

# ارتقاء روش دسته ذرات بهینه‌یاب برای ترکیب مناسب نگاشت‌های جنبش نیرومند زمین

محسن شهروزی<sup>\*۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه خوارزمی، تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۸/۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۵/۱۳)

## چکیده

ماهیت احتمالاتی زلزله مانع از آن می‌شود که بتوان به نگاشت یک زمین‌لرزه خاص برای تحلیل اعتماد و اکتفا کرد، لذا آیین‌نامه‌های طرح لرزه‌ای مقیاس کردن چندین نگاشت را برای کاهش حساسیت نتایج و امکان تصمیم‌گیری بهتر توصیه نموده‌اند تا با مبنای تطبیق طیفی از وجاهت آیین‌نامه طراحی برخوردار باشند. از سوی دیگر برای تحلیل‌های کمی دقیق در برآورد آسیب‌پذیری یا طراحی لرزه‌ای تاریخچه زمانی جنبش نیرومند زمین موردنیاز است. پژوهش حاضر روش ذرات بهینه‌یاب را که طی سال‌های اخیر در مسائل مهندسی توسعه یافته برای ترکیب بهینه شتاب‌نگاشت‌های زلزله فرمول‌بندی می‌کند و سپس دو شیوه ارتقا برای آن عرضه می‌کند که برپایه ترکیب جایگشتی متغیرهای حافظه موجود و مقداردهی احتمالاتی آنها استوار است. طی بحث نظری و بررسی مقایسه‌ای صورت گرفته بین نتایج مزایای روش ابداعی حاضر و شیوه استاندارد در افزایش تطبیق طیفی شتاب‌نگاشت‌ها با طیف هدف آشکار می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** جنبش نیرومند زمین، دسته ذرات بهینه‌یاب، تحلیل دینامیکی

## Improved particle swarm optimization for strong ground motion combination

<sup>۱\*</sup>Mohsen Shahrouzi

<sup>۱</sup>Kharazmi University, Engineering Department

(Received: 30 October 2011, accepted: 4 August 2013)

## Summary

A step-by-step numerical solution to dynamic or nonlinear systems depends on the input time history record of the strong ground motion. Well-known seismic design codes recommend using a set of scaled records instead of only one. That is because a single input motion is not reliable enough to cover the seismic characteristics of all possible earthquakes for engineering design purposes. As a current state of practice, the scaling coefficients are taken similar and the result does not necessarily lead to a close compatibility of the resulted mean spectrum with the standard target. In this regard, the coefficients as floating-point numbers should be searched in the form of an optimization

\*Corresponding author:

shahrouzi@khu.ac.ir

\*نگارنده رابط:

problem. Such a problem deals with a continuous type of search space with an infinite number of points. Thus complex optimizer engines are required to deal with it and seek a true global optimum set of scaling coefficients in order to suitably combine the selected ground motion records for further seismic design purposes. Particle Swarm Optimization, PSO, is one of the multi-agent meta-heuristic methods successfully applied to a variety of engineering design problems.

The present work formulates the problem of seeking optimal scaling factors using a utilized version of swarm intelligence as this method is best suited for continuous search spaces. In addition to inertial, cognitive and social terms of design point directions, an extra term is also utilized to improve the algorithm performance. In the first case, it is a new design vector with its elements selected one by one from other vectors in the current population of the swarm particles. The second modification is ordinating the velocity vector toward a randomly re-initiated particle position. In addition to the standard form of the particle swarm optimization, the aforementioned PSO versions are thus utilized, employed and further compared in the present work.

A variety of real-world ground motion records are picked from an available earthquake. The target spectrum is selected according to the Iranian Standard No.2800 for the soil type III and five percent damping considering the case of practical building structures. For each earthquake, the response spectra are generated for its longitude and transverse excitations and then combined using the Square Root of Sum of Squares (SRSS) method. The resulting SRSS acceleration response spectra are then averaged with the scaling factors with respect to the design target assigned by the developed optimization algorithms.

For the sake of true comparison, the same control parameters are chosen for three proposed versions of PSO, taken 2 for all the social, cognitive and extra congregation or combinatorial term except for the inertial coefficient which is taken 0.4. An error function is also defined to evaluate the compatibility of such weighted average spectrum with the target. The optimizer then samples various combinations of the scaling coefficients for the SRSS spectra and evaluated the error function for every such set. It seeks the optimal set among the continuous search space using the utilized artificial swarm intelligence for a pre-assigned number of particles and algorithm iterations. Consequently, the achieved results in the treated example show superiority of the optimized set over those in the code practice and considerable convergence/effectiveness improvement in the proposed methods over the standard particle swarm optimization.

