



مدلسازی پروفیل سرعت موج برشی با وارون‌سازی داده‌های HVSR با استفاده از الگوریتم CJAYA

راشدپور میرزائی^{*۱}

۱- دانشیار؛ دانشکده صنایع و فناوری‌های معدنی، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی ارومیه

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۱۳؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴

* نویسنده مسئول مکاتبات: rashed.poormirzaee@gmail.com

چکیده

شناخت ساختار سرعت موج برشی (Vs) در مطالعات مهندسی مرتبط با حوزه علوم زمین بسیار حائز اهمیت است. بطوریکه در مطالعات مربوط به اثر ساختگاه، Vs و فرکانس طبیعی کلیدی‌ترین متغیرها می‌باشند. جهت مدلسازی سرعت موج برشی تکنیک‌های مختلفی وجود دارد. اما استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی در شناخت این متغیرها به دلیل عدم تخریب محیط زیست و سرعت و دقت مناسب همواره مورد نظر مهندسان بوده است. در چند سال اخیر استفاده از امواج میکروترومور بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. روش برداشت میکروترومور تک ایستگاهی به دلیل سهولت و سرعت بالا در برداشت داده، از جمله روش‌هایی است که در دهه گذشته در مدلسازی Vs بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این روش بعد از جمع‌آوری امواج میکروترومور (با لرزه‌نگار سه مولفه‌ای) نسبت طیفی مولفه افقی به قائم (Horizontal to vertical spectral ratio) در فرکانس‌های مختلف محاسبه شده و نمودار مربوطه که نمودار HVSR نامیده می‌شود به دست می‌آید. با وارون‌سازی این نمودار می‌توان ساختار Vs را تخمین زد. اما وارون‌سازی مناسب داده‌های HVSR در دستیابی به یک مدل قابل اعتماد از Vs بسیار حائز اهمیت است. در این مطالعه یک روش وارون‌سازی جدید و مناسب بر مبنای الگوریتم فراکاووشی CJAYA پیشنهاد شده است که با ایجاد تغییراتی در الگوریتم اصلی JAYA برای وارون‌سازی داده‌های HVSR کاربردی و قابل استفاده است. سرعت همگرایی بالا و عدم نیاز به تنظیم پارامترهای داخلی از ویژگی‌های این الگوریتم می‌باشند. روش پیشنهادی در این مطالعه علاوه بر داده‌های ساختگی (در حالت وجود نوفه و بدون آن)، با استفاده از داده‌های واقعی نیز مورد آزمون قرار گرفت. نتایج بیانگر کارایی، دقت و سرعت بالای روش پیشنهاد شده می‌باشد. بطوریکه کارایی روش پیشنهاد شده در در تخمین پارامترهای مدل (Vs و ضخامت لایه‌ها) در حضور نوفه و بدون آن در مقایسه با الگوریتم اصلی JAYA از برتری برخوردار بود و همچنین همگرایی به پاسخ نهایی در تعداد تکرارهای کمتر به دست آمد.

واژگان کلیدی

سرعت موج برشی
وارون‌سازی
HVSR
الگوریتم فراکاووشی
مدلسازی

۱- مقدمه

زمین‌لرزه یک پدیده طبیعی است که همواره در طول تاریخ بشر بطور غیرقابل پیش بینی فجایع بزرگی را رقم زده است. این پدیده در اثر آزادسازی انرژی کرنشی جمع شده در ناحیه کانونی و انتشار قسمتی از آن به محیط اطراف رخ می‌دهد (Nakamura, 1998). برطبق مطالعات مختلف میزان خسارت زلزله‌ها در شهرها و کانون‌های جمعیتی که بر روی رسوبات نسبتاً نرم در مقایسه با سنگ‌بستر (سخت) قرار گرفته‌اند، از شدت و خسارت بیشتری برخوردار بوده است (Chen et al., 2009; Alizadeh et al., 2021). پیش بینی زلزله‌ها در حال حاضر غیرممکن است اما با بررسی الگوی رخداد آنها دیده می‌شود که هر چند سال در گوشه‌ای از دنیا زلزله‌های بزرگ و مرگبار رخ می‌دهند. اما با پیشرفت‌های جدید در حوزه مقاوم سازی از یک سو و اهمیت دادن به مطالعات اثر ساختمان از سوی دیگر، در کشورهای توسعه یافته اثبات شده است که می‌توان از تلفات انسانی و مادی پیشگیری کرد. بخش مهمی از خسارت حاصل از زمین‌لرزه‌های مخرب، به خصوصیات و اثرات ساختمان نسبت داده می‌شود، بعنوان مثال می‌توان به زمین لرزه لوما پریتا در سال ۱۹۸۹ میلادی در آمریکا اشاره کرد (Qadri et al., 2015). با تعیین پیروید طبیعی این مناطق، محققان دریافته‌اند که فرکانس طبیعی لایه‌های آبرفتی موجود، با فرکانس امواج لرزه‌ای رسیده به محل انطباق داشته و لذا سبب پدیده تشدید در ساختمان شده است (نورمحمدی و همکاران، ۱۳۹۸). لذا مطالعه فرکانس طبیعی در حین ساخت سازه‌های پراهمیت از مهمترین پارامترها در مطالعات ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای است. علاوه بر فرکانس غالب، مطالعه سرعت موج برشی ساختمان نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. (Borcherdt (1994 میانگین سرعت موج برشی ۳۰ متر اول خاک (Vs30) را برای طبقه‌بندی ساختمان و طراحی لرزه‌ای توصیه می‌کند. تهیه نقشه‌های هم‌سرعت موج برشی و سرعت معادل (Vs30) و زمین-شناسی محلی از مهم‌ترین فاکتورهای طبقه‌بندی ساختمان هستند (Maheswari et al., 2010). پیش‌بینی حرکت زمین در برابر زمین‌لرزه‌ها در خاک‌های کم ضخامت نیازمند دانستن سرعت امواج برشی و تغییرات آن در عمق می‌باشد. اطلاع از ساختار سرعت موج برشی برای پیش‌بینی جواب حرکت زمین در برابر زلزله‌ها بسیار مهم می‌باشد (Hunter et al., 2002).

روش‌های مختلفی برای محاسبه سرعت موج برشی مانند استفاده از روش‌های برداشت درون چاهی و یا وارون‌سازی منحنی پاشش امواج سطحی، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. روش‌های مبتنی بر گمانه‌ها هر چند از دقت بالایی برخوردارند اما استفاده از آنها به لحاظ میزان هزینه، زمانبر بودن و نیز ویژگی‌های تخریبی خود با محدودیت‌هایی روبه‌رو هستند. روش‌های مبتنی بر امواج میکروترومورها جهت مدلسازی پروفیل سرعت موج برشی بطور روزافزون مورد توجه محققین قرار می‌گیرد که از جمله آنها می‌توان به (Poormirzaee, 2016), (Angardi et al., 2024), (Maghami et al., 2021) اشاره نمود. از جمله روش‌های مبتنی بر امواج میکروترومور که در سال‌های اخیر به دلیل برداشت داده آسان و سریع و در نتیجه کم بودن هزینه‌های مرتبط با آن در مطالعات اثرساختمان استفاده شده است، روش وارون‌سازی بیضی‌واری امواج ری‌لی و یا روش

HVSR می‌باشد. در این روش که به روش ناکامورا نیز معروف است، بعد از جمع‌آوری داده مایکروترومور از طریق محاسبه نسبت طیفی مولفه افقی به قائم (Horizontal to vertical spectral ratio (HVSR)) در فرکانس-های مختلف، نمودار HVSR به دست می‌آید. با پیک مشاهده شده در این نمودار می‌توان فرکانس غالب ساختمان را تعیین نمود و همچنین با وارون‌سازی این نمودار نیز می‌توان ساختار سرعت موج برشی را محاسبه کرد. از روش HVSR در مطالعات ژئوتکنیکی مختلفی بمنظور تخمین فرکانس تشدید و یا مدلسازی پروفیل سرعت موج برشی استفاده شده است.

(Arai and Tokimatsu (2004 با استفاده از وارون‌سازی نمودار HVSR سرعت موج برشی را در ۶ ایستگاه واقع در شهر توکیو تا عمق ۱۰۰ متر مدلسازی کردند و سپس نتایج خود را با داده‌های درون چاهی (PS log) مقایسه نمودند. در این مقایسه میانگین خطای تخمین Vs برابر با ۱۰٪ بود.

