



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

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

## The geometry of growth strata as evidence for the evolution of the Nahreh anticline, the interior Fars region

Zahra Tavazo<sup>1</sup>, Ebrahim Gholami<sup>2\*</sup>, Hossein Motamedi<sup>3</sup>, Bahman Soleimany<sup>4</sup>, Jaumeh Vergés<sup>5</sup>

1. PhD student, Department of Geology, Faculty of Science, University of Birjand, Birjand, Iran
2. Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, University of Birjand, Birjand, Iran
3. Assistant Professor, National Iranian Oil Company, Exploration Directorate, Tehran, Iran
4. Assistant Professor, National Iranian Oil Company, Exploration Directorate, Tehran, Iran
5. Scientific staff, Doctor Geociencias Barcelona (Geo3Bcn), Barcelona, Spain

### Article info

#### Article history

Received: 23 January 2024

Accepted: 19 February 2024

#### Keywords:

Fars paleo high, Nahreh anticline, growth strata, onlapping, limb rotation.



### Abstract

The study area is located in the northern margin of the Fars paleo high plateau in the Zagros fold-thrust belt. The presence of growth strata in the young Aghajari and Bakhtiari formations shows the continuation of folding until the Pliocene and Pleistocene times. The study of the geometry of the Nahreh anticline was carried out using seismic lines, geological cross-section drawing using Kink's method and field studies. The difference in the geometry of the anticline below and above the Dashtak Formation and multi axiality of anticline indicates the function of this formation as an intermediate detachment horizon. The onlapping of the Aghajari Formation on the Asmari Formation has been observed on the southern limb of the Nahreh anticline. This onlapping can be happen due to the action of the basement fault after the sedimentation of the Asmari Formation. Thus after the deposition of this Formation the Nahreh anticline was folded and then the erosion of formations older than the Aghajari Formation, occurred during the uplift of the anticline. After that, sandstone of the Aghajari Formation deposited on top of the Asmari Formation. Based on the analysis of the geometry of those onlaps investigated in the seismic lines and in the field compared with existing models, this anticline is more consistent with the limb rotation around fixed hinges, and according to the seismic line it is consistent with the hinge migration model. It is also consistent with model C of detachment folds and with an uplift rate greater than sedimentation.

### Introduction

The Zagros orogenic belt in the northeastern margin of the Arabian plate has been extended in a northwest-southeast direction from Turkey to the Strait of Hormuz with a length of more than 2000 km. The ancient Fars paleo-high is located in the central part of the Fars Province, and the studied area is located at the northern edge of the ancient Fars plateau (Nahreh anticline) (Fig. 1). In the stratigraphic column of Fars, the Hormuz salt series is present as the main detachment horizon, and the Dashtak Formation is the middle detachment horizon. The growth strata is strong evidence to reveal the kinematics of the fold and the history and timing of

deformation during its compression phase (Vergés et al., 2002).

During folding, the specific geometries observed in the growth strata are related to hinge kinematics. All models are in agreement with the specific growth strata geometry for each of the fold model kinematics. Consequently, growth strata geometry can be an efficient method for the study of fold kinematics, which is essential for modeling (Hardy and Poblet, 1994; Ahmadi et al., 2006; Mercier et al., 2007; Livio et al., 2009).

**DOI** <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.1.106791>

\*Corresponding author: Ebrahim Gholami; E-mail: egholami@birjand.ac.ir

**How to cite this article:** Tavazo, Z., Gholami, E., Motamedi, H., soleimany, B., Vergés, J., 2024. The geometry of growth strata is evidence of the evolution of the Nahreh anticline (interior Fars region). Kharazmi Journal of Earth Sciences 10(1), 33- 52. <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.1.106791>



## Materials and Methods

In order to study the geometry of the anticline at the surface and depth, we need to design a structural section of the area. The position of structural sections is chosen in such a way that, while seismic data are used to draw the sections, geological structure and phenomena can be used to interpret the seismic lines.

