

تعیین پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای پنهان در تصاویر رادار نفوذی به زمین با استفاده از

الگوریتم تطبیق الگوی سریع

رضا احمدی^۱، نادر فتحیان‌پور^۲

۱- استادیار دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی اراک، ایران
۲- دانشیار دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

(دریافت ۱۶ خرداد ۱۳۹۴، پذیرش ۱۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)

چکیده

در مطالعه حاضر از روش رادار نفوذی به زمین (GPR) جهت تعیین مشخصات هندسی و فیزیکی اهداف استوانه‌ای مدفون نظیر انواع ساختارهای تونلی استفاده شده است. برای این منظور از روش تطبیق الگو به کمک روابط ریاضی موجود بین مشخصات هندسی هدف استوانه‌ای شامل شعاع، عمق دفن و موقعیت افقی، با پارامترهای هذلولی پاسخ، استفاده شد. روش تطبیق الگو از طریق بکارگیری دو روش تعیین میزان شباهت مختلف، هم‌امیخت دوبعدی مستقیم حوزه فضایی و همبستگی متقابل به‌هنگار شده در حوزه عدد موج دوبعدی، هم برای پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی و هم برای نگاشت‌های راداری واقعی، مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج حاصل از مطالعه برای مدل‌های مصنوعی متعدد مورد آزمون، نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی قادر است پارامترهای از پیش شناخته شده اشیاء مدفون را با دقت مطلوبی (حداکثر خطای ۱۵ درصد) تخمین بزند. الگوریتم تطبیق الگو برای شناسایی و استخراج پارامترهای هندسی قنات مدفون در دشت شاهین شهر اصفهان نیز به‌عنوان مطالعه میدانی داده‌های واقعی GPR مورد استفاده قرار گرفت. از آنجایی که داده‌های واقعی GPR حاوی انواع نوفه‌ها بوده و به‌شدت وابسته به شرایط محیطی و سازندهای زیرسطحی می‌باشند، بنابراین یک سری مراحل پیش‌پردازش و پردازشی متناسب و هدفمند، طراحی و به‌طور خودکار بر روی نگاشت‌های راداری واقعی GPR قبل از ورود به الگوریتم تطبیق الگو اعمال شد. بر اساس میزان دقت مقادیر استخراج شده برای پارامترهای هندسی قنات، از روی پاسخ GPR داده‌های واقعی برداشت شده، اعتبار الگوریتم تطبیق الگو به اثبات رسید. الگوریتم پیشنهادی به‌گونه‌ای طراحی شده است که کلیه مراحل شناسایی و تخمین پارامترهای هندسی اهداف مدفون، به‌طور خودکار انجام می‌شود.

کلمات کلیدی: رادار نفوذی به زمین (GPR)، هذلولی پاسخ، پارامترهای هندسی اهداف استوانه‌ای، تطبیق الگو، همبستگی متقابل به‌هنگار (نرمالیزه) شده

۱- مقدمه

رادار نفوذی به زمین^۱ (GPR) یک روش ژئوفیزیکی با قدرت تفکیک بالاست که قابلیت ارائه تصاویر زیرسطحی با تفکیک-پذیری بالا از محیط‌های دی‌الکتریک کم‌اتلاف^۲ را داراست. یک سیستم GPR، پالس‌های الکترومغناطیسی^۳ (EM) با فرکانس زیاد (عموماً در محدوده فرکانس یک مگاهرتز تا بیش از یک گیگاهرتز) را از طریق فرستنده، به درون زمین ارسال کرده و نحوه رفتار میدان EM با محیط پیرامون را از طریق گیرنده، آشکار می‌کند. این روش قادر به شناسایی و به‌نقشه درآوردن جزئیات زیرسطحی، بدون نیاز به هیچ‌گونه تخریب و یا دست-کاری بوده و نتایج برداشت، به‌آسانی به‌صورت تصاویر دوبعدی و سه‌بعدی ارائه می‌شوند.

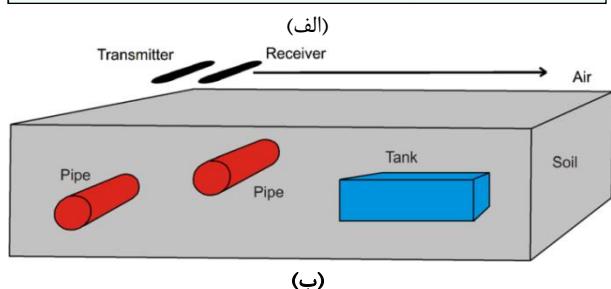
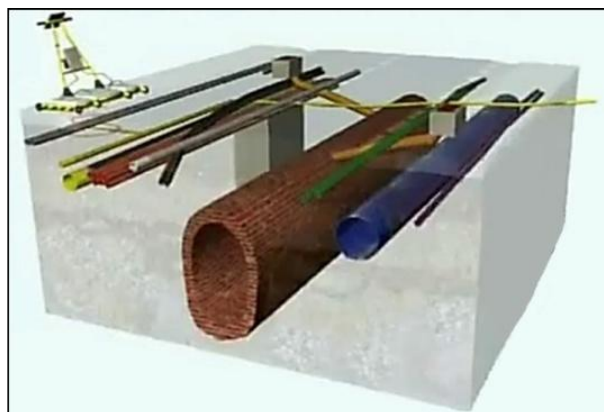
ویژگی‌های فیزیکی مواد که رفتار انرژی EM را در یک محیط کنترل می‌کنند شامل گذردهی دی‌الکتریک، ϵ ، نفوذپذیری مغناطیسی، μ و هدایت الکتریکی، σ می‌باشند. تغییرات نفوذپذیری مغناطیسی محیط‌ها به‌ویژه در کاربردهای زمین-شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، معمولاً ضعیف بوده و بنابراین در کاربرد این روش، در اکثر مواقع، ϵ و σ مهم‌ترین پارامترها می‌باشند. برداشت داده‌های GPR معمولاً از طریق سه مد صورت می‌گیرد که متداول‌ترین شیوه عملیات برداشت، مطابق شکل ۱ پروفیل‌زنی بازتابی فاصله ثابت تک حالت است. در تمام روش-های برداشت GPR، معمولاً یک مولفه میدان EM (مولفه میدان الکتریکی)، اندازه‌گیری می‌شود و شدت مولفه میدان الکتریکی اندازه‌گیری شده، به یک سیگنال ولتاژ، تبدیل شده و در مقابل زمان، ثبت می‌شود [۱]. متداول‌ترین شیوه نمایش داده‌های GPR، نمایش دامنه سیگنال بازگشتی در مقابل زمان تاخیر است که رد^۴ (تریس) نامیده می‌شود. پلاریته سیگنال بازتابی GPR نیز که بر اساس علامت ولتاژ نیم سیکل اول، تعریف می‌شود با طبیعت تغییر در ویژگی‌های الکتریکی (به‌ویژه ϵ)، کنترل گردیده و در تفسیر داده‌ها بسیار مفید است.

GPR دارای طیف وسیعی از کاربردهاست و در بسیاری از زمینه‌های مهندسی از جمله در زمینه‌های ژئوتکنیک، شناسایی ساختار و مسائل زمین‌شناسی مهندسی، معدن‌کاری، تصویر کردن آب‌های زیرزمینی، باستان‌شناسی، امور جنایی، قضایی، قانونی و نظامی، تاسیسات (مدفون در اعماق کم)، برف و یخ و یخبندان شناسی و مسائل زیست‌محیطی دارای کاربرد می‌باشد. یکی از مهم‌ترین کاربردهای آن در زمینه مهندسی ژئوتکنیک است که به‌طور خاص هدف آن آشکارسازی و شناسایی انواع

ساختارهای استوانه‌ای (شامل انواع تونل‌ها، کانال‌ها، فناات‌ها و خطوط انتقال آب و فاضلاب که در اغلب موارد نیز در زیر راه-های اصلی نواحی شهری قرار دارند)، آشکارسازی فضاهای خالی^۵ و شکستگی‌های درون توده‌های سنگی، بررسی نشست-های زمین و شناسایی نواحی همگن و غیرهمگن می‌باشد.

به‌منظور استخراج اطلاعات مطلوب از داده‌های خام (تصاویر) GPR، علاوه بر پیش‌پردازش‌های معمول و متداول ضروری، نیاز به اعمال پردازش‌های پیشرفته، سریع و موثر از جمله تکنیک‌های شناخت الگو^۶ می‌باشد. پردازش‌های پیشرفته و تکنیک‌های شناخت الگو در موارد معدودی در ارتباط با تصاویر GPR بکار گرفته شده، هرچند که هر مورد دارای محدودیت‌ها و کاستی‌هایی نیز می‌باشد، در تمامی آنها نتایج قابل قبولی ارائه نموده است که از جمله آنها کپینری و همکاران (۱۹۹۸) از تبدیل کلاسیک Hough به‌منظور شناسایی بخش‌های خطی تصویر GPR استفاده نمودند [۲]. استرنج و همکاران (۲۰۰۲) یک سری روش پیش‌پردازش را بر روی داده‌های GPR اعمال نموده و بکارگیری مراحل مختلف پیش‌پردازش را در دست‌یابی به نتیجه نهایی، ضروری و مفید ارزیابی نمودند [۳]. گامبا و بلوتی (۲۰۰۳) از دو رویکرد شبکه عصبی و تطبیق الگو برای آشکارسازی و تحلیل داده‌های GPR با هدف شناسایی موقعیت لوله‌های مدفون در نواحی شهری استفاده کردند. ورودی شبکه عصبی، بخشی از تصویر باینری شده است که از تصویر GPR پیش‌پردازش شده اقتباس می‌شود. برای استفاده از تکنیک تطبیق الگو، یک پایگاه داده از هذلولی‌های با ابعاد مختلف تهیه شده، با انتخاب هریک از رخدادهای هذلولی شکل موجود در تصویر GPR به‌طور دستی توسط عملگر^۷، مناسب‌ترین هذلولی از پایگاه داده‌ها بر آن انطباق می‌یابد [۴]. بزرگ‌ترین محدودیت این روش، محدود بودن انتخاب، تنها به هذلولی‌های موجود در پایگاه داده و دستی (غیرخودکار) بودن آن است. سزگین و همکاران (۲۰۰۴) اثرات روش‌های پیش‌پردازش را روی عملکرد آشکارسازی اشیاء مدفون، مورد مطالعه قرار دادند. با استفاده از اهداف فلزی و غیرفلزی با اندازه‌های گوناگون مدفون در اعماق مختلف، مشخص شد که روش‌های پیش‌پردازش مورد استفاده، نرخ هشدار غلط در محیط‌های واقعی را کاهش می‌دهند [۵]. کواي و همکاران (۲۰۱۰) یک سیستم آشکارسازی ویژگی و تطبیق الگو را برای شناسایی تصاویر GPR بکار گرفتند. آنها از منطق فازی برای انطباق ویژگی‌های آشکار شده از تصویر، بر ویژگی‌های موجود در پایگاه داده‌های الگو، برای شناسایی

در پژوهش حاضر با استفاده از روش تطبیق الگو و براساس ایده‌های نو از جمله استفاده از روش‌های پیش‌پردازش و پردازش تصویر خودکار بر روی نگاشت‌های^{۱۱} راداری GPR، اهداف پنهان در تصاویر GPR، به‌طور کامل شناسایی می‌شوند. به‌عبارت دیگر هدف از انجام پژوهش حاضر تعیین مشخصات هندسی اهداف استوانه‌ای مدفون، تحت شرایط مختلف محیطی، براساس اطلاعات معقول داده‌های GPR می‌باشد.