(Özalaybey et al. (2011 بمنظور مطالعه اثر ساختمان ناحیه Izmit Bay از داده‌های HVSR و ترکیب آن با داده‌های گرانی سنجی استفاده نمودند. به این منظور از داده‌های مایکروترومور تک ایستگاهی (۲۳۹ ایستگاه) فرکانس تشدید و نیز ساختار موج برشی تخمین زده شد و از داده‌های گرانی سنجی اطلاعات مفیدی در خصوص لایه‌های سنگی زیرسطحی به دست آمد. نتایج آنها نشان داد، ساختمان مورد مطالعه از یک لایه ضخیم رسوبات که با یک لایه نازک کم سرعت پوشیده شده و بر روی یک سنگ بستر سخت قرار گرفته، تشکیل شده است. Moon et al. (2019) روش‌های مایکروترومور آرایه‌ای و مایکروترومور تک ایستگاهی (H/V) را برای به دست آوردن ساختار سرعت موج برشی بکار بردند. برطبق نتایج آنها روش دوم بهترین دقت را در تخمین عمق سنگ بستر داشت. حکیمی و همکاران (۱۳۹۷)، با استفاده از داده‌های HVSR مایکروترومور به مطالعه اثر ساختمان در شهر زنجان پرداختند. آنها با طراحی و برداشت ۴۱ ایستگاه در نقاط مختلف شهر، فرکانس تشدید را با استفاده از نمودار HVSR محاسبه کردند و سپس پهنه‌بندی خطر زلزله در شهر زنجان را ارائه دادند. نتایج این مطالعه بیانگر تطابق یافته‌های آنها با اطلاعات حاصل از گمانه‌های ژئوتکنیکی بود. Maghami et al. (2021)، از روش HVSR جهت مدلسازی سه بعدی سرعت موج برشی در دشت قم استفاده کردند. برای این کار، ابتدا مایکروترومور تک آرایه‌ای در نقاط مختلف شهر قم (۴۳ نقطه) برداشت شد و سپس نمودار HVSR هر ایستگاه مورد وارون‌سازی با استفاده از نرم افزار OpenHVSR-Inversion قرار گرفت. جهت افزایش دقت در وارون‌سازی داده‌ها از اطلاعات کمکی (شامل اطلاعات گمانه‌های موجود، داده‌های لرزه‌نگاری و مقاومت سنجی) استفاده شد. نتایج بیانگر مدلسازی مناسب Vs30 و تطابق خوب ساختار تخمینی سنگ بستر با مورفولوژی حوزه رسوبی بود.

(Kafadar and İmamoğlu (2022 با استفاده از الگوریتم ژنتیک خیره، داده‌های ساختگی و واقعی HVSR را وارون‌سازی و پارامترهای دینامیک خاک را تخمین زدند. نتایج این مطالعه بیانگر کارایی ودقت خوب روش بکاربرده شده در مقایسه با روش مایکروترومور آرایه در تخمین سرعت موج برشی است. (Angardi et al. (2024 با استفاده از داده‌های

۲- معرفی الگوریتم CJaya

الگوریتم Jaya در سال ۲۰۱۶، توسط Rao بعنوان یک الگوریتم فراکاوشی ارائه شد که یک روش جستجو مبتنی بر اصل بقای اصلح/شایسته می‌باشد. این اصل که توسط چارلز داروین در سال ۱۸۶۹ ارائه شد، بیان می‌کند گونه‌هایی از موجودات که به بهترین وجه با محیط خود سازگار شده‌اند در بقا و تولید مثل موفق‌ترین هستند (Darwin, 1985). Jaya در زبان سانسکریت بمعنی قهرمان است. در این الگوریتم راهبرد اصلی آنست که در هر تکرار پاسخ‌های موجود $(X_{j,k,i})$ به بهترین پاسخ ارائه شده نزدیک شوند و در عین حال از بدترین پاسخ در همان تکرار نیز فاصله بگیرند (معادله ۱) (Rao, 2016). معیار ارزیابی پاسخ‌ها تابع خطا $(F_f(X))$ در نظر گرفته می‌شود. اگر به تعداد n ذره (پاسخ محتمل) در جمعیت داشته باشیم در هر تکرار موقعیت ذرات توسط رابطه زیر به روز رسانی می‌شوند.

$$x'_{j,k,i} = x_{j,k,i} + r_{1,j,i}(x_{j,best,i} - |x_{j,k,i}|) - r_{2,j,i}(x_{j,worst,i} - |x_{j,k,i}|) \quad (1)$$

$X_{j,k,i}$ بیانگر ژن‌های متغیر در k امین ذره جمعیت در تکرار i ام است. همچنین $r_{1,j,i}$ و $r_{2,j,i}$ اعداد تصادفی تولید شده در دامنه $[0,1]$ می‌باشند. $X_{j,best,i}$ بهتر ذره (یا پاسخ) و $X_{j,worst,i}$ بدترین ذره (یا پاسخ) می‌باشند. $x'_{j,k,i}$ در هر تکرار با $X_{j,k,i}$ مقایسه شده و در صورتیکه مقدار تابع خطای آن کوچکتر باشد، بعنوان بهترین حل حفظ می‌شود و در غیر اینصورت $X_{j,k,i}$ جایگزین آن خواهد شد (Rao, 2016). این فرایند یعنی تولید یک پاسخ جدید با استفاده از رابطه بالا و مقایسه با پاسخ‌های موجود در یک حلقه با تعداد تکرار معین انجام می‌شود تا در نهایت بهترین پاسخ یا ذره بعنوان حل مسئله معرفی شود.

بطور کلی گام‌های لازم برای الگوریتم اصلی JAYA بصورت زیر می‌باشد.

- ۱) تعیین تابع هدف/خطا متناسب با مسئله مورد نظر: $F_f(X)$
- ۲) تولید تصادفی جمعیت اولیه (پاسخ‌های محتمل)
- ۳) یافتن بهترین و بدترین پاسخ در بین جمعیت اولیه
- ۴) تولید یک ذره/حل جدید بر مبنای معادله ۱
- ۵) ارزیابی کیفیت (خطا) حل جدید $(x'_{j,k,i})$ و به‌روزرسانی بهترین و بدترین حل (مدل)
- ۶) تکرار فرایند از مرحله ۴ برای کل جمعیت اولیه
- ۷) معرفی بهترین حل موجود بعنوان پاسخ نهایی مسئله.

در الگوریتم‌های فراکاوشی، مکانیسم جستجو به دو بخش رفتار اکتشافی و رفتار استخراجی تقسیم بندی می‌شود. تفاوت الگوریتم‌های مختلف فراکاوشی عمدتاً به همین دو بخش برمی‌گردد. در الگوریتم Jaya (کلاسیک) این دو رفتار با معادله ۱ صورت می‌گیرد. به این منظور دو عدد تصادفی تولید شده با ضرب در جمله دوم و سوم معادله ۱ و جمع آنها با جمله اول تعیین می‌کند که رفتار اکتشافی شدیدتر باشد و یا رفتار استخراجی. اگر فاصله بین بهترین پاسخ با پاسخ یا ذره فعلی و

مایکروترموتر تک ایستگاهی (H/V) سرعت موج برشی را در شهر تبریز مدلسازی نمودند. آنها برای وارون‌سازی الگوریتم هوش مصنوعی آنسامبلی را (بدون نیاز به اطلاعات کمکی) پیشنهاد دادند. بر مبنای نتایج آنها کارایی روش تک ایستگاهی در مقایسه با مایکروترموتر آرایه‌ای، در تخمین V_{S30} از سرعت بالاتر و دقت مناسب برخوردار است.

مانند وارون‌سازی سایر داده‌های ژئوفیزیکی، وارون‌سازی نمودار HVSR با عدم قطعیت و ابهام روبه‌رو می‌باشد. که برای کاهش این ابهام استفاده از داده‌های اولیه مانند اطلاعات زمین شناسی و گمانه‌ها بسیار مهم می‌باشند (Hobiger et al., 2013). در مطالعات متعدد نشان داده شده است با استفاده از اطلاعات اولیه و بکارگیری روش‌های مناسب وارون‌سازی HVSR می‌توان ساختارهای موج برشی را با دقت قابل قبول مدلسازی نمود (Cipta et al., 2018; Layadi et al., 2018; Hallo et al., 2021).

پس از جمع آوری داده‌های مایکروترموتر تک ایستگاهی و استخراج منحنی HVSR، وارون‌سازی این نمودار انجام می‌گیرد. بکارگیری روش مناسب جهت وارون‌سازی داده‌ها، در ارائه پاسخ صحیح و مدل مناسب از اهمیت برخوردار است.

