



Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>



Quasi-synchronous collision between the Arabian-Eurasian plates: implications from geological evidence in remnant back –arc and foreland basins

Elhameh Mardani Havigh¹, Mahnaz Rezaeian^{1*}, Kobra Heydarzadeh², Jonas B. Ruh³

1. Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran

2. Department of Minerals and Groundwater Resources, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3. Institute of Marine Sciences, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Barcelona

Article info

Article type

Research Article

Article history

Received: 9 December 2025

Accepted: 22 February 2026

Keywords:

The Arabian-Eurasian collision, fore-arc and back-arc basins, stratigraphic unconformities, the orogenic belts.



Abstract

The collision between the Arabian and Eurasian plates is one of the key processes for understanding the evolution of the central segment of the Alpine–Himalayan belt. The development of the tectono-sedimentary systems of Zagros, Alborz, Talesh, and the Greater - Lesser Caucasus belts, as well as the depositional basins of the South Caspian, Moghan-Kura, and Central Iran, is fundamentally linked to this event. In addition to producing significant structural and tectonic changes at the regional scale, this collision led to major transformations in depositional patterns and in the evolution of back-arc and foreland basins. Among the most prominent indicators of this transition are the unconformities recorded in stratigraphic successions. These unconformities reflect processes such as pulsed uplift, abrupt changes in depositional regimes, variations in sedimentation rate, the influx of large volumes of clastic material, and short- to long-term interruptions in sedimentation. Numerous lines of evidence and previous investigations in the Zagros, Alborz, Talesh, and Caucasus belts show that the timing and characteristics of these unconformities are asynchronous and directly tied to the local dynamic of the orogenic belt. In the Moghan and South Caspian basins, the transition from deep-marine deposits to deltaic and continental units is accompanied by a marked increase in sedimentation rate, and the appearance of regional unconformities attests to the onset of the collisional phase and the associated mountain building. Correlation of unconformities across structural–sedimentary domains indicates that although the precise timing of events may differ slightly, a general pattern of progressively intensifying orogeny from the Eocene–Oligocene toward the Middle Miocene, and its culmination in the Pliocene–Quaternary, is evident throughout these mountain belts in association with the closure of the Neo-Tethys Ocean.

Introduction

The Arabia–Eurasia continental collision zone is one of the largest and most active collisional regions on Earth and represents the most significant tectonic event in the central segment of the Alpine–Himalayan orogenic belt having developed from the early Cenozoic to the present (Sengör and Natal'in, 1996; Allen et al., 2011; Hatzfeld and Molnar, 2010). The formation of fold and thrust belts such as the Zagros, Alborz, Talesh, Greater and Lesser Caucasus, parts of Turkey, as well as the sedimentary basin of the Caspian Sea and its surroundings, represents the product of collision within former and present foreland and back-arc basins (Berberian and King, 1981; Okay and Tüysüz, 1999; Allen et al., 2002; Agard et al., 2005; Koshnaw et al., 2024).

One of the key characteristics of intercontinental convergence is the development of back-arc basins and their associated magmatic activity, which can serve as essential tools for reconstructing the stages of tectonic evolution and identifying the main phases of the Arabia–Eurasia collision. These basins typically form as a result of changes in subduction-

zone dynamics or slab rollback, and are characterized by rapid subsidence, high sedimentation rates, and volcanic activity. Magmatism in the basins north of the Urumieh–Dokhtar arc in Central Iran and the Alborz has been regarded by researchers as a product of extensional processes within a back-arc basin. (e.g. Delavari et al., 2020; Magni et al., 2014; Verdel et al., 2011; Asiabanha and Foden, 2012).

Materials and Methods

The timing of magmatic activity and the unconformities preserved in stratigraphic columns provide critical insights into tectonic phases, stages of thrusting and uplift, abrupt changes in depositional regimes, basin evolution, and evidence for diachronous collision processes. When these temporal markers are validated by geochronological data, they can be used to constrain the precise timing of the onset and culmination of collision and to reconstruct the tectonic evolution of the orogenic belts. In this study, stratigraphic data from various sectors of the collision zone—including the South Caspian, Moghan, Caucasus, Talesh, Alborz, and Zagros—are examined.

DOI 10.22034/kjes.2026.11697

*Corresponding author: Mahnaz Rezaeian.; E-mail: m.rezaeian@iasbs.ac.ir



How to cite this article: Mardani Havigh, E., Rezaeian, M., Heydarzadeh, K., B. Ruh. J., 2026. Quasi-synchronous collision between the Arabian-Eurasian plates: implications from geological evidence in remnant back –arc and foreland basins. Kharazmi Journal of Earth Sciences 12(1), 128-147. <http://doi.org/10.22034/kjes.2026.11697>

Particular emphasis is placed on validating the recorded unconformities using absolute and thermochronological age constraints, with the goal of determining the collision age in the Moghan Basin. A multi-dataset approach that integrates unconformity with isotopic geochronology enables the construction of a refined temporal framework for collision processes and their spatiotemporal variations across the orogenic belts, highlighting the crucial role of back-arc basins in preserving detailed records of key events. Such an integrative approach allows identification of the critical timings of collision initiation, peak orogenesis, and post-collisional stages, thereby enabling a more accurate assessment of the relationships among different segments of the collision zone.

Results and Discussion

The geology of different parts of the collision zone in Cenozoic and particularly the stratigraphy, is reviewed (Fig. 1). Multiple lines of evidence and previous investigations in the

Zagros, Alborz, Talesh, and Caucasus mountain belts indicate that the timing and characteristics of the unconformities are quasi-synchronous and directly controlled by the local geodynamic behaviour of each segment of the orogen. In the Moghan and South Caspian basins, the transition from deep-marine deposits to deltaic and continental units—accompanied by a marked increase in sedimentation rates and the emergence of regional unconformities—attests to the onset of the collisional phase and associated uplift. Correlation of unconformities across tectono-sedimentary domains shows that, although the exact timing of events may vary slightly, a general pattern of progressively intensifying mountain building from the Eocene–Oligocene into the middle Miocene, culminating in the Pliocene–Quaternary, is evident throughout these orogenic belts and corresponds to the final closure of the Neo-Tethys Ocean.

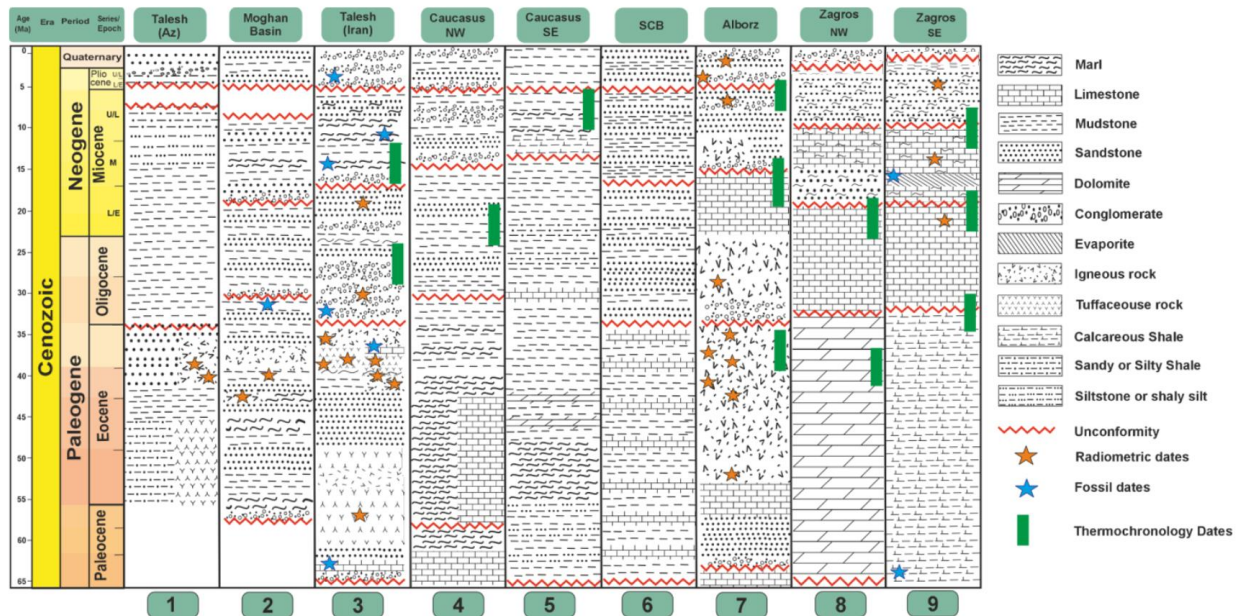


Fig. 1. Stratigraphic columns of the back arc and foreland basins located in the central part of the Arabia–Eurasia collision zone. The information presented in the stratigraphic columns includes stratigraphic data, unconformities, geochronology ages (radiometric and thermochronology ages) in the Talesh region of Azerbaijan (Vincent et al., 2005; Alizadeh et al., 2016), Moghan basin (IFP, 1961; Amini, 2006; Lukoil, 2007; Alizadeh Noudé et al., 2024), Talesh region of Iran (Madanipour et al., 2013), NW Caucasus (Vincent et al., 2011; Vincent et al., 2016), SE Caucasus (Avdeev and Niemi, 2011; Tye et al., 2022; Aghayeva et al., 2023), South Caspian Basin (Brunet et al., 2003), Alborz (Rezaeian et al., 2012), NW Zagros (Homke et al., 2009; Berberian and King, 1981; Madanipour et al., 2024), SE Zagros (Gavillot et al., 2010; Hessami et al., 2001; Gholami Zadeh et al., 2017; François et al., 2014).

Conclusions

In this paper, the single-stage view of the Arabia–Eurasia collision is replaced with a multi-stage model. The proposed model suggests that the collision occurred in three major phases:

- Initial collision during the Eocene–Oligocene (~40–23 Ma).
- Widespread deformation during the Early to Mid-Miocene (~23–12 Ma).

- Rapid orogeny in the Late Miocene to present (~12 Ma to present).

The proposed multi-stage model is capable of explaining the spatio-temporal variations in the pattern of regional unconformities and demonstrates that each segment of the collision zone has experienced a unique tectonic history. Furthermore, the regional correlation of similar unconformities between collision-affected areas and adjacent regions (e.g., the

Caucasus and the South Caspian Basin) may represent broader tectonic phases. Accordingly, the onset of collision cannot be regarded as a single instantaneous geodynamic event; rather, it can be considered a cyclic sequence of events spanning millions of years from the late Eocene to the Pliocene.

The overall conclusion is that a multi-dataset approach—based on the analysis of unconformities, provenance, and both isotopic and thermochronology dating in back-arc basins—can provide a robust framework for constraining the timing of the Arabia–Eurasia collision. This framework favors a series of regional phases rather than a single unified collision age. Existing studies emphasize that the timing of collision across different segments of the Arabia–Eurasia collision zone is multi-phase. Such an approach allows the collision history to be interpreted not as a single moment in time but as a succession of events, each expressed differently and at distinct times within each region. Finally, it is recommended that future studies focus on:

- Precise correlation of unconformities across multiple scales.
- Further development of thermochronology datasets.
- Integration of these data with thermal dating and subsidence modeling in the basins.