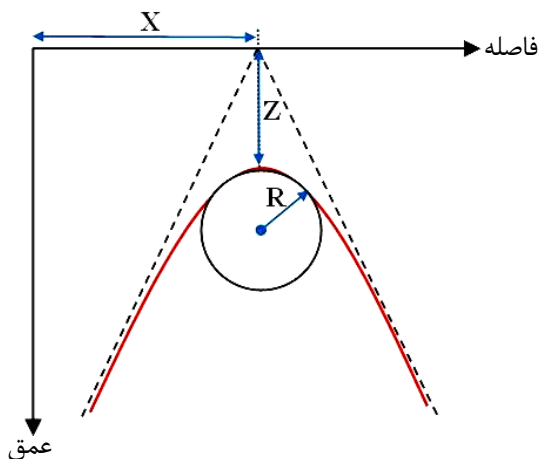
شکل ۱: برداشت داده‌های GPR با روش پروفیل‌زنی بازتابی با فاصله ثابت تک‌حالت، به‌منظور آشکارسازی الف) تاسیسات [۱۱] و ب) ساختارهای ژئوتکنیکی مدفون در زیر زمین (ویرایش شده از [۱۲]).

۲- مدل‌سازی پیش‌رو داده‌های GPR

برای دست‌یابی به هدف مورد نظر می‌توان از روش‌های عددی مختلفی نظیر ردیابی پرتو^{۱۲}، اجزاء گسسته^{۱۳} [۱۳]، اجزاء محدود و تکنیک‌های تفاضل محدود یک تا سه‌بعدی [۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷] به‌منظور مدل‌سازی استفاده نمود که در همه آنها انتشار و بازتاب امواج GPR در درون زمین، براساس رفتار امواج الکترومغناطیسی و نحوه عملکرد آنها با مواد زیرسطحی، شبیه‌سازی می‌شود. روش تفاضل محدود به‌خاطر دارا بودن مزیت‌هایی نظیر درک نسبتاً ساده مفاهیم آن، انعطاف‌پذیری، قابلیت شبیه‌سازی و مدل‌سازی محیط‌های پیچیده و قابل قبول بودن پاسخ‌های آن در موارد بکار رفته، در میان روش‌های عددی مذکور، پذیرش و کاربرد بیشتری یافته و بنابراین در این پژوهش نیز از روش تفاضل محدود دوبعدی استفاده شده است.

استفاده نمودند [۶]. در این مورد نیز یک پایگاه داده از یک سری ویژگی‌های الگوهای شناخته شده، ایجاد گردیده و کار تطبیق الگو با استفاده از منطق فازی و با استفاده از این ویژگی‌های الگوهای موجود در پایگاه داده، صورت می‌گیرد. هبسور و همکاران (۲۰۱۳) از روش GPR و سیستم طبقه‌بندی با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان^{۱۴} (SVM) برای اکتشافات ژئوتکنیکی استفاده کردند. برای طبقه‌بندی SVM ورودی‌ها از طریق اعمال تبدیل هیلبرت به دامنه‌های سیگنال بعد از انجام پردازش پیشرفته بر روی داده‌ها، حاصل شدند [۷]. مز و اسمالز (۲۰۱۳) برای موقعیت‌یابی خودکار هذلولی‌های بازتاب در تصاویر GPR از الگوریتم یادگیری Viola-Jones با حل مسئله شناخت الگو برای تصاویر مقیاس خاکستری استفاده نمودند. آنها برای تعیین موقعیت دقیق هذلولی‌ها و سرعت، از تبدیل Hough معمولی بهره بردند. از آنجایی که الگوریتم Viola-Jones هزینه محاسباتی تبدیل Hough را به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌دهد، بنابراین سیستم آشکارسازی توسعه‌یافته می‌تواند روی کامپیوترهای معمولی، حتی در محل، اجرا شود و نرخ آشکارسازی امیدبخشی را در نگاشت‌های راداری پردازش نشده، نشان می‌دهد [۸]. نانز- نیتو و همکاران (۲۰۱۴) به‌منظور آشکارسازی خودکار مواد منفجره و جداسازی اهداف بالقوه از پثواک‌ها^{۱۵}، از تکنیک‌های یادگیری ماشین شامل شبکه عصبی و رگرسیون لجستیک برای آنتن‌های با فرکانس مرکزی ۱ گیگاهرتز و ۲/۳ گیگاهرتز استفاده کردند. در پژوهش آنها شبکه عصبی با دقتی در حدود ۸۹ درصد تا ۹۲ درصد به- ترتیب برای آنتن‌های ۱ گیگاهرتز و ۲/۳ گیگاهرتز، نتیجه بهتری نشان داد [۹]. کیاو و همکاران (۲۰۱۵) برای تعیین موقعیت دقیق اشیاء فلزی مدفون در تصاویر GPR، از یک سیستم تحلیل سیگنال تک منشایی چند تفکیک‌پذیری^{۱۶} (MMSA) استفاده کردند. در فرایند چهار مرحله‌ای آنها، ابتدا با تجزیه تصویر توسط روش MMSA مولفه دامنه آن استخراج می‌شود. مولفه دامنه تا حد زیادی موجب بهبود بازتاب هدف و تضعیف موج مستقیم می‌گردد. سپس با محاسبه واریانس به- هنجار شده مولفه دامنه، روش استخراج ناحیه مطلوب، برای تعیین موقعیت واقعی بازتاب هدف از بازتاب‌های غیرواقعی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای یافتن قله‌های اهداف در نواحی محصور شده، از تبدیل Hough استفاده شده و در نهایت موقعیت افقی و قائم هدف، تخمین زده می‌شود [۱۰].

نگاشت راداری یک برداشت پروفیلی داده‌های GPR، مجموعه-ای از تریس‌های بازتابی است و پاسخ سیستم GPR (رخداد حاصله در تصویر) نیز برای اغلب اهداف مدفون (به‌ویژه اهداف استوانه‌ای) به‌صورت یک هذلولی می‌باشد. در شکل ۲ مقطع دوبعدی یک استوانه افقی و هذلولی پاسخ سیستم GPR آن در حوزه مکانی نشان داده شده است که در این شکل شعاع R استوانه افقی، X و Z به ترتیب موقعیت‌های مکانی افقی و قائم یا عمق دفن استوانه می‌باشند.



شکل ۲: پاسخ نوعی سیستم GPR به‌صورت هذلولی برای یک هدف مدفون به شکل استوانه افقی (مقطع دوبعدی) همراه با نمایش پارامترهای هندسی آن در حوزه مکانی.

با توجه به شکل ۲ و براساس معادله ریاضی هذلولی [۱۹]، روابط بین پارامترهای هندسی و پاسخ GPR هدف استوانه‌ای به‌صورت زیر خلاصه می‌شوند:

$$a = t_0 + \frac{2R}{v}, \quad b = \frac{v}{2}t_0 + R = \frac{v}{2}(a) \quad (1)$$

$$R = \frac{(2b-vt_0)}{2} = \frac{(a-t_0)}{2}v = \frac{b(a-t_0)}{a} \quad (2)$$

$$Z = \frac{vt_0}{2} = \frac{bt_0}{a} \quad (3)$$

$$\tan \varphi = \frac{a}{b} = \frac{2}{v} \quad (4)$$

که در این روابط a و b پارامترهای هندسی شناخته شده هذلولی، t_0 زمان سیر دو طرفه موج از چشمه واقع بر روی سطح زمین درست بالای مرکز شیء مدفون تا سطح فوقانی شیء، v سرعت سیر امواج EM در محیط و φ زاویه شیب مجانب‌های هذلولی می‌باشد.

۴- کاربرد شناخت الگو برای تصاویر GPR

شناخت الگو شاخه‌ای از علم مهندسی برق است که موضوع بحث آن مطالعه چگونگی مشاهدات محیطی توسط ماشین،

از آنجایی که در عمل اغلب ساختارهای ژئوتکنیکی همانند ساختارهای تونلی شامل انواع تونل‌ها، کانال‌ها و قنات‌ها، به‌صورت استوانه‌ای شکل می‌باشند بنابراین جهت شبیه‌سازی پاسخ GPR اشیای مصنوعی فرضی به شکل استوانه افقی از مدل‌سازی عددی پیشرو استفاده شد. برای این منظور الگوریتم مدل‌سازی پیشرو به‌روش تفاضل محدود دوبعدی بهبود یافته در حوزه فرکانس [۱۸] مورد استفاده قرار گرفت. در این الگوریتم بهبود یافته با طراحی مناسب و کدنویسی‌های لازم در محیط نرم افزار MATLAB، علاوه بر سهولت و تسریع در عملیات ورود مشخصات هندسی و فیزیکی مدل به نرم‌افزار، سرعت اجرای برنامه نیز نسبت به الگوریتم‌های معمول (همانند [۱۶]) افزایش یافته است [۱۸]. برای استفاده از این الگوریتم کافی است که با اجرای کدهای مربوطه در محیط MATLAB و وارد نمودن مقادیر ویژگی‌های الکتریکی و مغناطیسی (نفوذپذیری مغناطیسی نسبی μ_r ، گذردهی دی‌الکتریک نسبی ϵ_r و هدایت الکتریکی σ) محیط میزبان و هدف، ابعاد مدل (طول پروفیل برداشت و عمق)، فواصل گسسته‌سازی مکانی و فرکانس مرکزی آنتن، مدل مورد نظر را انتخاب نمود.