به‌طور کلی وارون‌سازی دارای ابهام ذاتی بوده اما ترکیب دیگر داده‌های کمکی همچون اطلاعات زمین‌شناسی و گمانه‌ها به فرایند وارون‌سازی، طیف وسیعی از مدل‌های احتمالی را محدود می‌کند و لذا کمک می‌شود تا یک مدل مفهومی نهایی ارائه گردد. در مسائل ژئوفیزیکی مقادیر تابع خطا (F_e) بشکل اختلاف داده مشاهده شده (f_{obs}) و داده پیش‌بینی شده (f_{est}) بیان می‌شود (رابطه ۱):

$$F_e = f_{obs} - f_{est} \quad (1)$$

معادله فوق می‌تواند یک معادله ساده و یا بسیار پیچیده و شامل چندین کمینه و بیشینه باشد (Menke, 1989). کوچک‌ترین این کمینه‌ها را کمینه کلی و تمامی کمینه‌های دیگر را کمینه محلی می‌نامند. لذا هدف از وارون‌سازی حل معادله فوق و یافتن نقطه‌ای بعنوان پاسخ است که کمترین هزینه (خطا) را دارد. روش‌های مختلفی برای حل معادله فوق پیشنهاد شده است. اما در سال‌های اخیر روش‌های غیرخطی بر مبنای الگوریتم‌های فراکاوشی، به دلیل سرعت و دقت بالا، از توجه بسیار برخوردار شده‌اند. در این الگوریتم‌ها با بکارگیری راهبردهای هوشمندانه، که عمدتاً از طبیعت، جانداران و یا پدیده‌های فیزیکی و یا قوانین ریاضی الهام گرفته شده‌اند، یافتن کمینه کلی قابل دسترس بوده و به دلیل سادگی روابط حاکم بر آنها دارای کدنویسی آسان‌تر هستند. در این مطالعه جهت وارون‌سازی داده‌های HVSR یک روش جدید بر مبنای الگوریتم Jaya که اخیراً ارائه شده است استفاده شد. علاوه بر این جهت ارتقاء سرعت همگرایی این الگوریتم در وارون‌سازی مسئله، با ایجاد تغییراتی و اضافه نمودن یک عملگر جهش قابلیت آن بهبود داده شد و الگوریتم جدید CJAYA نامیده شد. در ادامه و در بخش ۲ این مقاله به معرفی الگوریتم CJAYA پرداخته می‌شود. در بخش ۳ به داده‌های HVSR و در بخش ۴ این مقاله به وارون‌سازی داده‌های ساختگی و واقعی HVSR با الگوریتم پیشنهاد شده پرداخته شده است. همچنین در بخش ۵، نتایج این مطالعه بحث شده است.

$$r_k = r_{max} - (r_{max} - r_{min}) \times \frac{1}{I_{max}} \quad (3)$$

در معادله ۳، r_{min} و r_{max} به شکل زیر محاسبه می‌شوند.

$$r_{max} = \frac{1}{N_l} \quad (4)$$

$$r_{min} = \frac{1}{N_t} \quad (5)$$

که در معادله بالا N_l مربوط به تعداد لایه‌های مدل (در بخش بعدی در مورد این پارامتر بحث می‌شود) و N_t بیانگر تعداد ذرات جمعیت و یا تعداد کل پاسخ‌های اولیه می‌باشد. همچنین در معادله ۳، I و I_{max} بترتیب برابر با تعداد کل تکرارهای تعیین شده برای الگوریتم و شماره تکرار فعلی در حین اجرای الگوریتم می‌باشند. همانطور که دیده می‌شود با افزایش تکرارها، مقدار پارامتر r_k کاهش خواهد یافت.

بنابراین در الگوریتم CJaya، در گام ۴ الگوریتم اصلی Jaya علاوه بر معادله ۱ از معادله ۲ نیز در تولید پاسخ‌های جدید استفاده می‌شود. عبارتی در صورتیکه مقدار تصادفی rand از Pr کوچکتر باشد، الگوریتم از معادله ۱ برای تولید پاسخ جدید استفاده می‌کند در غیراینصورت از معادله ۲ برای تولید پاسخ یا ذره جدید استفاده می‌شود. مقدار Pr بین ۰ و ۱ بوده اما تعیین مقدار مناسب آن وابسته به مسئله بوده و با چندبار اجرای کد مشخص می‌شود. در بخش بعدی در قالب وارون‌سازی مدل‌های مصنوعی به تفاوت دو الگوریتم اشاره می‌شود و همچنین به جزئیات بیشتر الگوریتم CJaya و کارایی مناسب آن در وارون‌سازی داده‌های HVSR پرداخته خواهد شد.

۳- داده‌های HVSR مایکروترمو

نقش پارامترهای دینامیکی خاک در پاسخ لرزه‌ای ساختگاه در حوزه‌های رسوبی موضوع بسیاری از تحقیقات لرزه‌ای در دهه‌های گذشته بوده است. وجود یک لایه رسوبی می‌تواند حتی در اثر رخداد یک زلزله ضعیف سبب تقویت جنبش زمین و در نتیجه خسارتهای شدید به شهرها و اماکن در یک منطقه شود. مطالعه پاسخ لرزه‌ای با استفاده از مطالعه مستقیم و گمانه‌ها هزینه بر و زمانبر بوده و لذا استفاده از روش‌های لرزه‌ای مبتنی بر امواج مایکروترمو بخصوص در مناطق شهری می‌تواند یک انتخاب مناسب باشد. امواج مایکروترمو در واقع امواج لرزه‌ای و یا نوفه‌های محیطی هستند که می‌توانند توسط پدیده‌های مختلف صنعتی مانند ترافیک و فعالیت‌های انسانی و یا طبیعی مانند امواج حاصل از تغییرات آب و هوایی تولید شوند. روش‌های مبتنی بر امواج مایکروترمو جزء روش‌های با چشمه‌های غیرفعال طبقه بندی می‌شوند و محتوی فرکانسی پایینی را در بر می‌گیرند. Nogoshi & Igarashi در سال ۱۹۷۱ میلادی دریافتند که پیک مشاهده‌شده در نمودار نسبت طیفی مؤلفه افقی به قائم مربوط به منحنی بیضی‌واری امواج ری‌لی مد غالب بوده و نشانگر ساختار خاکی کم‌عمق است. Nakamura در ادامه مطالعه مایکروترموها و استفاده از آن در ژاپن، در سال ۱۹۸۹ میلادی یک روش جدید به نام HVSR یا H/V معرفی نمود که یک روش بسیار سریع و در مطالعات لرزه‌ای مناطق وسیع بسیار مناسب و کم هزینه است. داده‌های HVSR، برخلاف داده‌های مایکروترمو آرایه‌ای که از طریق چند

همچنین فاصله بین بدترین پاسخ با پاسخ و یا ذره فعلی نزدیک باشند، رفتار استخراجی الگوریتم از شدت بیشتری برخوردار خواهد بود. در غیر اینصورت رفتار اکتشافی الگوریتم (جستجوی تصادفی نواحی دورتر از پاسخ فعلی) انجام خواهد گرفت. جهت همگرایی بهتر و سریعتر هر الگوریتم فراکاوشی لازم است تعادل بین این دو رفتار برقرار باشد. هر الگوریتمی از معایب و مزایایی برخوردار است و می‌توان گفت هیچ الگوریتمی توانایی حل تمام مسائل بهینه سازی را ندارد (Poormirzaee and Kabgani, 2022). بعبارت دیگر یک الگوریتم می‌تواند برای یک مسئله عملکرد فوق العاده و برای مسئله‌ای دیگر کارایی پایینی را نشان دهد. اما الگوریتم Jaya از یک مکانیسم بسیار ساده برخوردار بوده و لذا سبب افزایش سرعت همگرایی در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها می‌شود. این موضوع در مطالعات مختلف گزارش شده است (Houssein, et al., 2021). این الگوریتم در حل برخی مسائل بهینه سازی در مقایسه با الگوریتم‌های فراکاوشی شناخته شده‌ای مانند الگوریتم ژنتیک از کارایی بالاتری برخوردار بوده است (مکرم و نیکنام، ۱۳۹۵). از ویژگی‌های الگوریتم Jaya آنست که دارای مفهوم و مکانیسم ساده و بدون پیچیدگی بوده که هم کد نویسی آن را آسان نموده و هم سبب همگرایی سریعتر آن شده است. از مزایای دیگر این الگوریتم آن است که به تنظیم پارامترهای داخلی نیاز ندارد. به همین جهت این الگوریتم در بهینه سازی انبوهی از مسائل واقعی با موفقیت بکار گرفته شده است (Zitar et al., 2022). بعنوان مثال از الگوریتم Jaya در حوزه مهندسی در بهینه سازی و یافتن پارامترهای بهینه مربوط به سلول‌های خورشید و همچنین یافتن مقدار بهینه پارامترهای مدل باطری‌های لیتیومی-یون استفاده شده است (Long et al., 2018; Vinh and Son, 2020). اما کارایی این الگوریتم در وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است. الگوریتم Jaya، با توجه به معادله ۱ و نیز ذات تصادفی بودن جمعیت اولیه، در شروع جستجو، به دلیل بیشتر بودن فاصله بهترین و بدترین پاسخ با پاسخ فعلی، رفتار اکتشافی شدیدتری از خود نشان داده و در مراحل پایانی، برعکس این رفتار یعنی رفتار استخراجی را از خود نشان می‌دهد (Zitar et al., 2022). این درحالیست، همانطور که قبلاً بیان شد، همگرایی مناسب یک الگوریتم زمانی اتفاق خواهد افتاد که یک تعادل در تمام زمان جستجو بین دو رفتار اکتشافی و استخراجی برقرار باشد. لذا بعد از بکاربردن الگوریتم Jaya در وارون‌سازی داده‌های HVSR، بمنظور دستیابی به پاسخ‌های صحیح و سرعت همگرایی بالاتر، تصمیم گرفته شد با ایجاد تغییر در الگوریتم Jaya و اضافه نمودن یک عملگر جهش به آن، در عملکرد الگوریتم بهبود ایجاد شود. این الگوریتم جدید و سفارشی برای داده‌های مورد استفاده، الگوریتم Customized Jaya یا CJaya نامیده شد که در ادامه به معرفی آن پرداخته می‌شود.

