



Influence of Inelastic Constant-Ductility SDOF Location versus Near-Fault Records

Sh. Monfaredi, H. Hamidi* , H. Khosravi

Civil Engineering Department, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

ABSTRACT: The unique features and destructive effects of near-fault records are of high interest to many researchers; the issue of the location of structures against these records has received less attention due to the lack of data. Therefore, in this study, the focus is on the effect of the location of the structure vs. causative fault on the amount of damage. To this end, we need enough near-fault records, which can be simulated using the synthetic generation technique due to the lack of real data. Using the fault parameters obtained for the 1999-Kocaeli earthquake, 273 earthquake records were generated by different location coordinates using the theoretical-based Green's function. To evaluate the seismic performance of the structures, OpenSEES software was used to carry out 9828 dynamic time-history analyses. The studied structures are SDOF with constant ductility. The records were applied according to the position of the structure against the causative fault and the relevant spectra were drawn as colored contours. The results showed that the location of the maximum responses in the inelastic state is almost the same as in the elastic state, so the critical location can be determined by a simpler elastic analysis; Stations that showed a maximum value at low periods have a larger amplitude, and stations that showed a maximum value at high periods have a higher pulse period. Both the distance and the angle of the SDOF location are influential in determining the location of the more severe failure.

Review History:

Received: Jun.02, 2020
Revised: Aug. 28, 2020
Accepted: Oct. 19, 2020
Available Online: Oct. 30, 2020

Keywords:

SDOF
Location of the structure
Near-fault
Constant ductility
Bi-linear steel material.

1- Introduction

In recent years, numerous research has been carried out about constant-ductility SDOF systems [1–3]. In this researches, the focus was on the characteristics of near-fault records and their effects on structures response [4] but site orientation was rarely taken into account. Major researches were related to the effect of rotation of components of ground motions [5-9]. It is obvious that the distance and angle of the structure from fault alignment and location of the epicenter are effective on structural responses. Therefore, an ensemble of 273 records was generated via theoretical-based Green's function technique by using fault rupture parameters derived from Hamidi et al.'s [10] research for the 1999 Kocaeli earthquake. Accordingly, the effect of site orientation toward earthquake in the form of S_d and S_a contours has been evaluated for constant-ductility inelastic SDOF systems for two ductility ratios $\mu=2$ and $\mu=3$.

2- Methodology

The SDOF system modeled in this paper includes mass, a rigid column with the elastic beam-column element, and a zero-length spring incorporating Steel01 material with elastic-perfectly plastic behavior. For computing responses, two OpenSEES elastic and inelastic codes were prepared. Matlab program was used to connect these two OpenSEES

codes. In the elastic code, the value of yielding moment M_y is defined to be a large number so that it remains linear but in inelastic code the M_y value defined variable that changes due to the yielding resistance.

3- Results and Discussion

For investigating the analysis results, some related contours were presented to show S_d and S_a values supporting periods from 1 to 5 sec as well as a specific value of 0.5 sec.

3- 1- Investigation of inelastic S_d values

To investigate S_d in the inelastic constant ductility status, some contours were drawn for $\mu=2$ and $\mu=3$ statuses. By comparing these contours with that of the elastic contour, it was specified that for periods equal or less than 3 sec the maximum value occurred on the right side of the epicenter, and for periods more than 3 sec, the location of maximum value occurred in the left side of the epicenter. The location of the maximum value in low periods in three statuses was similar but in higher periods seem different. It was specified that the maximum and minimum values in these three statuses had no significant difference. Generally, the two inelastic statuses had a close trend.

Fig. 1 shows the inelastic spectral displacement (S_d) contour for fault-normal records (for the case $\mu=3$).

*Corresponding author's email: h.hamidi@nit.ac.ir@



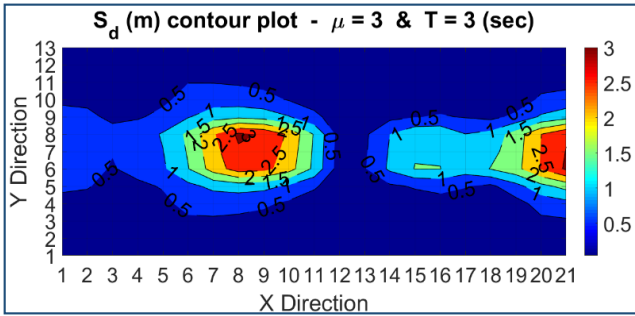


Fig. 1. Inelastic spectral displacement (Sd) contour.

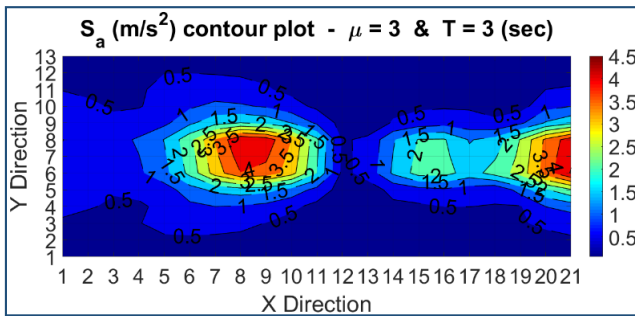


Fig. 2. Inelastic spectral displacement (Sa) contour.

3- 2- Investigation of inelastic Sa values

To investigate Sa in the inelastic constant ductility status, some contours were drawn for $\mu=2$ and $\mu=3$ statuses. By comparing these contours with elastic contour, it was specified that up to 4 sec, the maximum value occurred on the right side of the epicenter, and after 4 sec, the maximum value was observed on the left side. The location of the maximum value in low periods was similar in three statuses, and in high periods was approximately similar. By increasing μ the maximum value of Sa was decreased except for 0.5 sec. The location of the maximum value is constant for different periods. Fig. 2 shows the inelastic spectral displacement (Sa) contour for fault-normal records (for the case $\mu=3$).

3- 3- Strong ground motion parameters

In the investigation of strong ground motion parameters (i.e. PGA, PGV, and PGD), it was observed that the maximum values happened in the end rows that coincides with the location of the maximum value of Sd and Sa. This means that in the regions where the maximum responses were observed, the intensity and the ground displacement were higher. Fig. 3 demonstrates the variation of strong ground motion parameters versus fault alignment via colorful contours.

4- Conclusion

•By comparing Sd and Sa in the forms of elastic and inelastic behavior for two ductility demand ratios ($\mu=2$ and $\mu=3$), approximately a similar trend was seen between

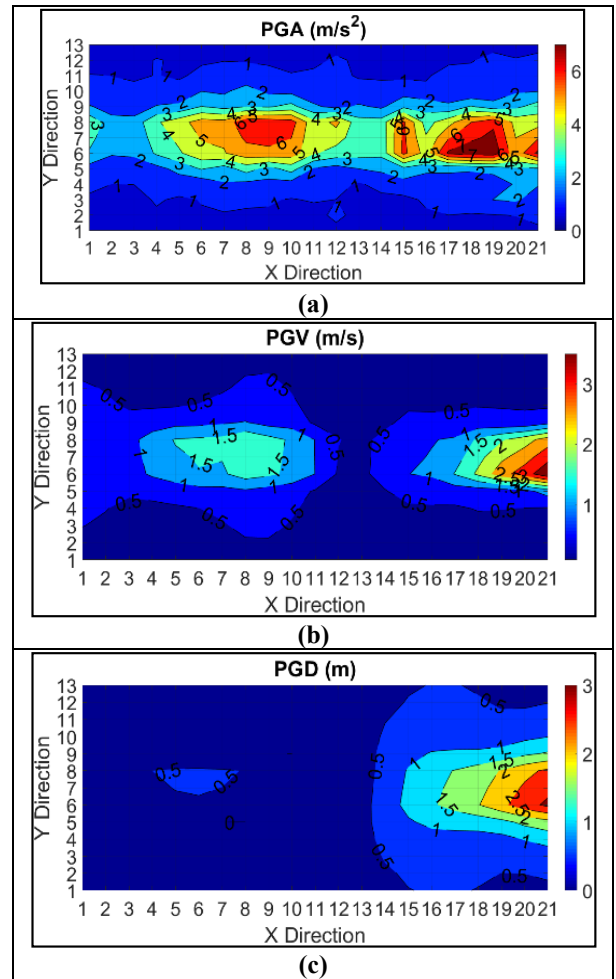


Fig. 3. Strong ground motion parameters contours.

elastic and inelastic responses. Therefore, by an appropriate approximation by elastic analysis, one can estimate the values of the maximum responses and the corresponding locations for inelastic behavior.

•Both parameters of R and θ (distance and angle from fault alignment) are important; two stations may have the same R but because of having different θ , different responses would be achieved.

•The Effect of directivity is slight on the low-period structures. But this effect is quite obvious in the response of long-period structures. So that in the period of 0.5 sec, the diagram is seen as a line and in the period of 4 sec, the diagram is seen as a parabola.

References

[1] Madhu Girija H, Gupta VK. Scaling of constant-ductility residual displacement spectrum. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2020;49:215–33.
 [2] Hamidi H, Karbassi A, Lestuzzi P. Seismic response of RC buildings subjected to fling-step in the near-fault region. *Structural Concrete* 2020; 21(5).

- [3] Lioussatou E, Fardis MN. Near-fault effects on residual displacements of RC structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2016;45:1391–409.
- [4] Khaloo AR, Khosravi H, Hamidi Jamnani H. Nonlinear interstory drift contours for idealized forward directivity pulses using “modified fish-bone” models. *Advances in Structural Engineering* 2015;18:603–27.
- [5] Nievas CI, Sullivan TJ. Accounting for directionality as a function of structural typology in performance-based earthquake engineering design. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2017;46:791–809.
- [6] Bradley BA, Baker JW. Ground motion directionality in the 2010–2011 Canterbury earthquakes. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2015;44:371–84.
- [7] Nicknam A, Barkhodari MA, Hamidi Jamnani H, Hosseini A. Compatible seismogram simulation at near source site using Multi-Taper Spectral Analysis approach (MTSA). *Journal of Vibroengineering* 2013;15.
- [8] Pinzón LA, Mánica MA, Pujades LG, Alva RE. Dynamic soil-structure interaction analyses considering directionality effects. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2020;130:106009.
- [9] Grant DN, Padilla D, Greening PD. Orientation dependence of earthquake ground motion and structural response. *Protection of Built Environment Against Earthquakes*, Springer; 2011, p. 57–73.
- [10] Hamidi H, Khosravi H, Soleimani R. Fling-step ground motions simulation using theoretical-based Green’s function technique for structural analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2018;115:232–45.
- [11] Abrahamson N. Seismological aspects of near-fault ground motions. 5th Caltrans Seismic Research Workshop, 1998.
- [12] Heaton TH, Hall JF, Wald DJ, Halling MW. Response of high-rise and base-isolated buildings to a hypothetical Mw 7.0 blind thrust earthquake. *Science* 1995;267:206.
- [13] Somerville PG. Development of ground motion time histories for phase 2 of the FEMA/SAC steel project. SAC Joint Venture; 1997.
- [14] ASCE-7. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. ASCE/SEI 7-16; 2016.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Sh. Monfaredi, H. Hamidi, H. Khosravi, *Influence of Inelastic Constant-Ductility SDOF Location versus Near-Fault Records*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(11) (2022) 1041-1044.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18538.6894](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18538.6894)





بررسی موقعیت قرارگیری سازه تک درجه آزاد غیرالاستیک با شکل پذیری ثابت در برابر نگاشت‌های حوزه نزدیک

شکیبا منفردی، حامد حمیدی*، حر خسروی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۱۳
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۶/۰۷
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۲۸
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۸/۰۹

کلمات کلیدی:

سازه تک درجه آزاد
موقعیت سازه نسبت به گسل
حوزه نزدیک
شکل پذیری ثابت
رفتار دوخطی

خلاصه: ویژگی های منحصر به فرد و آثار مخرب رکوردهای حوزه نزدیک گسل و ارائه‌ی راهکارهای مهندسی جهت پیشگیری از خساراتشان مورد توجه بسیاری از پژوهشگران می‌باشد؛ مسأله‌ی موقعیت قرارگیری سازه‌ها در برابر این رکوردها به دلیل کمبود داده‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، در این پژوهش تمرکز بر روی تأثیر موقعیت قرارگیری سازه در میزان خسارت‌هایی است که در هنگام زلزله به آن اعمال می‌شود. به منظور بررسی در این زمینه نیازمند رکوردهای زلزله می‌باشیم که به دلیل کمبود داده‌های شتاب نگاری دستگاهی، می‌توان با استفاده از تکنیک‌هایی جنبش نیرومند زمین را شبیه‌سازی کرد. با استفاده از پارامترهای گسلش به دست آمده برای زلزله‌ی کوچائیلی ترکیه ۱۹۹۹، ۲۷۳ شتاب نگاشت زلزله با توجه به مختصات مکانی مختلف به وسیله‌ی تابع گرین نظری تولید شد. به منظور ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها از نرم افزار OpenSEES و ۹۸۲۸ تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی استفاده شد. سازه‌های بررسی شده، تک‌درجه آزاد غیرالاستیک با شکل‌پذیری ثابت می‌باشد که رکوردها با توجه به موقعیت قرارگیری سازه نسبت به گسل اعمال گردید و با به دست آوردن پاسخ‌ها، طیف‌های مربوطه به صورت کانتورهای رنگی ترسیم شد. نتایج نشان داد موقعیت پاسخ‌های بیشینه در حالت غیرالاستیک تقریباً مشابه حالت الاستیک می‌باشد. لذا به وسیله‌ی یک تحلیل الاستیک که ساده‌تر است می‌توان موقعیت‌های بحرانی‌تر را مشخص کرد؛ ایستگاه‌هایی که در پیوندهای پایین مقدار بیشینه را نشان دادند دامنه‌ی بیشتر، و ایستگاه‌هایی که در پیوندهای بالا مقدار بیشینه را نشان دادند پرپد پالس بیشتری دارند. همچنین در تعیین موقعیت خرابی شدیدتر هر دو عامل فاصله و زاویه‌ای که سازه مورد نظر از خط گسل می‌گیرد، تأثیرگذار می‌باشند.