در پژوهش حاضر ابتدا با استفاده از مدل‌سازی عددی پیشرو به روش تفاضل محدود دوبعدی بهبود یافته، پاسخ سیستم GPR برای ۷۱ مدل مصنوعی مختلف شامل یک، دو و سه شیء استوانه‌ای افقی (متناظر با ساختارهای ژئوتکنیکی واقعی نظیر ساختارهای تونلی، کانال‌ها و قنات‌ها) به شعاع ۱۲/۵ سانتی‌متر تا ۱/۵ متر، مدفون در اعماق صفر تا ۲/۵ متری و واقع در فاصله ۱ تا ۵ متری طول پروفیل، مدل‌سازی شد. راستای پیمایش پروفیل‌های GPR عمود بر محور اشیاء مدفون بوده و با فرض دوبعدی بودن این اشیاء، گسترش طولی آنها بیش از ده برابر عرض آنها در نظر گرفته شده است که در عمل فرض درستی می‌باشد. قابل ذکر است که در تمام موارد، ابعاد مدل ۶×۳ متر و هدف موجود در همه مدل‌های مصنوعی مورد استفاده از جنس فلز رسانای کامل الکتریکی^{۱۴} (PEC) و محیط میزبان تمام مدل‌ها، خاک رس سیلتی (با مشخصات فیزیکی $\epsilon_r=6$ ، $\mu_r=1$ و $\sigma=6.67 \text{ mS/m}$; τ : نسبی) انتخاب شده است.

۳- روابط بین پارامترهای هندسی و پاسخ GPR اهداف استوانه‌ای

یکی از مهم‌ترین مسائل در طراحی‌ها و تصمیم‌گیری‌های مهندسی، شناسایی و استخراج پارامترهای هندسی ناهمگنی-های زیرسطحی مدفون است که تاحدودی با استفاده از روش-های ژئوفیزیکی نظیر GPR قابل حل می‌باشد. در حالت کلی

به‌طور کلی هدف روش تطبیق الگو پاسخ‌گویی به سوالات زیر است [۲۱]: آیا تصویر دارای بعد مشخصی از هدف مورد تجسس است؟ و در صورت مثبت بودن پاسخ سوال قبل، موقعیت هدف در کجای تصویر قرار دارد؟ بنابراین اساس تطبیق الگو همبستگی متقابل بین تصویر و هدف است که مبتنی بر تعریف فاصله (مربع فاصله) اقلیدسی می‌باشد. اگر f و t به ترتیب تصویر و هدف بوده و عملیات همبستگی در بازه پنجره (x,y) که موقعیت هدف در آن (u,v) است انجام شود با به‌هنگار (نرمالیزه) کردن بردارهای تصویر و هدف به واحد طول، همبستگی متقابل به‌هنگار شده، مطابق رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$\gamma(u, v) = \frac{\sum_{x,y} [f(x,y) - \bar{f}_{u,v}] [t(x-u, y-v) - \bar{t}]}{\{\sum_{x,y} [f(x,y) - \bar{f}_{u,v}]^2 \sum_{x,y} [t(x-u, y-v) - \bar{t}]^2\}^{0.5}} \quad (5)$$

که در این رابطه $\bar{f}_{u,v}$ میانگین هدف و \bar{t} میانگین $f(x,y)$ در ناحیه شامل هدف می‌باشد. هنگامی که فرآیند در حوزه فوریه صورت می‌گیرد، عملیات هم‌امیخت به عملیات ضرب تبدیل می‌شود؛ البته با شیفت فازی 180° درجه‌ای مقادیر تبدیل فوریه و در نتیجه عملیات همبستگی متقابل در حوزه فرکانسی به‌سادگی به‌صورت زیر می‌باشد [۲۲]:

$$C(u, v) = F(u, v) G^*(u, v) \quad (6)$$

که علامت * مزدوج مختلط مقادیر تابع می‌باشد. مزدوج مختلط فقط بر روی فاز مقادیر مختلط تاثیر می‌گذارد به‌گونه‌ای که عملیات خیلی شبیه به هم‌امیخت می‌باشد.

۴-۲- بکارگیری روش تطبیق الگو برای تصاویر GPR

۴-۲-۱- شناسایی الگوی پاسخ‌های GPR مدل‌های مصنوعی

در جدول ۱ نمونه‌ای از مشخصات مدل‌های مصنوعی ایجاد شده و پاسخ GPR مربوطه نشان داده شده است.

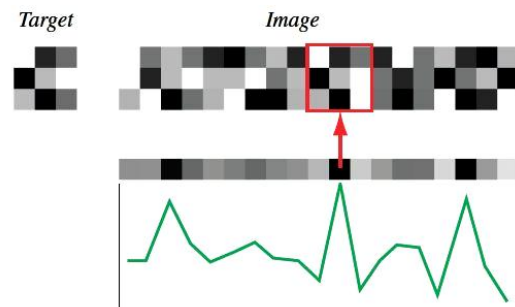
از طریق تلفیق آخرین الگوریتم‌های تطبیق الگوی سریع^{۱۹} [۲۲] عملیات تطبیق الگو برای مدل‌های مصنوعی مختلف، به‌صورت تعیین همبستگی متقابل بین تصویر و الگو با دو روش هم‌امیخت فضایی دوبعدی و حوزه عدد موج (تبدیل فوریه دوبعدی تصاویر) صورت گرفت. در به‌کارگیری الگوریتم‌های مذکور در کدهای تهیه شده برای این منظور، بسته به ابعاد تصویر و الگو، به‌طور خودکار الگوریتمی انتخاب می‌شود که در مدت زمان کوتاه‌تری اجرا شود. به‌منظور استخراج پارامترهای هندسی هدف استوانه‌ای نیز، از روش بهینه‌سازی مقید^{۲۰} (محدود شده) غیرخطی استفاده شده است.

نحوه یادگیری شناسایی الگوهای مورد نظر (هدف) از زمینه و تصمیم‌گیری معقول و مطمئن در خصوص طبقه الگوها می‌باشد. روش‌های هوشمند شناخت الگو در نیمه دوم قرن بیستم مطرح شده و به سرعت عمومیت پیدا کردند به‌گونه‌ای که در اواخر دهه هشتاد، کاربرد همه‌جانبه پیدا نمودند. این روش‌ها تکنیک‌های محاسباتی یادگیر هستند که به کمک آنها می‌توان یک نگاشت خاص را تقریب زد و یا داده‌های مختلف را طبقه‌بندی نمود.

برخی از تکنیک‌های شناخت الگو با استفاده از الگوریتم‌های مختلف و با اعمال محدودیت‌های مناسب، قادر به شناسایی پاسخ اهداف مختلف در تصاویر GPR می‌باشند. تطبیق الگو از جمله روش‌های هوشمند، سریع و کاربردی شناخت الگو می‌باشد که در مطالعه حاضر به‌منظور شناسایی اهداف استوانه‌ای مدفون در تصاویر GPR مورد استفاده قرار گرفته است.

۴-۱- مبانی تئوریک روش تطبیق الگو

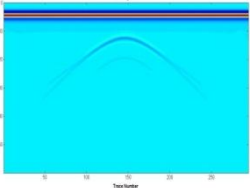
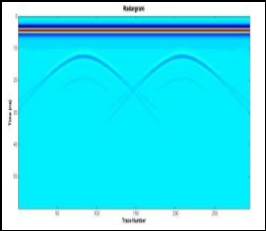
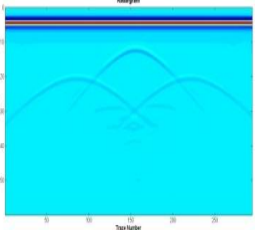
روش تطبیق الگو از جمله ساده‌ترین، قدیمی‌ترین و در عین حال سریع‌ترین روش‌های شناخت الگو بوده که براساس شباهت^{۱۵} بین دو پدیده هم نوع (نقاط، منحنی‌ها و یا اشکال) استوار است. در این روش معمولاً یک الگوی مبنا یا هدف که غالباً یک شکل دوبعدی است و یا یک نمونه اولیه^{۱۶} از یک الگوی معلوم، در مقابل تصویر، تطبیق داده می‌شود (شکل ۳). در این تطبیق معمولاً از معیارهای شباهت آماری نظیر روش‌های همبستگی متقابل^{۱۷}، فاصله چندمتغیره و غیره استفاده می‌شود. این روش به نوعی زیرمجموعه روش‌های یادگیری ماشینی^{۱۸} محسوب می‌شود.



نتیجه همبستگی متقابل

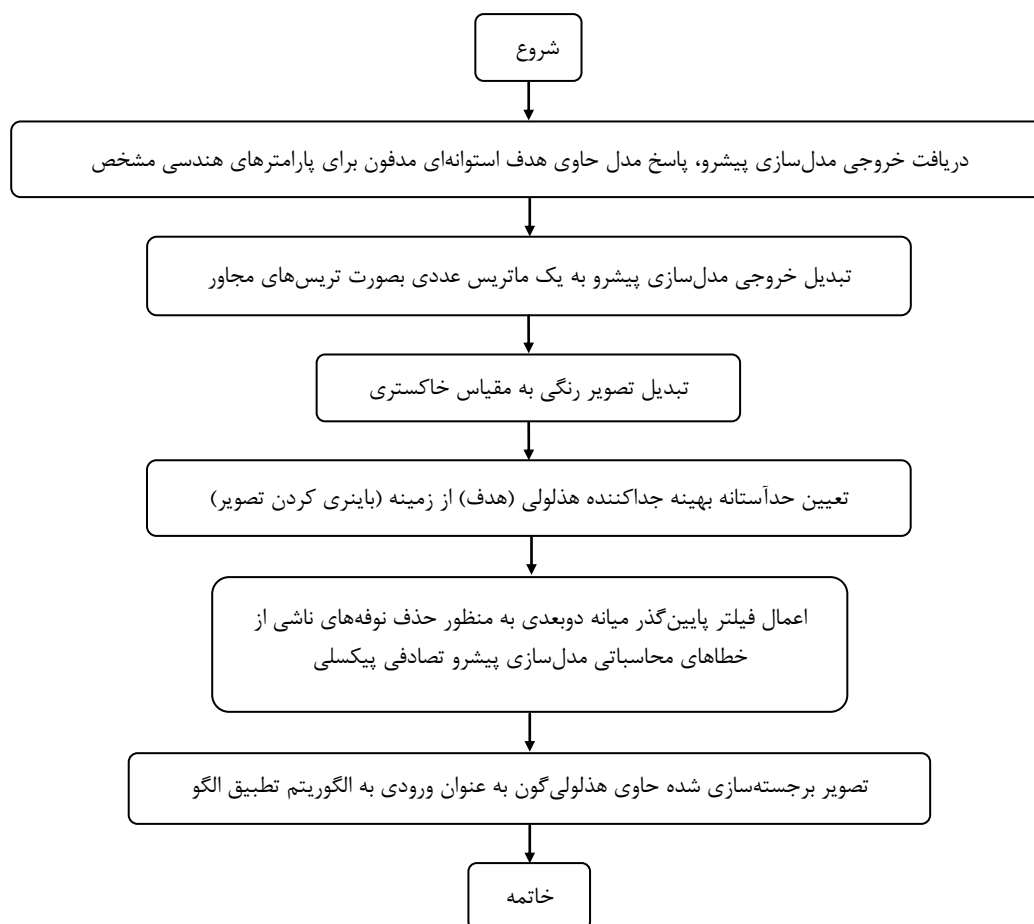
شکل ۳: همبستگی متقابل یک هدف با مقیاس خاکستری با تصویر برای حصول بهترین انطباق. در این مورد هدف 3×3 پیکسل به کار رفته و مقادیر حاصل به‌صورت نمودار نشان داده شده است. موقعیت مشخص شده بیشترین شباهت را به هدف دارد [۲۰].