بمنظور پوشش ضعف اشاره شده الگوریتم Jaya، تصمیم گرفته شد یک مقدار ثابت Pr در نظر گرفته شود و به‌ازای مقادیر مختلف تصادفی rand علاوه بر معادله ۱ از یک معادله دیگر بشکل زیر استفاده شود.

$$X'_{j,k,i} = X_{j,best,i} + r_k(X_k - X_l) \quad (2)$$

در معادله بالا X_l و X_k دو پاسخ یا ذره می‌باشند که بصورت تصادفی از جمعیت موجود انتخاب می‌گردند. r_k وابسته به میزان تکرار تعیین شده و در الگوریتم بوده و از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

می‌باشد که نکات آن در دستورالعمل (2004) SESAME بیان شده است. از آنجایی که نمودار HVSR بدون بعد بوده و از نسبت دو مقدار هم جنس محاسبه شده است و آرون‌سازی آن و تخمین پارامترهای مدل از ابهام بالایی برخوردار است و لذا استفاده از اطلاعات کمکی مانند اطلاعات زمین شناسی و یا استفاده از سایر روش‌های ژئوفیزیکی برای دستیابی به پاسخ نهایی دقیق بسیار حائز اهمیت می‌باشد. چراکه مدل‌های مختلف با ضخامت‌ها و سرعت‌های برشی متفاوت می‌توانند یک نمودار HVSR را تولید کنند. همزمان استفاده از تکنیک‌های آرون‌سازی هوشمند و دقیق از دیگر راهبردهای مهم برای دستیابی به پاسخ صحیح می‌باشد. همچنین در (Sanchez-Sesma, 2017) توصیه شده است در صورتیکه اطلاعات اولیه کم باشد و یا وجود نداشته باشد، بهتر است از آرون‌سازی همزمان نمودار HVSR و نمودار پاشش امواج سطحی استفاده شود.

۴- آرون‌سازی نمودار HVSR با استفاده از CJaya

در این بخش الگوریتم پیشنهاد شده، CJaya، در آرون‌سازی داده‌های ساختمانی و واقعی مورد آزمون قرار می‌گیرد. همچنین کارایی این الگوریتم در مقابل الگوریتم Jaya بررسی می‌شود. الگوریتم‌های آرون‌سازی در این مطالعه در محیط متلب نوشته شده‌اند. همچنین در فرایند آرون‌سازی بمنظور مدلسازی پیشرو از رابطه تقریب خطی بر مبنای مدل ویسکوالاستیک کلونین-وویت استفاده شد. این رابطه توسط Bardet et al. (2000) در غالب یک بسته نرم افزاری جهت محاسبه پاسخ ساختگاه نوشته شده است که بعد از آن در مطالعات مختلف جهت مدلسازی پیشرو در فرایند آرون‌سازی نمودارهای HVSR مورد استفاده قرار گرفته است. این کد پیشرو با دریافت پارامترهای سرعت موج برشی، ضخامت، چگالی و فاکتور میرایی لایه‌ها و همچنین دامنه فرکانسی، پاسخ تئوری زمین را محاسبه می‌کند. در فرایند آرون‌سازی تابع RMSE بعنوان تابع هدف (Misfit) بشکل معادله زیر در نظر گرفته شد.

$$Misfit = \left(\frac{\sum_{k=1}^{Nt} (HV_k^{obs} - HV_k^{est})^2}{Nt} \right)^{1/2} \quad (7)$$

در معادله ۷، HV_k^{obs} و HV_k^{est} بترتیب عبارتند از مقادیر HVSR مشاهده‌ای و تخمینی و Nt نشانگر تعداد کل نمونه‌ها (فرکانس‌ها) می‌باشد.

گام‌های لازم برای بکارگیری الگوریتم CJaya در آرون‌سازی داده‌های HVSR بصورت زیر می‌باشند.

- ۱) تولید تصادفی جمعیت اولیه در محدوده تعریف شده برای پارامترهای مدل (پاسخ‌های محتمل)
- ۲) ارزیابی کیفیت/خطای جمعیت اولیه با استفاده از معادله ۷
- ۳) یافتن بهترین و بدترین پاسخ در بین جمعیت اولیه
- ۴) اگر $rand < Pr$ تولید یک ذره/مدل جدید بر مبنای معادله ۱ و در غیر اینصورت تولید مدل جدید بر مبنای معادله ۲.
- ۵) مقایسه کیفیت (خطا) حل جدید $(x'_{j,k,i})$ و به روزرسانی بهترین

لرزه‌نگار سه مولفه‌ای بطور همزمان برداشت می‌شوند، تنها با استفاده از یک لرزه‌نگار سه مولفه‌ای به دست می‌آیند. مدت زمان لازم برای جمع-آوری داده‌های میکروترومور وابسته به منطقه مورد مطالعه و فرکانس طبیعی آن دارد (SESAME, 2004)، اما بطور کلی مدت زمان ۳۰ دقیقه ثبت داده برای مطالعات پهنه بندی مناسب و ایده‌آل می‌باشد. در این روش فرض بر نقش اصلی امواج سطحی (ری‌لی) در نمودار بیضی‌واری امواج ری‌لی یا همان HVSR است. اما بطور کلی در خصوص ترکیب امواج سطحی و یا حجمی که در نمودار HVSR نقش دارند، اختلاف نظر وجود دارد و حتی برخی محققین تکنیک‌هایی برای کاهش دادن اثر امواج حجمی و نیز امواج لآو در نمودار HVSR ارائه داده‌اند که از آن جمله می‌توان به تکنیک‌های RayDec که توسط (Hobiger et al., 2009) و تکنیک HVTFA که توسط (Poggi and Fah, 2010) ارائه شده است اشاره کرد.

(Bonney-Claudet et al., 2008) با روش‌های عددی نشان دادند که ترکیب جبهه‌های موج میکروترومورها تابعی از منشا آنها و ساختار ساختگاه می‌باشد.

بعد از ثبت امواج میکروترومور تک ایستگاهی، با استفاده از الگوریتم‌های ارائه شده و یا نرم افزارهای موجود، پیش پردازش و پردازش لازم صورت گرفته و نمودار HVSR به دست می‌آید. محاسبه این نمودار مراحل مختلفی دارد که بترتیب عبارتند از: ۱) محاسبه دامنه‌های طیف فوریه برای پنجره‌های زمانی انتخاب شده، ۲) محاسبه میانگین مولفه‌های افقی، ۳) محاسبه نسبت H/V برای هر پنجره زمانی با استفاده از معادله ۶، ۴) محاسبه میانگین نمودارهای H/V. این مراحل در برخی نرم افزارهای موجود برای پردازش داده‌های لرزه‌ای تعبیه شده‌اند که در این مطالعه از نرم افزار Geopsy برای پیش پردازش و محاسبه نمودار HVSR استفاده شد.

$$S = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \quad (6)$$

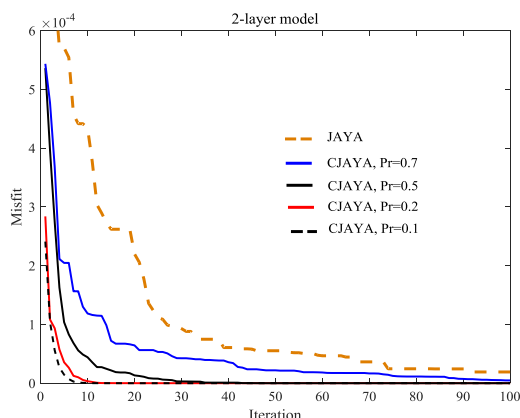
که در معادله بالا S_{HS} تبدیل فوریه مولفه افقی و S_{VS} تبدیل فوریه مولفه عمودی در سطح است. در نمودار HVSR فرکانسی که پیک دامنه را در بردار فرکانس طبیعی و یا تشدید نام دارد که یک تخمین قابل اعتماد برای آن است. اما بر طبق مطالعات مختلف مانند (Bonney-Claudet et al., 2006) دامنه پیک نمی‌تواند یک تخمین قابل اعتماد برای فاکتور تقویت ساختگاه باشد.