References

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Mouthereau, F., 2005. Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation. *International journal of earth sciences* 94(3), 401–419.
- Aghayeva, V., Sachsenhofer, R.F., van Baak, C.G.C., Bayramova, S., Ćorić, S., Frühwirth, M.J., Rzaeva, E., Vincent, S.J., 2023. Stratigraphy of the Cenozoic succession in eastern Azerbaijan: Implications for petroleum systems and paleogeography in the Caspian basin. *Marine and petroleum geology* 150, 106148.
- Alizadeh, A. A., Guliyev, I. S., Kadirov, F. A., Eppelbaum, L. V., 2016. *Geosciences of Azerbaijan: Volume I: Geology*. 1 ed. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-27395-2>.
- Alizadeh Noudeh, S., Yann, R., Magali, R., Olivier, B., Rahgoshay, M., 2024. Eocene High-K Magmatic Flare-up in a Context of South Dipping Subduction and Strike-Slip Tectonics: Insights from the Talysh Massif, NW Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 264, 106045.
- Allen, M.B., Jones, S., Ismail-Zadeh, A., Simmons, M., Anderson, L., 2002. Onset of subduction as the cause of rapid Pliocene–Quaternary subsidence in the South Caspian basin. *Geology* 30(9), 775–778.
- Allen, M.B., Kheirkhah, M., Emami, M.H., Jones, S.J., 2011. Right-lateral shear across Iran and kinematic change in the Arabia–Eurasia collision zone. *Geophysical Journal International* 184(2), 555–574.
- Amini, A., 2006. Oligo-Miocene fluvial-dominated deltas on the shelf of the South Caspian Sea (Paratethys). *Facies* 52(4), 579–597.
- Asiabanha, A., Foden, J., 2012. Post-collisional transition from an extensional volcano-sedimentary basin to a continental arc in the Alborz Ranges, N-Iran. *Lithos* 148, 98–111.
- Avdeev, B., Niemi, N. A., 2011. Rapid Pliocene exhumation of the central Greater Caucasus constrained by low-temperature thermochronometry. *Tectonics* 30, TC2009, doi:[10.1029/2010TC002808](https://doi.org/10.1029/2010TC002808).
- Berberian, M., King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18(2), 210–265.
- Brunet, M.F., Korotaev, M.V., Ershov, A.V., Nikishin, A.M., 2003. The south Caspian basin: A review of its evolution from subsidence modeling. *Sediment Geology*, 156 (1–4), 119–148. [10.1016/S0037-0738\(02\)00285-3](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(02)00285-3).
- Delavari, M., Ghanbari, S., Dolati, A., 2020. Adakitic volcanics of Azerbaijan area (south of Julfa): Evidence of magmatism in post-collisional setting. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 6, 2, 295 – 320. (in Persian)
- François, T., Agard, P., Bernet, M., Meyer, B., Chung, S.-L., Zarrinkoub, M.H., Burov, E., Monié, P., 2014. Cenozoic exhumation of the internal Zagros: first constraints from low-temperature thermochronology and implications for the build-up of the Iranian plateau. *Lithos* 206, 100–112. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.07.021>.
- Gavillot, Y., Axen, G. J., Stockli, D. F., Horton, B. K., Fakhari, M. D., 2010. Timing of thrust activity in the High Zagros fold-thrust belt, Iran, from (U–Th)/He thermochronometry. *Tectonics* 29, TC4025. <https://doi.org/10.1029/2009TC002484>.
- Gholami Zadeh, P., Adabi, M.H., Hisada, K.I., Hosseini-Barzi, M., Sadeghi, A., Ghassemi, M.R., 2017. Revised version of the Cenozoic collision along the Zagros Orogen, insights from Cr-spinel and sandstone modal analyses. *Scientific Reports* 7(1), 10828.
- Homke, S., Vergés, J., SerraKiel, J., Bernaola, G., Sharp, I., Garcés, M., Montero-Verdú, I., Karpuz, R., Goodarzi, M. H., 2009. Late Cretaceous–Paleocene formation of the proto-Zagros foreland basin, Lurestan Province, SW Iran. *Geological Society of America Bulletin* 121, 963–78.
- Hatzfeld, D., Molnar, P., 2010. Comparisons of the kinematics and deep structures of the Zagros and Himalaya and of the Iranian and Tibetan plateaus and geodynamic implications. *Reviews of Geophysics* 48(2).
- Hessami, K., Koyi, H.A., Talbot, C.J., Tabasi, H., Shabanian, E., 2001. Progressive unconformities within an evolving foreland fold–thrust belt, Zagros Mountains. *Journal of the Geological Society* 158(6), 969–981.
- IFP, 1961. IFP mission in Azerbaijan, National Iranian Oil Company, Geological Report No. 235 on Moghan area.
- Koshnaw, R.I., Kley, J., Schlunegger, F., 2024. The Miocene subsidence pattern of the NW Zagros foreland basin reflects the southeastward propagating tear of the Neotethys slab. *Solid Earth* 15(11), 1365–1383.
- Lukoil, 2007. Geological model creation, delineation and estimation of prospects for Moghan and Lali blocks (Iran). Internal report. Joint study project, NIOC exploration/Luk Oil Company.
- Madanipour, S., Ehlers, T.A., Yassaghi, A., Rezaeian, M., Enkelmann, E., Bahroudi, A., 2013. Synchronous deformation on orogenic plateau margins: Insights from the Arabia–Eurasia collision. *Tectonophysics* 608, 440–451.
- Madanipour, S., Najafi, M., Nozaem, R., Vergés, J., Yassaghi, A., Heydari, I., Khodaparast, S., Soudmand, Z., Aghajari, L., 2024. The Arabia–Eurasia collision zone in Iran: tectonostratigraphic and structural synthesis. *Journal of Petroleum geology* 47(2), 123–171.

- Magni, V., Faccenna, C., Van Hunen, J., Funicello, F., 2014. How collision triggers backarc extension: Insight into Mediterranean style of extension from 3-D numerical models. *Geology* 42(6), 511-514.
- Okay, A.I., Tüysüz, O., 1999. Tethyan sutures of northern Turkey. *Geological Society London Special Publications* 156(1), 475-515.
- Rezaeian, M., Carter, A., Hovius, N., Allen, M.B., 2012. Cenozoic exhumation history of the Alborz Mountains, Iran: New constraints from low-temperature chronometry. *Tectonics* 31(2).
- Sengör, A. M. C., Natal'in, B. A., 1996. 21 Paleotectonics of Asia: Fragments of a synthesis. *The tectonic evolution of Asia* 486-640.
- Tye, A.R., Niemi, N.A., Cowgill, E., Kadirov, F.A., Babayev, G.R., 2022. Diverse deformation mechanisms and lithologic controls in an active orogenic wedge: Structural geology and thermochronometry of the eastern Greater Caucasus. *Tectonics* 41(12), p.e2022TC007349.
- Verdel, C., Wernicke, B.P., Hassanzadeh, J., Guest, B., 2011. A Paleogene extensional arc flare-up in Iran. *Tectonics* 30, TC3008.
- Vincent, S. J., Allen, M. B., Ismail-Zadeh, A. D., Flecker, R., Foland, K. A., Simmons, M. D., 2005. Insights from the Talysh of Azerbaijan into the Paleogene evolution of the South Caspian region. *Geological Society of America Bulletin* 117, 1513-1533. <https://doi.org/10.1130/b25690.1>.
- Vincent, S.J., Braham, W., Lavrishchev, V.A., Maynard, J.R., Harland, M., 2016. The formation and inversion of the western Greater Caucasus Basin and the uplift of the western Greater Caucasus: Implications for the wider Black Sea region. *Tectonics* 35(12), 2948-2962.
- Vincent, S.J., Carter, A., Lavrishchev V.A., Rice S.P., Barabadze, T.G., Hovius, N., 2011. The exhumation of the western Greater Caucasus: a thermochronometric study. *Geological Magazine* 148(1), 1–21. doi:10.1017/S0016756810000257

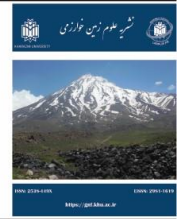
CRediT authorship contribution statement

	Writing - Original Draft, Conceptualization Methodology, Validation Investigation, Resources
	Conceptualization, Methodology Validation, Investigation, Resources, Supervision, Review & Editing Project administration
	Supervision, Methodology Validation, Review & Editing
	Supervision, Methodology Validation, Review & Editing



دسترسی آزاد

نشریه علوم زمین خوارزمی

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

برخورد شبه همزمان صفحه‌ی عربستان-اوراسیا: با تأکید بر شواهد زمین‌شناسی بقایای حوضه‌های پیش بوم و پشت کمانی الهامه مردانی حویق^۱، مهناز رضائیان^۲، کبری حیدرزاده^۳، یوناس رو^۴

^۱، ۲. دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران^۳، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران^۴، موسسه علوم دریایی بارسلونا، اسپانیا

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله مقاله پژوهشی	رخداد برخورد صفحه‌ی عربستان-اوراسیا یکی از فرآیندهای کلیدی در درک تکامل بخش میانی کمر بند آلپ-همالیا به شمار می‌رود. تکامل سامانه‌های رسوبی-ساختاری کمر بندهای کوهستانی زاگرس، البرز، تالش، قفقاز بزرگ و کوچک و حوضه‌های رسوب‌گذاری خزر جنوبی، کورا و ایران مرکزی در پیوند با این رخداد مهم بوده است. این فرآیند علاوه بر تغییرات ساختاری و زمین‌ساختی چشمگیر در مقیاس ناحیه‌ای، تحول بنیادی در الگوهای رسوب‌گذاری و تکامل حوضه‌های پشت کمانی و پیش بوم ایجاد کرده است. این حوضه‌ها به‌عنوان آرشیوهای رسوبی حساس، توالی‌های ضخیم و متنوع رسوبی را حفظ کرده‌اند که گذار تدریجی از شرایط فرورانش به برخورد قاره‌ای و وقایع ژئودینامیکی رخ داده را آشکار می‌سازند. از برجسته‌ترین شاخص‌های این گذار، ثبت سطوح ناپیوستگی در توالی‌های چین‌شده است. این ناپیوستگی‌ها، بازتاب فرآیندهایی چون بال‌آمدگی‌های دوره‌ای، تغییرات ناگهانی در رژیم‌های رسوبی، تغییرات نرخ رسوب‌گذاری، ورود حجم عظیم رسوبات آواری و وقفه‌های کوتاه یا بلندمدت در رسوب‌گذاری هستند. شواهد متعدد و بررسی‌های انجام‌شده در کمر بندهای زاگرس، البرز، تالش و قفقاز نشان می‌دهد که زمان‌بندی و ویژگی‌های این ناپیوستگی‌ها ناهمگام بوده و وابستگی مستقیمی به پویایی محلی هر بخش از کمر بند دارد. در حوضه‌ی مغان و خزر جنوبی نیز گذار از رسوبات عمیق دریایی به واحدهای دلتایی و قاره‌ای، همراه با افزایش چشمگیر نرخ رسوب‌گذاری است و ظهور ناپیوستگی‌های منطقه‌ای، گواهی بر آغاز فاز برخوردی و کوهزایی مرتبط با آن است. تطابق ناپیوستگی‌ها در پهنه‌های ساختاری-رسوبی نشان می‌دهد که اگرچه زمان‌بندی دقیق رویدادها ممکن است کمی متفاوت باشد، یک الگوی کلی از تشدید تدریجی کوهزایی از ائوسن-الیگوسن به سمت میوسن میانی و سپس اوج آن در پلیوسن-کواترنری در تمامی این کمر بندهای کوهزایی مرتبط با بسته شدن اقیانوس نئوتتیس مشهود است.
واژه‌های کلیدی: برخورد عربستان-اوراسیا، حوضه‌های پیش بوم و پشت کمانی، ناپیوستگی‌های چین‌شده، کمر بند کوهزایی.	



(Okay and Tüysüz, 1999; Allen et al., 2002; Jackson et al., 2002; Brunet et al., 2003; Agard et al., 2011; Koshnaw et al., 2024) (شکل ۱).

از ویژگی‌های کلیدی رخداد همگرایی بین قاره‌ای، توسعه حوضه‌های پشت‌کمانی و فعالیت ماگمایی مرتبط با آن‌هاست که می‌توانند ابزار کلیدی برای بازسازی مراحل تکامل تکتونیکی، شناسایی فازهای اصلی در طول برخورد عربستان-اوراسیا باشند. این حوضه‌ها معمولاً در اثر تغییرات دینامیک صفحه فرورانش یا رول‌بک ایجاد می‌شوند و با فرونشست سریع، نرخ بالای رسوب‌گذاری و فعالیت‌های آتشفشانی شناخته می‌شوند (Magni et al., 2014; Verdel et al., 2011). در بخش مرکزی پهنه همگرایی عربستان-اوراسیا، حوضه‌ی خزر جنوبی، البرز، ایران مرکزی، حوضه مغان، قفقاز و حوضه

مقدمه

منطقه برخورد قاره‌ای عربستان-اوراسیا یکی از بزرگ‌ترین و فعال‌ترین مناطق برخوردی زمین و مهم‌ترین رویداد زمین‌ساختی بخش میانی کوهزاد آلپ-همالیا به شمار می‌رود. این بخش از کوهزاد از پیچیده‌ترین سامانه‌های فعال زمین‌ساختی کنونی است که تکامل آن از اوایل سنوزوئیک تاکنون شکل گرفته است (Sengör and Natal'in, 1996; Allen et al., 2011; Hatzfeld and Molnar, 2010; Rolland, 2017). شکل‌گیری ساختارهای چین‌خورده و رانده شده نظیر زاگرس، البرز، ایران مرکزی، کپه داغ، تالش، قفقاز بزرگ و کوچک، بخش‌هایی از ترکیه و حوضه رسوبی دریای خزر و پیرامون محصول برخورد در حوضه‌های پیش بوم و پشت‌کمانی پیشین و کنونی به شمار می‌روند

DOI 10.22034/kjes.2026.11697

*نویسنده مسئول: مهناز رضائیان m.rezaeian@iasbs.ac.ir

استناد به این مقاله: مردانی حویق، ا.، رضائیان، م.، حیدرزاده، ک.، رو، ی. (۱۴۰۵). برخورد شبه همزمان صفحه‌ی عربستان-اوراسیا: با تأکید بر شواهد زمین‌شناسی از بقایای حوضه‌های پیش بوم و پشت کمانی. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۱۲، شماره ۱، صفحه ۱۲۸ تا ۱۴۷. <http://doi.org/10.22034/kjes.2026.11697>



پسابرخوردی، شاخص مهم گذار از فاز پشت کمانی به فاز برخوردی است (Stern and Johnson, 2010; Robertson, 2000; Chiu et al., 2013). ظهور و زوال اقیانوس نئوتتیس از پالئوزوئیک پایانی تا اوایل سنوزوئیک ثبت کننده شواهد ماگمایی مرتبط با گسترش پوسته اقیانوسی، فروانش و برخورد است. ماگماتیسم کرتاسه-پالئوژن مرتبط با فروانش نئوتتیس به زیر خردقاره ایران مشابه رویدادهای ژئودینامیکی در سایر بخش‌های جنوبی اوراسیا است و وقایع زمان الیگوس-میوسن را مرتبط با برخورد معرفی می‌کند (Sepahi et al., 2024; Shafaii Moghadam et al., 2020). در ائوسن (۵۶ تا ۳۴ میلیون سال پیش)، فعالیت آتشفشانی گسترده‌ای در مناطق مختلف ایران از جمله البرز رخ داده که دوره‌ای از کشش پشت کمانی مرتبط با فروانش لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس را ثبت کرده است (Alavi, 1996; Zanchi et al., 2006). در البرز و تالش، این تغییر در توالی‌های آتشفشانی ائوسن تا میوسن مشاهده می‌شود که در ابتدا همراه با فعالیت آتشفشانی پشت کمانی بوده که با تداوم برخورد رو به افول گذاشته است (Verdel et al., 2007; Ballato et al., 2011; Verdel et al., 2011; Rolland, 2017).

