

# تولید توابع شتاب زمان دوام با استفاده از تبدیل موجک و الگوریتم‌های بهینه‌سازی

علی کاوه\* (استاد)

وحیدرضا مهدوی‌داهونی (دانشجوی کارشناسی ارشد)  
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۳ (نهار ۱۳۹۳)  
دوره ۲-۳، شماره ۱/۲، ص. ۱۱۷-۱۲۳، (پاداشت فنی)

تبدیل موجک یک ابزار ریاضی است که تغییرات زمانی بسامد را در یک سیگنال نشان می‌دهد. از طرفی دیگر، زمان دوام یک روش پوش‌آور دینامیکی است؛ که عملکرد آن بر اساس زمان رسیدن به شاخص خرابی موردنظر است. در این نوشتار، با استفاده از تبدیل موجک و الگوریتم‌های بهینه‌سازی به تولید توابع شتاب سازگار با طیف آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ پرداخته شده است. روش به‌کار گرفته شده، در واقع، یک نوع اصلاح داده‌ها در حوزه‌ی زمان و بسامد است. برای این منظور کارایی الگوریتم‌های ابتکاری، کلاسیک، و ترکیبی از آنها برای تابع شتاب ساده شده (۵ ثانیه‌ی) ارزیابی می‌شود. الگوریتمی که در طی تکرار مشخص، کمترین میزان خطا را داشته باشد؛ به‌منزله‌ی بهترین روش بهینه‌سازی انتخاب می‌شود. سپس با استفاده از این روش، سه تابع شتاب اصلی (۲۰ ثانیه‌ی) تولید می‌شود. در نهایت نیز مقادیر خطای تابع شتاب تولیدشده با توابع شتاب  $ETA_{20a}$  مقایسه شده است، که نشان‌دهنده‌ی کارایی این روش نسبت به روش مرسوم است.

واژگان کلیدی: تابع شتاب، زمان دوام، تبدیل موجک، روش‌های بهینه‌سازی.

## ۱. مقدمه

مبنای عملکرد مانند استاتیکی غیرخطی و روش طیف ظرفیت و همچنین روش‌های تحلیل دینامیکی همچون روش تحلیل تاریخچه‌ی زمانی، تحلیل دینامیکی افزاینده، روش تحلیل طیفی و غیره پیشنهاد شده است.<sup>[۱]</sup>

روش زمان دوام<sup>۱</sup>، روشی نو برای تحلیل و طراحی لرزه‌ی سازه‌ها براساس عملکرد است که این روش در پژوهشی در سال ۲۰۰۴ پیشنهاد شده است.<sup>[۲]</sup> این روش با بهره‌گیری از ایده‌ی افزایش دامنه‌ی توابع شتاب، با شیوه‌ی متفاوت می‌تواند در جهت ساده‌ترکردن تحلیل سازه و با دقتی مناسب مورد استفاده قرار گیرد. نتایج پژوهش‌های اخیر اعضای تیم تحقیقاتی روش زمان دوام در رابطه با مقایسه‌ی آن با روش‌های متداول تحلیل و طراحی لرزه‌ی، از کارایی مناسب روش زمان دوام حکایت دارد. انتخاب تابع ورودی دینامیکی مناسب، اساس موفقیت روش زمان دوام است. در این راستا، تابعی مناسب‌تر خواهد بود که نتایج حاصل از اعمال آن در تحلیل زمان دوام، با نتایج موجود از عملکرد سازه‌های مختلف تحت زلزله‌های واقعی، بیشترین سازگاری را داشته باشد.<sup>[۳]</sup>

## ۲. توابع شتاب زمان دوام

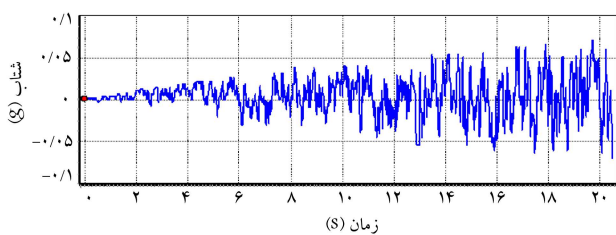
در اولین نسل از توابع شتاب زمان دوام، روند ساخت توابع شتاب از شتاب‌نگاشت ارتعاش تصادفی مانند نوز سفید<sup>۲</sup> آغاز می‌شود و به وسیله‌ی یک فیلتر، در دامنه‌ی بسامدی اصلاح و سپس با طیف طراحی آیین‌نامه‌ی معمولی، تنظیم می‌شود. در

مهم‌ترین هدف در آیین‌نامه‌های زلزله، فراهم‌کردن یک حد اطمینان قابل قبول با در نظر گرفتن ضرایب ایمنی در برابر شکست کلی سازه و ناپایداری آن در اثر زلزله‌های شدیدی است که احتمال دارد در مدت عمر مفید سازه رخ دهد. از جمله کاستی‌های موجود، روش‌های طراحی مرسوم و آیین‌نامه‌های کنونی، عدم امکان ارزیابی صریح عملکرد سازه و اجزای آن است. بدین منظور در سال‌های اخیر روش طراحی بر مبنای عملکرد مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. هدف از طراحی بر مبنای عملکرد این است که بتوان سازه را به گونه‌ی ساخت که عملکرد آن در مقابل زلزله‌های مختلف قابل پیش‌بینی باشد و بتوان عملکرد موردنظر را بسته به اهداف سازه انتخاب کرد.<sup>[۱]</sup>

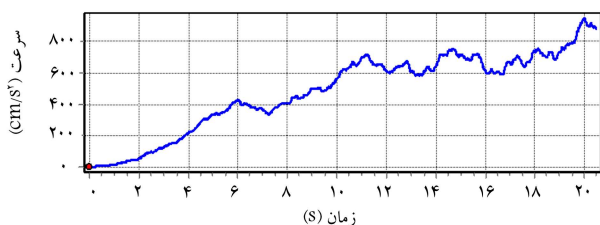
یکی از ساده‌ترین و رایج‌ترین روش‌های تحلیل لرزه‌ی، روش تحلیل استاتیکی است. محدودیت‌های موجود در روش‌های تحلیل استاتیکی از یک طرف و گسترش ابزار محاسباتی پرسرعت و دقیق از طرف دیگر، پژوهشگران و دانشمندان را بر آن داشت که با ارائه‌ی روش‌های دقیق‌تر به نحوی که اولاً تغییرشکل‌های خمیری و اثرات غیرخطی سازه را در نظر بگیرد، ثانیاً، خواص دینامیکی سازه از جمله: بسامد طبیعی، اثر مودهای نوسانی، اثر میرایی و... را در محاسبات وارد کنند و ثالثاً، اثرات زلزله را با اعمال شتاب زلزله‌ی طبیعی به سازه، به‌طور واقعی‌تر پیش‌بینی کنند، گامی در جهت اصلاح روش‌های قدیمی و تقریبی بردارند. در این راستا، روش‌های طراحی بر

\* نویسنده مسئول

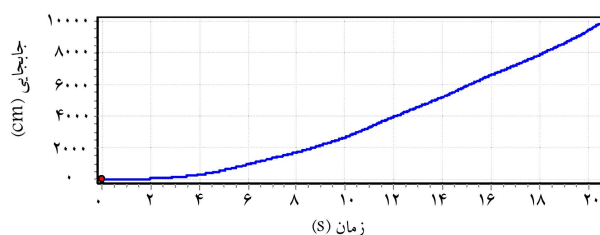
تاریخ: دریافت ۱۸/۱۰/۱۳۹۰، اصلاحیه ۱۴/۸/۱۳۹۱، پذیرش ۲۴/۱۱/۱۳۹۱.