**Keywords:** Strong ground motion, dynamic analysis, design spectra, particle swarm optimization

## ۱ مقدمه

نگاشت زلزله خاصی را برای وقوع در آینده به طور قطع پیش‌بینی کرد. در عوض آیین‌نامه‌ها با بررسی آماری و حاشیه اطمینان متناسب با انحراف معیار در زلزله‌های متعدد طیف‌های استاندارد هموار شده‌ای توصیه کرده‌اند که شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده باید برای وجاهت طراحی تا حد امکان به آن نزدیک باشند (استاندارد ۲۸۰۰-۱۳۸۴، دستورعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود، ۱۳۸۵).

کاربرد روش‌های دقیق و کمی در طراحی، بهسازی یا آسیب‌پذیری سازه‌ها نیازمند تحلیل‌های گام‌به‌گام خطی یا غیرخطی تاریخچه زمانی با استفاده از شتاب‌نگاشت‌های زلزله است (کلاف و پنزین، ۲۰۰۳). لیکن با عنایت به دوره بازگشت طولانی زمین‌لرزه‌ها نسبت به عمر داده‌های دستگاهی موجود و نیز ماهیت احتمالاتی آنها، نمی‌توان

مسئله پیش گفته را باید برای جست‌وجوی نظم‌یافته ضرایب مناسب ترکیب در قالب بهینه‌یابی فرمول‌بندی کرد (نعیم و همکاران، ۲۰۰۴؛ شهروزی، ۱۳۸۶). مقاله حاضر از میان شیوه‌های نوین بهینه‌یابی (شهروزی و محمدی، ۱۳۸۹؛ گیم و همکاران، ۲۰۰۱؛ شهروزی، ۲۰۱۱) به کاربرد روش گروه ذرات بهینه‌یاب ضمن اصلاح آن برای کارایی بیشتر در مسئله حاضر می‌پردازد. طی برنامه‌نویسی، بحث و اجرای روش، نتایج حاصل نشان می‌دهد که شیوه عرضه شده کاملاً موثر است و همچنین اصلاح آن به تطبیق طیفی بیشتر نسبت به استاندارد هدف منجر خواهد شد.

## ۲ فرمول‌بندی مسئله بهینه‌یابی ضرایب تطبیق طیفی نگاشت‌ها

مسئله حاضر با بردار ضرایب تطبیق  $\underline{Y}$  به شرح زیر طبق روابط (۱) تا (۴) فرمول‌بندی می‌شود:

$$\text{Maximize } F(\{y_i\}) = \frac{1}{E(\{y_i\})}, \quad (1)$$

$$\text{Subject to } 0 \leq y_i \leq 1$$

$$E(\{y_i\}) = \sum_{i=1, \dots, N} \left| \frac{q \bar{A}(T) - A_i(T)}{A_i(T)} \right|, \quad (2)$$

$$\bar{A}(T) = \frac{\sum_{i=1}^N y_i A_i(T)}{N}, \quad (3)$$

$$q = \max_T \left\{ \frac{A_i(T)}{A(T)} \right\}, \quad (4)$$

که  $A_i$  و  $\bar{A}$  به ترتیب مقدار طیف پاسخ شتاب هدف و میانگین طیف شتاب تاریخچه زمانی داده شده (واقعی) برای هر زمان تناوب  $T$  است.  $q$ ، عامل ثانویه برای برآورده کردن قید بیشتر بودن طیف میانگین از هدف استاندارد طراحی است. تابع شایستگی ( $F$ ) با کاهش خطا ( $E$ )، افزایش می‌یابد. نسبت  $A$  بر شتاب اوج زمین ضریب