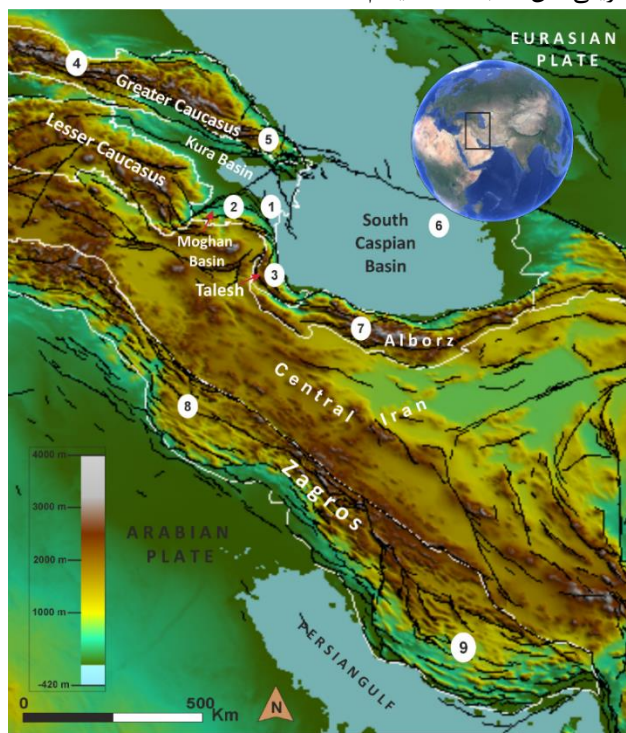
کورا نمونه‌های بارز حوضه‌های پشت کمانی هستند (شکل ۱). یکی از نکات مهم در این سامانه ژئودینامیکی، شواهد ثبت شده از ناهمزمانی برخورد در بخش‌های مختلف و نحوه تکامل فرآیندهای برخورد است. به عنوان مثال، داده‌های زمین‌شناسی نشان می‌دهند که در شرق و جنوب شرق ترکیه برخورد پیش از البرز آغاز شده است (Okay and Tüysüz, 1999; Darin and Umhoefer, 2022; Robertson and Parlak, 2025).

دوره‌های فعالیت ماگمایی سنوزوئیک در فلات ایران از دیگر ویژگی‌های بارز برخورد است که بازتاب زمان وقایع ژئودینامیکی فروانش-برخورد-پسابرخورد است (Asiabanha and Foden, 2012; Delavari et al., 2020).

پس از آنکه بربریان و کینگ (Berberian and King, 1981) ماگماتیسم کمربند ارومیه-دختر را از نوع کمان حاشیه قاره‌ای حاصل از فروانش پوسته اقیانوس نئوتتیس به زیر ایران مرکزی معرفی کردند، ماگماتیسم حوضه‌های شمال کمان ارومیه-دختر در ایران مرکزی و البرز به عنوان محصول کشش در حوضه پشت کمانی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت.

(Ghasemi et al., 2016; Asiabanha and Foden, 2012). توقف یا

کاهش فعالیت‌های ماگمایی کمانی و جایگزینی آن‌ها با ماگماتیسم



شکل ۱- نقشه توپوگرافی برجسته منطقه میانی کمربند آلپ-همالیا در پهنه برخورد عربی-اوراسیا. خط چین سفید مرز پهنه‌های تکتونواستراتیگرافی (Huber, 1977) را نشان می‌دهد. خطوط سیاه گسل‌های اصلی بخش میانی برخورد است (Zelenin et al., 2021). دایره‌های سفید رنگ ستون‌های چینه پهنه تکتونواستراتیگرافی مرتبط در شکل ۹ است.

Fig. 1. Relief map of the middle region of the Alpine-Himalayan belt on the Arabian-Eurasian collision zone. White and black lines correspond to tectono-stratigraphic borders (after Huber, 1977) and faults (Zelenin et al., 2021), respectively. The white circles indicate the positions of the stratigraphic columns in Figure 9

زاگرس

سن فعالیت ماگمایی و ناپیوستگی‌های ثبت شده در ستون چینه‌شناسی حاوی اطلاعات مهمی درباره فازهای تکتونیکی، مراحل رانده‌شدگی و بالآمدگی، تغییر ناگهانی در رژیم رسوب‌گذاری، تکامل حوضه رسوبی و شواهد ناهماهنگی زمان‌بندی برخورد هستند. چنانچه این شاخص‌های زمانی با داده‌های سن‌سنجی راستی آزمایی شوند، می‌توانند برای تعیین دقیق مرزهای زمانی آغاز و اوج و بازسازی تکامل تکتونیکی کمربندهای کوهزایی مورد استفاده قرار گیرند. در این پژوهش با بررسی داده‌های چینه‌شناسی بخش‌های مختلف پهنه برخورد شامل حوضه خزر جنوبی، مغان، قفقاز، تالش، البرز و زاگرس، اعتبارسنجی سطوح ناپیوستگی ثبت شده با استناد به نتایج مطالعات سن‌سنجی ایزوتوپی مطلق و حرارتی و با تأکید بر تعیین زمان برخورد در حوضه مغان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

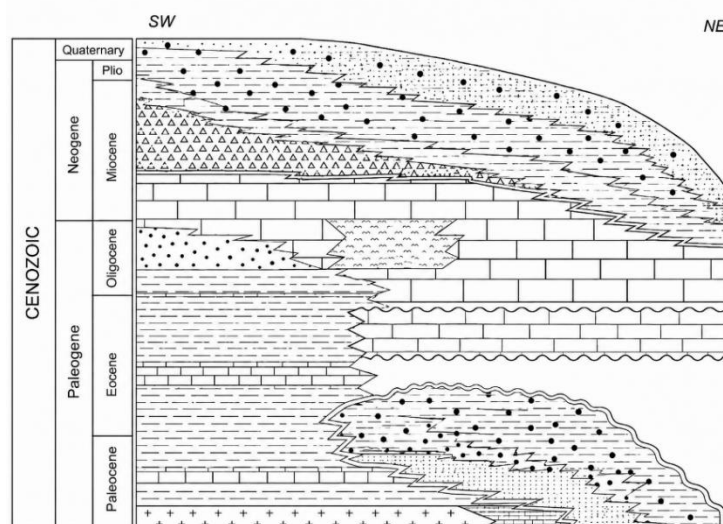


Fig. 2. Compiled stratigraphic column of Zagros in Cenozoic ([Hessami et al., 2001](#); [Madanipour et al., 2024](#))

البرز، نماینده ماگماتیسیم حوضه پشت کمان نئوتتیس در ایران مرکزی در نظر گرفته می‌شود (Ahmadvand et al., 2021). زمان‌بندی برخورد اولیه و اثرات آن بر الگوی رسوب‌گذاری و دگرشکلی در البرز همچنان مورد بحث است (Guest et al., 2006; Ballato et al., 2011; Rezaeian et al., 2012). ستون چینه‌شناسی سنوزوئیک البرز شاهد چندین ناپیوستگی اصلی است که تاریخچه پیچیده برخورد و ماهیت دوره‌ای مرتبط با مراحل مختلف بسته شدن اقیانوس نئوتتیس و برخورد قاره‌ای را ثبت کرده‌اند (شکل ۳). یک دگرشیبی فرسایشی در قاعده توالی سنوزوئیک ممکن است با تغییر شکل فشاری در سراسر شمال ایران مرتبط باشد. این دگرشیبی در امتداد کمربند چین‌خورده البرز-تالش امتداد دارد و احتمالاً با یک مرحله فشاری کرتاسه پسین - پالئوسن در البرز-ایران مرکزی مرتبط است (Berberian and King, 1981). بر اساس شواهد چینه‌شناسی می‌توان تاریخچه برخاستگی سنوزوئیک البرز را در سه فاز اصلی معرفی کرد: (۱) فاز آغازین ائوسن پایانی-الیگوسن، (۲) فاز میانی میوسن میانی و (۳) فاز نهایی که از پلیوسن آغاز شده و تا به امروز ادامه دارد (Rezaeian et al., 2012).

فاز ائوسن-الیگوسن هم‌زمان با برخورد اولیه عربستان با اوراسیا و به احتمال زیاد ناشی از تغییر در دینامیک برخورد عربستان-اوراسیا است (Guest et al., 2006; Rezaeian et al., 2012).

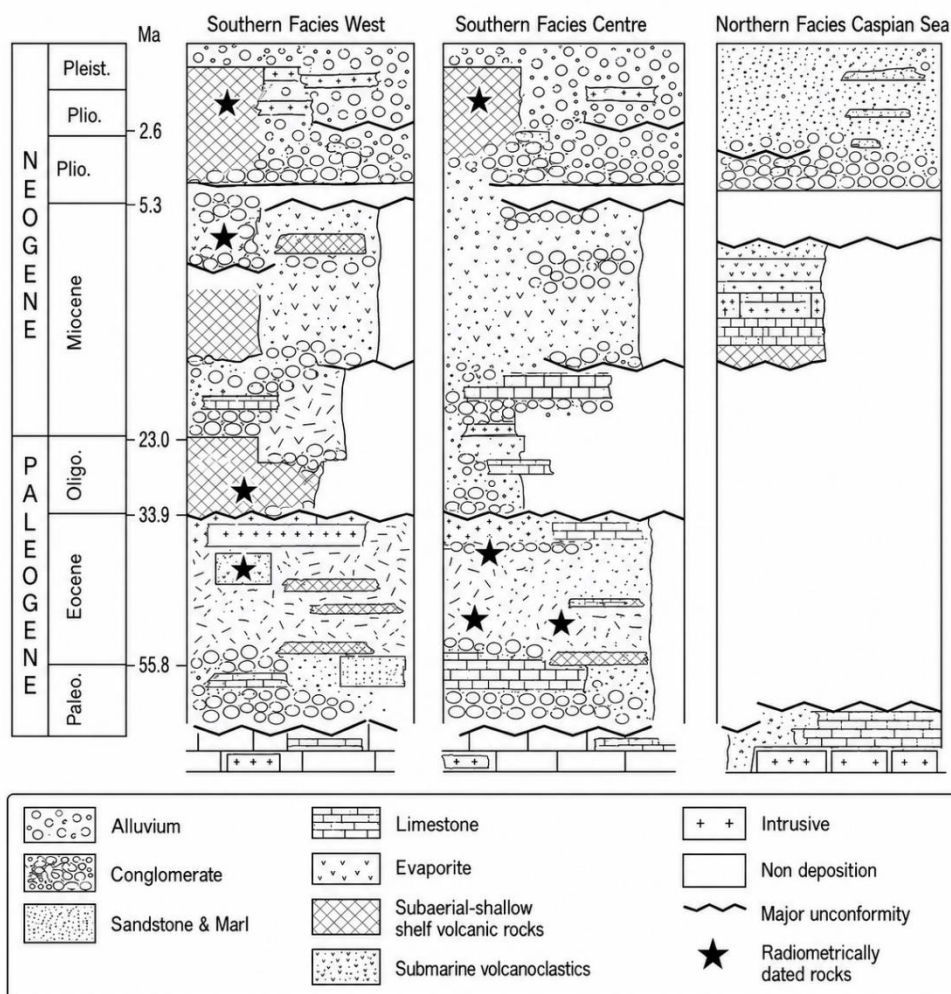
ناپیوستگی مهم میوسن میانی (حدود ۱۷ میلیون سال پیش) در البرز با سازند قرمز زیرین ثبت شده که نشان‌دهنده تشدید فعالیت‌های کوهزایی است (Rezaeian, 2009). بازآرایی تکتونیکی مهم در طول میوسن میانی و پلیوسن با تشکیل حوضه پیش‌کمانی در امتداد یال جنوبی البرز و گذار از رسوب‌گذاری کششی به دگرشکلی فشاری، نمایان‌شدگی (exhumation) شتاب‌دار و نهشته‌گذاری کنگلومراهای هم‌زمان با کوهزایی ثبت شده است (Rezaeian et al., 2006; Guest et al., 2012; al., 2012). ستون چینه‌شناسی البرز (Rezaeian et al., 2012) در شکل ۳ و شکل ۹ ستون ۷ ارائه شده است.