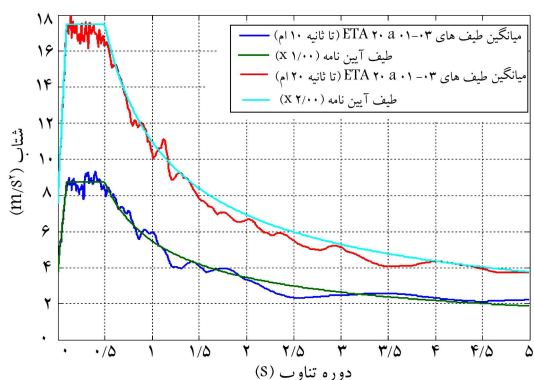
شکل ۱. تابع شتاب ۲۰a۰۳. ETA



شکل ۲. تابع سرعت ۲۰a۰۳. ETA



شکل ۳. تابع جابجایی ۲۰a۰۳. ETA



شکل ۴. طیف میانگین پاسخ توابع شتاب ۲۰a۰۳-۱۰-۰۳ در زمان‌های مختلف.

چون هدف این نوشتار ارائه روشی است که میزان محاسبات بهینه‌سازی و خطا کمتر شود، فقط روی توابع شتاب سری اول متمرکز خواهد شد. از این رو پاسخ هدف را طیف طراحی آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ برای خاک نوع دو در نظر گرفته شده است.<sup>[۷]</sup> شتاب پاسخ طیفی در آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ برای منطقه با خطر لرزه‌خیزی خیلی زیاد از رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود:

$$s_{\alpha T} = \frac{0.35 \times BI}{R} \quad (4)$$

که در این رابطه،  $B$  ضریب بازتاب ساختمان است که با استفاده از طیف بازتاب طرح به‌دست می‌آید. همچنین  $I$  ضریب اهمیت ساختمان و  $R$  ضریب رفتار ساختمان هستند که برابر ۱ در نظر گرفته شده است. بنابراین طیف هدف طبق رابطه‌ی ۵

ادامه با به کار بردن تابع خطی، نتایج شتاب‌نگاشت ثابت با توجه به شتاب‌های بیشینه در زمان‌های مختلف، فراینده می‌شدند. این شتاب‌نگاشت‌ها برای اثبات تحلیل زمان دوام مناسب بودند، اما نتایج عددی مهمی از آنها انتظار نمی‌رفت.<sup>[۵]</sup>

در نسل دوم توابع شتاب زمان دوام، جهت انطباق بهتر این شتاب‌نگاشت‌ها با زلزله‌های سطح طراحی آیین‌نامه، مستقیماً از مفهوم طیف پاسخ استفاده شد. این شتاب‌نگاشت‌ها به گونه‌ی تنظیم شدند که در زمان مبنا مثلاً  $t_{target}$ ، پاسخ‌های دینامیکی آنها برابر با طیف طرح آیین‌نامه باشد. با وجود این عملکرد سازه‌های مختلف با دوره‌های تناوب متفاوت را می‌توان با هم مقایسه کرد. با این دید، طیف پاسخ شتاب‌نگاشت زمان دوام متناسب با زمان افزایش پیدا می‌کند، یعنی در زمانی برابر نصف زمان هدف  $(t = \frac{t_{target}}{2})$ ، پاسخ نصف مقدار آیین‌نامه خواهد بود.<sup>[۵]</sup> با توجه به این موضوع، پاسخ شتاب هدف شتاب‌نگاشت‌های زمان دوام به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:

$$s_{\alpha T}(T_i, t_j) = \frac{t_j}{t_{target}} s_{\alpha C}(T_i) \quad (1)$$

که در آن،  $s_{\alpha T}(T_i, t_j)$  پاسخ شتاب هدف در زمان  $t_j$ ،  $T$  زمان تناوب و  $s_{\alpha C}(T_i)$  طیف شتاب طراحی آیین‌نامه است. همچنین پاسخ جابجایی پارامتر مهمی است که بسیار به پاسخ شتاب بستگی دارد. پاسخ جابجایی هدف در شتاب‌نگاشت زمان دوام می‌تواند به صورت رابطه‌ی ۲ تعریف شود:

$$s_{uT}(T_i, t_j) = \frac{t_j}{t_{target}} s_{uC}(T_i) \times \frac{T_i^2}{4\Pi^2} \quad (2)$$

که در آن،  $s_{uT}(T_i, t_j)$  پاسخ جابجایی هدف در زمان  $t$  است. روش مرسوم برای پیدا کردن شتاب‌نگاشتی که پاسخ هدف آن مانند روابط ۱ و ۲ باشد، به شکل یک مسئله بهینه‌سازی نامعقد در دامنه‌ی زمان مطابق رابطه‌ی ۳ بیان می‌شود:

$$\text{Minimize } F(a_g) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \{ [s_{i,j}^a - s_{i,j}^{\alpha T}]^2 + \alpha [s_{i,j}^u - s_{i,j}^u T]^2 \} \quad (3)$$

که در آن،  $a_g$  شتاب‌نگاشت زمان دوام موردنظر است و  $\alpha$  پارامتر وزن است، که برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود. این تذکر لازم است که چون شبه شتاب براساس پاسخ جابجایی واقعی به‌دست می‌آید، فقط کافی است که بهینه‌سازی برای قسمت اول رابطه‌ی ۳ انجام شود ( $\alpha$  برابر ۰ در نظر گرفته شود). از شتاب‌نگاشت‌های نسل اول به‌عنوان داده‌های اولیه برای فرایند بهینه‌سازی استفاده شده است.<sup>[۵]</sup> این فرایند برای  $20 \times 48 = 960$  نقطه‌ی هدف با فاصله‌ی زمانی ۰/۱ ثانیه و برای ۲۰۰ زمان تناوب مختلف ما بین ۰ تا ۵ ثانیه انجام شده است.<sup>[۶]</sup>