شکل نمودار HVSR تابعی از پارامترهای مختلف فیزیکی مانند سرعت موج برشی (V_s)، ضخامت لایه‌های زیرسطحی (H)، چگالی و سرعت موج طولی (V_p) می‌باشد. با توجه به مطالعات مختلف نشان داده شده است که نمودار HVSR بیشترین تاثیر را از دو پارامتر فیزیکی H و V_s می‌پذیرد و اثر سایر پارامترها قابل اغماض می‌باشد (Bignardi et al., 2016). لذا با توجه به خصوصیات ساختگاه نمودار HVSR می‌تواند شکل‌های مختلفی داشته و شامل یک یا چند پیک باشد. باید توجه داشت انتخاب پیک در نمودار HVSR برای تشخیص فرکانس طبیعی نیازمند اعتبارسنجی آن

و بدترین حل‌های موجود

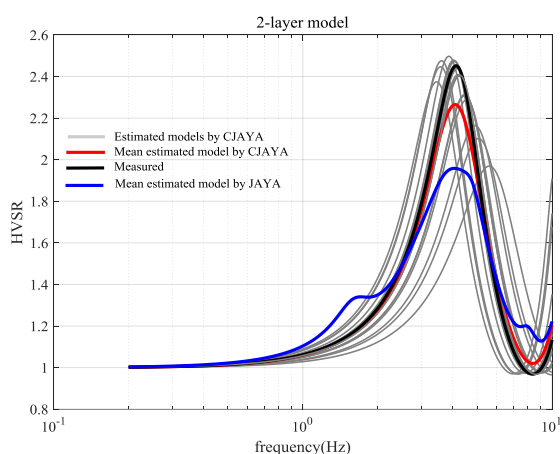
(۶) تکرار فرایند از مرحله ۴ برای کل جمعیت اولیه

(۷) معرفی بهترین حل (مدل) موجود بعنوان پاسخ نهایی مسئله.



شکل ۱: مقایسه نرخ همگرایی الگوریتم CJaya و Jaya در وارون-

سازی مدل A



شکل ۲: مقایسه الگوریتم‌ها در تخمین HVSR مدل A (نمودار

مشکی رنگ بیانگر مدل مشاهده شده، نمودار آبی رنگ خروجی Jaya و

نمودار قرمز رنگ خروجی CJaya)

همچنین بمنظور بررسی پایداری پاسخ‌های الگوریتم CJaya، به مدل A مقدار ۱۵٪ نوفه اضافه و مجدداً توسط الگوریتم وارون‌سازی شد. همانطور که در اشکال ۳ و ۴ دیده می‌شود الگوریتم همگرایی و تخمین مناسبی از مدل ارائه می‌دهد. الگوریتم CJaya در حالت وجود نوفه مقادیر ضخامت و سرعت‌های برشی لایه‌ها را بترتیب برابر ۲۹/۵ متر، ۴۹۰ متر بر ثانیه و ۱۱۹۰ متر بر ثانیه تخمین زد.

۴-۱ وارون‌سازی داده‌های ساختگی HVSR

در این بخش بررسی عملکرد الگوریتم CJaya و مقایسه آن با الگوریتم Jaya انجام می‌گیرد. به این منظور دو مدل لایه‌ای ساختگی (مصنوعی) در نظر گرفته شد و سپس وارون‌سازی آنها با دو الگوریتم مورد اشاره انجام گرفت. داده‌های ساختگی در رنج فرکانسی ۰/۲ تا ۱۰ هرتز مورد مطالعه قرار گرفتند. در وارون‌سازی نمودار HVSR، ورودی الگوریتم مقادیر آن یعنی دامنه-فرکانس بوده و خروجی، مقدار پارامترهای مدل یعنی ضخامت و سرعت موج برشی می‌باشد. در ابتدا مدل A (جدول ۱)، یک مدل دولایه با استفاده از دو الگوریتم CJaya و Jaya مورد وارون‌سازی قرار گرفت. همچنین مقدار بیشینه تکرار و نیز تعداد جمعیت اولیه برای هر دو الگوریتم بترتیب برابر ۱۰۰ و ۴۰ در نظر گرفته شد. بمنظور تعیین پارامتر Pr، مقادیر مختلفی مورد آزمون قرار گرفت، همانطور که در اشکال ۱ و ۲ دیده می‌شود الگوریتم برای مقدار ۰/۱ همگرایی سریعتری داشته و مدل صحیح‌تری را ارائه می‌دهد. الگوریتم CJaya از برتری واضحی در مقابل الگوریتم اصلی Jaya برخوردار است. بطوریکه الگوریتم CJaya به ازای پارامتر Pr برابر با ۰/۱ در تکرار هشتم به پاسخ صحیح دست می‌یابد (شکل ۱). این در حالیست که الگوریتم Jaya هم در نرخ همگرایی (شکل ۱) و هم در میزان خطای تخمین (جدول ۱) عملکرد ضعیف‌تری را نشان می‌دهد. در حقیقت در الگوریتم CJaya به دلیل استفاده از یک عملگر جهش جدید در آن تعادل بهتری بین رفتار اکتشافی و استخراجی الگوریتم برقرار می‌گردد و در نتیجه سریعتر به پاسخ بهینه می‌رسد. در شکل ۲، مقایسه دو الگوریتم در تخمین HVSR نشان داده شده است.

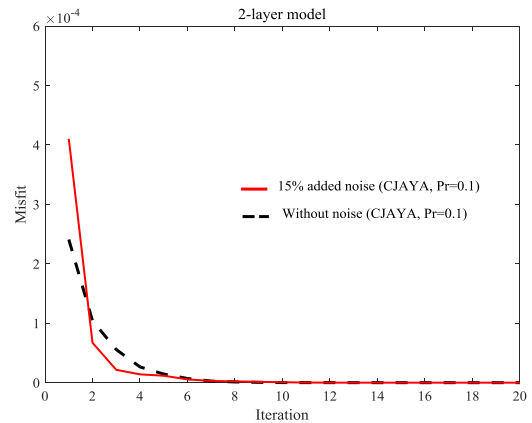
جدول ۱: مدل دولایه، مدل A (درصد خطای تخمین در داخل پرانتز)

متغییر	مقدار واقعی	CJaya	Jaya
H1(m)	۳۰	۳۰/۰۵(۰/۱)	۳۱(۳)
Vs1(m/s)	۵۰۰	۵۰۴(۰/۸)	۵۵۰(۱۰)
Vs2(m/s)	۱۲۰۰	۱۲۱۴(۱/۱)	۱۳۰۰(۸)

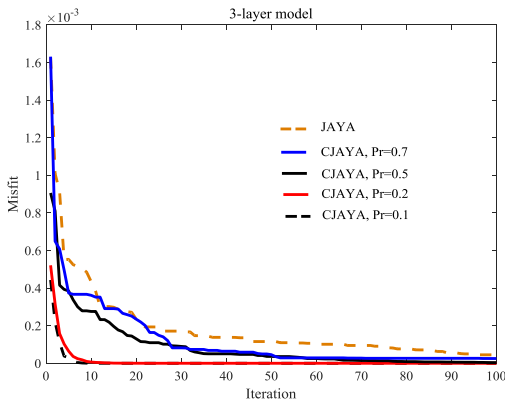
نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۸، شماره ۴، ۱۴۰۱.
 الگوریتم CJaya با وجود نوفه تخمین زده شد.