Field observations were made on this anticline and by completing the data, structural sections were drawn on this anticline using the kink method in Move 2018 software and then compared and controlled with the geological information obtained from the field observations.

## Results and Discussion

In the western parts of the study area in the southern flank of the anticline, the Aghajari Formation with growth strata is observed on top of the Asmari Formation. The growth strata show folding during deposition of the Aghajari Formation. The folding in the fold and thrust belts is dependent on the amount of friction present at the base of the shortening sediments, so that as the friction decreases with the presence of a ductile unit, the temporal precedence of the development of folding over faulting increases (Mitra, 2003; Hughes, 2013).

The discontinuity in the growth strata is mainly caused by the kinematics of the folds. Due to the migration of the kink bands axis, anticlines and the progressive rotation of the limb, three types of growth strata discontinuities have been identified: 1) Growth strata related to the migration of the kink bands in active anticlines (Hardy and Poblet, 1994). 2) Growth strata associated with kink band axis migration in active syncline, and 3) growth strata associated with limb rotation.

The different geometries of the growth strata developing during hinge migration, as opposed to limb rotation around a fixed hinge have been studied (Rafini and Mercier, 2002).

Other important parameters, such as sedimentation rate and uplift rate, also control the final growth-strata geometry. The ratio of the sedimentation rate to the

uplift rate ( $R$ ) controls the morphology of the fold. At high sedimentation-to-uplift ratio ( $R > 1$ ), the anticline structure remains immersed in the basin beneath the growth strata. This is particularly true for offshore anticlines with low amplitude, as seen on many seismic profiles. Low sedimentation-to-uplift ratios ( $R < 1$ ) typically cause the anticline structure to emerge from the basin. This is the case for most of the continental folds found in nature (Rafini and Mercier, 2002).

## Conclusions

The evolutionary history of a sedimentary basin includes geological events that have affected the sedimentary basin over time, causing changes in the type of sediments, the rate of sedimentation, and the conditions of the sedimentary basin.

The presence of growth strata in the seismic lines and field operations in the young Aghajari and Bakhtiari formations and the onlapping of the Aghajari on the Asmari formations in the southern limb of the Nahreh anticline can be due to the action of the basement fault after the deposition of the Asmari Formation. In fact after the deposition of the Asmari Formation, folding occurs in Nahreh anticline and erosion of the older formations than the Aghajari Formation occurs, during the rise of the anticline. Then the Aghajari Formation sandstone was deposited on the Asmari Formation. The presence of growth strata in Aghajari and Bakhtiari formations also shows the continuation of folding until the Pliocene and Pleistocene.






According to the studies conducted, the Nahreh anticline is consistent with model C of detachment folds and with a low sedimentation-to-uplift ratios (Rafini and Mercier, 2002). The slope of the growth strata was measured in the field observation. Then they were plotted on the chart where vertical axis is slope of growth strata and horizontal axis is number of growth strata beds. Comparison with the presented models and seismic lines, it shows the limb rotation with hinge migration mechanism.

## References

Ahmadi, R., Ouali, J., Mercier, E., Mansy, J. L., Van Vliet Lanoe, B., Launeau, P., 2006. The geomorphologic