جدول ۱: مشخصات هندسی و شکل پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی شامل یک، دو و سه شیء استوانه‌ای افقی.

نوع مدل					عمق دفن مدل (متر)	شعاع مدل (متر)		نوع مدل
مدل سه استوانه‌ای			مدل دو استوانه‌ای					
استوانه چپ	استوانه وسط	استوانه راست	استوانه چپ	استوانه راست				
۱	۰/۵	۱	۰/۵	۰/۵	۰/۵			
					۰/۲۵	مدل تک استوانه‌ای		نوع مدل
					۰/۲۵	استوانه راست	مدل دو استوانه‌ای	
					۰/۲۵	استوانه چپ		
					۰/۲	استوانه راست	مدل سه استوانه‌ای	
					۰/۱	استوانه وسط		
					۰/۳	استوانه چپ		

تکرار ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است. برای محاسبه ماتریس گرادینان داده‌ها نسبت به پارامترها (ماتریس ژاکوبین) نیز روش تفاضل محدود، مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجایی که تصاویر مصنوعی GPR نیز آغشته به مقداری پاسخ‌های ناخواسته و عوامل مزاحم (نوفه) هستند، به منظور آماده‌سازی این تصاویر جهت ورود به الگوریتم تطبیق الگو، ابتدا بایستی یک سری عملیات پیش‌پردازشی بر روی داده‌ها صورت گیرد. بنابراین در شکل ۴ ابتدا مراحل پیش‌پردازشی مورد نیاز تصاویر مصنوعی GPR نشان داده شده و در شکل ۵ الگوریتم تطبیق الگوی اعمال شده، ارائه شده است.

در این تحقیق از روش لونبرگ-مارکوارت^{۲۱} که یک روش کاملاً شناخته شده در حل مسائل بهینه‌سازی مقید به‌شمار می‌رود و از طریق اعمال مقادیر اولیه پارامترها و حدود قابل قبول مجاز پارامترهای هندسی، تحت عنوان حدود بالا و پایین، برای هر پارامتر استفاده شده است. تابع هدف به صورت مربع تفاوت مقادیر رقومی شده پاسخ هذلولوی به دست آمده از نگاشت‌های راداری GPR و پاسخ تئوریک مدل ریاضی هذلولوی، با تعریف مختصات محلی منطبق بر رأس هذلولوی به عنوان نقطه مبدا استفاده شده است. مقدار اولیه پارامتر منظم‌سازی در الگوریتم لونبرگ-مارکوارت معادل ۰/۰۰۵ و حداکثر تعداد



شکل ۴: مراحل پیش‌پردازش مقاطع GPR مدل‌های مصنوعی جهت ورود به الگوریتم تطبیق الگو.

با استفاده از الگوریتم‌های مذکور موقعیت افقی و قائم و نیز سایر مشخصات هندسی و فیزیکی اهداف مدفون، از طریق روابط ریاضی موجود بین این پارامترها با پارامترهای هذلولی پاسخ شناسایی گردید. در جدول ۲ مقادیر شعاع و عمق دفن واقعی با مقادیر تخمینی اهداف مدفون در تصاویر مصنوعی GPR مربوط به جدول ۱، مقایسه شده و میزان درصد خطای مربوطه نیز محاسبه گردیده است. معیار سنجش خطا در این مورد مطابق رابطه (۷) می باشد.

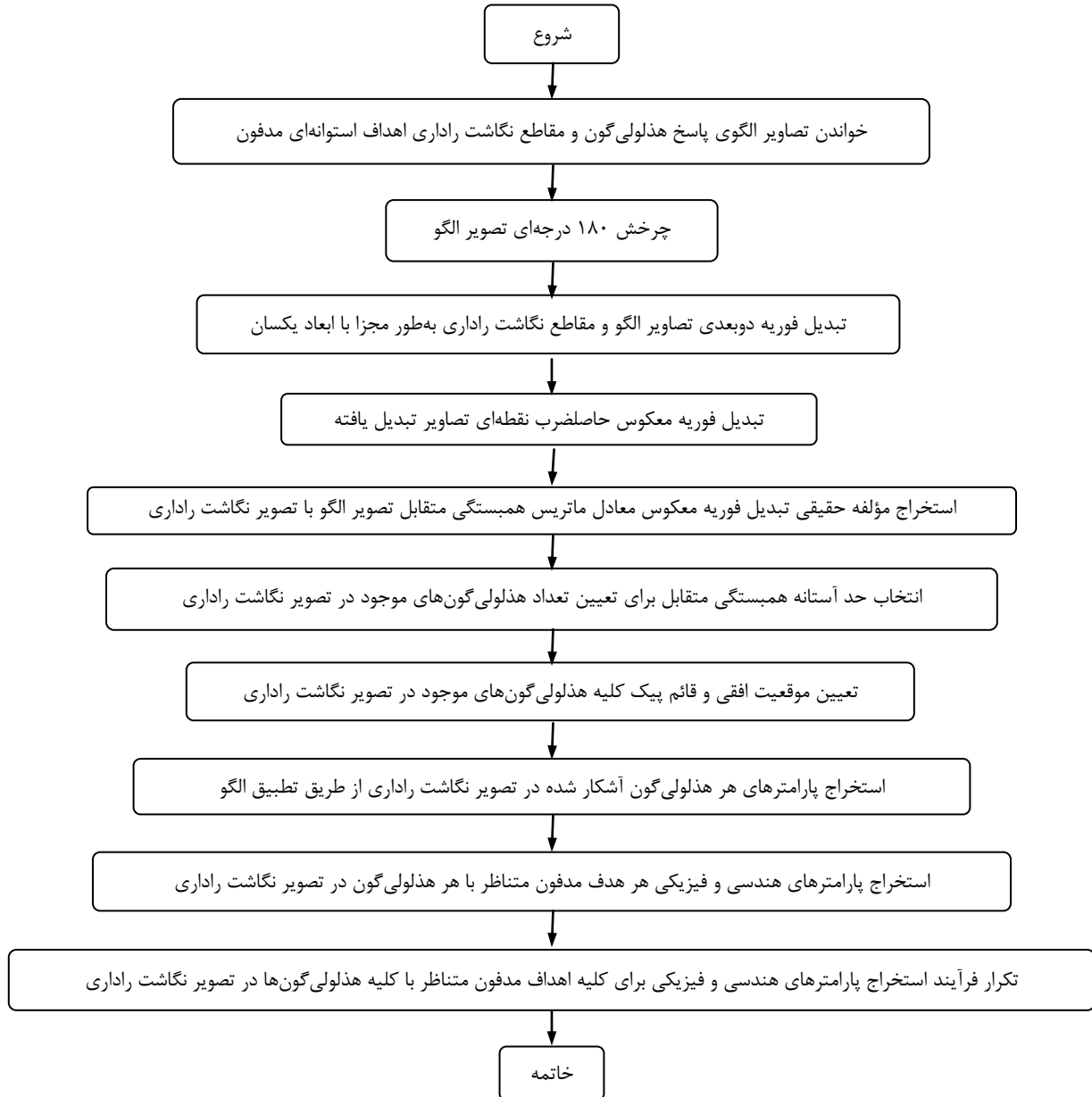
$$(7) \quad 100 \times (\text{مقدار واقعی} / \text{قدر مطلق اختلاف مقدار واقعی با مقدار تخمینی}) = \text{خطای تخمین پارامتر هندسی}$$

همان‌گونه که داده‌های این جدول نشان می‌دهد، الگوریتم پیشنهادی توانسته است با خطای متوسط ۱۲/۷ درصد، پارامترهای از پیش شناخته شده مدل‌های مدفون را تخمین بزند. نتایج برای تصاویر متداول و حتی کوچک نگاشت‌های راداری و ابعاد تصویری 500×1000 پیکسل حاکی از سرعت

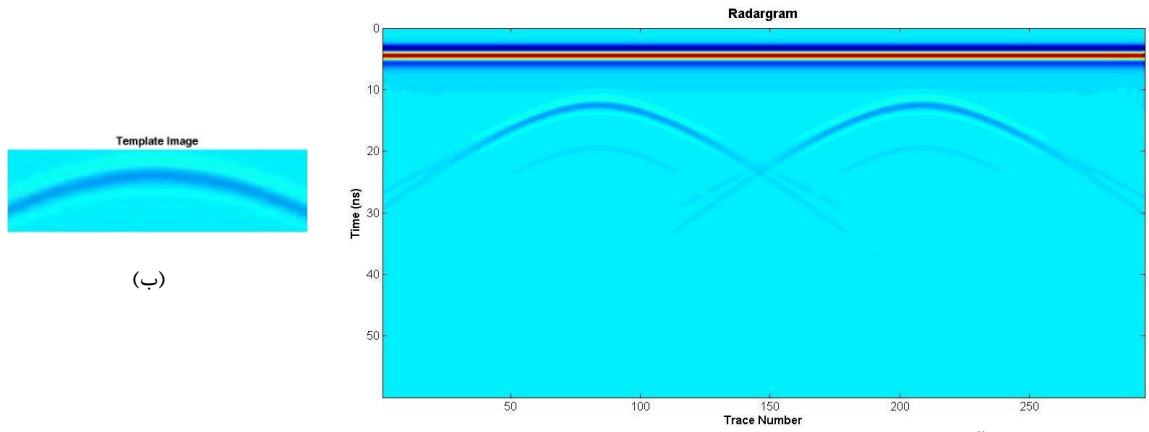
الگوریتم فوق برای ۷۱ مدل مصنوعی شامل یک، دو و سه استوانه افقی مدفون با میزان ۵ درصد نوفه تصادفی، به کار گرفته شد و نتایج مطلوبی ارائه نمود (حداکثر خطای ۱۵ درصد). به عنوان نمونه در شکل ۶ (الف) تصویر نگاشت راداری یک مدل مصنوعی حاوی دو استوانه افقی مشابه به قطر ۰/۵ متر مدفون در عمق ۰/۵ متری، (ب) تصویر الگوی مربوطه، (ج) موقعیت هذلولی‌های آشکار شده بر روی تصویر نگاشت راداری توسط تطبیق الگو، (د) نقشه سه‌بعدی میزان همبستگی متقابل بین تصویر الگو با تصویر نگاشت راداری (با همبستگی بسیار بالای ۹۹/۷۳ درصد در موقعیت اشیاء) و (ن) نمودار هذلولی‌های برازش یافته از طریق الگوریتم حداقل مربعات خطا بر پاسخ استوانه‌های افقی آشکار شده از طریق الگوریتم تطبیق الگو، نشان داده شده است. قابل ذکر است که در مورد پاسخ GPR مدل‌های مصنوعی، الگو مستقیماً از روی پاسخ هذلولی شکل هدف در نگاشت راداری استخراج شد.

