



Investigating the effect of particle shape on energy components in granular media under cyclic loading

Haleh Meshkinghaham, Mehrdad Emami Tabrizi *, Mohamad Reza Chenaghlou

Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

ABSTRACT: Granular dampers installed at the foundation can effectively reduce vibration in the upper stories during an earthquake. Given that particle shape is a crucial property influencing the mechanical behavior of granular materials, this study investigates the effect of particle shape on energy components and the macroscopic response of granular media. The numerical model was analyzed using the discrete element method (PFC 2D), based on an existing laboratory model and subjected to cyclic loading. Following verification, clump elements were employed to simulate particles in three shapes: a circle to represent rounded particles and a square and triangle for angular particles. Combined models featuring these three shapes were also utilized in the simulations. The results indicate that under confined conditions, over 80% of the total energy is stored as elastic strain energy or dissipated due to sliding between particles. The contribution of kinetic and damping energy accounts for approximately 10 to 15% of the total energy. Angular square-shaped particles enhance dissipated energy through damping, while triangular-shaped particles increase energy dissipation due to sliding. For optimal energy dissipation in granular media, a mixed-use of rounded and angular particles in equal proportions is recommended.

Review History:

Received: Mar. 02, 2023

Revised: Mar. 05, 2024

Accepted: Aug. 24, 2024

Available Online: Sep. 04, 2024

Keywords:

Energy Components

Particle Shape

Granular Media

Cyclic Loading

Discrete Element Method

1- Introduction

Energy variations within a specific volume of soil on a micromechanical scale are influenced by factors such as the friction between particles due to sliding, particle collisions, particle breakage, deformation, and seismic loading. Generally, researchers investigate energy variations in granular materials using two methods: laboratory experiments and numerical simulations. Laboratory methods typically explore energy consumption as influenced by parameters such as density, stress, strain, and the number of loading cycles [1, 2]. One effective approach for examining energy variations on a micromechanical scale, while also providing a macroscopic response, is the discrete element method. Laboratory studies can assess the macroscopic dissipated and stored energies in granular materials by analyzing the area under the stress-strain loop. In contrast, micromechanical investigations provide a more detailed understanding of stored and dissipated energies. One crucial property of granular materials that affects energy dissipation is particle shape. While particle shape is often assumed to be circular or spherical, some researchers have suggested using elliptical and polygonal shapes, as well as clusters formed by combining circular elements connected by rigid links [3-6]. Because of the mechanical behavior of these particles is similar to the behavior of real soils. In various studies, shapes such as cubes, cylinders, prisms, spheres,

tetrahedrons, and octahedrons have been utilized to represent angular and rounded particles [7-10]. The significant drawback of this modeling approach is the high calculation volume demand and increased execution time required. Among investigations focused on energy components at a microscopic scale due to cyclic loading, particle shapes in simulations have predominantly been spherical (or circular in the 2D) or clusters of the same shape. Given the presence of particles with diverse shapes and sizes in soil masses, as well as the importance of selecting appropriate geometric shapes for realistic modeling, it should be studied the influence of different particle shapes on energy dissipation in granular media. This study aims to investigate the effect of particle shape on energy components. Therefore, based on the discrete element method, particles were categorized into three groups: circles, squares, and triangles. Clump elements were utilized to simulate these particles. Initially, the numerical model was developed based on the laboratory model and analyzed in 2D using circular particles subjected to confined axial cyclic loading. Following a comparison between the numerical model and experimental results, which identified the optimal number of balls in the clusters, numerical simulations were conducted with three types of clusters - circle, square, and triangle – across six models composed of monodisperse and polydisperse particles. Finally, the results of energy

*Corresponding author's email: m.emami@sut.ac.ir



Table 1. Parameters of contact model

	G (N/m ²)	ν	μ	β
Particle(2)-Particle(2)	0.563E9	0.42	0.2	0.2
Particle(1)-Particle(1)	1.021E9	0.42	0.2	0.2
Particle(2)-Particle(1)	1.021E9	0.42	0.2	0.2
Particle(1) or Particle(2)-Wall	1.021E9	0.42	0.2	0.2

components across all models were extracted and compared.

2- Methodology

The dimensions of the numerical model are 150 mm in length and 105 mm in height with four rigid walls according to a laboratory study conducted by Jongchansitto et al., 2018 [11]. The side walls and the bottom wall of the model are fixed, while only the top wall is allowed to move during loading. The contact model used is nonlinear. Cyclic loading was applied in seven cycles through the upper wall. The parameters of the contact model are detailed in “Table 1”, which includes the following variables: G as the shear modulus, ν as Poisson’s ratio, μ as the friction coefficient, and β as the damping coefficient. Energy components were analyzed across six numerical models, which included both models with uniform-shaped particles and models consisting of differently shaped particles.

3- Results and Discussion

The ratio of energy components to total energy in six models is illustrated in “Figure 1”. As shown, an increase in the number of circular clumps leads to higher stored strain energy, resulting in a decrease in sliding dissipation. In model 4, which consists solely of circular clumps, the stored strain energy accounts for about 60% of the total energy, while the dissipated energy due to sliding is approximately 45%. Conversely, as the number of triangular clumps increases, the energy dissipated also rises. In model 6, which includes only triangular clumps, the energy dissipated from sliding reaches about 70% of the total energy. “Figure 1” further indicates that in all models, the levels of kinetic and damping energies are negligible due to confinement conditions. At the end of loading, the kinetic energy is lost, and the damping energy reaches about 1.5% of the total energy. Additionally, it appears that the dissipated energy due to damping is influenced by the initial distribution of particles.

4- Conclusions

The main conclusions of the paper are as follows:

-When the ratio of the radius of the maximum inscribed circle to the radius of the minimum circumscribed circle around the angular particle is closer to 1 (as in the case of a square particle), the dissipated energy due to damping

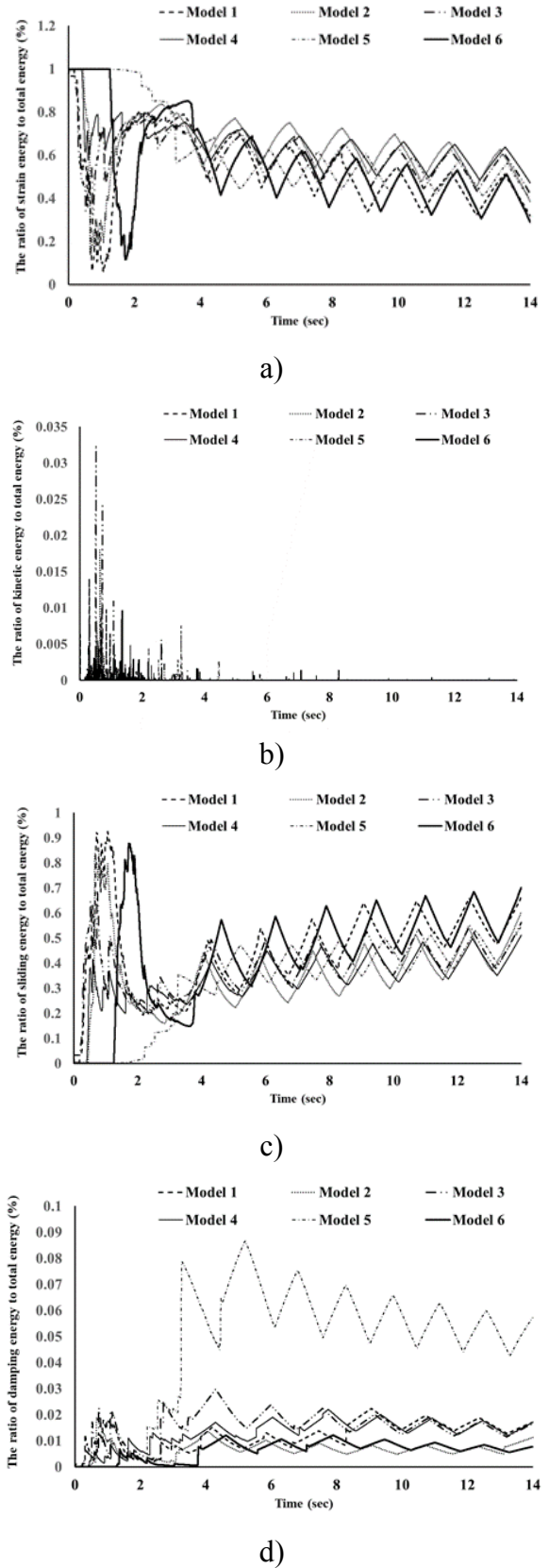


Fig. 1. Comparison of energy components in the models with mixed particles a. Elastic strain energy, b. Kinetic energy, c. sliding energy, and d. damping energy

increases. Conversely, when this ratio is lower (as with a triangular particle), the dissipated energy due to friction increases. Therefore, it can be concluded that in geotechnical materials, angular particles with non-smooth surfaces exhibit a high ability for energy dissipation.

- The energy dissipated in dashpots is influenced by the initial distribution of particles and the compaction of the media. The dense granular media dissipate the lower damping energy.

- If the objective in granular media is energy dissipation, it is recommended to use particles with various shapes in nearly equal proportions.

References

- [1] N. Okada, S. Nemat-Nasser, Energy dissipation in inelastic flow of saturated cohesionless granular media, *Geotechnique*, 44(1) (1994) 1-19.
- [2] S. Thevanayagam, T. Kanagalingam, T. Shenthan, Intergrain friction, contact density, and cyclic resistance of sands, in: *Proc. of 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Christchurch, New Zealand, 2003.
- [3] L. Rothenburg, R. Bathurst, Micromechanical features of granular assemblies with planar elliptical particles, *Geotechnique*, 42(1) (1992) 79-95.
- [4] J.M. Ting, M. Khwaja, L.R. Meachum, J.D. Rowell, An ellipse-based discrete element model for granular materials, *International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 17(9) (1993) 603-623.
- [5] T. Matsushima, H. Saomoto, Discrete element modeling for irregularly Y-shaped sand grains, in: *NUMGE 2002. 5th European Conference Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, 2002, pp. 239-246.
- [6] M.M. Shamsi, A. Mirghasemi, Numerical simulation of 3D semi-real-shaped granular particle assembly, *Powder technology*, 221 (2012) 431-446.
- [7] G. Yang, X. Yan, S. Nimbalkar, J. Xu, Effect of particle shape and confining pressure on breakage and deformation of artificial rockfill, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5 (2019) 1-10.
- [8] T. Zhang, C. Zhang, J. Zou, B. Wang, F. Song, W. Yang, DEM exploration of the effect of particle shape on particle breakage in granular assemblies, *Computers and Geotechnics*, 122 (2020) 103542.
- [9] V. Gorbanpoor, M. EMAMI Tabrizi, DEM investigation of the effect of arrangement of grains on the behavior of brittle granular materials subjected to one dimensional compression, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(11) (2023) 4139-4162.
- [10] V. Gorbanpoor, M. Emami Tabrizi, H. Afshin, Experimental investigation of the shape effect on the mechanical behavior of granular materials under uniaxial loading with lateral confinement, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(7) (2022) 292
- [11] P. Jongchansitto, X. Balandraud, I. Preechawuttipong, J.-B. Le Cam, P. Garnier, Thermoelastic couplings and interparticle friction evidenced by infrared thermography in granular materials, *Experimental Mechanics*, 58 (2018) 1469-1478.



بررسی اثر فاکتور شکل در مولفه‌های انرژی در محیط دانه‌ای تحت بارگذاری چرخه‌ای به روش المان مجزا

هاله مشگین قلم، مهرداد امامی تبریزی*، محمدرضا چناقلو

دانشکده مهندسی عمران و مرکز تحقیقات زلزله دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۱
بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۳
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۶/۱۴

کلمات کلیدی:

مولفه‌های انرژی
شکل دانه
محیط دانه‌ای
بارگذاری چرخه‌ای
روش المان مجزا

خلاصه: میراگرهای دانه‌ای به طور گسترده در کاربردهای مختلف از جمله زیر شالوده‌ها برای جلوگیری از انتقال امواج زلزله به طبقات ساختمان استفاده می‌شوند. با توجه به اینکه شکل هندسی دانه‌ها یکی از مهمترین خصوصیات اثرگذار در رفتار استهلاکی مجموعه مصالح دانه‌ای می‌باشد، لذا در این تحقیق به بررسی تاثیر فاکتور شکل در مولفه‌های انرژی پرداخته شده است. بدین منظور، مدل عددی بر اساس روش المان مجزا و با نرم افزار PFC^{2D} مطابق یک مدل آزمایشگاهی و تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای شبیه سازی و اعتبار سنجی گردید. از المان کلامپ برای شبیه سازی دانه‌ها در سه شکل دایره، مربع و مثلث معرف مصالح تیز گوشه، استفاده شد. در نهایت مدل‌های ترکیبی متشکل از دانه‌هایی با سه شکل مذکور برای شبیه سازی ایجاد شدند. نتایج حاکی از آنست که در شرایط محصور شده و در اثر تغییر شکل دانه‌ها، بیش از ۸۰٪ انرژی کل به صورت انرژی کرنشی الاستیک ذخیره یا در اثر لغزش بین دانه‌ها تلف می‌شود و سهم انرژی جنبشی و میرایی در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد انرژی کل می‌باشد. همچنین اگر نسبت شعاع بزرگترین دایره محاطی به شعاع کوچکترین دایره محیطی در اطراف دانه تیز گوشه به ۱ نزدیکتر شود (دانه مربعی شکل)، میزان انرژی استهلاکی میرایی بیشتر و اگر نسبت مذکور کمتر شود (دانه مثلثی شکل)، انرژی استهلاکی در اثر اصطکاک افزایش می‌یابد. به طور کلی در سیستم‌های دانه‌ای، استفاده از ترکیب دانه‌های تیز گوشه و گرد گوشه با نسبت مساوی جهت استهلاک انرژی دارای عملکرد مناسبی می‌باشد.