تهیه شتاب‌نگاشت ویژه یک طرح اغلب به یکی از روش‌های زیر صورت می‌گیرد: (۱) ایجاد مصنوعی شتاب‌نگاشت‌ها با کاربرد مدل‌های ریاضی - آماری (۲) بازسازی نگاشتهای زمین‌لرزه‌های واقعی و (۳) مقیاس کردن چند شتاب‌نگاشت موجود برای تطبیق با طیف طرح استاندارد (مخرجی و گوپتا، ۲۰۰۲؛ کارابالیس و همکاران، ۲۰۰۰؛ النشایی و دیسارنو، ۲۰۰۸؛ فجھان و ازدمیر، ۲۰۰۷؛ نعیم و همکاران، ۲۰۰۴). از آنجاکه شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده با شرایط ساختمانی و منبع یا مسیر مشابه محل طرح مقبولیت بیشتری به لحاظ برخورداری از مشخصات و محتوای بسامدی زلزله‌های واقعی دارند، روش سوم به‌طور گسترده در آیین‌نامه‌های لرزه‌ای پذیرفته و پیشنهاد شده است (استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش سوم، ۱۳۸۴، UBC97 1997). طی این فرایند زوج نگاشتهای چند زلزله موجود ابتدا به حداکثر شتاب زمین مقیاس شده و سپس مقادیر طیفی به شیوه جذر مجموع مربعات ترکیب SRSS و بر عددی آیین‌نامه‌ای (مثلاً ۱.۴ در استاندارد ۲۸۰۰ ایران) تقسیم می‌شوند تا یک نگاشت واحد به ازای هر زوج شتاب‌نگاشت به دست آید. لیکن با عنایت به شیوه آماری در استخراج طیف صاف شده استاندارد طراحی، طیف زلزله‌های واقعی بر آن طیف منطبق نمی‌شوند و با هم متفاوت‌اند. لذا در ادامه فرایند ضریب مقیاسی برای هر یک از زلزله‌ها طوری تعیین می‌شود که طیف میانگین آنها در بازه تناوبی مشخص حداقل برابر طیف هدف استاندارد طرح باشد.

این شیوه مقیاس کردن در استاندارد ۲۸۰۰ با جالش‌هایی روبه‌رو است. از جمله آنکه مشخص نکرده است که کدام زلزله‌ها از فهرست موجود انتخاب شوند تا با اطمینان بر طیف هدف منطبق شوند و مبنای منحصر به فردی برای تصمیم‌گیری و طراحی باشند ضمن اینکه کاربرد ضرایب یکسان به شیوه فوق الزاماً به بهترین تطبیق منجر نخواهد شد.

بازتاب  $B$  را تعریف می کند.

### ۳ روش دسته ذرات بهینه یاب ( Particle Swarm Optimization)

این الگوریتم را ابتدا کندی و ابرهارت در ۱۹۹۵ با شبیه سازی رفتار دسته پرندگان در حکم روشی فراابتکاری پیشنهاد دادند. در میان روش های گوناگونی که تاکنون برای حل مسائل بهینه یابی با الهام گرفتن از رفتارهای تکامل یافته در طبیعت گسترش یافته اند، پژوهشگران دو خاصیت عمده از این دسته های جانداران اقتباس کرده اند: تاثیر پذیری از محیط و خودسازماندهی.

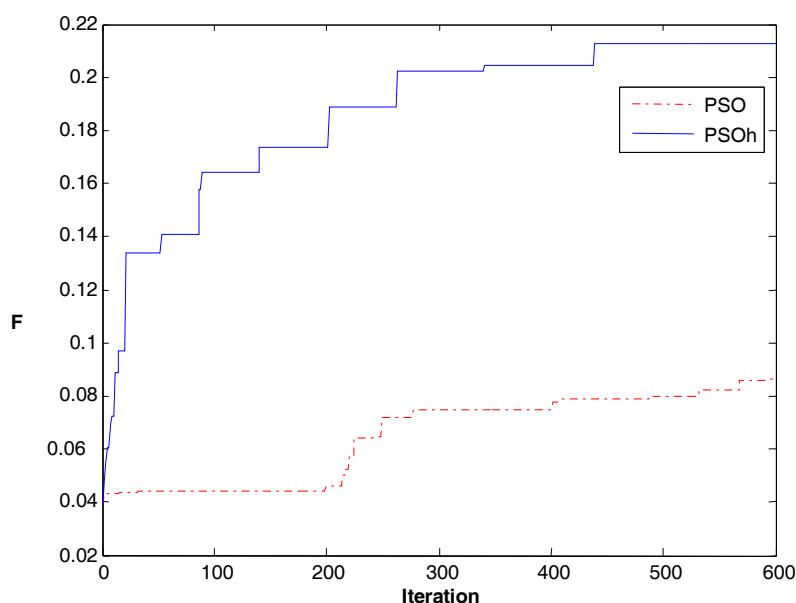
تاثیر پذیری از محیط شامل پاسخ به محرک های محیطی است. این خاصیت در اجتماعاتی مهم است که تمایزی بین شخص یک جزء (جاندار) با سایر اجزا نیست و تبادل اطلاعات میان آنها می تواند به طور غیر مستقیم اتفاق افتد. خودسازماندهی شامل تنظیم حرکت یک جزء بر اساس تجربه قبلی خود و حرکت سایر اجزای گروه است. برای