تاکنون در تولید توابع شتاب زمان دوام، معیارهای مختلفی برای پاسخ هدف در نظر گرفته شده است. مانند طیف طراحی آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ یا طیف طراحی آیین‌نامه‌ی ASCE و یا میانگین طیف پاسخ رکوردهای طبیعی زلزله، که برای هر کدام سری جداگانه‌ی توابع تولید شده‌اند. سری اول از نسل دوم توابع شتاب زمان دوام، توابع ۲۰a ETA هستند که در شکل ۱ تا ۳ به ترتیب تابع شتاب، سرعت و جابجایی یک نمونه از آنها، که سازگار با طیف آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ خاک نوع ۲ هستند، نشان داده شده است. همچنین طیف میانگین پاسخ این توابع شتاب در زمان‌های ۱۰ و ۲۰ ثانیه در شکل ۴ نشان داده شده است. زمان مبنا در این توابع شتاب ۱۰ و ۲۰ ثانیه در شکل ۴ نشان داده شده است. بنابراین همان‌طور که ملاحظه می‌شود، طیف پاسخ تا ثانیه‌ی دهم نزدیک به طیف آیین‌نامه و تا ثانیه‌ی بیستم نزدیک به ۲ برابر طیف آیین‌نامه است.

به دست می‌آید:

$$S_{ac} = 0,35 \times \begin{cases} 1 + 1,5(\frac{T}{0,1}) & 0 < T < 0,1 \\ 2,5 & 0,1 < T < 0,5 \\ 2,5(\frac{0,5}{T})^{\frac{1}{2}} & 0,5 < T \end{cases} \quad (5)$$

که در این رابطه،  $S_{ac}$  طیف شتاب طراحی آئین‌نامه برحسب  $g$  و  $T$  دوره‌ی تناوب اصلی ساختمان برحسب ثانیه است.

### ۳. تبدیل موجک

تبدیل موجک<sup>۳</sup> یک تبدیل ریاضی از فضای زمان به فضای بسامد است و قادر است تا تغییرات زمانی بسامد را در یک سیگنال نمایش دهد. استفاده از تبدیل موجک در تحلیل سیگنال‌هایی که نقاط تیز دارند و همچنین غیرایستا هستند، بسیار مناسب است و جواب‌های آن از تحلیل فوری قابل قبول‌تر است. یک موجک، موج کوچکی است که در زمان متمرکز می‌شود و برای تحلیل رفتار یک سیگنال، آن را با تابع سیگنال مقایسه می‌کند.<sup>[۸]</sup>

تبدیل موجک گسسته برای تحلیل سیگنال از دو فیلتر بالاگذر و پایین‌گذر استفاده می‌کند. در واقع فیلتر پایین‌گذر<sup>۴</sup> بسامدهای پایین و شکل کلی سیگنال و فیلترهای بالاگذر<sup>۵</sup> بسامدهای بالا و جزئیات سیگنال را تخمین می‌زنند. این دو فیلتر از دو تابع مقیاس و موجک استفاده می‌کنند.<sup>[۹]</sup> ضرایب جزئیات سیگنال  $f(t)$  در سطح  $j$  از رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید:

$$cD_j(k) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \varphi_{j,k} dt \quad (6)$$

و ضرایب تقریب سیگنال  $f(t)$  در سطح  $j$  از رابطه‌ی ۷ به دست می‌آید:

$$cA_j(k) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{j,k} dt \quad (7)$$

اساس تبدیل موجک در به دست آوردن تصویر سیگنال روی موجک اتساع و انتقال یافته است. انتقال تضمین می‌کند که تمام طول سیگنال در نظر گرفته شود و اتساع تضمین‌کننده‌ی این است که تمام بسامدهای موجود مورد تحلیل قرار گیرد. در روابط ۶ و ۷،  $\varphi_{j,k}$  و  $\psi_{j,k}$  به ترتیب برابر تابع موجک و تابع مقیاس در سطح  $j$  ام انتقال  $k$  هستند و از رابطه‌ی ۸ و ۹ محاسبه می‌شوند:

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi\left(\frac{t - 2^j k}{2^j}\right) \quad (8)$$

$$\varphi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \varphi\left(\frac{t - 2^j k}{2^j}\right) \quad (9)$$

$$\left\{ J = 1, 2, \dots, j; K = 1, 2, \dots, k \mid j \leq \log_2^N, k = \frac{N}{2^j} \right\}$$

برای بازسازی ضرایب تقریب و جزئیات به ترتیب از روابط ۱۰ و ۱۱ استفاده می‌شود:

$$D_j(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} cD_j(k) \psi_{j,k} dk \quad (10)$$

$$A_j(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} cA_j(k) \varphi_{j,k} dk \quad (11)$$

که در این روابط،  $D_j$  و  $A_j$  به ترتیب ضرایب جزئیات و تقریب بازسازی شده در سطح  $j$  ام هستند. تابع اصلی را می‌توان از مجموع ضرایب تقریب در سطح  $j$  ام و ضرایب جزئیات بازسازی شده در سطح‌های پایین‌تر به دست آورد (رابطه‌ی ۱۲):

$$f(t) = A_j(t) + \sum_{j \leq J} D_j(t) \quad (12)$$

با رفتن به ترازهای پایین‌تر، بسامدهای کوتاه‌تر قابل بررسی می‌شوند و وضعیت در بسامدهای پایین مشخص می‌شود. تعداد ترازهای قابل پیشروی، تابع محتوای بسامدی سیگنال و تعداد نقاط نمونه‌گیری ماست. محدوده‌ی بسامدی ضرایب جزئیات در سطح  $j$  ام از رابطه‌ی ۱۳ به دست می‌آید:

$$\left[ \frac{1}{2^{j+1} \Delta t}, \frac{1}{2^j \Delta t} \right] \quad (13)$$

و همچنین محدوده‌ی دوره‌ی تناوب ضرایب جزئیات در سطح  $j$  ام از رابطه‌ی ۱۴ به دست می‌آید:

$$\left[ 2^j \Delta t, 2^{j+1} \Delta t \right] \quad (14)$$

که در آن،  $\Delta t$  گام زمانی است. در این نوشتار، برای تجزیه‌ی داده‌ها از تبدیل ویولت Daubechies مرتبه‌ی دهم (db10) استفاده شده است.<sup>[۱۱]</sup>

### ۴. نحوه‌ی تولید توابع شتاب زمان دوام با استفاده از

#### تبدیل موجک و الگوریتم‌های بهینه‌سازی

همان‌طور که اشاره شد، تبدیل موجک محتوای بسامدی سیگنال را در هر لحظه از زمان می‌دهد و از طرفی دیگر روش زمان دوام روشی است که عملکرد آن بر اساس زمان است، یعنی در هر لحظه از زمان باید طیف پاسخ نسبت خطی از طیف هدف باشد، این تشابه تبدیل موجک و روش زمان دوام می‌تواند کمک زیادی کند.