پیشنهادی به گونه‌ای طراحی شد که کلیه مراحل شناسایی و تخمین پارامترهای هندسی اشیاء مدفون، به‌طور اتوماتیک و با حداقل دخالت کاربر تخمین زده شود.

بالاتر روش تشخیص الگو در حوزه عدد موجی نسبت به هم‌میخت حوزه فضایی دارد به گونه‌ای که در مثال‌های مصنوعی آزمون شده، تا بیش از ۲۳ برابر، سریع‌تر می‌باشد. الگوریتم

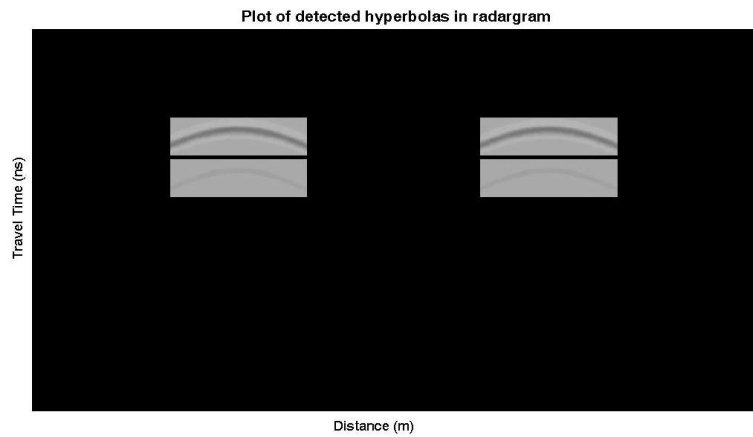


شکل ۵: نمودار جریان عملیات تطبیق الگوی سریع پیشنهادی برای تصاویر GPR.

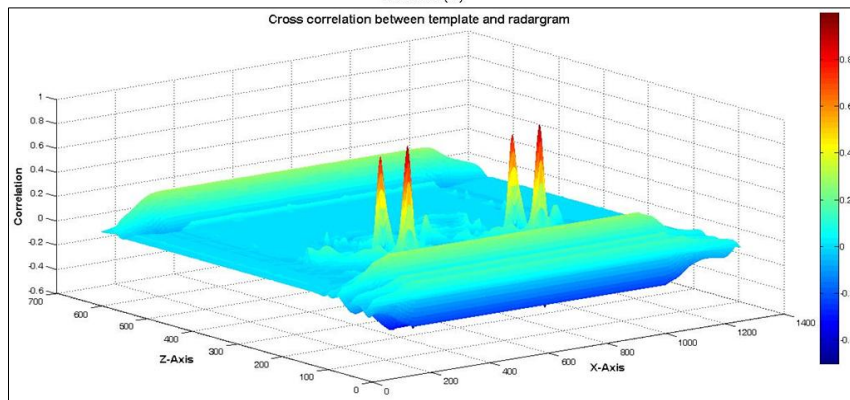


(ب)

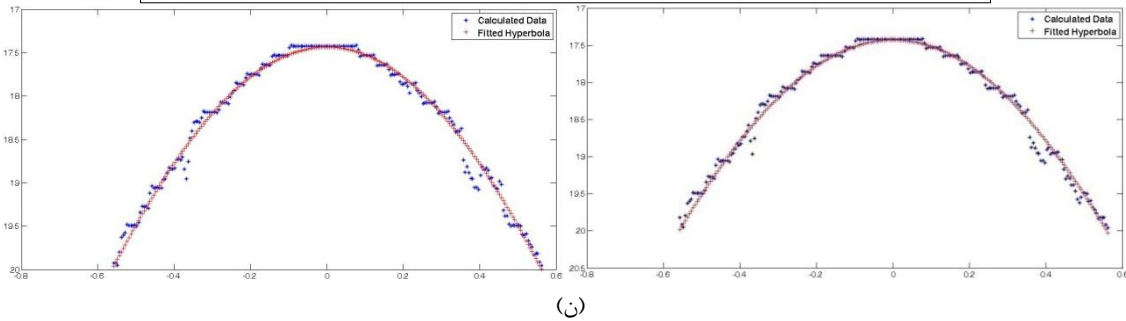
(الف)



(ج)



(د)



(ن)

شکل ۶: الف) تصویر نگاشت راداری مدل حاوی دو استوانه افقی، ب) تصویر الگوی مربوطه، ج) موقعیت هذلولی‌های آشکار شده، د) نقشه سه‌بعدی میزان همبستگی متقابل بین تصویر الگو و نگاشت راداری، ن) نمودار هذلولی‌های برازش یافته بر پاسخ استوانه‌های افقی.

جدول ۲: مقایسه مقادیر تخمینی شعاع و عمق دفن حاصل از تصاویر مصنوعی GPR با مقادیر واقعی و محاسبه میزان درصد خطای مربوطه.

نوع مدل	مشخصات هندسی مدل		شعاع واقعی (متر)	شعاع تخمینی (متر)	خطای شعاع (%)	عمق دفن واقعی (متر)	عمق دفن تخمینی (متر)	خطای عمق دفن (%)
	مدل تک استوانه‌ای	مدل دو استوانه‌ای						
مدل دو استوانه‌ای	مدل تک استوانه‌ای	استوانه راست	۰/۲۵	۰/۲۲	۱۲	۰/۵	۰/۵۵	۱۰
	مدل دو استوانه‌ای	استوانه چپ	۰/۲۵	۰/۲۲	۱۲	۰/۵	۰/۵۵	۱۰
مدل سه استوانه‌ای	مدل سه استوانه‌ای	استوانه راست	۰/۲۰	۰/۱۷	۱۵	۱	۱/۱۴	۱۴
	مدل سه استوانه‌ای	استوانه وسط	۰/۱۰	۰/۱۲	۲۰	۰/۵	۰/۵۵	۱۰
	مدل سه استوانه‌ای	استوانه چپ	۰/۳۰	۰/۲۶	۱۳/۳	۱	۱/۱۴	۱۴

۴-۲-۲- شناسایی الگوی پاسخ‌های GPR داده‌های واقعی

- مطالعه میدانی

به منظور اعتبارسنجی عملکرد الگوریتم تطبیق الگوی پیشنهادی در تعیین پارامترهای هندسی ساختارهای استوانه‌ای مدفون، مطالعه میدانی برداشت داده‌های صحرائی GPR با هدف بررسی‌های ژئوتکنیکی، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در ادامه نحوه برداشت داده‌ها، مراحل پیش‌پردازش و پردازش داده‌های برداشت شده و تفسیر نتایج، آورده شده و استخراج پارامترهای هندسی اشیاء مدفون با استفاده از الگوریتم تطبیق الگو، تشریح گردیده است. از آنجایی که داده‌های واقعی به انواع نوفه‌ها آلوده بوده و به شدت به مورد تحت مطالعه وابسته^{۲۲} می‌باشند، بنابراین لازم است که نگاشت‌های راداری واقعی GPR قبل از ورود به الگوریتم تطبیق الگو مطابق شکل ۷ از یک سری مراحل پیش‌پردازش و پردازشی عبور کنند. به هر جهت ممکن است انجام تمام مراحل پیش‌پردازش ذکر شده در شکل ۷ برای تمام نگاشت‌های راداری واقعی GPR ضرورت نداشته باشد. جهت اجرای الگوریتم تطبیق الگو لازم است ابتدا الگوی مناسب مورد نیاز ایجاد شود که برای این منظور الگو به صورت مصنوعی تهیه می‌شود. از آنجایی که پاسخ GPR اهداف زیرسطحی در نگاشت‌های راداری، «وابسته به مقیاس»^{۲۳} یا به عبارت دیگر تابع ابعاد هدف زیرسطحی است بنابراین ایجاد الگو، بطور مصنوعی و براساس طول موج پاسخ هدلولی شکل هدف در نگاشت راداری صورت می‌گیرد تا تناسب لازم بین الگو و پاسخ هدف، ایجاد شده و الگوریتم قادر به شناسایی پاسخ هدلولی شکل هدف در تصویر GPR باشد.

تهیه تعداد الگوهای مصنوعی به تنوع اهداف استوانه‌ای مدفون در تصاویر واقعی GPR ارتباط دارد یعنی اگر یک تصویر GPR حاوی پاسخ چند هدف مدفون با مشخصات هندسی (قطر و عمق دفن) مختلف باشد جهت شناسایی پاسخ این اهداف در

تصویر GPR لازم است که مجموعه‌ای از الگوهای با ابعاد مختلف مورد نظر، تهیه و سپس الگوریتم برای شناسایی پاسخ متناسب با ابعاد مورد نظر به اجرا درآید.

هدف اصلی از انجام بررسی‌های ژئوفیزیکی به روش GPR در این مطالعه موردی، شناسایی و تعیین محل قنات‌های مدفون در محدوده دشت شاهین شهر واقع در استان اصفهان می‌باشد. برای انجام عملیات برداشت اهداف مورد مطالعه از یک سیستم GPR با فرکانس مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز مجهز به آنتن‌های پوشش‌دار^{۲۴} و از روش پروفیل‌زنی بازتابی فاصله ثابت تک‌حالت استفاده شد. در حالت ایده آل (محیط زمین‌شناسی معمولی بدون حضور مواد هادی الکتریکی) سیستم GPR مجهز به آنتن با فرکانس مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز، دارای تفکیک‌پذیری در حدود ۱۰ سانتی‌متر و حداکثر میزان عمق نفوذ، در حدود ۱۰ متر می‌باشد [۲۳] و در مورد محیط‌های زمین‌شناسی متداول، دارای میزان تفکیک‌پذیری در حدود ۳۰ سانتی‌متر و حداکثر عمق تجسس در حدود ۸ متر است [۲۴].