- imprints of hinge migration in the fault-related folds. A case study in southern Tunisian Atlas. *Journal of Structural Geology*, 28, 721–728. [https:// DOI: 10.1016/j.jsg.2006.01.004](https://doi.org/10.1016/j.jsg.2006.01.004).
- Hardy, S., Poblet, J., 1994. Geometric and numerical model of progressive limb rotation: in detachment folds. *Geology*. 22. 371–374. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)022<0371:GANMOP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)022<0371:GANMOP>2.3.CO;2).
- Hughes, A., 2013. Insights into Contractional Fault- Related Folding Processes Based on Mechanical, Kinematic and Empirical Studies. Harvard University PhD Dissertations.
- Livio, A., Berlusconi, A., Alessandro, M., Michetti, A., Sileo, G., Zerboni, A., Trombino, L., Cremaschi, M., Mueller, K., Vittori, E., Carcano, C., Rogledi, S., 2009. Active fault-related folding in the epicentral area of the December 25, 1222 (Io = IX MCS) Brescia earthquake (northern Italy): seismotectonic implications. *Tectonophysics*, 476, 320–335. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.03.019>.
- Mercier, E., Rafini, S., Ahmadi, R., 2007. Folds kinematics in “folds and thrust belts” The “hinge migration” question. A review. Thrust belts and foreland basins part IV. Structural modeling/restoration. Berlin: Springer. [https://DOI: 10.1007/978-3-540-69426-7\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-540-69426-7_7).
- Mitra, S., 2003. A Unified Kinematic Model for the Evolution of Detachment Folds. *Journal of Structural Geology*. 25. 1659-1673. [http://dx.doi.org/10.1016/S0191-8141\(02\)00198-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00198-0).
- Rafini, S., Mercier, E., 2002. Forward modelling of foreland basins progressive unconformities. *Sedimentary Geology*, 146, 75–89. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00167-1](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00167-1).
- Vergés, J., Marzo, M., Muñoz, J. A., 2002. Growth strata in foreland settings: *Sedimentary Geology*. v. 146. no. 1-2. p. 1- 9. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00162-2](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00162-2).

#### CRediT authorship contribution statement

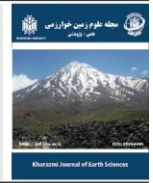
 <b>Zahra Tavazo</b>	Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Resources, Data Curation, Writing - Original Draft
 <b>Ebrahim Gholami</b>	Conceptualization, Writing - Review & Editing, Writing - Review & Editing, Supervision
 <b>Hossein Motamedi</b>	Conceptualization, Writing - Review & Editing, Writing - Review & Editing, Supervision
 <b>Bahman Soleimany</b>	Conceptualization, Writing - Review & Editing, Writing - Review & Editing, Supervision
 <b>Jaumeh Vergés</b>	Conceptualization, Writing - Review & Editing, Writing - Review & Editing, Supervision



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

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

## هندسه چینه‌های رشدی به عنوان شاهدهی بر نحوه تکامل تاقدیس نره، منطقه فارس داخلی

زهرآ تواضع<sup>۱</sup>، ابراهیم غلامی<sup>۲\*</sup>، حسین معتمدی<sup>۳</sup>، بهمن سلیمانی<sup>۴</sup>، جامه ورجس<sup>۵</sup>

۱. دانشجوی دکترای تکتونیک، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

۲. دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

۳. استادیار، مدیریت اکتشاف نفت، تهران، ایران.

۴. استادیار، مدیریت اکتشاف نفت، تهران، ایران.

۵. استاد، موسسه تحقیقات علوم زمین Jaume Almera، بارسلونا، اسپانیا.

### چکیده

منطقه مورد مطالعه در حاشیه شمالی بلندای قدیمی فارس در کمربند چین‌خورده - رانده زاگرس قرار دارد. حضور چینه‌های رشدی در یال جنوبی این تاقدیس، در سازندهای جوان آجاجاری و بختیاری، تدوام چین‌خوردگی تا زمان پلیوسن و پلیوستوسن را نشان می‌دهد. به منظور بررسی هندسه تاقدیس نره از خطوط لرزه‌ای و رسم مقطع زمین‌شناسی به روش کینک و مطالعات صحرایی استفاده شده است. تفاوت هندسه تاقدیس در زیر و بالای سازند دشتک و چند محوره بودن تاقدیس نشان‌دهنده عملکرد این سازند به عنوان افق جدایش میانی است. پیش‌نشینی (Onlapping) سازند آجاجاری بر روی سازند آسماری در یال جنوبی تاقدیس نره مشاهده شده است. این پیش‌نشینی می‌تواند در اثر عملکرد گسل پی‌سنگی پس از رسوب‌گذاری سازند آسماری باشد. بدین صورت که پس از رسوب‌گذاری این سازند تاقدیس نره دچار چین‌خوردگی گردیده و سپس فرسایش سازندهای قدیمی‌تر از سازند آجاجاری هنگام برخاستگی تاقدیس اتفاق افتاده است. بعد از آن ماسه‌سنگ سازند آجاجاری با پیش‌نشینی بر روی سازند آسماری رسوب‌گذاری کرده است. بر اساس تحلیل هندسه چینه‌های رشدی بررسی شده در خطوط لرزه‌ای و بازدیدهای صحرایی و مقایسه با مدل‌های موجود، این تاقدیس با مدل چرخش در یال و مهاجرت لولا مطابقت بیشتری دارد. همچنین با مدل C چین‌های جدایشی و با نرخ بالآمدگی بیشتر نسبت به رسوب‌گذاری مطابقت دارد.