جدول ۲: مدل سه لایه، مدل B (درصد خطای تخمین در داخل پراتز نشان داده شده است)

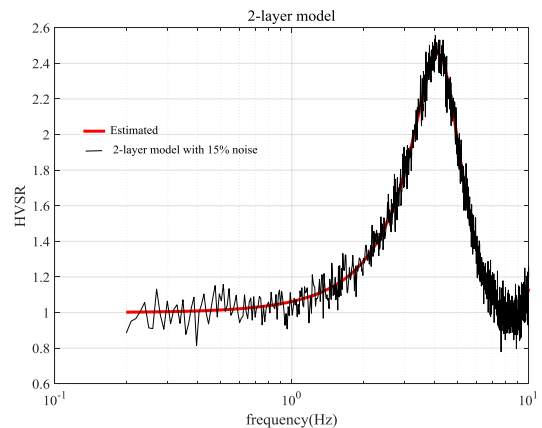
متغیر	مقدار واقعی	CJaya	Jaya
H1(m)	۲۰	۱۹/۴(۳)	۲۲(۱۰)
H2(m)	۳۰	۲۹/۶(۱/۳)	۳۱(۳)
Vs1(m/s)	۴۰۰	۳۷۰(۷/۵)	۴۲۰(۵)
Vs2(m/s)	۸۰۰	۷۹۰(۱/۲)	۸۵۰(۶)
Vs3(m/s)	۱۶۰۰	۱۵۵۴(۲/۸)	۱۷۲۵(۸)



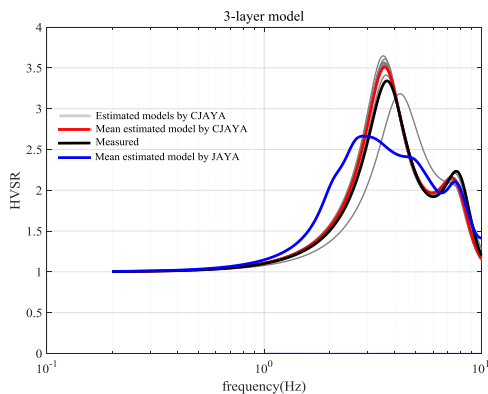
شکل ۳: مقایسه نرخ همگرایی الگوریتم CJaya در وارون سازی مدل A با نوفه و بدون آن



شکل ۵: مقایسه نرخ همگرایی الگوریتم CJaya و Jaya در وارون سازی مدل B



شکل ۴: تخمین HVSR مدل A با ۱۵٪ نوفه توسط الگوریتم CJaya (نمودار مشکی رنگ بیانگر مدل مشاهده شده همراه با نوفه و نمودار قرمز رنگ خروجی CJaya)



شکل ۶: مقایسه الگوریتم‌ها در تخمین HVSR مدل B (نمودار مشکی رنگ بیانگر مدل مشاهده شده، نمودار آبی رنگ خروجی Jaya و نمودار قرمز رنگ خروجی CJaya)

برای انجام آزمون بیشتر الگوریتم CJaya یک مدل سه لایه، مدل B نیز با مشخصات جدول ۲ مورد وارون سازی قرار گرفت. همانطور که در نتایج به دست آمده مشخص است (جدول ۲ و اشکال ۵ و ۶) الگوریتم CJaya از سرعت همگرایی بالاتر (با در نظر گرفتن مقدار Pr برابر با ۰/۱) نسبت به الگوریتم کلاسیک Jaya برخوردار است. همچنین میزان خطای تخمین CJaya در مقایسه با الگوریتم Jaya بیانگر عملکرد مناسب آن است. همانطور که در نمودار شکل ۶ دیده می‌شود نمودار HVSR تخمینی (نمودار قرمز) توسط الگوریتم CJaya حداکثر تطابق را با نمودار مشاهده شده دارد. بعبارت دیگر این الگوریتم با تخمین مناسب‌تر پارامترهای مدل، در مقایسه با الگوریتم اصلی Jaya مدلسازی بهتری از نمودار مشاهده شده ارائه داده است. بمنظور بررسی بهتر الگوریتم، با اضافه نمودن ۱۵٪ نوفه به مدل B مجدداً این مدل مورد وارون سازی قرار گرفت که نتایج (اشکال ۷ و ۸) بیانگر پایداری الگوریتم در شرایط وجود نوفه است که معمولاً در شرایط واقعی با آن مواجه هستیم. مقادیر ضخامت‌ها به ترتیب برابر با ۱۹ متر و ۲۸ متر و همچنین سرعت‌های موج برشی لایه‌ها به ترتیب ۳۵۰ متر بر ثانیه، ۷۶۰ متر بر ثانیه و ۱۵۰۰ متر بر ثانیه توسط



شکل ۹: موقعیت ایستگاه مورد مطالعه در شهر استانبول بر روی

نقشه گوگل ارث

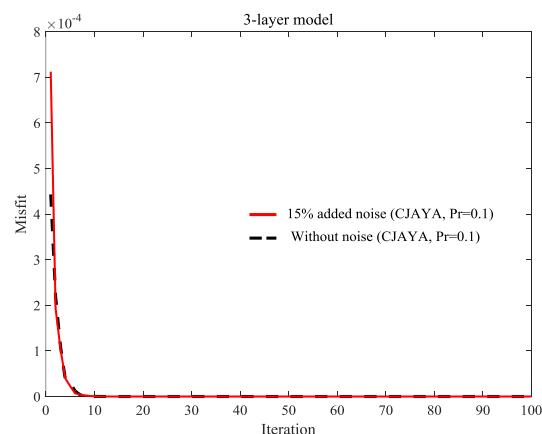
بمنظور وارون‌سازی داده‌های واقعی، مانند وارون‌سازی داده‌های ساختمانی، ورودی الگوریتم بصورت یک فایل فرکانس-دامنه آماده شد. با توجه به اطلاعات قبلی زمین شناسی و ژئوفیزیکی از منطقه یک مدل ۴ لایه جهت وارون‌سازی با الگوریتم CJaya در نظر گرفته شد. برای اجرای الگوریتم مقدار Pr برابر با ۰/۱ و همچنین مقادیر بیشترین تکرار الگوریتم و تعداد جمعیت اولیه بترتیب برابر ۲۰ و ۴۰ انتخاب شدند. با اجرای الگوریتم نتایج بشرح جدول ۳ و اشکال ۱۰ و ۱۱ به‌دست آمد.

جدول ۳: وارون‌سازی داده‌های واقعی، با الگوریتم CJaya و مقایسه با

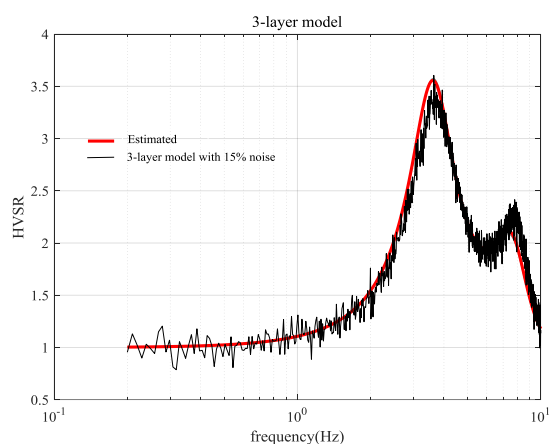
نتایج الگوریتم Elitist GA		
Elitist GA	CJaya	متغییر
۶۶	۷۳	H1(m)
۱۲۶	۱۱۴	H2(m)
۲۵۲	۲۱۷	Vs1(m/s)
۳۲۷	۳۳۴	Vs2(m/s)
۴۲۰	۴۰۵	Vs3(m/s)
۵۳۸	۵۲۳	Vs3(m/s)
۹۳۶	۸۷۰	Vs3(m/s)

نتایج به‌دست آمده از الگوریتم CJaya با نتایج مطالعه Kafadar and İmamoğlu (2022) مقایسه شد. این محققین از الگوریتم ژنتیک خبره برای وارون‌سازی داده‌های HVSR برداشت شده در ایستگاه مورد مطالعه استفاده کردند که نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است. آنچه که از مقایسه این دو الگوریتم دیده شد، الگوریتم CJaya بسیار سریع بوده و همگرایی بیشتری نشان می‌دهد. این درحالیست که با اجرای کد ژنتیک خبره بر روی داده‌های ایستگاه مورد مطالعه زمان بیشتری را برای همگرا شدن به پاسخ نهایی نیازمند است. علاوه بر این الگوریتم CJaya نیاز به تنظیم پارامتر خاصی ندارد اما در مقابل برای الگوریتم ژنتیک خبره نیاز به تنظیم پارامترهای داخلی الگوریتم می‌باشد.

در مطالعه دیگری که توسط Kudo et al. (2000) با استفاده از داده‌های میکروترمور آرایه‌ای در منطقه مورد مطالعه انجام گرفته میزان



شکل ۷: مقایسه نرخ همگرایی الگوریتم CJaya در وارون‌سازی مدل B با نوفه و بدون آن



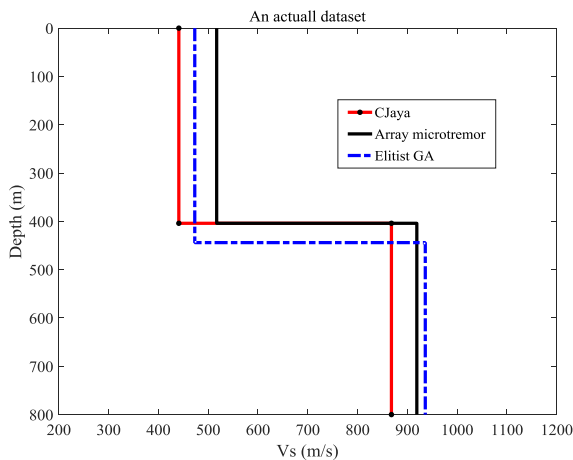
شکل ۸: تخمین HVSR مدل B با ۱۵٪ نوفه توسط الگوریتم CJaya

(نمودار مشکی رنگ بیانگر مدل مشاهده شده همراه با نوفه و نمودار قرمز رنگ خروجی CJaya)

