داشته است. این سازه‌ها به صورت انبار مهمات و تجهیزات جهت تأمین امنیت زاغه و مهمات دارای کاربرد فراوانی هستند به طوری که در جنگ شرق و غرب به طور قابل ملاحظه‌ای مورد استفاده قرار گرفتند. از نقطه نظر دیگر، به دلیل ویژگی ذاتی این تأسیسات امکان شناسایی مکان آن‌ها یک مسئله بسیار پیچیده است که برای نیروهای نظامی یکی از اساسی‌ترین مسائل در زمان جنگ است. واضح است که به دلیل استتار این تأسیسات زیرزمینی و وجود اثرات سطحی و زمینی بسیار اندک، شناسایی آن‌ها با استفاده از سنجنده‌های مرئی و حرارتی امکان‌پذیر نیست. از این رو شناسایی این اهداف به یکی از چالش‌های بزرگ و مهم سده اخیر تبدیل شده است. باید توجه داشت که وجود چنین سازه‌هایی با ابعادی بیش از هزاران متر در اکثر موارد با مشاهده یک درب ورودی یا یک هواکش تهویه در سطح زمین می‌توان تأیید کرد. از نمونه‌های استفاده از سازه‌های زیرسطحی در جنگ‌ها، می‌توان به استفاده آلمانی‌ها از سازه‌ها به عنوان تأسیسات صنعتی و استفاده ویتنام از تونل زیرسطحی در جنگ ویتنام جهت اختفاء و انتقال مهمات جنگی اشاره کرد [۱].

خواص فیزیکی حفره‌ها و تونل‌های زیرسطحی همواره نسبت به محیط اطراف خود در زیرزمین تفاوت چشمگیری دارد. اما با وجود این تفاوت قابل ملاحظه، به دلیل وجود شکل ناهمگن و نامنظم مواد و اجزاء تشکیل‌دهنده حفره و همچنین به علت متفاوت بودن اندازه حفره‌ها و نسبت آن با قدرت تفکیک‌پذیری روش‌های ژئوفیزیک، آشکارسازی و تعیین تقریبی موقعیت سازه‌های زیرسطحی کار آسانی بشمار نمی‌آید. در میان روش‌هایی که برای شناسایی دریای آزاده زیرزمینی به کار می‌روند، روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری میدان ثقل زمین به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد میدان ثقل از کارایی بالایی برخوردار هستند. در کاربردهای زمین‌شناسی و ژئوفیزیک، از داده‌های ثقلی برای کشف گنبد‌های نمکی و منابع گازی استفاده می‌شود. برای اینکه یک روش ژئوفیزیک سازه مورد نظر را با دقت بالا آشکارسازی کند می‌بایستی پارامتر فیزیکی مربوط به آن روش بکار رفته، دارای تباین کافی با محیط اطراف خود باشد. در روش گرانج‌سنجی پارامتر فیزیکی اصلی چگالی بی‌هنجاری است، بنابراین جهت اکتشاف مواد معدنی و تعیین موقعیت تونل

کاربردهای اقیانوس‌شناسی، ناوربی و مطالعه اثرات هیدروسفر و اتمسفر اشاره کرد. گرانس سنجی به عنوان شاخه قدیمی از علوم کلاسیک، برای مطالعه نظری و تجربی میدان جاذبه اطراف زمین است که شامل ابداع روش‌های اندازه‌گیری تغییرات شتاب گرانشی به طور دقیق در زمان و مکان است. گالیله که در اوایل سده شانزدهم میلادی (۱۶۴۲-۱۵۶۴) قانون سقوط آزاد اجسام را کشف کرد، برای اولین بار شتاب گرانشی را اندازه گرفت. گرانس سنجی نخستین بار جهت انجام مطالعات زمین‌شناسی پوسته بالایی زمین به کار گرفته شد [۲]. در ژئوفیزیک، بررسی و مطالعه بی‌هنجاری‌های گرانشی از دیرباز برای اکتشاف نفت و توده‌های معدنی مورد استفاده قرار گرفته است. با این وجود، روش گرانس سنجی، در مطالعات آب، ژئوتکنیک و مهندسی از سابقه کمتری برخوردار است. مبنای مطالعات گرانشی در اکتشاف، ناهمگونی محلی چگالی کانی‌ها و سنگ‌هاست. تباین چگالی بین هدف مورد نظر و سنگ میزبان به اضافه حجم آن، بازتابی به صورت تغییر میدان گرانش خواهد داشت. این تغییرات معمولاً در مقایسه با میدان گرانش زمین، از مقدار زیادی برخوردار نیستند.

بنابراین، حوزه عمل گرانس سنجی در ابعاد بزرگ بی‌هنجاری (چند تا چند کیلومتر) که بیشتر در بررسی‌های زمین‌شناسی و نفت بوده، تا ابعاد کوچک (چند ۱۰ متر) در مطالعات معدنی و ابعاد بسیار کوچک (چند متر) در کاربردهای زمین‌شناسی سطحی و مهندس عمران است. مبنای اندازه‌گیری‌ها در روش گرانس سنجی، قانون جاذبه بین دو جرم منتج از قانون دوم نیوتن است. بر اساس این قانون، نیروی وارد بین دو جرم  $M$  و  $m$  به صورت زیر بیان می‌شود (شکل ۱):

$$\vec{f}_g = -G \frac{mM}{r^3} \vec{r} \quad (1)$$



شکل ۱. نیروی جاذبه میان دو توده جرمی [۹].

رابط (۱) یک رابطه متقارن است. جرم  $M$  (جرم زمین) نیرویی بر جرم  $m$  و جرم  $m$  نیرویی مساوی، ولی در جهت مخالف، بر جرم  $M$  وارد می‌کند. در رابطه (۱)،  $G$  ضریب تناسب است و ثابت جهانی جاذبه یا ثابت نیوتن نامیده می‌شود. ثابت  $G$  را می‌توان به عنوان نیروی بین دو ذره با جرم‌های واحد و فاصله واحد تفسیر کرد.

مختلف مورد ارزیابی قرار بگیرد. پردازش و تحلیل داده‌ها با استفاده از برنامه نوشته‌شده در نرم‌افزار ژئوسافت انجام شده و فیلترهای مختلف برای شناسایی مرزها و گوشه‌های مدل‌های ساختگی استفاده گردیده است. برای بررسی عمق و مرز ساختارهای مدفون از روش اویلر مکانی استفاده می‌شود به طوری که نتایج آن با نتایج الگوریتم بلکلی و فیلتر سیگنال تحلیلی به صورت همزمان ترکیب شده و نقشه نهایی جهت تعیین عمق و موقعیت سازه‌ها به دست می‌آید. در روش اویلر مکانی برای تخمین عمق و مرز بی‌هنجاری زیرسطحی نیازی به دانستن پارامترهای بردار گرانشی زمین نیست. روش اویلر مکانی روشی سریع برای تفسیر داده‌های میدان پتانسیل است. در این روش در صورتی که مقدار صحیحی از شاخص ساختاری مربوط به هندسه توده سبب شونده، انتخاب شده و در معادله اویلر استفاده شود، این روش می‌تواند تخمینی از عمق آنومالی مورد نظر ارائه دهد و با توجه به اینکه اهداف مورد بررسی ما سازه‌های مدفونی هستند که دارای هندسه مشخصی هستند پس با دانستن هندسه ساختار می‌توان شاخص ساختاری مورد نظر را انتخاب کرد. در نهایت پس از شبیه‌سازی‌های متنوع، راهکارهای مناسبی جهت کاهش احتمال اکتشاف تونل زیرزمینی و همچنین جهت افزایش احتمال استتار و اختفاء تونل‌ها ارائه می‌شود.

اساس روش‌های متنوعی جهت افزایش توان تفکیک لبه‌ها، اکثراً براساس مشتقات افقی یا عمودی میدان پتانسیل وجود دارد. در تحقیقی دیگر که بر روی داده‌های یک مدل مصنوعی بدون نویز انجام شد، کارایی فیلترهای مختلف مورد استفاده بررسی و سپس بر روی داده‌های مدل با سطح نویز اتفاقی ۲٪ مقایسه بین فیلترها انجام شده است [۹].