در این نوشتار برای تولید توابع شتاب زمان دوام به این صورت عمل می‌شود که ابتدا یک سری داده‌ی تصادفی با میانگین صفر در نظر گرفته می‌شود، سپس این داده‌ها با استفاده از تبدیل موجک (روابط ۶ تا ۱۱) به تعداد سطح کافی تجزیه می‌شوند، به طوری که بازه‌ی دوره‌ی تناوب مورد نظر با استفاده از رابطه‌ی ۱۴ را پوشش دهد، و همچنین ضرایب تقریب بازسازی شده در هر سطح ( $D_j$ ) محاسبه می‌شوند. به منظور اصلاح داده‌ها در حوزه‌ی زمان، ضرایب جزئیات بازسازی شده‌ی هر سطح به تعداد جزء‌های زمانی مساوی تقسیم می‌شوند و هر کدام از این بازه‌های زمانی در یک متغیر ضرب می‌شوند. پس از ضرب متغیرها در ضرایب تقریب، سیگنال جدید از رابطه‌ی ۱۲ محاسبه و خطای پایه با استفاده از رابطه‌ی ۱۵ محاسبه می‌شود. متغیرها با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی طوری به دست آورده می‌شوند که خطای پایه، کمینه شود.

بنابراین تابع هدف بهینه‌سازی به شکل نامقید و با استفاده از رابطه‌ی ۱۵ (که خطای پایه نیز نامیده می‌شود) تعریف می‌شود:

$$\text{Minimize } F(x_{i,j}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [s_{i,j}^a - s_{i,j}^T]^2}{n \times m}} \quad (15)$$

که در این رابطه،  $x_{i,j}$  متغیری است که باید در جزء زمانی  $i$  ام از سطح  $j$  ام ( $D_j$ ) ضرایب جزئیات بازسازی شده‌ی تابع شتاب ضرب شود. بنابراین تعداد متغیرها برابر  $j \times i$  است.  $m$  و  $n$  به ترتیب تعداد گام‌های زمانی و تعداد نقاط دوره‌ی تناوب در نظر گرفته شده در فرآیند بهینه‌سازی است.

## ۵. الگوریتم‌های بهینه‌سازی

چنان‌که قبلاً گفته شد، هدف این نوشتار ارائه‌ی روشی به منظور کاهش تعداد متغیرهای فرآیند بهینه‌سازی و در نتیجه‌ی آن، کاهش محاسباتی و وقت‌گیر تابع هدف در تولید توابع شتاب زمان دوام است، و هدف ارائه و یا بهبود یک الگوریتم نیست. بنابراین برای نشان‌دادن کارایی روش به‌کارگرفته‌شده و مقایسه‌ی الگوریتم‌های بهینه‌سازی از یک الگوریتم ابتکاری (ژنتیک) و یک الگوریتم کلاسیک (کوشی-نیوتن) و ترکیب آنها استفاده شده و به شرح مختصری از آنها پرداخته شده است.

### ۱.۱ الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، یک روش بهینه‌سازی براساس جستجو است که توسط جان هولند و شاگردانش در دانشگاه میشیگان ارائه شده است. ایده‌ی الگوریتم ژنتیک از دو اصل انتخاب و تولید نسل در طبیعت بهره برده است. با گذشت زمان، ساختار ژنتیکی موجودات تغییر کرده است و نسل‌های جدیدتر با محیط سازگاری بیشتری دارند. بدین طریق که امکان زنده‌ماندن و تولید مثل موجودات قوی‌تر بیشتر از موجودات ضعیف است. در نسل‌های جدیدتر، ساختار ژنتیکی موجودات قوی تکرار می‌شود و موجودات ضعیف از بین می‌روند. در بعضی موارد نیز جهش به‌وجود می‌آید، بدین معنی که از آمیزش دو موجود، موجودی متولد می‌شود که بر اثر جهش ژنتیکی خیلی بهتر یا بدتر از والدین خود است و به تعبیری یک نابعه یا یک عقب‌مانده متولد می‌شود و در نسل‌های بعدی تأثیر می‌گذارد. در سال‌های اخیر، کتاب‌ها و مقالات متعددی در مورد الگوریتم ژنتیک و کاربردهای آن به چاپ رسیده است.<sup>[۱۲،۱۳]</sup> در اینجا از توضیحات اضافی خودداری می‌کنیم و فقط به معرفی پارامترهای آن می‌پردازیم (جدول ۱).

### ۲.۵ الگوریتم کوشی-نیوتن

این الگوریتم، یک الگوریتم کلاسیک است که اکس‌ترم یک تابع را با استفاده از گرادینت تابع به‌دست می‌آورد. در جعبه‌ی ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار MATLAB ۷.۸.۰، الگوریتم بهینه‌سازی کوشی-نیوتن با روش جستجوی خطی (fminuncon) آورده شده است. جستجوی خطی، یک روش جستجو است که به‌عنوان یک قسمت از الگوریتم بهینه‌سازی بزرگ‌تر استفاده می‌شود. در هر مرحله از الگوریتم اصلی، روش جستجوی خطی در طول خط حاوی نقطه‌ی جاری و موازی جهت جستجو، نقاط بعدی را جستجو می‌کند. این روش را می‌توان هم به‌صورت مقید و هم به‌صورت نامقید تعریف کرد.<sup>[۱۱]</sup> به‌دلیل اینکه متغیرها هیچ قیدی ندارند، بنابراین از روش نامقید

استفاده می‌شود. این تذکر لازم است که برای تولید توابع شتاب زمان دوام نسل دوم (ETA ۲۰a) نیز از این الگوریتم استفاده می‌شده است.<sup>[۱۴]</sup>

### ۳.۵ روش ترکیبی

بعضی روش‌ها مانند کوشی-نیوتن برای شروع حل مسئله، نیاز به داشتن جواب نزدیک به جواب بهینه دارند (در غیر این‌صورت ممکن است در دام یک بهینه‌ی محلی بیافتند) و این خود در بعضی مواقع موجب نیازمندی آنها به روش‌های دیگری است که جوابی نزدیک به جواب بهینه تولید کنند، اما در الگوریتم ژنتیک و روش‌هایی مانند جستجوی تصادفی، شروع حل مسئله از نقاط تصادفی در فضای جستجو صورت می‌گیرد. بنابراین، در این روش ابتدا با استفاده از الگوریتم ژنتیک در تکرارهای اولیه، نقاط نزدیک به بهینه پیدا می‌شوند. سپس با استفاده از الگوریتم کوشی-نیوتن، که نقاط ابتدایی آن، نقاط به‌دست‌آمده از الگوریتم ژنتیک هستند، تکرارهای بعدی فرآیند بهینه‌سازی انجام می‌شود.