### اطلاعات مقاله

#### تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۳

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۳۰

#### واژه‌های کلیدی

بلندای فارس، تاقدیس

نره، چینه‌های رشدی،

پیش‌نشینی، چرخش یال.



### مقدمه

۱۵ درصد از کل ذخایر گاز اکتشاف شده در جهان است (Motamedi et al., 2012; Bordenave and Hegre, 2012). لایه‌های نمک‌دار سری هرمز یا معادل‌های جانبی آن به سن اینفراکامبرین - کامبرین به عنوان افق شکل‌پذیر پوشاننده پی‌سنگ برای پهنه فارس پیشنهاد شده‌اند (Jackson, 1980; Berberian, 1995; Talbot and Alavi, 1996). هر چند برخی از پژوهشگران نبود رخنمون گنبد‌های نمکی در بخش مرکزی بلندای قدیمی فارس را به معنی نبود سری هرمز در قاعده پوشش رسوبی در نظر گرفته‌اند

کمربند کوهزایی زاگرس در حاشیه شمال شرقی ورقه عربی با راستای شمال‌غرب-جنوب‌شرق از ترکیه تا تنگه هرمز به طول بالغ بر ۲۰۰۰ کیلومتر گسترش یافته است. بلندای قدیمی فارس در بخش مرکزی پیشانی پهنه فارس واقع شده است و منطقه مورد مطالعه در حاشیه شمالی بلندای قدیمی فارس (تاقدیس نره) قرار دارد (شکل ۱). بلندای قدیمی فارس در جنوب کمربند چین‌خورده - رانده زاگرس حاوی ۱۵۰۰ تریلیون فوت مکعب معادل

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.1.106791>

\*نویسنده مسئول: ابراهیم غلامی [egholami@birjand.ac.ir](mailto:egholami@birjand.ac.ir)

استناد به این مقاله: تواضع، ز.، غلامی، ا.، معتمدی، ح.، سلیمانی، ب.، ورجس، ج. (۱۴۰۳) هندسه چینه‌های رشدی شاهدهی بر نحوه تکامل تاقدیس نره، منطقه فارس داخلی.

مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۱۰، شماره ۱، صفحه ۳۳ تا ۵۲. <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.1.106791>



تاریخچه تکامل سینماتیکی یک گسل یا گروهی از گسل‌ها، لازم است مطالعات مختلف همچون یافته‌های میدانی (وضوح متریک) و نتایج خطوط لرزه‌ای باهم ادغام گردند. درک کامل چینه‌های رشدی می‌تواند برای اکتشاف نفت در یک ساختمان مفید و مؤثر باشد. در دهه اخیر، به دلایل ذیل علاقه فزاینده‌ای به مطالعه چینه‌های رشدی و ارتباط آن‌ها با ساختارهای تکتونیکی ایجاد شده است: (۱) شناخت سازوکارهای رسوب‌گذاری همزمان با تکتونیک و ارتباط آن‌ها با چین‌خوردگی و گسلش. (۲) افزایش دقت مدل‌های زمین‌شناسی برای اکتشاف هیدروکربن، به ویژه در مناطقی که هندسه چینه‌های رشدی ممکن است بسیار پیچیده باشد (شکل ۲) (Vergés et al., 2002).