مثال یک پرنده از گروه پرندگان براساس عوامل زیر

حرکت بعدی خود را تنظیم می کند:

- عامل شناختی
- عامل اجتماعی
- عامل تاخیر (لختی)

طبق عامل اول هر ذره تجربه مسیری که قبلا پیموده را در حافظه دارد و برای حرکت های آینده به کار می گیرد. نقش عامل اجتماعی، بهره گیری از تجربیات سایر اعضای آن گروه (دسته ماهی ها یا پرندگان) است. به علاوه، هر چه سرعت قبلی یک ذره (پرنده یا ماهی) بیشتر باشد تغییر جهت یا سرعت برای آن دشوارتر است که این اثر با عامل لختی نشان داده می شود. از طرفی هر ذره رویکرد عمومی توجه به بهترین حرکت در اعضای مجاور ذره (gbest) تجربه شده در گروه را نیز به کار می برد. پس الگوریتم دسته ذرات بهینه یاب، براساس حرکت گروهی ذرات به سوی بهترین موقعیتی که در گذشته با آن روبه رو شده اند، با امید دستیابی به موقعیت بهتر بنا شده است.



شکل ۱. مقایسه نمودار همگرایی بهترین شایستگی در روش استاندارد با روش اصلاح شده ۱.

گام  $k$ ام  $V_i^k$ ، فاصله بین موقعیت کنونی و  $pbest$  و فاصله بین موقعیت کنونی و بهترین یافته دسته،  $gbest$ ، بهبود بخشد (رابطه ۵ و ۶).  $rand$  یک متغیر احتمالاتی در بازه بین ۰ و ۱ ایجاد می‌کند.

$$Y_i^{k+1} = Y_i^k + V_i^{k+1} \quad (5)$$

$$V_i^{k+1} = w V_i^k + rand \cdot c_1 (Y_i^{pbest} - Y_i^k) + rand \cdot c_2 (Y_i^{gbest} - Y_i^k), \quad (6)$$

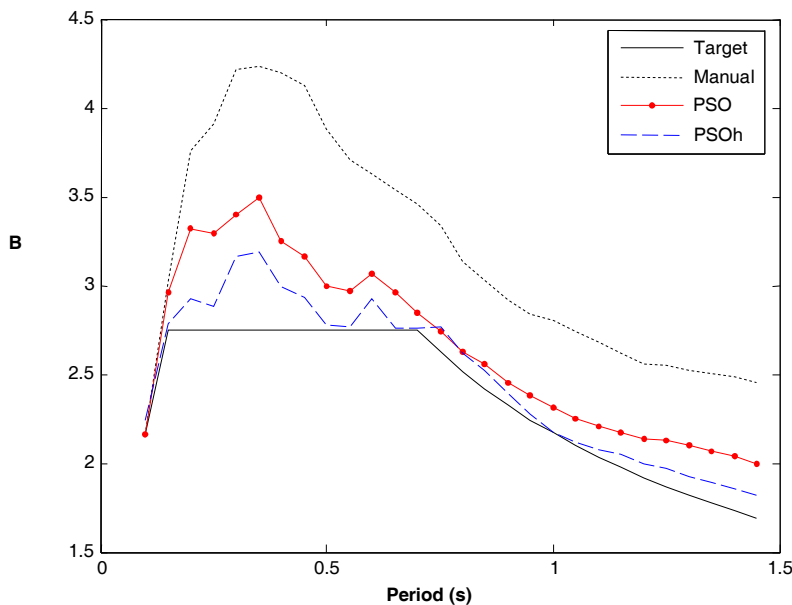
که  $c_1$  ضریب شناختی،  $c_2$  ضریب مشارکت اجتماعی و  $w$  ضریب اینرسی است. همان‌طور که اشاره شد دو رویکرد همسایگی محلی و همسایگی کلی برای اعمال در PSO وجود دارد. بنابر رابطه (۶) اساس روش دسته ذرات بهینه‌یاب افزایش فضای جست‌وجو به صورت جهتی و تأمین نگرش همه‌جانبه با جمع بردارهای احتمالاتی جهت‌های پیش گفته است. برای بهبود روش می‌توان از ایده‌ای مشابه

این الگوریتم نیز جمعیتی از عوامل جست‌وجو (ذرات) را به طور هم‌زمان برای یافتن حل بهینه به کار می‌گیرد و تفاوت آن با سایر روش‌های جست‌وجوی موازی در نحوه هدایت این دسته جمعی مجازی است (شهروزی، ۱۳۸۶).