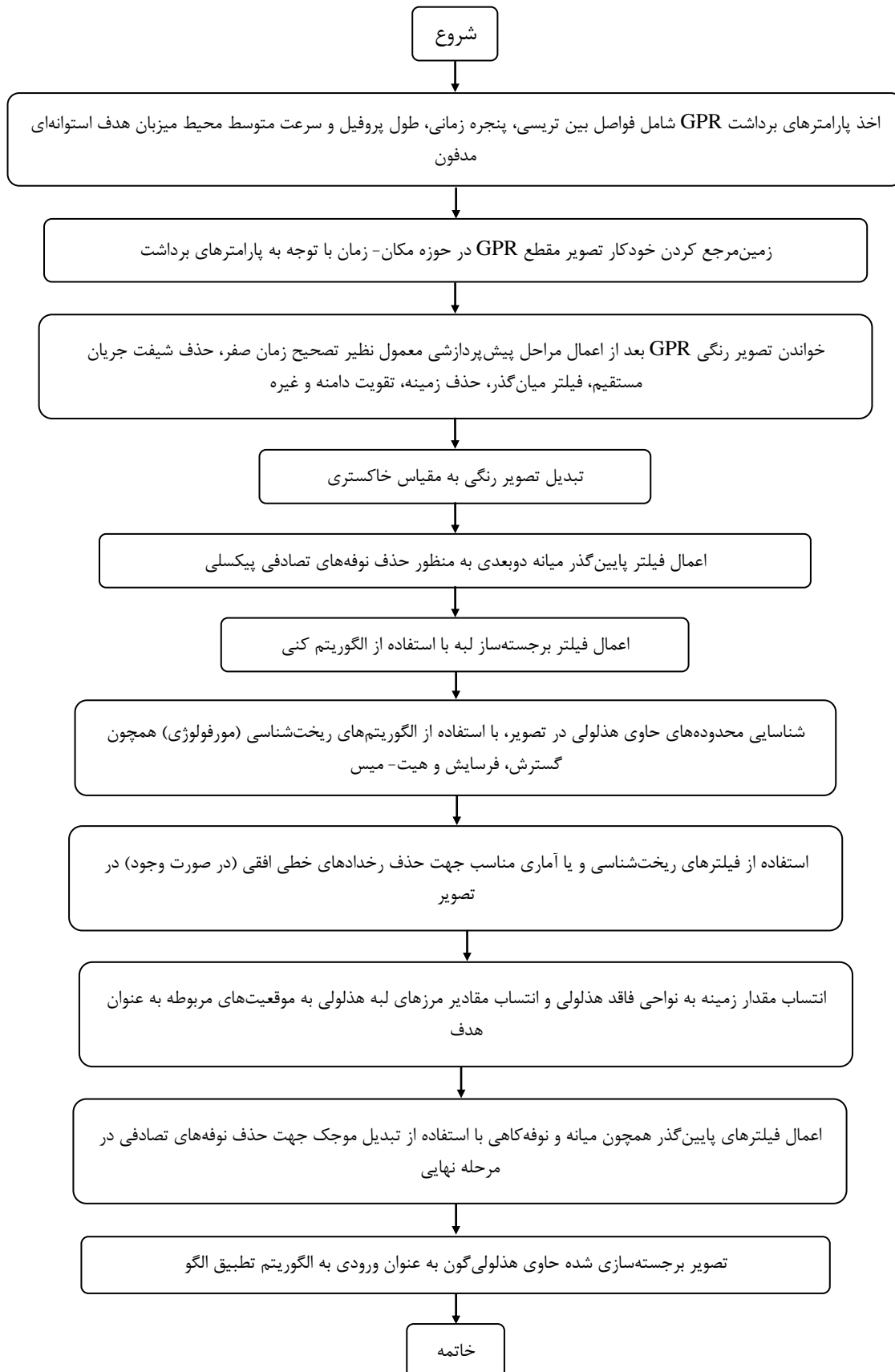
برای آشکارسازی قنات‌های احتمالی مدفون در محدوده مورد مطالعه، برداشت‌های GPR از طریق یک شبکه برداشت متعام مربعی با فواصل پروفیلی ۵ متر در دو راستای شمالی-جنوبی و شرقی-غربی در سطح یک محدوده مربعی به ابعاد ۵۰×۵۰ متر انجام گرفت.

میزان سرعت سیر امواج EM در سازندهای آبرفتی محیط از طریق مشخصات فیزیکی آنها همچون دانه‌بندی، درصد رطوبت و میزان رس محیط، معادل ۰/۱۲ m/ns منظور شد. در تمام مراحل برداشت، با استفاده از امکانات دستگاه برداشت و براساس وضعیت محدوده مورد مطالعه، تمام پارامترهای برداشت از جمله فواصل بین تریسی (فاصله ایستگاهی)، پنجره زمانی (عمق تجسس) و فاصله نمونه‌برداری زمانی (فرکانس

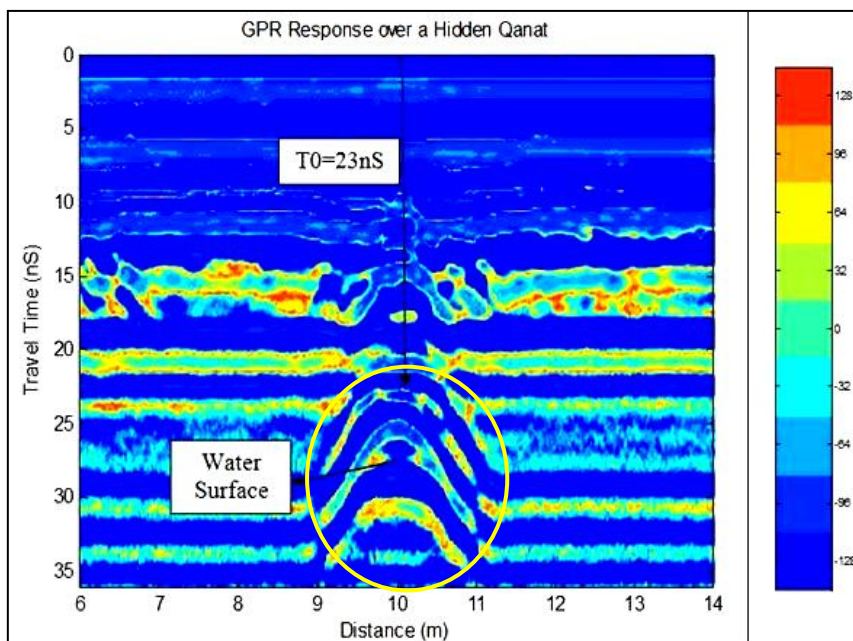
نمونه‌برداری)، به‌طور بهینه انتخاب و تنظیم شدند. گفتنی است برای دستیابی به بهترین پاسخ، بعضاً یک پروفیل با چند فاصله بین تریسی، پنجره زمانی و فرکانس نمونه برداری مختلف، با روش سعی و خطا برداشت شد. فواصل بین تریسی در بازه بین ۱ تا ۵ سانتیمتر (اغلب ۲ سانتی‌متر) انتخاب شدند. پنجره زمانی با فرض واقع بودن قنات در بازه عمقی بین یک تا پنج متر (که معمولاً چنین است) و براساس رابطه بین زمان رسید دوطرفه موج، عمق و سرعت سیر موج EM در دستگاه، تنظیم شد.

جهت پیش‌پردازش، تجزیه و تحلیل و تفسیر داده‌های GPR (نگاشت‌های راداری)، از نرم‌افزارهای Ground Vision و Radexplorer [۲۳] استفاده شد. به عنوان نمونه نگاشت راداری پیش‌پردازش شده بخشی از مقطع منطبق بر پروفیل میانی برداشت شده در راستای شمال- جنوب عمود بر امتداد تخمینی قنات در شکل ۸ نمایش داده شده است. مهم‌ترین

عملیات پیش‌پردازشی اعمال شده بر روی داده‌ها جهت ارائه مقطع نهایی برای ورود به الگوریتم تطبیق الگو، شامل تصحیح زمان صفر^{۲۵}، اعمال فیلتر دی‌وای^{۲۶} (حذف روند فرکانس خیلی پایین از داده‌ها)، حذف شیفت جریان مستقیم^{۲۷}، فیلتر میان‌گذر باترورث^{۲۸} حذف متوسط^{۲۹}، حذف زمینه^{۳۰} و انواع تقویت^{۳۱} دامنه امواج بازگشتی با عمق می‌باشد. همان‌گونه که از این شکل مشاهده می‌شود، موقعیت قنات مدفون نیمه پر از آب شیرین (به دلیل معکوس شدن پلاریته سیگنال بازتابی در موقعیت سطح آب و وجود بازتابهایی در زیر سطح آب)، در نیمه پایینی تصویر، بصورت هذلولی‌های متقارن به‌خوبی قابل شناسایی می‌باشد. جهت استخراج پارامترهای هندسی قنات مدفون، نیاز به آماده‌سازی مقطع پیش‌پردازش شده و اعمال مراحل پردازشی پیشرفته‌تر جهت ورود به الگوریتم تطبیق الگو می‌باشد.



شکل ۷: مراحل پیش پردازش و پردازشی مقاطع GPR واقعی جهت ورود به الگوریتم تطبیق الگو.