۱- مقدمه

محققین تغییرات انرژی در مصالح دانه‌ای را در قالب روش‌های آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. روشهای آزمایشگاهی معمولاً استهلاک انرژی را در اثر تغییر پارامترهایی نظیر تراکم، تنش همه جانبه، دامنه کرنش و تعداد سیکل‌های بارگذاری مورد بررسی قرار دادند [۳، ۴]. یکی از روش‌های کارآمد برای بررسی تغییرات انرژی در مقیاس میکرومکانیکی، روش المانهای مجزا^۱ می‌باشد. مطالعات آزمایشگاهی قادرند انرژی استهلاکی و ذخیره شده ماکروسکوپی را در مصالح دانه‌ای بر مبنای سطح زیر نمودار تنش - کرنش بررسی نمایند در حالیکه بررسی میکرومکانیکی، میزان انرژی ذخیره شده و اتلافی در اثر نیروهای بین دانه‌ها را با جزئیات بیشتری در اختیار قرار می‌دهد. تحقیقات متعددی به بررسی میکرومکانیکی تغییرات انرژی در مصالح دانه‌ای به روش المان مجزا، تحت بارگذاریهای چرخه‌ای و شبه استاتیکی در حالت دو بعدی و سه بعدی پرداخته‌اند. در این تحقیقات، مولفه‌های انرژی

مصالح دانه‌ای زمانیکه تحت بارگذاریهای مختلفی قرار می‌گیرند، از خود رفتار پیچیده‌ای نشان می‌دهند [۱، ۲]. تغییرات انرژی در حجم معینی از خاک در مقیاس میکرومکانیکی، تابع عوامل مختلفی می‌باشد. این عوامل عبارتند از اصطکاک بین دانه‌ها در اثر لغزش که افت انرژی اصطکاک را به دنبال دارد. در اثر برخورد دانه‌ها به یکدیگر نیز مقداری از انرژی به علت میرایی مستهلک می‌گردد. اگر بارگذاری به نحوی انجام گیرد که دانه‌های خاک دچار شکست و تغییر شکل گردند، مقداری از انرژی وارده نیز در اثر شکست تلف می‌شود. همچنین زبری سطح دانه‌ها و بارگذاری لرزه‌ای نیز موجب استهلاک انرژی در مصالح دانه‌ای می‌گردند. مولفه انرژی جنبشی ناشی از حرکت و چرخش دانه‌ها در نقاط تماس و نیز انرژی کرنشی ذخیره شده در اثر تغییر شکل الاستیک در نقاط تماس دانه‌ها نیز در تغییرات انرژی در مقیاس میکرومکانیکی موثر می‌باشند. به طور کلی

1 Discrete element method (DEM)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.emami@sut.ac.ir



دانه‌ها تمایل به غلتش دارند. از طرف دیگر، زاویه اصطکاک داخلی مجموعه دانه‌های دایره‌ای به طور قابل ملاحظه‌ای کوچکتر از مجموعه دانه‌های با شکل هندسی نامنظم می‌باشد [۲۱].

برخی از محققان با توجه به تمایل کمتر دانه‌های بیضی شکل به دوران، نسبت به دانه‌های دایره‌ای شکل و نیز تشابه رفتار مکانیکی مجموعه‌های شبیه سازی شده با دانه‌های بیضی شکل، با رفتار خاکهای واقعی، شکل بیضی را برای دانه‌ها پیشنهاد دادند [۲۲، ۲۳]. با توجه به اینکه دانه‌های واقعی خاک، غالباً دارای گوشه‌های تیز می‌باشند، مدل‌سازی دانه‌های خاک با اشکال چند ضلعی، مدل واقع بینانه‌تری از رفتار خاک ارائه می‌دهد. ایراد اصلی این نوع مدل‌سازی حجم بالای محاسبات و افزایش زمان اجرای برنامه است [۲۴]. در روش دیگر، شکل نامنظم ذرات توسط ترکیب تعدادی المان دایره‌ای شکل که با هم همپوشانی داشته و با اتصال صلب به یکدیگر متصل شده‌اند، به صورت دانه‌های خوشه‌ای^۴ شکل مدل می‌شوند [۲۵، ۲۶]. در مطالعه آزمایشگاهی انجام گرفته توسط یانگ^۵ و همکاران [۲۷] برای بررسی تاثیر شکل دانه بر شکست مصالح، دانه‌های مصنوعی در سه شکل مکعب، استوانه و منشور ساخته شده‌اند. در تحقیق عددی انجام یافته توسط ژانگ^۶ و همکاران [۲۸] بررسی تاثیر شکل بر شکست مصالح با استفاده از سه شکل کره، چهار وجهی و هشت وجهی صورت گرفته است. قربانپور^۷ و همکاران [۲۹] نیز از دو شکل مکعبی و استوانه‌ای که به ترتیب نماینده دانه‌های تیز گوشه و گرد گوشه می‌باشند، مطالعه عددی مشابهی را انجام دادند. به طور کلی با مرور تاریخچه مطالعات صورت گرفته در زمینه بررسی تغییرات انرژی در محیطهای دانه‌ای، ملاحظه می‌شود که شکل دانه‌ها غالباً کروی با قطرهای یکسان یا مختلف [۲، ۶، ۷، ۹-۱۱، ۱۳-۱۵، ۲۰]، بیضوی [۱۶]، مثلثی، مربعی و شش ضلعی به صورت دانه‌های هم شکل [۱۷] و خوشه‌ای هم شکل در هر شبیه سازی [۱۲، ۱۹] می‌باشند. همچنین اشکال متشکل از دایره‌های هم اندازه بهم چسبیده و غیر همپوشان و به صورت دانه‌های هم شکل در نظر گرفته شده است [۱۸]. از میان مطالعاتی که به بررسی مولفه‌های انرژی در مقیاس میکروسکوپی در اثر بارگذاری چرخه‌ای پرداخته‌اند، شکل دانه‌ها در شبیه‌سازیها کروی (در حالت دو بعدی دایره‌ای) و یا خوشه‌ای هم شکل می‌باشند. با توجه به وجود دانه‌ها با اشکال و اندازه‌های مختلف در توده‌های خاکی و از طرف دیگر اهمیت انتخاب شکل هندسی

در مقیاس میکروسکوپی بر اساس مطالعه اسمر^۱ و همکاران، شامل انرژی پتانسیل گرانشی ناشی از وزن دانه‌ها، انرژی کرنشی در دو جهت نرمال و برشی ناشی از فنرهای الاستیک خطی در نقاط اتصال، انرژی جنبشی ناشی از حرکت دانه‌ها، انرژی استهلاکی در اثر اصطکاک بین دانه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است [۵].

تحقیقات مذکور تغییرات انرژی را در اثر پدیده‌های مختلفی مانند تغییرات سطح ارتعاش [۶، ۷]، بررسی ارتباط نرم شدگی^۲ با استهلاک انرژی [۸]، ارتباط استهلاک انرژی و شروع پدیده روانگرایی در خاک [۹، ۱۰]، بررسی فرایند شبه الاستیک در خاکهای دانه‌ای [۱۱]، استهلاک انرژی در بستر بالاست^۳ راه آهن [۱۲]، استهلاک انرژی در خاکهای ماسه‌ای تحت بارگذاری سه محوری [۱۳-۱۵] و میراگرهای دانه‌ای [۱۶-۱۸] مورد مطالعه قرار داده‌اند. برخی از مطالعات مذکور به بررسی مولفه‌های انرژی در مقیاس میکروسکوپی شامل انرژی کرنشی ذخیره شده، انرژی جنبشی، انرژی اتلافی در اثر اصطکاک و انرژی اتلافی در اثر میرایی ناشی از برخورد دانه‌ها پرداخته‌اند [۵، ۶، ۹، ۱۰، ۱۲-۱۵، ۱۹]، برخی دیگر پاسخ فرکانسی مدل را مورد ارزیابی قرار دادند [۷، ۱۷] و تعدادی هم توان میرایی مصاح دانه‌ای و مکانیزم استهلاک انرژی را بررسی کردند [۲، ۱۶، ۱۸، ۲۰].

نوع بارگذاری نیز در پاسخ نهایی مصالح دانه‌ای تاثیر گذار می‌باشد بطوریکه مصالح دانه‌ای وقتی تحت تاثیر بارگذاری چرخه‌ای قرار می‌گیرند رفتار تنش-کرنش غیر خطی و غیر الاستیک نشان می‌دهند، با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری اثرات غیر خطی و غیر الاستیک افزایش می‌یابد. لذا برآورد صحیح غیرخطی بودن تحت بارگذاری چرخه‌ای حائز اهمیت می‌باشد [۱]. نوع بارگذاری در مطالعات مذکور شامل ضربه‌ای [۶، ۷]، سه محوری چرخه‌ای [۱۰، ۱۱، ۱۳، ۱۴]، برش ساده سیکلیک [۱۵]، استاتیکی دو محوری [۱۵]، استاتیکی [۱۲]، لرزه‌ای [۸، ۹] و هارمونیک [۱۶-۱۸] می‌باشد.

یکی از خصوصیات مهم مصالح دانه‌ای که رفتار استهلاکی مجموعه مصالح دانه‌ای را تحت تاثیر قرار می‌دهد، شکل هندسی دانه‌ها است. لذا مدل‌سازی دقیق شکل هندسی دانه‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. در روش متداول، معمولاً شکل هندسی دانه‌ها، دایره‌ای یا کروی شکل در نظر گرفته می‌شوند. این فرض باعث سادگی محاسبات می‌گردد. همچنین مقاومت دانه‌های دایره‌ای شکل در برابر دوران خیلی اندک بوده و این

4 Cluster
5 Yang
6 Zhang
7 Gorbanpoor

1 Asmar, B.N
2 Softening
3 Ballast

با توجه به اینکه در این مطالعه از حرکت دورانی دانه‌ها صرف‌نظر شده است، لذا انرژی جنبشی فقط ناشی از حرکت انتقالی دانه‌ها مد نظر قرار گرفته است:

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N m_i u_i^2 \quad (1)$$

در رابطه (۱)، N ، تعداد کل دانه‌ها، m_i ، جرم دانه i و u_i سرعت انتقالی دانه i هستند.

انرژی کرنشی، شامل کل انرژی کرنشی ذخیره شده در فنرهای نرمال و برشی در مدل تماسی است.

$$E_s = \frac{1}{2} \sum_{c=1}^{N_c} \frac{(F_n^2)_c}{K_n} + \frac{(F_s^2)_c}{K_s} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، N_c ، تعداد نقاط تماس در مدل، F_n ، نیروی نرمال، F_s ، نیروی برشی، K_n سختی فنر نرمال و K_s سختی فنر برشی می‌باشند. کار نیروهای حجمی، کل کار انجام گرفته در مدل در اثر نیروهای حجمی را شامل می‌شود. در این مطالعه نیروهای حجمی شامل نیروی وزن دانه‌ها می‌باشند.

$$E_b = \sum_{i=1}^N m_i g h_i \quad (3)$$

در رابطه (۳)، h_i ، فاصله قائم مرکز دانه i از مبنای اولیه است. کار نیروهای مرزی، کل کار انجام گرفته در مدل در اثر بارگذاری خارجی بر روی دیوارهای مدل را شامل می‌شود.

$$E_w = \sum_{w=1}^{N_w} f_s u_w \quad (4)$$

در رابطه (۴)، f_s ، برآیند نیروهای سطحی وارد به دیوارها و u_w جابجایی انتقالی دیوارها هستند.

مناسب برای دانه‌ها به منظور ایجاد مدل نزدیک به واقعیت، لازم است تا به بررسی تاثیر شکل‌های مختلف دانه‌ها در مقادیر مولفه‌های انرژی در محیط دانه‌ای پرداخته شود.

هدف از این تحقیق، بررسی تاثیر شکل دانه‌ها بر مولفه‌های انرژی می‌باشد. بر این اساس با توجه به مدلسازی دو بعدی بر اساس روش المان مجزا و با نرم افزار PFC^{2D}، دانه‌ها در سه گروه دایره، مربع و مثلث در نظر گرفته شدند. برای مدلسازی شکل‌های مذکور، از دانه‌های خوشه‌ای استفاده گردیده است. در نرم افزار PFC^{2D} دانه‌های خوشه‌ای با عنوان کلامپ مطرح شده‌اند. لذا در ادامه تحقیق حاضر، از واژه "کلامپ" برای دانه‌های خوشه‌ای استفاده شده است. به این منظور ابتدا مدل عددی بر اساس مدل آزمایشگاهی انتخاب و در حالت دو بعدی و با دانه‌های دایره‌ای شکل تحت بارگذاری چرخه‌ای محوری و در حالت محصور شده، تحلیل گردید. سپس بعد از اعتبارسنجی مدل عددی، برای تعیین تعداد توپه‌های تشکیل دهنده کلامپها، با توجه به مدل آزمایشگاهی، کلامپهای دایره‌ای شکل استفاده شد. این کلامپها در سه نوع مختلف از لحاظ تعداد توپه‌های تشکیل دهنده، در مدلسازی استفاده شدند. بر اساس مقایسه نتایج حاصل از مدلسازی عددی مطالعه آزمایشگاهی با دانه‌های دایره‌ای شکل، تعداد توپه‌های بهینه برای ایجاد کلامپ مشخص گردید. سپس با توجه به تعداد توپه‌های بهینه، شبیه سازی عددی مدل با سه شکل دایره، مربع و مثلث برای کلامپها، در مدل‌های متشکل از یک شکل کلامپ یا مدل‌های ترکیبی انجام گرفت و در نهایت نتایج مربوط به مولفه‌های انرژی در هر سه مدل با توجه به شکل کلامپها استخراج و با هم مقایسه شدند.