## ۶. مقایسه‌ی نتایج حاصل از بهینه‌سازی

در بخش‌های قبل انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی و پارامترهای آنها برای تولید تابع هدف ساده‌شده توضیح داده شد. در این بخش نتایج این روش‌ها در تولید تابع شتاب ساده‌شده با هم مقایسه خواهند شد، سپس روشی را که مقدار خطای کمتری نتیجه دهد، انتخاب می‌شود و تابع شتاب اصلی (۲۰ ثانیه‌ی) با استفاده از این روش تولید خواهد شد. بهینه‌سازی توابع شتاب زمان دوام از نظر محاسباتی فرآیندی سنگین و زمان‌بر است. از آنجایی که برای یافتن الگوریتم مناسب بهینه‌سازی و همچنین کارایی روش ارائه‌شده نیاز است که آزمون‌های متعددی انجام شود، بنابراین باید مسئله‌ی ما را تعریف مشابه زمان دوام و با ابعاد کوچک‌تر تعریف شود. از این مسئله به‌عنوان تابع شتاب ساده‌شده‌ی زمان دوام یاد می‌شود که مشخصات کامل آن در جدول ۲ شرح داده شده است. لازم به ذکر است که طیف هدف برای بهینه‌سازی، همان طیف شتاب آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ است که در محدوده‌ی دوره‌ی تناوب کوچک‌تر از ۲/۵۶ ثانیه در نظر گرفته شده است. با توجه به بازه‌ی دوره‌ی تناوب (۰ تا ۲/۵۶ ثانیه) و رابطه‌ی ۱۴، تعداد سطح تجزیه‌ی داده‌ها را ۷ در نظر گرفته‌ایم؛ تا دوره‌ی تناوب  $2/56 \times 0.01 = 0.0256$  را پوشش دهد.

همچنین برای نشان‌دادن کارایی روش ارائه‌شده با روش مرسوم، یعنی بهینه‌سازی در حوزه‌ی زمان، تابع شتاب ساده‌شده با استفاده از الگوریتم کوشی-نیوتن در حوزه‌ی زمان بهینه‌سازی شده است. در این روش، تعداد متغیرهای فرآیند بهینه‌سازی برابر با

جدول ۲. تابع شتاب ساده‌شده.

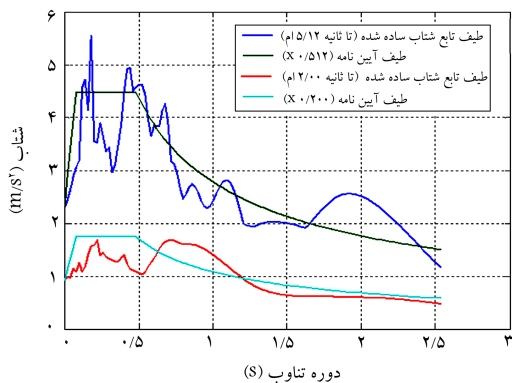
۵/۱۲	مدت زمان (ثانیه)
۰/۰۱	گام زمانی (ثانیه)
۰-۲/۵۶	بازه‌ی دوره‌ی تناوب (ثانیه)
۱۰	زمان هدف (ثانیه)
۰/۰۲	گام دوره‌ی تناوب (ثانیه)
۱۰	زمان مبنا (ثانیه)
۷	تعداد سطح تجزیه با استفاده از تبدیل موجک
۸	تعداد جزء‌های زمانی
شتاب	پاسخ بهینه
$7 \times 8 = 56$	تعداد متغیرها

جدول ۱. پارامترهای الگوریتم ژنتیک.

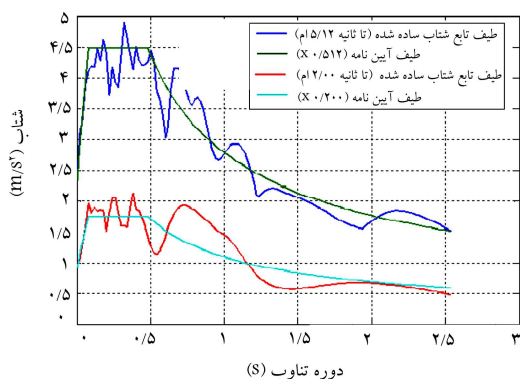
۵۶	اندازه‌ی جمعیت
۰/۹	ضریب تلفیق
مسابقه‌یی	تابع انتخاب
گوسی	تابع جهش
۰/۱	ضریب جهش
۰/۲	ضریب مهاجرت
۲۰	بازه‌ی مهاجرت
۱۰۰	تعداد نسل

الگوریتم گوشی - نیوتن جواب بهتری از خود نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که شاید بتوان با به‌کارگرفتن الگوریتم‌های تصادفی با تکرارهای بیشتر (فرار از بهینه‌ی محلی) و یا تغییر پارامترها به جواب بهتر دست یافت، اما قطعاً بهتر از الگوریتم‌های کلاسیک جواب نخواهند داد. همچنین در روش‌های ترکیبی با وجود میزان همگرایی بیشتر، در تکرارهای اولیه بهبود چندانی حاصل نخواهد شد. بنابراین برای تولید تابع شتاب اصلی از الگوریتم گوشی - نیوتن استفاده خواهد شد.

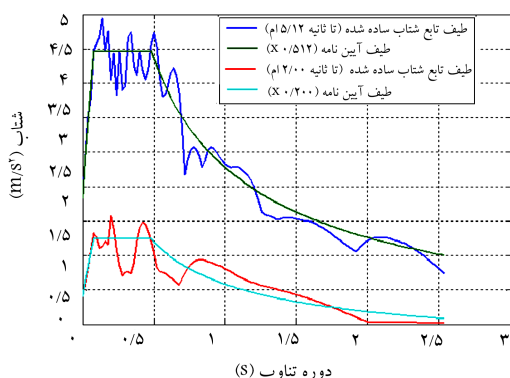
در شکل‌های ۷ الی ۹، به ترتیب طیف پاسخ تابع شتاب ساده شده پس



شکل ۷. طیف پاسخ تابع شتاب ساده شده پس از بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک در زمان‌های مختلف.



شکل ۸. طیف پاسخ تابع شتاب ساده شده پس از بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم گوشی - نیوتن در زمان‌های مختلف.

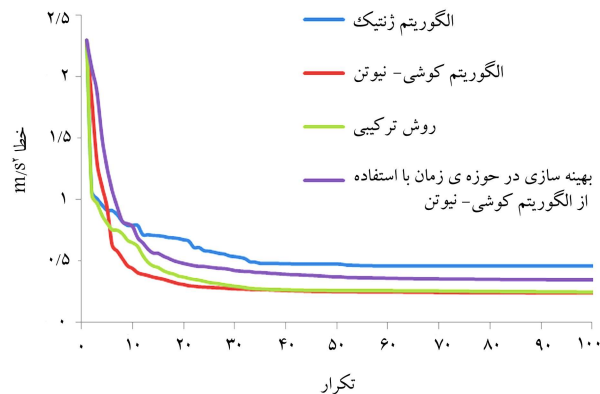


شکل ۹. طیف پاسخ تابع شتاب ساده شده پس از بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ترکیبی در زمان‌های مختلف.