۱- مقدمه

پس از وقوع زلزله‌های مخربی از جمله زلزله ۱۹۹۲ لندنرژ^۱، زلزله ۱۹۹۴ نورثریج^۲، زلزله ۱۹۹۵ کوبه ژاپن^۳ و زلزله ۱۹۹۹ چیچی تایوان^۴ بود که نگاشت‌های نزدیک گسل و خصوصیات منحصر به فرد آنها مورد توجه قرار گرفت. در حوزه نزدیک گسل، جنبش نیرومند زمین تحت تأثیر مکانیزم شکست، جهت انتشار گسیختگی گسل نسبت به سایت، موقعیت ایستگاه ثبت شده در ارتباط با گسل و تغییر مکان پسماند زمین قرار می‌گیرد [۱-۳]. یکی از فاکتورهایی که بر روی حرکت در ناحیه نزدیک گسل تأثیر می‌گذارد، جهت گسیختگی است که در آن گسیختگی از کانون زلزله در امتداد ناحیه

گسیختگی گسترش می‌یابد و به آن اثر جهت‌پذیری می‌گویند [۴]. پدیده جهت‌پذیری پیشرونده^۵ هنگامی اتفاق می‌افتد که گسیختگی به سمت سایت انتشار یابد و جهت لغزش گسل هم به سمت سایت باشد و از طرف دیگر زاویه بین گسل و جهت گسیختگی از کانون به سایت کوچک باشد. در صورتی که سایت در نزدیکی مرکز زلزله باشد، گسترش گسیختگی باعث دور شدن انتشار گسیختگی از سایت می‌شود و جهت‌پذیری پسرونده^۶ اتفاق می‌افتد و اگر سایت تقریباً عمود به گسل نسبت به کانون زلزله باشد، احتمال است که جهت‌پذیری خنثی^۷ را نشان دهد [۴-۷].

به طور کلی یک نگاشت نزدیک گسل، شامل مؤلفه افقی عمود بر گسل، مؤلفه افقی موازی گسل و مؤلفه قائم می‌باشد که در این میان مؤلفه افقی عمود بر گسل، به دلیل دارا بودن اثر جهت‌داری و با توجه به مشاهدات در

- 1 1992 Landers
- 2 1994 Northridge
- 3 1995 Kobe, Japan
- 4 1999 Chi-Chi, Taiwan

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: h.hamidi@nit.ac.ir



فاکتور شکل پذیری (μ) افزایش می یابد، تأثیر ویژگی پالسگونه سرعت نزدیک گسل بر روی طیف پاسخ غیرالاستیک کاهش می یابد [۱۵]. گیلی و همکاران در سال ۲۰۱۰ پاسخ سیستمهای تکدرجه آزاد غیرالاستیک را در برابر حرکات دارای اثرات جهت پذیری پیش‌رونده و بدون اثرات جهت پذیری پیش‌رونده به وسیله فاکتورهای کاهش مقاومت وابسته به پرپود و شکل پذیری به دست آوردند و نتیجه گرفتند که فاکتورهای کاهش برای جنبش های دارای اثر جهت پذیری پیش‌رونده و بدون اثر جهت پذیری پیش‌رونده به ویژه در محدوده پرپودهای پالس ($T=0.5-3$ sec)، متفاوت هستند [۱۶]. وانگ و همکاران^۴ در سال ۲۰۱۵، مقادیر طیفی را برای سیستم تکدرجه آزاد و سیستم دو درجه آزاد تک جرم، تحت ۸۹ رکورد دوجبهته^۵، مقایسه کردند. نتایج نشان داد هنگامی که الگو و مقادیر دو نوع طیف انرژی از فاکتور شکل پذیری، پرپود و خاک سایت تأثیرگیرد، ویژگی‌های الگوی طیفی متداول برای خاک سایت دارند [۱۷]. مایکل اسکات و بنجامین ماسون^۶ در سال ۲۰۱۷ به منظور بررسی پاسخ سیستم سازه‌ای تحت توالی لرزه‌ای و بار سونامی^۷ طیف پاسخ غیرخطی شکل پذیری ثابت را برای سیستم های تکدرجه آزاد الاستوپلاستیک در معرض بارهای لرزه‌ای همراه با بارهای هیدرودینامیک ترسیم نمودند. طیف و معیار شدت به دست آمده نشان داد که بزرگ‌نمایی پاسخ برای سیستم‌های با پرپود طبیعی طولانی و ظرفیت شکل پذیری بالا تحت بارهای لرزه‌ای بسیار چشمگیر است [۱۸]. فرانسیسکو^۸ در سال ۲۰۱۹ نسبت جابه‌جایی غیرخطی شکل پذیری ثابت سیستم‌های تکدرجه آزاد مرکزگرا^۹ را با دو سطح ظرفیت استهلاک انرژی محاسبه کرد و با پاسخ سیستم تکدرجه آزاد پلاستیک دوخطی^{۱۰}، کلاف^{۱۱} و هیستریزس تاکدا^{۱۲} مقایسه نمود. همچنین تخمین تحلیلی نسبت‌های جابه‌جایی غیرالاستیک شکل پذیری ثابت برای مقادیر میانگین و ۹۰ درصد، برحسب پرپود اولیه، سطح شکل پذیری و نسبت سختی بعد تسلیم پیشنهاد شد [۱۹]. مدهو گیریجا و گوپتا^{۱۳} در سال ۲۰۲۰ تغییرمکان‌های پسماند^{۱۴} را برای نوسانگرهای تکدرجه آزاد الاستیک-پلاستیک کامل با کمک مدل

برخی زمین لرزه‌ها در غالب موارد بیشترین تأثیر را در پاسخ سازه‌ها دارد و اثر آن عمدتاً غالب می شود [۸]. اثرات رکوردهای حوزه نزدیک بر سازه‌ها در تحقیقات مختلفی بررسی شده است. به طور مثال با بررسی خسارات زلزله ی بم (۲۰۰۳) مشاهده شده است قابهای خمشی که در جهت عمود بر گسل بودند متحمل خسارات شدید شامل تغییرشکل جانبی زیاد در طبقه ی همکف شدند؛ ولی قابهایی که در جهت موازی گسل بودند تحت نیروی قابل توجهی قرار نگرفتند [۲، ۹ و ۱۰].

در این پژوهش به منظور بررسی موقعیت قرارگیری سازه در پاسخ‌های آن در برابر رکوردهای حوزه نزدیک از سازه تکدرجه آزاد غیرالاستیک با شکل پذیری ثابت استفاده شده است. پژوهش های متعددی در طول سالیان گذشته در ارتباط با پاسخ سازه‌های تکدرجه آزاد شکل پذیری ثابت انجام گرفته است [۷، ۱۱ و ۱۲]. به عنوان مثال در سال ۲۰۰۰، بائز و میراندا از ۸۵ رکورد نزدیک گسل برای محاسبه نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک شکل پذیری ثابت استفاده کردند. نتایج نشان داد که به طور میانگین رکوردهای نزدیک گسل، موجب ایجاد نسبت‌های جابه‌جایی غیرالاستیک بزرگتری نسبت به نتایج رکوردهای دور از گسل که مربوط به مطالعه قبلی‌شان بود، شده است [۱۲]. مک رائی^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۱ اثرات جنبش زمین نزدیک گسل را در پاسخ غیرخطی سازه‌هایی که به صورت نوسانگرهای تکدرجه آزاد با پرپودهای محدوده ۰/۵ تا ۳ ثانیه و شکل پذیری هدف ۲، ۴، ۶ مدل شدند، بررسی کردند. نتایج نشان داد که تقاضای غیرالاستیک پرپود متوسط و طولانیتر نوسانگر در پاسخ به جنبش عمود بر جهت لغزش برای سایت‌های نزدیک گسل افزایش یافت و نوسانگر پرپود کوتاه خیلی تحت تأثیر جنبش نزدیک گسل قرار نگرفت [۱۳]. چوپرا و چینتاپاکدی^۲ در سال ۲۰۰۱ میانگین نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک شکل‌پذیری ثابت را برای سیستم‌های تکدرجه آزاد الاستوپلاستیک محاسبه کردند. نتایج نشان داد هنگامی که نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک برای پرپودهای نرمالایز شده جنبش نیرومند با توجه به پرپود گوشه TC، به عنوان نماینده‌ی پاسخ الاستیک سیستم تکدرجه آزاد می باشد؛ نسبت‌های جابه‌جایی غیرالاستیک شکل پذیری ثابت، روند خیلی مشابه با آنهایی دارند که برای زمین لرزه های دور از گسل محاسبه شدند [۱۴]. ماورودیس^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۴ با بررسی پاسخ الاستیک و غیرالاستیک سیستم‌های تکدرجه آزاد در برابر زمین لرزه های دستگاهی و مصنوعی نتیجه گرفتند که هنگامی که

4 Wang
5 bidirectional
6 Scott and Mason
7 sequential earthquake and tsunami loading
8 Francesco
9 self-centering
10 bilinear plastic
11 Clough
12 Takeda hysteresis
13 Madhu Girija and Gupta
14 residual displacement

1 MacRae
2 Chopra and chintapakdee
3 Mavroeidis

جایی ماندگار در برخی از رکوردهای این زلزله به صراحت دیده شد. گسیختگی سطحی در این زلزله در حدود ۱۴۵ کیلومتر امتداد یافت که حدود ۹۵ کیلومتر به سمت شرق مرکز زلزله و حدود ۵۰ کیلومتر به سمت غرب مرکز زلزله بود [۲۶]. گسیختگی گسل کوچائیلی وضعیت خاصی داشته است و به صورت انتشار گسیختگی دوطرفه نامتقارن اتفاق افتاد. گسیختگی اول، گسترش گسیختگی به طرف بالا و غرب مرکز زلزله در طول ۱۰ ثانیه ابتدایی که ۲۰ کیلومتر مساحت گسل در طول لغزش گسل و ۱۵ کیلومتر در طول عمق گسل را شامل شد و گسیختگی دوم ۷ ثانیه پس از شکست اولیه، یک جانبه به سمت شرق مرکز زلزله گسترش یافت که مقدار این گسیختگی به فاصله ۵۰ کیلومتر از مرکز زلزله و عمق حدود ۸ کیلومتر رسید [۲۷].

در این پژوهش برای شبیهسازی نگاهشدها از پارامترهای گسلش به دست آمده از تحقیق حمیدی و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۲۵] و تابع تئوری گرین استفاده شد که برای یافتن پارامترهای مربوط به گسلش به روش مهندسی معکوس، از روش الگوریتم ژنتیک چندهدفه استفاده شد و در نتیجه ۲۷۳ نگاهت زلزله به دست آمد. برای به دست آوردن پارامترهای لرزه خیزی زلزله کوچائیلی ۱۹۹۹ ایستگاه یاریمکا (YPT) انتخاب شد. خاک استفاده شده و مدل‌های سرعت برای ایستگاه یاریمکا آنهایی بودند که توسط سکیگوچی و ایواتا^۲ گزارش شدند [۲۶]. تابع لغزش مثلث شکل برای هر تکه گسل به صورت توزیع لغزش در طول گسل (۴×۲۰ تکه گسل)، بر مبنای یاگی و کیکوچی اجرا شد [۲۷]. شکل ۱ مختصات ایستگاهها را نشان می دهد. فاصله ایستگاهها هم در جهت طولی و هم در جهت عرضی ۴ کیلومتر می باشد. ۱۳ ردیف در جهت X و ۲۱ ردیف در جهت Y و طول گسل بررسی شده ۱۰۲ کیلومتر است.

شکل ۲ تاریخچه ی زمانی شتاب را برای چند ایستگاه شبیه سازی شده در موقعیت‌های مختلف به عنوان نمونه نشان می دهد. شماره رکوردهای استفاده شده بر مبنای شماره گذاری نشان داده شده در شکل ۱ می باشد. به عنوان نمونه شکل ۳- الف تاریخچه ی زمانی شتاب و شکل ۳- ب تاریخچه زمانی سرعت می باشد. با توجه به نگاهت موجود، می توان حضور پالس را در نگاهت نزدیک گسل مشاهده کرد.