## ۲. اساس روش گرانس سنجی

گرانس سنجی (ثقل سنجی)، اندازه‌گیری و مطالعه شتاب گرانش زمین است. این مطالعات دارای اهمیت زیادی در علوم زمین‌شناسی بوده و مبنای مطالعات ژئودزی است، که بدون نقشه‌های دقیق آن نمی‌توان تصویر مناسبی از وضعیت زمین به دست آورد. با توجه به پیشرفت دستگاه‌های امروزی می‌توان با استفاده از داده‌های جاذبه‌ی نتایج مناسبی از ساختارهای زیرسطحی به دست آورد. شتاب گرانش در هر نقطه روی سطح زمین، تابعی از موقعیت اندازه‌گیری، توزیع جرم درونی زمین و تغییرات زمانی جرم درون زمین است. شتاب گرانشی اندازه‌گیری شده می‌تواند برای اهداف ژئوتکنیکی، ژئوفیزیکی و ژئودینامیکی (چنانچه به صورت تکراری انجام شود) استفاده شود. البته شتاب گرانشی اندازه‌گیری شده، کاربردهای دیگری نیز در حوزه‌های مختلف تحقیقاتی و کاربردی دارد که از آن جمله می‌توان به

اثرات اضافی یا همان نویز<sup>۱</sup> را از داده‌های مشاهده‌ای حذف کرد تا در نهایت بتوانیم مقدار آنومالی اصلی مربوط به سازه مدفون را به دست آوریم و نتایج مناسبی برای آن ارائه دهیم. در ابتدا با اعمال تصحیحاتی موسوم به تصحیحات جاذبی، بایستی داده‌ها نسبت به یک سطح مبنای مشخص مانند ژئوئید و یا در صورت مشخص نبودن این سطح در منطقه مورد مطالعه، نسبت به سطح بیضوی مرجع تصحیح شوند. اختلاف بین گرانش مشاهده‌ای پس از اعمال تصحیحات و شتاب گرانشی نظری در هر نقطه، بی‌هنجاری بوگه<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. این بی‌هنجاری، تنها تحت تأثیر تغییرات چگالی، حجم اهداف اکتشافی و اثر سنگ‌های پایه است. فرمول نهایی محاسبه گرانش بی‌هنجاری مورد نظر یا همان آنومالی کامل بوگه پس از انجام تصحیحات بیان شده، به صورت زیر است [۹]:

$$\Delta g^{CB} = g_{p'} - \gamma \quad (9)$$

$$= g_p + \delta g^{FA} + \delta g^B + \delta g^T - \gamma$$

در رابطه اخیر، آنومالی کامل بوگه ( $\Delta g^{CB}$ ) است به طوری که شتاب گرانشی مشاهده‌شده در روی سطح ژئوئید ( $g_{p'}$ ) از مجموع گرانش در یک نقطه ( $g_p$ )، تصحیح هوای آزاد ( $\delta g^{FA}$ )، تصحیح تخته بوگه ( $\delta g^B$ ) و تصحیح توپوگرافی ( $\delta g^T$ ) به دست می‌آید. در نهایت آنومالی کامل بوگه از کسر مقدار گرانش نرمال ( $\gamma$ ) از شتاب گرانشی مشاهده شده ( $g_{p'}$ ) به دست می‌آید.

**برداشت هوابرد و تصحیحات مورد نیاز آن:** پیشرفت‌هایی که در سال‌های اخیر در روش‌ها، دستگاه‌ها و سیستم‌های موقعیت‌یابی صورت گرفته است، سبب شده که اندازه‌گیری‌های هوابرد بر روی مناطق وسیعی از زمین‌ها و دریاها انجام شود. به وسیله مطالعات هوابرد می‌توان به صورت سریع و با هزینه پایین منطقه مورد نظر را بررسی کرد. اندازه‌گیری‌های هوابرد به طور معمول بر روی خط پروازهایی با طول بلند که فاصله بین این خطوط پرواز با توجه به اندازه هدف مورد بررسی و عمق آن تعیین می‌شود، صورت می‌گیرند. تأثیر بی‌هنجاری‌هایی با فرکانس بالا که به طور معمول در اثر ساختارهای سطحی ایجاد می‌شوند را می‌توان با افزایش ارتفاع پرواز و انتخاب فواصل اندازه‌گیری بزرگ‌تر کاهش داد؛ به طوری که اگر ساختار سطحی با حجم زیادی نسبت به سازه زیرزمینی وجود داشته باشد، به دلیل کاهش یافتن دقت اندازه‌گیری نمی‌توان با افزایش بیش از اندازه ارتفاع پرواز اثر این ساختار مزاحم را از بین برد. راه حل دوم با افزایش فاصله بین پروفیل‌های داده‌برداری تا حدی اثر آنومالی سطحی را از بین می‌برد. کاربرد وسیع گرانش سنجی هوابرد

رابطه (۱) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\vec{f}_g = m \left( -G \frac{M}{r^3} \vec{r} \right) = m \vec{a}_g \quad (2)$$

$$\vec{a}_g = -G \frac{M}{r^3} \vec{r} \quad (3)$$

که در رابطه (۳)،  $r$  فاصله بین نقطه اثر نیرو و جرم دلخواه است. قدر مطلق شتاب جاذبه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$a_g = G \frac{M}{r^2} \quad (4)$$

قدر مطلق شتاب جاذبه دارای واحد  $\frac{m}{s^2}$  است. واحد کوچک‌تر آن  $\frac{cm}{s^2}$  که به افتخار گالیله، این واحد، گال نامیده می‌شود.

**شتاب و پتانسیل جاذبه ناشی از یک جسم صلب:** یک جسم را در فضای سه بعدی در نظر بگیرید. می‌خواهیم شتاب جاذبه ناشی از این جسم را در نقطه  $P$ ، با مختصات  $(x, y, z)$  به دست آوریم. به این منظور، جسم را به قطعات کوچک با حجم  $dv$  تقسیم می‌کنیم. برای حجم کوچک  $dv$ ، جرم به صورت  $dm = \rho dv = \rho dx dy dz$  تعریف می‌شود.  $\rho$  چگالی عنصر حجم  $dv$  است. بنابراین، شتاب جاذبه جسم برابر مجموع شتاب جاذبه این منابع نقطه‌ای خواهد شد [۱۰]:

$$\vec{a}_g = -G \int_v \frac{\rho}{l^3} \vec{l} dx dy dz \quad (5)$$

$$\vec{f}_g = m \vec{a}_g = m \vec{\nabla} W_g \quad (6)$$

$$\vec{a}_g = \vec{\nabla} W_g \quad (7)$$

از طرف دیگر، می‌توان این معادله را برای پتانسیل گرانشی به صورت زیر حل کرد:

$$W_g(\vec{r}) = G \int_v \frac{\rho(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dv \quad (8)$$

بنابراین، پتانسیل جاذبه ناشی از یک جسم، از رابطه فوق به دست می‌آید. پتانسیل در یک نقطه از میدان، کار لازم برای جابه‌جایی واحد جرم از بی‌نهایت تا نقطه مورد نظر است. مبنای محاسبات عددی در این تحقیق بر اساس پتانسیل میدان گرانشی و شتاب جاذبی است.

### ۳. تصحیحات لازم در برداشت زمینی گرانش

تصحیحات داده‌های گرانشی، در واقع حذف پارامترهایی است که روی مقادیر اندازه‌گیری تأثیر می‌گذارد، ولی نسبت به اثر گرانش اهداف مورد تجسس، نوعی نوفه به حساب می‌آید. قبل از این که بتوان داده‌های مشاهده‌ای را در ارتباط با اهداف اکتشافی و زمین‌شناسی تفسیر کرد، باید با اعمال تصحیحات مورد نیاز،

<sup>1</sup> Noise

<sup>2</sup> Bouguer Anomaly

به توان  $n$  افزایش می‌یابد. فیلتر پایین گذر با فرکانس قطعی برابر با  $f_f$  بر روی سیگنال  $GPS$  اعمال می‌شود، که در این حالت کمترین مقدار طول موج سیگنال از رابطه  $\lambda f_f = v$  به دست می‌آید که  $v$  سرعت هواپیما است. بنابراین تصحیح خطای محدود  $GPS$  به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$a_{rms} = \sqrt{(a^2)} = (2\pi)^2 \left[ \frac{v^5}{5\lambda^5} + \frac{f_c^n v^{5-n}}{(5-n)\lambda^{(5-n)}} \right]^{1/2} \quad (13)$$

در گرانش سنجی هواپرد نسبت نوفه به سیگنال در حدود ۱۰۰۰ است. بخش بزرگی از نوفه‌ها شامل نوفه‌هایی با فرکانس بالا است که ناشی از تکان‌های هواپیما است. تکان خوردن هواپیما حین حرکت باعث تغییر یافتن مقادیر داده‌های گرانشی اندازه‌گیری شده می‌شود که این خود سبب افزایش خطای اندازه‌گیری می‌شود؛ به طوری که برای حذف این تغییرات، مقادیر در دو نقطه با دو شتاب‌سنج در نزدیک هم بر اساس روش گرادیان سنجی اندازه‌گیری می‌شود تا با محاسبه آهنگ تغییرات داده گرانشی در واحد طول، مقدار اضافه‌شده در اثر تکان هواپیما محاسبه شود و سپس این مقدار اضافی از مقدار اندازه‌گیری شده کم شود [۱۳].