تاریخچه تکامل زاگرس شامل سه بازه زمانی اصلی است: کرتاسه میانی تا پسین (۸۵-۱۱۵ میلیون سال پیش)، پالئوسن-ائوسن (۶۰-۴۰ میلیون سال پیش) و از الیگوسن پسین تا امروز (5 ± 30 میلیون سال پیش تاکنون) (Agard et al., 2005; Agard et al., 2011; Mouthereau et al., 2012). بر اساس مطالعات کوشنو و همکاران (Koshnaw et al., 2024, 2019)، بازه‌های زمانی الیگوسن پسین-میوسن میانی و پلیوسن-کواترنر جوان‌ترین فازهای تکامل حوضه پیش بوم زاگرس هستند.

ناپیوستگی‌های سنوزوئیک زاگرس تاریخچه پیش‌رونده برخورد صفحه عربستان و ایران، دوره‌های کوهزایی و دوره‌های فرسایش ناشی از این برخورد را ثبت کرده‌اند که نشانگر انتشار دگرشکلی از شمال غرب پهنا چین‌خورده به جنوب شرق است (شکل ۲) (Madanipour et al., 2024; Farahpour and Hessami, 2012; Hessami et al., 2001). علاوه بر ناپیوستگی کرتاسه پسین-پالئوسن (معادل کوهزایی لارامید)، ناپیوستگی مهم الیگوسن-ائوسن، در قاعده سری‌های کربناتی الیگوسن در برخی از نواحی زاگرس، با رویدادهای تکتونیکی مرتبط با بسته شدن نهایی اقیانوس نئوتتیس و مهیا شدن شرایط برای برخورد قاره‌ای معرفی شده است. ناپیوستگی‌های مهم میوسن به دلیل ثبت شروع اولین دوره‌های کوهزایی در زاگرس، ایجاد توپوگرافی و تغییر الگوی رسوب‌گذاری در حوضه پیش بوم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Emami et al., 2010). واضح‌ترین ناپیوستگی که گسترده‌ترین شاهد تداوم برخورد در زاگرس است، ناپیوستگی زاویه‌دار در قاعده سازند بختیاری در میوسن پسین-پلیوسن است که کنگلومراهای این سازند را بر روی سازندهای قدیمی‌تر قرار می‌دهد (Hessami et al., 2001; Sherkati et al., 2006). ستون چینه‌شناسی زاگرس در شکل ۲ و شکل ۹ (ستون ۸ و ۹) ارائه شده است.

البرز

کوهزاد البرز در حاشیه جنوبی خزر، نمود برخورد عربستان-اوراسیا در مجاورت بلوک صلب خزر جنوبی است. مجموعه سازندهای پالئوسن-ائوسن



شکل ۳- ستون چینه‌شناسی البرز (Rezaeian et al., 2012)

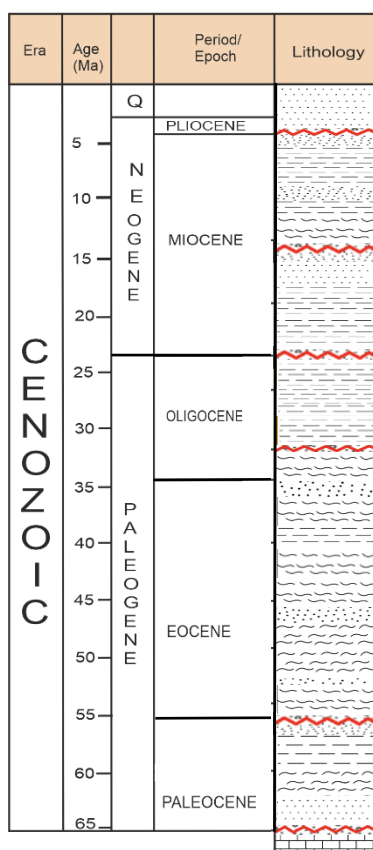
Fig. 3. Alborz stratigraphic column (Rezaeian et al., 2012)

اؤسن، در بسیاری از حوضه‌های پیرامون قفقاز ثبت شده است. سازندهای اؤسن اغلب به صورت ناپیوستگی بر روی واحدهای پالئوسن یا قدیمی‌تر قرار می‌گیرند (Khain, 1975). این ناپیوستگی با یک رویداد تکتونیکی مهم در پایان کرتاسه و آغاز پالئوژن هماهنگی دارد و منجر به تغییر شکل‌های گسترده و ایجاد توپوگرافی در منطقه قفقاز شده است (Philip et al., 1989).

قفقاز

بررسی شرایط زمین‌شناسی و ساختاری منطقه قفقاز مستلزم تقسیم‌بندی به سه پهنه مجزای قفقاز بزرگ و کوچک و حوضه کورا است. قرارگیری حوضه پشت کمانی پالئوزوئیک-مزوزوئیک قفقاز بزرگ در پهنه همگرایی صفحات عربی-اوراسیا منجر به رشد این کوهزاد با روند موازی زاگرس و طول بیش از ۱۱۰۰ کیلومتر در سنوزوئیک شده است (Adamia et al., 2011).

ناپیوستگی‌های ستون چینه‌شناسی قفقاز بزرگ (شکل ۴) حاکی از یک تاریخچه کوهزایی تدریجی و چندمرحله‌ای هستند. ناپیوستگی پالئوسن -



شکل ۴- ستون چینه‌شناسی تلفیقی جنوب شرق قفقاز بزرگ (Tye et al., 2022)

Fig. 4. Compiled stratigraphic column of SE Great Caucasus (Tye et al., 2022)

خود جای داده و هندسه تغییر شکل آن عمدتاً توسط ساختارهای ضخیم پوسته (Thick-skin) کنترل می‌شود (Nemčok et al., 2013; Forte et al., 2016).

تحت تأثیر تنش فشاری ایجاد شده مرتبط با فروانش و سپس برخورد صفحه عربستان-اوراسیا، مرحله اول کوتاه‌شدگی در طول ائوسن بالایی-الیگوسن و برخاستگی همزمان با فرسایش قفقاز بزرگ در الیگوسن صورت گرفت (Adamia et al., 1997; Golonka, 2000; Popov et al., 2010; Nemčok et al., 2013). مرحله دوم کوتاه‌شدگی در میوسن میانی (سارماسین) همراه برخورد آغازین عربستان با اوراسیا است که منجر به توسعه کمربند چین‌خورده و راندگی قفقاز شد (Popov et al., 2004; Sainot et al., 2006). برخورد نهایی و تشکیل ساختار کوهستانی درون‌قاره‌ای امروزی قفقاز در دوره نئوژن-کواترنری رخ داد (Adamia et al., 2011). همچنین، توسعه رشته‌کوه‌های قفقاز شرقی در ۱۰ الی ۵ میلیون سال اخیر سرعت گرفت (Avdeev and Niemi, 2011). ستون چینه‌شناسی قفقاز بزرگ بر اساس

قفقاز کوچک با پیچیدگی قابل توجهی که ناشی از ماگماتیسم درون پهنه‌های ساختاری متنوع از نظر زمان آغاز و تاریخچه تکامل تکتونیکی است، مشخص می‌شود (Alizadeh et al., 2016) و به دلیل موقعیت تکتونیکی که در بخش میانی برخورد قاره‌ای و بین بلوک‌های اصلی (عربستان و اوراسیا) و بلوک‌های فراری ثانویه (ایران مرکزی و آناتولی) محصور شده تحت کوتاه‌شدگی شدیدی قرار دارد (Avagyan et al., 2005).

حوضه کورا، یک سامانه پیش بوم با روند شمال غربی-جنوب شرقی است که پی‌سنگ آن ادامه غربی پوسته اقیانوسی حوضه خزر جنوبی تفسیر می‌شود و از دریای سیاه تا دریای خزر گسترش یافته از شمال شرق به کوهزاد قفقاز بزرگ و از جنوب غرب به قفقاز کوچک محدود می‌شود (Zonenshain and Le Pichon, 1986; Adamia et al., 2010; Adamia et al., 2011; Nemčok et al., 2013). تخمین اولیه کوتاه‌شدگی نشان دهنده آن است که کورا در بخش مرکزی پهنه برخوردی، با کوتاه‌شدگی ۲۵ کیلومتر، حدوداً ۳۰ تا ۴۰ درصد از کل همگرایی عربستان-اوراسیا را در ۵ میلیون سال پیش در

کمبرندهای چین‌خورده -رانده کمانی شامل کوه‌های تالش، البرز و کپه‌داغ احاطه شده است (Berberian, 1982; Priestley et al., 1994; Jackson et al., 2002; Brunet et al., 2003; Kaz'Min and Verzhbitskii, 2011; Axen et al., 2001).

وینسنت و همکاران (Vincent et al., 2016) در شکل ۹ (ستون ۴ و ۵) ارائه شده است.

حوضه خزر جنوبی

حوضه خزر جنوبی، یکی از ضخیم‌ترین توالی‌های رسوبی و یک بلوک نسبتاً پایدار با تغییر شکل جزئی و بی‌لرزه در کمربند آلپ-همالیا است که توسط

Time		Seismic complex	Western part		Central part		Eastern part	
			Lithology	Thickness (km)	Lithology	Thickness (km)	Lithology	Thickness (km)
1.75	Quaternary (Q)	SSC-10		1-2		2		0-2
5.3	Pliocene (N ₂)	SSC-9		0.4-0.6		2		0.5-2
	lower (N ₂ ¹)	SSC-8		6-6.5		7-8		0.1-4.5
23.0	Miocene (N ₁)	SSC-7		2		2-3		0-2.5
	upper (N ₁ ³)	SSC-6						
	middle (N ₁ ²)	SSC-5		3		2-3		2
33.7	Oligocene (Pg ₃)							
53	Eocene (Pg ₂)	SSC-3		2		1.5-2		1
	Paleocene (Pg ₁)							
65								



terrigenous,
mainly clay



terrigenous,
mainly sand



carbonates



unconformity

شکل ۵- ستون چینه‌شناسی حوضه خزر جنوبی (Brunet et al., 2003)

Fig. 5. South Caspian stratigraphic column (Brunet et al., 2003)

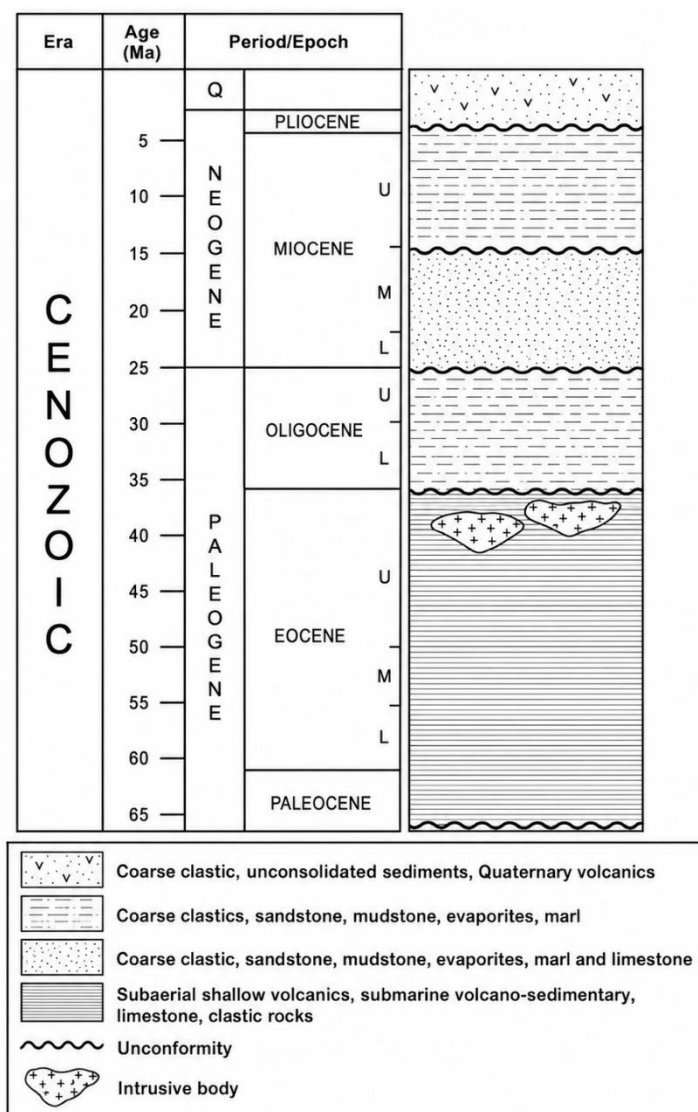
است (Brunet et al., 2003). این تغییر با تشکیل سطوح ناپیوستگی و افزایش شدید نرخ رسوب‌گذاری همراه بود که مستقیماً با بارگذاری تکتونیکی ناشی از بالآمدگی رشته‌کوه‌های البرز و قفقاز در حاشیه حوضه مرتبط است (Allen et al., 2002). ناپیوستگی مهم دیگر در میوسن میانی است که منجر به تشکیل یک سطح فرسایشی وسیع و رسوب‌گذاری سکانس‌های تخریبی در حوضه شده است. ستون چینه‌شناسی حوضه خزر جنوبی بر اساس مطالعه برون و همکاران (Brunet et al., 2003) در شکل ۹، ستون ۶ ارائه شده است.