۳- مدل سازی سیستم تک درجه آزاد دوبعدی غیر الاستیک در حالت ثابت

استفاده از سیستم های تک درجه آزاد در مباحث تحلیلی به منظور بررسی تئوری و بنیادی سازه ها همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است [۱۴، ۱۵،

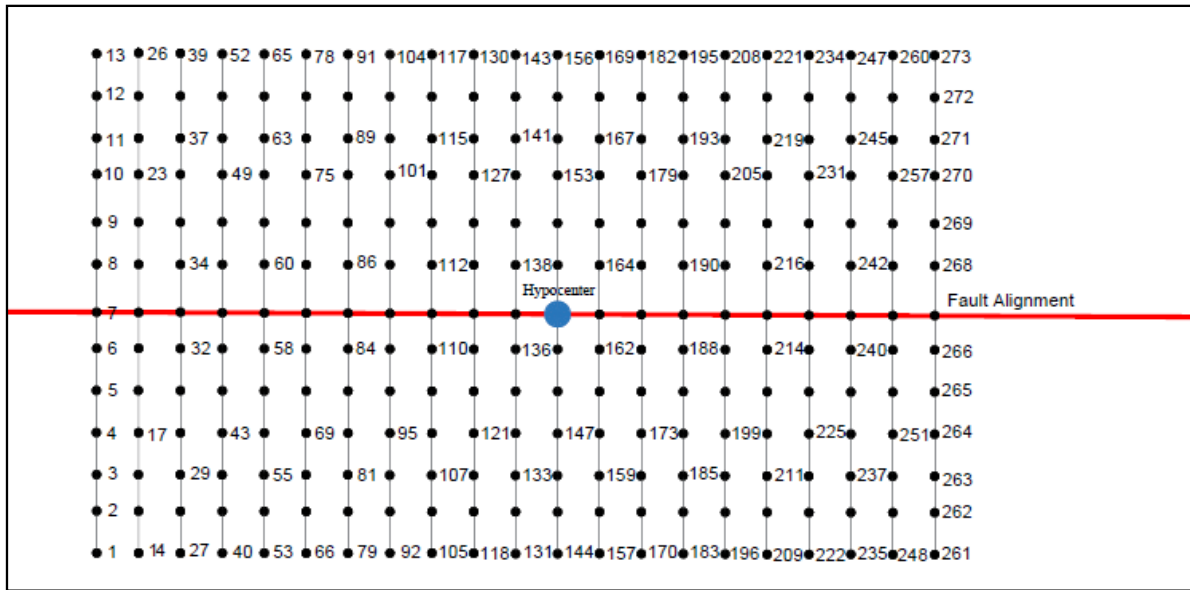
هیستریزیس دوخطی برای سازه های فولادی تخمین زدند. مطابق این مدل، تغییرات جابه جایی پسماند با پریود اصلی به شرایط سایت وابسته است و جابه جایی های پسماند به ضریب شکل پذیری در نرخ شکل پذیری پایین حساس تر هستند [۱۱]. دونگ^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۰، به بررسی نسبت جابه جایی غیرالاستیک سیستم تک درجه آزاد مرکزگرا با مدل هیستریزیک پرچمی شکل در معرض زمین لرزه های نزدیک گسل پالس گونه پرداختند. به منظور مقایسه، طیف زمین لرزه دور از گسل نیز محاسبه شد. نتایج نشان داد زمین لرزه های پالس گونه منجر به نسبت جابه جایی خیلی بزرگتری در مقایسه با رکورد دور از گسل به ویژه در ناحیه طیفی شتاب ثابت شده است [۲۰].

در پژوهش های انجام شده در سالهای اخیر به بررسی ویژگیهای نگاهشدهای حوزه نزدیک و اثرات آنها بر روی پاسخ سازه ها پرداخته شد. ولی در این بین بحث موقعیت قرارگیری سازه ها به ندرت مورد توجه قرار گرفت. عمده پژوهش ها در ارتباط با اثر دوران مؤلفه های زلزله بوده است [۲۴-۲۱]. بدیهی است که فاصله و زاویه ای که یک سازه از خط گسل و محل مرکز زلزله میگیرد بر روی پاسخهای آن تأثیرگذار است، از این رو، در این پژوهش تمرکز بر روی تأثیر موقعیت قرارگیری سازه در میزان خسارتی است که در هنگام زلزله به آن اعمال می شود. سازه های مورد بررسی، سازه های مشابه قرار گرفته در ایستگاه های مختلف، در حالت تک درجه آزاد غیرالاستیک شکل پذیری ثابت می باشند.

به منظور بررسی تأثیر موقعیت سازه بر روی پاسخها، با توجه به کمبود داده های شتابنگاری واقعی می توان با استفاده از تکنیکهای شبیه سازی موجود، جنبش نیرومند زمین را شبیه سازی کرد [۸]. در این پژوهش با استفاده از پارامترهای گسلش به دست آمده از تحقیق حمیدی و همکاران برای زلزله کوچائیلی ترکیه ۱۹۹۹ [۲۵]، ۲۷۳ رکورد زلزله با توجه به مختصات مکانی مختلف به وسیله ی تابع گرین تئوری تولید و اثرات موقعیت سازه نسبت به زلزله در قالب کانتورهای S_d ، S_a برای سیستم تک درجه آزاد غیرالاستیک شکل پذیری ثابت برای دو فاکتور شکل پذیری $\mu = 2$ و $\mu = 3$ ارزیابی شد و در پایان نتایج حاصل از این دو حالت با نتایج سیستم الاستیک مقایسه شد.

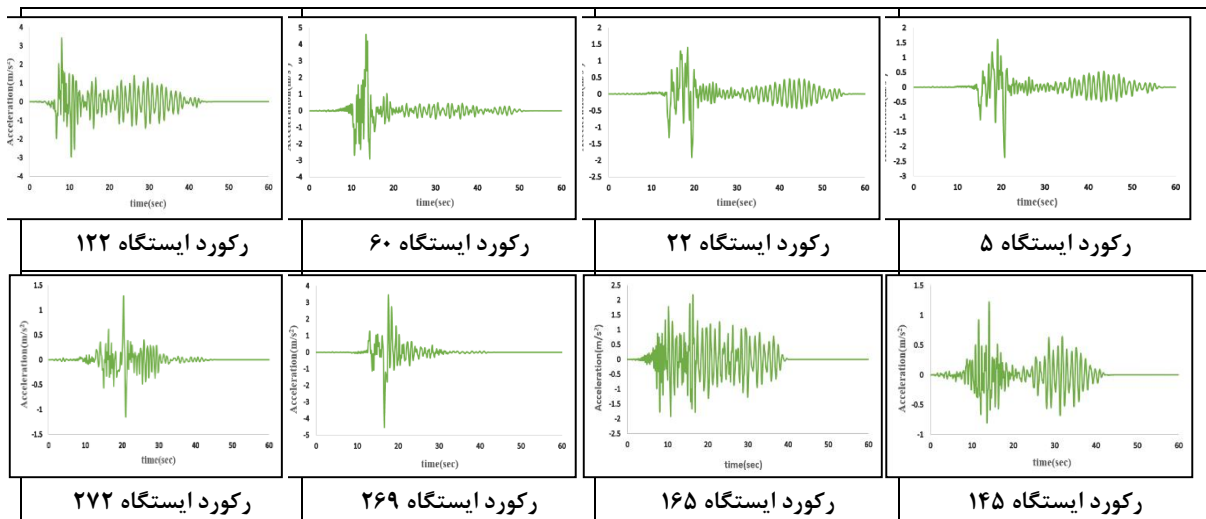
۲- رکوردهای مورد استفاده در تحلیل ها

یکی از زلزله های معروف دارای رکوردهای ثبت شده در حوزه نزدیک گسل، زلزله ی کوچائیلی ترکیه ۱۹۹۹ می باشد که اثرات جهت پذیری و جابه



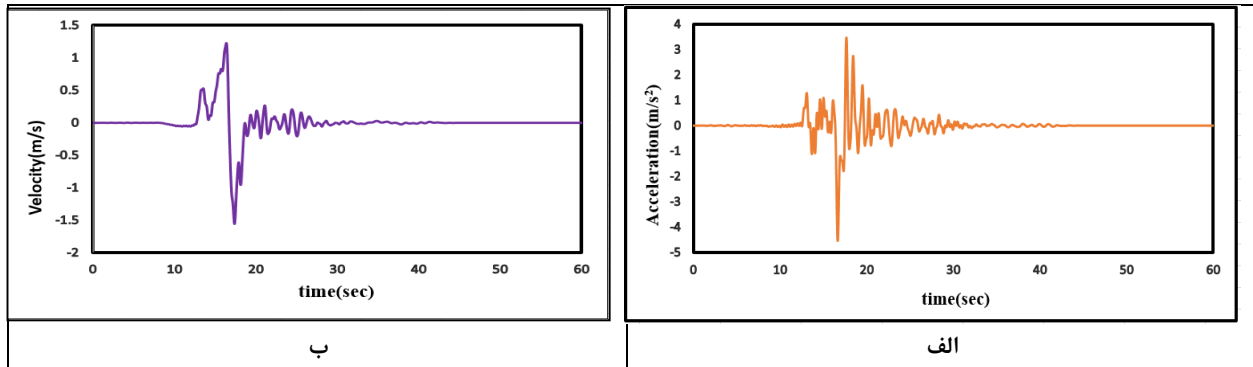
شکل ۱. خط گسل و ایستگاه‌هایی که رکوردشان برای این پژوهش تولید و استفاده شده است (اقتباس از مرجع [۲۵])

Fig. 1. Fault alignment and the station number used in this study [25]



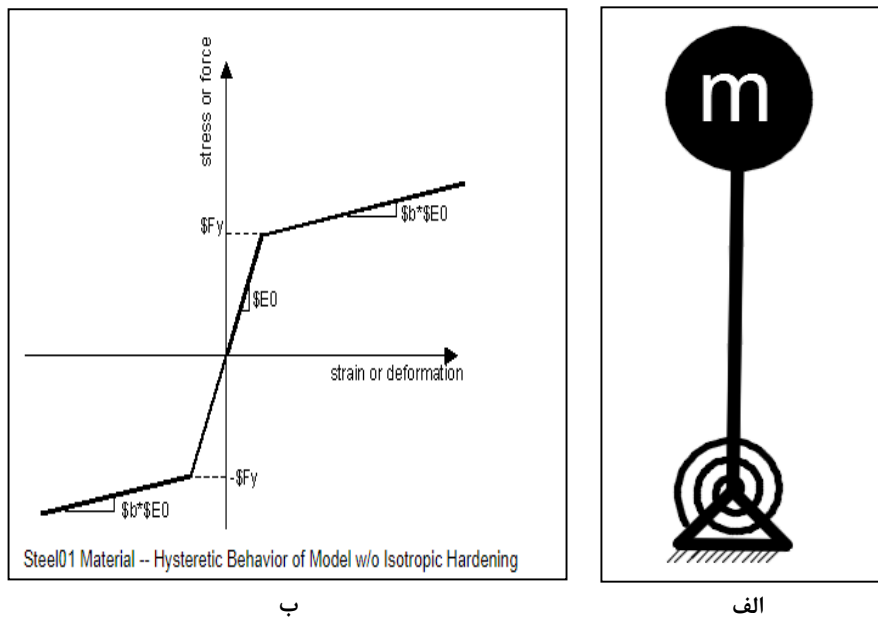
شکل ۲. تاریخچه زمانی شتاب برای چند ایستگاه ثبت زلزله

Fig. 2. Acceleration time history for some selected stations



شکل ۳. تاریخچه زمانی ایستگاه ۲۶۵، (الف) تاریخچه زمانی شتاب و (ب) تاریخچه زمانی سرعت

Fig. 3. Time history for station no. 265.



شکل ۴. الف) سازه تک‌درجه آزاد مدل شده به صورت دوبعدی در نرم‌افزار، (ب) منحنی رفتار فولاد Steel01 [۳۱]

Fig. 4. a) The SDOF structure modeled in the software, b) Hysteretic behavior of Steel01 material

پلاستیک کامل^۲ یعنی با سخت‌شوندگی کرنشی^۳ (شیب خط دوم در نمودار $\epsilon-M$) صفر در نظر گرفته شد. مقدار ϵ_0 برابر ۵ درصد به عنوان میرایی سیستم در نظر گرفته شد.

برای به دست آوردن پاسخها در حالت شکل پذیری ثابت از دو کد

[۲۸-۳۰]. سازه تک‌درجه آزاد مدل شده در این تحقیق شامل یک جرم، یک ستون صلب با رفتار تیر-ستون الاستیک و یک فنر المان طول-صفر^۱ در پای آن می باشد. شکل ۴-الف سازهی تک‌درجه آزاد مدل شده در نرم افزار OpenSEES [۳۱] را نشان می دهد.

رفتار فولاد مصالح به صورت Steel01 (شکل ۴-ب) و الاستیک-

2 Elastic perfectly plastic

3 Strain hardening

1 Zero length

برای فهمیدن اینکه μ به μ_{target} رسید یا خیر، باید یک حد رواداری تعریف شود که هر وقت نسبت $\frac{\mu}{\mu_{target}}$ به یک حدود مورد قبولی رسید معلوم شود که شکل پذیری مورد نظر به دست آمده است. در اینجا به این منظور، رابطه (۵) تعریف شد.

$$\left[1 - \left(\frac{\mu}{\mu_{target}} \right) \right] \leq 0.01 \quad (5)$$

در بررسی شرط رابطه (۵) دو حالت پیش می آید:

الف) اگر شرط مورد قبول باشد، یعنی μ به μ_{target} رسیده است و می توان سایر خروجی های مدنظر را هم به دست آورد؛ به این صورت که V_y که تا این مرحله به دست آمد ثبت و به منظور تعیین S_a غیرالاستیک استفاده شود.

