

تضعیف نوفه تصادفی GPR توسط فیلتر ساویتزکی گولای در فضای موجک مختلط دوشاخه‌ای

صادق مقدم^۱، علیرضا گودرزی^{۲*}، بهروز اسکویی^۳ و اصغر آزادی^۴

۱- دانشجوی دکتری، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

۲- دانشیار، دانشکده علوم و فناوری نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته

۳- دانشیار، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

۴- استادیار، دانشگاه پیام‌نور، واحد پرند

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۰۳؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۲

* نویسنده مسئول مکاتبات: agholami@ut.ac.ir

واژگان کلیدی

چکیده

داده‌های برداشت‌شده در روش رادار نفوذی به زمین (GPR) همانند سایر روش‌های ژئوفیزیکی همواره شامل انرژی‌های ناخواسته یا نوفه هستند. تضعیف نوفه یکی از مراحل مهم در پردازش داده‌های ژئوفیزیکی قبل از انجام تفسیر است. تاکنون روش‌های گوناگونی برای تضعیف نوفه‌های گوسی داده‌های روش GPR ارائه شده است که هرکدام محدودیت‌ها و برتری‌های مربوط به خود را دارند. در این پژوهش، برای اولین بار روش‌های تجزیه زمان - فرکانس در پیاده‌سازی الگوریتمی بهینه برای تضعیف نوفه‌های گوسی و غیرگوسی توسط روش موجک مختلط دوشاخه‌ای (DTCWT) و فیلتر حوزه زمان ساویتزکی گولای (SG)، بر روی داده‌های GPR بررسی شده است. نتایج حاصل از داده‌های مصنوعی در حضور نوفه گوسی، حاکی از ضعف عملکرد روش‌های آستانه‌گیری نرم و گاروت غیرمنفی در حوزه DTCWT می‌باشد، به نحوی که سیر نزولی و میرای طیف فرکانسی روش‌های آستانه‌گیر، حاکی از دست‌رفتن سیگنال در بازه فرکانس‌های بالا است، به نحوی که با تضعیف نوفه، سیگنال نیز از دست می‌رود. از سوی دیگر اعمال روش SG منجر به عدم بازگردانی شکل اصلی سیگنال در داده‌های مصنوعی و حقیقی روش GPR شده است. به‌منظور بررسی بیشتر، فیلتر SG با همان پارامترهای حوزه DTCWT در حضور نوفه گوسی و غیرگوسی بر روی داده‌های مصنوعی و حقیقی GPR اعمال گردید. الگوریتم طراحی شده SG-DTCWT نتایج قابل‌اعتمادتری را در ارتباط با قدرت حفظ سیگنال و تضعیف نوفه ارائه داده است. با توجه به اینکه نوفه‌های تصادفی در داده‌های GPR از توزیع گوسی تبعیت نمی‌کنند، الگوریتم مطرح‌شده می‌تواند یک روش قابل اعتماد در تضعیف نوفه داده‌های GPR باشد.

رادار نفوذی به زمین
حوزه موجک مختلط
فیلتر ساویتزکی گولای
تضعیف نوفه
حفظ سیگنال

۱- مقدمه

دامنه کاربردهای نزدیک به سطح روش رادار نفوذی به زمین (GPR) با توجه به عمق نفوذ کم که عمدتاً در زیرمجموعه تست‌های غیرمخرب طبقه‌بندی می‌شود، بسیار گسترده است که به عنوان مثال می‌توان به تحقیقاتی نظیر آشکارسازی تأسیسات زیرسطحی (Ishitsuka et al., 2018)، مطالعات آب‌های زیرزمینی کم‌عمق (Saintenoy and Hopmans, 2011)، رسوب‌شناسی (Lejzerowicz et al., 2018)، کنترل کیفیت جاده‌ها (Fernandes and Pais, 2017)، زمین‌شناسی (Bednarczyk and Szynekiewicz, 2015)، کنترل بتن و دیوارها (Jiao et al., 2020)، نظارت بر راه‌آهن (Fontul et al., 2016) و پل‌سازی (Ata et al., 2017) اشاره نمود. در سال‌های اخیر، استفاده از این روش در ایران به دلیل توان بالای تفکیک و سرعت بالا در برداشت داده‌ها، همچون سایر روش‌های ژئوفیزیکی مورد توجه قرار گرفته است. کامکار روحانی و همکاران (۱۳۹۱) به منظور شناسایی حفره‌های زیرسطحی و بررسی لایه‌بندی، دانه‌بندی و برآورد میزان رس و رسوبات زیرسطحی کم‌عمق از روش GPR استفاده کرده‌اند (کامکار روحانی و همکاران، ۱۳۹۱)؛ نتایج حاصل از تحقیقات آن‌ها مؤید قدرت بالای روش GPR در شناسایی اهدافی مانند حفره‌های زیرسطحی، تفکیک رسوبات زیرسطحی درشت‌دانه از ریزدانه و میزان رطوبت لایه‌های متفاوت زیرسطحی می‌باشد. موارد متعدد دیگری شامل آشکارسازی قنات (قنبری و حفیظی، ۱۳۹۵)، آشکارسازی شکستگی‌ها و تاق‌دیس‌های نزدیک سطح (اویسی‌موخر، ۱۳۸۶)، آشکارسازی لوله‌های مدفون زیرسطحی (محمدی-ویژه، ۱۳۸۷) و تعیین ضخامت آسفالت (مزیانی، ۱۳۸۹) را می‌توان به عنوان نتایج موفق استفاده از روش GPR در ایران و گسترش روزافزون کاربردهای آن در کشور نام برد. در این روش ژئوفیزیکی، یک پالس الکترومغناطیسی در حد نانوثانیه به زیر زمین ارسال می‌شود؛ دامنه و زمان رسید سیگنال بازگشتی که وابسته به پارامترهای الکترومغناطیسی (ثابت دی‌الکتریک، تراوایی مغناطیسی و رسانندگی الکتریکی) است، برای به‌دست‌آوردن اطلاعات از زیرسطح زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد.

پهنای وسیع باند مورد استفاده در سیستم GPR، موجب تداخل سیگنال‌های دریافتی این روش با نوفه‌های محیطی وابسته به منابع مختلف نظیر خطوط تلفن، امواج رادیویی و غیره می‌شود. وجود نوفه در برداشت‌های ژئوفیزیکی و مخصوصاً روش GPR به علت استفاده از امواج فرکانس بالا، عامل مهمی در تخریب داده‌های برداشت شده و در پی آن، اطلاعات همراه از داخل زمین است. نوفه مورد مطالعه در این تحقیق، نوفه تصادفی است که پدیده‌ای رایج در داده‌برداری بوده و میزان آن در هر اندازه‌گیری، متفاوت و غیرقابل پیش‌بینی می‌باشد. هدف از تضعیف نوفه تصادفی به‌گونه‌ای است که بدون ایجاد رخداد مصنوعی، پیوستگی رخدادهای همدوس افزایش یابد. نوفه‌های تصادفی برای تمام نگاشت‌ها متفاوت بوده و طرح اصولی خاصی را نشان نمی‌دهند و ممکن است

هم‌زمان از منابع نامشخصی ناشی شوند. از سوی دیگر، این نوفه‌ها بر روی ردهای مختلف (trace) غیرمشابه هستند و از اطلاعات نگاشت‌های مجاور نمی‌توان وضع یک نگاشت خاص را پیش‌بینی کرد (ابراهیمی برادر و همکاران، ۱۳۹۷).

به علت شباهت‌هایی که میان انتشار امواج الکترومغناطیس و امواج لرزه‌ای وجود دارد، نوفه‌های اتفاقی داده‌های GPR و داده‌های لرزه‌ای را می‌توان از لحاظ آماری شبیه دانست و پردازش‌های تضعیف نوفه که برای داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد را برای داده‌های GPR نیز استفاده نمود (Oskooi et al., 2018). البته مسئله‌ای نیز که سبب تفاوت قابل توجه سیگنال‌ها در دو روش مذکور می‌شود، میرایی سیگنال GPR در عبور از ساختارهای رسانا است؛ این مسئله بایستی در استفاده مستقیم روش‌های پردازش لرزه‌ای در روش GPR به خوبی مدنظر قرار گیرد. به عنوان مثال روش واهمامیخت (Deconvolution) به عنوان روش پردازشی کلیدی در داده‌های لرزه‌ای به شمار می‌آید (Yilmaz, 2001). با این وجود استفاده از این روش در روش GPR به دلیل تغییر ماهیت موجک ورودی به زمین توسط جفت‌شدگی الکترومغناطیسی زمین-آنتن و ماهیت واپاشندگی و جذب انرژی توسط زمین، شرایط محدودتری را به همراه خواهد داشت (Schmelzbach and Huber, 2015).

اکثر سیگنال‌های مورد استفاده در علم ژئوفیزیک همچون سیگنال‌های روش GPR، در حوزه زمان هستند. به طور معمول این نحوه نمایش بهترین شکل توصیف یک سیگنال نبوده و از سوی دیگر، اطلاعات سودمند سیگنال‌های روش GPR در محتوای فرکانسی آن نهفته است. سیگنال‌های GPR از نوع ناپایا با زمان هستند، بدین معنی که محتوای فرکانسی آنها با زمان تغییر می‌یابد. بنابراین تبدیل فوریه مرسوم هیچ اطلاعاتی در مورد بازه زمانی متناظر با پدیداری آن فرکانس در سیگنال، در دسترس قرار نمی‌دهد. در تبدیل فوریه زمان-کوتاه (STFT) نیز که به نوعی تبدیل زمان-فرکانس می‌باشد، سیگنال به بخش‌های به حدکافی کوچک تقسیم می‌شود، به نحوی که بتوان این بخش‌ها را پایا فرض نمود. در این تبدیل، طول پنجره مورد استفاده متناهی بوده و به همین دلیل منجر به کاهش تفکیک‌پذیری فرکانسی سیگنال خواهد شد (Sejdic et al., 2009).

لذا برحسب سیگنال مورد بررسی، نوعی مصالحه بین تفکیک‌پذیری زمانی و فرکانسی برقرار می‌شود، زیرا نمی‌توان هم‌زمان هر دو عامل را بهینه نمود. از این رو با توجه به مشکل تفکیک‌پذیری در تبدیل STFT که ریشه در اصل عدم قطعیت هایزنبرگ دارد، رهیافت آنالیز چند تفکیکی (MRA) که تحلیل سیگنال در فرکانس‌های متفاوت با قابلیت‌های تفکیک‌پذیری مختلف می‌باشد (Mallat, 1999)، می‌تواند در تحلیل سیگنال‌های ناپایا مدنظر قرار گیرد.

تبدیل موجک پیوسته (CWT) به عنوان روشی جایگزین و مکمل بر تبدیل STFT و با هدف جبران نقص‌های مربوط به تفکیک‌پذیری در