#### ۴. شبیه‌سازی اثر میدان جاذبی سازه مکعبی به صورت مدل‌سازی پیشرو

در مطالعات گرانش‌سنجی، به منظور بررسی روش‌های مورد استفاده در پردازش و تفسیر داده‌های به دست آمده از عملیات صحرایی و همچنین سنجش دقت و قابلیت عملی این روش‌ها، آن‌ها را بر داده‌های مصنوعی حاصل از اشکال هندسی ساده اعمال می‌کنند. برای بیان بی‌هنجاری‌های گرانشی حاصل از اشکال هندسی ساده، از روابط تحلیلی استفاده می‌شود. این فرمول‌های ریاضی توابعی از عمق، فاکتور شکل، ضریب دامنه و تباین چگالی ساختار مدفون هستند. بنابراین، می‌توان نتایج به دست آمده را با مقادیر اولیه پارامترهای هدف مقایسه کرد و به بررسی میزان دقت روش مورد استفاده پرداخت. در این مطالعه، برای تولید داده‌های مصنوعی از مدل ساده مکعب مستطیلی به عنوان چشمه ایجادکننده اثر گرانشی استفاده خواهد شد.

اثر گرانشی یک مکعب با ابعادی که بین مختصات  $(x_1, y_1, z_1)$  و  $(x_2, y_2, z_2)$  قرار دارد، از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۴]:

$$g = \gamma \rho \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \mu_{ijk} \left[ z_k \arctan \frac{x_i y_i}{z_k R_{ijk}} - (14) x_i \log(R_{ijk} + y_j) - y_j \log(R_{ijk} + x_i) \right]$$

که در آن داریم:

شامل تعیین مکان سازه‌های زیرزمینی، حوزه‌های رسوبی و حفره‌های زیرسطحی است و همچنین روش بیان شده در کارهای عمرانی و ژئوتکنیکی کاربرد فراوانی دارد. تصحیحات عرض جغرافیایی، هوای آزاد، بوگه، توپوگرافی و اتووش تصحیحاتی هستند که بر روی داده‌های گرانش‌سنجی هواپرد اعمال می‌گردند [۱۱].

در برداشت هواپرد، تصحیحاتی به منظور حذف اثر شتاب هواپیما، شامل شتاب قائم هواپیما و جفت شدگی بین سرعت هواپیما و چرخش زمین، از داده‌های گرانشی انجام می‌شود که به آن تصحیح اتووش می‌گویند. این تصحیح یکی از مهم‌ترین تصحیحات پرکاربرد در برداشت‌های فضاپایه است. اثر اتووش به دلیل حرکت دستگاه اندازه‌گیری در مسیری منحنی (به دور زمین) و اثر شتاب مرکزگرا به وجود می‌آید. تصحیح این اثر به صورت رابطه زیر معرفی می‌شود:

$$E = \frac{v^2}{a} \left[ 1 - \frac{h}{a} - \varepsilon(1 - \cos^2 \phi(3 - 2\sin^2 \alpha)) \right] + 2v\omega_e \cos \phi \sin \alpha \quad (10)$$

$$\varepsilon = \frac{v^2}{a} \sin^2 \alpha + 4v\omega_e \quad (11)$$

در روابط فوق،  $v$  مجموع سرعت هواپیما در جهت‌های شمالی-جنوبی و شرقی-غربی،  $a$  نصف محور اصلی زمین،  $h$  ارتفاع هواپیما،  $\omega_e$  سرعت زاویه‌ای و  $\alpha$  و  $\phi$  به ترتیب آزیموت هواپیما و عرض جغرافیایی هستند. با توجه به این رابطه می‌توان نتیجه گرفت که خطا در تعیین موقعیت هواپیما سبب اثر بزرگ‌تری در تصحیح اتووش و در نهایت کاهش دقت داده‌ها می‌شود [۱۲].

یکی از عواملی که همواره بر روی داده‌های گرانشی اثر مستقیم دارد، عدم تفاوت بین شتاب گرانشی و شتاب ناشی از حرکت هواپیما است. برای جدایی شتاب‌های ناخواسته از داده‌های گرانشی به یک حسگر غیر مانند مانند  $GPS$  احتیاج است. محدودیت در داده‌های  $GPS$  دقت داده‌های گرانشی را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد که این خود به معنای محدود کردن روش گرانشی هواپرد در اکتشافات معدنی و تعیین مکان ساختارهای زیرسطحی است. بر اساس بررسی‌هایی که صورت گرفت، می‌توان نشان داد که میزان طیف نوفه  $GPS$  به صورت رابطه زیر است:

$$S_x(f) = S_{02} \left( 1 + \left( \frac{f}{f_c} \right)^n \right) \quad (12)$$

که در این رابطه،  $S_{02}$  برابر با  $0.1$  متر،  $f_c$  برابر با  $0.15$  هرتز و توان  $n$  برابر با  $3$  است. این تابع گویای این مطلب است که طیف نوفه  $GPS$  از مقدار پایه‌ای در حدود  $0.1$  شروع و با توجه

تحلیلی در مرکز شبکه نسبت به ۸ عدد اطراف آن در تمامی جهات بیشتر باشد، این نقطه را به عنوان محل احتمالی ساختارها شناسایی می‌کند. در ادامه این روش بر روی داده‌های ساختگی گرانش به کار گرفته می‌شود [۱۷ و ۱۸].

یکی از مهم‌ترین و متداول‌ترین روش‌های تخمین عمق آنومالی‌های گرانش، روش واهمامیخت اوپلر است. در سال ۱۹۸۲ تامپسون معادله همگن را برای تفسیر دو بعدی داده‌های مغناطیس به عنوان یک روش خودکار بر اساس معادله همگن اوپلر شرح داد [۱۹]. در تحقیقی دیگر این روش را برای داده‌های گرانشی با معرفی یک ضریب ساختار دو بعدی بکار بردند. تابعی را در سیستم مختصات کارتزین  $f(x,y,z)$  با در نظر گرفتن جهت  $z$  مثبت به سمت پایین و سطح مشاهده‌ای افقی  $z=0$  در نظر می‌گیریم. این تابع زمانی همگن از درجه  $N$  است اگر داشته باشیم [۲۰]:

$$f(tx, ty, tz) = t^N f(x, y, z) \quad (19)$$

و در این حالت معادله اوپلر به صورت زیر خواهد بود:

$$x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} + z \frac{\partial f}{\partial z} = Nf \quad (20)$$

که در آن  $N$  ضریب ساختار آنومالی نامیده می‌شود. حال با در نظر گرفتن اثر گرانشی جرم نقطه‌ای  $m$  (در حالت دو بعدی  $y=0$ ) داریم:

$$g(x) = \frac{Gm(z - z_0)}{[(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2]^{3/2}} \quad (21)$$

و بنابراین:

$$\frac{\partial g}{\partial z} = \frac{GmA}{B} [(x - x_0)^2 + 2(z - z_0)^2] \quad (22)$$

و

$$\frac{\partial g}{\partial x} = \frac{-3GmA}{B} (x - x_0) (z - z_0) \quad (23)$$

که در اینجا:

$$A = [(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2]^{1/2} \quad (24)$$

$$B = [(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2]^3$$

بنابراین داریم:

$$(x - x_0) \frac{\partial g}{\partial x} + (z - z_0) \frac{\partial g}{\partial z} = -2g(x) \quad (25)$$

بنابراین  $g(x)$  همگن از درجه دو بوده و معادله اوپلر برای  $g$  عبارت است از:

$$(x - x_0) \frac{\partial g}{\partial x} + (z - z_0) \frac{\partial g}{\partial z} = -Ng(x) \quad (26)$$

$$R_{ijk} = \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z_k^2} \quad (15)$$

$$\mu_{ijk} = (-1)^i (-1)^j (-1)^k$$

این رابطه می‌تواند به راحتی برای محاسبه اثر یک مکعب، در نقاط یک شبکه منظم، به کار برده شود. در این رابطه، مختصات مربوط به گوشه‌های مدل، نسبت به نقطه اندازه‌گیری گرانش محاسبه می‌شود.