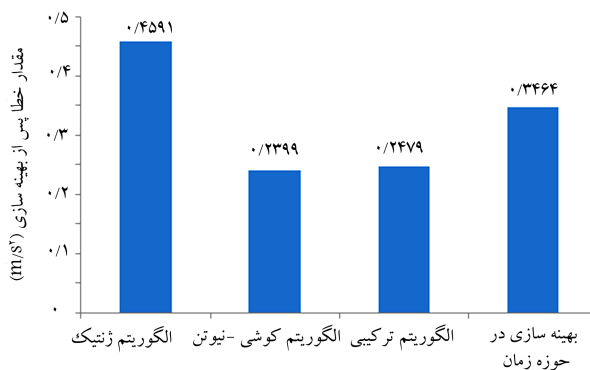
مدت زمان تابع شتاب تقسیم بر گام زمانی، یعنی ۵۱۲ نقطه، است. برای مقایسه‌ی این روش با روش ارائه شده، متغیرهای اولیه‌ی داده‌های تصادفی یکسان در نظر گرفته شده است. همچنین فرایند بهینه‌سازی برای تمام روش‌ها در ۱۰۰ تکرار انجام شده است. شکل ۵، میزان خطای پایه را در مقابل تکرار در فرایند بهینه‌سازی برای تمام روش‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در الگوریتم ژنتیک نسبت به الگوریتم گوشی - نیوتن در تکرارهای ابتدایی (تکرار ۰ تا ۳) میزان خطا کمتر و همگرایی بیشتر است (به دلیل شروع حل مسئله از نقاط تصادفی در فضای جستجو در الگوریتم ژنتیک)، ولی در تکرارهای انتهایی این نتایج بالعکس است. در روش ترکیبی تا ۱۰ تکرار ابتدایی، که از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است، نسبت به الگوریتم گوشی - نیوتن همان‌طور که انتظار می‌رود میزان خطا کمتر و همگرایی بیشتر است؛ ولی از تکرار ۱۰ به بعد، که از الگوریتم گوشی - نیوتن استفاده شده است، بالعکس است و در تکرارهای نهایی میزان خطا به الگوریتم گوشی - نیوتن نزدیک می‌شود.

در شکل ۶، میزان خطای پایه پس از بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف و روش بهینه‌سازی در حوزه‌ی زمان نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم گوشی - نیوتن میزان خطای کمتری حاصل شد. همچنین همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، مقدار خطا در روش ارائه شده نسبت به روش مرسوم (بهینه‌سازی در حوزه‌ی زمان)  $\frac{0.2349 - 0.2346}{0.2346} \times 100 = 0.13\%$  و تعداد متغیرهای بهینه‌سازی  $\frac{512 - 56}{512} \times 100 = 89\%$  کاهش پیدا کرده است.

البته دلیل اختلاف زیاد بین نتیجه‌ی الگوریتم ژنتیک (یک الگوریتم تصادفی) و گوشی - نیوتن (یک الگوریتم کلاسیک) را می‌توان تعداد متغیرهای بهینه‌سازی زیاد عنوان کرد، که حتی با کاهش ۸۹ درصدی تعداد متغیرهای بهینه‌سازی باز هم



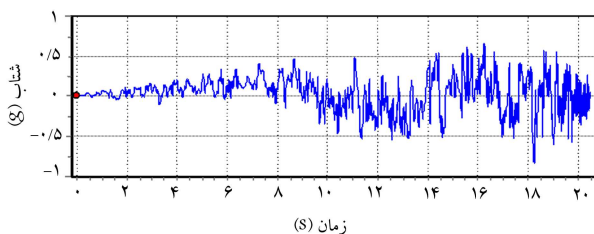
شکل ۵. مقایسه‌ی همگرایی روش‌های مختلف.



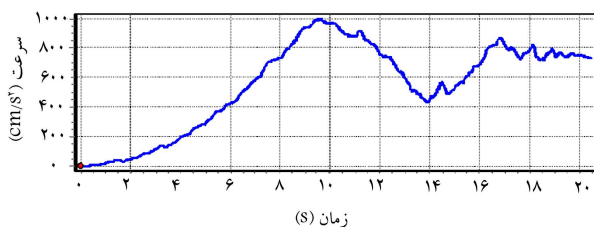
شکل ۶. مقایسه‌ی نتایج حاصل از بهینه‌سازی با استفاده از روش‌های مختلف.

جدول ۳. پارامترهای موردنظر برای تولید تابع شتاب اصلی.

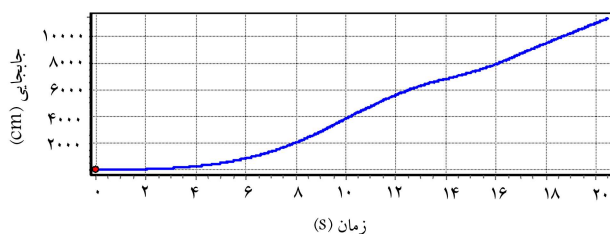
۲۵/۴۸	مدت زمان (ثانیه)
۰/۰۱	گام زمانی (ثانیه)
۰-۵/۱۲	محدوده‌ی دوری تناوب (ثانیه)
۰/۰۰۵	گام دوری تناوب (ثانیه)
۱۰	زمان مبنا (ثانیه)
۸	تعداد سطح تجزیه با تبدیل موجک
۳۲	تعداد جزءهای زمانی
شتاب	پاسخ بهینه
$۸ \times ۳۲ = ۲۵۶$	تعداد متغیر



شکل ۱۱. تابع شتاب AF-۰۱.



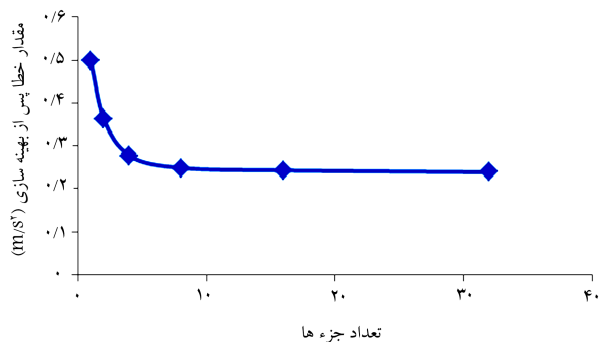
شکل ۱۲. تابع سرعت AF-۰۱.



شکل ۱۳. تابع جابجایی AF-۰۱.

ثانیه را پوشش دهد. پارامترهای در نظر گرفته شده برای تابع شتاب اصلی در جدول ۳ آورده شده است.