نوفه‌زدایی داده‌های GPR حاکی از برتری روش تبدیل موجک با فاکتور کیفیت تنظیم‌پذیر (TQWT) همراه با آستانه‌گیری نرم نسبت به آستانه-گیری سخت و روش زمان-مکان (F-X) خودبازگشتی بوده است. نتایج مطالعات اسکویی و همکاران (۲۰۱۵)، بیانگر اهمیت DTCWT در پردازش داده‌های GPR و تضعیف نوفه‌های تصادفی با توزیع گوسی می‌باشد. با این حال در این تحقیق به بررسی برتری یا عدم برتری روش مذکور نسبت به فیلترهای رایج حوزه زمان پرداخته نشده است. همان‌طور که مبرهن است سیگنال‌های روش GPR به دلیل تغییر محتوای فرکانسی با زمان، ناپایا هستند و ساز و کار تضعیف و واپاشی در آن‌ها تأثیر بسزایی دارد. این مسئله از آنجا ناشی می‌شود که محیط زمین به عنوان یک فیلتر پایین‌گذر، واپاشنده و جاذب انرژی می‌باشد و این پیچیدگی در سیگنال‌های روش GPR با فرکانس بالاتر نسبت به سیگنال‌های روش لرزه‌ای شدیدتر است (Fergusen and Margrave, 2012). همراه با تغییرات سیگنال، نوفه‌ها نیز از محیط میزبان و هوا در گیرنده ثبت می‌شوند؛ حال به دلیل عمق نفوذ پایین امواج الکترومغناطیس در این روش و همچنین ثبت نوفه‌های محیط همراه با موج مستقیم ارسالی از فرستنده در گیرنده، این تغییرات بر روی سیگنال اصلی روش GPR که در واقع هم‌امیخت سری ضرایب بازتاب و موجک فرستنده می‌باشد، اثرگذاری شایان توجهی دارد. بنابراین دامنه امواج فرکانس پایین و همچنین نوفه‌های ثبت‌شده در گیرنده، توسط ضرایب موجک نشان داده می‌شوند. مقادیر این محدوده‌ها ممکن است هم‌پوشانی داشته و صفر کردن این ضرایب برای یک آستانه خاص به هر نحوی، یا به سیگنال آسیب‌زده و یا کیفیت تضعیف نوفه را کاهش می‌دهد که می‌تواند به عنوان ضعف اصلی این حوزه در نظر گرفته شود. از سوی دیگر تبعیت نوفه‌های تصادفی با توزیع احتمال گوسی برای داده‌های ژئوفیزیک دور از واقعیت میدانی است. بنابراین در این تحقیق سه موضوع اصلی مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ در وهله اول باید تعیین شود که برتری ذکرشده حوزه DTCWT می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین پیشرفته برای حوزه زمانی فیلترها عمل کند یا خیر؛ در مرحله دوم، عملکرد دو حوزه در حضور نوفه غیرگوسی برای اولین بار مورد کنکاش قرار گرفته و در نهایت الگوریتمی بهینه به‌منظور تضعیف نوفه سیگنال‌های روش GPR معرفی خواهد شد. تبدیل موجک در این تحقیق بر روی سری زمانی سیگنال GPR اجرا می‌شود؛ به عبارت دیگر سیگنال دریافتی در حوزه زمان بوده و تبدیل موجک براساس اعمال موجک مادر بر روی سری زمانی سیگنال ارائه می‌گردد (گودرزی، ۱۳۹۲). لذا هدف نهایی از این تحقیق ارائه روش نوینی می‌باشد که علاوه بر پوشش و مرتفع‌نمودن کاستی‌های حوزه موجک و حوزه زمان، بتواند عملکرد قابل قبولی در حذف نوفه گوسی و غیرگوسی داده‌های روش GPR داشته باشد. به عبارت دیگر هر روشی که تاکنون در مورد نوفه‌زدایی روش GPR استفاده شده است، مبتنی بر این واقعیت بوده که نوفه‌های داده‌های روش GPR حامل نوفه‌های گوسی بوده است؛ اما به دلیل پیچیدگی محیط زمین، نوفه‌ها کاملاً منطبق بر داده‌های گوسی نمی‌باشند. لذا ارائه روشی در چارچوب حوزه موجک و

تبدیل STFT معرفی شده است. این تبدیل توسط دو پارامتر مقیاس و انتقال کنترل می‌گردد. مفهوم پارامتر انتقال مشابه با انتقال زمانی در تبدیل STFT می‌باشد که اطلاعات زمانی تبدیل را در بر می‌گیرد؛ همچنین پارامتر مقیاس به‌طور معکوس به فرکانس ارتباط می‌یابد. در نهایت ایده تبدیل موجک گسسته (DWT) مشابه با تبدیل CWT است که در آن نوعی توصیف زمان-مقیاس از سیگنال گسسته با استفاده از فیلترهای دیجیتال ارائه می‌شود (Selesnick et al., 2005). انواع مختلف تبدیل‌های موجک با توجه به نوع موجک (ریکر، دابشیز و ...)، قاب موجک (یک شاخه مانند DWT و چندشاخه مانند DTCWT) و فیلتر بانک‌های موجک (طراحی فیلتر و ابزاری که به منظور تجزیه و تحلیل سیگنال‌ها در قاب موجک قرار می‌گیرند)، طبقه‌بندی می‌شوند (گودرزی، ۱۳۹۲).

تبدیلات موجک بطور گسترده در علوم مختلفی شامل حذف نوفه تصاویر پزشکی (Liu et al., 2007)، فشرده‌سازی (Lamard et al., 2005) و بهبود تفکیک-پذیری تصاویر ماهواره‌ای (Demirel and Anbarjafari, 2010) کاربرد دارد. روش‌های گوناگونی برای تضعیف نوفه‌های داده‌های روش ژئوفیزیکی GPR در حوزه موجک ارائه شده است. (Baili et al., 2009) با استفاده از تبدیل DWT به حذف نوفه داده‌های GPR بر روی سنگ‌فرش یک خیابان پرداختند و عملکرد روش تبدیل موجک را با موجک‌های مادر مختلف و روش‌های آستانه‌گیری نرم و سخت توسط دو فاکتور نسبت سیگنال به نوفه (SNR) و ریشه جذر میانگین مربعی (NRMSE) ارزیابی نمودند. نتایج این تحقیق بیانگر برتری عملکرد تبدیل موجک، توسط موجک‌های مادر مختلف، نسبت به فیلترهای رایج حوزه فرکانس برای حذف نوفه‌های داده‌های روش GPR بوده است.

(Zou and Yang, 2009) روش‌های آستانه‌گیری نرم و سخت را در روش DWT به منظور کاهش نوفه‌های روش GPR مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعات بیانگر افزایش نسبت SNR روش آستانه‌گیری نرم نسبت به آستانه‌گیری سخت در تضعیف نوفه‌های روش مذکور بوده است. (Yang, 2013) از تبدیل DWT و الگوریتم پیگیری تطبیقی برای آنالیز داده‌های GPR و تعیین نوع، مکان و جنس لوله‌های مختلف استفاده کرد. ایده استفاده از روش تبدیل DTCWT در حذف نوفه‌های روش GPR، توسط (Julayusefi et al., 2012) شکل گرفت.

پس از اعتبارسنجی عملکرد روش فوق بر روی داده‌های روش GPR، اسکویی و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از روش‌های آستانه‌گیری سخت، نرم، نیمه‌نرم و گاروت غیرمنفی در حوزه تبدیل DTCWT، به حذف نوفه گوسی داده‌های مصنوعی و حقیقی GPR پرداختند (Oskooi et al., 2015). نتایج این پژوهش حاکی از برتری روش فوق در مقایسه با روش تبدیل استاندارد DWT توسط روش‌های مختلف آستانه‌گیری بوده است. علاوه بر این، روش DTCWT با استفاده از آستانه‌گیری گاروت غیرمنفی، به‌عنوان روشی مفید در تضعیف نوفه‌های تصادفی داده‌های روش GPR معرفی شده است. نتایج مطالعات (Ebrahimi bardar et al., 2019)

زمان که انطباق بیشتری با داده‌های واقعی روش GPR داشته باشد و اثر بیشتری در حفظ شکل اصلی سیگنال پس از نوفه‌زدایی داشته باشد، هدف اصلی این تحقیق می‌باشد.

در این پژوهش به منظور حفظ شکل اصلی سیگنال، از فیلتر ساویتزکی گولای (SG) استفاده شده است. این فیلتر توسط ساویتزکی و ام. جی. ای گولای در سال ۱۹۶۴ معرفی شده است (Savitzky and Golay, 1964). برای آشنایی بیشتر با این فیلتر می‌توان به (Schafer, 2011) مراجعه نمود. کاربرد این فیلتر در ژئوفیزیک نتایج قابل قبولی را به همراه داشته است و استفاده از آن به دلیل ریاضیات ساده و همچنین حفظ شکل اصلی سیگنال پس از اعمال فیلتر، می‌تواند نقطه برتری این فیلتر نسبت به نتایج فیلترهای رایجی مانند روش واهمامیخت فرکانس-مکان (FX) در افزایش کیفیت مقاطع ژئوفیزیکی باشد (خداقلی و باقری، ۱۳۹۸). از جمله کاربردهای موفق این فیلتر در حوزه علوم مختلف می‌توان به نوفه‌زدایی سیگنال (Awal et al., 2011)، سنجش از دور (Chen and Shu, 2011) و تحلیل و بازسازی سری‌های زمانی (Chen et al., 2004) اشاره نمود.

یکی از مطالعات موفق این روش در علم ژئوفیزیک، تضعیف نوفه داده‌های روش لرزه‌ای توسط Liu et al. (2016) می‌باشد. نتایج حاصل از کاربرد فیلتر SG در داده‌های لرزه‌ای در این تحقیق، حاکی از قابلیت بالای روش فوق در بازگردانی شکل اصلی سیگنال لرزه‌ای در محیط‌های حاوی نوفه در مقایسه با فیلتر وینر و روش‌های حذف نوفه در حوزه موجک می‌باشد. با این حال به منظور افزایش توان عملکرد فیلتر فوق در محیط‌های حاوی نوفه بالا که منجر به تغییرات ناخواسته در شکل اصلی سیگنال می‌شود، از روش منظم‌سازی تغییرات کل (Total Variation regularization) استفاده شده است. همچنین می‌توان به نمونه‌های کاربردی دیگری از این فیلتر در ژئوفیزیک شامل روش مقاومت‌ویژه الکتریکی (Baba et al., 2014)، تضعیف نوفه در داده‌های لرزه‌ای (Wu et al., 2018) و داده‌های روش GPR (Jeng et al., 2009) اشاره نمود. در این تحقیق پس از معرفی تبدیل موجک DTCWT و فیلتر حوزه زمان SG و الگوریتم طراحی شده به منظور تضعیف نوفه‌های روش GPR، داده مصنوعی آغشته به نوفه گوسی و غیرگوسی و همچنین داده واقعی برداشت‌شده در محیط شهری هدف تضعیف قرار می‌گیرند تا قابلیت روش پیشنهادی در چارچوب حوزه زمان و موجک در حذف نوفه داده‌های روش GPR مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲- روش‌شناسی

۲-۱- تبدیل موجک

تحلیل سیگنال‌های ناپایا با زمان در روش GPR و انتخاب فضای تحلیل این روش، فرایند پیچیده‌ای است. فوریه یک روش کلی و آسان برای بررسی توزیع کلی انرژی - فرکانس فراهم می‌کند. این طیف، فرکانس-هایی را که در کل مجموعه داده‌ها وجود دارند، نشان می‌دهد. همان‌گونه

که اشاره شد، تبدیل فوریه و مشتقات آن برای پردازش سیگنال‌های GPR که اطلاعات سودمند آن در محتوای فرکانسی سیگنال نهفته هستند، با مشکل مواجه است. ایده اصلی در تحلیل زمان-فرکانس، فهم و شرح تغییر محتوای فرکانسی داده‌ها با زمان است. یکی از مشهورترین تحلیل‌های زمان-فرکانس، تبدیل موجک می‌باشد که سیگنال را با تابع-های موجک تجزیه می‌کند. تئوری مفصل حوزه موجک را می‌توان در (Chui (1992) و Daubechies (1992) دنبال کرد.

توصیف هر فضای برداری چندبعدی دلخواه V که شامل مجموعه‌ای از بردارهای مستقل خطی v است، توسط رابطه (۱) نشان داده می‌شود:

$$V = \sum_{k=1}^N a_k b_k \quad (1)$$

که در آن a_k ، b_k و N به ترتیب بردارهای پایه فضا، ضرایب ترکیب خطی و بعد فضا هستند. این مفهوم را با این تعبیر که بردارهای پایه جای خود را به توابع پایه (φ_k) می‌دهند، می‌توان به راحتی تعمیم داد. بنابراین هر تابع دلخواه $f(t)$ را می‌توان به صورت رابطه (۲) توصیف نمود:

$$f(t) = \sum_{k=1}^N a_k \varphi_k(t) \quad (2)$$

تبدیل موجک گسسته DWT به ما این قابلیت را می‌دهد که نوفه‌های ناخواسته را در زمان‌های خاصی در داده تضعیف کنیم. همچنین این تبدیل به راحتی معکوس‌پذیر می‌باشد. در این حوزه عمدتاً فیلترهای تضعیف نوفه بر مبنای آستانه‌گیری اعمال می‌شوند (Donoho, 1994). برای جبران کاستی‌های روش DWT از جمله نبود اطلاعات فازی، حساسیت به جابه‌جایی زمانی و جهت‌یافتگی ضعیف، تبدیل موجک مختلط (CWT) توسط Kingsbury (1998) معرفی شد. روش CWT با اضافه کردن افزونگی (Redundancy)، بر نقص‌های روش DWT استاندارد غلبه نموده است (Yang et al., 2014). با این وجود، بازسازی کامل توسط فیلترهای مختلط بعد از مرحله ابتدایی دشوار خواهد بود؛ چرا که ورودی‌های فیلتر بعد از مرحله اول مختلط بوده و طراحی فیلتر برای بازسازی کامل ناقص خواهد ماند. برای رفع این مشکل، تبدیل موجک مختلط دوشاخه‌ای (DTCWT) ارائه شد که امکان بازسازی کامل توسط بکارگیری دو تبدیل DWT تحقق خواهد یافت. DWT اول، بخش حقیقی تبدیل مختلط و DWT دوم، بخش موهومی موجک مختلط را تولید کرده و در واقع DTCWT تصویر را به شش زیرباند در جهت‌های $\pm 15^\circ$ ، $\pm 45^\circ$ و $\pm 75^\circ$ و دو زیرباند فرکانس پایین تجزیه می‌کند. بنابراین توابع نمایی مختلط، توابع پایه به منظور محاسبه تبدیل فوریه یک سیگنال هستند. از سوی دیگر، این توابع متعامد بوده و به همین منظور این توانایی را به تبدیل فوریه می‌دهند که بتوان سیگنال اولیه را از روی سیگنال تبدیل یافته، بازسازی نمود (گودرزی و ملائی، ۱۳۹۷).