۲- مولفه‌های میکروسکوپی انرژی

بررسی انرژی در محیط دانه‌ای فهم بهتری از اندرکنش دانه‌ها در مقیاس میکرو در اختیار قرار می‌دهد، بطوریکه بر این اساس می‌توان پیش‌بینی دقیقتری از پاسخ محیط دانه‌ای در مقیاس ماکرو، در اثر بارهای وارده بدست آورد. همچنین بررسی تک تک مولفه‌های انرژی، سهم هر کدام از این ترمها را در میزان کل انرژی اتلافی مشخص می‌نماید. در این مطالعه، مولفه‌های انرژی شامل انرژی جنبشی، انرژی کرنشی فنرها، انرژی ناشی از نیروهای حجمی، انرژی حاصل از کار نیروهای مرزی، انرژی استهلاکی توسط میراگرها و نیز انرژی استهلاکی ناشی از لغزش اصطکاکی به ترتیب مطابق روابط (۱) الی (۶) مورد ارزیابی قرار گرفته است. محاسبات مربوط به همه مولفه‌های انرژی در کل گامهای بارگذاری انجام می‌شود [۹، ۱۰].

جدول ۱. مشخصات مصالح دانه‌ای [۳۱]

Table 1. Characteristics of granular materials [31]

نوع مصالح	قطر (mm)	تعداد	دانسیتته (kg/m ³)
دانه (۱)	۱۰/۵	۴۳	۱۴۲۰
دانه (۲)	۱۲	۷۳	۱۰۴۰

۳- مدلسازی عددی

۳-۱- هندسه مدل عددی

با توجه به اینکه هدف از مطالعه حاضر بررسی مولفه‌های انرژی در محیط دانه‌ای با اشکال کروی شکل، تحت بارگذاری چرخه‌ای می‌باشد، لذا از داده‌های موجود مطالعه آزمایشگاهی انجام گرفته توسط جانگ چان سیتو^۱ و همکاران [۳۲، ۳۱] برای مدلسازی استفاده شده است. با توجه به ابعاد مدل آزمایشگاهی، مدل عددی به صورت دو بعدی، به طول ۱۵۰ میلی‌متر و به ارتفاع ۱۰۵ میلی‌متر با چهار دیوار صلب ایجاد گردید. طول دیوار بالا جهت ایجاد امکان حرکت در هنگام بارگذاری، به اندازه ۲ میلی‌متر از هر طرف، کوچکتر از طول دیوار پایین می‌باشد. دیوارهای طرفین و دیوار پایین مدل ثابت بوده و فقط دیوار بالایی مدل قابلیت حرکت هنگام بارگذاری را دارد. چون در این مرحله، هدف اعتبار سنجی مدل عددی است، لذا آرایش مکانی دانه‌ها با در نظر گرفتن مختصات مراکز آنها، عیناً از مدل آزمایشگاهی اقتباس شد. مشابه مدل آزمایشگاهی از دو نوع مصالح دانه‌ای گرد گوشه با قطرهای ۱۰/۵ میلی‌متر و ۱۲ میلی‌متر مطابق جدول ۱ در ساخت مدل عددی استفاده شده است. «شکل (۱)» مدل عددی ساخته شده در نرم افزار PFC^{2D} را نشان می‌دهد.

۳-۲- مدل تماسی بین دانه‌ها

انتخاب صحیح رفتار تماسی دانه‌ها، جهت بررسی اندرکنش بین دانه‌ای نقش بسزایی دارد. پاسخ مکانیکی مدل‌های تماسی مختلف وابسته به جابجایی نسبی دانه‌های مجاور بوده و سطح واقع‌گرایی مدل تماسی را می‌توان با تعریف روابط غیرخطی نیرو-جابجایی برای فنرهای تماسی و یا

انرژی میرایی، به کل انرژی استهلاکی توسط میراگرها در دو جهت نرمال و برشی مربوط می‌شود.

$$E_{\beta} = \sum_{c=1}^{N_c} (F_n^d)_c (u_n)_c + (F_s^d)_c (u_s)_c \quad (5)$$

در رابطه (۵)، u_n و u_s جابجایی نسبی نقاط اتصال در دو جهت نرمال و برشی بوده و F_n^d و F_s^d مولفه‌های نرمال و برشی نیروی میراگر می‌باشند.

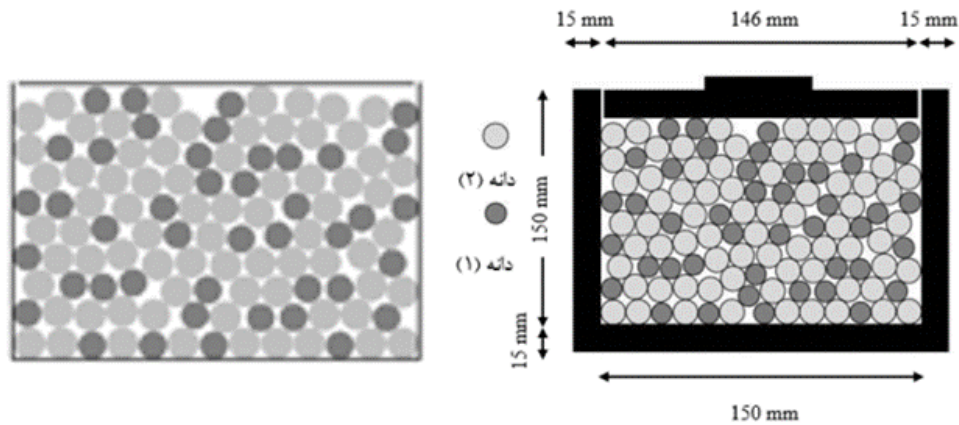
انرژی اصطکاکی به کل انرژی استهلاکی در اثر لغزش اصطکاکی در نقاط اتصال و در کل گامهای بارگذاری اتلاق می‌شود.

$$E_f = \sum_{c=1}^{N_c} (F_s)_c (u_{slip})_c \quad (6)$$

در رابطه (۶)، u_{slip} مقدار جابجایی لغزشی در نقطه اتصال است. در روابط (۲)، (۵) و (۶) C ، شمارنده مربوط به نقاط تماس می‌باشد.

در طی بارگذاری چرخه‌ای، مولفه‌های انرژی مورد نظر بر اساس روابط (۱) تا (۶) تعیین شده و قانون بقاء انرژی مطابق رابطه (۷) ارزیابی می‌گردد [۹، ۱۰، ۳۰].

$$E_w + E_b = E_k + E_s + E_{\beta} + E_f \quad (7)$$



شکل ۱. سمت راست مدل آزمایشگاهی، سمت چپ مدل عددی

Fig. 1. Right: the laboratory model, Left: the numerical model

جدول ۲. مشخصات پارامترهای مدل تماسی

Table 2. Parameters of contact model

مشخصات پارامترهای مدل رئولوژی	مدول برشی G (N/m ²)	نسبت پوواسون (ν)	ضریب اصطکاک (m)	ضریب میرایی نرمال (β _n)
دانه (۲)-دانه (۲)	۰/۵۶۳×۱۰ ^۹	۰/۴۲	۰/۲	۰/۲
دانه (۱)-دانه (۱)	۱/۰۲۱×۱۰ ^۹	۰/۴۲	۰/۲	۰/۲
مدل غیر خطی ویسکوالاستیک	دانه (۱)-دانه (۲)	۱/۰۲۱×۱۰ ^۹	۰/۴۲	۰/۲
	دانه (۱)-دیوار یا دانه (۲)-دیوار	۱/۰۲۱×۱۰ ^۹	۰/۴۲	۰/۲

میراگر به دو مولفه نرمال و برشی در نقطه اتصال تجزیه می‌شوند:

$$F_C = F^h + F^d \quad (۸)$$

$$F^h = -F_n^h \vec{n}_c + F_s^h \quad (a)$$

$$F^d = -F_n^d \vec{n}_c + F_s^d \quad (b)$$

ترکیب فنر و میراگر ارتقا داد [۳۳]. در این مطالعه، مدل تماسی بین دانه‌ها مدل تماسی غیر خطی هرتز در نظر گرفته شد. رفتار رئولوژی مدل هرتز مطابق «شکل (۲)» است. قوانین نیرو - جابجایی در این مدل مطابق روابط (۸) تا (۱۱) است [۳۴-۳۶]. ضریب میرایی برشی متناسب با مقدار متناظر خود در جهت نرمال انتخاب می‌شود و معمولاً در محدود ۰ تا ۱ برابر ضریب میرایی نرمال متغیر است [۳۷، ۳۸]. در این مطالعه از ضریب میرایی برشی، صرفنظر گردید و فقط ضریب میرایی نرمال اعمال شد. مشخصات مربوط به پارامترهای مدل مطابق جدول ۲ می‌باشند.

در نقطه اتصال می‌توان نوشت:

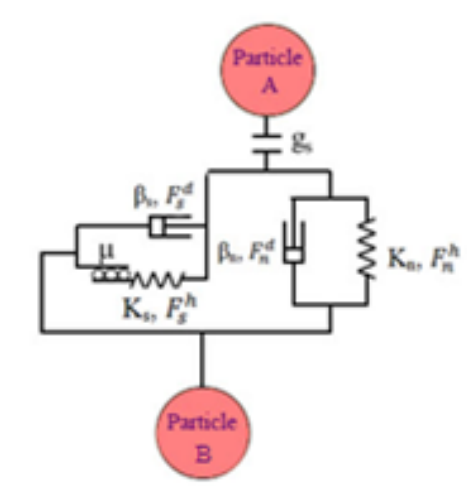
که در آن F_n^h و F_s^h مولفه‌های نرمال و برشی نیروی هرتز و F_n^d

F^h نیروی هرتز در نقطه اتصال است. هر کدام از نیروهای هرتز و

$$g_s = \sqrt{\frac{F_n^h}{2G \sqrt{\frac{4R_1 R_2}{R_1 + R_2}} / 3(1-\nu)}} \quad (11)$$

۳-۳- بارگذاری مدل

بارگذاری مکانیکی، شامل بار فشاری تک محوری سینوسی است که از قسمت دیواره بالایی مدل اعمال می‌شود. بارگذاری در ۷ سیکل با پریود ۲ ثانیه، با سرعت اعمال بار ۰/۱ متر بر ثانیه و دامنه نیروی فشاری در محدوده ۰/۱- کیلونیوتن تا ۱۰- کیلونیوتن می‌باشد.



شکل ۲. رفتار و مولفه‌های رئولوژی مدل هرترز

Fig. 2. Rheological behavior of Hertz model

۴- اعتبار سنجی مدل

همانگونه که ذکر شد، جهت مدلسازی از داده‌های موجود مطالعه آزمایشگاهی انجام گرفته توسط جانگ چان سیتو^۱ و همکاران [۳۱، ۳۲]، استفاده شده است. در تحقیق آزمایشگاهی انجام گرفته، بردارهای جابجایی مدل با پردازش تصویر توسط نرم افزار Matlab مطابق «شکل (۳)» استخراج شده‌اند. دامنه بردارهای جابجایی محیط تحت اثر بار حداقل (۰/۱- کیلونیوتن) حدود ۱ میلی‌متر و تحت اثر بار حداکثر (۱۰- کیلونیوتن) بیش از ۵ میلی‌متر گزارش شده‌اند [۳۱].

«شکل (۴)»، جابجایی دانه‌ها را در دامنه بار حداقل و حداکثر نشان می‌دهد. مطابق شکل، در دامنه حداقل و حداکثر بار تطابق خوبی بین مسیر و جهت جابجایی دانه‌ها با مدل آزمایشگاهی وجود دارد. همچنین در اثر اعمال بار با دامنه حداکثر، ناحیه مثلثی، «شکل (۳)»، مشاهده می‌شود. این پدیده در محیط‌های دانه‌ای با دانه‌های با قطر یکسان یا از یک جنس مشاهده می‌شود [۳۹]. ولی در تحقیق انجام گرفته توسط جانگ چان سیتو و همکاران [۳۱] در محیط‌های دانه‌ای کامپوزیت نیز قابل رویت است [۳۱]. در این مطالعه نیز روند تغییرات جابجایی دانه‌ها در محیط کامپوزیت، نواحی مثلثی را نشان می‌دهد.