#### ۴-۱. معادلات روش‌های سیگنال تحلیلی - اوپلر و بلکلی

##### جهت تخمین موقعیت و عمق اهداف مدفون

روش‌های تخمین عمق عددی بسیاری برای تفسیر آنومالی‌های گرانش با فرض چشمه به شکل کره، استوانه افقی و یا استوانه عمودی، ارائه شده است. در این مطالعه، از روش تخمین عمق سیگنال تحلیلی - اوپلر به منظور تعیین عمق بی‌هنجاری گرانشی استفاده می‌شود. برای تشریح روش اتوماتیک سیگنال تحلیلی - اوپلر، باید روابط سیگنال تحلیلی و روش اوپلر ذکر و متعاقباً ترکیب گردد تا اینکه به طور همزمان پارامترهای محل و عمق بی‌هنجاری گرانشی تخمین زده شود. سیگنال تحلیلی مختلط با مشتقات افقی و قائم میدان پتانسیل به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۵ و ۱۶]:

$$A(x, y) = \left( \frac{\partial P}{\partial x} x + \frac{\partial P}{\partial y} y + i \frac{\partial P}{\partial z} \hat{z} \right) \quad (16)$$

در رابطه بالا  $x, y, \hat{z}$  بردارهای واحد در سه جهت میدان مختصات،  $i$  عدد موهومی  $\sqrt{-1}$ ،  $\partial P / \partial z$  مشتق قائم و  $\partial p / \partial x$ ،  $\partial P / \partial y$  مشتقات افقی داده‌های پتانسیل هستند.

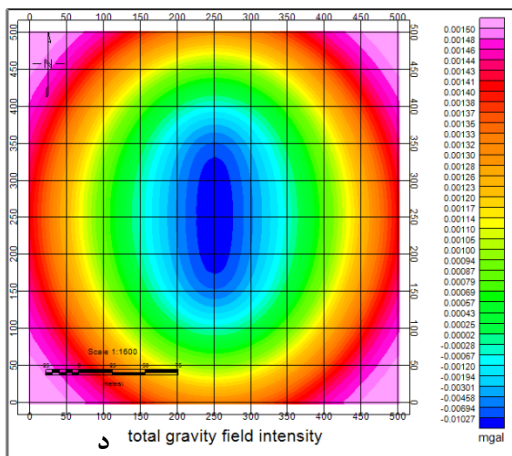
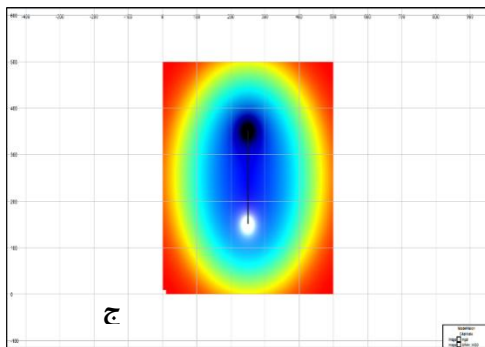
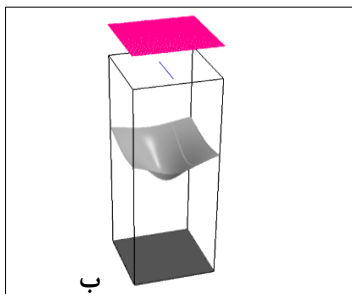
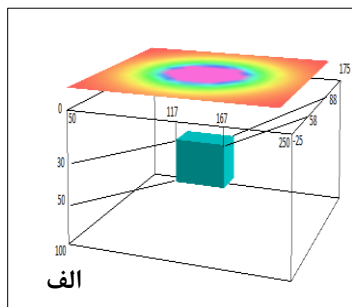
محاسبات سه بعدی دامنه سیگنال تحلیلی (AAS) به صورت زیر است:

$$|AAS(x, y)| = \sqrt{\left( \frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right)^2} \quad (17)$$

دامنه مشتق مرتبه  $N$  سیگنال تحلیلی به صورت زیر است:

$$|AAS_n(x, y)| = \sqrt{\left( \frac{\partial P_n}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial P_n}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial P_n}{\partial z} \right)^2} \quad (18)$$

در رابطه بالا، بالانویس  $Z$  مشتق قائم میدان پتانسیل گرانش است. مشتقات افقی توسط روش تفاضل محدود و یا تبدیل فوریه سریع (FFT) محاسبه می‌شود. تبدیل هیلبرت نیز برای محاسبه مشتق قائم استفاده می‌شود. بعد از محاسبه سیگنال تحلیلی، الگوریتم بلکلی برای شناسایی اتوماتیک محل ساختارها بکار برده می‌شود. در ادامه روش ترکیبی سیگنال تحلیلی - اوپلر پارامترهای عمق و مختصات را برای محل‌های شناسایی شده با الگوریتم بلکلی تخمین می‌زند. الگوریتم بلکی در صورتی که دامنه سیگنال



شکل ۱. الف) نمای سه‌بعدی مکعب مربعی، ب) نمایش مکعب طولی (مدل تونل)، ج) آنومالی بوگه مکعب طولی همراه با محل قرارگیری آن و د) آنومالی بوگه مدل مصنوعی

روش‌های مختلفی برای تخمین مرز ساختارهای زمین‌شناسی، به کمک بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل وجود دارد. در همه این روش‌ها، تغییرات یک کمیت در سرتاسر نقشه و خصوصاً در محدوده بی‌هنجاری اندازه‌گیری می‌شود. از جمله این

رابطه اخیر یک رابطه خطی است که با حل عددی آن برای تعداد مناسبی نقاط از پروفیل، می‌توان به سادگی  $x$  و  $z$  یعنی مختصات یک نقطه از آنومالی گرانث را تعیین کرد. روش استفاده از رابطه فوق در حالت سه بعدی به این صورت است که پنجره‌ای شامل تعداد نقاط مناسب نقاط گرانث برداشت در نظر گرفته می‌شود و دستگاه معادلات خطی حاصل از این رابطه به صورت عددی حل می‌شود که نتیجه آن تعیین مختصات یک نقطه از آنومالی زیرسطحی است. با حرکت دادن این پنجره روی یک شبکه، مختصات تعداد نقاط بیشتری از آنومالی به دست می‌آید که پیوستگی بهتر این نقاط پس از قرار گرفتن بر روی نقشه آنومالی بوگه، یکی از ملاک‌های قبول یا رد جواب‌ها است [۲۰].