به طور خلاصه مزایای این روش را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

۱- روش مذکور تقریباً نامتغیر با زمان است که در ادامه به این

شرط پرداخته می‌شود.

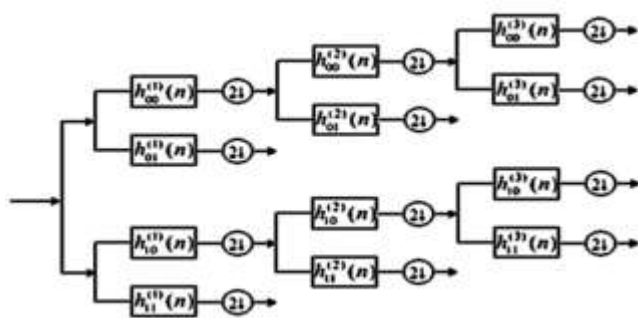
$$\varphi_c(t) = \varphi_{h_0}(t) + j\varphi_{h_1}(t) \quad (3)$$

در تبدیل فوریه، سینوس و کسینوس جفت دقیق هیلبرت هم می‌باشند. برای بدست آوردن جفت دقیق هیلبرت، باید ضرایب نامحدود باشند. به دلیل اینکه در این تبدیل تعداد محدودی از ضرایب وجود دارند، این تبدیل تقریباً نامتغیر با زمان می‌باشد. به منظور ساده‌سازی محاسبات کافی است که فیلترهای مدنظر نیم‌نمونه تأخیر داشته باشند (Selesnick, 2001):

$$h_{01}(n) \approx h_{00}(n - 0.5) \rightarrow \varphi_{h_1}(t) \approx H\{\varphi_{h_0}(t)\} \quad (4)$$

به منظور اینکه روش دوشاخه ارائه گردد، فیلترهای $h_{00}(n)$ و $h_{01}(n)$ باید شرط رابطه (۵) را مطابق شکل (۳) برآورده نمایند:

$$h_{01}(e^{jw}) \approx e^{-j0.5w} h_{00}(e^{jw}) \quad (5)$$



شکل ۳: فیلتر بانک‌های چندمرحله‌ای تجزیه برای پیاده‌سازی تبدیل CWT با فیلترهای متفاوت در هر مرحله (Selesnick et al., 2005).

۲-۲- فیلتر ساویتزکی گولای

یکی از اهداف اصلی در بسیاری از مسائل پردازش سیگنال، کاهش نوفه در سیگنال‌هایی می‌باشد که به‌طور کلی دارای تغییرات تدریجی می‌باشند. یکی از رهیافت‌های پردازش در این راستا، استفاده از فیلتر هموارکننده به‌منظور اندازه‌گیری داده و بازسازی تابع هدف می‌باشد. فیلتر SG یک فیلتر دیجیتال است که می‌تواند روی مجموعه‌ای از نقاط داده‌های دیجیتال با هدف هموارسازی داده‌ها، یعنی افزایش دقت داده‌ها بدون اعوجاج سیگنال، اعمال شود. این امر، در فرایندی معروف به همامیخت، با برازش مجموعه‌های فرعی متوالی از نقاط داده مجاور با چند جمله‌ای درجه پایین با استفاده از حداقل مربعات خطی امکان‌پذیر می‌باشد.

هدف اصلی در این فیلتر با توجه به شکل (۴)، بدست آوردن متغیر هموار شده g_i در نقطه x_i توسط میانگین‌گیری از داده‌های مجاور می‌باشد (Gander and Matt, 1995). ساده‌ترین روش محاسبه، میانگین متحرک از تعداد معینی از f_i ها می‌باشد؛ اما به‌طور معمول در این روش یک چند جمله‌ای بر روی تعداد معینی از نقاط برازش می‌شود؛ سپس مقدار چندجمله‌ای در x_i ، متغیر هموار g_i را ارائه خواهد داد. در این محاسبات، n_l تعداد نقاط سمت چپ x_i و n_r تعداد نقاط سمت

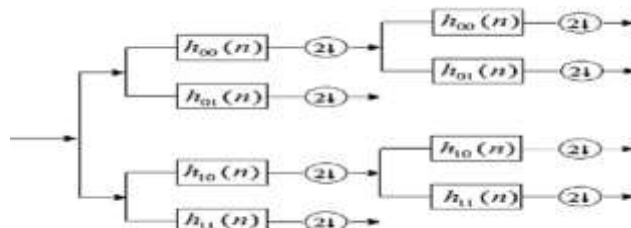
۲- جهت یافتگی بهبودیافته نسبت به تبدیل DWT دارد.

۳- شرط بازسازی کامل را برآورده می‌کند.

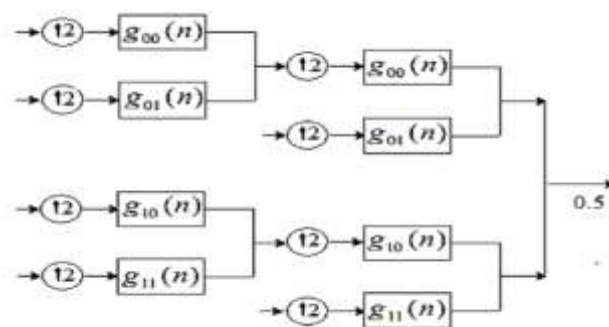
۴- افزونگی آن میانه است؛ به‌نحوی که محاسباتش دو برابر تبدیل DWT است.

۵- از دو موجک همزمان استفاده می‌کند که هر دو جفت تقریبی هیلبرت هستند (گودرزی و ملائی، ۱۳۹۷).

فیلتر بانک‌های تجزیه و ترکیب استفاده شده در طراحی تبدیل مختلط CWT که از دو شاخه فیلترهای حقیقی استفاده می‌کند، در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. در هر یک از دو تبدیل موجک حقیقی، مجموعه مختلفی از فیلترها استفاده می‌شود که هرکدام از آنها شرایط بازسازی کامل موقعیت‌ها را فراهم می‌کند و دو مجموعه فیلترها چنان پیاده‌سازی می‌شوند که همه تبدیل، تقریباً تحلیلی باشد. قسمت حقیقی و موهومی ضرایب مختلط توسط $h_0(n)$ و $h_1(n)$ تولید می‌شوند. $h_{00}(n)$ و $h_{11}(n)$ فیلترهای پایین/بالا گذر شاخه فیلتر بانک‌های بالایی می‌باشند که جفت هیلبرت آن‌ها در شاخه پایینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین جفت فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر فیلتر بانک شاخه بالا توسط $h_0(n)$ و $h_1(n)$ و جفت فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر فیلتر بانک شاخه پایین با $g_0(n)$ و $g_1(n)$ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱: فیلتر بانک‌های تجزیه دوشاخه برای پیاده‌سازی تبدیل CWT (Kingsbury, 2001). $h_{11}(n)$ و $h_{00}(n)$ فیلترهای پایین/بالا گذر شاخه فیلتر بانک‌های بالایی می‌باشند که جفت هیلبرت آن‌ها در شاخه پایینی مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۲: فیلتر بانک‌های ترکیب دوشاخه تبدیل CWT (Kingsbury, 2001). $g_{11}(n)$ و $g_{00}(n)$ فیلترهای پایین/بالا گذر شاخه فیلتر بانک‌های بالایی می‌باشند که جفت هیلبرت آن‌ها در شاخه پایینی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

موجک‌های حقیقی $\varphi_{h_0}(t)$ و $\varphi_{h_1}(t)$ باید جفت هیلبرت تقریبی باشند به‌نحوی که (Selesnick et al., 2005):

حال می‌توان رابطه (۱۱) را برای بدست آوردن ضرایب b از تجزیه QR ماتریس A ، حل کرد. تجزیه روش QR یک ماتریس، تجزیه ماتریس A به حاصلضرب $A=QR$ می‌باشد که در آن Q ، ماتریس متعامد و R ماتریس بالا مثلثی می‌باشد. این روش معمولاً به منظور حل مسائل خطی کمترین مربعات مورد استفاده قرار می‌گیرد. به منظور دستیابی به هدف این فیلتر، فقط نیاز به حل $g_i = p_i(x_i) = b_0$ می‌باشد. تعیین ضرایب b از رابطه (۱۱) می‌تواند بر اساس حل رابطه (۱۲) بدست آید:

$$A^T A b = A^T f \quad (12)$$

بنابراین:

$$g_i = e_{M+1}^T (A^T A)^{-1} A^T f \quad (13)$$

که e_{M+1} ، $(M+1)$ امین بردار واحد می‌باشد. به طور واضح می‌توان g_i را به عنوان ترکیبی خطی از f_i نشان داد.

بردار c را به صورت زیر معرفی می‌کنیم:

$$c := A(A^T A)^{-1} e_{M+1} \quad (14)$$

که شامل ضرایب فیلتر به صورت $c_{n_l}, \dots, c_{n_r}$ می‌باشد. چون c وابسته به x_i و Δx نمی‌باشد، فقط باید یکبار محاسبه شود؛ سپس تمامی مقادیر هموار شده g_i می‌تواند با یک ضرب عددی ساده بدست آید.

$$g_i = c^T f = \sum_{j=i-n_l}^{i+n_r} c_j - i f_j \quad (15)$$

محاسبه بردار c با توجه به معادله (۱۴) برای مقادیر بزرگ M می‌تواند دقت کافی نداشته باشد. این عدم دقت به این علت است که شرط A مربعی و به فرم $A^T A$ می‌باشد. بنابراین سیستم کمترین مربعات رابطه (۱۱) می‌تواند توسط تجزیه QR به صورت خطی توسط رابطه (۱۶) حل شود:

$$A=QR \quad (16)$$

در رابطه (۱۶)، Q ماتریس متعامد بوده و همچنین دارای بعد $(n_l + n_r + 1) * (M + 1)$ و از سوی دیگر، R ماتریس بالا مثلثی با بعد $(M + 1) * (M + 1)$ می‌باشد. با جایگذاری رابطه (۱۶) در معادله (۱۴)، بردار c را می‌توان به صورت رابطه (۱۷) بدست آورد:

$$c = \frac{1}{r_{M+1,M+1}} Q e_{M+1} \quad (17)$$

که می‌تواند برای حل عددی در بدست آوردن ضرایب c مورد استفاده قرار گیرد.

یکی از مهمترین مزایای استفاده از این فیلتر، سرعت بالای محاسباتی آن می‌باشد؛ علت امر این است که برای مقادیر ورودی داده شده n_l, n_r و M ، فقط کافی است که یکبار ضرایب c محاسبه شوند و سپس هر مقدار فیلترشده g_i توسط یک ضرب ساده از رابطه (۱۵) با طول $(n_l + n_r + 1)$ بدست می‌آید. از طرفی از نقایص این فیلتر، انتخاب پارامترهای n_l, n_r و M می‌باشد که برای بدست آوردن مقادیر بهینه رهیافت‌هایی توسط Ziegler (1981) و Press and Teukolsky (1990) ارائه شده است. با این وجود در این تحقیق از روش سعی و خطا برای بدست آوردن مقادیر بهینه استفاده شده است.

راست x_i می‌باشند. از سوی دیگر، $p_i(x)$ چندجمله‌ای درجه M می‌باشد که در تعداد نقاط $1 + n_l + n_r$ از x_i توسط معادله کمترین مربعات برازش می‌شود. پس از برازش چندجمله‌ای $p_i(x)$ بر روی تعداد معینی از نقاط x_i ، $g_i = p_i(x_i)$ محاسبه خواهد شد. چند جمله‌ای $p_i(x)$ از درجه M که بر روی داده f_j برازش می‌شود را می‌توان به صورت رابطه (۶) بیان کرد:

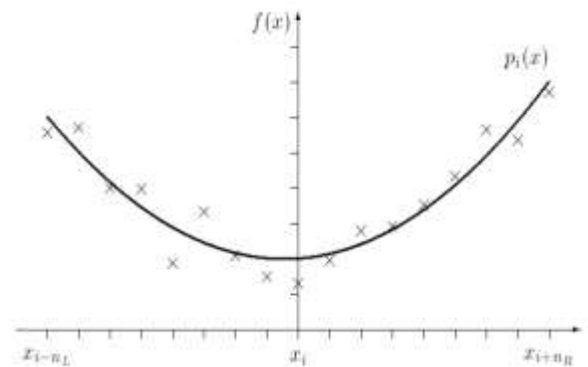
$$p_i(x) = \sum_{k=0}^M b_k \left(\frac{x-x_i}{\Delta x} \right)^k \quad (6)$$

به منظور پیاده‌سازی این فیلتر، فرض بر این است که بعد افقی x_i بطور یکنواخت در فضای $x_{i+1} - x_i = \Delta x$ قرار گرفته است. لازم به ذکر است که به منظور برازش $p_i(x)$ به صورت کمترین مربعات در داده اندازه-گیری شده، باید ضرایب b_k توسط رابطه (۷) تعیین شوند:

$$\sum_{j=i-n_l}^{i+n_r} (p_i(x_j) - f_j)^2 = \min \quad (7)$$

به همین منظور ماتریس A به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A = \begin{bmatrix} (-n_l)^M & -n_l & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ n_r^M & n_r & 1 \end{bmatrix} \in R^{(n_l+n_r+1)*(M+1)} \quad (8)$$



شکل ۴: چندجمله‌ای کمترین مربعات $p_i(x)$ که بر روی منحنی $f(x)$ برازش می‌شود (Gander and Matt, 1995).