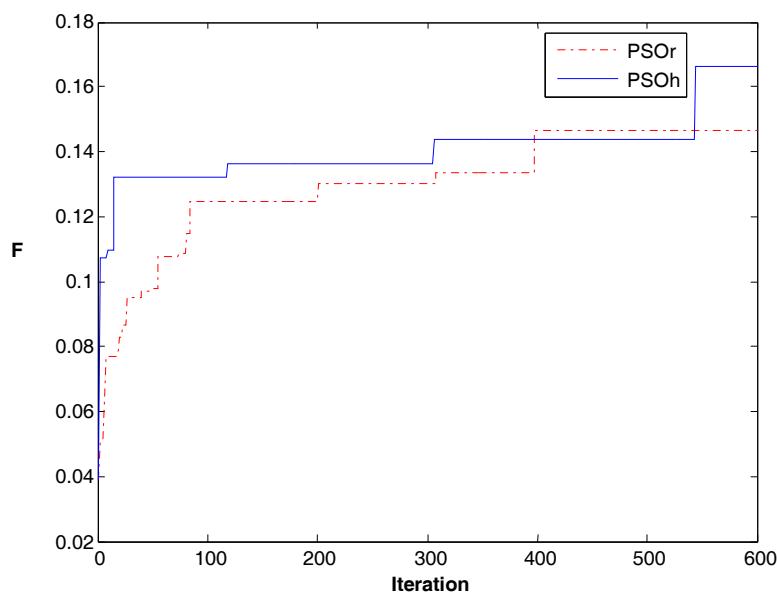
هر عضو بهترین موقعیت خود را در گذشته ( $pbest$ ) که در آن بیشترین ارزش را داشته است و نیز موقعیت بهترین عضو در کل گروه ( $gbest$ ) را از میان  $pbest$ ها نیز در حافظه دارد. این اطلاعات به دانش هر عضو از تجربه خود و از عملکرد سایر اعضای گروه تشبیه می‌شود.

#### ۴ پارامترهای روش استاندارد و شیوه ارتقاء آن در مقاله حاضر

در الگوریتم دسته ذرات بهینه‌یاب طبق فرمول‌های زیر، هر ذره  $i$  سعی می‌کند تا موقعیت خود را با استفاده از اطلاعاتی چون موقعیت کنونی  $Y_i^k$ ، سرعت ذره  $V_i^k$  در



شکل ۲. مقایسه مقادیر ضریب بازتاب میانگین به روش دستی، استاندارد و اصلاح شده ۱ در برابر طیف طرح ۲۸۰۰.



شکل ۳. مقایسه نمودار همگرایی بهترین شایستگی در روش اصلاح شده ۱ و ۲.

توانایی جست‌وجو و کارایی آن در حل مسئله به شدت افزایش یابد:

$$\underline{V}_i^{k+1} = w\underline{V}_i^k + \text{rand} \cdot c_1(\underline{Y}_i^{pbest} - \underline{Y}_i^k) + \text{rand} \cdot c_2(\underline{Y}_i^{gbest} - \underline{Y}_i^k) + \text{rand} \cdot c_3(\underline{Y}_i^R - \underline{Y}_i^k), \quad (7)$$

که  $c_3$  ضریبی ثابت برای اثر  $\underline{Y}_i^R$  است. هی و همکاران (۲۰۰۴) انتخاب تصادفی این بردار را از بین موقعیت‌های سایر ذرات پیشنهاد کردند که داده جدیدی به حافظه موجود نمی‌افزود ولیکن در تحقیق حاضر **بردار**  $\underline{Y}_i^R$  به روش‌های احتمالی و جایگشتی پیش گفته تعیین می‌شود.