۲-۴ وارون‌سازی داده‌های واقعی HVSR

در این بخش الگوریتم پیشنهاد شده، جهت وارون‌سازی یک مجموعه داده واقعی HVSR بکاربرده شد. به این منظور از داده‌های HVSR برداشت شده در یک ایستگاه واقع در شهر استانبول ترکیه استفاده شد (شکل ۹). داده‌های این منطقه توسط محققین مختلف مطالعه شده و زمین شناسی منطقه و لایه‌های زیرسطحی آن بخوبی شناخته شده است. لذا می‌تواند داده آزمون مناسبی برای الگوریتم‌های جدید باشد. منطقه مورد مطالعه عموماً از رسوبات نرم پوشیده شده است. بطور کلی تشکیلات سازندی این منطقه، شامل گراول‌ها، رس، ماسه‌های تحکیم یافته، آهک‌ها و مارن‌ها می‌باشند. داده‌ها در این ایستگاه توسط یک لرزه‌نگار سه مولفه‌ای به مدت ۶۰ دقیقه برداشت شده‌اند. این منطقه از لحاظ مخاطرات لرزه‌ای بسیار حائز اهمیت بوده بطوریکه کانون زلزله ۷/۴ ریشتری در سال ۱۹۹۹ که خسارت بسیار شدیدی را ایجاد کرد در فاصله ۱۱۰ متری این منطقه قرار دارد (Kafadar and İmamoğlu, 2022).

شکل ۱۱: همگرایی الگوریتم CJaya در وارون‌سازی داده واقعی



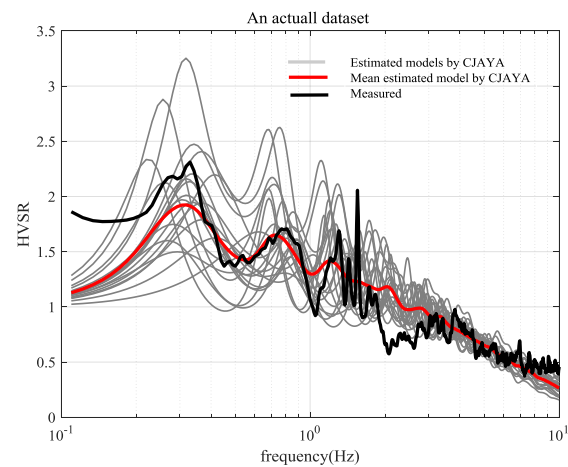
شکل ۱۲: مدلسازی Vs در ایستگاه مورد مطالعه با استفاده از CJaya (نمودار قرمز)، Elitist GA (نمودار منقطع آبی رنگ) و مایکروترمور (نمودار مشکی رنگ)

۵- نتیجه‌گیری

شناخت اثر ساختگاه در مطالعات مهندسی زلزله از اهمیت بخصوصی برخوردار است. این اطلاعات تاثیر مستقیم در طراحی و ساخت سازه‌ها و زیرساخت‌ها دارند. از جمله پارامترهای موثر در مطالعات اثر ساختگاه فرکانس طبیعی و سرعت موج برشی می‌باشد. روش‌های ژئوفیزیکی را می‌توان مناسب‌ترین روش برای تخمین این پارامترها دانست. چراکه نسبت به روش‌های مبتنی بر حفاری سریعتر و کم هزینه تر بوده و با توجه به تجربیات مختلف از صحت مناسب برخوردار می‌باشند. از جمله روش‌های ژئوفیزیکی که از محدودیت کمتری برخوردار بوده و در مناطق شهری نیز قابلیت استفاده دارد، روش HVSR مایکروترمور می‌باشد. این روش در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این روش با استفاده از یک لرزه‌نگار سه مولفه‌ای و با جمع‌آوری حدود ۳۰ دقیقه امواج مایکروترمور می‌توان نمودار HVSR را به دست آورد. با یافتن پیک نمودار و اعتبار سنجی آن می‌توان فرکانس طبیعی خاک را محاسبه نمود. همچنین با وارون‌سازی این نمودار می‌توان یک تخمین مناسب از سرعت موج برشی رسوبات به دست آورد. اما یکی از چالش‌های وارون‌سازی این روش، عدم یکتایی و در نتیجه نیاز به اطلاعات اولیه و یا کمکی می‌باشد. برای این منظور علاوه بر استفاده از اطلاعات زمین شناسی و یا استفاده از سایر داده‌های ژئوفیزیکی بکاربردن الگوریتم‌های قوی وارون‌سازی لازم است تا در زمان مناسب مدل بهینه را در اختیار قرار دهد. چه بسا اطلاعات کمکی موجود بوده اما استفاده از الگوریتم وارون‌سازی نامناسب موجب همگرایی به پاسخ درست نشود. در این مطالعه یک روش جدید وارون‌سازی برمبنای

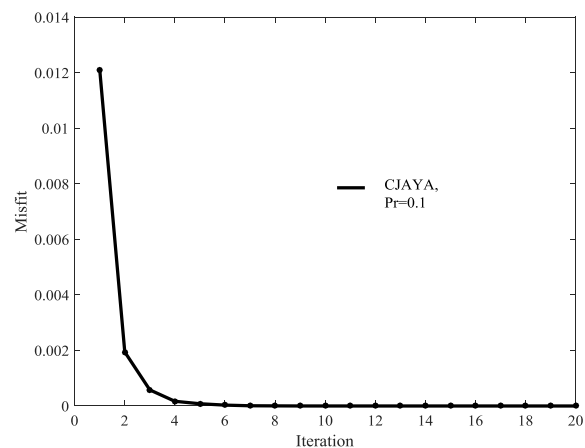
ضخامت رسوبات حدود ۴۰۴ متر و سرعت برشی آن حدود ۵۱۷ متر بر ثانیه تخمین زده شد. همچنین سرعت موج برشی در سنگ بستر را حدود ۹۱۹ متر بر ثانیه پیش بینی نمودند. این در حالیست که Kafadar (and İmamoğlu 2022) با استفاده از وارون‌سازی HVSR مقدار ضخامت رسوبات را برابر با ۴۴۴ متر و سرعت آنرا ۴۷۳ متر بر ثانیه و سرعت موج برشی در سنگ بستر را ۹۳۶ متر بر ثانیه تخمین زدند. لذا بمنظور ارزیابی بهتر عملکرد الگوریتم CJaya با استفاده از معادله ۸، ابتدا میانگین سرعت موج برشی در رسوبات محاسبه و سپس با استفاده از شکل ۱۲ مقایسه انجام گرفت.

$$V_s = \frac{\sum d_i}{\sum d_i/V_i} \quad (8)$$



شکل ۱۰: مدلسازی نمودار HVSR مربوط به ایستگاه مورد مطالعه ، با استفاده از الگوریتم CJaya

با انجام محاسبات، ضخامت رسوبات، سرعت موج برشی رسوبات و سنگ بستر با الگوریتم CJaya به ترتیب برابر با ۴۰۴ متر، ۴۴۱ متر بر ثانیه و ۸۷۰ متر بر ثانیه به دست آمد. همانطور که دیده می‌شود الگوریتم CJaya با وارون‌سازی داده‌های HVSR تخمین مناسبی را از ساختگاه مورد مطالعه ارائه نموده است.