با توجه به «شکل (۳-الف) و (۳-ب)» ملاحظه می‌شود که بیشترین جابجایی در دانه‌های bi و bj اتفاق می‌افتد. وقتی که مدل تحت اثر دامنه حداقل بار قرار می‌گیرد، جابجایی در دانه bi برابر ۱/۱ میلی‌متر و در دانه bj برابر با ۱/۱۶ میلی‌متر می‌باشد. زمانیکه مدل تحت اثر دامنه حداکثر بار قرار می‌گیرد، جابجایی دانه bi برابر با ۷/۷۳ میلی‌متر و در دانه bj برابر با ۷/۷۵ میلی‌متر است. با توجه به مطالب ذکر شده، دامنه جابجایی دانه‌ها در

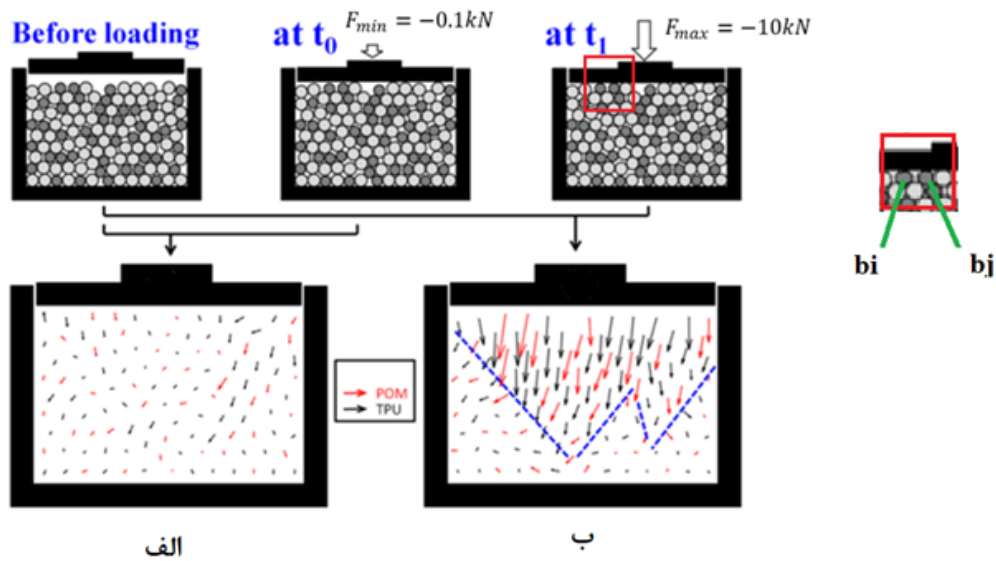
و F_s^d مولفه‌های نرمال و برشی نیروی میراگر می‌باشند. همچنین مقادیر نیروی نرمال F_n^h و نیروی برشی F_s^h بر اساس سختی نرمال و برشی بر اساس رابطه (۱۰) محاسبه می‌گردند:

$$F_n^h = \left[\frac{2G \sqrt{2R_e^h}}{3(1-\nu)} \right] g_s^{\alpha_h} \quad (a)$$

$$F_s^h = F_s^h_0 + \left[\frac{2(1-\nu)}{2-\nu} \right] \times \alpha_h \left[\frac{2G \sqrt{2R_e^h}}{3(1-\nu)} \right] F_n^h \left(\alpha_h - \frac{1}{\alpha_h} \right) \Delta \delta_s \quad (b) \quad (10)$$

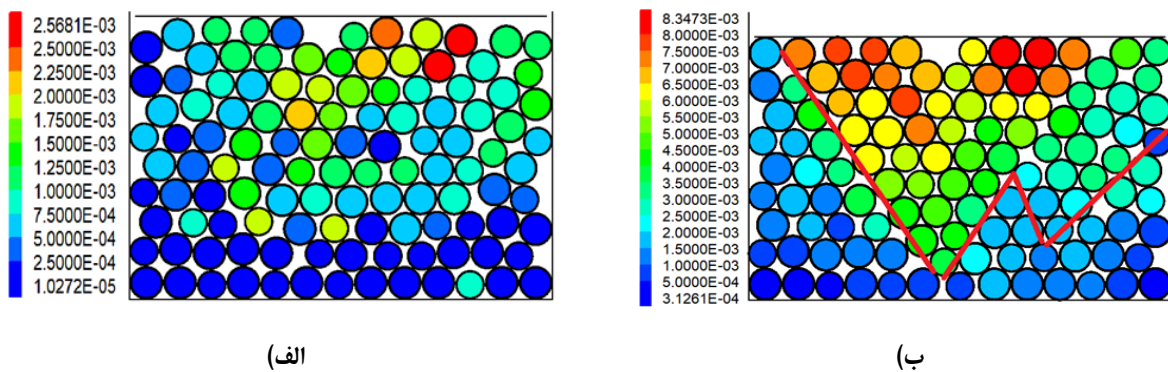
$$R_e^h = \frac{2R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (c)$$

در رابطه (۱۰)، G مدول برشی موثر، α_h نمای هرترز، که عدد بی بعد بوده و در پیش فرض نرم افزار مقدار آن ۱/۵ می‌باشد. در این مطالعه هم مقدار α_h ، ۱/۵ در نظر گرفته شده است. شعاع موثر R_e^h و $F_s^h_0$ نیروی برشی هرترز اولیه هستند. همچنین مقدار g_s مطابق با رابطه (۱۱) محاسبه می‌گردد:



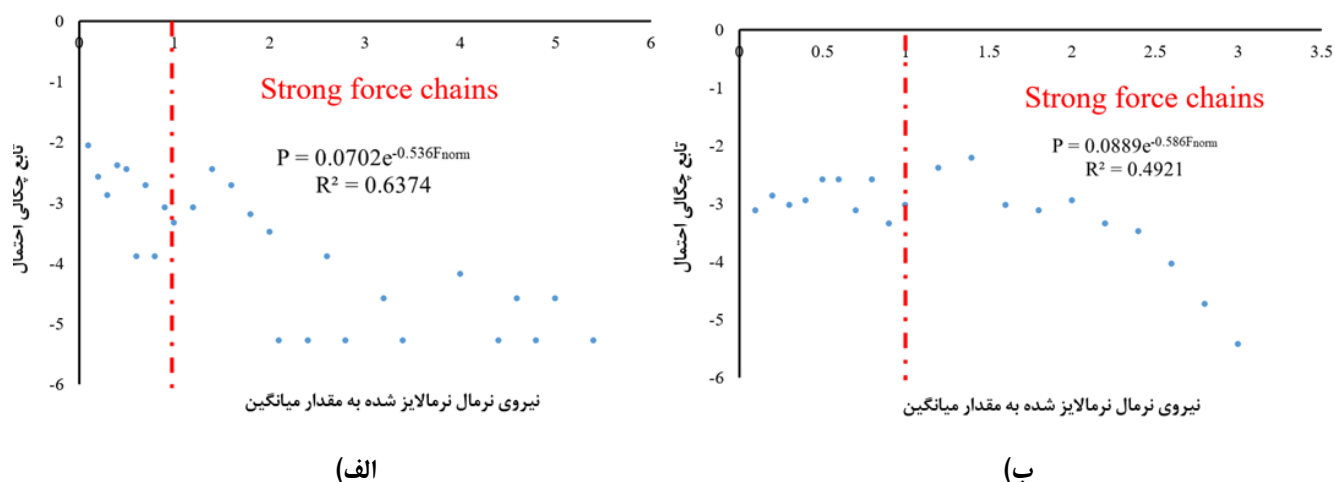
شکل ۳. جابجایی دانه‌ها در مدل آزمایشگاهی، الف. تحت بار حداقل ب. تحت بار حداکثر [۳۱]

Fig. 3. Displacement of particles in the laboratory model, a. Under minimum load b. under maximum load [31]



شکل ۴. جابجایی دانه‌ها در مدل عددی، الف. تحت بار حداقل ب. تحت بار حداکثر

Fig. 4. Displacement of particles in the numerical model, a. Under minimum load b. under maximum load



شکل ۵. توابع چگالی احتمال: الف. تحت اثر دامنه حداقل بار، ب. تحت اثر دامنه حداکثر بار

Fig. 5. Probability density functions: a. Under minimum load, b. Under maximum load

$$P \propto e^{-\beta F_{norm}} \quad (12)$$

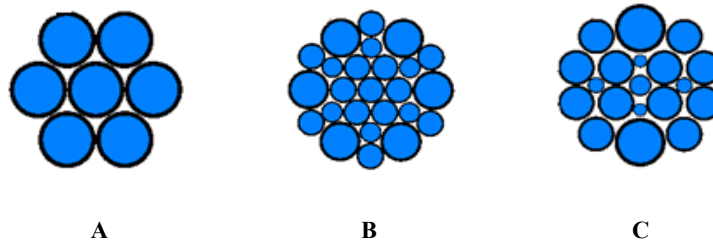
که در آن، P ، تابع چگالی احتمال نیروهای نرمال و F_{norm} ، نیروی نرمال نرمالیزه شده در نقاط تماس است بطوریکه F_{norm} از نسبت نیروی نرمال تماسی به نیروی نرمال متوسط مجموعه مصالح دانه‌ای حاصل می‌شود. مطابق «شکل (۵)»، ملاحظه می‌شود که روند کاهش نمایی تحت اثر دامنه بار حداقل و حداکثر مشاهده می‌شود. مقادیر ضریب β به ترتیب در دو حالت مذکور برابر با $0/536$ و $0/586$ است. همچنین در حالت اعمال دامنه حداقل بار، $37/24\%$ از نقاط تماس دارای نیروی نرمال بیشتر از میانگین نیروی نرمال کل نقاط تماس در مجموعه دانه‌ها می‌باشند. این مقدار در حالت اعمال دامنه حداکثر بار برابر $44/49\%$ است.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- بررسی تاثیر تعداد توپه‌های تشکیل دهنده کلامپ بر مولفه‌های انرژی برای بررسی تاثیر تعداد توپه‌های تشکیل دهنده کلامپ بر مولفه‌های انرژی، مدلسازی دانه‌ها در نرم افزار با استفاده از کلامپ انجام گرفته است. یکی از پارامترهای موثر در انتخاب شکل کلامپ‌ها، تعداد توپه‌های تشکیل دهنده آنها می‌باشد. هر چه تعداد توپه‌های تشکیل دهنده کلامپها بیشتر باشد، شکل دانه به شکل واقعی نزدیکتر می‌شود ولی در عوض زمان تحلیل

اثر اعمال بار حداکثر بیشتر از ۵ میلی‌متر و در اثر اعمال بار حداقل در حدود ۱ میلی‌متر بوده و تطابق خوبی با نتایج مدل آزمایشگاهی دارد. ولی در اثر اعمال بار حداقل، در برخی دانه‌ها، مقادیر جابجایی با مقادیر گزارش شده از مدل آزمایشگاهی اندکی متفاوت بوده و کمی بیشتر از آن است (حدود $2/6$ میلی‌متر). این تفاوت را می‌توان به خطا در چیدمان دانه‌ها بر اساس مختصات مراکز آنها نسبت داد که هنگام اثر بار فشاری اندک، مشاهده می‌شود ولی زمانی که مقدار بار فشاری وارده به مدل و متعاقبا به دانه‌ها، افزایش یافته و تخلخل کم می‌شود، این تفاوت نسبت به مدل آزمایشگاهی بسیار کم است. در مقیاس میکرومکانیکی، به دلیل تنوع ذاتی پارامترهایی نظیر اندازه قطر، میزان گرد بودن، خواص فیزیکی مواد و نیز مکان دقیق دانه‌ها، نمی‌توان مقادیر یکسانی برای پاسخ‌های سینماتیکی و دینامیکی مجموعه مصالح دانه‌ای بین شبیه سازی عددی و نیز آزمایش‌ها مشاهده نمود، به همین دلیل نیاز به تحلیل آماری داده‌ها است [۴۰]. برای این منظور تابع توزیع چگالی احتمال نیروهای نرمال نرمالیزه شده به مقدار میانگین، مطابق «شکل (۵)» استخراج شده است.

آزمایشها و شبیه سازیهای عددی نشان داده‌اند که روند کاهش نمایی شبکه توزیع نیرویی قوی، از ویژگیهای بارز محیطهای دانه‌ای می‌باشد. این روند نمایی، حضور نیروهای بزرگ را در سیستم منعکس می‌کند که اغلب به شکل زنجیره‌های نیرو ظاهر می‌شوند. در مصالح دانه‌ای گرد گوشه، تابع چگالی احتمال برای زنجیره‌های نیرویی قوی، مطابق رابطه (۱۲) است [۴۰].



شکل ۶. شکل کلامپهای مورد استفاده در مدلسازی

Fig. 6. The shape of clumps in numerical modeling

جدول ۳. مقادیر دانسیته اصلاح شده کلامپها

Table 3. Modified density of clumps

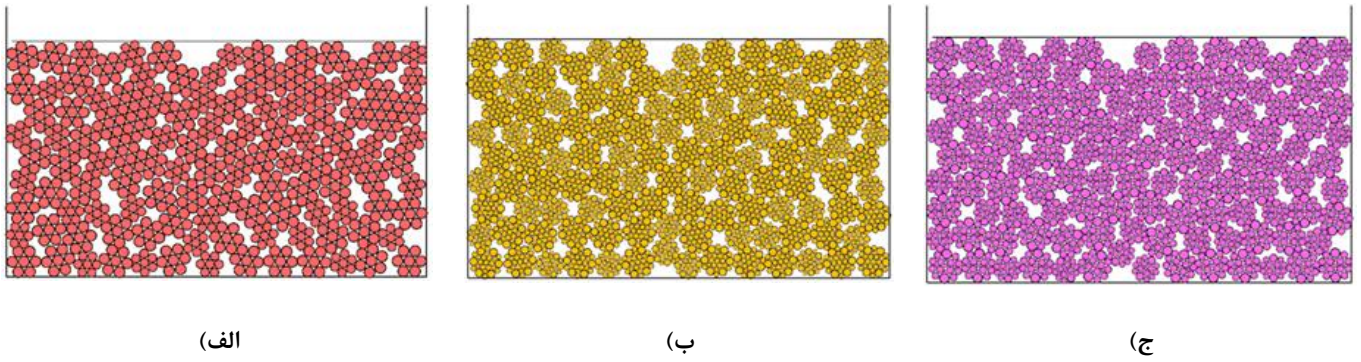
دانه (۲)	دانه (۱)		
۱۲	۱۰/۵	قطر (mm)	مدل A
۱۲۳۷/۷۴	۱۷۴۳/۷	دانسیته (kg/m ³)	
۱۲	۱۰/۵	قطر (mm)	مدل B
۱۲۳۴/۷۷	۱۷۵۳/۱۳	دانسیته (kg/m ³)	
۱۲	۱۰/۵	قطر (mm)	مدل C
۱۲۳۷/۴۵	۱۷۵۱/۴۵	دانسیته (kg/m ³)	

$$\rho_{scaled} = \frac{\rho_p V_p}{\sum_{i=1}^{N_b} V_i^b} \quad (13)$$

که در آن ρ_p دانسیته واقعی مصالح دانه‌ای، V_p حجم واقعی مصالح دانه‌ای، V_i^b حجم هر یک از توپهای تشکیل دهنده کلامپ، N_b تعداد توپهای لازم برای تشکیل کلامپ و ρ_{scaled} دانسیته اصلاح شده در مدلسازی می‌باشند [۴۱].