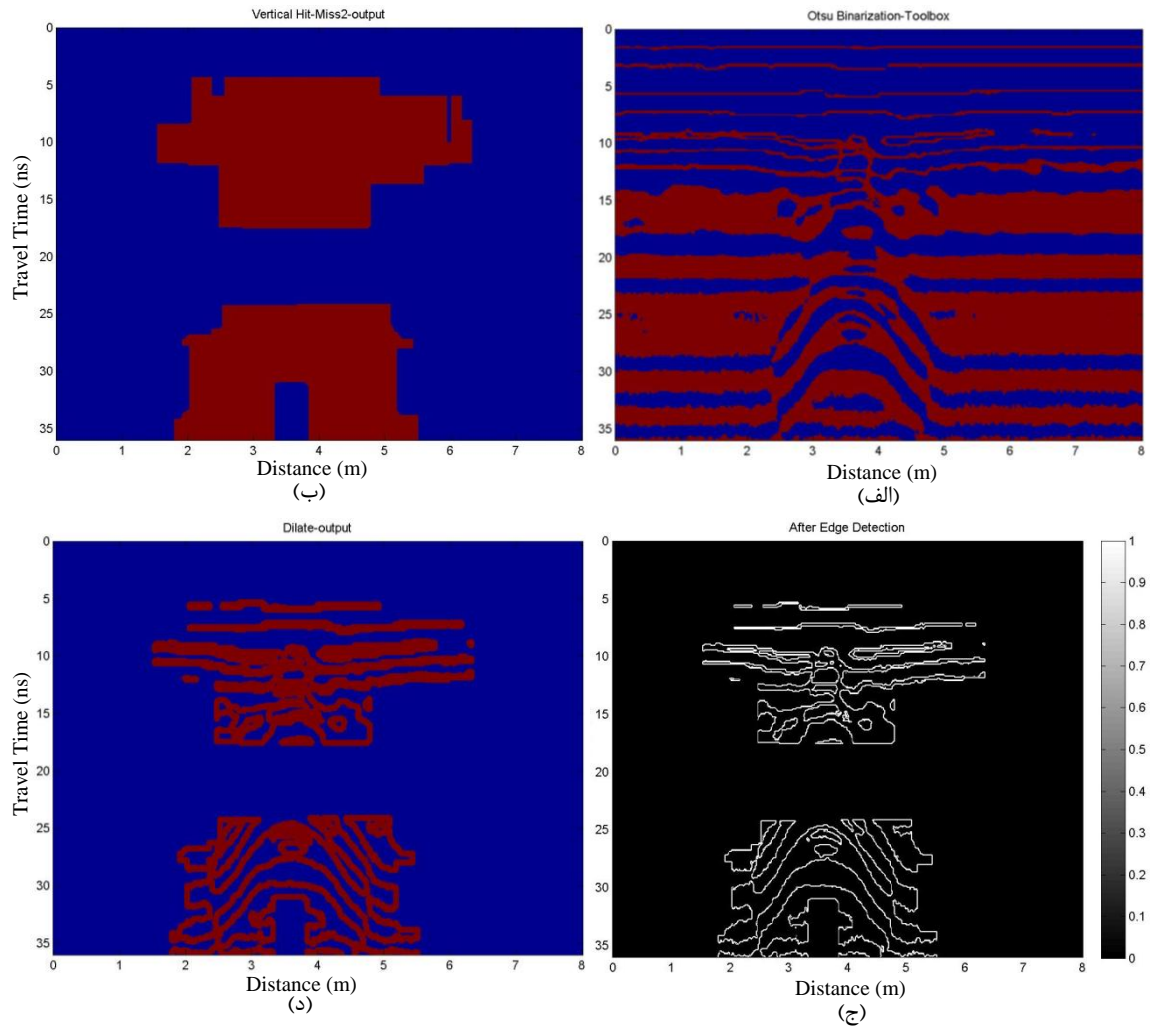
شکل ۸: آشکارسازی و شناسایی قنات نیمه پر از آب شیرین در دشت شاهین‌شهر در نیمه پایینی تصویر (بیضی زرد رنگ). راهنمای رنگی نشان دهنده سطح مقیاس رنگی معرف شدت دامنه بازتاب می‌باشد.

الگوریتم حداقل مربعات خطا، بر پاسخ هدف (قنات) آشکار شده از طریق الگوریتم تطبیق الگو (ه)، نشان داده شده است.

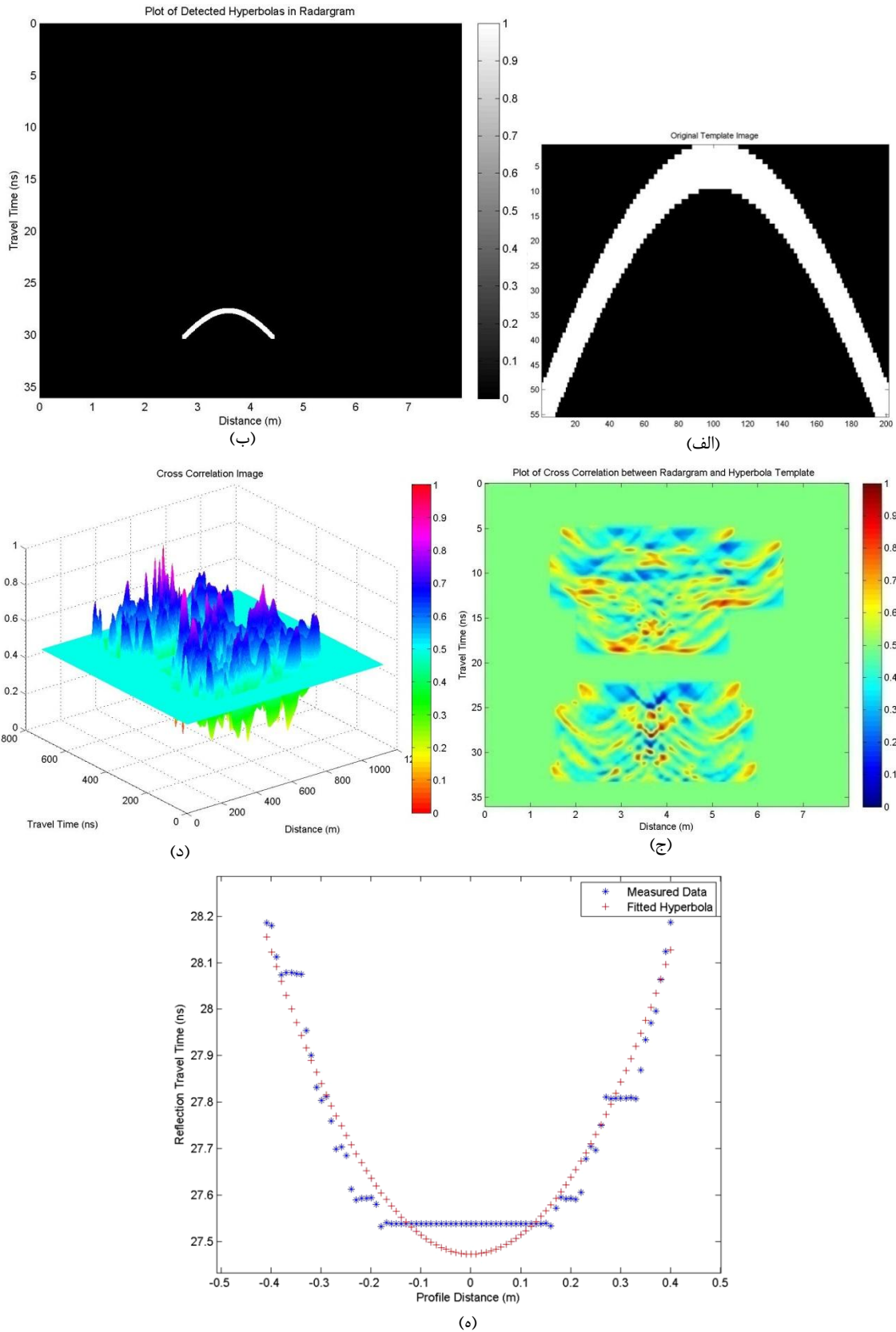
بعد از آشکارسازی قنات، از طریق حفر ترانشه در موقعیت مناسب (منطبق بر پروفیل میانی برداشت GPR در راستای شمال- جنوب) در راستای عمود بر امتداد قنات، عمق دفن و شعاع واقعی آن نیز به ترتیب $1/6$ متر و $0/6$ متر اندازه‌گیری شد.

مراحل پردازشی اعمال شده بر روی نگاشت راداری پیش- پردازش شده شکل ۸ در شکل ۹ نشان داده شده است. در شکل ۹ (الف) مقطع پیش‌پردازش شده، با روش اتسو^{۳۳} [۲۵] به صورت باینری درآمده است. تصویر پردازش شده این مقطع بعد از اعمال فیلتر ریخت‌شناسی هیت-میس^{۳۳} [۲۶] در شکل ۹ (ب) نشان داده شده است. با اعمال فیلتر کنی^{۳۴} به منظور تشخیص لبه‌ها تصویر شکل ۹ (ج) حاصل شد. آخرین مرحله پردازش، اعمال فیلتر ریخت‌شناسی گسترش^{۳۵} [۲۶] بوده و نتیجه آن نیز تصویر نهایی شکل ۹ (د) است که وارد الگوریتم تطبیق الگو گردید.

در شکل ۱۰ به ترتیب تصویر الگوی انتخاب شده (الف)، موقعیت هذلولی آشکار شده بر روی تصویر نگاشت راداری توسط تطبیق الگو (ب)، نقشه دوبردی میزان همبستگی متقابل بین تصویر الگو و نگاشت راداری (ج)، نقشه سه‌بعدی میزان همبستگی متقابل بین تصویر الگو و نگاشت راداری (د) و نمودار هذلولی محاسباتی برازش یافته بر پاسخ هدف استوانه‌ای شکل، از طریق



شکل ۹: (الف) تصویر باینری شده شکل ۸ به روش اتسو، (ب) نگاشت راداری شکل (الف) بعد از اعمال فیلتر ریخت‌شناسی هیت-میس، (ج) نگاشت راداری شکل (ب) بعد از اعمال فیلتر تشخیص لبه، (د) تصویر نهایی بعد از اعمال فیلتر ریخت‌شناسی گسترش.



شکل ۱۰: الف) تصویر الگوی انتخاب شده، ب) موقعیت هذلولی آشکار شده در نگاشت راداری، ج) نقشه میزان همبستگی متقابل بین تصویر الگو و نگاشت راداری، د) نقشه سه‌بعدی میزان همبستگی متقابل بین تصویر الگو و نگاشت راداری، ه) نمودار هذلولی برازش یافته بر پاسخ هدف. راهنمای رنگی تصاویر (ج) و (د) معرف میزان همبستگی متقابل بین تصویر الگو و نگاشت راداری است.

توجه به حضور انواع نوفه‌ها در داده‌های واقعی، نتایج بسیار مطلوبی به حساب می‌آیند. معیار خطا در این مورد نیز مطابق رابطه (۷) می‌باشد. الگوریتم پیشنهادی به گونه‌ای طراحی شده است که کلیه مراحل شناسایی و تخمین پارامترهای هندسی اشیاء مدفون به‌طور خودکار و با حداقل دخالت کاربر تخمین زده می‌شود.

مشخصات هندسی واقعی این قنات با مقادیر برآورد شده توسط روش تطبیق الگو در جدول ۳ مقایسه شده و میزان درصد خطای مربوطه نیز محاسبه گردیده است. سرعت سیر امواج EM در محیط نیز ۰/۱۱ متر بر نانو ثانیه محاسبه شده است. داده‌های این جدول نشان می‌دهند که خطای برآورد مقادیر پارامترهای هندسی شعاع و عمق دفن قنات توسط روش تطبیق الگو به ترتیب حدود ۱۸/۳ و ۶/۲۵ درصد بوده که با

جدول ۳. مقایسه مقادیر پارامترهای هندسی اندازه‌گیری شده قنات با مقادیر تخمینی توسط روش تطبیق الگو و محاسبه میزان درصد خطای مربوطه.