و دو بردار b و f به صورت زیر معرفی می‌شوند:

$$b := \begin{bmatrix} b_M \\ \vdots \\ b_1 \\ b_0 \end{bmatrix} \in R^{(M+1)} \quad (9)$$

$$f := \begin{bmatrix} f_{i-n_l} \\ \vdots \\ f_i \\ f_{i+n_r} \end{bmatrix} \in R^{(n_l+n_r+1)} \quad (10)$$

باید این نکته را در نظر داشت که ماتریس A به مقادیر x_i و فضای Δx وابسته نمی‌باشد. با تعاریف بالا می‌توان مسئله کمترین مربعات رابطه (۷) را در فرم معادله ماتریسی رابطه (۱۱) حل کرد:

$$\|Ab - f\|_2 = \min \quad (11)$$

تضعیف نوفه در حوزه تبدیل موجک با توجه به شکل (۵) در سه مرحله صورت می‌پذیرد:

۱. در وهله اول تبدیل موجک مورد نظر بر روی سیگنال اعمال شده و بر اساس فیلتر بانک‌های تجزیه، مطابق با شکل (۱) به ضرایب موجک تبدیل خواهد شد.
۲. مقدار آستانه تعیین شده و سپس تابع آستانه‌گیر مورد نظر بر روی ضرایب موجک تجزیه‌شده اعمال و ضرایب جدید موجک به دست خواهد آمد.
۳. معکوس تبدیل موجک مطابق با شکل (۲) بر روی ضرایب اعمال شده و سیگنال با استفاده از ضرایب جدید موجک بازسازی خواهد شد.



شکل ۵: الگوریتم طراحی‌شده در حوزه DTCWT به منظور تضعیف نوفه سیگنال‌های روش GPR.

نقش آستانه متمایز نمودن ضرایب کوچک (که اغلب نوفه هستند) و ضرایب بزرگ به‌عنوان نماینده ویژگی‌های اصلی یک سیگنال می‌باشند. لذا تعیین مقدار آستانه و انتخاب روش آستانه‌گیری از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. یکی از مهمترین روش‌های انتخاب حد آستانه، روش ارائه‌شده توسط Donoho and Johnstone (1994) می‌باشد که به صورت رابطه (۱۹) بیان می‌شود:

$$T = \sigma \sqrt{2 \log(N)} \quad (19)$$

در این رابطه، T مقدار آستانه، σ انحراف معیار موجود در سیگنال و N طول سیگنال مورد بررسی می‌باشد.

در این تحقیق مقادیر آستانه توسط روش‌های آستانه‌گیر نرم (Donoho, 1995) و گاروت غیرمنفی (Breiman, 1995) بدست خواهند آمد. در آستانه‌گیری نرم پس از تعیین مقدار آستانه، ضرایب با قدر مطلق کمتر از مقدار آستانه برابر با صفر در نظر گرفته شده و دیگر ضرایب مطابق با رابطه (۲۰) کوچک (shrink) خواهند شد:

$$y = \begin{cases} x - T & x > T \\ x + T & x < -T \\ 0 & |x| \leq T \end{cases} \quad (20)$$

در رابطه فوق x و y به ترتیب، ضرایب قبل و بعد از آستانه‌گیری می‌باشند. در آستانه‌گیری گاروت غیرمنفی ضرایب کمتر از مقدار آستانه برابر با صفر در نظر گرفته شده و ضرایب بزرگتر از آن مطابق با رابطه (۲۱) کوچک می‌شوند:

$$y = \begin{cases} x - \frac{T^2}{x} & |x| > T \\ 0 & |x| \leq T \end{cases} \quad (21)$$

۳-۲- نوفه گوسی و غیرگوسی

با فرض اینکه منبع موج رادیویی در حضور نوفه، ضعیف و در فاصله بسیار دور از سیگنال رادیویی قرار داشته باشد و از سوی دیگر، دامنه موج گیرنده کمتر از میانگین دامنه نوفه باشد، در این صورت سیگنال موردنظر توسط نوفه پوشانده شده و به این نوفه، اصطلاحاً نوفه رادیویی و یا استاتیک گفته می‌شود (ITU-R Recommendation, 2016). نوفه استاتیک صرف نظر از ماهیت فرستنده و گیرنده، ماهیت پایا داشته و برخلاف نوفه‌های دینامیکی که دارای منشا متغیر، توزیع گسترده و محتوای فرکانس پایین هستند، دارای مولفه‌های ثابت می‌باشند (Blackard et al., 1993).

نوفه گوسی یکی از انواع نوفه استاتیک است که از تابع توزیع چگالی احتمال نرمال پیروی می‌کند. به‌عبارتی مقادیر این نوفه توزیع گوسی دارند (Barbu, 2013). یک مورد خاص این نوفه، نوفه گوسی سفید می‌باشد که توان آن به‌طور یکنواخت در همه فرکانس‌ها توزیع شده است. همچنین، تابع چگالی طیف توان آن در همه فرکانس‌ها مقداری تقریباً ثابت دارد. تابع خودهمبستگی نوفه سفید به‌صورت تابع دلتای دیراک است. نوفه سفید به هر سیگنال گسسته در زمان که نمونه‌های آن دنباله‌ای از متغیرهای تصادفی ناهمبسته، که دارای میانگین صفر و واریانس متناهی هستند، نیز گفته می‌شود. بسته به کاربرد، ممکن است لازم باشد نمونه‌ها مستقل و با توزیع احتمالی مشابه در نظر گرفته شوند. به هر پدیده اتفاقی که در این تابع قابل تعریف نباشد، نوفه غیرگوسی گفته می‌شود. عوامل مختلفی می‌توانند یک تابع توزیع نرمال را به یک تابع غیرنرمال تبدیل نمایند، به نحوی که سیگنال و یا نوفه از توزیع گوسی تبعیت نکند (Gurley et al., 1997). به‌منظور تولید نوفه غیرگوسی در این تحقیق، از رهیافت Cheynet (2020) استفاده شده است. پوش دامنه نقاط منحنی نوفه غیرگوسی در این رهیافت از منحنی توزیع چگالی احتمال نرمال پیروی نمی‌کند.

با توجه به اینکه حوزه تبدیل موجک حاصل هم‌سنگی سیگنال حاوی نوفه با یک یا چند موجک مادر و زیر مجموعه‌های آن است، ارائه الگوریتمی که قادر به پاسخگویی به توزیع غیرنرمال نیز باشد، از ملزومات پردازش داده‌های روش GPR می‌باشد.

۴-۲- تعریف مسئله و روش تحقیق

سیگنال دارای نوفه تصادفی را می‌توان به‌صورت رابطه (۱۸) مدل‌سازی کرد (Lahouar, 2003):

$$y(t) = x(t) + n(t) \quad (18)$$

در رابطه بالا $y(t)$ سیگنال دارای نوفه، $x(t)$ سیگنال خالص بدون نوفه و $n(t)$ نوفه تصادفی است که باید از روی سیگنال حذف شود.

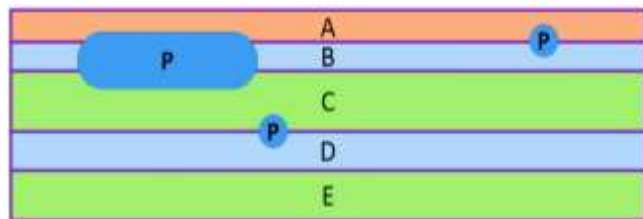
امکان حذف کامل نوفه‌های روش GPR وجود ندارد، ولی می‌توان با استفاده از روش‌های گوناگون، میزان آن را تا حدود زیادی کاهش داد، به‌طوری‌که سیگنال به‌دست‌آمده شباهت زیادی به سیگنال خالص داشته باشد.

مدل مصنوعی زمین متشکل از پنج لایه و دو شکل لوله و یک مجرای می- باشد که توسط نرم افزار GPRMAX2D تهیه شده است. ضرایب رسانندگی و ثابت دی الکتریک لایه ها و اهداف زیرسطحی به تفکیک در شکل (۷) نمایش داده شده اند (ابراهیمی برادر و همکاران، ۱۳۹۷).

نتایج حاصل از نوفه زدایی با استفاده از روش های حوزه زمان و تبدیل موجک بر روی داده های مصنوعی GPR که به نوفه گوسی آغشته شده، در شکل (۸) نشان داده شده است. فرکانس غالب در این داده، ۲۰۰ MHz بوده و همان طور که در این شکل ملاحظه می شود، نسبت سیگنال به نوفه گوسی اضافه شده به مدل مصنوعی اولیه، ۵db در نظر گرفته شده است.

با اضافه شدن نوفه گوسی، مسیر و مرز لایه ها به خصوص لایه های نازک تا حدودی از بین رفته اند و برجستگی لایه ها تقریباً نامشخص بوده و آسیب دیده اند. این مدل برای بررسی روش های DTCWT، SG، و روش پیشنهادی SG-DTCWT مورد استفاده قرار می گیرد.

به منظور نوفه زدایی مقطع آغشته شده به نوفه گوسی، در ابتدا از روش های آستانه گیر نرم (شکل ۸-د) و گاروت غیرمنفی (شکل ۸-ه) که در تحقیقات اسکوئی و همکاران (۲۰۱۵) مورد توجه قرار گرفته، استفاده شده است. پس از اعمال روش های آستانه گیر، چنانچه انتظار می رفت نتایج حاصل از نوفه زدایی آن ها به دلیل وابستگی و طراحی براساس توزیع احتمال گوسی، نسبتاً برتر از روش SG (شکل ۸-ز) به نظر می رسد. با این وجود، طیف فرکانسی روش های فوق بیانگر این واقعیت هستند که انطباق کامل طیف فرکانسی روش های آستانه گیر (منحنی طیف سبز رنگ) با محور صفر طیف توان در بازه ۶۰۰ MHz مطابق با شکل (۸-ج)، حاکی از دست رفتن سیگنال در این بازه فرکانسی است، به نحوی که در کنار تضعیف نوفه، سیگنال نیز از بین رفته و در نتیجه بازسازی سیگنال به خوبی صورت نگرفته است.



شکل ۷: مدل مصنوعی زمین و اهداف مختلف که ضرایب رسانندگی و ثابت دی الکتریک آن ها به صورت مجزا نمایش داده شده است (ابراهیمی برادر و همکاران، ۱۳۹۷).

بنابراین می توان نتیجه گرفت که روش های آستانه گیر در حوزه تبدیل DTCWT، انرژی فرکانس بالای سیگنال را حذف کرده و از منظر حفظ سیگنال در این بازه از انرژی، دارای عملکرد ضعیف می باشند.

پس از اعمال فیلتر حوزه زمان SG با استفاده از الگوریتم (1995) Gander and Matt در شکل (۸-ز)، بخشی از نوفه تضعیف شده است؛ با این حال مرز بسیاری از داده ها مخدوش شده و سیگنال های کم دامنه

رهیافت پیشنهادی که با پیاده سازی الگوریتم حوزه زمان SG در قالب تبدیل DTCWT اجرا خواهد شد، در شکل (۶) نمایش داده شده است.

بر اساس این شکل، پس از اعمال تبدیل DTCWT براساس فیلتر بانک های تجزیه بر روی ردهای روش GPR، به جای استفاده از توابع آستانه- گیر و صفر کردن ضرایب برای یک آستانه خاص بدست آمده از روش های آستانه گیر برای هر رد، فیلتر SG بر روی تمامی مقیاس های تجزیه شده از هر رد اعمال شده و سپس سیگنال روش GPR با استفاده از عملگر معکوس سازی تبدیل DTCWT بر روی تمامی ضرایب که توسط روش SG نوفه زدایی شده اند، بازسازی خواهد شد.