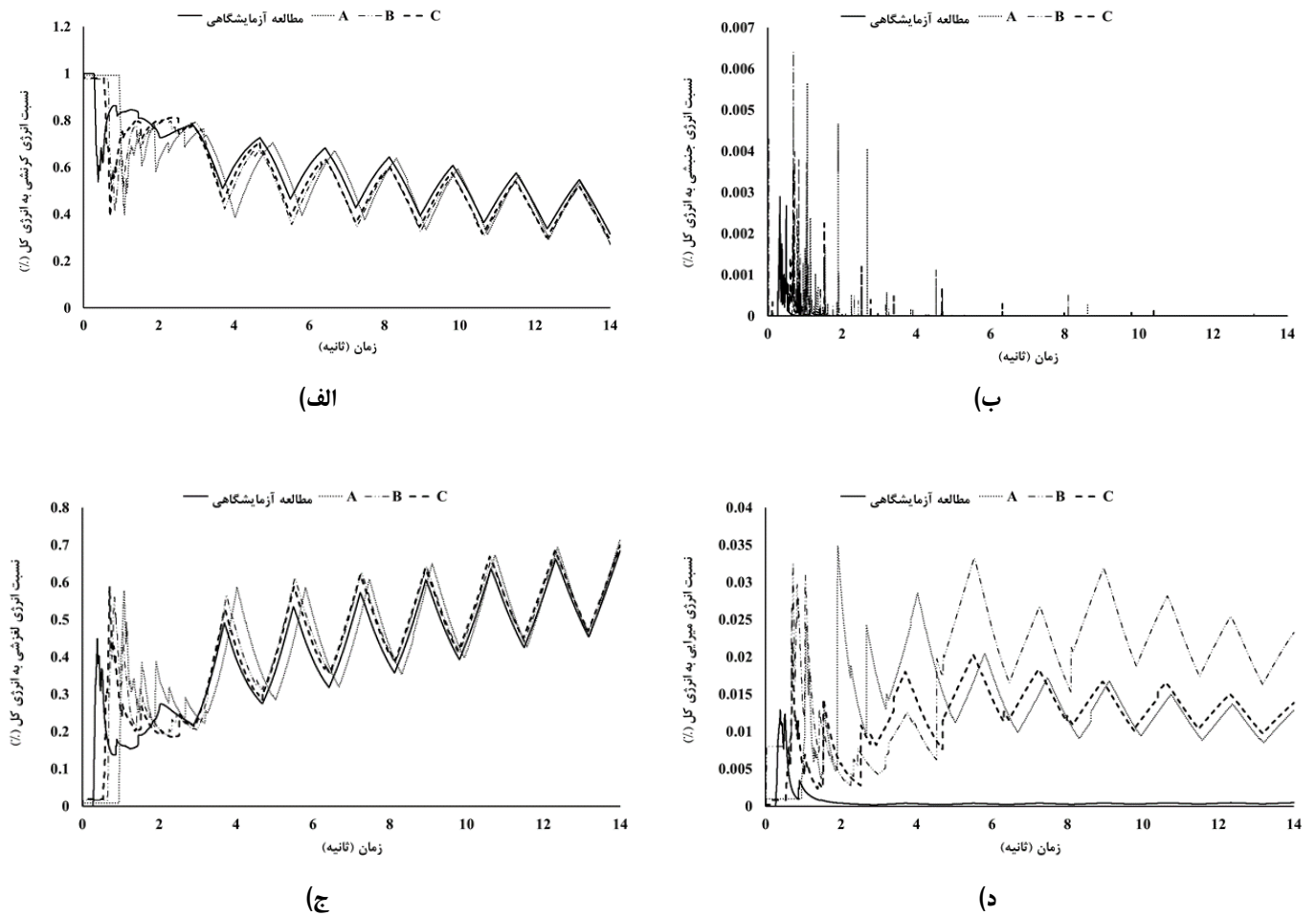
«شکل (۸)» نسبت مقادیر انرژی‌های کرنشی، جنبشی، لغزشی ناشی از اصطکاک و میرایی را به انرژی کل نشان می‌دهد. با توجه به «شکل (۸-ب)» ملاحظه می‌شود که انرژی جنبشی در سیکلهای آغازین

افزایش می‌یابد. در این تحقیق برای تعیین تعداد دقیق توپهای تشکیل دهنده کلامپها، سه نوع کلامپ با نام A، B و C به ترتیب با ۷، ۱۹ و ۲۵ توپ، مطابق «شکل (۶)» برای مدلسازی استفاده شده است. شبیه سازی عددی مطابق با مدل آزمایشگاهی به صورت دو بعدی، به طول ۱۵۰ میلیمتر و به ارتفاع ۱۰۵ میلیمتر با چهار دیوار صلب ایجاد گردید و بارگذاری مشابه حالت قبل و در ۷ سیکل با سرعت ۰/۰۳ متر بر ثانیه اعمال شد. مشخصات دانه‌ها مطابق با جدول شماره ۱ در نظر گرفته شده است و فقط چون در مدلسازی دانه‌ها، تمام حجم دانه در نظر گرفته نمی‌شود و کمی فضای خالی وجود دارد، لذا برای رعایت اصل پایستگی جرم، دانسیته دانه‌ها مطابق رابطه (۱۳) اصلاح شده و مطابق جدول ۳ ارائه گردیده است. «شکل (۷)» شبیه سازیهای انجام گرفته بر اساس سه گروه فوق الذکر از کلامپها را نشان می‌دهد.



شکل ۷. شبیه سازی عددی با کلامپهای الف. گروه A، ب. گروه B و ج. گروه C

Fig. 7. Numerical simulation a. Clumps group A, b. Clumps group B and c. Clumps group C



شکل ۸. مقایسه مولفه‌های انرژی در مدل سازیهای انجام گرفته با سه نوع کلامپ A، B و C الف. انرژی کرنشی الاستیک، ب. انرژی جنبشی، ج. انرژی لغزشی و د. انرژی میرایی

Fig. 8. Comparison of energy components in the numerical modeling with three types of clumps A, B and C. a. Elastic strain energy, b. Kinetic energy, c. sliding energy and d. damping energy

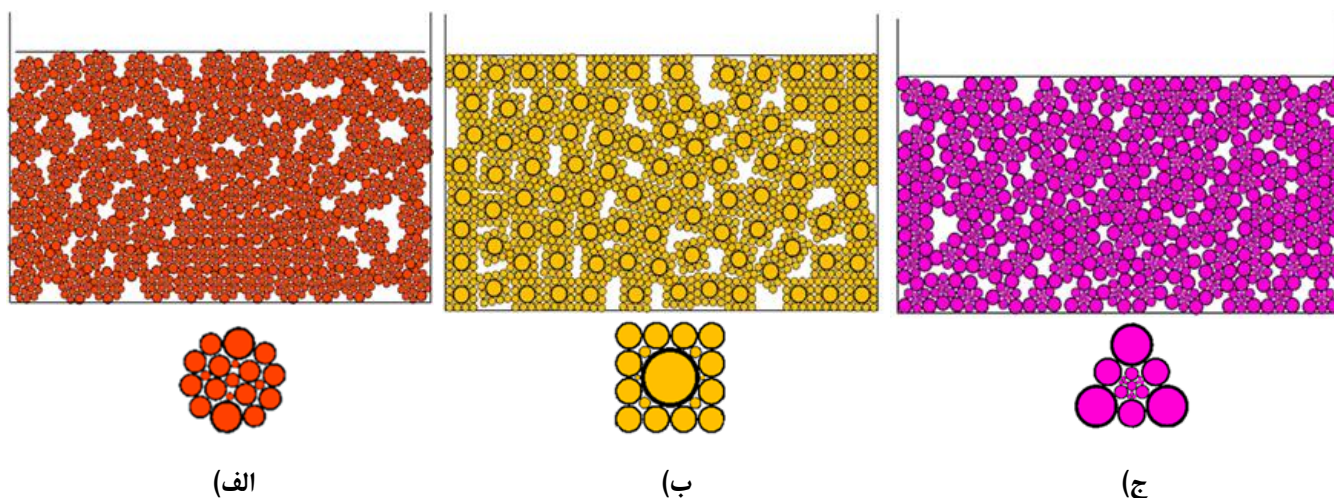
جدول ۴. مقادیر ضرایب همبستگی بین مولفه‌های انرژی در سه مدل کلامپ و مدل آزمایشگاهی

Table 4. Correlation coefficients between energy components in three models with three clumps and laboratory model

	مدل آزمایشگاهی	کلامپ A	کلامپ B	کلامپ C
انرژی کرنشی	مدل آزمایشگاهی	۱		
	کلامپ A	۰/۵۸۰	۱	
	کلامپ B	۰/۶۱۳	۰/۸۸۱	۱
	کلامپ C	۰/۶۰۲	۰/۹۱۸	۰/۹۶۴
انرژی جنبشی	مدل آزمایشگاهی	۱		
	کلامپ A	۰/۰۰۰۸۵	۱	
	کلامپ B	-۰/۰۰۱۸۱	-۰/۰۰۱۱۱	۱
	کلامپ C	۰/۰۰۶۳۰	-۰/۰۰۱۲۷	-۰/۰۰۱۳۲
انرژی لغزشی	مدل آزمایشگاهی	۱		
	کلامپ A	۰/۹۹۴	۱	
	کلامپ B	۰/۹۹۴	۰/۹۹۹	۱
	کلامپ C	۰/۹۹۵	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹
انرژی میرایی	مدل آزمایشگاهی	۱		
	کلامپ A	۰/۸۴۸	۱	
	کلامپ B	۰/۹۵۷	۰/۸۴۸	۱
	کلامپ C	۰/۹۶۲	۰/۹۱۹	۰/۹۷۲

به عنوان مثال در زمان ۳ ثانیه انرژی کرنشی در هر دو مدل به حدود ۸۰ درصد انرژی کل می‌رسد. بر اساس «شکل (۸-ج)» تغییرات انرژی لغزشی با افزایش سیکلها به صورت صعودی است زیرا انرژی استهلاکی در اثر لغزش دانه‌ها به صورت تجمعی در سیستم مصالح دانه‌ای انباشته می‌شود. در پایان بارگذاری سطح انرژی لغزشی در هر چهار مدل تقریباً با هم برابر بوده و به حدود ۷۰ درصد انرژی کل می‌رسند. با توجه به مطالب مذکور می‌توان نتیجه گرفت میزان انرژی جنبشی و نیز انرژی میرایی در سیستم مصالح دانه‌ای در شرایط محصور شده، درصد کمی از انرژی کل را به خود اختصاص می‌دهند و قسمت اعظم انرژی به صورت انرژی کرنشی و لغزشی مصرف می‌شود. ضرایب همبستگی بین مولفه‌های انرژی در سه مدل و نیز مدل آزمایشگاهی مطابق جدول ۴ است. بر اساس جدول و نیز شکل، ملاحظه می‌شود از بین سه نوع کلامپ مورد نظر، کلامپ C بیشترین انطباق را با مدل آزمایشگاهی دارد. لذا در ادامه تحقیق، تعداد توپهای تشکیل دهنده کلامپها، ۱۹ عدد در نظر گرفته شده است.

بارگذاری در حدود ۰/۶ درصد انرژی کل است که با افزایش تعداد سیکلهای بارگذاری، به دلیل شرایط محصور شدگی و عدم امکان جابجایی دانه‌ها، تقریباً به صفر می‌رسد. همچنین مطابق «شکل (۸-د)» نیز انرژی میرایی در سیکلهای آغازین در حدود ۳/۵ درصد انرژی کل می‌باشد که با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری این مقدار در کلامپهای A و C به حدود ۱/۵ درصد، در کلامپ B به حدود ۲/۵ درصد و در نمونه آزمایشگاهی تقریباً به صفر می‌رسد. قسمت اعظم انرژی ورودی، به صورت انرژی کرنشی در فنرها ذخیره شده «شکل (۸-الف)» یا در اثر اصطکاک تلف می‌شود «شکل (۸-ج)». مطابق «شکل (۸-الف)» قبل از شروع بارگذاری، انرژی کرنشی ذخیره شده در فنرها ۱۰۰ درصد انرژی کل است. با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری، روند نزولی در نسبت انرژی کرنشی به انرژی کل مشاهده می‌شود بطوریکه در پایان بارگذاری، سطح انرژی کرنشی در هر سه مدل کلامپ و نیز نمونه آزمایشگاهی تقریباً برابر می‌شوند. در سیکل‌های ابتدایی نیز روند تغییرات انرژی کرنشی در مدل با کلامپ C مشابه نمونه آزمایشگاهی است.