تالش

رسوبات پرکننده حوضه خزر جنوبی از کوهزادهای قفقاز، البرز و کپه‌داغ و همچنین از پلتفرم روسیه تأمین شده‌اند (Brunet et al., 2003). ستون چینه‌شناسی سنوزوئیک حوضه خزر جنوبی، به‌عنوان یک حوضه پیش بومی در برابر کمربندهای کوهزایی البرز و قفقاز، اطلاعاتی غنی از ناپیوستگی‌ها را در خود ثبت کرده است. برون و همکاران (Brunet et al., 2003) چندین ناپیوستگی اصلی را شناسایی کرده‌اند که همگی با رویدادهای کوهزایی در حاشیه حوضه همزمان هستند. ناپیوستگی عمده در الیگوسن پیشین رخ داده که نشان‌دهنده مرحله اولیه بالآمدگی در حاشیه حوضه در پاسخ به فاز کوهزایی است (شکل ۵). در الیگوسن پسین-میوسن پیشین، الگوی فرونشست در حوضه خزر جنوبی کاملاً تغییر کرده و به یک حوضه پیش بومی تبدیل شده

است که محصول کشش در حوضه پشت کمان ایران مرکزی به شمار می‌رود (Vincent et al., 2005; Amani et al., 2024).

کمربند کوهستانی تالش در جنوب شرقی جمهوری آذربایجان و شمال غرب ایران قرار دارد و یک کمربند چین‌خوردگی-رورانه است که آن را ادامه

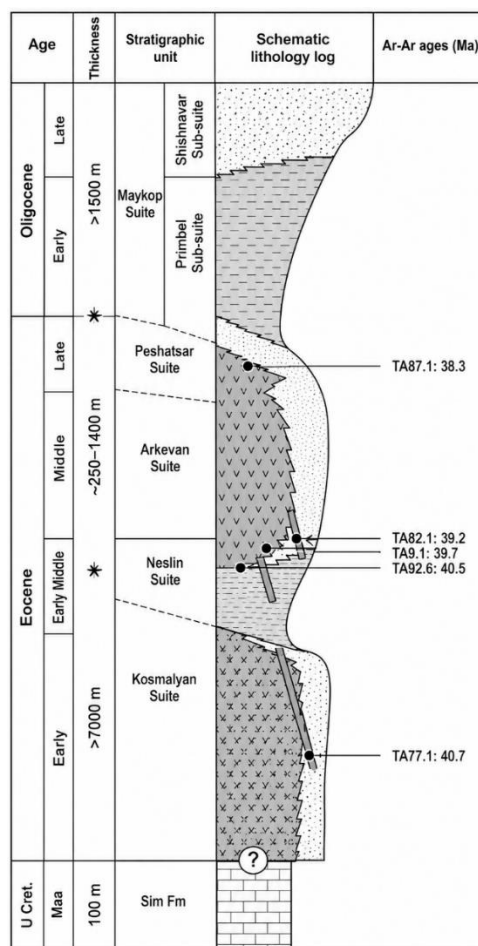


اکثر مؤلفان کوه‌های تالش را متشکل از دو قوس ساختاری جنوبی و شمالی که توسط یک بخش مرکزی با روند شمالی-جنوبی به هم متصل شده‌اند معرفی می‌کنند (Madanipour et al., 2013; Alizadeh et al., 2016).

جنوب شرقی چین‌خوردگی‌های قفقاز کوچک در نظر می‌گیرند. نوارهای ماگمایی کرتاسه و پالئوسن-ائوسن در تالش ادامه کمربند ماگمایی البرز غربی

شکل ۶- ستون چین‌شناسی تلفیقی تالش ایران (Madanipour et al., 2013)

Fig. 6. Compiled stratigraphy column for Iranian Talesh (Madanipour et al., 2013)



شکل ۷- ستون چین‌شناسی تالش آذربایجان همراه با نمونه‌های سن سنجی ایزوتوپ آرگون/آرگون (Vincent et al., 2005)

Fig. 7. Azerbaijani Tالش stratigraphy column including Ar/Ar dated samples (Vincent et al., 2005)

ناپیوستگی کوتاهه پسین-پالئوسن، از مهم‌ترین و کلیدی‌ترین ناپیوستگی در منطقه تالش است که به وضوح نشان می‌دهد یک رویداد کوهزایی مهم در پایان کرتاسه رخ داده و منجر به تغییر شکل، بالاآمدگی و فرسایش گسترده شده است (Berberian and King, 1981). ناپیوستگی اصلی در ائو-الیگوسن نشان‌دهنده آغاز فرآیندهای برخوردی بین ایران و اوراسیا در ائوسن پسین-الیگوسن پیشین است (Verdel et al., 2011). ناپیوستگی مهم دیگر تالش در میوسن میانی است و شواهد واضحی از تشدید کوهزایی در این منطقه ارائه می‌دهد. این رویداد نشان‌دهنده اوج گیری فرآیندهای برخوردی میوسن میانی در منطقه تالش است (Allen et al., 2003).

حوضه مغان

حوضه مغان در شمال غرب ایران، حوضه پشت کمانی ائوسن در حاشیه جنوبی پارانتیس شرقی و لبه شمالی پهنه برخوردی اوراسیا-عربستان قلمداد می‌شود که هم اکنون حوضه پیش بوم در منطقه انتقالی از کوهزاد البرز و

مؤلفین دیگر مرزهای کوهستان تالش را در ادامه البرز به قوس جنوبی و بخش میانی در مجاورت ایران مرکزی و قوس شمالی و محدوده بین گسل تالش و ارس را به عنوان گستره مغان معرفی می‌کنند. مغان بخشی از حوضه کورا و پارانتیس شرقی است و دارای تاریخچه زمین‌شناسی، تکتونیک، جغرافیایی دیرینه و ژئودینامیکی متفاوت از تالش و ایران مرکزی است (IFP, 1961; Nabavi, 1976; Huber, 1977; Berberian and Arshadi, 1976; Amini, 2006; Lukoil, 2007).

ناپیوستگی‌های سنوزوئیک در منطقه تالش نشان می‌دهند که منطقه تالش تحت تأثیر چندین مرحله کوتاه‌مدت کوهزایی در سنوزوئیک قرار گرفته است. ستون چین‌شناسی کوهستان تالش (آذربایجان) (شکل ۷) بر اساس مطالعه وینسنت و همکاران (Vincent et al., 2005) و ستون چین‌شناسی کوهستان تالش (ایران) (شکل ۶) بر اساس مطالعه معدنی پور و همکاران (Madanipour et al., 2013) در شکل ۹ (ستون ۱ و ۳) ارائه شده است.

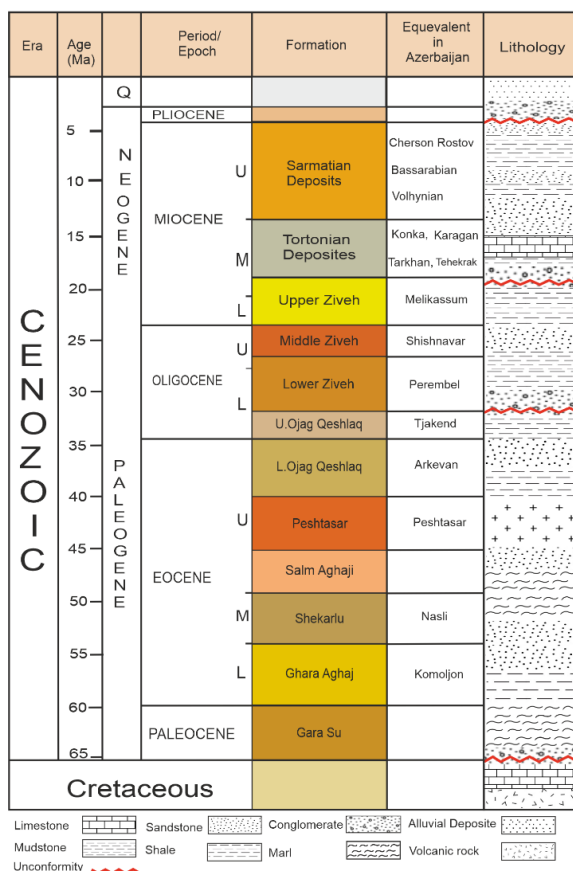
قرار گرفته است. شروع گسترش حوضه همراه با فوران آتشفشان بازالت پشتاسر در ائوسن میانی در نظر گرفته شده است. بازالت پشتاسر (E_{3b})، جوان‌ترین واحد ولکانیکی پالئوژن در تالش و معادل زمان اوج کشش حوضه است (Vincent et al., 2005). سازند اجاق قشلاق (E₄)، معادل Arkevan آذربایجان (IFP, 1961) است و سن ائوسن فوقانی تا الیگوسن دارد و بر روی بازالت پشتاسر رسوب‌گذاری کرده است (Amini, 2006).

سازند زیوه معادل سری میکوپ (Maikop) در تالش آذربایجان (IFP, 1961; Lukoil, 2007) با ناپیوستگی هم‌شیب و گاهی دگرشیب روی نهشته‌های ائوسن قرار دارد. نهشته‌های منسوب به اشکوب تورتونین (میوسن میانی) به نام سازند تورتونین نامیده می‌شوند (IFP, 1961). به مجموعه نهشته‌های مربوط به اشکوب سارماسین (میوسن پسین)، سازند سارماسین گفته می‌شود. تغییر رژیم تکتونیکی کششی ائوسن به فشارشی در انتهای میوسن میانی، منجر به عدم امکان رسوب‌گذاری در حوضه مغان و ناپیوستگی زاویه‌دار در میوسن فوقانی - پلیوسن زیرین شد (Amini, 2006).

منطقه تالش به کمر بند کوهزایی قفقاز است. حوضه مغان به عنوان حوضه پشت کمانی پهنه فرورانش نئوتتیس، گنجینه‌ای ارزشمند از تاریخچه تکتونیکی مرتبط با برخورد بین صفحه عربستان و اوراسیا را در خود ضبط کرده است. تکامل حوضه و شکل کنونی آن در طول سنوزوئیک و طی وقایع تکتونیکی متعدد رخ داد (شکل ۸).

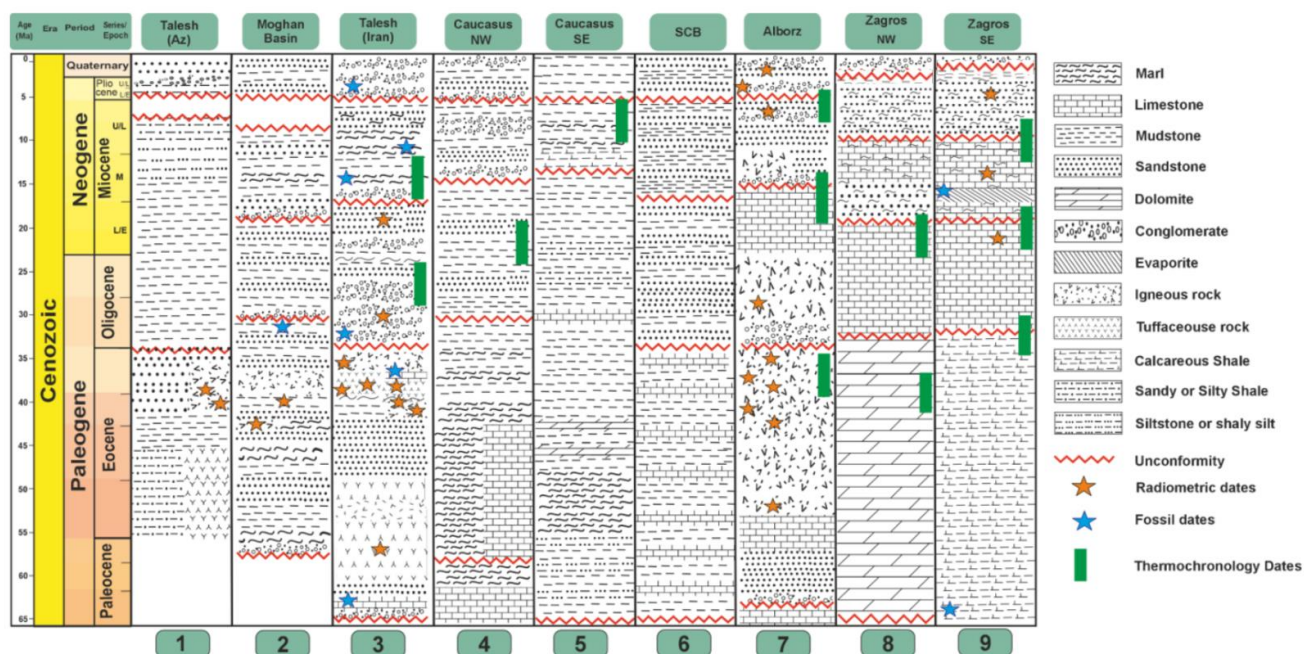
سازند قره‌سو (E₀) با گسترش محدود، موقعیت چینه‌شناسی معادل سازند آستارا در آذربایجان است (Lukoil, 2007) و روی واحدهای کرتاسه تشکیل شده و به صورت ناپیوسته با سازند قره‌آغاج (ائوسن زیرین تا ائوسن میانی) پوشیده می‌شود (IFP, 1961).