شکل ۶: الگوریتم طراحی شده توسط فیلتر SG در حوزه DTCWT به منظور تضعیف نوفه سیگنال های روش GPR.

داده مصنوعی روش GPR تولید شده در این مطالعات مطابق با نوع تولید شده در مطالعات (Ebrahimi Bardar et al., 2019) توسط موجک ریکر بوده است که بر اساس مطالعات Wang (2015) توسط رابطه (۲۲) بیان می شود:

$$w(t) = (1 - \pi^2 f^2 t^2) \exp(-\pi^2 f^2 t^2) \quad (22)$$

در رابطه بالا $w(t)$ موجک ریکر، t زمان و f فرکانس مرکزی موجک ریکر می باشد. موجک ریکر در حوزه زمان متقارن و دارای میانگین صفر می باشد. در مدل مصنوعی تولید شده، موجک ارسالی از فرستنده که بدون تغییر در زمین منتشر می شود، با پاسخ ضربه زمین همامیخت می شود. حال اگر نوفه محیط نیز در نظر گرفته شود، مدل ریاضی سیگنالی که در گیرنده ثبت می شود، به صورت رابطه (۲۳) خواهد بود:

$$y(t) = w(t) * r(t) + n(t) \quad (23)$$

در رابطه بالا $t=0,1,\dots,N-1$ بوده و N تعداد نمونه ها را نشان می دهد. همچنین $y(t)$ رد ثبت شده، $w(t)$ موجک انتشار یافته در زمین، $r(t)$ سری ضرایب بازتاب زمین و $n(t)$ نوفه است (Robinson and Treitel, 1967).

همان طور که قبلاً بیان شد، به منظور ساده سازی محاسبات در این مدل فرض بر این است که موجک ثبت شده در گیرنده برابر با موجک ارسالی از فرستنده می باشد. این مسئله در روش واهمامیخت از اهمیت بالایی برخوردار است (Moghaddam et al., 2019).

۲-۵- بررسی روش های تضعیف نوفه بر روی داده مصنوعی

در این تحقیق به منظور بررسی عملکرد فیلترها در حوزه زمان و موجک،

روش‌ها مدنظر قرار گیرد.

جدول ۱: زمان محاسبه شده توسط فیلترهای SG، آستانه‌گیری نرم و گاروت غیرمنفی در حوزه DTCWT و روش SG-DTCT به منظور تضعیف نوفه گوسی سیگنال‌های داده مصنوعی روش GPR.

روش	SG	DTCWT-SOFT	DTCWT-NON-GARROTE	SG-DTCWT
زمان (ثانیه)	۰/۱۲	۰/۹۹۴	۰/۹۴۴	۱/۰۸۱

اما نکته دیگری که باید در بحث تضعیف نوفه داده‌های روش GPR در نظر گرفته شود، این است که توزیع گوسی برای داده‌های ژئوفیزیکی دور از واقعیت میدانی است. به همین دلیل، داده نوع دوم (شکل ۹-ج) براساس اضافه‌نمودن نوفه غیرگوسی تصادفی بر روی مدل مصنوعی اول (مدل مصنوعی شکل ۸) با نسبت سیگنال به نوفه ۵ db برای پاسخ به این مسئله تولید شده است. همان‌طور که در طیف توان (شکل ۹-ح) مشاهده می‌شود، نوفه تولید شده در داده مصنوعی (منحنی طیف قرمز رنگ) از توزیع احتمال گوسی تبعیت نمی‌کند.

با اعمال روش‌های مذکور بر این نوع داده نتایج زیر حاصل شد:

در حضور نوفه غیرگوسی همچنان ضعیف‌ترین نتیجه مرتبط با اعمال روش SG در حوزه زمان (شکل ۹-ز) می‌باشد، به این صورت که بخشی از نوفه‌های فرکانس بالا برطرف شده است، اما با نرم‌شدگی ایجاد شده، مسیر لایه‌ها به صورت معقول بازگردانی نشده و به تبع آن مرز بخشی از داده‌ها مخدوش شده است. همانند مقطع آغشته شده به نوفه گوسی در حوزه زمان، کشیدگی رویدادها و ردها در راستای محور زمان در این مقطع کاملاً مشهود است. البته کشیدگی‌ها نسبت به مقطع آغشته به نوفه گوسی کمتر بوده و ردها نرمی بهتری را از خود نشان می‌دهند. به عنوان مثال اثر سهمی در اطراف رد شماره ۲۵۰ وضوح بهتری را نسبت مورد مشابه با نوفه گوسی از خود نشان می‌دهد. طیف توان حاصل از اعمال این فیلتر بر روی داده آلوده شده به نوفه غیرگوسی (منحنی طیف زرد رنگ در شکل ۹-ح) نشان‌دهنده طبعیت روند طیف داده نوفه‌دار و نوفه‌زدایی شده می‌باشد.

این فیلتر در فرکانس‌های کم نه تنها موفق نبوده بلکه نوفه بیشتری را نیز بر روی سیگنال اعمال کرده است. در اطراف فرکانس مرکزی، این فیلتر تقریباً مشابه با روش‌های دیگر عمل نموده است و در فرکانس‌های بالا توانسته میزان قابل قبولی از نوفه‌های فرکانس بالا را حذف نماید و روند مناسبی هم دارد. اما به هر حال نتیجه نهایی این است که اعمال این فیلتر در حوزه زمان در فرکانس‌های بالا بسیار موفق‌تر از فرکانس‌های پایین عمل می‌کند.

با اعمال روش‌های آستانه‌گیر مطابق با شکل (۹-د) و (۹-ه) نتایج بهتری نسبت به فیلتر SG اخذ شده است. مسیر لایه‌ها و برجستگی سهمی‌ها

نسبت به سیگنال‌های با دامنه بالاتر، بیشتر تحت تأثیر نوفه‌زدایی در این روش قرار گرفته و پس از حذف نوفه، تحت تأثیر نرم‌شدگی (Smoothness) بالاتری حاصل از اعمال این فیلتر قرار گرفته‌اند.

به هر ترتیب نرم‌شدگی ایجاد شده در مقطع منجر به عدم بازگردانی دقیق مرز لایه‌ها توسط اعمال فیلتر حوزه زمان SG شده است. علاوه بر این، با توجه به طیف توان حاصل از اعمال این فیلتر بر روی داده مصنوعی آغشته شده به نوفه گوسی، قسمتی از انرژی سیگنال در اطراف فرکانس مرکزی حذف شده است. بنابراین فیلتر SG در حذف نوفه داده‌های روش GPR کاملاً ناموفق بوده است.

با توجه به نتایج اعمال دو حوزه در حضور نوفه گوسی، می‌توان نتیجه گرفت که هریک از روش‌های مذکور در برآورده نمودن دو شرط اصلی در نوفه‌زدایی یعنی تضعیف نوفه و حفظ سیگنال اصلی دارای نقص‌های جدی می‌باشند.

باتوجه به اینکه در کنار آزمودن روش‌های متداول در حوزه موجک باید حوزه زمان نیز در نظر گرفته شود، بنابراین در رهیافت مدنظر در این تحقیق، روش SG در حوزه زمان با همان پارامترهای حوزه موجک مطابق با الگوریتم مطرح شده در شکل (۶) بر روی داده‌های مصنوعی حاوی نوفه گوسی اعمال شد. به عبارت دیگر مقادیر مورد نیاز در پیاده‌سازی الگوریتم SG که در بخش تئوری به آن‌ها اشاره شد، بدون تغییر بر روی تمامی مقیاس‌ها و پس از تجزیه سیگنال اجرا شده و سپس تبدیل معکوس DTCWT بر روی آن‌ها اعمال شد.

پس از پیاده‌سازی این الگوریتم در شکل (۸-و)، مسیر لایه‌ها به‌خوبی قابل تشخیص می‌باشد و همچنین در سرتاسر مقطع یک نرم‌شدگی منطقی در مسیر ردها مشاهده شده و علاوه بر این، ساختارها اعم از دامنه کم و زیاد به خوبی قابل تشخیص هستند و نسبت به فیلتر SG و حوزه DTCWT نتیجه بهتری بدست آمده است. نکته دیگری که در اینجا باید به آن توجه شود این است که مسیر لایه‌ها به خوبی بازگردانی شده‌اند که این نشان از قدرتمند بودن روش SG-DTCWT در انجام عمل تضعیف نوفه می‌باشد.

البته لازم به ذکر است که در فرکانس‌های پایین تا فرکانس مرکزی، انطباق منحنی خروجی SG-DTCWT به رنگ آبی در داده ورودی بدون نوفه به رنگ مشکی نشان‌دهنده عملکرد تقریباً مشابه روش پیشنهادی با دو روش قبل در تضعیف نوفه می‌باشد. علاوه بر این اختلاف بین منحنی آبی (روش SG-DTCWT) و مشکی (داده مصنوعی بدون نوفه) حاکی از این واقعیت است که این روش علیرغم برتری فاحش نتوانسته است نوفه را به طور کامل حذف نماید و لذا واژه تضعیف نوفه مناسب‌ترین انتخاب برای روش پیشنهادی است.

بنابراین نتایج این مقایسه بدین شرح است که با پارامترهای یکسان برای فیلتر SG، تبدیل DTCWT حوزه قابل اعتمادی برای پیاده‌سازی روش SG است.

با این حال زمان محاسبه روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های دیگر مطابق با جدول (۱)، بیشتر می‌باشد که باید در مورد زمان اعمال این

شده توسط روش SG را در حوزه زمان نشان می‌دهد. با توجه به این دو شکل، سیگنال‌ها نرم‌تر شده و روند اصلی سیگنال تقریباً حفظ شده است. با این وجود مشابه با اثر این فیلتر بر روی داده مصنوعی، رویدادهای دامنه پایین‌تر تحت تأثیر نوفه‌زدایی بیشتری قرار گرفته و پس از اعمال فیلتر SG، کاهش دامنه بیشتری در مقایسه با رویدادهای با دامنه بالاتر اتفاق افتاده است.

به‌عنوان مثال در شکل (۱۳-ب) مشاهده می‌شود که در بازه زمانی ۲۰ تا ۶۰ نانوثانیه، اعمال روش SG بر روی رد داده واقعی منجر به حذف بیشتر رویدادهای با دامنه پایین شده است. این امر منجر به کشیدگی رویدادها و عدم وضوح تصویر سهمی‌ها در مقطع شده است. لذا سهمی مربوط به ردهای شماره ۳۵۰ تا ۴۰۰ (دایره سمت راست) نه تنها تغییر مثبتی نداشته است، بلکه پس از اعمال روش SG، وضوح آن کاهش یافته است.

شکل (۱۲-ب و ج) و شکل (۱۳-ب) مربوط به حذف نوفه داده واقعی توسط روش‌های آستانه‌گیر در فضای DTCWT می‌باشد. با اعمال این روش‌ها، نوفه‌های زمینه نسبت به روش حوزه زمان، بهتر تضعیف شده‌اند و اثر سهمی‌ها به طور معقولی از سیگنال آغشته استخراج شده است. برای مثال سهمی وابسته به ردهای شماره ۳۵۰ تا ۴۰۰ در شکل (۱۲-ب و ج)، با عملکرد بهتری تضعیف شده‌اند، به‌طوری که امتداد سهمی به خوبی مشخص شده است. با این وجود، مشابه با فیلتر حوزه زمان، در بازه زمانی ۲۰ تا ۶۰ نانوثانیه در شکل (۱۳-ج)، اعمال روش‌های آستانه‌گیر بر روی رد داده واقعی عملکرد ضعیفی در حفظ رویدادهای با دامنه پایین داشته است.

در نهایت حذف نوفه توسط SG در فضای DTCWT در شکل (۱۱-ب) و شکل (۱۳-ب) دیده می‌شود. نوفه‌های زمینه به نحو بسیار مطلوبی تضعیف شده‌اند به‌طوری که امتداد سهمی‌ها به خوبی مشخص بوده و زمینه مغشوش و نوفه‌دار جای خود را به زمینه بدون نوفه داده است.

لذا روش فوق در حذف نوفه و بازسازی شکل اصلی سیگنال‌های روش GPR با توجه به شکل (۱۳-ب) بسیار موفق عمل کرده است و قابل مقایسه با روش‌های آستانه‌گیر حوزه DTCWT می‌باشد.