شکل ۹. شبیه‌سازی عددی در مدل‌سازیهای انجام گرفته با سه نوع کلامپ A، B و C: الف. کلامپ دایره‌ای، ب. کلامپ مربعی و ج. کلامپ مثلثی

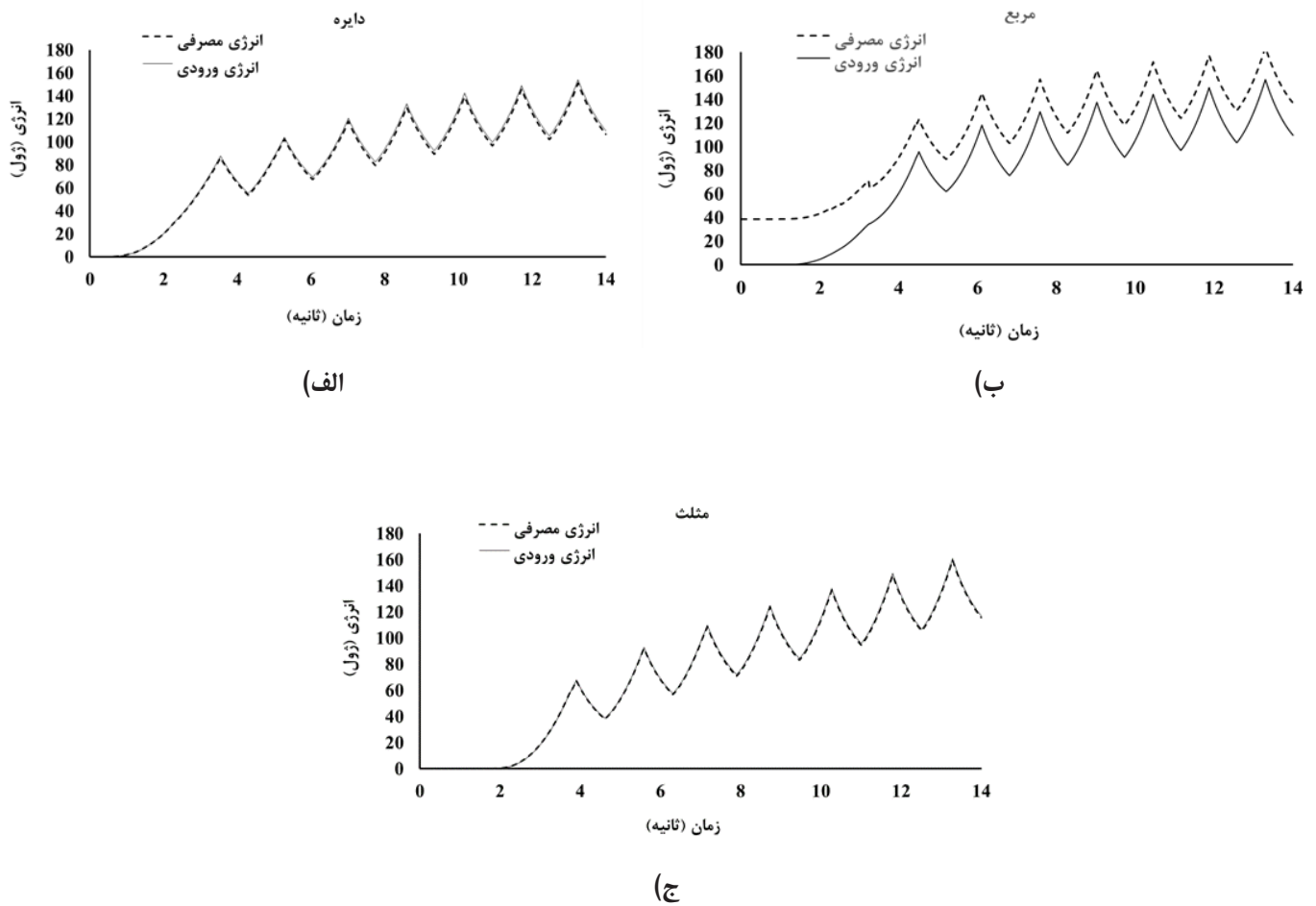
Fig. 9. Numerical simulation with three types of clumps A, B and C: a. Circular clump, b. Square clump and c. Triangular clump

۵-۳- اعتبار سنجی قانون بقاء انرژی

قانون بقاء انرژی مطابق با رابطه (۷) برای هر سه مدل عددی شامل کلامپهای دایره‌ای، مربعی و مثلثی مطابق «شکل (۱۰)» بررسی شده است. منبع اصلی انرژی ورودی به محیط، ناشی از بارگذاری خارجی است. قسمت دیگر انرژی ورودی به سیستم هم ناشی از کار نیروهای حجمی می‌باشد. بخشی از این انرژی صرف لغزش دانه‌ها شده بخش دیگری به صورت انرژی کرنشی الاستیک در فنرها ذخیره می‌شود، قسمتی توسط میراگرها مصرف شده و بخشی هم به صورت انرژی جنبشی دانه‌ها مصرف می‌شود. با توجه به شکل‌ها ملاحظه می‌شود که تعادل بین انرژی ورودی و مصرفی محیط در دو مدل که با کلامپهای به شکل دایره و مثلث مدل شده‌اند، برقرار است بطوریکه انرژی ورودی و مصرفی در شروع بارگذاری از صفر شروع شده و در پایان بارگذاری چرخه‌ای به حدود ۱۲۰ ژول می‌رسند. در مدل با کلامپ دایره‌ای شکل با توجه به اینکه غلتش دانه‌ها بر روی هم به آسانی صورت می‌گیرد و مدل سریعتر به پایداری می‌رسد، این اختلاف بسیار ناچیز است. در مدل با کلامپهای مثلثی شکل هم با توجه به شکل هندسی دانه‌ها، مدل

۵-۲- بررسی تاثیر شکل بر میزان استهلاک انرژی در محیط دانه‌ای

به منظور بررسی تاثیر شکل هندسی دانه‌ها بر میزان استهلاک انرژی، از سه نوع کلامپ با شکل‌های دایره، مربع و مثلث با ۱۹ عدد توپ که از مرحله قبل به دست آمده است، برای شبیه‌سازی استفاده شده است. بطوریکه در اطراف کلامپهای دایره‌ای، نسبت شعاع بزرگترین دایره محاطی به شعاع کوچکترین دایره محاطی برابر با ۱ و در کلامپهای مربعی و مثلثی کوچکتر از ۱ می‌باشد. ابعاد مدل عددی و بارگذاری مطابق با مراحل قبل بوده ولی کلامپها از یک نوع و با قطر ۱۲/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. تخلخل در هر سه مدل ثابت بوده و برابر ۰/۲۳ است. کلامپهای مربع و مثلثی شکل دارای مساحت معادل با کلامپ دایره‌ای می‌باشند. «شکل (۹)» مدل‌های عددی ایجاد شده با کلامپهای به شکل دایره، مربع و مثلث را نشان می‌دهد. تعداد نقاط تماس در مدل با کلامپهای دایره‌ای، ۲۶۳، در مدل با کلامپهای مربعی، ۴۲۰ و در مدل با کلامپهای مثلثی ۲۵۷ عدد است. تعداد توپهای پیرامون کلامپها که منجر به ایجاد نقاط تماس بین دانه‌ای می‌شوند، در کلامپهای دایره‌ای، مربعی و مثلثی به ترتیب برابر ۱۰، ۱۲ و ۶ عدد می‌باشند.



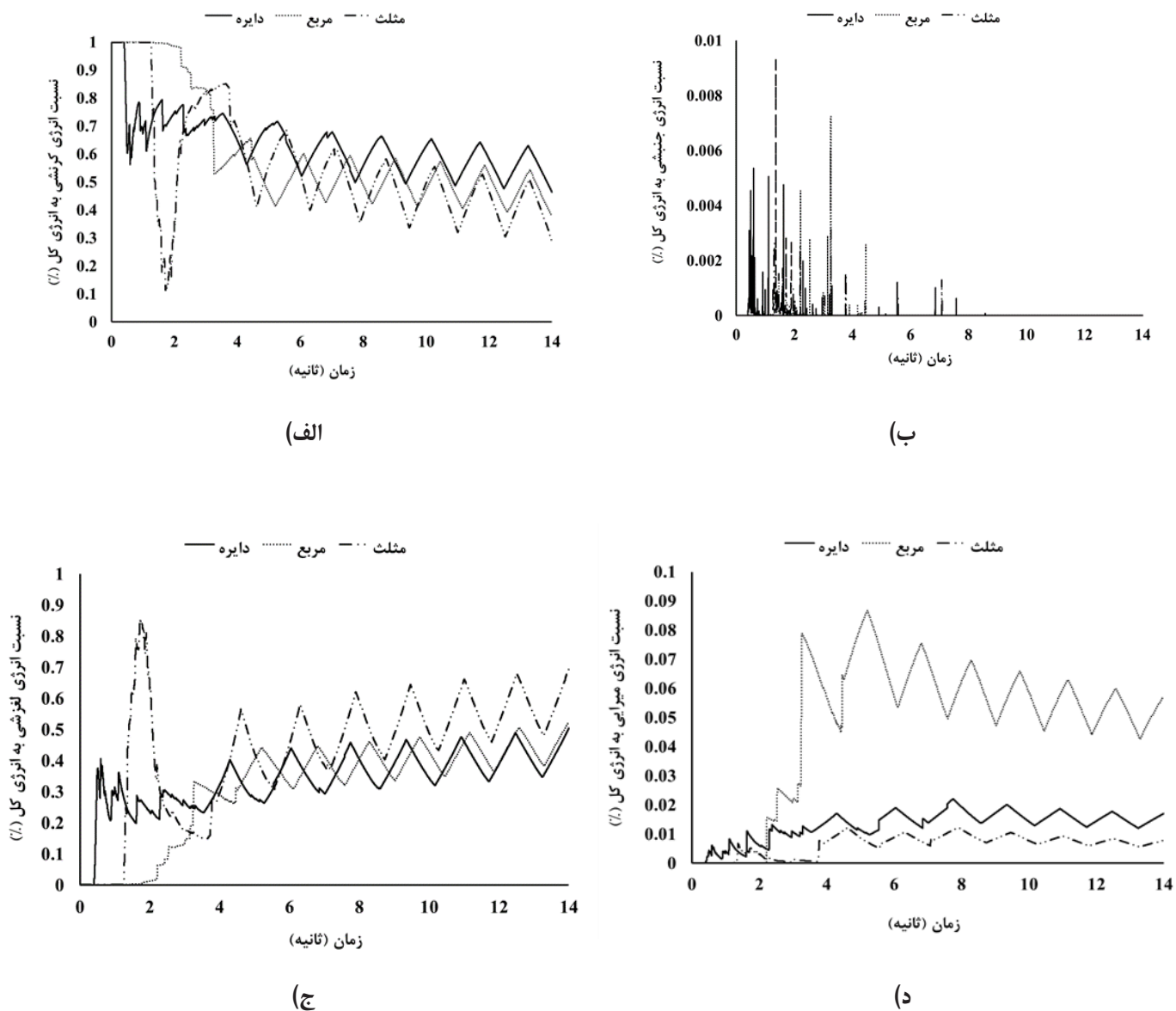
شکل ۱۰. بقاء انرژی در طی بارگذاری چرخه‌ای الف. کلامپ دایره‌ای، ب. کلامپ مربعی و ج. کلامپ مثلثی

Fig. 10. Energy conservation during cyclic loading a. Circular clump, b. Square clump and c. Triangular clump

به علت خطای مدلسازی عددی است. زیرا در مدل با کلامپهای مربعی شکل، در شروع بارگذاری، به علت اینکه نقاط تماس واقع در اضلاع کلامپ مربعی شکل، در کنار هم باعث ایجاد تماس طولی^۱ می‌شوند، لذا کلامپها برای خروج از حالت تعادل انرژی بیشتری مصرف می‌کنند. با افزایش تعداد سیکلهای بارگذاری این اختلاف کاهش می‌یابد زیرا وضعیت تماس کلامپها نسبت به قبل از بارگذاری از حالت تماس طولی تغییر می‌یابند.