سازند قره‌آغاج (E₁)، معادل سازند (Komolion) در آذربایجان است (Lukoil, 2007). در بعضی بخش‌ها که سازند قره‌سو تشکیل نشده با ناپیوستگی واحدهای کرتاسه را می‌پوشاند. حد بالایی آن سازند شکرلو (E₂)، معادل سازند نسلی (Nasli) در تالش آذربایجان است (Lukoil, 2007). سازند سلم‌آغاجی (E₃) به واسطه وجود یک لایه ماسه‌سنگ درشت‌دانه روی شکرلو



شکل ۸- ستون چینه‌شناسی تلفیقی حوضه مغان (IFP, 1961; Lukoil, 2007)

Fig. 8. Compiled stratigraphy column of Moghan basin (IFP, 1961; Lukoil, 2007)



شکل ۹- ستون چینه‌شناسی حوضه‌های پشت کمانی و پیش بوم پیشین و کنونی واقع در بخش میانی منطقه برخوردی عربستان-اوراسیا. موقعیت ستون‌ها در شکل ۱ مشخص شده است. اطلاعات مندرج در ستون چینه‌شناسی شامل اطلاعات چینه‌شناسی، ناپیوستگی، سن سنجی مطلق و سن سنجی حرارتی در تالش آذربایجان (Vincent et al., 2005; Alizadeh et al., 2016)، حوضه مغان (Alizadeh et al., 2016)، تالش ایران (Madanipour et al., 2013)، شمال غربی قفقاز (Vincent et al., 2011; Vincent et al., 2016)، قفقاز جنوب شرقی (Tye et al., 2022; Aghayeva et al., 2023; Avdeev and Niemi, 2011)، حوضه خزر جنوبی (Brunet et al., 2003)، البرز (Berberian and King, 1981; Rezaeian et al., 2012)، شمال غرب زاگرس (Homke et al., 2009) و جنوب شرق زاگرس (Hessami et al., 2001; Gholami Zadeh et al., 2017; François et al., 2014; Gavillot et al., 2010) است.

Fig. 9. Stratigraphic columns of the back arc and foreland basins located in the central part of the Arabia-Eurasia collision zone. The information presented in the stratigraphic columns includes stratigraphic data, unconformities, geochronology ages (radiometric and thermochronological ages) in the Talesh region of Azerbaijan (Vincent et al., 2005; Alizadeh et al., 2016), Moghan basin (IFP, 1961; Amini, 2006; Lukoil, 2007; Alizadeh Noudé et al., 2025), Talesh region of Iran (Madanipour et al., 2013), NW Caucasus (Vincent et al., 2011; Vincent et al., 2016), SE Caucasus (Avdeev and Niemi 2011; Tye et al., 2022; Aghayeva et al., 2023), South Caspian Basin (Brunet et al., 2003), Alborz (Rezaeian et al., 2012), NW Zagros (Homke et al., 2009; Berberian and King, 1981; Madanipour et al., 2024), SE Zagros (Gavillot et al., 2010; Hessami et al., 2001; Gholami Zadeh et al., 2017; François et al., 2014)

سطوح ناپیوستگی در پیوند با داده‌های سن سنجی مذکور کلید رمزگشایی تاریخچه پویا و پیچیده تکتونیکی کمربند البرز به شمار می‌رود. ناپیوستگی‌های سنوزوئیک در البرز چند مرحله‌ای و منطقه‌ای بوده و ناپیوستگی اصلی بین واحد ولکانیکی - رسوبی ائوسن (سازند کرج) و توالی‌های الیگوسن، ناپیوستگی میوسن میانی و پلیوسن زیرین مشاهده شده است که بیانگر گذار از یک محیط پشت کمانی به شرایط برخوردی است (Rezaeian, 2009; Ballato et al., 2011). همزمانی فازهای نامبرده با ناپیوستگی‌های گزارش شده در البرز و همچنین نواحی تالش و خزر مشهود است.

محدودیت دسترسی به کانی‌های سنگین مورد نیاز سن سنجی حرارتی در زاگرس موجب کمبود اطلاعات مرتبط شده است. این مطالعات بیانگر رشد کوهزاد در بازه‌های زمانی حدود ۸-۱۲ میلیون سال پیش (Gavillot et al., 2010)، ۱۷ میلیون سال پیش (François et al., 2014) و حدود ۲۲ و ۳۸ میلیون سال پیش (Homke et al., 2009) است. همزمانی رخدادهای میوسن و ائو-الیگوسن با ناپیوستگی‌های مناطق مجاور از جمله البرز و حوضه خزر جنوبی و تالش مشهود است.

داده‌های جدید سن سنجی U-Pb روی زیرکن‌های آواری نشان می‌دهد که تغییر منشأ رسوبی از صفحه عربستان به بلوک ایران مرکزی در حدود ۲۵ میلیون سال پیش (مرز الیگوسن-میوسن) رخ داده که نشان‌دهنده آغاز تغییر شکل‌های اصلی در زاگرس است (Emami et al., 2010). با بکارگیری روش مشابه شواهدی دال بر برخورد قاره‌ای بین عربستان و اوراسیا قبل از آغاز ائوسن (۵۶ میلیون سال پیش) در منطقه لرستان ارائه شده است (Sun et al., 2023) که قابل توجه به ناپیوستگی قاعده توالی چینه‌شناسی سنوزوئیک است (شکل ۹).

داده‌های چینه‌شناسی و خاستگاه نشان می‌دهند که ناپیوستگی‌های میوسن و پلیوسن ستون چینه‌شناسی زاگرس همراه با نهشته‌های کنگلومرای و ماسه‌سنگی گسترده، نشانگر اوج فاز رانده‌شدگی و فعالیت‌های تکتونیکی هستند (Berberian, 1995; Agard et al., 2005; Agard et al., 2011; Mouthereau et al., 2012; McQuarrie and Van Hinsbergen, 2013; Koshnaw et al., 2019; Koshnaw et al., 2024).

تالش دارای ناپیوستگی‌های متعدد در ائوسن-الیگوسن، میوسن پیشین و میوسن پسین-پلیوسن است که با بالاآمدگی شدید و توقف فعالیت‌های ولکانیکی هم‌زمان است که پاسخ حوضه پیش بوم به دوره‌های کوهزایی را ثبت کرده است (Madanipour et al., 2018). داده‌های دما-زمان سنجی درجه حرارت پایین، دو فاز اصلی تغییر شکل منطقه‌ای در اوایل الیگوسن و میوسن میانی برای تالش ثبت کرد که با تغییر عمده در الگوی رسوب‌گذاری در طول ائوسن پسین-الیگوسن پیشین همخوان است (Madanipour et al., 2013; Madanipour et al., 2018).

نهشته‌های پلیوسن زیرین در مغان گزارش نشده‌اند و در بیشتر بخش‌های حوضه مغان رسوبات پلیوسن بالایی با ناپیوستگی زاویه‌دار بر روی رسوبات میوسن بالایی قرار دارند (IFP, 1961). ناپیوستگی میوسن میانی، ناپیوستگی میوسن پسین-پلیوسن از مهم‌ترین سطوح ناپیوستگی در حوضه مغان محسوب می‌شود. رسوبات پلیوسن (مثل کنگلومراهای محصول فرسایش کوهزایی) با یک ناپیوستگی واضح بر روی واحدهای میوسن فوقانی قرار می‌گیرند. ستون چینه‌شناسی حوضه مغان در شکل ۸ و شکل ۹، ستون ۲ ارائه شده است.

بحث

فلات ایران با احراز یک موقعیت زمین‌ساختی-ژئودینامیکی منحصر به فرد دارای جایگاه ویژه برای ثبت تاریخچه تکتونیکی از پرکامبرین پسین تا امروز است. وقایع ژئودینامیکی نظیر جدایش قاره‌ای گندوانا، همگرایی با اوراسیا، تشکیل و زوال اقیانوس‌های بزرگ مانند پالئوتتیس، نئوتتیس و پاراتتیس همچنین فرآیندهای زمین‌ساختی متنوعی مانند فرورانش اقیانوسی، برخورد و پسارخورد در ارتباط با شکل‌گیری حوضه‌های پشت کمانی، پیش بوم و جزایر کمانی، قابل تأمل است.

برخورد قاره-قاره‌ای متعاقب فرورانش، بر تشکیل و سبک گسترش و تکامل حوضه‌های پشت کمانی مؤثر است (Magni et al., 2014). کلیدی‌ترین شواهد قابل بررسی این بایگانی‌ها تاریخچه چینه‌شناسی است که از شواهد ثبت شده در آن می‌توان مواردی مانند تغییرات سریع در نرخ رسوب‌گذاری و ضخامت توالی‌ها، ناپیوستگی‌ها و نبوده‌های رسوب‌گذاری و توقف یا تغییر در فعالیت آتشفشانی کمانی (Draut and Clift, 2011) را نام برد.

ناپیوستگی‌ها و نبوده‌های رسوب‌گذاری در ستون چینه‌شناسی نه تنها نشان‌دهنده وقفه‌های رسوبی هستند بلکه به عنوان نقاط برش زمانی، شواهد فعالیت تکتونیکی و شاخص‌های حساسی از تغییرات ناگهانی در نرخ رسوب‌گذاری و منشأ رسوبات ارائه می‌دهند که با دوره‌های کوهزایی هم‌خوانی داشته و گذار از یک محیط تکتونیکی به محیطی دیگر و همچنین رابطه بین زمین‌شناسی ساختاری و چینه‌شناسی را نشان می‌دهند (Agard et al., 2011; Ballato et al., 2011; Mouthereau et al., 2012; Barber et al., 2018). چنانچه این نشانگرهای زمانی با داده‌های سن سنجی اعتبارسنجی شوند، چارچوبی محکم برای تعیین دقیق مرزهای زمانی آغاز و اوج همچنین بازسازی تکامل تکتونیکی کمربند عربستان-اوراسیا فراهم می‌آورند.

ناپیوستگی ثبت شده در قاعده توالی چینه‌شناسی سنوزوئیک از جمله مهم‌ترین ناپیوستگی‌های مرتبط با تاریخچه چینه‌شناسی پهنه برخورد است (Berberian and King, 1981) که در ستون چینه‌شناسی زاگرس، البرز، قفقاز، تالش، حوضه خزر جنوبی و مغان مشاهده شده است.

داده‌های دما-زمان سنجی درجه حرارت پایین البرز، بیانگر سه فاز اصلی تغییر شکل منطقه‌ای در ائوسن-الیگوسن، میوسن میانی و اوایل پلیوسن است.

این میان کلید فهم توالی رخدادها توسط حوضه‌های پشت‌کمانی در ثبت جزئیات وقایع برجسته است. رویکرد یکپارچه‌سازی اطلاعات امکان تعیین زمان‌های کلیدی آغاز برخورد، اوج کوه‌زایی و مراحل پس‌برخوردی را فراهم کرده و کمک می‌کند تا ارتباط میان بخش‌های مختلف کمربند با دقت بیشتری تحلیل شود.

ترکیب داده‌های سن‌سنجی ایزوتوپی با ناپیوستگی‌های چینه‌ای شناسایی‌شده در البرز، زاگرس، قفقاز، حوضه خزر جنوبی، تالش و مغان نشان می‌دهد که برخورد در سراسر کمربند ناهمزمان است. تطابق ناپیوستگی‌ها در این مناطق نشان می‌دهد که اگرچه زمان‌بندی دقیق رویدادها ممکن است کمی متفاوت باشد، اما یک الگوی نیمه همزمان از تشدید تدریجی کوهزایی قابل پیگیری است که از پالئوسن آغاز می‌شود و تا ائوسن-الیگوسن ادامه پیدا می‌کند. آثار آن از میوسن میانی و در نهایت پلیوسن-کواترنری در تمامی کمربندهای کوهزایی مشهود است. در این مقاله دیدگاه تک مرحله‌ای (تک زمانی) برای زمان برخورد با یک مدل چندمرحله‌ای جایگزین می‌شود. مدل جدید پیشنهاد می‌کند که این برخورد در سه مرحله اصلی صورت گرفته است: ۱- برخورد اولیه موسوم به برخورد نرم در ائوسن پسین-الیگوسن (۴۰ تا ۲۳ میلیون سال پیش)، ۲- تغییر شکل گسترده موسوم به برخورد سخت در میوسن آغازین و میانی (۲۳ تا ۱۲ میلیون سال پیش)، ۳- کوهزایی پرشتاب در میوسن پایانی تا امروز (۱۲ میلیون سال پیش تاکنون). مدل چندمرحله‌ای پیشنهادی توانایی توضیح تغییرات زمانی-مکانی در الگوی ناپیوستگی‌های منطقه‌ای را دارد و نشان می‌دهد که هر بخش از کمربند کوهزایی تاریخیچه تکتونیکی منحصر به فردی را تجربه کرده است. همچنین همبستگی منطقه‌ای ناپیوستگی‌های مشابه بین نواحی متأثر از برخورد و نواحی پیرامونی (قفقاز، حوضه جنوب خزر) می‌تواند نشان‌دهنده فازهای تکتونیک وسیع‌تر باشد. بر این اساس، آغاز برخورد را نمی‌توان یک پدیده ژئودینامیک آنی دانست بلکه می‌توان به صورت یک توالی دوره‌ای از رویدادها با مقیاس زمانی میلیون‌ها سال از ائوسن تا پلیوسن در نظر گرفت.