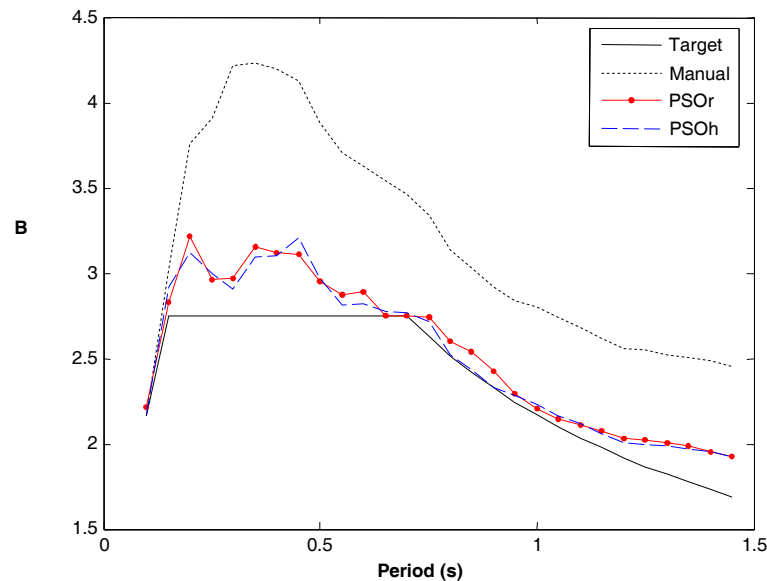
کارایی و کیفیت روش دسته ذرات بهینه‌یاب نیز همچون بسیاری دیگر از روش‌های فراابتکاری به عوامل اکتشاف و استخراج بهینه طی جست‌وجوی فضای مسئله فرمول‌بندی شده وابسته است.

الگوریتم‌های تکاملی در پیوندهای ژنی استفاده کرد (شهروزی، ۲۰۱۱).

اگر مقدار هریک از اجزای (ژن‌های) تشکیل‌دهنده یک متغیر طرح به‌طور تصادفی با مقادیر جزء متناظر از سایر متغیرهای حافظه موجود جست‌وجو تعویض شود شیوه‌ای جدید به پیمایش فضای جست‌وجو نسبت به الگوریتم استاندارد اضافه می‌شود که در مقاله حاضر با عنوان اصلاح نوع ۱ (جایگشتی، PSOh) عرضه شده است.

همچنین ممکن است در انتخاب بردار جدید از مقداردهی تصادفی اجزای متغیر طرح استفاده شود که در این مقاله شیوه بهبود نوع ۲ (احتمالاتی، PSOr) برای روش اصلی قلمداد می‌شود.

پس روش استاندارد PSO را می‌توان با افزودن عبارت جدیدی به رابطه (۶) به شرح زیر ارتقاء داد به‌طوری‌که



شکل ۴. مقایسه مقادیر ضریب بازتاب میانگین به روش دستی، با روشهای اصلاح شده ۱ و ۲ در برابر طیف طرح ۲۸۰۰.

ضرایب مقیاس اعشاری از بازه [۰٫۱] تعیین می‌شوند لذا طی روش اخیر انتخاب و تنظیم ضرایب زلزله‌ها به‌طور هم‌زمان طی فرایند بهینه‌یابی صورت می‌گیرد تا خطای حاصل به حداقل کاهش یابد. برای اجرای الگوریتم **دسته** ذرات بهینه‌یاب و اصلاح ۱ و ۲ به شیوه جایگشتی و احتمالاتی، از ضرایب کنترلی موردنیاز مطابق جدول ۱ استفاده شده است.

جدول ۱. پارامترهای کنترلی برای تنظیم اجرای بهینه‌یابی.

نوع اصلاح روش	الگوریتم	تعداد ذرات	$C_3$	$C_2$	$C_1$	$w_i$
-	PSO	۵	۲	۲	۲	۰٫۴
1	PSOh	۵	۲	۲	۲	۰٫۴
2	PSOr	۵	۲	۲	۲	۰٫۴

مطابق شکل ۱ مشاهده می‌شود که روش اصلاح شده برتری چشمگیری در نمودار همگرایی دارد. جدول ۲ شاخص‌های مقایسه روش دسته ذرات بهینه‌یاب را با روش اصلاح شده ۱ بیان می‌کند. ملاحظه می‌شود که هر دو

از آنجاکه هر دو روش اصلاحی عرضه شده برای PSO به‌طور نظری به افزایش قابلیت اکتشاف نقاط بیشتری از فضای جست‌وجو با الگوریتم منجر می‌شوند، لذا انتظار می‌رود کیفیت نتایج حاصل نسبت به روش استاندارد بهبود یابد که این امر علاوه بر بحث نظری اخیر طی مثال زیر بررسی می‌شود.

#### ۵ اجرا و ارزیابی روش‌های استاندارد و اصلاح شده

تعداد ۲۴ زوج شتاب‌نگاشت زلزله تصحیح شده بر مبنای مشخصات مشترک با بزرگای بیش از ۵ و حداقل شتاب اوج زمین برابر ۰٫۲ شتاب گرانی در حوزه دور از پایگاه داده معتبر بین‌المللی انتخاب شده‌اند (وبگاه داده زلزله PEER ۲۰۱۰). برای هر زمین‌لرزه دو مولفه افقی عمود برهم استفاده و به بیشینه شتاب زمین متناظر مقیاس شده است. طیف هدف هموار از استاندارد ۲۸۰۰ زلزله برای میرایی ۵ درصد، خاک نوع ۳ و منطقه با خطرپذیری بسیار زیاد انتخاب شده و بازه تناوبی هدف بین ۰٫۱ تا ۰٫۵ ثانیه است.