ب) اگر شرط بالا مورد قبول نباشد، یعنی μ به μ_{target} نرسید و باید V_y جدید با استفاده از رابطه (۶) حاصل شود:

$$V_{y_{i+1}} = V_{y_i} \left(\frac{\mu}{\mu_{target}} \right)^{pow} \quad (6)$$

در رابطه (۶) pow توان، V_{y_i} برابر V_y اولیه و $V_{y_{i+1}}$ برابر V_y می باشد که در این مرحله باید حاصل شود.

برای این رابطه نیاز به یک توان می باشد که این توان از طریق سعی و خطا حاصل می شود. یعنی باید با این توان بازی شود تا نسبت $\frac{\mu}{\mu_{target}}$ قابل قبول باشد. به همین دلیل برای این توان تابع تعریف شده است تا وضعیتش در حالت شرطی مشخص شود. وقتی توان مناسب پیدا شد، مقاومت تسلیم جدید تعریف می شود و مجدداً تحلیل انجام گرفته و μ جدید محاسبه می شود و مجدداً شرط بررسی می شود. این کار این قدر تکرار می شود تا شرط برقرار شود.

با استفاده از مراحل فوق، مقدار جابهجایی و شتاب در حالت غیرالاستیک با شکل پذیری ثابت برای یک پریود و یک نگاهت، حاصل شده است.

$$S_{dinelastic} = \Delta_{max} \quad (7)$$

OpenSEES الاستیک و غیرالاستیک استفاده شد. همچنین برای ارتباط بین دو کد و به علت زیاد بودن تعداد نگاهتها و آنالیزهای مرتبط، در نرم افزار MATLAB یک حلقه تشکیل داده شد و لینک بین نرم افزارهای OpenSEES و MATLAB صورت گرفت. حلقه مورد نظر برای هر رکورد (۲۷۳ ایستگاه مختلف) و پریودهای ۱ تا ۵ ثانیه با گام زمانی ۱ ثانیه و همچنین تک پریود ۰/۵ ثانیه، تکرار گردید. در کد الاستیک مقدار لنگر تسلیم فنر M_y یک عدد بزرگ تعریف شد؛ به صورتی که هیچگاه وارد حوزه غیرخطی نشود. ولی در کد غیرالاستیک مقدار M_y به صورت یک متغیر تعریف شد که هر بار با توجه مقاومت تسلیم تغییر کند. مراحل مدل سازی سیستم تکدرجه آزاد دوبعدی غیرالاستیک در حالت شکل پذیری ثابت به صورت زیر است:

- ۱- فرض پارامترهای جرم (M)، شکل پذیری هدف (μ_{target})، میرایی (ξ)، پریود (T)، رکورد زلزله (EQ)
- ۲- محاسبه سختی (K)

$$K = \left(\frac{4\pi^2}{T^2} \right) \times M \quad (1)$$

- ۳- تحلیل سیستم تکدرجه آزاد خطی و محاسبه برش پایه الاستیک (V_E)

$$V_E = M \times S_a \quad (2)$$

- ۴- تحلیل سیستم تکدرجه آزاد غیرالاستیک به وسیله مقاومت تسلیم (V_y)

$$V_y = \frac{M \times S_a}{\mu_{target}} \quad (3)$$

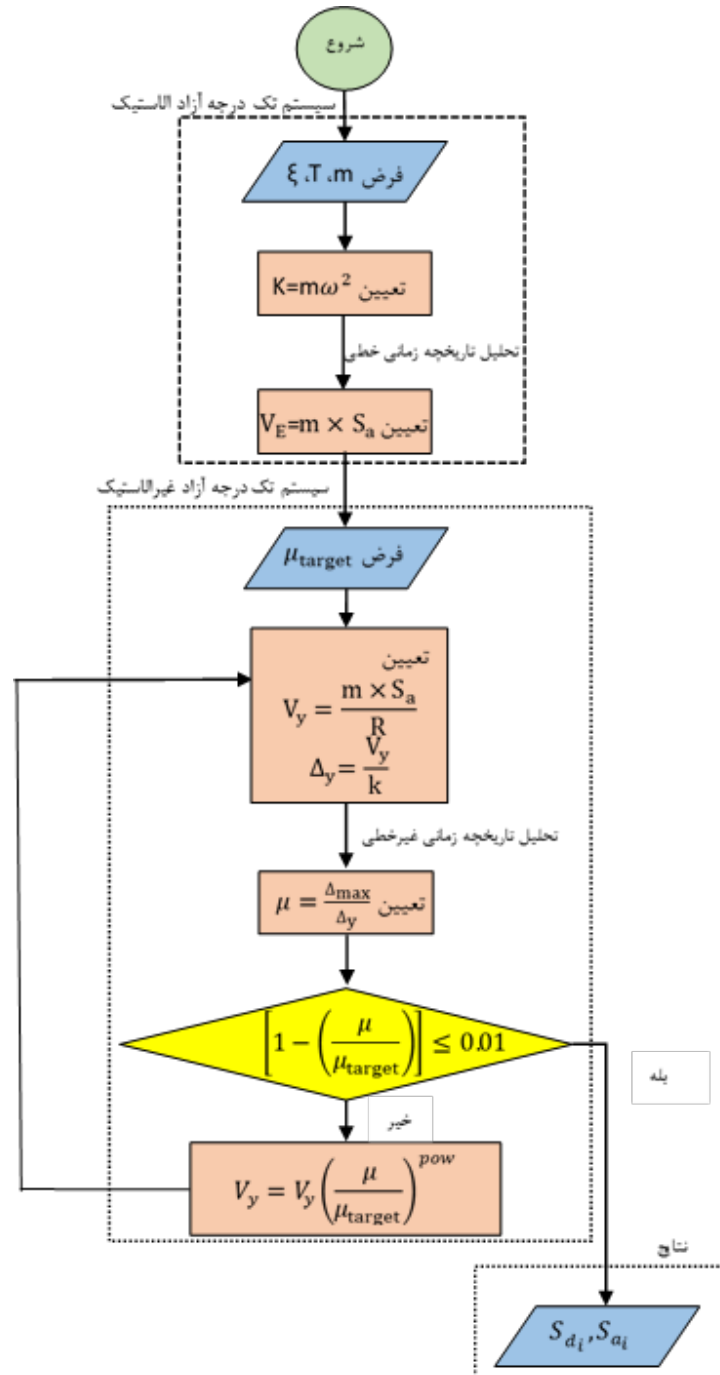
- ۵- تعیین جابهجایی بیشینه (Δ_{max}) و جابهجایی نقطه تسلیم (Δ_y) از طریق خروجی تحلیل غیرالاستیک و در نهایت تعیین شکل پذیری (μ)

$$\mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (4)$$

و تمامی این مراحل در آن قرار گرفت. پس از به دست آوردن خروجیها کانتورهای S_d و S_a برای تمام پریودها و نگاشتهای مورد نظر رسم شدند. شکل ۵ خلاصه مراحل انجام شده را در قالب فلوجارت نشان می دهد. همان طور که این شکل نشان می دهد، مراحل کار شامل دو بخش

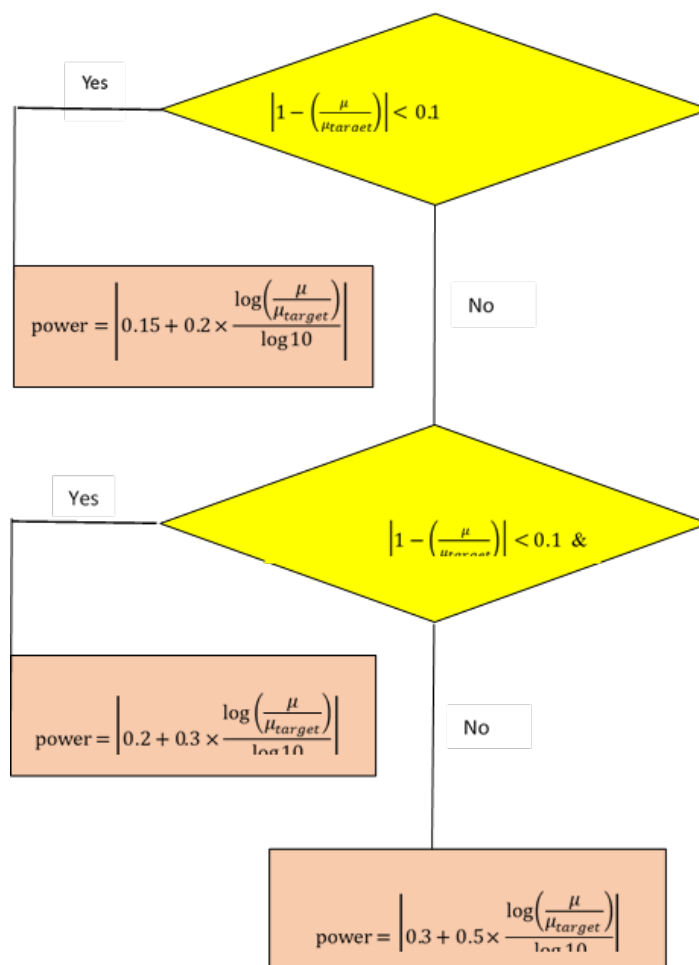
$$S_{\text{ainelastic}} = \frac{V_{y_{i+1}}}{M} \quad (8)$$

برای در نظر گرفتن سایر پریودها و ایستگاهها حلقه‌هایی تعریف شد



شکل ۵. فلوجارت مدل سازی سیستم تک درجه آزاد غیرالاستیک شکل پذیری ثابت

Fig. 5. Modeling flowchart of the inelastic constant-ductility SDOF



شکل ۶. فلوچارت توان مورد استفاده در الگوریتم مدل‌سازی

Fig. 6. The power algorithm flowchart to achieve target ductility

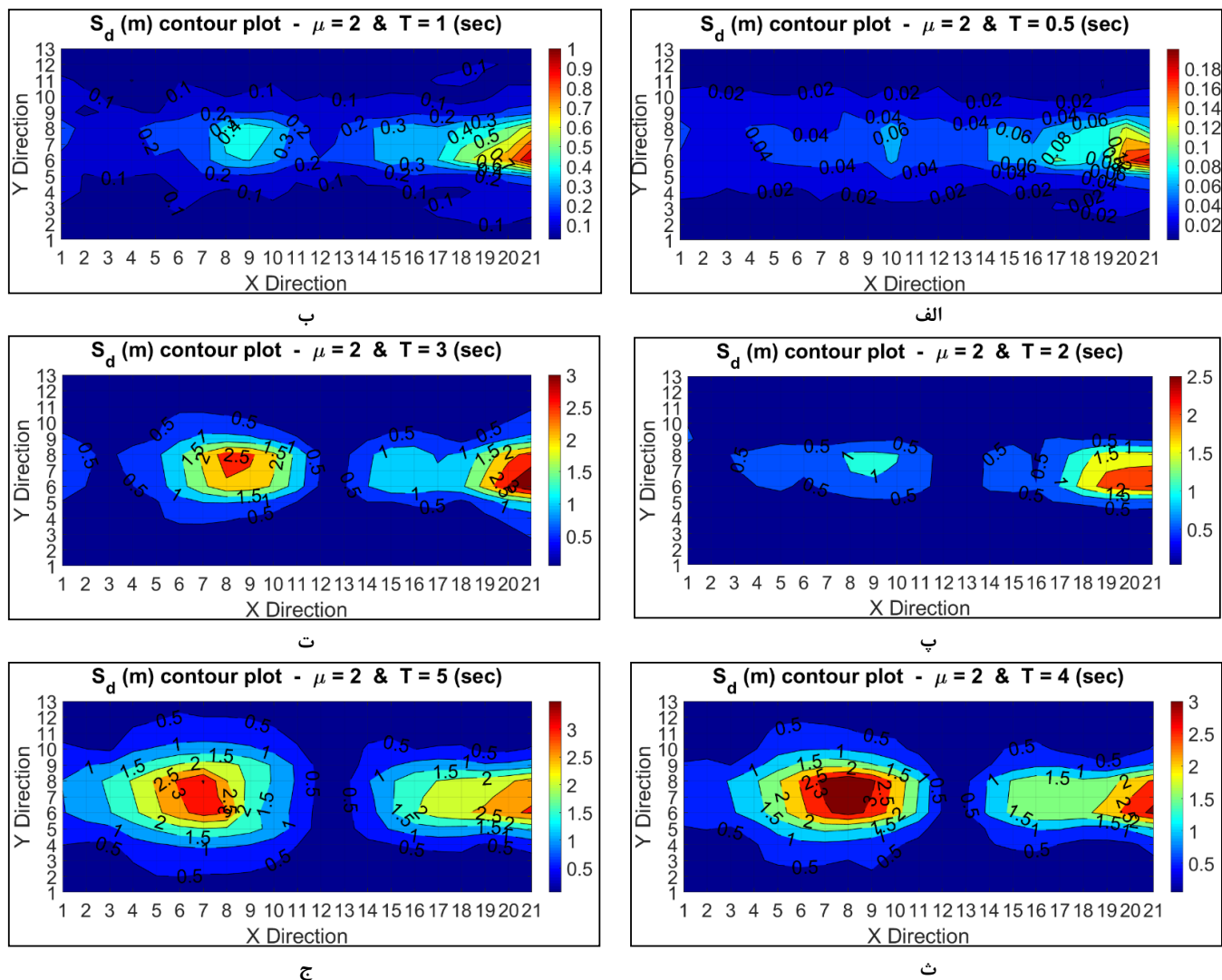
جهت X^1 و جهت Y^2 برای محورهای X و Y مشخص شده است که در واقع همان جهت X و Y را بر روی سطح زمین مشخص می‌کنند. به منظور سهولت در درک موقعیت ایستگاهها، ۲۱ ردیف در جهت X و ۱۳ ردیف در جهت Y مشخص شده است که ایستگاه‌ها بر روی این ردیفها قرار گرفته‌اند و برای توصیف موقعیت، به جای بیان شماره ایستگاه‌های مدنظر، شماره ردیف آنها در جهت X یا Y بیان شده است. محل مرکز زلزله در ردیف ۱۲ در جهت X می‌باشد. به منظور جلوگیری از ازدیاد صفحات مقاله، کانتورهای حالت الاستیک ارائه نشده است و صرفاً نتایج آنها در قالب جدول در انتها با حالت غیرالاستیک مقایسه شده است.