با توجه به نتایجی که در شکل (۱۳-ب) نشان داده شده است، فیلتر پیشنهادی SG-DTCWT قابلیت بیشتری در بازسازی شکل سیگنال داشته و نرم‌کنندگی حاصل از آن برتری بیشتری در حفظ سیگنال و حذف نوفه نسبت به حوزه زمان با نرمی حاصل از برازش کمترین مربعات با چند جمله‌ای درجه $M=2$ بر روی رد حاصل داشته است. با اعمال این روش، شکل سیگنال اصلی از داده نوفه‌دار نسبت به فیلتر SG و روش‌های آستانه‌گیر بهتر تفکیک شده است. علاوه بر این، نتایج بصری بهتری نسبت به ردها پیدا شده است، به‌صورتی که اثر اهداف زیرسطحی به

پس از تضعیف نوفه وضوح بیشتری را نشان می‌دهند. البته باید متذکر شد که در این نوع داده، پاسخ فرکانسی روش‌های آستانه‌گیر برای نوفه‌های غیرگوسی مبین حذف بخشی از انرژی فرکانس بالا است که می‌توان این واقعیت را با روند میرا و نزولی طیف فرکانسی این دو روش آستانه‌گیر بعد از فرکانس ۴۰۰ MHz در شکل ۹-ح توجیه نمود. بنابراین ضعف هر یک از حوزه‌های تضعیف نوفه (فیلتر SG در تضعیف نوفه‌های فرکانس پایین و روش‌های آستانه‌گیر در تضعیف نوفه‌های فرکانس بالا) به طور کامل نمی‌تواند راه‌حل منطقی در عملیات حذف نوفه در داده‌های روش GPR باشند.

اما رهیافت طراحی شده SG در حوزه موجک (شکل ۹-و) نتایج بسیار قابل قبولی را ارائه داده است که علاوه بر قدرت حفظ سیگنال در ارتباط با این نوع خاص از نوفه، نتایج تضعیف نوفه کاملاً قابل مقایسه با روش‌های آستانه‌گیر بوده و وضوح ردها و سهمی‌ها نسبت به فیلتر حوزه زمان SG به مراتب بهتر به نمایش درآمده‌اند. علاوه بر این، با توجه به طیف فرکانسی در شکل (۹-ح)، اعمال این روش برخلاف دو روش قبل، منجر به حذف هیچ بازه فرکانسی نشده است. البته لازم به ذکر است که هر سه روش در نوفه‌زدایی در اطراف فرکانس مرکزی مشابه یکدیگر عمل کرده‌اند.

۲-۶- بررسی روش‌های تضعیف نوفه بر روی داده واقعی

در نهایت روش‌های مطرح شده در تضعیف نوفه بر روی داده واقعی اعمال گردید. داده واقعی در این پژوهش توسط آنتن ۳۰۰-۸۰۰ MHz متعلق به شرکت GSSI و به منظور شناسایی تاسیسات زیرسطحی در محوطه باز موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران مطابق با شکل (۱۰) برداشت شده است. چنانچه در داده ورودی برداشت‌شده توسط آنتن ۸۰۰ MHz در شکل (۱۱-الف) پس از بزرگنمایی مشاهده می‌شود، کادراهی دایره‌ای مربوط به دو هدف غیرفلزی می‌باشند که به دلیل وجود نوفه در داده برداشتی تقریباً پوشانده شده‌اند.



شکل ۱۰: برداشت داده‌های GPR در محوطه باز موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران توسط آنتن ۳۰۰-۸۰۰ MHz متعلق به شرکت GSSI به منظور شناسایی تاسیسات زیرسطحی.

شکل (۱۱-ج) و شکل (۱۳-ب) به‌ترتیب مقطع و رد ۱۲۰ام نوفه‌زدایی

۳- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی روش‌های تجزیه زمان-فرکانس در تضعیف نوفه داده‌های روش GPR پرداخته شد. از این رو نوفه‌های گوسی و غیرگوسی هدف تضعیف قرار گرفتند و در نهایت تلاش برای بهبود نتایج، منجر به ارائه روشی نوین برای اولین بار در تضعیف نوفه‌های موجود در مقاطع حاصل از روش GPR با طراحی فیلتر حوزه زمان در چارچوب حوزه موجک مختلط دوبعدی گردید. برای این منظور یک نوع داده مصنوعی با دو نوع نوفه همراه با توزیع گوسی و غیرگوسی جهت پیشبرد اهداف با مقدار نسبت سیگنال به نوفه اضافه شده ۵ db، تولید گردید. در ارتباط با داده مصنوعی با دو نوع نوفه، روش‌های متفاوت آستانه‌گیری یعنی روش آستانه‌گیر نرم و گاروت غیرمنفی بکار گرفته شد. با توجه به اینکه این روش‌ها براساس توزیع احتمال گوسی طراحی و تعریف شده‌اند، نتایج حاصل از نوفه‌زدایی آن‌ها نسبتاً برتر از روش SG به نظر می‌رسد؛ اما باتوجه به طیف نزولی و میرا شده فرکانسی روش‌های آستانه‌گیر در بعضی از بازه‌های فرکانسی، حکایت از دست رفتن سیگنال دارد؛ به‌نحوی که در کنار تضعیف نوعی داده نیز از دست می‌رود. از سوی دیگر روش SG در حوزه زمان با همان پارامترهای حوزه موجک بر روی داده مصنوعی و واقعی پیاده گردید که با پارامترهای یکسان برای روش مذکور، حوزه DTCWT حوزه قابل اعتمادی برای پیاده‌سازی روش SG است. در حضور نوفه غیرگوسی همچنان ضعیف‌ترین نتیجه مرتبط با اعمال روش SG در حوزه زمان می‌باشد؛ اما برای سایر روش‌ها، روش ارائه شده SG-DTCWT نتایج بسیار قابل قبولی را در داده‌های مصنوعی و حقیقی ارائه کرده است. در این روش، علاوه بر قدرت حفظ سیگنال در ارتباط با این نوع خاص از نوفه، نتایج تضعیف نوفه کاملاً قابل مقایسه با روش‌های آستانه‌گیری است. البته لازم به ذکر است که هر سه روش در نوفه‌زدایی در اطراف فرکانس مرکزی مشابه یکدیگر عمل کرده‌اند.

۴- منابع

- ابراهیمی بردر، ا.، اسکویی، ب.، و گودرزی، ع.، ۱۳۹۸، ارتقاء کارایی نوفه زدایی TV و GSTV در فضاهای RADWT و DTRADWT، نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، ۵ (۱)، ۲۹-۵۵.
- اویسی موخر، م.، ۱۳۸۶، بررسی ساختار شکستگی سراب قنبر در جنوب شهر کرمانشاه با استفاده از روش رادار، مجله ژئوفیزیک ایران، ۱ (۱)، ۸۱-۸۹.
- محمدی ویژه، م.، ۱۳۸۷، برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های رادار نفوذی به زمین در منطقه شاهرود و مقایسه آن با نتایج ژئوالکتریک در منطقه مزبور، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- مزینانی، ا.، ۱۳۸۹، بررسی ضخامت آسفالت با استفاده از روش GPR، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و

شکل (۱۳- الف) تغییرات توان روش‌های اعمالی را بر حسب فرکانس بر روی داده حقیقی نشان می‌دهد. منحنی قرمز رنگ در این شکل، طیف توان داده حقیقی دارای نوفه است. طیف توان روش SG در حوزه زمان (منحنی زرد رنگ) در فرکانس‌های میانی و مرکزی نه تنها موفق نبوده بلکه بخش قابل توجهی از انرژی سیگنال را حذف کرده است؛ با این حال در فرکانس‌های بالا تقریباً روند قابل قبولی را در حذف نوفه و حفظ سیگنال داشته است. این همان رفتاری است که در اعمال این فیلتر در حوزه زمان و بر روی داده مصنوعی آغشته شده به نوفه گوسی نیز مشاهده شد. روش‌های آستانه‌گیر (منحنی سبز و آبی کم‌رنگ) در حوزه DTCWT در اطراف فرکانس مرکزی روند بهتری نسبت به فیلتر حوزه زمان دارند. با این حال، روش‌های مطرح‌شده نیز مقداری از انرژی سیگنال را در این بازه فرکانسی حذف نموده‌اند. در فرکانس‌های بالا نیز روند میرا و غیرقابل قبولی از این حوزه مشاهده می‌شود.

با بررسی طیف توان سیگنال حاصل از اعمال روش SG در حوزه DTCWT (منحنی آبی پررنگ) می‌توان اثر بسیار مناسب این فیلتر را مشاهده کرد. همانند روند تضعیف نوفه در داده مصنوعی آغشته به نوفه گوسی و غیرگوسی، روش فوق در فرکانس‌های میانی رفتاری مشابه با سیگنال اصلی دارد و در فرکانس‌های بالا در حذف نوفه موفق بوده و رفتاری کاملاً مشابه با سیگنال دارد.

بنابراین اعمال روش SG در حوزه موجک با توجه به نتایج بصری و طیف فرکانسی، بیشترین میزان تضعیف نوفه و حفظ سیگنال را دارد. نکته دیگری که در طیف توان داده واقعی و فیلترهای اعمالی دیده می‌شود، تفاوت منحنی طیف توان روش‌های آستانه‌گیر در داده مصنوعی و واقعی می‌باشد که ریشه در فرمول‌بندی و فرایند تعریف‌شده توسط روش‌های آستانه‌گیری دارد که به واریانس داده ارتباط می‌یابد. واریانس داده مصنوعی در این تحقیق به گونه‌ای بوده است که بعد از اعمال روش‌های آستانه‌گیر، طیف توان در فرکانس‌های بالا میرا شده است. این رفتار در داده واقعی علاوه بر فرکانس‌های بالا، در اطراف فرکانس مرکزی نیز مشاهده شده است.

همان‌طور که در شکل (۱۳- الف) مشخص است، هر سه روش مطرح شده قابلیت کاهش نوفه داده‌های روش GPR را دارند؛ اما نکته حائز اهمیت از این مسئله ناشی می‌شود که حفظ سیگنال نیز به‌موازات تضعیف نوفه انجام شود. با توجه به نتایج حاصل از اعمال روش‌ها بر روی داده مصنوعی و واقعی، برتری روش SG-DTCWT نسبت به سایر روش‌ها در تضعیف نوفه و حفظ سیگنال نشان داده شده و توانمندی‌های روش مذکور اعم از تضعیف نوفه در کنار حفظ سیگنال می‌تواند یک روش قابل اتکا در تضعیف نوفه داده‌های روش GPR باشد، زیرا توزیع نوفه‌های تصادفی در این داده‌ها کاملاً از توزیع گوسی تبعیت نمی‌کند.

- impulsive noise for indoor wireless communications, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 11 (7), 991-1001.
- Breiman, L., 1995, better subset regression using the non-negative garrote, *Technometrics*, 37, 373-384.
- Chen, Z., and Shu, J., 2011, remote sensing image merging based on Savitzky-Golay method, *Geo- spatial Information Science*, 27 (2), 29-33.
- Chen, J., Jönsson, P., Tamura, M. Z. Matsushita, B., and Eklundh, L., 2004, A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter, *Remote Sensing of Environment*. 91, 3-4, 332- 344.
- Cheyne, E., 2020, Non-Gaussian process generation, MATLAB Central File Exchange, Retrieved, (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/52193-non-gaussian-process-generation>).
- Chui, C.K., 1992, An introduction to wavelet, New York: Academic Press, ISBN:10:0121745848, 266.
- Daubechies, I., 1992, Ten lectures on wavelets, Society for Industrial and Applied Mathematics, ISBN: 0898712742, 357.
- Demirel, H., and Anbarjafari, G., 2010, Satellite image resolution enhancement using complex wavelet transform, *Geoscience and Remote Sensing Letters*, IEEE 7, 1, 123-126.
- Donoho, D. L., 1995, De-noising by soft thresholding, *IEEE transactions on information theory*, 41, 613-627.
- Donoho, D. L. Johnstone, I. M., 1994, Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage, *Biometrika*, 81, 425-455.
- Ebrahimi Bardar, A., Oskooi, B., and Goudarzi, A., 2019, comparison of GPR random noise attenuation using autoregressive-FX method and tunable quality factor wavelet transform TQWT with soft and hard thresholding, *Journal of Signal and Information Processing*, 10, 19-35.
- Ferguson, R., and Margrave, G., 2012, attenuation compensation for georadar data by Gabor deconvolution, CREWES Research, Report 24.
- Fernandes, F., Pais, J., 2017, Laboratory observation of cracks in road pavements with GPR, *Journal of Construction and Building Materials*, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.022.
- ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- کامکار روحانی، ا.، اسحاقی، ا.، و عرب امیری، ع.، ۱۳۹۱، پردازش و تفسیر داده‌های رادار نفوذی به زمین به منظور شناسایی حفره‌های زیرسطحی و بررسی لایه‌بندی، دانه بندی و برآورد میزان رس در رسوبات زیرسطحی کم عمق، *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۳۸ (۴)، ۱۷۳-۱۵۵.
- گودرزی، ع.، ۱۳۹۲، تضعیف امواج زمین غلت و نوفه‌های اتفاقی با استفاده از برخی تکنیک‌های تجزیه و تحلیل چندگانه تفکیک‌پذیر، پایان‌نامه دکتری تخصصی، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.
- گودرزی، ع.، و ملانی، ف.، ۱۳۹۷، افزایش توان تفکیک داده‌های لرزه‌ای با استفاده از تبدیل موجک گسسته مختلط، *نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی*، ۴ (۲)، ۲۱۱-۲۲۳.
- قنبری، س.، و حفیظی، م.، ۱۳۹۵، کاربرد مدل‌سازی پیشرو و الگوریتم پردازشی مناسب در تعیین محل قنات به روش GPR، *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۰ (۲)، ۶۷-۸۲.
- خداقلی، م.، و باقری، مجید.، ۱۳۹۸، استفاده از فیلتر ساویتزکی- گولای برای ارتقا کیفیت تصاویر لرزه‌ای، *اولین همایش ملی پردازش سیگنال و تصویر در ژئوفیزیک*، <https://civilica.com/doc/970463> شاهرود.
- Ata, M., Abdelakder, E.M., Abouhamad, M., Serror, M.H., and Marzouk, M., 2017, On the Use of Ground Penetrating Radar, for Bridge Deck Assessment, *International Conference on Computer Science and Application Engineering (CSAE 2017)*, ISBN: 978-1-60595-505-6.
- Awal, M. A., Mostafa, S. S., and Ahmad, M., 2011, Performance analysis of Savitzky- Golay smoothing filter using ECG signal, *International journal of computer information*, 1 (2), 24-29.
- Baba, K., Bahi, L., Ouadif, L., 2014, Enhancing Geophysical Signals Through the Use of Savitzky-Golay filtering method, *Geofísica Internacional*, 53 (4), 399-409.
- Baili, J., Lahouar, S., Hergli, M., Al-Qadi, L., and Besbes, K., 2009, GPR signal de-noising by discrete wavelet transform, *Journal of NDT&E International*, 42, 696-703.
- Bednarczyk, Z., and Szykiewicz, A., 2015, Applied Engineering Geology Methods for Exemplar Infrastructure Projects in Malopolskie and Podkarpackie Provinces, *Springer International Publishing In Engineering Geology for Society and Territory*, 6, 203-210.
- Blackard, K.L., Rappaport, T. S., Bostian, C. W., 1993, Measurements and models of radio frequency