- Intelligence Method. Pure Appl. Geophys. 181, 1831-1844. <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03514-z>
- Arai, H., and Tokimatsu, K., (2004). S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 94, No. 1, pp. 53-63.
- Bardet, JP., Ichii, K., Lin, CH., (2000). EERA: A Computer Program for Equivalent-linear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits. University of Southern California, Department of Civil Engineering.
- Bonnefoy-Claudet S., Cornou C., Bard P.-Y., Cotton F., Moczo P., Kristek J. et al. 2006. H/V ratios: a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations. Geophysical Journal International 167(2), 827-837.
- Bonnefoy-Claudet, S., Köhler, A., Cornou, C., Wathelet, M. & Bard, P.-Y., 2008. Effects of Love waves on microtremor H/V ratio, Bull. seism. Soc. Am., 98, 288-300.
- Borcherdt, R. D. (1994). Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). Earthquake spectra, 10(4), 617-653.
- Chen, Q., Liu, L., Wang, W., & Rohrbach, E. Site effects on earthquake ground motion based on microtremor measurements for metropolitan Beijing. Chinese Science Bulletin, 54(2), 280-287, 2009.
- Cipta, A., Cummins, P., Dettmer, J., Saygin, E., Irsyam, M., Rudyanto, A. & Murjaya, J., (2018) Seismic velocity structure of the Jakarta Basin, Indonesia, using trans-dimensional Bayesian inversion of horizontal-to-vertical spectral ratios, Geophys. J. Int., 215(1), 431-449.
- Darwin, Charls, 1985, The origin of Species by Means of Natural Selection, Penguin: Harmondsworth
- Hallo, M., Imperatori, W., Panzera, F., and Fah, D., (2021) Joint multizonal transdimensional Bayesian inversion of surface wave dispersion and ellipticity curves for local near-surface imaging, Geophys. J. Int. 226, 627-659.
- Hobiger, M., Bard, P.-Y., Cornou, C. & Le Bihan, N., (2009) Single station determination of Rayleigh wave ellipticity by using the random decrement technique (RayDec), Geophys. Res. Lett., 36, L14303,
- Hobiger, M., Cornou, C., Wathelet, M., Di Giulio, G., Knappmeyer-Endrun, b., Renalier, F., bard, P.-Y., Savvaidis, A., Hailemikael, S., Le Bihan, N., Ohrnberger, M. and Theodoulidis, N., (2013). Ground structure imaging by inversions of Rayleigh wave ellipticity: Sensitivity analysis and application to European strong-motion sites, Geophys. J. Int. 192, 207-229.
- Houssein, E.H., Gad, A.G., and Wazery, Y.M., (2021). Jaya Algorithm and Applications: A Comprehensive Review, Razmjoooy, N., et al. (eds.), Metaheuristics and Optimization in Computer and Electrical Engineering, Lecture Notes in Electrical Engineering 696.
- Hunter, J. A., Benjumea, B., Harris, J. B., Miller, R. D., Pullan, S. E., Burns, R. A., & Good, R. L. (2002). Surface and downhole shear wave seismic methods for thick soil site investigations. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22(9-12), 931-941.
- CJaya ارائه شد. در این الگوریتم با اضافه نمودن یک عملگر جهش الگوریتم با سرعت بالاتری به پاسخ نهایی همگرا گردید. این الگوریتم در مقایسه با الگوریتم Jaya استاندارد علاوه بر سرعت همگرایی بالاتر خطای تخمین کمتری را در تخمین ضخامت لایه‌ها و سرعت موج برشی از خود نشان داد. الگوریتم پیشنهاد شده با داده‌های ساختگی و واقعی مورد آزمون قرار گرفت. در آزمون داده‌های ساختگی با وجود نوفه و بدون آن عملکرد مناسبی در مقایسه با الگوریتم Jaya استاندارد از خود نشان داد. الگوریتم CJaya در وارون‌سازی داده‌های HVSR واقعی نیز استفاده شد. به این منظور داده‌های یک ایستگاه در شهر استانبول کشور ترکیه مورد استفاده قرار گرفت. اثر ساختگاه این منطقه، به لحاظ اهمیت لرزه‌ای آن، توسط افراد مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج وارون‌سازی این داده با الگوریتم CJaya نشان داد تخمین ساختار سرعت موج برشی منطقه با دقت مناسبی صورت گرفته است. الگوریتم CJaya قابلیت استفاده در وارون‌سازی سایر داده‌های ژئوفیزیکی را نیز دارد و توصیه می‌شود در مطالعات آینده در وارون‌سازی همزمان داده‌های HVSR و منحنی پاشش امواج سطحی استفاده گردد که تلفیق این دو داده می‌تواند در مدلسازی بهتر و دقیق‌تر ساختار سرعت موج برشی بسیار حائز اهمیت باشد.

۶- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
Vs	m/s	سرعت موج برشی
H	m	ضخامت
Vp	m/s	سرعت موج طولی
HVSR	-	نسبت مولفه افقی به قائم طیف فوریه

۷- منابع

- نورمحمدی، م.، پورمیرزائی، ر.، نیکروز، ر.، ۱۳۹۸، مطالعه اثرساختگاه با استفاده از روش نسبت طیفی H/V و صحت سنجی آن:مطالعه موردی، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران، ایران.
- مکرم، م.، و نیکنام، ط.، ۱۳۹۵، استفاده از الگوریتم JAYA به منظور حل مسأله توزیع اقتصادی بار، کنفرانس بین المللی مهندسی برق، تهران.
- حکیمی، ب.، معصومی، ز.، قدس، ع.، سعید، ن.، (۱۳۹۷). مطالعه اثر ساختگاه مبتنی بر HVSR مایکروتremor در شهر زنجان (ایران)، مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۲(۴)، ۱۱۵-۱۳۹.
- Alizadeh, S., Poormirzaee, R., Nikrouz, R., Sarmady, S. (2021). Using Stacked Generalization Ensemble Method to Estimate Shear Wave Velocity Based on Downhole Seismic Data: a case study of Sarab-e-Zahab, Iran, journal of seismic exploration, J. Seism. Explor. 30, 281-301.
- Angardi, S., Poursorkhabi, R.V., Shirvanehdeh, A.Z. et al. (2024). Vs Profiling by the Inversion of Rayleigh Wave Ellipticity Curve Using a Hybrid Artificial

- estimation in Fateh jang area, Pakistan. *Earthquake Science*, 28(1), 87-95, 2015.
- Rao, R. (2016), Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7(1), 19-34.
- Sanchez-Sesma F.J. (2017). Modeling and inversion of the microtremor H/V spectral ratio: physical basis behind the diffuse field approach. *Earth Planets Space* 69(1), 92.
- SESAME_European_project, Pierre-Yves BARD, (2004) Site effects assessment using ambient excitations; deliverable D23.12: guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: measurements, processing and interpretation; deliverable D23.12. Final report WP12. Project No. EVG1-CT-2000-00026.
- Vinh, L.T., Son, N.N., (2020). Parameters extraction of solar cells using modified jaya algorithm. *Optik* 203:164034.
- Zitar, R.A., Al-Betar, M.A., Awadallah, M.A. et al. (2022). An Intensive and Comprehensive Overview of JAYA Algorithm, its Versions and Applications. *Arch Computat Methods Eng* 29, 763–792. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09585-8>.
- Kafadar, Ö., İmamoğlu, Ç. (2022). Estimation of the amplification properties of soil through HVSR inversion based on an elitist genetic algorithm. *Earth Sci Inform* 15, 2319–2334 (2022).
- Kudo, K., Kanno, T., Okada, H., zel ,O., Erdik, M., Takahashi, M., Sasatani, T., Higashi, S., Yoshida, K., (2000). Site specific issues on strong ground motion during the Kocaeli, Turkey Earthquake of August 17, 1999, as inferred from array observations of microtremors and aftershocks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Submitted to BSSA Special Issue.
- Layadi, K., Semmane, F. and Yelles-Chaouche, A., (2018) S-wave velocity structure of Chlef City, Algeria, by inversion of Rayleigh wave ellipticity, *Near Surface Geophysics*, 16, 328-339.
- Layadi, K., Semmane, F. and Yelles-Chaouche, A., (2018) S-wave velocity structure of Chlef City, Algeria, by inversion of Rayleigh wave ellipticity, *Near Surface Geophysics*, 16, 328-339.
- Long, W., Zijun, Zh., Chao, H., Leung, T.K. (2018). A gpu-accelerated parallel jaya algorithm for efficiently estimating li-ion battery model parameters. *Appl Soft Comput* 65:12–20.
- Maghami, s., Sohrabi-Bidar, A., Bignardi, S., Zarean, A., Kamalian, M., (2021) Extracting the shear wave velocity structure of deep alluviums of “Qom” Basin (Iran) employing HVSR inversion of microtremor recordings, *Journal of Applied Geophysics* 185, 104246.
- Maheswari, R. U., Boominathan, A., & Dodagoudar, G. R. (2010). Seismic site classification and site period mapping of Chennai City using geophysical and geotechnical data. *Journal of Applied Geophysics*, 72(3), 152-168.
- Moon, S.W., Subramaniam, P., Zhang, Y., Vinoth, G., Ku, T., (2019). Bedrock depth evaluation using microtremor measurement: empirical guidelines at weathered granite formation in Singapore. *J. Appl. Geophys.* 171, 103866. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103866>.
- Nakamura, Y., (1989) A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *Railw. Tech. Res. Inst. Q Rep.*, 30(1), 25–33.
- Özalaybey, S., Zor, E., Ergintav, S., Tapırdamaz, M.C., (2011). Investigation of 3-D basin structures in the İzmit Bay area (Turkey) by single-station microtremor and gravimetric methods, *Geophysical Journal International*, Volume 186, Issue 2, Pages 883–894.
- Poormirzaee, R., (2016) S-wave velocity profiling from refraction microtremor Rayleigh wave dispersion curves via PSO inversion algorithm, *Arab J Geosci* 9:1-10, DOI 10.1007/s12517-016-2701-6.
- Poormirzaee, R., Kabgani, A. (2022). Characterizing the Vs Profile from Surface Wave Data Using a Customized Artificial Jellyfish Search Algorithm. *Pure Appl. Geophys.* 179, 4429–4444.
- Qadri, S. T., Nawaz, B., Sajjad, S. H., & Sheikh, R. A. Ambient noise H/V spectral ratio in site effects