- 1 X Direction
- 2 Y Direction

مدل‌سازی سیستم الاستیک و غیرالاستیک در نرم افزار می‌باشد. شکل ۶ قسمت توان مورد استفاده در رابطه (۶) را نشان می‌دهد. این توان به صورت تجربی تعیین شده است تا قدرت همگرایی خوبی داشته باشد و زودتر همگرا شود که در رسم طیف‌های مختلف عملکرد مناسبی داشته است. از آنجایی که این توان به صورت روابط شرطی تعریف شد، برای درک بهتر، فلوچارتی ارائه شد.

۴- نتایج و بحث

برای بررسی نتایج حاصل از تحلیل‌ها، شکل‌هایی در قالب کانتورهای رنگی ارائه شدند که نمایشگر مقدار S_d و S_a می‌باشند. در این کانتورها

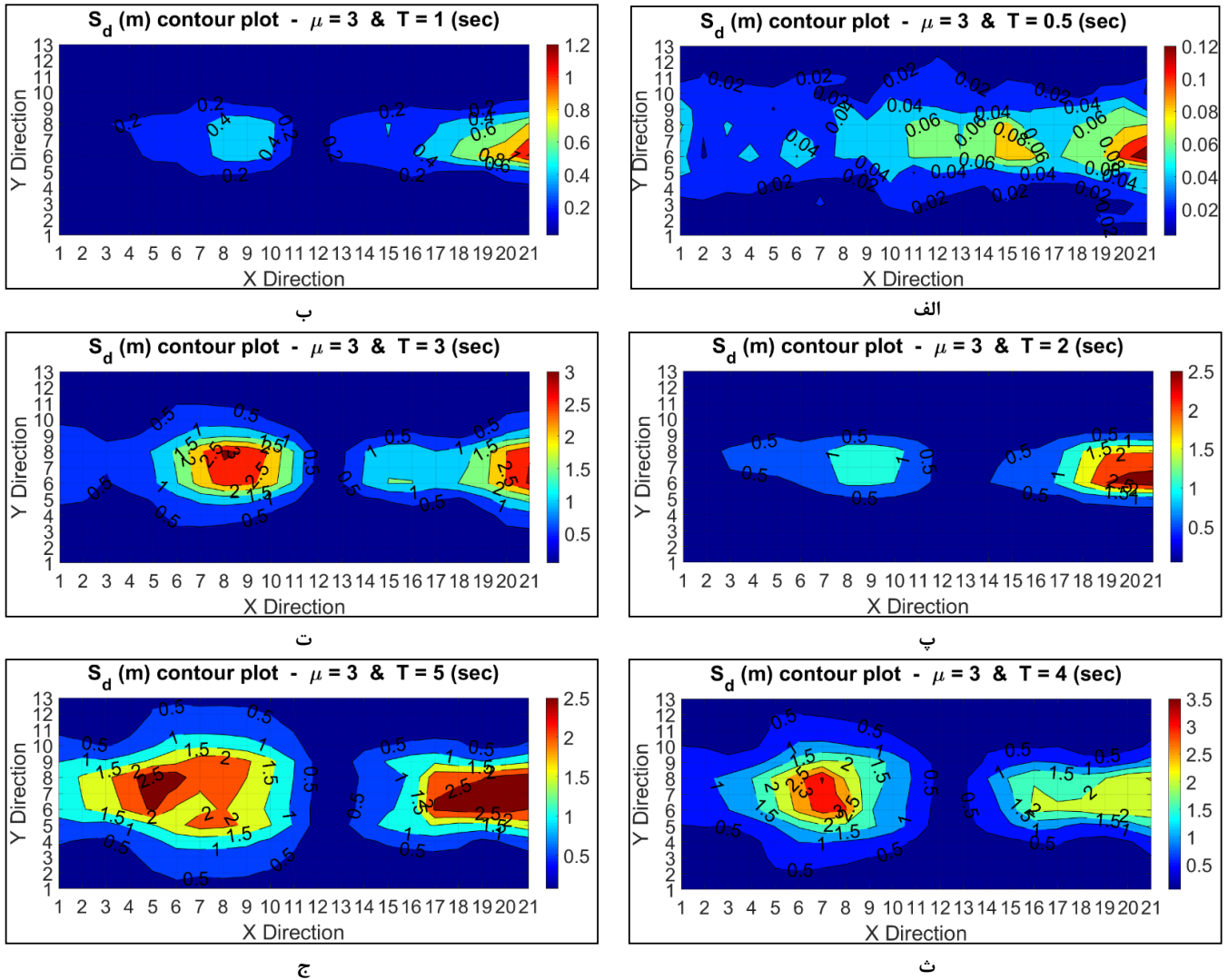


شکل ۷. الف تا ج) کانتور S_d غیرالاستیک برحسب (m) در حالت $\mu = 2$ برای شتاب‌نگاشت‌های عمود بر گسل. الف) پریود ۰/۵ ثانیه، ب) پریود ۱ ثانیه، پ) پریود ۲ ثانیه، ت) پریود ۳ ثانیه، ث) پریود ۴ ثانیه و ج) پریود ۵ ثانیه. (اعداد روی محور X و Y نشان‌دهنده شماره ردیف‌هایی هستند که ایستگاه‌ها بر روی آن‌ها قرار می‌گیرند (شماره موقعیت))

Fig. 7. Inelastic spectral displacement (S_d) contour for fault-normal records (for the case $\mu=2$)

۴-۱-۱- بیشینه جابه‌جایی طیفی (S_d) غیرالاستیک در حالت $\mu = 2$ شکل ۷ کانتورهای S_d غیرالاستیک برحسب متر در حالت $\mu = 2$ برای پریودهای ۱ تا ۵ ثانیه با گام ۱ ثانیه و همچنین تک پریود ۰/۵ ثانیه می‌باشد. برای حالت $\mu = 2$ ، با افزایش پریود مقدار بیشینه افزایش یافت؛ البته مقدار بیشینه در پریود ۳ و ۴ ثانیه تغییری نکرد. تا قبل پریود ۴ ثانیه، مقادیر بیشینه در سمت راست مرکز زلزله به ویژه ردیف ۲۰ و ۲۱ در جهت

۴-۱- بررسی بیشینه جابه‌جایی طیفی (S_d) غیرالاستیک به منظور بررسی وضعیت در حالت غیرالاستیک با شکل‌پذیری ثابت کانتورهای S_d برای دو حالت $\mu = 2$ و $\mu = 3$ ترسیم شدند. شکل‌های ۷ و ۸ این کانتورها را نشان می‌دهند. هر یک از این شکل‌ها شامل ۶ کانتور می‌باشد که پریودهای ۱ تا ۵ ثانیه با گام ۱ ثانیه و همچنین تک پریود ۰/۵ ثانیه را شامل می‌شوند.



شکل ۸. الف تا ج) کانتور S_d غیرالاستیک برحسب (m) در حالت $\mu = 3$ برای شتاب‌نگاشت‌های عمود بر گسل. الف) پریود ۰/۵ ثانیه، ب) پریود ۱ ثانیه، پ) پریود ۲ ثانیه، ت) پریود ۳ ثانیه، ث) پریود ۴ ثانیه و ج) پریود ۵ ثانیه. اعداد روی محور X و Y نشان‌دهنده شماره ردیف‌هایی هستند که ایستگاه‌ها بر روی آن‌ها قرار می‌گیرند (شماره موقعیت)

Fig. 8. Inelastic spectral displacement (S_d) contour for fault-normal records (for the case $\mu=3$)

$\mu = 2$ مشاهده شد این است که در حالت $\mu = 2$ در پریود ۴ ثانیه مقدار بیشینه به سمت چپ مرکز زلزله منتقل شده بود؛ ولی در این حالت از پریود ۳ ثانیه این وضعیت اتفاق افتاد. همچنین در حالت $\mu = 2$ بعد پریود ۴ ثانیه مقدار بیشینه افزایش یافت؛ اما در این حالت بعد پریود ۴ ثانیه مقدار بیشینه کاهش یافت. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، مقدار بیشینه در پریود ۵ ثانیه به ۲/۵ کاهش یافت و محدوده پوشش اعدادی که کمتر از

X واقع شده است و بعد از آن به تدریج به سمت چپ مرکز زلزله به ویژه حوالی ردیف ۷ و ۸ در جهت X بیشتر شده است. بعد پریود ۴ ثانیه شکل کلی کانتورها ثابت ماندند و محدوده پوشش اعداد تغییر کرده است.

شکل ۸ کانتورهای S_d غیرالاستیک بر حسب متر با شکل‌پذیری $\mu = 3$ برای پریودهای ۱ تا ۵ ثانیه با گام ۱ ثانیه و همچنین تک پریود ۰/۵ ثانیه را نشان می‌دهند. تفاوتی که در این حالت نسبت به حالت

جدول ۱. مقایسه ی S_d در سه حالت الاستیک، غیرالاستیک در حالت $\mu=2$ و غیرالاستیک در حالت $\mu=3$

Table 1. Comparison of S_d values for statuses of elastic, $\mu=2$, and $\mu=3$

S_d						
$\mu = 3$		$\mu = 2$		Elastic		
ردیف مقدار بیشینه در جهت X	مقدار بیشینه	ردیف مقدار بیشینه در جهت X	مقدار بیشینه	ردیف مقدار بیشینه در جهت X	مقدار بیشینه	پریود
۲۱	۰/۱۲	۲۱	۰/۱	۲۱	۰/۱۲	۰/۵
۲۱	۱/۲	۲۱	۱	۲۱،۱۸	۰/۸	۱
۲۱-۱۹	۲/۵	۲۱	۲/۵	۲۱،۲۰	۲/۳	۲
۲۱،۸	۳	۲۱-۲۰	۳	۲۱	۳	۳
۷	۳/۵	۲۱، ۹-۷	۳	۸	۳	۴
۲۱-۱۷، ۶-۵	۲/۵	۷	۳/۵	۸-۷	۳	۵

[۳۲]. به طور کلی دو حالت غیرخطی روند نزدیکی به حالت الاستیک دارند. بدین ترتیب می توان به وسیله یک تحلیل خطی که بسیار آسانتر است، روند حدودی پاسخهای بیشینه و موقعیتشان را برای غیرخطی حدس زد.

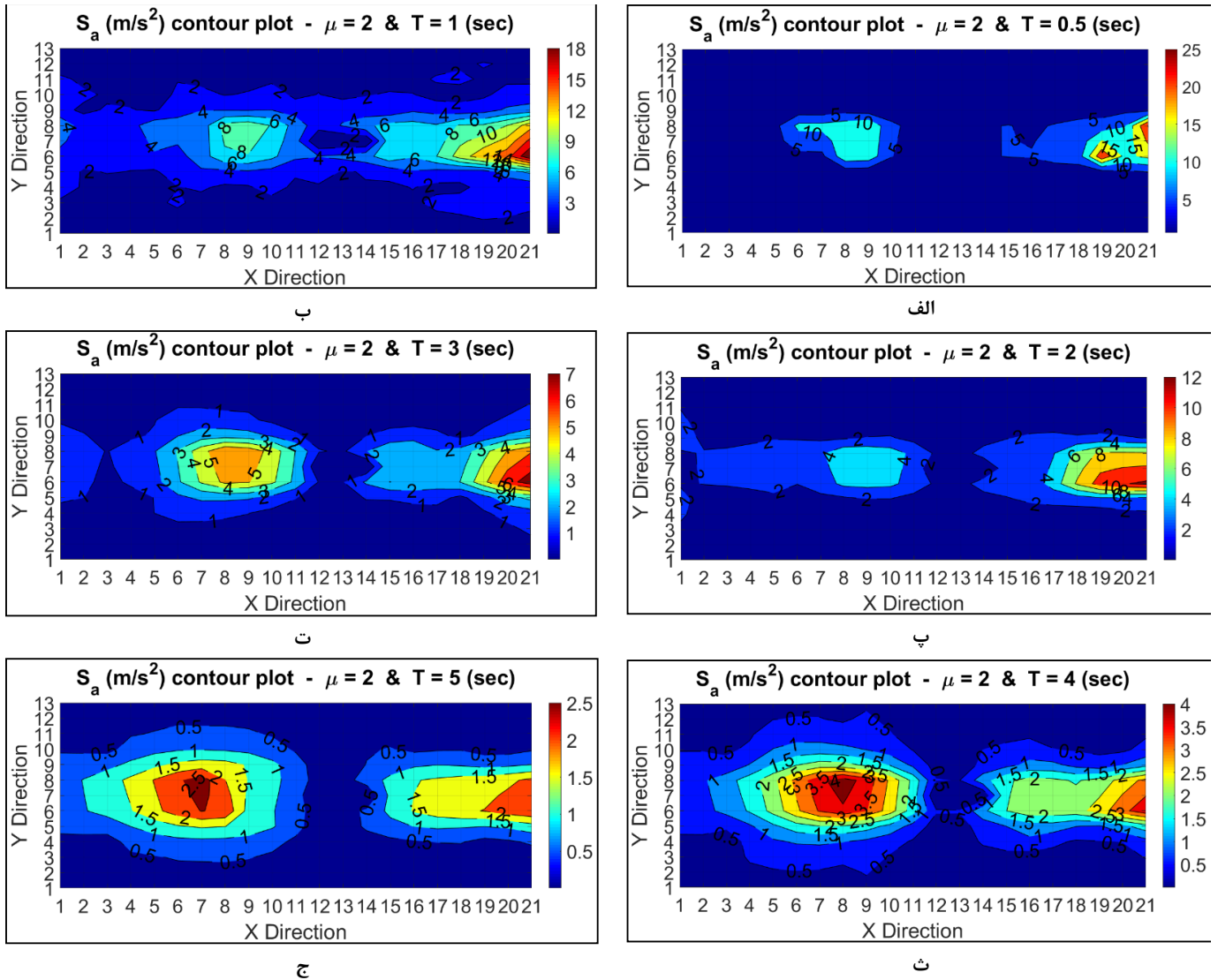
۴-۲- بررسی بیشینه شتاب طیفی (S_a) در حالت غیرالاستیک