نتیجه‌گیری کلی این است که یک رویکرد چند-داده‌ای مبتنی بر تحلیل ناپیوستگی‌ها، خاستگاه و سن‌سنجی ایزوتوپی و حرارتی در حوضه‌های پشت‌کمانی می‌تواند چارچوبی قوی برای زمان‌بندی برخورد عربستان - اوراسیا فراهم آورد که در آن مجموعه‌ای از فازهای منطقه‌ای به جای یک مقطع زمانی پیشنهاد می‌شود. مطالعات انجام شده تأکید دارند که زمان‌بندی برخورد در بخش‌های مختلف کمربند برخورد عربستان - اوراسیا چند مرحله‌ای است. چنین رویکردی سبب می‌شود که تاریخچه برخورد به جای یک مقطع زمانی، به صورت مجموعه‌ای از رویدادهای پی‌درپی در نظر گرفته شود که در هر ناحیه به شکلی خاص و در زمانی متفاوت خود را نشان داده است. در نهایت، پیشنهاد می‌شود که مطالعه‌های آتی بر روی همبستگی دقیق ناپیوستگی‌ها در چندین

مطالعات منطقه‌ای در قفقاز نشان می‌دهد که زمان‌بندی برخورد در امتداد کمربند متغیر است. در قفقاز جنوب شرقی و شمال غربی، ناپیوستگی میوسن میانی و میوسن پسین-پلیوسن ثبت شده که با مراحل اولیه بالآمدگی مرتبط هستند (Vincent et al., 2005). ناپیوستگی میوسن میانی در قفقاز شمال غربی اندکی قدیمی‌تر از بخش جنوب شرقی است و عدم همزمانی در برخورد را در طول کمربند نشان می‌دهد. مطابق با داده‌های سن‌سنجی حرارتی رشته کوه‌های قفقاز شرقی دارای رشد سریع در ۱۰ تا ۵ میلیون سال اخیر هستند (Avdeev and Niemi, 2011).

در ستون چینه‌شناسی حوضه خزر جنوبی که یکی از نمونه‌های بارز از بقایای حوضه‌های پشت‌کمانی است، سه ناپیوستگی مهم در مرز ائوسن-الیگوسن، میوسن پیشین و میوسن پسین-پلیوسن ثبت شده که همخوان با ناپیوستگی‌های ثبت شده در ستون چینه‌شناسی قفقاز، البرز، زاگرس و تالش است.

ناپیوستگی ثبت شده در ستون چینه‌شناسی حوضه مغان، الیگوسن پیشین، میوسن پیشین و میوسن پسین-پلیوسن است. ناپیوستگی الیگوسن پیشین همزمان با ناپیوستگی منطقه قفقاز و اندکی جوان‌تر از ناپیوستگی در دیگر حوضه‌ها است. درحالی‌که ناپیوستگی میوسن پیشین حوضه مغان، اندکی زودتر از دیگر حوضه‌ها ثبت شده است. ناپیوستگی میوسن پسین-پلیوسن، همزمان با سایر حوضه‌ها در ستون چینه‌شناسی حوضه مغان ثبت شده است که نشان‌دهنده تکامل نهایی برخورد عربستان-اوراسیا، برخاستگی کل حوضه‌ها است.

چندگانگی زمان وقوع برخورد در شواهد زمین‌شناسی منجر به نظریه‌پردازی پیرامون ماهیت این رخداد ژئودینامیکی شده است. به طوری‌که بالاتو و همکاران (Ballato et al. 2011) برخورد دو مرحله‌ای موسوم به برخورد نرم و سخت در بازه‌های زمانی ائو-اولیگوسن و میوسن را پیشنهاد دادند. در نتایج پروژه MEBE زمان برخورد به الیگوسن نسبت داده شده است (Barrier et al., 2007). علیزاده نوده و همکاران (Alizadeh Noudah et al., 2025) نیز چند مرحله‌ای بودن برخورد را با فرض برخورد نرم در بازه‌های زمانی پالئوسن-ائوسن-اولیگوسن و سخت در میوسن مورد توجه قرار دادند. با توجه به راست آزمایی توزیع زمانی فازهای تکتونیکی در پهنه برخورد پیشنهاد میشود که مدل چندمرحله‌ای با تک مرحله‌ای جایگزین شود و فرایند برخورد بصورت یک پدیده ژئودینامیکی چند فازی در نظر گرفته شود.

نتیجه‌گیری

رویکرد چند داده‌ای همراه با یکپارچه‌سازی مطالعات ناپیوستگی و سن‌سنجی ایزوتوپی امکان تعیین چارچوب زمانی دقیق از فرآیند برخورد و تغییرات زمانی-مکانی آن در سراسر کمربندهای کوهزایی فراهم می‌کند و در

این نوشتار در چهارچوب پایان نامه دکترای مؤلف اول در دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان و با حمایت معنوی مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران انجام شد

مقیاس، توسعه بیشتر پایگاه داده‌های سن‌سنجی حرارتی کانی‌های آواری و ترکیب آن‌ها با سن‌سنجی حرارتی و مدل‌های فرونشست متمرکز شود.

قدردانی

References

- Adamia, S., Alania, V., Chabukiani, A., Chichua, G., Enukidze, O., Sadradze, N., 2010. Evolution of the Late Cenozoic basins of Georgia (SW Caucasus): a review. Geological Society London Special Publications 340(1), 239-259.
- Adamia, S., Zakariadze, G., Chkhotua, T., Sadradze, N., Tsereteli, N., Chabukiani, A., Gventsadze, A., 2011. Geology of the Caucasus: a review. Turkish Journal of Earth Sciences 20(5), 489-544.
- Adamia, S.A., Lordkipanidze, M., Zakariadze, G.S., 1977. Evolution of an active continental margin as exemplified by the Alpine history of the Caucasus. Tectonophysics 40(3-4), 183-199.
- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Mouthereau, F., 2005. Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation. International Journal of Earth Sciences 94(3), 401-419.
- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monié, P., Meyer, B., Wortel, R., 2011. Zagros orogeny: a subduction-dominated process. Geological Magazine 148(5-6), 692-725.
- Aghayeva, V., Sachsenshofer, R.F., van Baak, C.G.C., Bayramova, S., Corić, S., Frühwirth, M.J., Rzaeva, E., Vincent, S.J., 2023. Stratigraphy of the Cenozoic succession in eastern Azerbaijan: Implications for petroleum systems and paleogeography in the Caspian basin. Marine and petroleum geology 150, 106148.
- Ahmadvand, A., Ghorbani, M.R., Mokhtari, M.A.A., Chen, Y., Amidon, W., Santos, J.F., Paydari, M., 2021. Lithospheric mantle, asthenosphere, slab and crustal contribution to petrogenesis of Eocene to Miocene volcanic rocks from the west Alborz Magmatic Assemblage, SE Ahar, Iran. Geological Magazine 158(3), 375-406. doi:10.1017/S0016756820000527
- Alavi, M., 1996. Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz mountain system in northern Iran. Journal of geodynamics 21(1), 1-33.
- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution. American Journal of Science 304(1), 1-20.
- Alizadeh, A. A., Guliyev, I. S., Kadirov, F. A., Eppelbaum, L. V., 2016. Geosciences of Azerbaijan: V I: Geology. 1 ed. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-27395-2>.
- Alizadeh Noudesh S., Yann, R., Magali, R., Olivier, B., Rahgoshay, M., 2024. Eocene High-K Magmatic Flare-up in a Context of South Dipping Subduction and Strike-Slip Tectonics: Insights from the Talysh Massif, NW Iran. Journal of Asian Earth Sciences 264, 106045.
- Alizadeh Noudesh S., Yann, R., Magali, R., Delphine, B., Philippe, M., Arthur, I., Olivier, B., ahgoshay, M., 2025. Geochronological, isotopic and petrogenetic investigations of Cenozoic Volcanic rocks in the Talysh Massif, NW Iran: Insights for the Eocene magmatic flare-up. Lithos 496-497, 107954.
- Allen, M.B., Ghassemi, M.R., Shahrabi, M., Qorashi, M., 2003. Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran. Journal of structural geology 25(5), 659-672.
- Allen, M.B., Jones, S., Ismail-Zadeh, A., Simmons, M., Anderson, L., 2002. Onset of subduction as the cause of rapid Pliocene-Quaternary subsidence in the South Caspian basin. Geology 30(9), 775-778.
- Allen, M.B., Kheirkhah, M., Emami, M.H., Jones, S.J., 2011. Right-lateral shear across Iran and kinematic change in the Arabia—Eurasia collision zone. Geophysical Journal International 184(2), 555-574.
- Amani, K., Delavari, M., Amini, S., Azizi, H., Asahara, Y., Furman, T., Tabbakh Shabani, A.A., Asiabanha, A., Mohammadi, A., 2024. Geochemistry, Sr-Nd isotopes and zircon U-Pb dating of magmatic rocks from the Talesh range, western Alborz: New insights into Late Cretaceous evolution of the southern Eurasian margin. Geochemistry 84(1), 126042.
- Amini, A., 2006. Oligo-Miocene fluvial-dominated deltas on the shelf of the South Caspian Sea (Paratethys). Facies 52(4), 579-597.
- Asiabanha, A., Foden, J., 2012. Post-collisional transition from an extensional volcano-sedimentary basin to a continental arc in the Alborz Ranges, N-Iran. Lithos 148, 98-111.
- Avagyan, A., Sosson, M., Philip, H., Karakhanian, A., Rolland, Y., Melkonyan, R., Rebaï, S., Davtyan, V., 2005. Neogene to Quaternary stress field evolution in Lesser Caucasus and adjacent regions using fault kinematics analysis and volcanic cluster data. Geodinamica Acta 18(6), 401-416.
- Avdeev, B., Niemi, N. A., 2011. Rapid Pliocene exhumation of the central Greater Caucasus constrained by low-temperature thermochronometry, Tectonics 30, TC2009. doi:10.1029/2010TC002808.
- Axen, G.J., Lam, P.S., Grove, M., Stockli, D.F., Hassanzadeh, J., 2001. Exhumation of the west-central Alborz Mountains, Iran, Caspian subsidence, and collision-related tectonics. Geology 29(6), 559-562.
- Ballato, P., Uba, C.E., Landgraf, A., Strecker, M.R., Sudo, M., Stockli, D.F., Friedrich, A., Tabatabaei, S.H., 2011. Arabia-Eurasia continental collision: Insights from late Tertiary foreland-basin evolution in the Alborz Mountains, northern Iran. Bulletin 123(1-2), 106-131.
- Barber, D.E., Stockli, D.F., Horton, B.K., Koshnaw, R.I., 2018. Cenozoic exhumation and foreland basin evolution of the Zagros orogen during the Arabia-Eurasia collision, western Iran. Tectonics 37(12), 4396-4420.
- Barrier, E., Vrielynck, B., Brouillet, J.F., Brunet, M.F., Stephenson, R., Gaetani, M., 2007. The MEBE Paleotectonic maps: Evolution of the Middle-East since Mesozoic. In Geophysical Research Abstracts 9, 09817.
- Berberian, M., Arshadi, S., 1976. On the evidence of the youngest activity of the North Tabriz Fault and the seismicity of Tabriz city. Contribution to the Seismotectonics of Iran (Part II) 39, 397-418. Retrieved from <http://manuelberberian.com/Berberian & Arshadi 1976 - Tabriz>.
- Berberian, M., King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. Canadian journal of earth sciences 18(2), 210-265.