- glaciogenic sediments in central Poland, *Studia Quaternaria*, 38 (2), 103-119.
- Liu, C. C., Dai, D. Q., and Yan, H., 2007, Local discriminant wavelet packet coordinates for face recognition, *Journal of Machine Learning Research*, 1165-1195.
- Liu, Y., Dang, B., Li, Y., Lin, H., and Ma, H., 2016, Applications of Savitzky-Golay filter for seismic random noise reduction, *Acta Geophysica*, 64(1), 101-124.
- Mallat, S.G., 1999, *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic Press, ISBN: 0-12-466606-X.
- Moghaddam, S., Oskooi, B., Goudarzi, A., and Azadi, A., 2019, The comparative sense of sparse deconvolution and least-squares deconvolution methods in increasing the temporal resolution of GPR data, *Arabian journal of Geosciences*, <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4686-4>.
- Oskooi, B., Parnow, S., Smirnov, M., Varfinezhad, R. & Yari, M., 2018, Attenuation of random noise in GPR data by image processing, *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 677.
- Oskooi, B., Julayusefi, M., and Goudarzi, A., 2015, GPR noise reduction based on wavelet thresholdings, *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 2937-2951.
- Press, W.H., and Teukolsky, S.A., 1990, savitzky-golay smoothing filters, *computers in physics*, 669-672.
- Raj, V. N. P., and Venkateswarlu, T., 2012, Denoising of medical images using dual tree complex wavelet transform, *procedia technology*, 4, 238-244.
- Robinson, E.A., and Treitel, S., 1967, Principles of digital Wiener filtering, *Geophysical Prospecting*, 15 (3), 311-332.
- Saintenoy, A., and Hopmans, J., 2011, Ground Penetrating Radar: Water Table detection sensitivity to soil water retention properties, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4 (4), 748-753.
- Savitzky, A., and Golay, M., 1964, Smoothing and differentiation, of data by simplified least squares procedures, *Analytical Chemistry*, 36, 1627-1639.
- Schmelzbach, C., and Huber, E., 2015, Efficient Deconvolution of Ground-Penetrating Radar Data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(9), 5209-5217.
- Fontul, S., Fortunato, E., De Chiara, F., Burrinha, R., and Baldeiras, M., 2016, Railways Track Characterization Using Ground Penetrating Radar, *The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016)*, 143, 1193-1200.
- Gander W., von Matt, U., 1995, Smoothing Filters. In: *Solving Problems in Scientific Computing Using Maple and MATLAB®*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-97619-3_9.
- Gurley, K. R., Tognarelli, M. A., & Kareem, A. 1997, Analysis and simulation tools for wind engineering. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 12(1), 9-31.
- Jeng, Y., Li, Y., Chen, Ch., Chien, H., 2009, Adaptive filtering of random noise in near-surface seismic and ground-penetrating radar data, *Journal of Applied Geophysics*, 68 (1), 36-46.
- Jiao, L., Ye, Q., Cao, X., Huston, D., Xia, T., 2020, Identifying concrete structure defects in GPR image, *Journal of Measurement*, 160, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107839>.
- Julayusefi, M., Goudarzi, A., Hozhabry, R., Shamounadeh, M., 2012, Application of the 2D dual tree CWT as an image processing technique to attenuate remnant random noise of GPR signal, *SEG Technical Program Expanded Abstracts Istanbul 2012 International Geophysical Conference and Oil and Gas Exhibition*.
- Ishitsuka, K., Iso, Sh., Onishi, K., Matsuoka, T., 2018, Object Detection in Ground penetrating Radar Images using a deep convolutional neural network and image set preparation by migration, *International journal of Geophysics*, <https://doi.org/10.1155/2018/9365184>.
- ITU-R Recommendation, p-372-8, 2016, Radio noise , International Telecommunication Union, Geneva.
- Kingsbury, N. G., 1998, The dual-tree complex wavelet transform: a new efficient tool for image restoration and enhancement, *Proc EUSIPCO*. 98, 319-322.
- Lahouar, S., 2003, Development of Data Analysis Algorithms for Interpretation of Ground Penetrating Radar Data. PhD Dissertation, Department of Electrical Engineering, Virginia Tech, Blacksburg.
- Lamard, M., Daccache, M., Cazuguel, W., Roux, G., and Cochener, B., 2005, Use of a JPEG-2000 wavelet compression scheme for content-based ophthalmologic retinal images retrieval, in *Proc. 27th IEEE EMBS*, 4010-4013.
- Lejerowicz, A., Wysocka, A., Kowalczyk, S., 2018, Application of ground penetrating radar method combined with sedimentological analyses in studies of

Yang, Q., 2013, GPR detection for underground water pipe based on wavelet transform and matching pursuit algorithm, International Journal of advancements in computing technology, 5, 122-127.

Yang, Y., Tong, S., Huang, S., Pan, L., 2014, Dual-Tree Complex Wavelet Transform and Image Block Residual-Based Multi-Focus Image Fusion in Visual Sensor Networks, Sensors, 14 (2), 22408-22430.

Yilmaz, Ö., 2001, Seismic data analysis. Tulsa, Society of Exploration Geophysicists, 1, 74170-2740.

Ziegler, H., 1981, Properties of digital smoothing polynomial (DISPO) filters, Applied Spectroscopy, 35, 88-92.

Zou, H., Yang, F., 2009, Image Detection of Ground Penetrating Radar Based on Wavelet Scale Space Correlation, First International Workshop on Education Technology and Computer Science, doi:10.1109/ETCS.2009.430.

Schafer, R.W., 2011, what is a savitzky-Golay filter, IEEE signal processing magazine, 1053-5888.

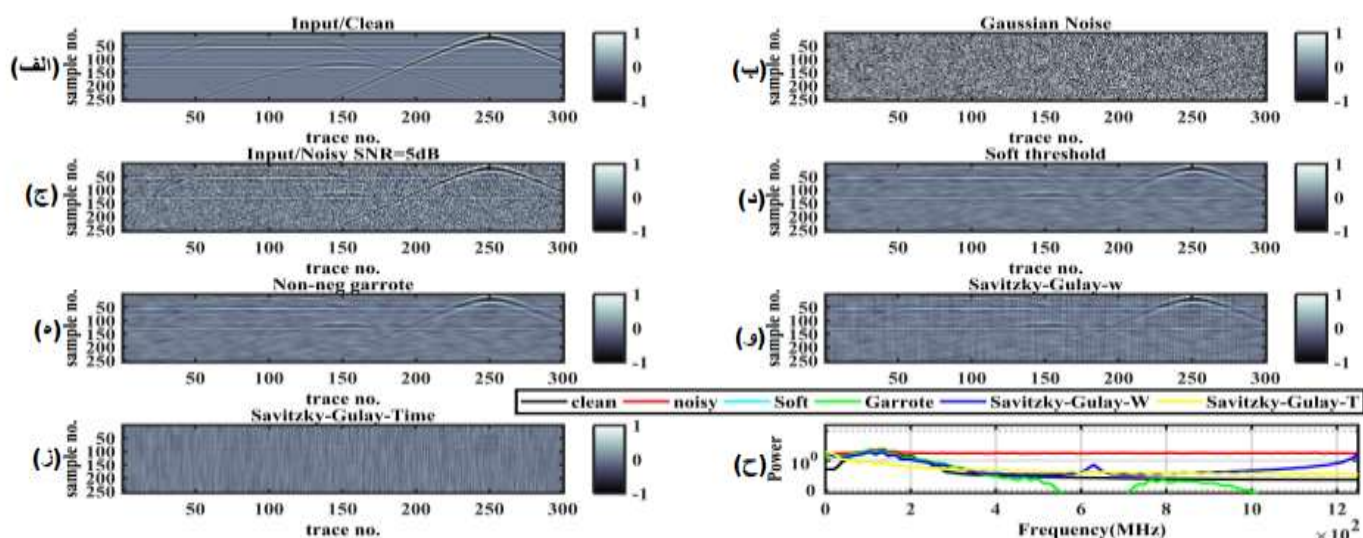
Sejdic, E.; Djurovic, I.; Jiang, J., 2009, Time-frequency feature representation using energy concentration: An overview of recent advances, Digital Signal Processing, 19 (1): 153-183.

Selesnick, I. W., Baraniuk, R. G., and Kingsbury, N. G., 2005, The dual-tree complex wavelet transform, IEEE signal processing magazine, 22, 123-151.

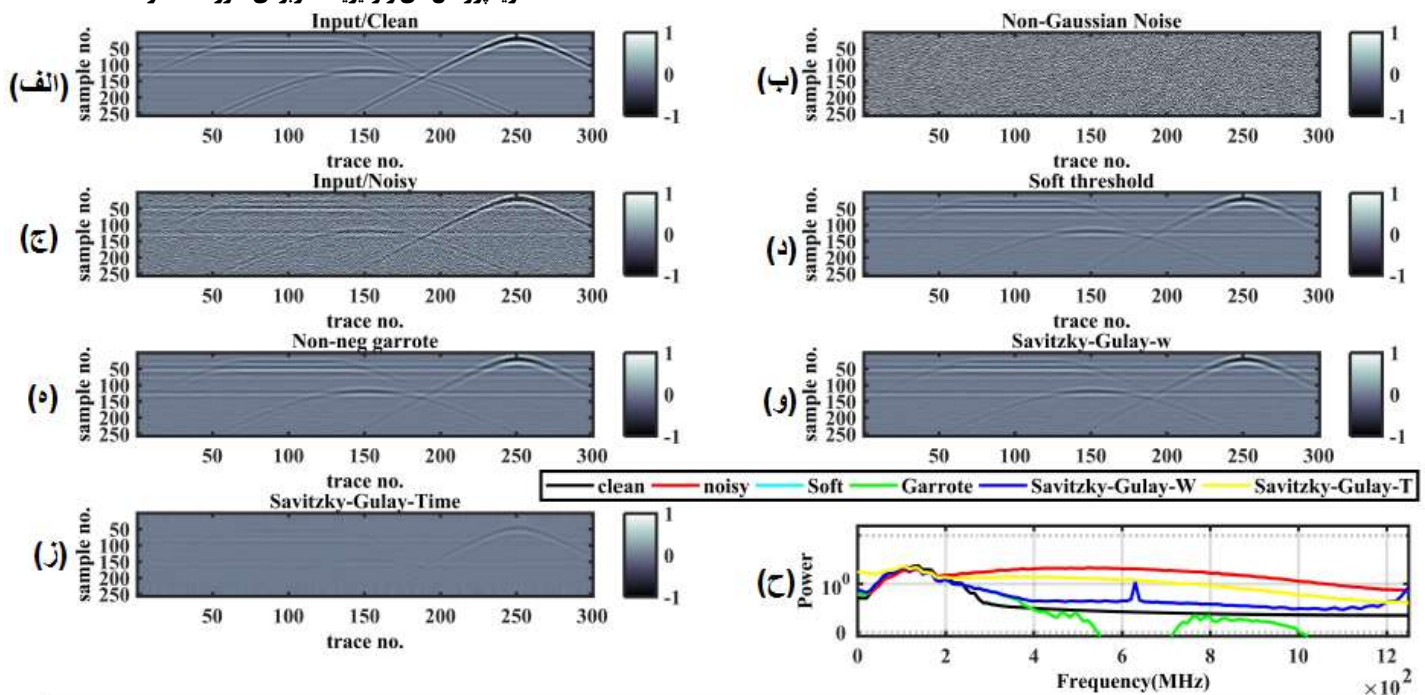
Tudor Barbu, T., 2013, Variational Image Denoising Approach with Diffusion Porous Media Flow, Abstract and Applied Analysis, doi:10.1155/2013/856876.