به منظور بررسی وضعیت S_a در حالت غیرالاستیک با شکل پذیری ثابت کانتورهای S_a برای دو حالت $\mu=2$ و $\mu=3$ ترسیم شدند. شکل‌های ۹ و ۱۰ این کانتورها را نشان می دهند. هر یک از این شکل‌ها شامل ۶ کانتور می باشد که پریودهای ۱ تا ۵ ثانیه با گام ۱ ثانیه و همچنین تک پریود ۰/۵ ثانیه را شامل می شوند.

۴-۲-۱- بیشینه شتاب طیفی (S_a) در حالت غیرالاستیک $\mu=2$

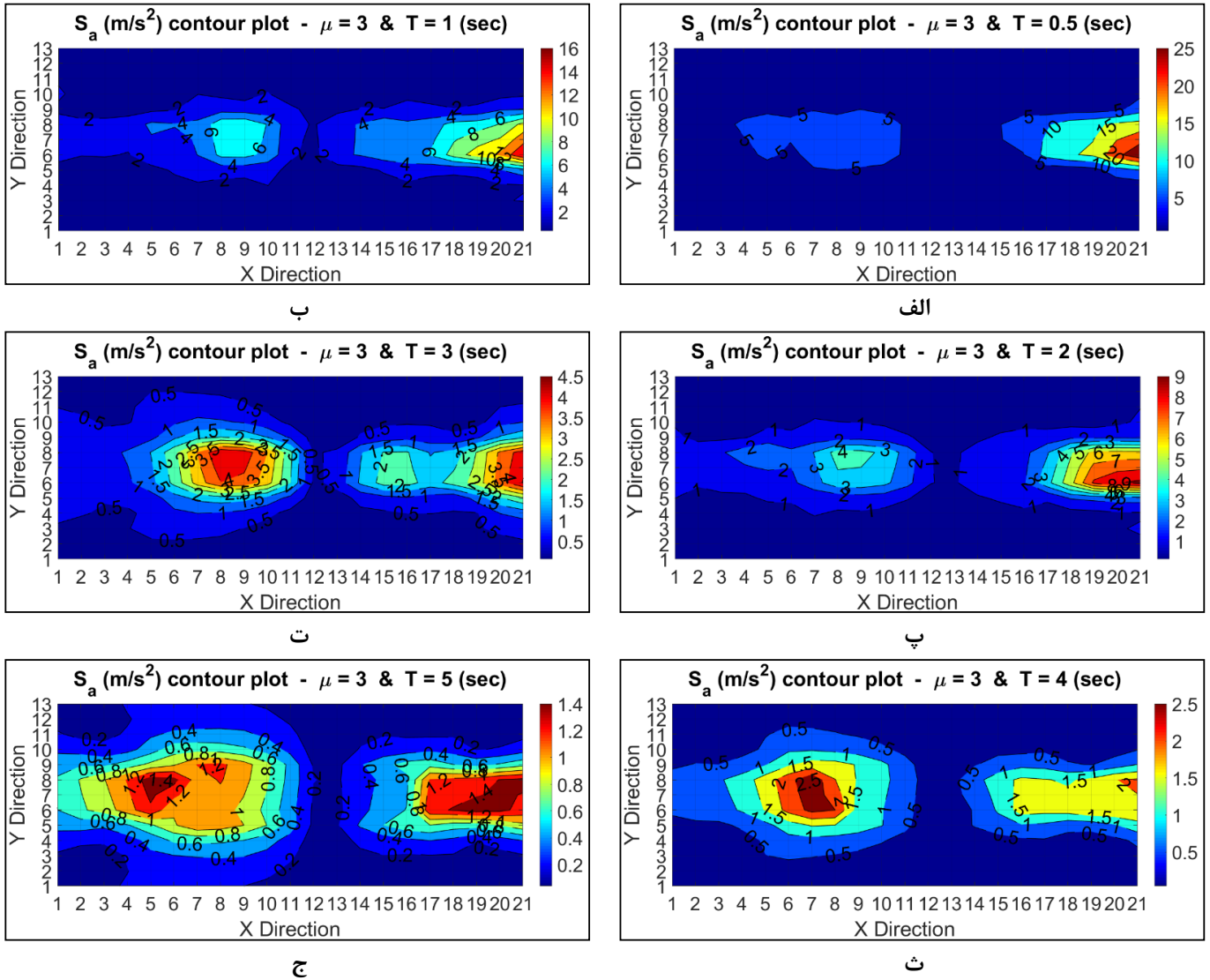
شکل ۹ کانتورهای S_a غیرالاستیک با شکل پذیری $\mu=2$ برای پریودهای ۱ تا ۵ ثانیه با گام ۱ ثانیه و همچنین تک پریود ۰/۵ ثانیه را نشان می دهد. برای حالت $\mu=2$ تا قبل پریود ۴ ثانیه مقدار بیشینه در نیمه ی راست مرکز زلزله به ویژه ردیف ۲۰ و ۲۱ در جهت X واقع شد و از پریود ۴ ثانیه نیمه ی چپ به ویژه ردیف ۷ و ۸ در جهت Y به تدریج بیشتر شد و با افزایش پریود مقدار S_a کاهش یافت. به جز پریود ۱ ثانیه، در سایر پریودها حد فاصل دو قسمت چپ و راست کمترین مقدار را نشان داد؛ ولی در پریود ۱ ثانیه این قسمت پیوستگی با سایر قسمتها دارد. این مسأله در پریود ۱ ثانیه S_d هم دیده شده است.

مقدار بیشینه هستند، افزایش یافت. همچنین در این پریود همزمان با سمت چپ مرکز زلزله، سمت راست مرکز زلزله نیز مقدار بیشینه را نشان می دهد. به طور کلی وضعیت متفاوتی برای این پریود در این μ اتفاق افتاده است. جدول ۱ مقادیر بیشینه و ردیف هایشان بر اساس اینکه بر روی کدام یک از ردیفهای جهت X قرار گرفتند، مشخص می کند. طبق جدول ۱ در حالت الاستیک تا قبل پریود ۳ ثانیه مقدار بیشینه افزایش یافت؛ ولی بعد آن مقدار بیشینه بر روی عدد ۳، ثابت شد. در پریود ۳ ثانیه و پریودهای کمتر از آن مقدار بیشینه در سمت راست مرکز زلزله اتفاق افتاد؛ به ویژه ۲ ردیف ۲۰ و ۲۱ در جهت X و بعد پریود ۳ ثانیه محل مقدار بیشینه به سمت چپ مرکز زلزله به ویژه ردیفهای ۷ و ۸ در جهت X انتقال یافت. با بررسی هر سه حالت مشاهده شد با افزایش پریود مقدار S_d افزایش یافت؛ به جز در پریود ۵ ثانیه، هنگامی که $\mu=3$ می باشد. موقعیت قرارگیری مقدار بیشینه در پریودهای پایین در هر سه حالت مشابه یکدیگر است؛ اما در پریودهای بالا کمی تفاوت ایجاد شده است که بیشتر پریود ۵ ثانیه در حالت $\mu=3$ این نظم را بهم ریخته است. در بررسی های انجام شده و مطابق جدول ۱ مشخص شد که مقادیر کمینه و بیشینه S_d برای حالت خطی از ۰/۱۲ تا ۳ برای غیرخطی $i=2$ از ۰/۱ تا ۳/۵ برای حالت غیرخطی $i=3$ از ۰/۱۲ تا ۲/۵ می باشد که نشان می دهد در این سه حالت تفاوت چندانی با هم ندارند. زمانی S_d خطی با S_d غیرخطی زیاد تفاوت نداشته باشد یا به عبارتی با تغییر μ پاسخهای یکسان داشته باشیم، equal displacement method برقرار می شود. در اینجا می توان گفت این شرایط تقریباً برقرار است



شکل ۹. الف تا ج) کانتور S_a غیرالاستیک برحسب (m/s^2) در حالت $\mu=2$ برای شتاب‌نگاشت‌های عمود بر گسل. الف) پریود ۰/۵ ثانیه، ب) پریود ۱ ثانیه، پ) پریود ۲ ثانیه، ت) پریود ۳ ثانیه، ث) پریود ۴ ثانیه و ج) پریود ۵ ثانیه. (اعداد روی محور X و Y نشان‌دهنده شماره ردیف‌هایی هستند که ایستگاه‌ها بر روی آن‌ها قرار می‌گیرند (شماره موقعیت))

Fig. 9. Inelastic spectral acceleration (S_a) contour for fault-normal records (for the case $\mu=2$)



شکل ۱۰. الف تا ج) کانتور S_a غیرالاستیک برحسب (m/s^2) در حالت $\mu=3$ برای شتاب‌نگاشت‌های عمود بر گسل. الف) پریود ۰/۵ ثانیه، ب) پریود ۱ ثانیه، پ) پریود ۲ ثانیه، ت) پریود ۳ ثانیه، ث) پریود ۴ ثانیه و ج) پریود ۵ ثانیه. (اعداد روی محور X و Y نشان‌دهنده شماره ردیف‌هایی هستند که ایستگاه‌ها بر روی آن‌ها قرار می‌گیرند (شماره موقعیت))

Fig. 10. Inelastic spectral displacement (S_d) contour for fault-normal records (for the case $\mu=3$)

جدول ۲. مقایسه ی S_a دو بعدی در حالت الاستیک، حالت غیرالاستیک $\mu=2$ و حالت غیرالاستیک $\mu=3$

Table 2. Comparison of S_a values for statuses of elastic, $\mu=2$, and $\mu=3$

S_a						پریود
$\mu = 3$		$\mu = 2$		Elastic		
ردیف مقدار بیشینه در جهت X	مقدار بیشینه	ردیف مقدار بیشینه در جهت X	مقدار بیشینه	ردیف مقدار بیشینه در جهت X	مقدار بیشینه	
۲۱	۲۵	۲۱	۲۵	۲۱	۲۲	۰/۵
۲۱	۱۶	۲۱	۱۸	۲۱	۳۰	۱
۲۱	۹	۲۱	۱۲	۲۱-۲۰	۲۲	۲
۲۱	۴/۵	۲۱	۷	۲۱	۱۴	۳
۷	۲/۵	۸	۴	۲۱،۸	۷	۴
۲۱-۱۸، ۶-۵	۱/۴	۸-۶	۲/۵	۲۱، ۹-۶	۱/۵	۵

نزدیک تر است. برای $\mu = 1$ بیشترین مقدار در پریود ۱ ثانیه، ولی برای $\mu = 2$ و $\mu = 3$ بیشترین مقدار در پریود ۰/۵ ثانیه اتفاق افتاده است. بجز پریود ۰/۵ ثانیه، در سایر پریودها با افزایش μ مقدار S_a کاهش پیدا کرده است. با افزایش پریود مقدار بیشینه کاهش یافت؛ به جز در پریود ۱ ثانیه که این نظم را به هم ریخت. تا پریود ۴ ثانیه مقدار بیشینه در سمت راست مرکز زلزله و در محل ردیف ۲۱ در جهت X واقع شد. از پریود ۴ ثانیه علاوه بر ردیف ۲۱، حوالی ردیف ۸ در جهت X نیز مقدار بیشینه را نشان داد. در حالت غیرخطی معنای S_a مقاومتی می شود. وقتی به ازای یک S_a یک S_a به دست آید مشابه این است که برای یک μ یک R محاسبه شده باشد؛ تفاوتشان در این است که $S_a = \frac{F_y}{m}$ و $R = \frac{F_{elastic}}{F_{yield}}$ می باشد ولی از نظر کلیات شکل تفاوت اندکی دارند.