مشخصات هندسی هدف روش تخمین	شعاع واقعی (متر)	شعاع تخمینی (متر)	خطای شعاع (درصد)	عمق دفن واقعی (متر)	عمق دفن تخمینی (متر)	خطای عمق دفن (درصد)	موقعیت واقعی (متر)	موقعیت افقی تخمینی (متر)	خطای موقعیت افقی (درصد)
تطبیق الگو	۰/۶۰	۰/۷۱	۱۸/۳	۱/۶	۱/۵	۶/۲۵	۳/۶	۳/۵	۲/۹

۵- نتیجه‌گیری

می‌رساند. براساس نتایج به‌دست آمده، روش پیشنهادی تطبیق الگو قادر به تشخیص پاسخ‌های GPR اهداف استوانه‌ای مدفون بوده و برای شناسایی ویژگی‌های هندسی این اهداف و نیز تخمین سرعت سیر متوسط امواج EM در محیط‌های در برگیرنده این اهداف، از قدرت پیش‌بینی خوب و سریع برخوردار است.

برای تعیین تعداد هذلولی‌های آشکار شده در تصاویر واقعی GPR، به‌منظور تعیین مشخصات هندسی اهداف استوانه‌ای مدفون با استفاده از روش تطبیق الگو، نیاز به تنظیم یک حد آستانه برای مقدار ضریب همبستگی متقابل است. همچنین برای برازش بهترین هذلولی با استفاده از الگوریتم حداقل مربعات خطا، بر هذلولی‌های آشکار شده از طریق مقدار آستانه ضریب همبستگی متقابل، جهت تعیین پهنای هذلولی آشکار شده، نیاز به تعریف یک حد آستانه براساس سطح روشنایی سلول‌ها می‌باشد که در پژوهش حاضر، این موارد به‌طور تجربی و براساس آزمون و خطا صورت گرفت. پیشنهاد می‌شود که به‌منظور ادامه مطالعات در آینده و بهبود نتایج به‌دست آمده از پژوهش، این فرآیند نیز از طریق اجرای یک الگوریتم انتخاب آستانه بهینه خودکار صورت گیرد. همچنین به‌منظور خودکار نمودن هر چه بیشتر فرایند تخمین پارامترهای هندسی و فیزیکی اشیاء مدفون، از الگوریتم‌های مبتنی بر تبدیل ویژگی مستقل از ابعاد در تشخیص الگو، استفاده شود.

در پژوهش حاضر روش تطبیق الگو هم برای تصاویر مصنوعی و هم برای تصاویر واقعی GPR در حضور نوفه‌ها مورد استفاده قرار گرفت که نتایج فعالیت‌های پژوهشی انجام شده را می‌توان به این صورت خلاصه نمود. مهم‌ترین نقاط قوت و جنبه‌های نوآوری بکارگیری الگوریتم تطبیق الگوی بهینه در این پژوهش شامل اعمال مراحل پیش‌پردازش و پردازشی خودکار برای حذف نوفه‌ها از تصویر GPR به‌منظور آماده‌سازی آن جهت ورود به الگوریتم تطبیق الگو، سرعت بالای الگوریتم در تعیین میزان همبستگی متقابل بین تصویر الگو و تصویر نگاشت راداری از طریق بکارگیری دو روش تعیین میزان شباهت مختلف، قابلیت آشکارسازی هر تعداد هذلولی موجود در تصویر GPR، تعیین مشخصات هندسی (شعاع، عمق دفن و موقعیت افقی) اهداف استوانه‌ای افقی مدفون زیرسطحی و سرعت سیر امواج EM در محیط میزبان اهداف با استفاده از اعمال یک الگوریتم غیرخطی از طریق برازش یک تابع هذلولی توسط الگوریتم حداقل مربعات خطا، بر هذلولی‌های (پاسخ اهداف استوانه‌ای افقی) آشکار شده از طریق الگوریتم تطبیق الگو می‌باشند.

نتایج بررسی برای مدل‌های مصنوعی نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی توانسته پارامترهای هندسی اشیاء مدفون را با دقت مطلوبی (حداکثر خطای ۱۵ درصد) تخمین بزند. علاوه بر آن، نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی بر روی داده‌های واقعی دشت شاهین شهر اصفهان، دقت نسبتاً خوب روش مورد نظر را در استخراج پارامترهای هندسی قنات مدفون، به اثبات

۶- مراجع

- penetrating radar for locating buried impediments to geotechnical exploration and piling*”, Journal of Applied Geophysics, 7 (4), pp. 374-387.
- [8] Maas, C., and Schmalzl, J. (2013), “Using pattern recognition to automatically localize reflection hyperbolas in data from ground penetrating radar”, Computers & Geosciences, 58, pp 116-125.
- [9] Núñez-Nieto, X., Solla, M., Gómez-Pérez, P., and Lorenzo, H. (2014), “GPR signal characterization for automated landmine and UXO detection based on machine learning techniques”, Remote Sensing, 6, pp 9729-9748.
- [10] Qiao, L., Qin, Y., Ren, X., and Wang, Q. (2015), “Identification of buried objects in GPR using amplitude modulated signals extracted from multiresolution monogenic signal analysis”, Sensors, 15, pp 30340–30350.
- [11] Diamanti, N., Giannopoulos, A., and Forde, M.C. (2008), “Numerical modelling and experimental verification of GPR to investigate ring separation in brick masonry arch bridges”, NDT&E International, 41, pp 354–363.
- [12] www.tstengineering.com/en/ground-penetrating-radar
- [13] Bourgeois, J.M., and Smith, G.S., (1996), “A fully three-dimensional simulation of a ground-penetrating radar: FDTD theory compared with experiment”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 34
- [22] Lewis, J.P. (1995), “Fast Normalized Cross-Correlation”, Vision Interface, pp 120-123.
- [23] www.malags.com
- [24] Annan, A.P. (2001), “Ground-penetrating radar workshop notes”, Sensors and Software Inc. Mississauga, ON, Canada.
- [25] Otsu, N. (1979), “A threshold selection method from gray-level histograms”, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 9(1), pp. 62-66.
- [26] Gonzalez, R.C., and Woods, R.E. (2001), “Digital image processing”, second edition, Prentice-Hall, Inc.
- [1] Annan, A.P. (2003), “GPR for infrastructure imaging”, International Symposium (NDT-CE 2003), Non-Destructive Testing in Civil Engineering.
- [2] Capineri, L., Grande, P., and Temple, J.A.G. (1998), “Advanced image-processing technique for real-time interpretation of ground-penetrating radar images”, International Journal of Imaging System Technology, 9(1), pp 51–59.
- [3] Strange, A., Chandran, V., and Ralston, J. (2002), “Signal processing to improve target detection using Ground Penetrating Radar”, Fourth Australasian Workshop on Signal Processing and Applications (WOSPA), Brisbane, Australia.
- [4] Gamba, P., and Belotti, V. (2003), “Two fast buried pipe detection schemes in ground penetrating radar images”, International Journal of Remote Sensing”, 24(12), pp 2467–2484.
- [5] Sezgin, M., Kurugöllü, F., Taşdelen, İ., and Öztürk, S. (2004), “Real time detection of buried objects by using GPR”. SPIE Defense and Security Symposium, 12-16 April, Orlando, USA.
- [6] Cui, Y., Wang, L., and Xiao, J. (2010), “Automatic Feature Recognition for GPR Image Processing”, World Academy of Science, Engineering and Technology, 61, pp 176-179.
- [7] Hebsur, A. V., Muniappan, N., Rao, E. P. and Venkatachalam, G., (2013), “Application of ground (1), pp 36–44.
- [14] Cassidy, N.J. (2001), “The application of mathematical modelling in the interpretation of Ground Penetrating Radar data”, Ph.D. Thesis, Keele University.
- [15] Giannopoulos, A., 2005, “Modelling ground penetrating radar by GprMax”, Construction and Building Materials, 19, pp 755-762.
- [16] Irving, J., and Knight, R. (2006), “Numerical modeling of ground penetrating radar in 2-D using MATLAB”, Computers & Geosciences, Vol 32, pp 1247–1258.
- [17] Bergmann, T., Robertsson, J.O.A., and Holliger, K. (1996), “Numerical properties of staggered finite-difference solutions of Maxwell’s equations for ground-penetrating radar modeling”, Geophysical Research Letters, 23(1), pp 45-48.
- [18] Ahmadi, R., Fathianpour, N., and Norouzi, G.H. (2013), “Improving Ground Penetrating Radar (GPR) forward modeling approach using the numerical finite difference method”. Iranian Journal of Geophysics, 8(3), pp 114-130.
- [19] Shihab, S., and AL-Nuaimy, W. (2005), “Radius estimation for cylindrical objects detected by Ground Penetrating Radar”, Subsurface sensing technologies and applications, vol. 6, pp 151-166.
- [20] Russ, J.C. (2007), “The image processing Handbook”, Taylor & Francis, Fifth edition, 836 pages.
- [21] Duda, R.O., and Hart, P.E. (1973), “Pattern classification and scene analysis”, New York: Wiley.

-
- ¹ Ground-Penetrating Radar
 - ² Low-loss
 - ³ Electromagnetic
 - ⁴ Trace
 - ⁵ Cavity
 - ⁶ Pattern recognition
 - ⁷ Operator
 - ⁸ Support Vector Machine
 - ⁹ Clutter
 - ¹⁰ Multiresolution Monogenic Signal Analysis
 - ¹¹ Radargram
 - ¹² Ray Tracing
 - ¹³ Discrete Elements
 - ¹⁴ Perfectly Electrical Conductive
 - ¹⁵ Similarity
 - ¹⁶ Prototype
 - ¹⁷ Cross correlation
 - ¹⁸ Machine learning
 - ¹⁹ Fast template matching
 - ²⁰ Constrained optimization
 - ²¹ Levenberg-Marquardt
 - ²² Case-dependent
 - ²³ Scale-dependent
 - ²⁴ Shielded
 - ²⁵ Time zero correction
 - ²⁶ Dewowing
 - ²⁷ Dc shift removal
 - ²⁸ Butterworth
 - ²⁹ Subtract mean
 - ³⁰ Background removal
 - ³¹ Gain
 - ³² Otsu
 - ³³ Hit-Miss
 - ³⁴ Canny
 - ³⁵ Dilation