Wang, Y., 2015, Frequencies of the Ricker wavelet, Geophysics, 80, A31-A37.

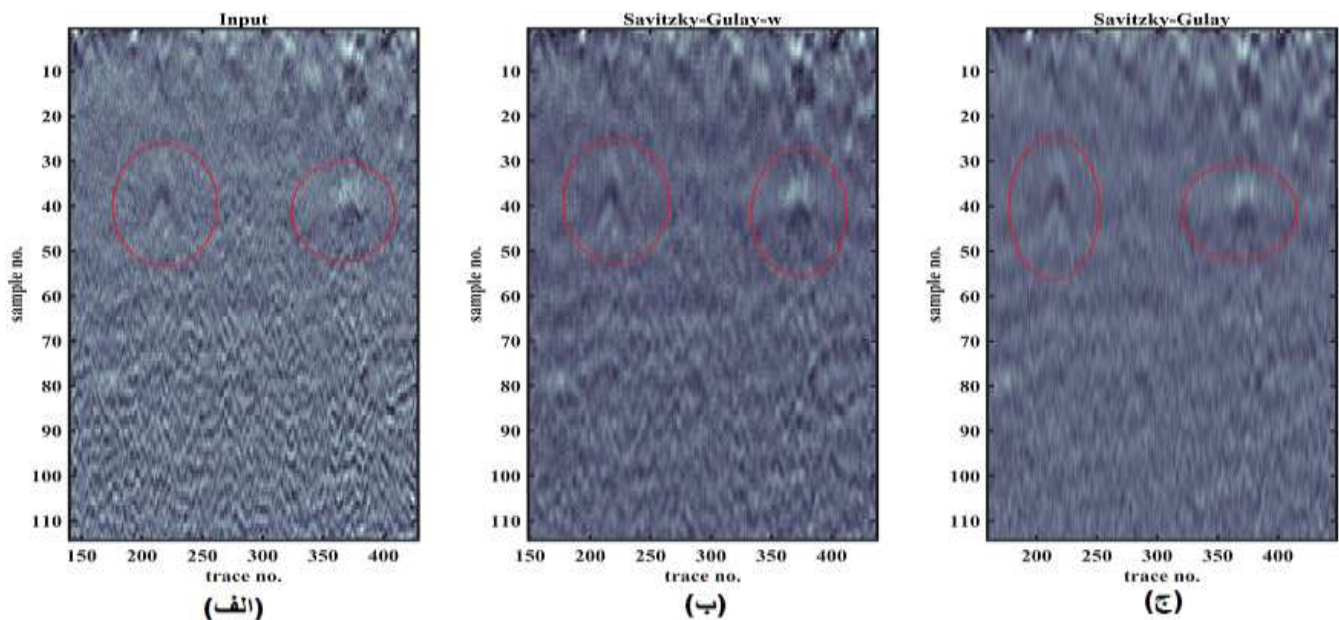
Wu, Sh., Wang, Y., Di, Z., Chang, X., 2018, Random noise attenuation by 3D Multi-directional vector median filter, Journal of Applied Geophysics, 159, 277-284.



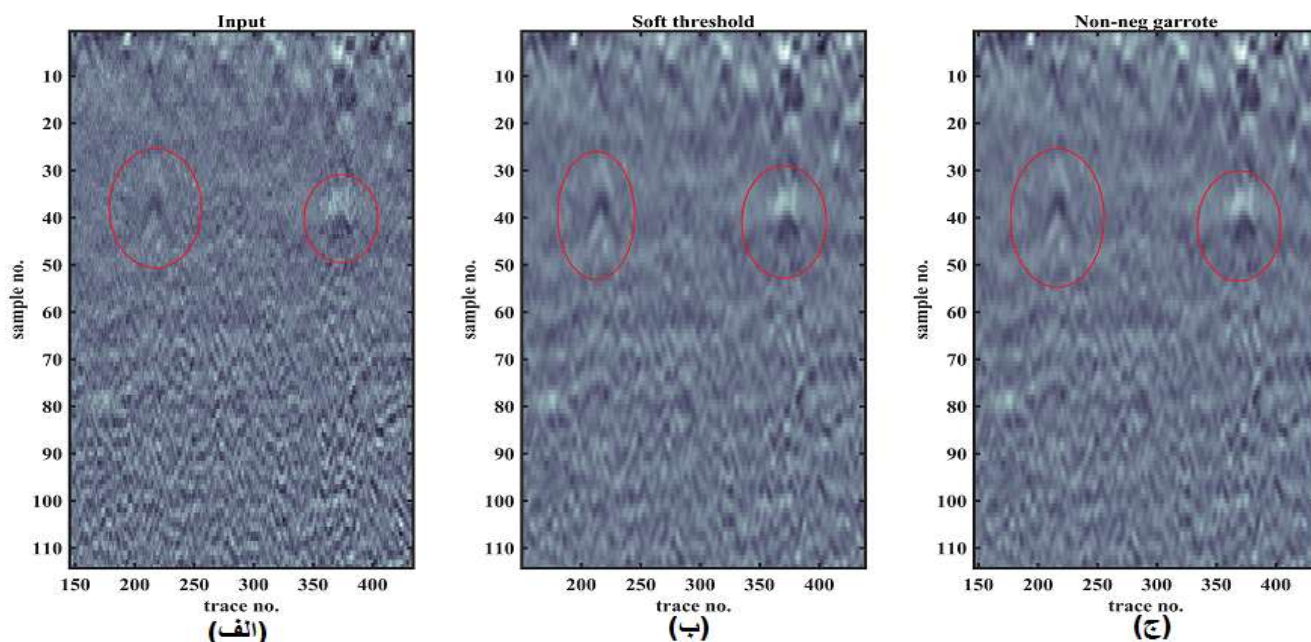
شکل ۸: الف) داده مصنوعی بدون نوفه با فرکانس غالب ۲۰۰MHz تولید شده توسط نرم افزار GPRMAX2D (ب) نوفه گوسی (ج) داده مصنوعی با نسبت سیگنال به نوفه ۵ db (د) تضعیف نوفه توسط آستانه گیری نرم در حوزه DTCWT (ه) تضعیف نوفه توسط آستانه گیری گاروت غیرمنفی در حوزه DTCWT (و) اعمال فیلتر پیشنهادی SG-DTCWT (ز) اعمال فیلتر SG در حوزه زمان (ح) طیف توان روش های مذکور.



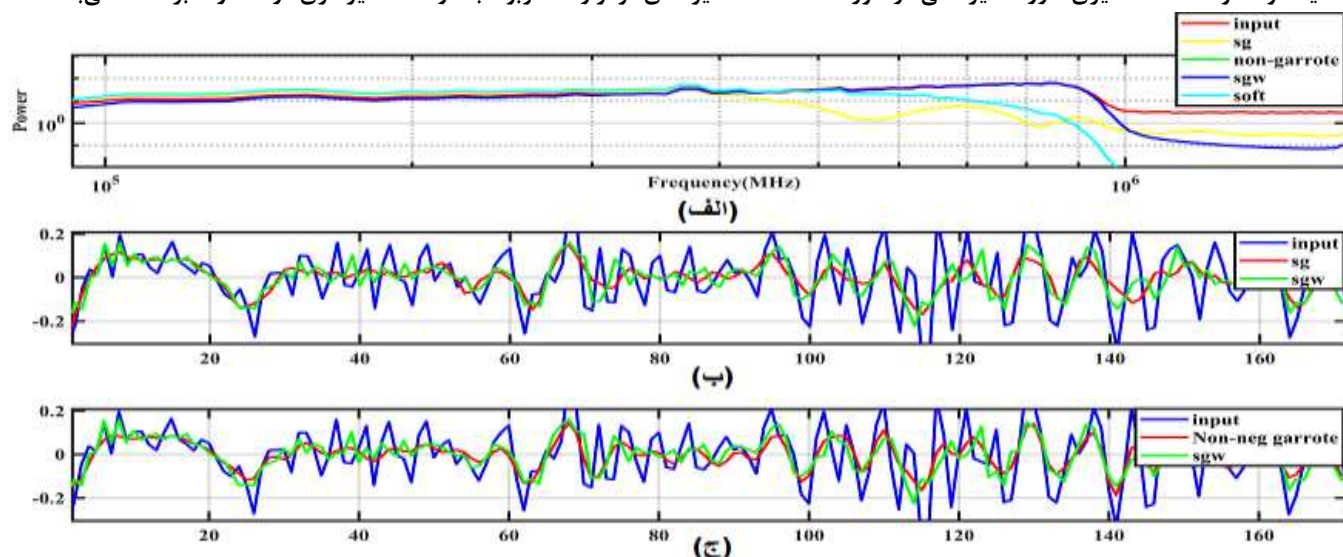
شکل ۹: الف) داده مصنوعی بدون نوفه با فرکانس غالب ۲۰۰MHz تولید شده توسط نرم‌افزار GPRMAX2D (ب) نوفه غیرگوسی تولید شده با استفاده از رهیافت (Cheynet 2020) (ج) داده مصنوعی با نسبت سیگنال به نوفه ۵ db (د) تضعیف نوفه توسط آستانه‌گیری نرم در حوزه DTCWT (ه) تضعیف نوفه توسط آستانه‌گیری گاروت غیرمنفی در حوزه DTCWT (و) اعمال فیلتر پیشنهادی SG-DTCWT (ز) اعمال فیلتر SG در حوزه زمان (ح) طیف توان روش‌های مذکور.



شکل ۱۰: الف) داده واقعی برداشت‌شده همراه با بزرگنمایی توسط آنتن ۸۰۰ MHz، (ب) تضعیف نوفه توسط فیلتر SG-DTCWT (ج) تضعیف نوفه توسط فیلتر SG در حوزه زمان، دایره‌های قرمز رنگ مربوط به دو هدف غیرفلزی در محدوده برداشت می‌باشند.



شکل ۱۲: الف) داده واقعی برداشت شده همراه با بزرگنمایی توسط آنتن ۸۰۰ MHz، ب) تضعیف نوفه توسط آستانه‌گیری نرم در حوزه DTCWT (ج) تضعیف نوفه توسط آستانه‌گیری گاروت غیرمنفی در حوزه DTCWT، دایره‌های قرمز رنگ مربوط به دو هدف غیرفلزی در محدوده برداشت می‌باشند.



شکل ۱۳: الف) طیف توان داده واقعی به رنگ قرمز، طیف توان داده پس از اعمال روش SG به رنگ زرد، طیف توان داده پس از اعمال روش آستانه‌گیر گاروت غیرمنفی به رنگ سبز، طیف توان داده پس از اعمال روش SG-DTCWT به رنگ آبی پررنگ و طیف توان داده پس از اعمال روش آستانه‌گیر نرم به رنگ آبی کمرنگ، ب) منحنی آبی رنگ رد ۱۲۰م داده واقعی برداشت شده توسط آنتن ۸۰۰ MHz، منحنی قرمز رنگ رد ۱۲۰م داده واقعی بعد از اعمال فیلتر SG و منحنی سبز رنگ رد ۱۲۰م بعد از اعمال روش SG-DTCWT می‌باشد. ج) منحنی آبی رنگ رد ۱۲۰م داده واقعی برداشت شده توسط آنتن ۸۰۰ MHz، منحنی قرمز رنگ رد ۱۲۰م داده واقعی بعد از اعمال روش آستانه‌گیر گاروت غیرمنفی و منحنی سبز رنگ رد ۱۲۰م بعد از اعمال روش SG-DTCWT می‌باشد.