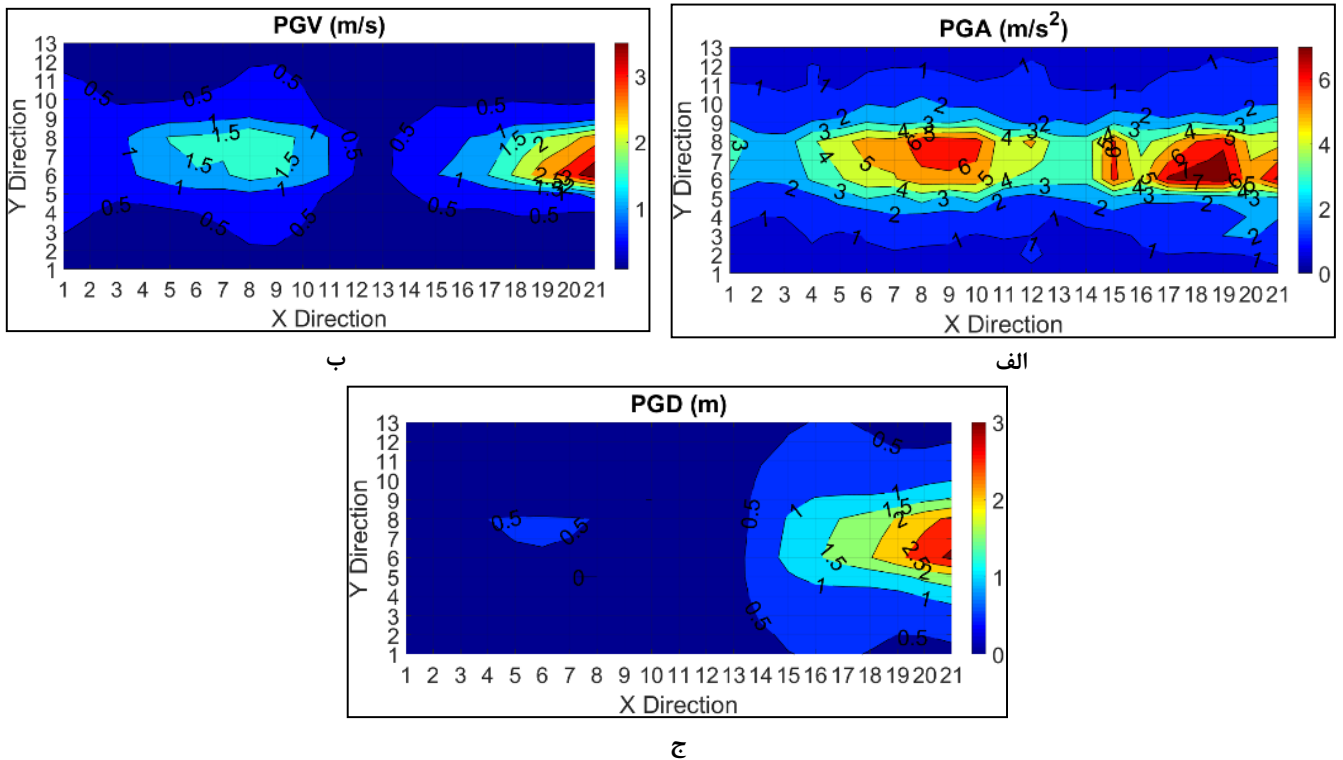
۴-۳- بررسی پارامترهای جنبش نیرومند زمین

شکل ۱۱- الف کانتور PGA را برای مؤلفه عمود بر گسل شتاب‌نگاشتها نشان می دهد. بیشترین مقدار PGA در قسمت ایستگاه‌هایی است که در ردیف ۱۷ تا ۲۰ محور افقی واقع شده‌اند و نشان‌دهنده بیشتر بودن شدت امواج زلزله در این نواحی است. مشاهده شد که مقدار بیشینه در نیمه سمت راست مرکز زلزله به بیشتر از $\frac{m}{s^2}$ ۷ رسید و نیمه سمت چپ مرکز زلزله به مقدار $\frac{m}{s^2}$ ۶ رسید.

شکل ۱۱- ب کانتور PGV برای نگاهشهای عمود بر گسل را نشان

۴-۲-۲- بیشینه شتاب طیفی (S_a) در حالت غیرالاستیک $i = 3$ شکل ۱۰ کانتورهای S_a غیرالاستیک با شکل پذیری $\mu = 3$ برای پریودهای ۱ تا ۵ ثانیه با گام ۱ ثانیه و همچنین تک پریود ۰/۵ ثانیه را نشان می‌دهند. مانند حالت $\mu = 2$ ، با افزایش پریود مقدار بیشینه کاهش یافت. تا قبل پریود ۴ ثانیه، مقدار بیشینه در سمت راست مرکز زلزله به ویژه ردیف ۲۱ در جهت X واقع شد؛ در پریود ۴ ثانیه در ردیف ۷ و در پریود ۵ ثانیه همزمان در هر دو سمت چپ و راست مرکز زلزله مقدار بیشینه اتفاق افتاد.

جدول ۲ مقادیر بیشینه و ردیفهایشان بر اساس اینکه بر روی کدام یک از ردیفهای جهت X قرار گرفتند، برای پریودهای ۱ تا ۵ ثانیه با گام ۱ ثانیه و همچنین تک پریود ۰/۵ ثانیه در سه حالت الاستیک و غیرالاستیک با $\mu = 2$ و $\mu = 3$ را نشان می دهد. طبق جدول ۲ در حالت الاستیک با افزایش پریود مقدار بیشینه S_a کاهش یافت، به جز در پریود ۱ ثانیه. تا پریود ۴ ثانیه مقدار بیشینه در سمت راست مرکز زلزله و در محل ردیف ۲۱ در جهت X واقع شد و از پریود ۴ ثانیه علاوه بر ردیف ۲۱، حوالی ردیف ۸ در جهت X نیز مقدار بیشینه را نشان داد. محل مقادیر بیشینه در پریودهای پایین سه حالت مشابه و در پریودهای بالا تقریباً مشابه می باشد. مقادیر بیشینه S_a برای حالت الاستیک از ۴/۵ تا ۳۰ برای غیرخطی $\mu = 2$ از ۲/۵ تا ۲۵ برای حالت غیرخطی $\mu = 3$ از ۱/۴ تا ۲۵ می باشد که نشان می دهد با افزایش μ بیشینه مقدار S_a کاهش میابد. محل بیشینه مقدار برای پریودهای مختلف ثابت است. وضعیت برای $\mu = 2$ و $\mu = 3$ بهم



شکل ۱۱. کانتور پارامترهای جنبش نیرومند زمین

Fig. 11. Ground motion parameters contour

سمت راست و در حوالی شکست دوم مقادیر بیشتر شده است. همچنین در بررسی پارامترهای زمین مشاهده شد که موقعیت مقادیر بیشینه S_a و S_d با موقعیت مقادیر بیشینه پارامترهای زمین، در دو سمت مرکز زلزله مطابقت دارد. یعنی در همان نواحی که پاسخهای بیشینه مشاهده شد، شدت زلزله و مقدار جابه‌جایی زمین بیشتر بود.

شکل ۱۲ نمودارهای سه بعدی $T - \theta - \frac{S_{d_n}}{S_{d_p}}$ را در حالت غیرالاستیک $\mu = 2$ برای ایستگاههای تا شعاع ۵، 10° ، ۱۵ و ۲۰ کیلومتر نشان می‌دهد. به منظور رسم این نمودارها نسبت پاسخها در فواصل مشخص شده تعیین گشت بدین صورت که مثلاً برای فاصله ۱۰ کیلومتر ایستگاههایی که از محل مرکز زلزله تا فاصله ۱۰ کیلومتری اطراف آن قرار می‌گیرند، جدا شدند. یکبار S_d تحت آنالیز با مؤلفه عمود بر گسل شتاب‌نگاشت‌ها و بار دیگر S_d تحت آنالیز با مؤلفه موازی گسل شتاب‌نگاشت‌ها به صورت مجزا به دست آمد و سپس نسبت آنها محاسبه شد. برای تعیین زوایا، سمت

می‌دهد. محل PGV بیشینه و مقدار بیشینه آن در ایستگاههای انتهایی سمت راست مرکز زلزله قرار گرفت و بیشترین مقدار آن به $\frac{3}{5} \frac{m}{s}$ رسید. بیشترین مقدار در نیمه چپ مرکز به $\frac{1}{5} \frac{m}{s}$ رسید و برخلاف کانتور PGA مقدار بیشینه در دو سمت مرکز زلزله نزدیک هم نشد.

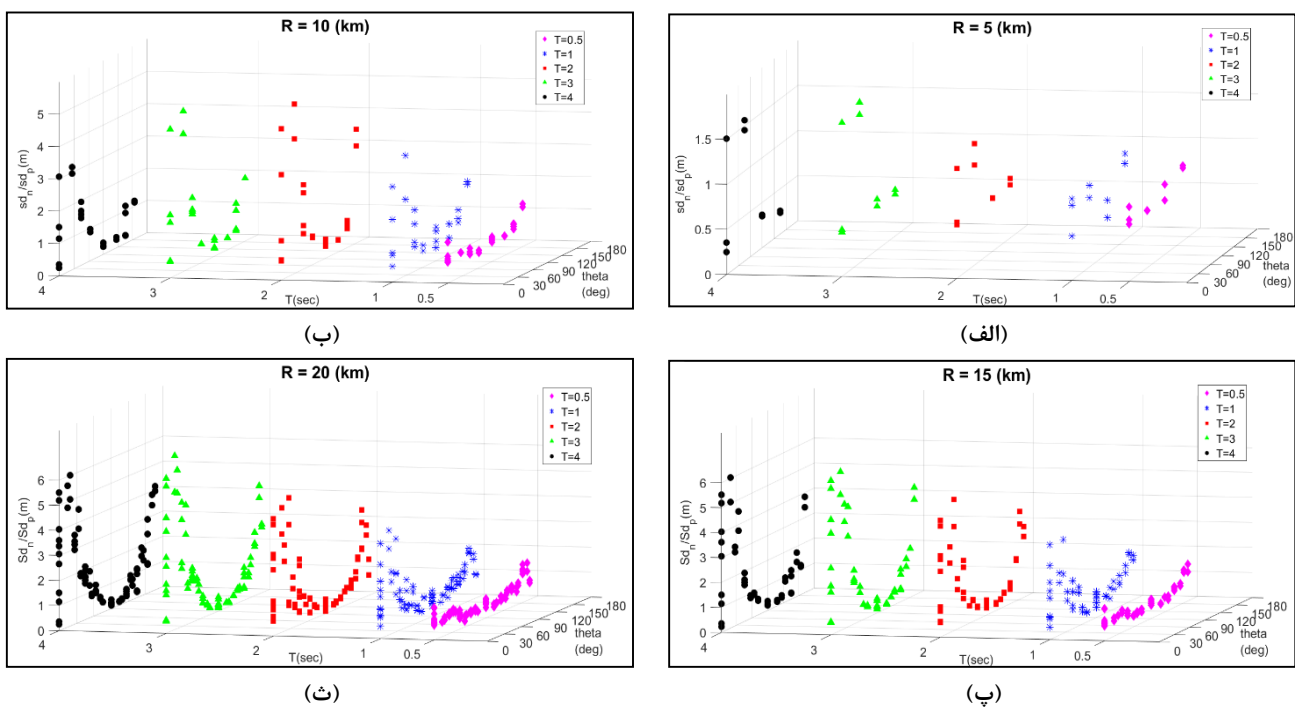
شکل ۱۱- پ کانتور PGD را برای مؤلفه عمود بر گسل شتاب‌نگاشت‌ها نشان می‌دهد. مشاهده شد در ایستگاه ۲۶۶ مقدار بیشینه اتفاق افتاد و به مقدار ۳ متر رسید. بیشترین خسارت مربوط به این ایستگاه و نواحی اطراف آن می‌باشد.

جدول ۳ مقادیر بیشینه پارامترهای جنبش نیرومند زمین و ردیفهایشان بر اساس اینکه بر روی کدام یک از ردیفهای جهت X قرار گرفتند را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول مشاهده می‌شود مقادیر بیشینه در ردیفهای انتهایی اتفاق می‌افتد. به نظر می‌رسد نوع گسلش این گسل و شکست دوم در موقعیت مقادیر بیشینه تأثیر گذاشته است؛ چرا که عمدتاً در ردیفهای انتهایی

جدول ۳. بررسی کمی پارامترهای جنبش نیرومند زمین

Table 3. Quantitative investigation of ground motion parameters

مقدار بیشینه	ردیف مقدار بیشینه	پارامترهای جنبش نیرومند زمین
۷	۲۰-۱۷	PGA
۳/۵	۲۱	PGV
۳	۲۱	PGD



شکل ۱۲. الف تا ت نمودارهای سه بعدی $S_{dn}/S_{dp} - T - \theta$ در حالت $\mu=2$. الف) برای تا شعاع ۵ کیلومتر، ب) برای تا شعاع ۱۰ کیلومتر، پ) تا شعاع ۱۵ کیلومتر و ت) تا شعاع ۲۰ کیلومتر.