توابع شتاب تولید شده در این نوشتار، AF-۰۱ تا AF-۰۳ نام گذاری شده است. در شکل های ۱۱ تا ۱۳ به ترتیب تابع شتاب، جابجایی و سرعت یکی از توابع شتاب تولید شده (AF-۰۱) و در شکل های ۱۴ تا ۱۶ به ترتیب طیف های میانگین پاسخ شتاب، جابجایی و سرعت این توابع شتاب تولید شده نشان داده شده است. همان طور که در شکل های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می شود، تابع سرعت و جابجایی AF-۰۱ همانند  $ETA_{20a-3}$  (شکل های ۲ و ۳)، به دلیل داشتن نویز در دوره های تناوب بالا دور از واقعیت هستند، که این یکی از معایب این سری از توابع شتاب زمان دوام است. به هر حال می توان این روش را برای تولید سری های دیگر توابع شتاب زمان دوام به کار گرفت.



شکل ۱۰. اثر تعداد جزءهای زمانی در میزان خطا.

از بهینه سازی با استفاده از الگوریتم های ژنتیک، کوشی - نیوتن و ترکیبی در زمان های ۲ و ۵/۱۲ ثانیه ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، طیف های پاسخ تابع شتاب تولید شده (مخصوصاً طیف های شدیدتر) با استفاده از الگوریتم ژنتیک نسبت به الگوریتم کوشی - نیوتن انطباق خوبی به دلیل میزان خطای بیشتر ندارد.

## ۷. اثر تعداد جزءهای زمانی در میزان خطا

همان طور که گفته شد، پس از تجزیه ی داده ها به تعداد سطوح کافی، ضرایب تقریب بازسازی شده در هر سطح به تعدادی جزء زمانی تقسیم و هر کدام از این جزءهای زمانی در یک متغیر ضرب می شوند. هر چه تعداد جزءهای زمانی بیشتر در نظر گرفته شود، میزان خطا کمتر می شود. از طرف دیگر، تعداد متغیرهای بهینه سازی و در نتیجه مدت زمان اجرای الگوریتم بهینه سازی نیز بیشتر می شود. برای این منظور، ضرایب تقریب بازسازی شده ی تابع شتاب ساده شده به تعداد ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۶ و ۳۲ جزء زمانی تقسیم و میزان خطای پایه پس از بهینه سازی محاسبه می شود. همچنین تعداد متغیرهای بهینه سازی برابر تعداد جزء زمانی در تعداد سطح های تجزیه (برابر ۷) است. برای بهینه سازی از الگوریتم کوشی - نیوتن در ۵۰ تکرار استفاده شده است.

در شکل ۱۰، میزان خطا در برابر تعداد جزءهای زمانی آورده شده است. همان طور که ملاحظه می شود، هر چه تعداد جزءهای زمانی بیشتر شود، میزان خطا کمتر می شود. این روند تا تعداد جزء زمانی ۸، خوب پیش می رود؛ ولی بعد از آن، میزان خطا به طور محسوسی کاهش پیدا نمی کند و مدت زمان اجرای الگوریتم نیز زیاد می شود. بنابراین اگر برای تابع هدف اصلی، طول بازه ی زمانی  $\frac{5/12}{8} = 0/64$  ثانیه در نظر گرفته شود، جواب قابل قبول در مدت زمان کم حاصل می شود.

## ۸. تولید توابع شتاب اصلی (۲۰ ثانیه یی)

حال با توجه به پیداشدن بهترین روش بهینه سازی (الگوریتم کوشی - نیوتن در ۱۰۰ تکرار) و صحت روش به کار گرفته شده، اقدام به تولید سه تابع شتاب ۲۰ ثانیه یی شده است. روند تولید تابع شتاب اصلی مانند تابع شتاب ساده شده است. طول و تعداد جزءهای زمانی به ترتیب برابر ۰/۶۴ ثانیه و  $\frac{25/48}{0/64} = 32$  در نظر گرفته شده است. تعداد سطوح تجزیه ی داده ها با استفاده از تبدیل موجک، ۸ در نظر گرفته شده است؛ تا با توجه به رابطه ی ۱۵، دوری تناوب  $0/64 \times 32 = 2/05$  ثانیه باشد.

جدول ۴. مقایسه‌ی توابع شتاب تولیدشده با توابع شتاب  $ETA_{20}^a$ .

خطای مطلق ( $m/s^2$ )	تابع شتاب	خطای مطلق ( $m/s^2$ )	تابع شتاب
۰٫۴۱۰	AF-۰۱	۰٫۴۳۵	$ETA_{20}^a-۰۱$
۰٫۴۳۸	AF-۰۲	۰٫۴۵۴	$ETA_{20}^a-۰۲$
۰٫۴۲۴	AF-۰۳	۰٫۴۲۹	$ETA_{20}^a-۰۳$
۰٫۴۲۴	میانگین	۰٫۴۴۰	میانگین
۰٫۲۵۰	Ave AF-۰۱-۰۳	۰٫۲۶۶	Ave $ETA_{20}^a-۰۱-۰۳$

کاهش یافته است. این تذک لازم است که برای تولید ه یک از تابع شتاب  $ETA_{20}^a$  با پردازش‌گر پنتیوم (IV) با بسامد  $2800$  مگاهرتز بیش از  $120$  ساعت زمان صرف شده است،<sup>[۱۴]</sup> در حالی که برای تولید هر یک از توابع شتاب تولیدشده با مشخصات پردازش‌گر یکسان، کمتر از  $12$  ساعت زمان صرف شده است.

## ۹. نتیجه‌گیری

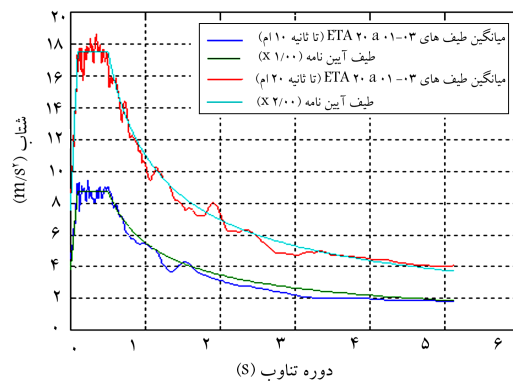
۱. تولید توابع شتاب زمان دوام به دلیل اینکه بهینه‌سازی آنها در حوزه‌ی زمان انجام می‌شود و همچنین زیادبودن تعداد متغیرهای آن، همواره فرآیندی زمان‌بر و مشکل بوده است. در این نوشتار، برای تولید توابع شتاب از بهینه‌سازی در حوزه‌ی زمان و بسامد استفاده شده است. تبدیل موجک به دلیل اینکه محتوای بسامدی یک سیگنال را در طول زمان مورد بررسی قرار می‌دهد و از طرفی دیگر، روش زمان دوام روشی است که عملکرد آن بر اساس زمان است، برای اصلاح داده‌ها در حوزه‌ی بسامد از تبدیل موجک استفاده شده است. همچنین به منظور اصلاح داده‌ها در حوزه‌ی زمان، ضرایب جزئیات بازسازی‌شده‌ی هر سطح به تعداد جزءهای زمانی مساوی تقسیم می‌شوند و هر کدام از این جزءهای زمانی در یک متغیر ضرب می‌شوند. برای محاسبه‌ی متغیرها از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده می‌شود. این کار باعث می‌شود که تعداد متغیرها، در نتیجه‌ی حجم محاسبات بهینه‌سازی تولید توابع شتاب زمان دوام، کاهش یابد.