## ۶ نتیجه گیری

همان‌طور که مشاهده شد روش رایج انتخاب دستی زلزله‌ها با کاربرد ضرایب یکسان مقیاس الزاما به طرح مناسبی از تعیین خطر طی مقیاس نگاشتهای تاریخیچه زمانی منجر نمی‌شود؛ چنان‌که برای مثال در این پژوهش خطای تطبیق طیف میانگین حاصل نسبت به طیف طرح هدف که طبق رابطه (۲) برآورد شده بیش از ۳ برابر ضرایب حاصل از روش دسته ذرات بهینه یاب محاسبه شد. از آنجا که این ضرایب با اعمال به جنبش نیرومند زمین پایه تعیین میزان خطر لرزه ای در تحلیل و طراحی متعاقب آن خواهند بود، لذا از لحاظ اقتصادی بهینه یابی آنها کاملاً توجیه پذیر است. از سوی دیگر طبق فرمول بندی عرضه شده در روابط (۱) تا (۴) امکان حذف برخی زلزله های غیرمنطبق بر طیف طرح در صورتی که الگوریتم ضرایب صفر را به طور خودکار به آنها نسبت دهد، تامین شده است که مزیت دیگری برای روش مقاله حاضر به شمار می آید.

به منظور کاهش هزینه محاسبات بهینه، الگوریتم دسته ذرات بهینه یاب برای این مسئله ویژه سازی شد. همچنین با عرضه نسخه اصلاح شده آن، کارایی روش افزایش یافت. در این بررسی علاوه بر زمان محاسبات، شاخص های کارایی و کیفیت (کاهش خطا یا همان افزایش شایستگی حاصل از یک مجموعه ضرایب) در نتایج روش ها طبق جدول ۲ مقایسه شد. در حالی که روش استاندارد توانست شایستگی نهایی را نسبت به مقدار آن در ابتدای بهینه یابی ۱۲۰٪ افزایش (و خطای متناظر را کاهش) دهد این میزان با اصلاح روش به ۴۴۰٪ رسید که حدود ۳ برابر بهبود را در نتیجه شیوه اصلاح جایگشتی عرضه شده در مقاله حاضر نشان می دهد. در ضمن مشاهده شده که تاثیر اصلاح احتمالاتی روش حدوداً مشابه ولی اندکی کمتر از اصلاح جایگشتی بوده است. این نتیجه که حتی با کاربرد ۵ ذره بهینه یاب برای افزایش کارایی و

روش زمان محاسباتی به نسبت کمی برای بهبود چشمگیر تطبیق طیفی نیاز دارند. روش اصلاح شده ۱ ظرف حدود ۳ ثانیه توانسته مقادیر طیفی را در مجموع حدود ۴ برابر به طیف نزدیک تر کرده و از افزایش غیر ضروری سطح خطر، بکاهد (شکل ۲). چنین نتیجه ای قدرت تصمیم گیری در محاسبات خطرپذیری زلزله را بهبود خواهد داد. روش استاندارد اگرچه ۷۷٪ مدت روش اصلاح شده را در محاسبات به کار برده لیکن بهبود شایستگی روش اصلاح شده نسبت به آن ۳/۷ برابر بوده است. برای تایید صحت این مقایسه همان‌طور که در شکل های ۱ و ۳ مشاهده می شود نقطه شروع هردو روش از یک جمعیت ذرات یکسان آغاز شده است. مقایسه زمان کمتر و شایستگی بیشتر با شاخص کارایی کل مشخص شده که برای اصلاح ۱ نسبت به روش بدون اصلاح حدود ۳ برابر به دست آمده است.

با مقایسه نوع اصلاح در شکل های ۳ و ۴ می توان نتیجه گرفت که هر دو شیوه اصلاح در کاهش خطای طیفی نسبت به روش دستی (ضرایب یکسان مقیاس) کاملاً موثرند چنان‌که در این اجرا خطا از حدود ۱۲٪ به ۴/۷٪ کاهش یافته است. نمودارهای همگرایی و طیف میانگین حاصل کارایی هردو شیوه اصلاح را مشابه هم نشان می دهند و به عبارت دیگر نسبت شاخص کارایی کلی بین آنها که حدود ۱/۰۲ به دست آمده موید این امر است.