تحت اثر وزن دانه‌ها سریعتر از دو مدل دیگر به وضعیت تعادل می‌رسد و لذا اختلاف بین انرژی ورودی و مصرفی تقریباً صفر است. این موضوع در «شکل (۱۰-ج)» هم قابل مشاهده است. ولی در مدلی که با کلامپ مربع شکل شبیه سازی شده است، مطابق «شکل (۱۰-ب)» بین انرژی ورودی و خروجی مدل تفاوت وجود دارد. انرژی ورودی از مقدار صفر شروع شده و بعد از هفت سیکل به حدود ۱۰۰ ژول می‌رسد. انرژی مصرفی از مقدار تقریباً ۴۰ ژول شروع شده و در پایان به حدود ۱۲۰ ژول می‌رسد. این تفاوت

1 Line contact



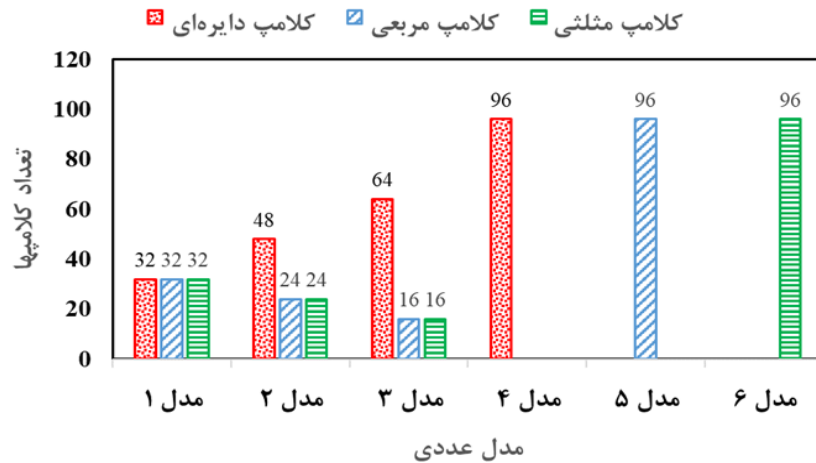
شکل ۱۱. مقایسه مولفه‌های انرژی در مدل‌سازیهای انجام گرفته با سه نوع کلامپ دایره، مربع و مثلث الف. انرژی کرنشی الاستیک، ب. انرژی جنبشی، ج. انرژی لغزشی و د. انرژی میرایی

Fig. 11. Comparison of the energy components in the modeling with three types of clumps: circle, square and triangle a. Elastic strain energy, b. Kinetic energy, c. sliding energy and d. damping energy

«ج-۱۱» مشاهده می‌شود که در پایان بارگذاری، انرژی استهلاکی لغزشی در مدل با کلامپهای دایره‌ای، مربعی و مثلثی به ترتیب در حدود ۵۰٪، ۵۰٪ و ۷۰٪ انرژی کل می‌باشد. بر اساس دو شکل مذکور، در مدل با کلامپهای مثلثی در سیکل ابتدایی بارگذاری (زمان ۲ ثانیه) انرژی کرنشی به ۱۵٪ انرژی کل و انرژی لغزشی به ۸۵٪ انرژی کل می‌رسد. بر این اساس می‌توان گفت وجود کلامپهای مثلثی باعث افزایش مقدار استهلاک انرژی در محیط

۴-۵- مولفه‌های انرژی

«شکل (۱۱)» به ترتیب نسبت انرژی‌های کرنشی، جنبشی، لغزشی و میرایی به انرژی کل را در سه مدل با کلامپهای دایره‌ای، مربعی و مثلثی نشان می‌دهد. با توجه به «شکل (۱۱-الف)» مشاهده می‌شود که انرژی کرنشی در پایان بارگذاری در مدل با کلامپهای دایره‌ای، مربعی و مثلثی به ترتیب در حدود ۵۰٪، ۴۰٪ و ۳۰٪ انرژی کل است. مطابق «شکل



شکل ۱۲. نحوه توزیع کلامپهای دایره‌ای، مربعی و مثلثی در مدل‌های ترکیبی

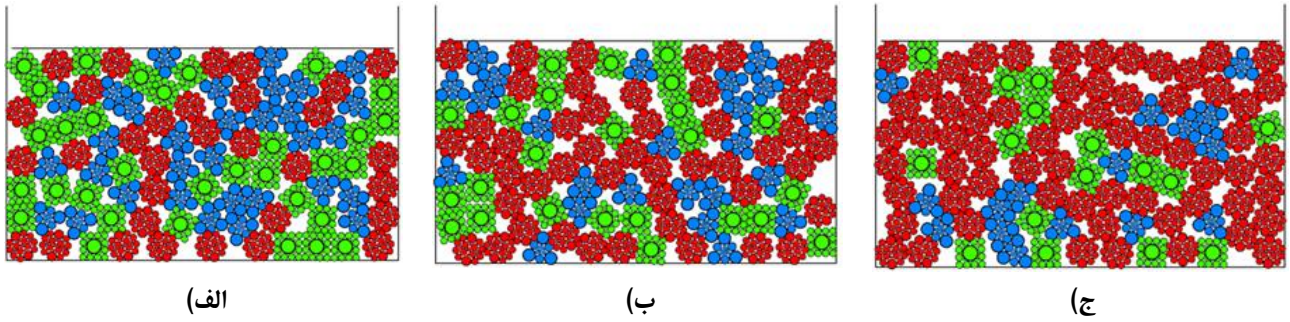
Fig. 12. Distribution of circular, square and triangular clamps in models with mixed particles

۵-۵- مدل‌های ترکیبی

در این مرحله از مطالعه، به بررسی تغییرات انرژی در محیط متشکل از کلامپهایی از هر سه شکل دایره، مربع و مثلث پرداخته می‌شود. برای این منظور سه مدل عددی با همان ابعاد و همان بارگذاری مشابه با حالت‌های قبل ایجاد گردید. در یکی از مدل‌ها تعداد کلامپهای دایره‌ای، مربعی و مثلثی شکل برابر، در دو مدل دیگر از تعداد کلامپهای مربعی و مثلثی کاسته شده و بر تعداد کلامپهای دایره‌ای افزوده می‌شود بطوریکه در یکی از مدل‌ها تعداد کلامپهای دایره‌ای ۵۰ درصد تعداد کل کلامپها و در مدل دیگر ۶۷ درصد تعداد کل کلامپها است. تعداد کلامپهای مربعی و مثلثی شکل نیز با هم برابر است. نتایج مربوط به این مدل‌ها با نتایج مربوط به مدل‌های با کلامپهای فقط دایره‌ای شکل، فقط مربعی شکل و فقط مثلثی شکل که در مرحله قبل مورد ارزیابی قرار گرفته بودند، مقایسه گردید. لازم به ذکر است که تخلخل در هر ۶ مدل ثابت است. «شکل (۱۲)» تعداد و نوع کلامپهای تشکیل دهنده مدل‌ها را نشان می‌دهد. مدل‌های ترکیبی ایجاد شده در این مرحله مطابق «شکل (۱۳)» هستند.

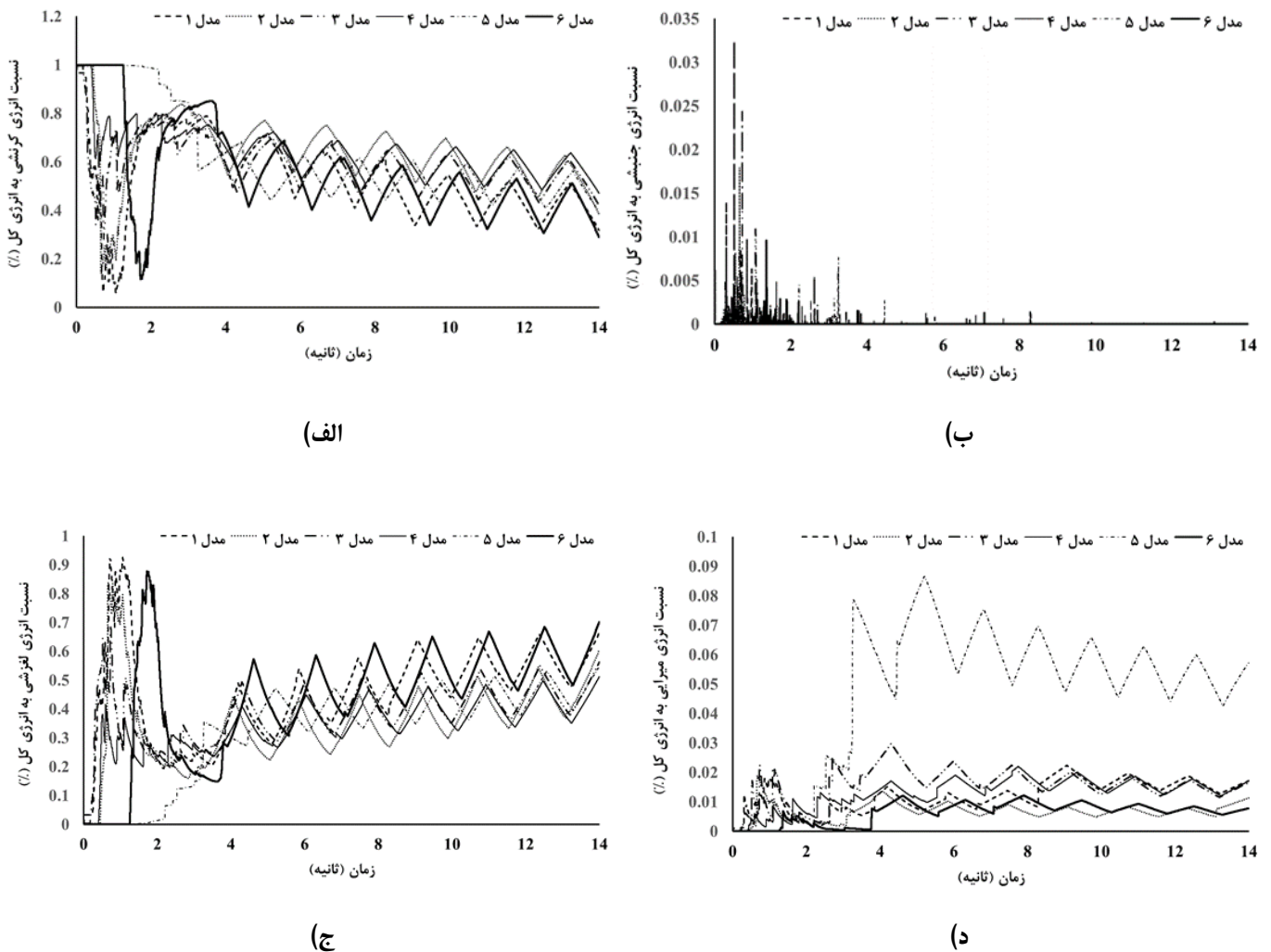
نسبت مولفه‌های انرژی به انرژی کل در سه مدل ترکیبی در مقایسه با مدل‌های متشکل از یک نوع کلامپ، مطابق با «شکل (۱۴)» می‌باشند. با توجه به «شکل (۱۴-الف)» مشاهده می‌شود که افزایش کلامپهای دایره‌ای باعث افزایش انرژی کرنشی ذخیره شده می‌شود و به تبع آن میزان انرژی استهلاکی لغزشی کاهش می‌یابد. همانگونه که در «شکل

دانه‌ای می‌شود. دلیل این موضوع، گیر افتادن کلامپهای مثلثی در بین سایر کلامپها است که باعث می‌شود تا زمان ایجاد شرایط پایدار، استهلاک انرژی بیشتر شود. با افزایش سیکلهای بارگذاری، کلامپها در وضعیت پایدار قرار گرفته و درصد استهلاک انرژی کم می‌شود. در مدل با کلامپهای دایره‌ای و مربعی شکل به دلیل تمایل کلامپهای دایره‌ای به غلتش و ایجاد طول تماس بجای تماس نقطه‌ای در کلامپهای مربعی شکل، پایداری کلامپها سریعتر تامین شده و استهلاک انرژی کمتری صورت می‌گیرد. به این علت در این دو مدل دامنه نوسان انرژی کرنشی و لغزشی در سیکلهای ابتدایی نسبت به مدل با کلامپهای مثلثی کمتر است. در مدل با کلامپهای مربعی تا زمان ۳ ثانیه هیچگونه اتلاف انرژی در محیط صورت نمی‌گیرد که همانگونه که گفته شد، دلیل این موضوع ایجاد تماس طولی به جای تماس نقطه‌ای می‌باشد. بر اساس «شکل (۱۱-ب)» به علت شرایط محصور شدگی نمونه، انرژی جنبشی در هر سه مدل ناچیز و در حدود ۱٪ انرژی کل را به خود اختصاص میدهد و مستقل از شکل کلامپها است. با افزایش تعداد سیکلهای بارگذاری به دلیل افزایش تراکم محیط، مقدار آن به صفر می‌رسد. مطابق «شکل (۱۱-د)» انرژی میرایی در پایان بارگذاری در مدل با کلامپهای دایره‌ای، مربعی و مثلثی به ترتیب برابر با ۲٪، ۶٪ و ۱٪ انرژی کل است. در مدل با کلامپهای مربعی به دلیل تمایل اندک کلامپها به غلتش، نیروی زیادی برای میرایی نیاز است، لذا سطح انرژی میرایی در مدل مذکور بیشتر است.