Fig. 12. Three-dimensional $S_{dn}/S_{dp}-T-\theta$ diagram (for the case $\mu=2$)

ردیف عمود بر مرکز زلزله هستند، زاویه ی ۹۰ درجه دارند. به همین ترتیب سایر زوایا در حد فاصل این زوایا مشخص شده است. در این نمودارهای سه بعدی محور X زوایا را از صفر تا ۱۸۰ برحسب درجه، محور Y پریود را از ۱ تا ۴ ثانیه با گام ۱ ثانیه به همراه پریود ۰/۵ ثانیه و محور Z نسبت پاسخهای عمودی به افقی را نشان می دهد. مطابق شکل، لوزیهای صورتی پریود ۰/۵ ثانیه، ستاره های آبی پریود ۱ ثانیه، مربعهای قرمز پریود ۲ ثانیه، مثلثهای

چپ خط گسل به عنوان زاویه ی صفر و سمت راست خط گسل به عنوان زاویه ی ۱۸۰ درجه در نظر گرفته شده است. ردیف ۱۲ محور افقی که عمود بر محل مرکز زلزله می باشد، به عنوان زاویه ۹۰ درجه در نظر گرفته شده است. بنابراین ایستگاههایی که بر روی خط گسل و در سمت چپ مرکز زلزله هستند زاویهی صفر درجه، ایستگاه هایی که بر روی خط گسل و در سمت راست مرکز زلزله هستند، زاویه ی ۱۸۰ درجه و ایستگاههایی که بر روی

سبز پریود ۳ ثانیه و دایره های مشکی پریود ۴ ثانیه را نشان می دهند.

در جاهایی که نسبت پاسخهای عمودی به موازی بیشتر است در واقع اثرات جهت پذیری خودش را بیشتر نشان داده است. زاویه ۹۰ درجه کمترین مقدار نسبتها را نشان می دهد و عمدتاً زاویه ۰ درجه که در جهت جهت پذیری پیشرونده واقع است، بیشترین مقدار را نشان می دهد. شعاع ۵ کیلومتر کمترین نسبت پاسخها را دارد و با افزایش فاصله مقدار نسبتها افزایش یافت. البته بین نسبت پاسخ در شعاع ۱۵ کیلومتر و شعاع ۲۰ کیلومتر تفاوت زیادی دیده نشد. تأثیر راستاگرایی موجب نامتقارن شدن الگوی تابش شد. همانطور که در زوایای صفر درجه و ۱۸۰ درجه مشاهده شد، این نسبت در زاویه راستاگرایی ۱۸۰ درجه (جهت پس رو) کمتر از زاویه راستاگرایی صفر درجه (جهت پیش رو) شده است. در شعاع ۵ کیلومتر و در پریودهای پایین نظم کمتری مشاهده شد و با افزایش فاصله از مرکز زلزله و افزایش پریود نظم بیشتری ایجاد شد. از آنجایی که موقعیت ایستگاههای بالای خط گسل و پایین خط گسل متقارن است و نوع خاک در همه نقاط یکسان است، فقط ۰ تا ۱۸۰ در نظر گرفته شد. در پریودهای پایین نظم کمتری برای نقاط مشاهده می شود؛ مخصوصاً دیده می شود که در زاویه ۹۰ درجه حالت کمینه اتفاق می افتد. در شعاع ۵ کیلومتر با افزایش μ بزرگترین نسبت عمود و موازی افزایش می یابد؛ ولی در سایر شعاعها این نسبت با افزایش μ کاهش می یابد. حالت غیرالاستیک $\mu = 3$ روند مشابهی با حالت $\mu = 2$ دارد. به منظور جلوگیری از تکرار و طولانی شدن صفحات مقاله از ارائه نمودارهای آن صرف نظر شده است.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از رکوردهای شبیه سازی شده حوزه نزدیک به بررسی رفتار سازه تک درجه آزاد غیرالاستیک با شکل پذیری ثابت پرداخته شده است و نتایج زیر حاصل شده است:

- با مقایسه ی S_d و S_a در حالت های الاستیک و غیرالاستیک با $\mu = 2$ و $\mu = 3$ دیده شد که به طور کلی دو حالت غیرخطی روند نزدیکی به حالت الاستیک دارند. بدین ترتیب می توان با تقریب نسبتاً مناسبی به وسیله یک تحلیل خطی، روند حدودی پاسخهای بیشینه و موقعیتشان را برای غیرخطی حدس زد.

- با بررسی کانتورهای S_d و S_a مشخص شد که محل مقادیر بیشینه در کانتورهای S_d و S_a در پریود یکسان، تقریباً مشابه می باشد؛ یعنی با تعیین محل مقدار بیشینه برای S_d در یک پریود مشخص، مقدار

بیشینه S_a در این پریود، در همان حوالی می باشد.

- در این پژوهش مشخص شد هر دو پارامتر R و θ (فاصله از گسل و زاویه قرارگیری نسبت به گسل) مهم است. شاید دو ایستگاه دارای فاصله (R) یکسان باشند ولی به دلیل داشتن زاویه (θ) متفاوت، پاسخهای متفاوتی نشان می دهند. میزان و روند این اختلاف در قالب نمودارهایی ترسیم شد. مثلاً دیده شد ایستگاههایی که فاصله کمی از خط گسل داشتند ولی در منطقه جهت پذیری پیشرونده بودند، پاسخهای زیاد داشتند؛ ولی آنهایی که در منطقه ی جهت پذیری خنثی بودند، پاسخهای کمی داشتند.

- در نمودارهای نسبت پاسخ برای پریود ۰/۵ ثانیه ملاحظه شد که در ۹۰ درجه کمینه نبود باید مراقب بود سازه هایی که کوتاه هستند ممکن است در این ناحیه خیلی آسیب ببینند؛ ولی در سازه های بلند به گفته سامرویل ناحیه خنثی است و زیاد آسیب نمی بینند، عملاً سازه بلند را می توان در ناحیه خنثی ساخت؛ ولی اگر کوتاه باشد، در بخش خنثی ساخته نشود.
- با افزایش پریود و فاصله گرفتن از مرکز زلزله نظم بین نقاطی که نسبت پاسخ عمود بر گسل به پاسخ موازی گسل را نشان میدهند بیشتر می شود.

- با فاصله گرفتن از مرکز زلزله نسبت پاسخ عمود بر گسل به پاسخ موازی گسل بیشتر شده است، زیرا در نزدیکی مرکز زلزله اثرات جابهجایی استاتیکی ماندگار در مؤلفه ی موازی گسل زیاد است و موجب شده است این مؤلفه مقدار زیادی داشته و نسبت پاسخ عمود به موازی کم شود.

- با آن که با حرکت بر روی گسل از غرب به شرق، فاصله ی عمودی تمام ایستگاهها از خط گسل یکسان است، ولی پاسخ دینامیکی سیستم SDOF در بعضی قسمتها نسبت به قسمتهای دیگر بیشتر شده است. این نشان دهنده پدیده راستاگرایی است، اگر بتوان با روشهایی محل تقریبی مرکز زلزله را حدس زد. با استفاده از این نتایج می توان تشخیص داد در کدام نواحی سازه های کوتاه و در کدام نواحی سازه های بلند ساخته شود.
- در نتایج ارائه شده در این پژوهش محل مرکز زلزله تأثیرگذار نیست؛ یعنی اگر محل مرکز زلزله بر روی نقشه ایستگاهها نقطه ی دیگری باشد، تفاوت چندانی در نتایج ندارد. عواملی که در پاسخها تأثیرگذار بودند، شدت و پریود شتابنگاشت ها بودند.

- کانتور پارامترهای زمین می تواند موقعیت خرابی های بیشتر را به صورت تقریبی مشخص کند. پیش از انجام تحلیل سازه ای محل خرابی های بیشتر با این کانتورها قابل تشخیص است.

- تأثیر جهت پذیری بر روی سازه های با پریود پایین کم (T کمتر)

Performance of Soft Stories in Short Steel Structures and Replacement of Braces with Equivalent Moment Resisting Frame. *Amirkabir Journal of Civil Engineering (Amirkabir)* 2017.

- [11] Madhu Girija H, Gupta VK. Scaling of constant-ductility residual displacement spectrum. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2020;49:215–33.
- [12] Baéz JI, Miranda E. Amplification factors to estimate inelastic displacement demands for the design of structures in the near field. *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, 2000.
- [13] MacRae GA, Morrow D V, Roeder CW. Near-fault ground motion effects on simple structures. *Journal of Structural Engineering* 2001;127:996–1004.
- [14] Chopra AK, Chintanapakdee C. Comparing response of SDF systems to near-fault and far-fault earthquake motions in the context of spectral regions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2001;30:1769–89.
- [15] Mavroeidis GP, Dong G, Papageorgiou AS. Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2004;33:1023–49.
- [16] Gillie JL, Rodriguez-Marek A, McDaniel C. Strength reduction factors for near-fault forward-directivity ground motions. *Engineering Structures* 2010;32:273–85.
- [17] Wang F, Li HN, Yi TH. Energy spectra of constant ductility factors for orthogonal bidirectional earthquake excitations. *Advances in Structural Engineering* 2015;18:1887–99.
- [18] Scott MH, Mason HB. Constant-ductility response spectra for sequential earthquake and tsunami loading. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2017;46:1549–54.
- [19] De Francesco G. Constant-ductility inelastic displacement ratios for displacement-based seismic design of self-centering structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2019;48:188–209.
- [20] Dong H, Han Q, Du X, Liu J. Constant ductility inelastic

است. تفاوت زیادی در مقدار پاسخ در زوایای مختلف و تقریباً فواصل مختلف دیده نشده است. اما در سازه‌های پرپیوند بلند تفاوت مقدار پاسخ در زوایای مختلف مشهود است؛ به طوری که در پیوند ۰/۵ ثانیه، شکل نمودار به صورت خط و در پیوند ۴ ثانیه، شکل نمودار به صورت سهمی دیده شده است.

منابع

- [1] Somerville P, Graves R. Conditions that give rise to unusually large long period ground motions. *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 1993;2:211–32.
- [2] Nicknam A, Barkhodari MA, Hamidi Jamnani H, Hosseini A. Compatible seismogram simulation at near source site using Multi-Taper Spectral Analysis approach (MTSA). *Journal of Vibroengineering* 2013;15.
- [3] Khaloo AR, Khosravi H, Hamidi Jamnani H. Nonlinear interstory drift contours for idealized forward directivity pulses using “modified fish-bone” models. *Advances in Structural Engineering* 2015;18:603–27.
- [4] Abrahamson N. Seismological aspects of near-fault ground motions. 5th Caltrans Seismic Research Workshop, 1998.
- [5] Heaton TH, Hall JF, Wald DJ, Halling MW. Response of high-rise and base-isolated buildings to a hypothetical Mw 7.0 blind thrust earthquake. *Science* 1995;267:206.
- [6] Somerville PG. Development of ground motion time histories for phase 2 of the FEMA/SAC steel project. SAC Joint Venture; 1997.
- [7] Lioassatou E, Fardis MN. Near-fault effects on residual displacements of RC structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2016;45:1391–409.
- [8] ASCE-7. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. ASCE/SEI 7-16; 2016.
- [9] Ghafory-Ashtiany M, Hosseini M. Post-Bam earthquake: recovery and reconstruction. *Natural Hazards* 2008;44:229–41.
- [10] Ebadi P, Maghsoudi A. Case Study on Seismic

- of America 2002;92:300–11.
- [27] Yagi Y, Kikuchi M. Source rupture process of the Kocaeli, Turkey, earthquake of August 17, 1999, obtained by joint inversion of near-field data and teleseismic data. *Geophysical Research Letters* 2000;27:1969–72.
- [28] Kojima K, Saotome Y, Takewaki I. Critical earthquake response of SDOF elastic-perfectly plastic model with viscous damping under double impulse as substitute of near-fault ground motion. *Journal of Structural and Construction Engineering* 2017;82. doi:10.3130/aajs.82.643.
- [29] Pourali N, Khosravi H, Dehestani M. An investigation of P-delta effect in conventional seismic design and direct displacement-based design using elasto-plastic SDOF systems. *Bulletin of Earthquake Engineering* 2019;17:313–36.
- [30] Hamidi H, Karbassi A, Lestuzzi P. Seismic response of RC buildings subjected to fling-step in the near-fault region. *Structural Concrete* 2020; 21(5).
- [31] McKenna F, Fenves GL, Scott MH. *OpenSees: Open system for earthquake engineering simulation*. University of California, Berkeley, CA 2013.
- [32] Newmark NM, Hall WJ. *Earthquake spectra and design*: Earthquake Engineering Research Institute. Berkeley, California 1982.
- displacement ratios for the design of self-centering structures with flag-shaped model subjected to pulse-type ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2020;133:106143.
- [21] Nievas CI, Sullivan TJ. Accounting for directionality as a function of structural typology in performance-based earthquake engineering design. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2017;46:791–809.
- [22] Bradley BA, Baker JW. Ground motion directionality in the 2010–2011 Canterbury earthquakes. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2015;44:371–84.
- [23] Pinzón LA, Mánica MA, Pujades LG, Alva RE. Dynamic soil-structure interaction analyses considering directionality effects. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2020;130:106009.
- [24] Grant DN, Padilla D, Greening PD. Orientation dependence of earthquake ground motion and structural response. *Protection of Built Environment Against Earthquakes*, Springer; 2011, p. 57–73.
- [25] Hamidi H, Khosravi H, Soleimani R. Fling-step ground motions simulation using theoretical-based Green's function technique for structural analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2018;115:232–45.
- [26] Sekiguchi H, Iwata T. Rupture process of the 1999 Kocaeli, Turkey, earthquake estimated from strong-motion waveforms. *Bulletin of the Seismological Society*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Sh. Monfaredi, H. Hamidi, H. Khosravi, *Influence of Inelastic Constant-Ductility SDOF Location versus Near-Fault Records*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(11) (2022) 4767-4786.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18538.6894