(Bahroudi and Koyi, 2003)، بیشتر پژوهشگران دلایلی چون کاهش ستبرای سری هرمز در بلندا و یا تغییر رخساره آن به انیدریت را پیشنهاد کرده‌اند (Furst, 1976 ; Kent, 1979; Jahani, 2008; Talbot and Alavi, 1996). چینه‌های رشدی به عنوان شاهدهی محکم برای آشکار کردن سینماتیک چین و تاریخچه و زمان دگرشکلی در فاز فشارش هستند. افزایش استفاده از خطوط لرزه‌ای با وضوح بیست متر در مناطق تکتونیکی پیچیده، ارتباط بین ساختارهای رشدی و نهشته شدن رسوب در محیط‌های دریایی و قاره‌ای همزمان با فعالیت‌های تکتونیکی را نشان داده است. چینه‌های رشدی به عنوان رسوبات همزمان با تکتونیک به طور قابل توجهی مشابه با چین‌های فشارشی مرتبط با راندگی در عمق و چین‌های مرتبط با انتشار گسل‌های نرمال در رژیم‌های کششی هستند. برای مستندسازی کامل

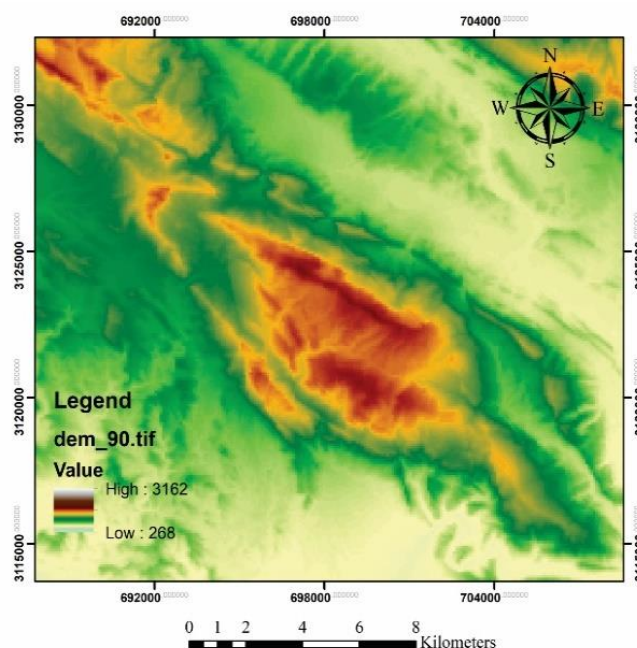
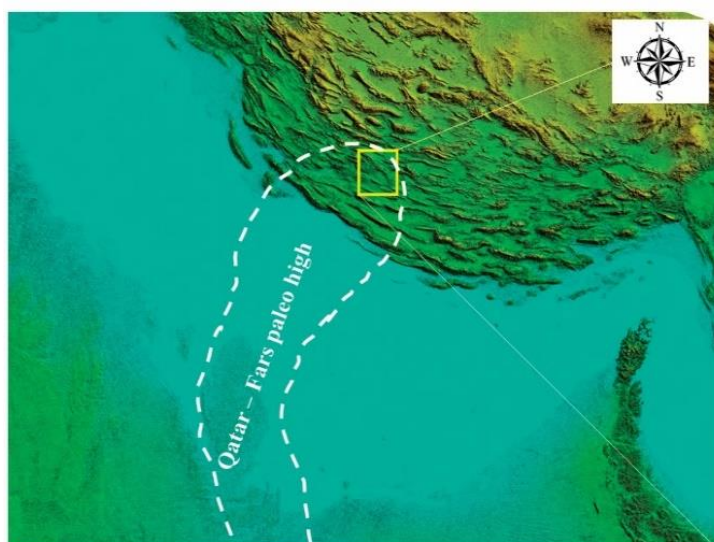
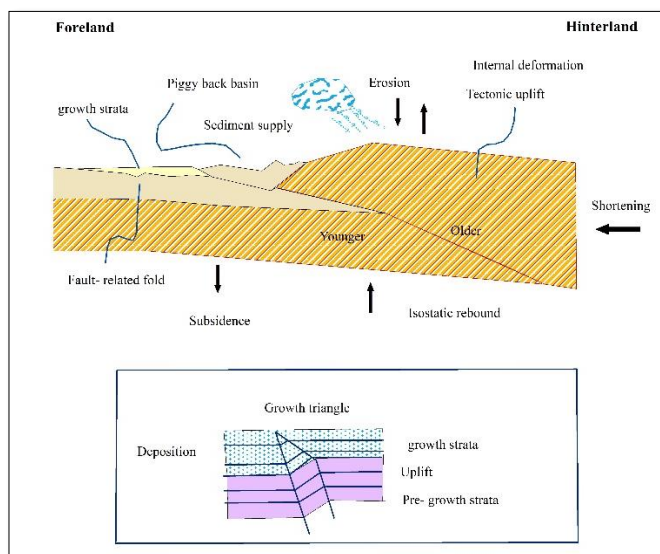