شکل ۱۳. مدل‌های ترکیبی ایجاد شده

Fig. 13. Numerical models with mixed particles



شکل ۱۴. مقایسه مولفه‌های انرژی در مدل‌های ترکیبی الف. انرژی کرنشی الاستیک، ب. انرژی جنبشی، ج. انرژی لغزشی و د. انرژی میرایی

Fig. 14. Comparison of energy components in the models with mixed particles a. Elastic strain energy, b. Kinetic energy, c. sliding energy and d. damping energy

و سه مدل متشکل از کلامپه‌های با شکلهای مختلف و با نسبتهای متفاوت، به روش المان مجزا شبیه‌سازی گردیدند. مهمترین نتایج تحقیق به شرح زیر است:

- قسمت اعظم انرژی ورودی به مدل (بیش از ۸۰٪)، به صورت انرژی کرنشی الاستیک ذخیره شده یا در اثر لغزش بین دانه‌ها تلف می‌شود. مولفه‌های انرژی جنبشی و میرایی در مقایسه با دو مولفه مذکور ناچیز و مجموعاً در حدود ۱۰ الی ۱۵٪ هستند.
- دامنه تغییرات انرژی کرنشی الاستیک در سیکلهای اولیه بارگذاری در هر شش مدل، در حدود ۸۰٪ انرژی کل بوده و در پایان بارگذاری به حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد انرژی کل می‌رسد.
- دامنه تغییرات انرژی استهلاکی در اثر اصطکاک در آغاز بارگذاری از صفر شروع شده و در سیکل اول به علت کاهش زیاد تخلخل و حرکت لغزشی دانه‌ها به حدود ۹۰٪ انرژی کل می‌رسد. با افزایش تعداد سیکلهای بارگذاری، به دلیل تغییرات اندک تخلخل، مقدار انرژی استهلاکی نسبت به سیکل اول کم می‌شود، ولی به دلیل ماهیت تجمعی انرژی استهلاکی، در سیکلهای بعدی روند افزایشی با نرخ اندک در سطوح انرژی استهلاکی مشاهده می‌شود. بطوریکه در پایان بارگذاری در هر شش مدل مقدار انرژی مذکور به حدود ۵۰ الی ۷۰ درصد انرژی کل می‌رسد.
- اگر نسبت شعاع بزرگترین دایره محاطی به شعاع کوچکترین دایره محیطی در اطراف دانه تیز گوشه به ۱ نزدیکتر شود (مثلاً دانه مربعی شکل)، میزان انرژی استهلاکی میرایی بیشتر می‌شود و اگر نسبت مذکور کمتر شود (به عنوان مثال دانه مثلثی شکل)، انرژی استهلاکی در اثر اصطکاک افزایش می‌یابد. بر این اساس می‌توان گفت، در مصالح ژئوتکنیکی، دانه‌های تیز گوشه و با سطوح غیر صاف، توانایی بالایی در استهلاک انرژی دارند.
- مقدار انرژی اتلافی در میراگرها وابسته به توزیع اولیه دانه‌ها و به عبارت دیگر تراکم بین دانه‌ها است. هر چه تراکم محیط دانه‌ای بیشتر باشد، انرژی میرایی کاهش خواهد یافت.
- اگر در سیستمهای دانه‌ای، هدف استهلاک انرژی باشد، توصیه می‌شود از دانه‌هایی با شکلهای مختلف و با نسبت تقریباً مساوی استفاده گردد. در این تحقیق، مدل عددی به صورت دوبعدی و با تخلخل ثابت ایجاد گردید. برای رسیدن به دقت بیشتر، می‌توان مدل عددی را در حالت سه بعدی و با تعداد دانه‌های بیشتری شبیه سازی نمود. همچنین می‌توان به

«شکل (۱۴-ب)» و «شکل (۱۴-الف)» ملاحظه می‌شود، انرژی کرنش ذخیره شده و انرژی استهلاکی لغزشی در مدل ۴ که فقط از کلامپه‌های دایره‌ای تشکیل شده است به ترتیب در حدود ۶۰٪ و ۴۵٪ انرژی کل می‌باشد. با افزایش کلامپه‌های مثلثی، میزان استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. در مدل ۶ که شامل فقط کلامپه‌های مثلثی است، انرژی استهلاکی لغزشی در حدود ۷۰٪ انرژی کل می‌باشد. بر اساس «شکل (۱۴-ب)» و «شکل (۱۴-د)»، در مدل‌های ترکیبی نیز به علت شرایط محصور شدگی، سطح انرژی جنبشی و میرایی ناچیز است. انرژی جنبشی در هر سه مدل ترکیبی در پایان بارگذاری از بین می‌رود و انرژی میرایی در هر سه مدل در پایان به حدود ۱/۵ درصد انرژی کل می‌رسد. همچنین به نظر می‌رسد که انرژی اتلافی میرایی وابسته به توزیع اولیه دانه‌ها است.

با توجه به مطالب مذکور می‌توان گفت، در شرایط محصور شده تحت بارگذاری چرخه‌ای، سهم انرژی جنبشی و میرایی در مقایسه با دو مولفه انرژی کرنشی و استهلاکی لغزشی ناچیز بوده و مستقل از شکل دانه‌ها است و در بررسی مولفه‌های انرژی در این حالت، می‌توان از انرژی جنبشی و میرایی صرف‌نظر کرده و به بررسی اثر انرژی‌های کرنشی و لغزشی پرداخت. از میان تحقیقاتی که به بررسی مولفه‌های انرژی در شرایط مشابه با تحقیق حاضر پرداخته‌اند [۱۰، ۱۵] نیز مشاهده می‌شود که سهم انرژی‌های جنبشی و میرایی در مقایسه با دو مولفه دیگر قابل اغماض است. همچنین روند تغییرات مولفه‌های انرژی در مطالعات مذکور، مشابه با تحقیق حاضر می‌باشد. ولی چون دانه‌ها به شکل دایره در حالت دو بعدی و کره در حالت سه بعدی در نظر گرفته شده‌اند، تاثیر پارامتر شکل در مولفه‌های انرژی دیده نشده است. به عبارت دیگر تاثیر تغییرات شکل هندسی دانه‌ها بر مولفه‌های انرژی مشخص نیست. با توجه به نتایج مطالعه حاضر میزان تاثیر شکل دانه‌ها بر مولفه‌های انرژی شامل انرژی‌های کرنشی، جنبشی، لغزشی و میرایی به صورت کمی ارائه می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر شکل هندسی دانه‌ها بر میزان تغییرات انرژی مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، سه نوع دانه دایره‌ای، مربعی و مثلثی به عنوان نماینده مصالح گرد گوشه و تیز گوشه در نظر گرفته شدند. نسبت شعاع بزرگترین دایره محاطی به شعاع کوچکترین دایره محیطی در اطراف کلامپه‌های دایره‌ای برابر با ۱ و در کلامپه‌های مربعی و مثلثی کوچکتر از ۱ می‌باشد. شش مدل عددی شامل سه مدل متشکل از کلامپه‌های هم شکل

- [11] P. Xia, L. Shao, W. Deng, Mechanism study of the evolution of quasi-elasticity of granular soil during cyclic loading, *Granular Matter*, 23 (2021) 1-15.
- [12] H. Xiao, Z. Zhang, Y. Chi, M. Wang, H. Wang, Experimental study and discrete element analysis on dynamic mechanical behaviour of railway ballast bed in windblown sand areas, *Construction and Building Materials*, 304 (2021) 124669.
- [13] K.J. Hanley, X. Huang, C. O'Sullivan, Energy dissipation in soil samples during drained triaxial shearing, *Géotechnique*, 68(5) (2018) 421-433.
- [14] J. Keishing, X. Huang, K.J. Hanley, Energy dissipation in soil samples during cyclic triaxial simulations, *Computers and Geotechnics*, 121 (2020) 103481.
- [15] L. Tong, Y. Gao, Y.-H. Wang, DEM simulations of energy dissipation in sand under static and cyclic loading, *Journal of Testing and Evaluation*, 49(1) (2021) 28-44.
- [16] F. Terzioglu, J.A. Rongong, C.E. Lord, Influence of particle sphericity on granular dampers operating in the bouncing bed motional phase, *Journal of Sound and Vibration*, 554 (2023) 117690.
- [17] M. Sánchez, C.M. Carlevaro, L.A. Pugnali, Effect of particle shape and fragmentation on the response of particle dampers, *Journal of Vibration and Control*, 20(12) (2014) 1846-1854.
- [18] H. Pourtavakoli, E.J. Parteli, T. Pöschel, Granular dampers: does particle shape matter?, *New Journal of Physics*, 18(7) (2016) 073049.
- [19] W. Xiong, Q.-m. Zhang, J.-f. Wang, Effect of morphological gene mutation and decay on energy dissipation behaviour of granular soils, *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 24(4) (2023) 303-318.
- [20] P. Jacobs-Capdeville, S. Kuang, J. Gan, A. Yu, Micromechanical analysis of granular dynamics and energy dissipation during hopper discharging of polydisperse particles, *Powder Technology*, 422 (2023) 118462.
- [21] S. Abedi, A.A. Mirghasemi, Particle shape consideration بررسی مدل در تخلخل‌های مختلف پرداخت و دقت نتایج را افزایش داد.
- منابع**
- [1] S.L. Kramer, *Geotechnical earthquake engineering*, Pearson Education India, 1996.
- [2] X. Wang, Y. Liu, F. Nicot, Energy processes and phase transition in granular assemblies, *International Journal of Solids and Structures*, 289 (2024) 112634.
- [3] N. Okada, S. Nemat-Nasser, Energy dissipation in inelastic flow of saturated cohesionless granular media, *Geotechnique*, 44(1) (1994) 1-19.
- [4] S. Thevanayagam, T. Kanagalingam, T. Shenthan, Intergrain friction, contact density, and cyclic resistance of sands, in: *Proc. of 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Christchurch, New Zealand, 2003.
- [5] B. Asmar, P. Langston, A. Matchett, J.K. Walters, Energy monitoring in distinct element models of particle systems, *Advanced Powder Technology*, 14(1) (2003) 43-69.
- [6] B. Asmar, P. Langston, J. Walters, A. Matchett, T. Yanagida, Distinct element model of energy dissipation in vibrated binary particulate mixtures, *Particulate science and technology*, 24(4) (2006) 395-409.
- [7] T. Yanagida, A. Matchett, J. Coulthard, Energy dissipation of binary powder mixtures subject to vibration, *Advanced Powder Technology*, 12(2) (2001) 227-254.
- [8] S. Lenart, *The use of dissipated energy at modeling of cyclic loaded saturated soils*, *Earthquake Engineering: New Research*. Nova Science Publishers, Inc., New York, (2008).
- [9] U. El Shamy, C. Denissen, Microscale characterization of energy dissipation mechanisms in liquefiable granular soils, *Computers and Geotechnics*, 37(7-8) (2010) 846-857.
- [10] U. El Shamy, C. Denissen, Microscale energy dissipation mechanisms in cyclically-loaded granular soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, 30 (2012) 343-361.

- [31] P. Jongchansitto, X. Balandraud, I. Preechawuttipong, J.-B. Le Cam, P. Garnier, Thermoelastic couplings and interparticle friction evidenced by infrared thermography in granular materials, *Experimental Mechanics*, 58 (2018) 1469-1478.
- [32] P. Jongchansitto, X. Balandraud, I. Preechawuttipong, J.-B. Le Cam, P. Garnier, Analysis of the thermomechanical response of granular materials by infrared thermography, in: *Residual Stress, Thermomechanics & Infrared Imaging, Hybrid Techniques and Inverse Problems, Volume 7: Proceedings of the 2018 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics*, Springer, 2019, pp. 7-11.
- [33] T. Zhao, *Coupled DEM-CFD analyses of landslide-induced debris flows*, Springer, 2017.
- [34] Itasca. PFC 5.0 (Particle flow code in 2 and 3 dimensions), Version 5.0, User's manual, in, 2017.
- [35] K.H. Hunt, F.R.E. Crossley, Coefficient of restitution interpreted as damping in vibroimpact, (1975).
- [36] I. Agnolin, J.-N. Roux, Internal states of model isotropic granular packings. I. Assembling process, geometry, and contact networks, *Physical Review E*, 76(6) (2007) 061302.
- [37] M. Babić, H.H. Shen, H.T. Shen, The stress tensor in granular shear flows of uniform, deformable disks at high solids concentrations, *Journal of Fluid Mechanics*, 219 (1990) 81-118.
- [38] C.S. Campbell, Granular shear flows at the elastic limit, *Journal of fluid mechanics*, 465 (2002) 261-291.
- [39] C. Chaiamarit, X. Balandraud, I. Preechawuttipong, M. Grédiac, Stress network analysis of 2D non-cohesive polydisperse granular materials using infrared thermography, *Experimental Mechanics*, 55 (2015) 761-769.
- [40] B. Cambou, M. Jean, F. Radjaï, *Micromechanics of granular materials*, John Wiley & Sons, 2013.
- [41] C. O'Sullivan, *Particulate discrete element modelling: a geomechanics perspective*, CRC Press, 2011.
- in numerical simulation of assemblies of irregularly shaped particles, *Particuology*, 9(4) (2011) 387-397.
- [22] L. Rothenburg, R. Bathurst, Micromechanical features of granular assemblies with planar elliptical particles, *Geotechnique*, 42(1) (1992) 79-95.
- [23] J.M. Ting, M. Khwaja, L.R. Meachum, J.D. Rowell, An ellipse-based discrete element model for granular materials, *International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 17(9) (1993) 603-623.
- [24] A. Mirghasemi, L. Rothenburg, E. Matyas, Numerical simulations of assemblies of two-dimensional polygon-shaped particles and effects of confining pressure on shear strength, *Soils and Foundations*, 37(3) (1997) 43-52.
- [25] T. Matsushima, H. Saomoto, Discrete element modeling for irregularly Y-shaped sand grains, in: *NUMGE 2002. 5th European Conference Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, 2002, pp. 239-246.
- [26] M.M. Shamsi, A. Mirghasemi, Numerical simulation of 3D semi-real-shaped granular particle assembly, *Powder technology*, 221 (2012) 431-446.
- [27] G. Yang, X. Yan, S. Nimbalkar, J. Xu, Effect of particle shape and confining pressure on breakage and deformation of artificial rockfill, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5 (2019) 1-10.
- [28] T. Zhang, C. Zhang, J. Zou, B. Wang, F. Song, W. Yang, DEM exploration of the effect of particle shape on particle breakage in granular assemblies, *Computers and Geotechnics*, 122 (2020) 103542.
- [29] V. Gorbanpoor, M. EMAMI Tabrizi, DEM investigation of the effect of arrangement of grains on the behavior of brittle granular materials subjected to one dimensional compression, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(11) (2023) 4139-4162.
- [30] Q. Wu, Z. Yang, X. Li, Numerical simulations of granular material behavior under rotation of principal stresses: micromechanical observation and energy consideration, *Meccanica*, 54 (2019) 723-740.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Meshkinghalam, M. Emami Tabrizi, M. R. Chenaghlou, Investigating the effect of particle shape on energy components in granular media under cyclic loading, Amirkabir J. Civil Eng., 56(9) (2024) 1193-1216.

DOI: [10.22060/ceej.2024.22238.7937](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.22238.7937)