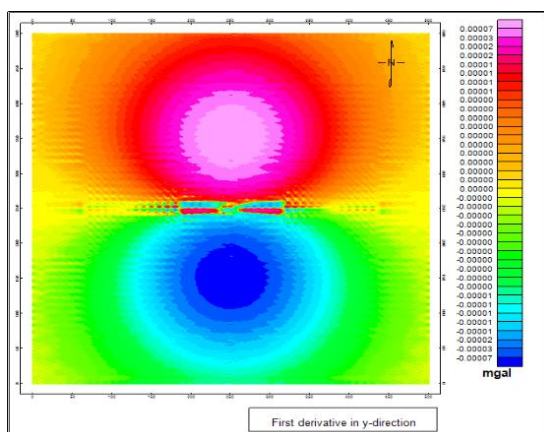
#### ۴-۲. نتایج شبیه‌سازی مدل تک مکعبی

در این مطالعه، برای تولید داده‌های مصنوعی از مدل ساده مکعبی به عنوان چشمه ایجادکننده اثر گرانثی استفاده خواهد شد. از آنجا که در این مطالعه، تنها هدف مورد نظر مدل‌سازی شده است، نیاز به اعمال روش‌های جداسازی بی‌هنجاری‌ها و اعمال تصحیحات ناست. از این رو به اعمال روش‌های رایج پردازش و سپس تفسیر نتایج به دست آمده می‌پردازیم. در این مرحله از یک مکعب طولی برای شبیه‌سازی تونل‌های تروریستی استفاده شده است که دارای تباين چگالی بیشتری نسبت به زمینه است. چنین ساختاری به دلیل تباين چگالی بیشتر امکان اکتشاف بیشتری نسبت به سازه‌های دست‌ساز دارند ولی حجم کوچک این ساختارها باعث تضعیف اثر گرانثی آن‌ها می‌شود. به کمک این مدل می‌توان دقت روش گرانث‌سنجی در آشکارسازی تونل‌های زیرزمینی بررسی کرد. به طور کلی حجم و عمق سازه زیرسطحی نقش بسزایی در میزان دقت اکتشاف و استتار آن دارند. پارامترهای مدل مورد نظر در جدولی ارائه شده است که یک تونل با مقطع ۲\*۲ با طول ۲۰۰ متر در عمق ۲۰ متری است (جدول ۱). آنومالی بوگه به دست آمده از مدل مورد نظر همراه با نمایش سه‌بعدی مکعب نشان داده شده است (شکل ۱). مدل‌سازی در ابتدا بدون نویز زمینه انجام شده است و در مرحله بعد با افزودن ۵٪ نویز گوسین به زمینه صورت گرفته است تا مدل‌سازی به واقعیت نزدیک‌تر باشد و فیلترها بر روی مدل نویزدار اعمال گردیده است.

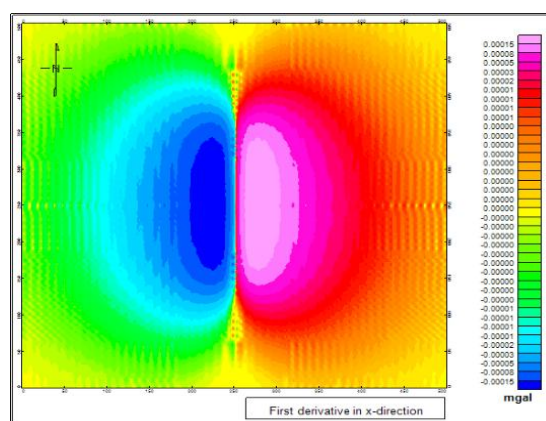
جدول ۱. پارامترهای مدل مصنوعی

مختصات مرکز مدل			ابعاد شبکه برداشت $X \times Y$ (m)	تباين چگالی $Kg/m^3$
$x1-x2$	$y1-y2$	$z1-z2$		
۲۵۰-۲۵۲	۱۵۰-۳۵۰	۲۰-۲۲	۵۰۰*۵۰۰	۲۰۰۰

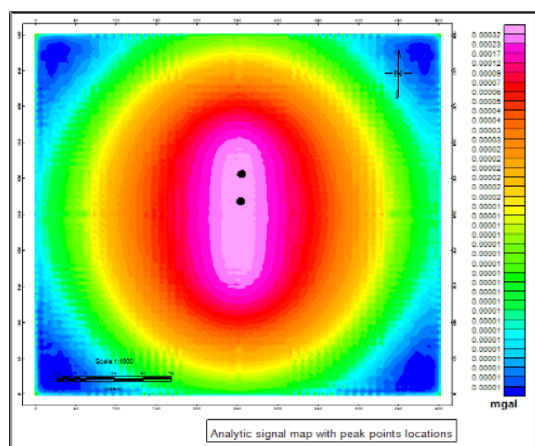
مدل مورد نظر در راستای  $x$  و  $y$  است و با استفاده از این مشتقات می‌توان مرزهای ساختارها و لبه هدف را به خوبی تشخیص داد (شکل ۲). در مرحله بعد با اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی آنومالی‌های بزرگتر را نسبت به آنومالی‌های ضعیف‌تر بهتر و بارزتر نشان می‌دهیم و سپس با اعمال الگوریتم بلکلی نقاط پیک آنومالی را با دایره‌های توپر شناسایی می‌کنیم (شکل ۲). در نهایت نتایج روش سیگنال تحلیلی - اویلر یا به اصطلاح  $(an-euler)$  همراه با اعمال الگوریتم بلکلی بر روی داده‌های گرانشی به دست آمد به طوری که پارامترهای مکان و عمق ساختارهای زیرزمینی موجود به صورت شکل و جدول مد نظر برآورد شدند (شکل ۳).



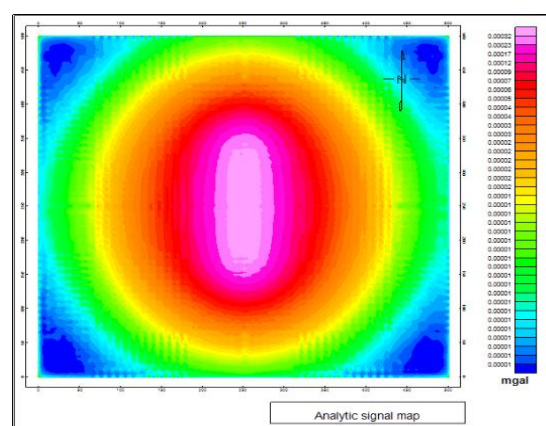
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۲. (الف و ب) نقشه مشتق افقی به ترتیب در جهت  $y, x$  (ج) نقشه گرانشی سیگنال تحلیلی و (د) نقشه فیلتر بلکلی

راستا است. خطای تخمین عمق ناشی از کوچکی دهانه تونل و عمق آن است (جدول ۲ و ۳). به صورت مشابه محل یک پایگاه نظامی در عمق ۲۰۰ متری شبیه‌سازی شده است و همچنین عمق آن نیز برآورد شده است (شکل ۳).

مختصات اول حاصل از نتایج اعمال الگوریتم بلکلی بر داده‌ها است و مختصات حاصل از اعمال روش سیگنال تحلیلی - اویلر با اندکی خطا نسبت به مختصات اول به دست آمده است. خطای زیاد در مختصه قائم اویلر به دلیل وجود کشیدگی زیاد در این

روش‌ها می‌توان به نقشه‌های مشتقات افقی (گرادیان‌های افقی) و روش سیگنال تحلیلی اشاره کرد. نقشه‌های گرادیان افقی یکی از مناسب‌ترین روش‌های تعیین مرز بی‌هنجاری گرانشی است. در گرادیان‌های افقی در واقع با مشتق‌گیری از میدان گرانش، تغییرات میدان در واحد طول بررسی می‌شود و همان طور که می‌دانیم ماکسیمم تغییرات در مرزهای ساختار رخ می‌دهد و به عبارتی دیگر با مشتق‌گیری در جهات مختلف می‌توان مرزهای ساختار را به خوبی تفکیک کرد [۲۰].

همان‌گونه که در شکل نیز دیده می‌شود، مقادیر بیشینه و کمینه در هر یک از دو شکل به ترتیب نشان‌دهنده ابتدا و انتها



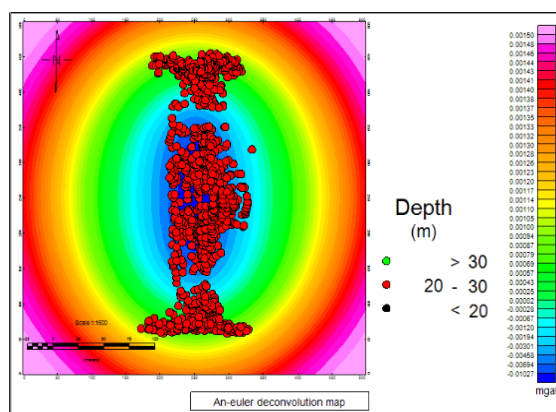
تونل‌های زیرزمینی را مشخص کرده تا این تونل‌ها توسط روش گرانش‌سنجی قابل اکتشاف نباشند و یا با انتخاب محل مناسب برای ساخت تونل‌های زیرزمینی امکان اکتشاف این ساختارها را به حداقل رساند. امکان اکتشاف تونل‌ها با استفاده از روش گرانش‌سنجی به چندین پارامتر وابسته است که به ترتیب بیان می‌گردد.