۲. برای کارایی روش ارائه‌شده، ابتدا یک تابع شتاب ساده تعریف شده است و با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ابتکاری (ژنتیک)، کلاسیک (کوشی-نیوتن) و ترکیبی، تابع شتاب ساده‌شده تولید شد. سپس این روش‌ها با هم مقایسه شدند و مشاهده شد که الگوریتم‌های کلاسیک، بهترین جواب را ارائه می‌دهند.

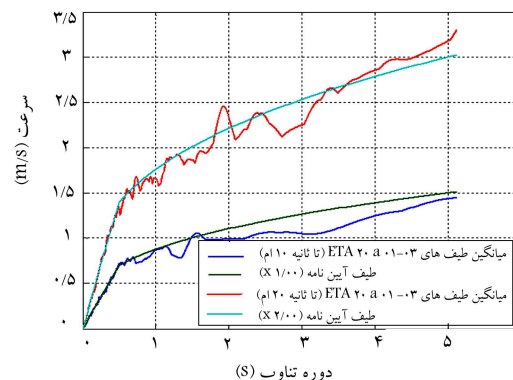
۳. بهینه‌سازی تابع شتاب ساده‌شده در حوزه‌ی زمان و بسامد نسبت به بهینه‌سازی در حوزه‌ی زمان با استفاده از الگوریتم کوشی-نیوتن باعث  $89\%$  کاهش زمان محاسبات بهینه‌سازی و همچنین کاهش  $30/1\%$  خطا می‌شود.

۴. هر چه تعداد جزءهای زمانی بیشتر شود، میزان خطا کمتر می‌شود. ولی از طرف دیگر، سرعت کاهش خطا خیلی کمتر و متغیرها و زمان اجرای بهینه‌سازی بیشتر می‌شود.

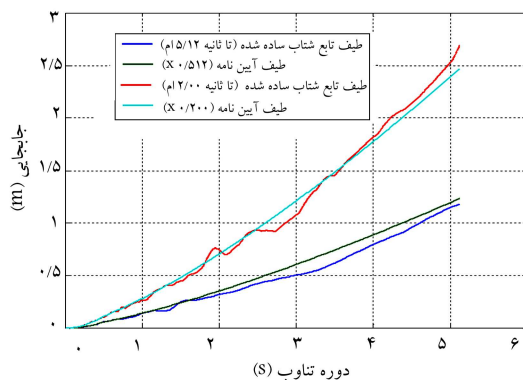
۵. می‌توان توابع شتاب با طول بیشتر مثلاً  $20/48$  ثانیه‌ی نیز در حوزه‌ی زمان و بسامد تولید کرد. نتایج نشان می‌دهند که میزان خطای میانگین طیف‌های پاسخ توابع شتاب تولیدشده با استفاده از این روش نسبت به توابع شتاب  $ETA_{20}^a$ ،  $6\%$  و مدت زمان اجرای محاسبات بهینه‌سازی  $90\%$  کاهش یافته است.



شکل ۱۴. طیف‌های میانگین پاسخ شتاب در لحظات  $10^{\circ}$  و  $20^{\circ}$  ثانیه.



شکل ۱۵. طیف‌های میانگین پاسخ سرعت در لحظات  $10^{\circ}$  و  $20^{\circ}$  ثانیه.



شکل ۱۶. طیف‌های میانگین پاسخ جابجایی در لحظات  $10^{\circ}$  و  $20^{\circ}$  ثانیه.

## ۱.۸. مقایسه‌ی خطاهای طیف پاسخ

مهم‌ترین پارامتر مؤثر در نتایج تحلیل زمان دوام، میزان خطای بین طیف پاسخ با طیف آیین‌نامه است. هر چه میزان خطا کمتر باشد، دقت نتایج حاصل از تحلیل زمان دوام بیشتر است. در جدول ۴، میزان خطا، میانگین خطاها و خطای طیف میانگین توابع شتاب تولیدشده با توابع شتاب  $ETA_{20}^a$  مقایسه شده است. چنان که ملاحظه می‌شود، استفاده از  $3$  تابع شتاب، خطای پایه را به میزان  $41\%$  کاهش می‌دهد. میزان میانگین خطاهای طیف شتاب  $3/6\%$  نسبت به تابع  $ETA_{20}^a$  و همچنین میزان خطای میانگین طیف‌های شتاب  $6\%$

## پانوشتها

1. endurance time method
2. white noise
3. wavelet transformation
4. low pass
5. high pass

## منابع (References)

1. Moghaddam, H., *Earthquake Engineering: Theory and Application*, Farahang Publications, Tehran, Iran, (2002).
2. Bozorgnia, Y. and Bertero, V.V., *Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering*, CRC Press, CA, USA (2004).
3. Estekanchi, H.E., Vafai, A. and Sadeghazar, M. "Endurance time method for seismic analysis and design of structures", *Scientia Iranica*, **11**(4), pp. 361-370 (2004).
4. Nozari, A. "Optimization of endurance time intensifying acceleration functions using classic and heuristic approaches", MSc Thesis, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran (2008).
5. Valamanesh, V., Estekanchi, H.E. and Vafai, A. "Characteristics of second generation endurance time acceleration functions", *Scientia Iranica*, **17**(1), pp. 53-61 (2010).
6. Estekanchi, H.E., Valamanesh, V. and Vafai, A. "Application of endurance time method in linear seismic

analysis", *Engineering Structures*, **29**(10), pp. 2551-2562 (2007).

7. BHRC, *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*, Standard No.2800- 05, 3rd edition, Building and Housing Research Center, Tehran, Iran (2005).
8. Benedetto, J.J. and Frazier, M.W., *Wavelets: Mathematics and Applications*, Boca Raton, CRC Press (1994).
9. Ovanesova, A.V. and Sua'rez, L.E. "Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures", *Engineering Structures*, **26**(1), pp. 39-49 (2004).
10. Daubechies, I. "Ten lectures on wavelets", CBMS - NSF Conference Series in Applied Mathematics, Montpelier, Vermont (1992).
11. MathWorks, *Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox 2*, User's Guide, Revised for version 2.1, Release MATLAB 2009a (March 2009).
12. Goldberg, D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley Publishing Company, NY (1989).
13. Kaveh, A. and Kalatjari, V. "Genetic algorithm for discrete sizing optimal design of trusses using the force method", *Int J Numer Methods Eng*, **55**, pp. 55-72 (2002).
14. Nozari, A. and Estekanchi, H.E. "Optimization of endurance time acceleration functions for seismic assessment of structures", *Int. J. Optim. Civil Eng.*, **1**(2), pp. 257-277 (2011).