جدول ۲. نمونه نتایج حاصل از اجرای بهینه یابی.

الگوریتم	زمان محاسباتی (ثانیه)	درصد بهبود شایستگی	مقایسه زمان	مقایسه کیفیت	مقایسه کارایی
PSO	۲/۴	٪۱۲۰	۰/۷۷	۱	۱
PSOh	۳/۰	٪۴۴۰	۱	۳/۷۰	۲/۹



- Eberhart, R. C., and Kennedy, J., 1995, A new optimizer using particle swarm theory, Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, 39-43, Piscataway, NJ: IEEE Service Center.
- Elnashai, A. S., and Di Sarno, L., 2008, Fundamentals of Earthquake Engineering: John Wiley & Sons, UK.
- Fahjan, Y., Ozdemir, Z., 2007, Procedures for real earthquake time histories scaling and application To fit Iranian design spectra, Proceedings of 5th International Conference of Earthquake Engineering and Seismology, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, I. R. Iran.
- Geem, Z. W., Kim, J. -H., and Loganathan, G. V., 2001, A new heuristic optimization algorithm: harmony search, Simulation, **76**(2), 60-68.
- He, S., Wu, Q. H., Wen, J. Y., Saunders, J. R., Paton, R. C., 2004, A particle swarm optimizer with passive congregation: Bio Systems, **78**, 135-147.
- Karabalis, D. L., Cokkinides, G. J., Rizos, D. C., and Mulliken, J. S., 2000, Simulation of earthquake ground motions by a deterministic approach: Advances in Engineering Software, **31**, 329-338.
- Mukherjee, S., and Gupta, V. K., 2002, Wavelet-based generation of spectrum-compatible time-histories: Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **22**, 799-804.
- Naeim, F., Alimoradi, A., and Pezeshk, S., 2004, Selection and scaling of ground motion time histories for structural design using genetic algorithms: Earthquake Spectra, **20**(2), 413-426.
- Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER Strong Motion Database, <http://peer.berkeley.edu/smcat/>, accessed 22 June 2010.
- Shahrouzi, M., 2011, A new hybrid genetic and swarm optimization for earthquake accelerogram scaling: International Journal of Optimization in Civil Engineering, **1**(1), 127-140.
- Uniform Building Code (UBC97), 1997: International Conference of Building Officials, Whittier, California.
- کاهش زمان محاسباتی حاصل شد توانایی الگوریتم‌های عرضه شده برای مسئله اخیر را در افزایش کیفیت هم‌زمان با سرعت محاسباتی نشان می‌دهد. بدین ترتیب اصلاح جایگشتی ارائه شده در الگوریتم دسته ذرات بهینه‌یاب با بهبود اکتشاف فضای جستجو به افزایش توانایی آن در مساله حاضر منجر شده و نتایج عددی در کنار بحث نظری اخیر، اعتبار شیوه بهبود یافته در این مقاله را برای کاربردهای مهندسی نشان می‌دهد.
- ### منابع
- عدالت، ع. و سیاه‌کوهی، ح. ر.، ۱۳۸۶، استفاده از رخساره‌های لرزه‌ای در توصیف یکی از مخازن نفتی ایران: مجله ژئوفیزیک ایران، **۴**(۱)، ۳۷-۴۹.
- دفتر امور فنی و تدوین معیارها سازمان برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۵، دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود: انتشارات پژوهشگاه بین‌المللی لرزه‌شناسی و مهندسی زلزله.
- شهروزی، م.، ۱۳۸۶، روش‌های فراابتکاری جست‌وجوی بهینه‌گسسته ابعاد، الگو و پیکربندی در مسائل سازه‌ای، تازه‌های ساختمان و مسکن، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن: دوره یازدهم، شماره اول و دوم، شماره پیاپی ۳۳.
- شهروزی، م. و محمدی، ا.، ۱۳۸۹، روش دسته ذرات بهینه‌یاب برای جست‌وجوی ضرایب مقیاس شتاب‌نگاشت‌ها: پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران، ۱۴ تا ۱۶ اردیبهشت.
- کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، ۱۳۸۴، آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد شماره ۲۸۰۰ ۸۴، ویرایش سوم، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- Clough, R. W., and Penzien, J., 2003, Dynamics of Structures, Third Ed., Computers & Structures, Inc. Berkeley, CA.