۱- حجم سازه یا تونل زیرزمینی: به صورت کلی در تمام روش‌های ژئوفیزیکی هر چه حجم سازه بزرگ‌تر باشد امکان اکتشاف آن بیشتر می‌شود زیرا تونل یا حفره بزرگ‌تر موجب تباین گرانشی بیشتر با محیط اطراف و زمینه می‌شود.

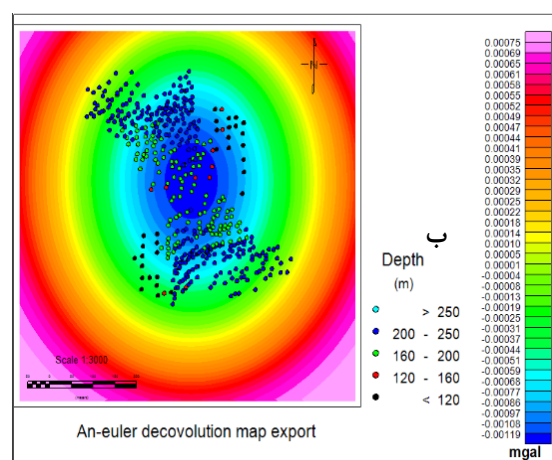
۲- عمق قرارگیری: با افزایش عمق امکان اکتشاف تونل کمتر می‌شود و در صورت قرارگیری در عمق زیاد عملاً امکان اکتشاف ساختار از بین می‌رود.

۳- تباین چگالی با زمینه: هر چه میزان تباین چگالی با محیط اطراف بیشتر باشد امکان اکتشاف بیشتر می‌شود و با کاهش این تباین اثر ساختار در مقابل زمینه کاهش می‌یابد و یکی از راه‌های جلوگیری از اکتشاف سازه‌ها زیرزمینی، ساخت این سازه‌ها در مکان‌های است که با سازه‌های ساخت دست بشر تباین کمتری داشته باشند.

در این بخش تونل‌ها دارای تباین چگالی یکسان نسبت به زمینه هستند و در اعماق مختلف قرار داده شده‌اند تا در نهایت بتوان پارامتری را تعریف کرد که نشان‌دهنده امکان اکتشاف تونل‌های نظامی توسط روش گرانش‌سنجی باشد. پارامترهای مدل چند مکعبی در جدولی ارائه شده است (جدول ۴). آنومالی بوگه به دست آمده از مدل مورد نظر همراه با محل قرارگیری آن نشان داده شده است (شکل ۴). مدل‌سازی در ابتدا بدون نویز زمینه انجام شده است و در مرحله بعد با افزودن ۵٪ نویز گوسین به زمینه صورت گرفته است تا مدل‌سازی به واقعیت نزدیک‌تر باشد و فیلترها بر روی مدل نویزدار اعمال گردیده است. در این مرحله، به مانند مثال قبل در ابتدا دامنه سیگنال تحلیلی برای برجسته‌سازی محل ساختار مورد نظر محاسبه گردیده است و بعد از محاسبه سیگنال تحلیلی، الگوریتم بلکلی برای شناسایی اتوماتیک محل ساختارها بر روی نقشه سیگنال تحلیلی اعمال شده است (شکل ۴). همان طور که مشاهده می‌شود در خروجی سیگنال تحلیلی مدل شماره ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲ به دلیل عمق زیاد قابل تشخیص نبوده و میدان گرانشی آن با زمینه ترکیب شده و قابل‌شناسایی نیست. سیمبل‌های دایره توخالی محل‌های شناسایی شده توسط الگوریتم بلکلی را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود الگوریتم بلکلی تعداد ۶ عدد از ۱۲ ساختار را شناسایی کرده است بقیه ساختارها به دلیل عمق زیاد



(الف)



(ب)

شکل ۳. نقشه نهایی سیگنال تحلیلی - اوپلر بر روی داده‌های گرانشی. (الف) مدل تونل زیرزمینی و (ب) مدل پایگاه نظامی

جدول ۲. نتایج عددی مدل تونل زیرزمینی

X	Y	X An- Euler	Y An-Euler	Depth
257.13	283.46	265.07	349.25	26.34

جدول ۳. نتایج عددی مدل پایگاه نظامی

X	Y	X An- Euler	Y An-Euler	Depth
518.22	71.42	527.6	160.91	172.35

۴-۳. نتایج شبیه‌سازی مدل چند مکعبی

به عنوان دومین مدل‌سازی، از یک مدل چند مکعبی با کمی پیچیدگی استفاده شده است. در این مدل از چندین مکعب در اعماق مختلف استفاده شده است تا توانایی روش گرانش‌سنجی در اکتشاف تونل‌های زیرزمینی در اعماق متفاوت مورد ارزیابی قرار بگیرد. با بررسی این مدل می‌توان عمق مناسب برای ساخت

قابل شناسایی نیستند.

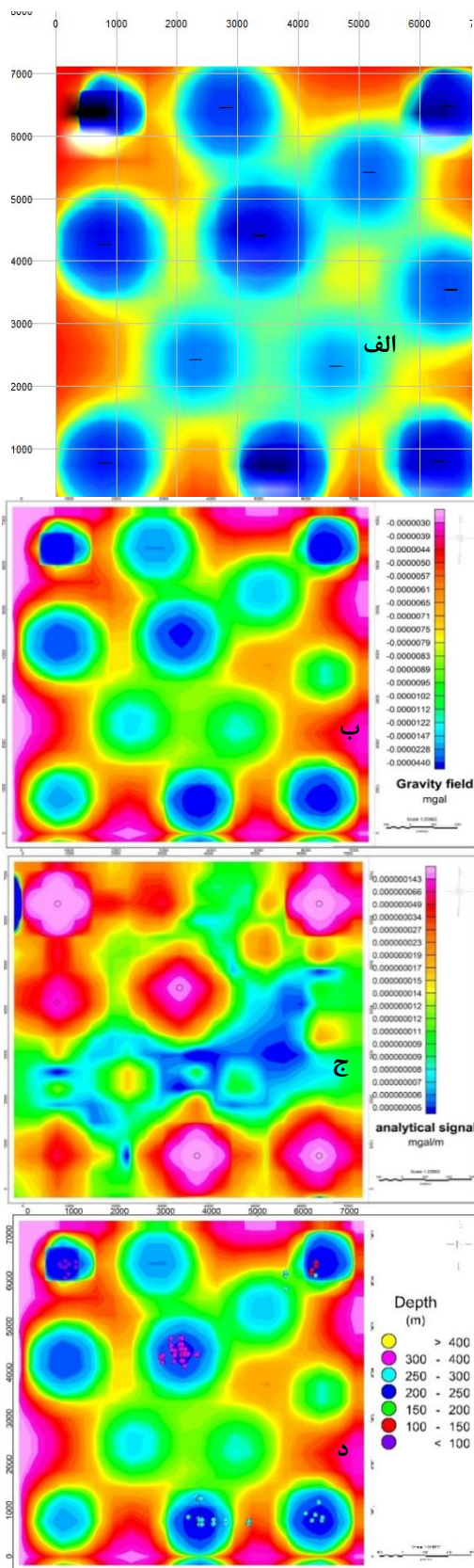
در ادامه روش ترکیبی سیگنال تحلیلی- اویلر پارامترهای عمق و مختصات را برای محل های شناسایی شده با الگوریتم بلکلی تخمین میزند (جدول ۵). همان طور که مشاهده می شود با افزایش عمق امکان اکتشاف ساختارها کاهش یافته و همچنین با افزایش عمق دقت روش اویلر در تعیین عمق نیز کاهش می یابد و عملاً بعد از عمق ۲۰۰ متری دقت در عمق یابی به شدت کاهش می یابد و خطا قابل ملاحظه می گردد (شکل ۴). ولی در مکان یابی افقی (x و y) با افزایش عمق خطا چندان زیاد نمی شود و قابل چشم پوشی است. همچنین در این بخش برای بررسی داده ها، پارامتری جدید با توجه به نتایج این تحقیق تعریف می شود که با تجزیه و تحلیل این پارامتر می توان احتمال اکتشاف ساختارها را به صورت کمی بررسی کرد. این پارامتر F است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$F = \frac{\text{حجم}(m^3)}{\text{عمق}(m)} = \frac{V}{h}$$