- Berberian, M., 1982. Aftershock tectonics of the 1978 Tabas-e-Golshan (Iran) earthquake sequence: a documented active 'thin- and thick-skinned tectonic' case. *Geophysical Journal International* 68(2), 499-530.
- Berberian, M., 1995. Master "blind" thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics* 241(3-4), 193-224.
- Brunet, M.F., Korotaev, M.V., Ershov, A.V., Nikishin, A.M., 2003. The south Caspian basin: A review of its evolution from subsidence modeling: *Sediment Geology* 156(1-4), 119-148. 10.1016/S0037-0738(02)00285-3.
- Chiu, H. Y., Chung, S. L., Zarrinkoub, M. H., Mohammadi, S. S., Khatib, M. M., Iizuka, Y., 2013. Zircon U-Pb age constraints from Iran on the magmatic evolution related to Neotethyan subduction and Zagros orogeny. *Lithos* 162, 70-87.
- Darin, M.H., Umhoefer, P.J., 2022. Diachronous initiation of Arabia-Eurasia collision from eastern Anatolia to the southeastern Zagros Mountains since middle Eocene time. *International Geology Review* 64(18), 2653-2681.
- Delavari, M., Ghanbari, S., Dolati, A., 2020. Adakitic volcanics of Azerbaijan area (south of Julfa): Evidence of magmatism in post-collisional setting. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 6, 2, 295 - 320. (in Persian)
- Draut, A.E., Clift, P.D., 2011. Basins in arc-continent collisions. In *Tectonics of sedimentary basins: Recent advances* (eds C. Busby and A. Azur) 347-368.
- Emami, H., Vergés, J., Nalpas, T., Gillespie, P., Sharp, I., Karpuz, R., Blanc, E.P., Goodarzi, M.G.H., 2010. Structure of the Mountain Front Flexure along the Anaran anticline in the Pusht-e Kuh Arc (NW Zagros, Iran): insights from sand box models. *Geological Society London Special publications* 330, 155-178.
- Farahpour, M.M., Hessami, K., 2012. Cretaceous sequence of deformation in the SE Zagros fold-thrust belt. *Journal of the Geological Society* 169(6), 733-743.
- Forte, A.M., Yanites, B.J., Whipple, K.X., 2016. Complexities of landscape evolution during incision through layered stratigraphy with contrasts in rock strength. *Earth Surface Processes and Landforms* 41(12), 1736-1757.
- François, T., Agard, P., Bernet, M., Meyer, B., Chung, S.-L., Zarrinkoub, M.H., Burov, E., Monié, P., 2014. Cenozoic exhumation of the internal Zagros: first constraints from low-temperature thermochronology and implications for the build-up of the Iranian plateau. *Lithos* 206-207, 100-112. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.07.021>.
- Gavillot, Y., Axen, G. J., Stockli, D. F., Horton, B. K., Fakhari, M. D., 2010. Timing of thrust activity in the High Zagros fold-thrust belt, Iran, from (U-Th)/He thermochronometry. *Tectonics* 29, TC4025. <https://doi.org/10.1029/2009TC002484>.
- Ghasemi, H., Rostami Hossuri, M., Sadeghian, M., Kadkhodaye Arab, F., 2016. Back-arc extensional magmatism in the Oligo-Miocene basin of the Northern edge of Central Iran. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences* 25(99), 239-252. (in Persian)
- Gholami Zadeh, P., Adabi, M.H., Hisada, K.I., Hosseini-Barzi, M., Sadeghi, A., Ghassemi, M.R., 2017. Revised version of the Cenozoic collision along the Zagros Orogen, insights from Cr-spinel and sandstone modal analyses. *Scientific Reports* 7(1), 10828.
- Golonka, J., 2000. Cambrian-Neogene plate tectonic maps. Wydawnictwa Uniwersytetu Jagiellonskiego, Krakow.
- Guest, B., Axen, G.J., Lam, P.S., Hassanzadeh, J., 2006. Late Cenozoic shortening in the west-central Alborz Mountains, northern Iran, by combined conjugate strike-slip and thin-skinned deformation. *Geosphere* 2(1), 35-52.
- Homke, S., Vergés, J., SerraKiel, J., Bernaola, G., Sharp, I., Garcés, M., Montero- Verdù, I., Karpuz, R., Goodarzi, M.H., 2009. Late Cretaceous-Paleocene formation of the proto-Zagros foreland basin, Lurestan Province, SW Iran. *Geological Society of America Bulletin* 121, 963-78.
- Hatzfeld, D., Molnar, P., 2010. Comparisons of the kinematics and deep structures of the Zagros and Himalaya and of the Iranian and Tibetan plateaus and geodynamic implications. *Reviews of Geophysics* 48(2).
- Hessami, K., Koyi, H.A., Talbot, C.J., Tabasi, H., Shabanian, E., 2001. Progressive unconformities within an evolving foreland fold-thrust belt, Zagros Mountains. *Journal of the Geological Society* 158(6), 969-981.
- Huber, H. 1977. Tectonic Map of North-West Iran 1: 2,500, 000 Scale. NIOC, Exploration and Production.
- IFP., 1961. IFP mission in Azerbaijan, National Iranian Oil Company, Geological Report No. 235 on Moghan area.
- Jackson, J., Priestley, K., Allen, M., Berberian, M., 2002. Active tectonics of the south Caspian basin. *Geophysical Journal International* 148(2), 214-245.
- Kaz'Min, V.G., Verzhbitskii, E.V., 2011. Age and origin of the South Caspian Basin. *Oceanology* 51(1), 131-140.
- Khain, V.E., 1975. Structure and main stages in the tectono-magmatic development of the Caucasus: an attempt at geodynamic interpretation. *American Journal of Science* 275, 131-156.
- Koshnaw, R.I., Kley, J., Schlunegger, F., 2024. The Miocene subsidence pattern of the NW Zagros foreland basin reflects the southeastward propagating tear of the Neotethys slab. *Solid Earth* 15(11), 1365-1383.
- Koshnaw, R.I., Stockli, D.F., Schlunegger, F., 2019. Timing of the Arabia-Eurasia continental collision—Evidence from detrital zircon U-Pb geochronology of the Red Bed Series strata of the northwest Zagros hinterland, Kurdistan region of Iraq. *Geology* 47(1), 47-50.
- Lukoil, 2007. Geological model creation, delineation and estimation of prospects for Moghan and Lali blocks (Iran). Internal report. Joint study project, NIOC exploration/Luk Oil Company.
- Madanipour, S., Ehlers, T.A., Yassaghi, A., Rezaeian, M., Enkelmann, E., Bahroudi, A., 2013. Synchronous deformation on orogenic plateau margins: Insights from the Arabia-Eurasia collision. *Tectonophysics* 608, 440-451.
- Madanipour, S., Yassaghi, A., Ehlers, T.A., Enkelmann, E., 2018. Tectonostratigraphy, structural geometry and kinematics of the NW Iranian Plateau margin: insights from the Talesh Mountains, Iran. *American Journal of Science* 318(2), 208-245.
- Madanipour, S., Najafi, M., Nozaem, R., Vergés, J., Yassaghi, A., Heydari, I., Khodaparast, S., Soudmand, Z., Aghajari, L., 2024. The Arabia-Eurasia collision zone in Iran: tectonostratigraphic and structural synthesis. *Journal of Petroleum geology* 47(2), 123-171.
- Magni, V., Faccenna, C., van Hunen, J., Funicello, F., 2014. How collision triggers backarc extension: Insight into Mediterranean style of extension from 3-D numerical models. *Geology* 42(6), 511-514.

- McQuarrie, N., Van Hinsbergen, D.J., 2013. Retrodeforming the Arabia-Eurasia collision zone: Age of collision versus magnitude of continental subduction. *Geology* 41(3), 315-318.
- Mouthereau, F., Lacombe, O., Vergés, J., 2012. Building the Zagros collisional orogen: timing, strain distribution and the dynamics of Arabia/Eurasia plate convergence. *Tectonophysics* 532, 27-60.
- Nabavi, M. H., 1976. An introduction to the geology of Iran. Geological Survey of Iran. (in Persian)
- Nemčok, M., Glonti, B., Yukler, A., Marton, B., 2013. Development history of the foreland plate trapped between two converging orogens; Kura Valley, Georgia, case study. *Geological Society London Special Publications* 377(1), 159-188.
- Okay, A.I., Tüysüz, O., 1999. Tethyan sutures of northern Turkey. *Geological Society London Special Publications* 156(1), 475-515.
- Philip, H., Cisternas, A., Gvishiani, A., Gorshkov, A., 1989. The Caucasus: an actual example of the initial stages of continental collision. *Tectonophysics* 161(1-2), 1-21.
- Popov, S.V., Antipov, M.P., Zastrozhnov, A.S., Kurina, E.E., Pinchuk, T.N., 2010. Sea-level fluctuations on the northern shelf of the Eastern Paratethys in the Oligocene-Neogene. *Stratigraphy and Geological Correlation* 18(2), 200-224.
- Popov, S.V., Rozanov, A.Y., Rögl, F., Steininger, F.F., Shcherba, I.G., Kovac, M., 2004. Lithological-paleogeographic maps of Paratethys. *CFS Courier Forschungsinstitut Senckenberg* 250, 1-46.
- Priestley, K., Baker, C., Jackson, J., 1994. Implications of earthquake focal mechanism data for the active tectonics of the South Caspian Basin and surrounding regions. *Geophysical Journal International* 118(1), 111-141.
- Rezaeian, M., 2009. Coupled tectonics, erosion and climate in the Alborz Mountains, Iran (Doctoral dissertation, University of Cambridge).
- Rezaeian, M., Carter, A., Hovius, N., Allen, M.B., 2012. Cenozoic exhumation history of the Alborz Mountains, Iran: New constraints from low-temperature chronometry. *Tectonics* 31(2).
- Robertson, A.H.F., 2000. Mesozoic-Tertiary tectonosedimentary evolution of a south-Tethyan oceanic basin and its margins in southern Turkey, in Bozkurt, E., Winchester, J.A., Piper, J.D.A., eds., *Tectonics and magmatism in Turkey and surrounding area*: Geological Society London, Special Publications, 173, 97-138.
- Robertson, A. H. F., Parlak, O., 2025. Eocene contractional deformation in the NW corner of the Arabian plate and its relation to Arabia-Eurasia collision in SE Türkiye. *International Geology Review* 67(6), 717-753, <https://doi.org/10.1080/00206814.2024.2400696>
- Rolland, Y., 2017. Caucasus collisional history: Review of data from East Anatolia to West Iran. *Gondwana Research* 49, 130-146.
- Saintot, A., Brunet, M.F., Yakovlev, F., Sébrier, M., Stephenson, R., Ershov, A., Chalot-Prat, F., McCann, T., 2006. The Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution of the greater Caucasus. *Geological Society London Memoir* 32(1).
- Sengör, A. M. C., Natal'in, B. A., 1996. 21 Paleotectonics of Asia: Fragments of a synthesis. *The tectonic evolution of Asia* 486-640.
- Sepahi, A. A., Nemati, B., Asiabanha, A., Lentz, D. R., McFarlane, C. R. M., 2024. New U-Pb zircon geochronological data for Takestan magmatic rocks (Western Alborz) and their significance for the interpretation of Paleogene magmatism in Iran. *International Geology Review* 66(14), 2644-2671, <https://doi.org/10.1080/00206814.2023.2291779>.
- Shafaii Moghadam, H., Li, Q.L., Li, X.H., Stern, R.J., Levresse, G., Santos, J.F., Lopez Martinez, M., Ducea, M.N., Ghorbani, G., Hassannezhad, A., 2020. Neotethyan subduction ignited the Iran arc and backarc differently. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 125(5), e2019JB018460.
- Sherkati, S., Letouzey, J., Frizon de Lamotte, D., 2006. Central Zagros fold-thrust belt (Iran): New insights from seismic data, field observation, and sandbox modeling. *Tectonics* 25(4).
- Stern, R.J., Johnson, P., 2010. Continental lithosphere of the Arabian Plate: a geologic, petrologic, and geophysical synthesis. *Earth-Science Reviews* 101(1-2), 29-67.
- Sun, G., Hu, X., Garzanti, E., BouDagher-Fadel, M.K., Xu, Y., Jiang, J., Wolfgring, E., Wang, Y., Jiang, S., 2023. Pre-Eocene Arabia-Eurasia collision: New constraints from the Zagros Mountains (Amiran Basin, Iran). *Geology* 51(10), 941-946.
- Tye, A.R., Niemi, N.A., Cowgill, E., Kadirov, F.A., Babayev, G.R., 2022. Diverse deformation mechanisms and lithologic controls in an active orogenic wedge: Structural geology and thermochronometry of the eastern Greater Caucasus. *Tectonics* 41(12), e2022TC007349.
- Verdel, C., Wernicke, B.P., Hassanzadeh, J., Guest, B., 2011. A Paleogene extensional arc flare-up in Iran. *Tectonics* 30, TC3008.
- Verdel, C., Wernicke, B.P., Ramezani, J., Hassanzadeh, J., Renne, P.R., Spell, T.L., 2007. Geology and thermochronology of Tertiary Cordilleran-style metamorphic core complexes in the Saghand region of central Iran. *Geological Society of America Bulletin* 119(7-8), 961-977.
- Vincent, S. J., Allen, M. B., Ismail-Zadeh, A. D., Flecker, R., Foland, K. A., Simmons, M. D., 2005. Insights from the Talysh of Azerbaijan into the Paleogene evolution of the South Caspian region. *Geological Society of America Bulletin* 117, 1513-1533, <https://doi.org/10.1130/b25690.1>
- Vincent, S.J., Carter, A., Lavrishchev V.A., Rice S.P., Barabadze, T.G., Hovius, N., 2011. The exhumation of the western Greater Caucasus: a thermochronometric study. *Geological Magazine* 148(1):1-21, doi:10.1017/S0016756810000257.
- Vincent, S.J., Braham, W., Lavrishchev, V.A., Maynard, J.R., Harland, M., 2016. The formation and inversion of the western Greater Caucasus Basin and the uplift of the western Greater Caucasus: Implications for the wider Black Sea region. *Tectonics* 35(12), 2948-2962.
- Zanchi, A., Zanchetta, S., Balini, M., Garzanti, E., Nicora, A., Poli, S., Naimi, N., Hosayum, M., 2006. The Paleotethys collision zone in north eastern Iran. In *Geophysical Research Abstracts* 8, 03439).
- Zelenin, E., Bachmanov, D., Garipova, S., Trifonov, V., Kozhurin, A., 2021. The active faults of Eurasia (AFEAD): Ontology and design behind the continental-scale dataset. *Earth System Science Data* 14, 4489-4503.
- Zonenshain, L.P., Le Pichon, X., 1986. Deep basins of the Black Sea and Caspian Sea as remnants of Mesozoic back-arc basins. *Tectonophysics* 123(1-4), 181-211.