جدول ۴. پارامترهای مدل چند مکعبی

شماره مدل ها	ابعاد شبکه برداشت X×Y (m)	محدوده مدل			تایین چگالی Kg/m <sup>3</sup>
		z1-z2	y1-y2	x1-x2	
۱	۷۰۰×۷۰۰	۵۰-۵۳	۶۴۲۸-۶۴۳۱	۷۴۳-۹۴۳	۲۰۰
۲	۷۰۰×۷۰۰	۱۰۰-۱۰۳	۶۴۷۸-۶۴۸۱	۶۳۷۸-۶۵۷۸	۲۰۰
۳	۷۰۰×۷۰۰	۲۰۰-۲۰۳	۶۷۲-۶۷۵	۳۶۱۴-۳۸۱۴	۲۰۰
۴	۷۰۰×۷۰۰	۳۰۰-۳۰۳	۸۰۵-۸۰۸	۶۲۰۲-۶۴۰۲	۲۰۰
۵	۷۰۰×۷۰۰	۴۰۰-۴۰۳	۴۴۰۸-۴۴۱۱	۳۲۵۰-۳۴۵۰	۲۰۰
۶	۷۰۰×۷۰۰	۵۰۰-۵۰۳	۴۲۶۷-۴۲۷۰	۷۰۳-۹۰۳	۲۰۰
۷	۷۰۰×۷۰۰	۶۰۰-۶۰۳	۷۸۱-۷۸۴	۷۱۰-۹۱۰	۲۰۰
۸	۷۰۰×۷۰۰	۷۰۰-۷۰۳	۶۴۴۹-۶۴۵۲	۲۷۱۱-۲۹۱۱	۲۰۰
۹	۷۰۰×۷۰۰	۸۰۰-۸۰۳	۳۵۴۴-۳۵۴۷	۶۳۹۸-۶۵۹۸	۲۰۰
۱۰	۷۰۰×۷۰۰	۹۰۰-۹۰۳	۵۴۱۴-۵۴۱۷	۵۰۴۹-۵۲۴۹	۲۰۰
۱۱	۷۰۰×۷۰۰	۱۰۰۰-۱۰۰۳	۲۴۳۳-۲۴۳۶	۲۲۰۳-۲۴۰۳	۲۰۰
۱۲	۷۰۰×۷۰۰	۱۱۰۰-۱۱۰۳	۲۳۲۳-۲۳۲۶	۴۵۰۵-۴۷۰۵	۲۰۰

با توجه به جدول (۵) برای اکتشاف ساختارها به وسیله الگوریتم بلکلی و روش اتوماتیک سیگنال تحلیلی- اویلر، برای پارامتر F می توان حد آستانه تقریبی ۳,۵ را تعریف کرد یا به عبارتی ساختارهای با F بیشتر از ۳,۵ را می توان با الگوریتم بلکلی و روش اتوماتیک سیگنال تحلیلی- اویلر اکتشاف کرد. لازم به ذکر است این مدل نشان دهنده برداشت زمینی گرانش است که از دقت بیشتری نسبت به برداشت های هواپرد برخوردار است. همان طور که می دانیم در مناطق جنگی امکان برداشت زمینی وجود ندارد به همین دلیل برداشت هوایی گرانش از اهمیت زیادی برخوردار است که در ادامه مدل های هواپرد همین مدل چند مکعبی شرح داده می شود.



شکل ۴. الف) آنومالی بوگه ساده به همراه محل قرارگیری مکعب ها، ب) آنومالی بوگه مدل مصنوعی، ج) اعمال الگوریتم بلکلی بر روی نقشه سیگنال تحلیلی و د) نقشه نهایی سیگنال تحلیلی- اویلر

جدول ۵. نتایج عددی مدل چند مکعبی

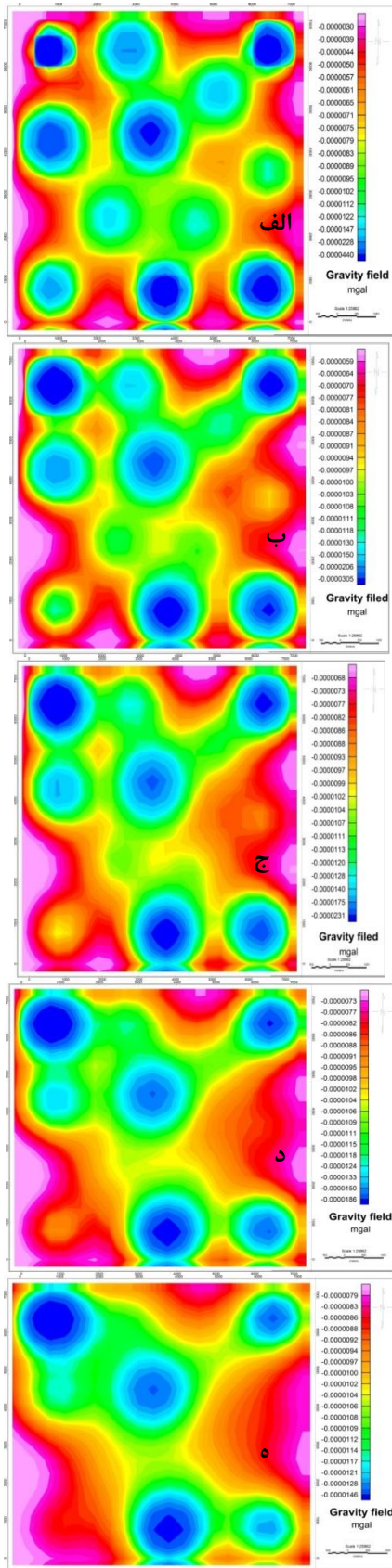
مدل	X	Y	X An-Euler	Y An-Euler	An-Euler Depth(m)	F=V/h (m <sup>3</sup> /m)
۱	۷۵۰	۶۳۶۵	۷۴۷	۶۳۶۵	۷۰	۳۶
۲	۶۳۷۵	۶۳۶۵	۶۳۸۱	۶۳۶۹	۱۳۳	۱۸
۳	۳۷۵۰	۷۴۰	۳۷۴۶	۷۲۸	۲۰۳	۹
۴	۶۳۷۵	۷۴۰	۶۳۵۲	۷۴۱	۲۴۰	۶
۵	۳۳۷۵	۴۴۹۰	۳۳۶۰	۴۴۵۰	۲۹۰	۴.۵
۶	۷۵۰	۴۱۱۵	۷۵۳	۴۱۹۷	۳۴۰	۳.۶
۷	-	-	-	-	-	۳
۸	-	-	-	-	-	۲.۵۷
۹	-	-	-	-	-	۲.۲۵
۱۰	-	-	-	-	-	۲
۱۱	-	-	-	-	-	۱.۸
۱۲	-	-	-	-	-	۱.۶۳

۴-۴. نتایج شبیه‌سازی داده‌های جاذبی مدل چند مکعبی به صورت هوابرد

در این بخش به مدل‌سازی داده‌های گرانش هوابرد می‌پردازیم و دقت این روش را در مقایسه با داده‌های گرانش زمینی مقایسه می‌کنیم. در گرانش‌سنجی هوابرد به طور کلی با افزایش ارتفاع دقت در بررسی تونل‌های زیرزمینی کاهش می‌یابد ولی می‌توان گفت با افزایش ارتفاع نسبت سیگنال به نویز افزایش می‌یابد. در این بخش داده‌های مدل‌سازی شده در مدل چند مکعبی که به صورت زمینی شبیه‌سازی شده بودند را با استفاده از فیلتر فراسو با بالا بردن سطح داده‌برداری و با تغییرات فرکانس‌ها، به صورت هوابرد مدل‌سازی می‌کنیم تا بتوان با مدل‌سازی زمینی مورد مقایسه قرار داد. داده‌ها در ارتفاعات متفاوت مدل‌سازی شده‌اند که شامل ارتفاعات ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ متر است. آنومالی بوگه حاصل از این مدل‌ها در ارتفاعات مختلف در شکل‌هایی نشان داده شده‌اند (شکل ۵). نتایج آنومالی بوگه مدل مصنوعی هوابرد بیانگر این موضوع است که با افزایش ارتفاع از شدت میدان گرانشی کاسته شده و به تدریج آنومالی‌ها محو می‌گردند به طوری که در ارتفاع ۱۰۰۰ متری به طور کلی ۵ آنومالی قابل تشخیص‌اند که در روش اتوماتیک تعداد کمتری قابل‌شناسایی خواهند بود.

۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه مدل‌سازی مصنوعی داده‌های زمینی و هوایی گرانش‌سنجی با اعمال فیلترهای گوناگون روش سیگنال تحلیلی - اوپلر و الگوریتم بلکلی جهت تعیین عمق و موقعیت آنومالی انجام شد. پارامتر جدیدی برای بررسی امکان اکتشاف این ساختارها معرفی شد تا با استفاده از این پارامتر بتوان قبل از ساخت یک سازه، نسبت حجم به عمق مناسب برای عدم اکتشاف سازه را بررسی کرد.



شکل ۵. آنومالی بوگه گرانش در ارتفاعات مختلف. (الف) سطح زمین، (ب) ۳۰۰ متری، (ج) ۵۰۰ متری، (د) ۷۰۰ متری و (ه) ۱۰۰۰ متری

- [4] Sabatier, J. M.; Muir, T. G. "Workshop on Real-time Detection of Clandestine Shallow Tunnels"; NCPA Report HB0306-01 for US Army Research Office, University of Mississippi, 2006.
- [5] Crawford, N. C.; Croft, L. A.; Cesin, G. L.; Wilson, S. "Microgravity and Electrical Resistivity Techniques for Detection of Caves and Clandestine Tunnels"; American Geophysical Union, 2006.
- [6] Mikhailov, V.; Pajot, G.; Diament, M.; Price, A. "Automatic Detection of UXO Magnetic Anomalies Using Extended Euler Deconvolution"; *Geophysics* 2010, 75, 13-20.
- [7] Sahami, H.; Radan, M. Y.; Majidi, D. "Detecting Buried Underground Structures Using Simulation of Gravity Data"; *Passive Defence Science and Technology* 2012, 1, 81-94 (In Persian).
- [8] MadanchiZare, A.; Dehghani, H.; MousaZade, K.; Taghavi, S. "Modelling the Ability of Geophysics Sensors for Underground Utility Detection and Some Solutions to Disable Them"; *Passive Defence Journal* 2013, 16, 63-76 (In Persian).
- [9] Mosapour, Y.; Khazaee, S. "Precise Edge Detection of Anomalies in Potential Field Data Using Balanced Horizontal Derivative and Second-Order Normalized Total Horizontal Derivative"; *Journal of the Earth and Space Physics* 2016, 42, 393-403 (In Persian).
- [10] Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sherrif, R. E. "Applied Geophysics"; Cambridge University Press, 1990.
- [11] Wooldridge, A. "Review of Modern Airborne Gravity Focusing on Results from GT-1A Surveys"; *First Break*, 2010, 28, 85-92.
- [12] Van Kann, F. "Requirement and General Principle of Airborne Gravity Gradiometers for Mineral Exploration"; Airborne Gravity, the ASEG-PESA Airborne Gravity Workshop; R. Lane, Ed., Australia, 2004, 1-6.
- [13] Alberts, B. "Regional Gravity Field Modeling Using Airborne Gravimetry Data"; NCG, Nederlandse Commissie Voor Geodesie, 2009.
- [14] Gerkens, A. J. "Foundation of Exploration Geophysics"; Cambridge University Press, 1989.
- [15] Nabighian, M. N. "The Analytic Signal of two-Dimensional Magnetic Bodies with Polygonal Cross Section: Its Properties and Use for Automated Anomaly Interpretation"; *Geophysics* 1972, 37, 507-517.
- [16] Nabighian, M. N. "Toward a Three-Dimensional Automatic Interpretation of Potential Field Data"; *Geophysics* 1984, 39, 412-425.
- [17] Salem, A.; Ravat, D. "Analytic Signal and Euler Method for Automatic Interpretation of Data"; *Geophysics* 2003, 68, 1952-1961.
- [18] Debeglia, N.; Coppel, J. "Automatic 3-D Interpretation of Potential Field Data using Analytic Signal Derivatives"; *Geophysics* 1997, 62, 87-96.
- [19] Thompson, D. T. "EULDPH: A New Technique for Making Computer-Assisted Depth Estimates from Magnetic Data"; *Geophysics* 1982, 47, 31-37.
- [20] Ebrahimzadeh Ardestani, V. "Applied Gravimetry"; Tehran University Press, 1389 (In Persian).

با توجه به مدل‌سازی انجام شده، مشاهده گردید که با برداشت‌های زمینی و هوابرد گرانش‌سنجی، پردازش داده‌ها و استفاده از روش‌های پیشرفته تفسیرهای کیفی و کمی می‌توان به راحتی سازه‌های و اهداف مدفون شده زیرسطحی را که تباین چگالی مناسبی با محیط اطراف خود ایجاد می‌کنند را شناسایی کرد. از این رو می‌توان روش گرانش‌سنجی را به عنوان یکی از مجموعه روش‌های پرکاربرد و مورد استفاده در شناسایی سازه‌های زیرزمینی نظامی بکار برد. در ساخت تأسیسات نظامی برای ایجاد پدافند مناسب در برابر حملات دشمن، می‌توان راهکارهایی را به منظور جبران تباین چگالی اهداف زیرسطحی با محیط اطراف به کار برد تا این اهداف از دید روش گرانش‌سنجی پنهان شوند. از جمله این راهکارها می‌توان به استفاده از بتون‌هایی با چگالی بالا، دیوارهای ضخیم، استفاده از مدل زمین‌شناسی اتفاقی در استتار مناطق با چگالی مختلف و همچنین استفاده از سقف‌های ضخیم به صورتی که هم سبب افزایش مقاومت سازه و هم سبب کاهش تباین چگالی موجود می‌شوند اشاره کرد. همچنین به عنوان یک روش پدافند غیرعامل می‌توان در محل احداث سازه‌های نظامی مدفون از حفرات فریب استفاده کرد تا دشمن در شناسایی سازه مورد نظر دچار خطا و اشتباه گردد. با توجه به مهم بودن عمق سازه طراحی‌شده، می‌توان با بررسی اولیه عمق غیرقابل اکتشاف با روش‌های ژئوفیزیکی از جمله روش گرانش‌سنجی، از شناسایی سازه مورد نظر توسط دشمن جلوگیری کرد. با توجه به این موضوع که در روش گرانش‌سنجی، اهداف با توجه به میزان تباین چگالی خود با محیط اطراف شناخته می‌شوند، می‌توان توده‌هایی را با چگالی و ابعاد متفاوت در اطراف سازه قرار داد و به این صورت دشمن را در شناسایی هدف گمراه نمود. همچنین می‌توان با قرار دادن سازه‌ها در اعماق بیشتر و کوچک کردن ابعاد آن‌ها، شناسایی آن‌ها را توسط روش گرانش‌سنجی، پیچیده و دشوارتر کرد. در نهایت می‌توان گفت با بررسی‌های اولیه گرانش‌سنجی جهت احداث تونل زیرزمینی نظامی، با استفاده از روش سیگنال تحلیلی- اویلر و همچنین با اعمال الگوریتم بلکلی بر روی داده‌های جاذبی می‌توان مانع آشکارسازی سازه احداث شده شد.

## ۶. مراجع‌ها

- [1] Sepp, E. M. "Deeply Buried Facilities: Implications for Military Operations"; Occasional Paper No. 14, Center for Strategy and Technology, Air War College, 2000.
- [2] Stolarczyk, L. G.; Troublefield, R.; Battis, J. "Detection of Underground Tunnels with a Synchronized Electromagnetic Wave Gradiometer"; *Proc. SPIE* 2005, 5778, 994-1001.
- [3] Amin M. "Toward Self-healing Infrastructure Systems"; *IEEE Computer Application Power* 2001, 20-28.