Fig. 1. Geological location of the studied area.

شکل ۱- موقعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه.



شکل ۲- فرآیندهای سطحی و عمقی در هنگام پرشدگی همزمان با تکتونیک حوضه پیش‌بوم و چینه‌های رشدی مرتبط با آن در کمربندهای چین‌خورده و رانده پیش‌بوم (Vergés et al., 2002).

Fig. 2. Surface and deep processes during the syntectonic foreland basin filling and the related growth strata in a foreland fold and thrust belt (Vergés et al., 2002).

سینماتیک چین‌ها با داده‌های میدانی یا ژئوفیزیکی چالش برانگیز است، و به نظر می‌رسد نظریه لولای ثابت، نظریه غالب‌تری است.

### ستون چینه‌شناسی

در ستون چینه‌شناسی فارس (شکل ۳)، سری نمک هرمز به عنوان افق جدایشی اصلی حضور دارد و سازند دشتک به عنوان افق جدایشی میانی می‌باشد. واحدهای پالئوزوئیک زیرین شامل سازندهای میلا (دولومیت، شیل و آهک)، ایل‌بیگ (شیل، ماسه‌سنگ و گل‌سنگ) و زردکوه (شیل، ماسه‌سنگ و کربنات) هستند که با یک ناپیوستگی از واحدهای پالئوزوئیک بالایی جدا می‌شوند. اردویسین با سازندهای سیاهو (ماسه‌سنگ و شیل‌های ارگانیک) و سرچاهان (ماسه‌سنگ و شیل‌های ارگانیک) آغاز می‌شود که سنگ منشأ گاز در بلندای فارس هستند. جهانی (Jahani, 2008) ستبرای حدود چهار کیلومتر را برای سری پالئوزوئیک در بلندای قدیمی فارس پیشنهاد کرده است. سن سازند دالان بالایی به روش سن‌سنجی ایزوتوپ استرانسیم برابر ۲۵۱/۵ تا ۲۵۲/۵ میلیون سال گزارش شده که معادل زمان بازشدگی اقیانوس تتیس جدید است (Wang et al., 2007). بر اساس ستون چینه‌شناسی، یک ناپیوستگی در پالئوزوئیک همزمان با فاز تکتونیک

چندین روش و تکنیک بر اساس هندسه چینه‌های رشدی (هندسه رسوب همزمان با تشکیل یا رشد یک چین) که به سینماتیک چین مربوط می‌شود، وجود دارد (Zoetmeijer, 1993; Shaw and Suppe, 1994; Poblet and Hardy, 1995; Hardy and Poblet, 1994; Wickham, 1995; Zapata and Allmendinger, 1996; Hardy, 1997; Muller and Suppe, 1997; Storti and Poblet, 1997; Suppe et al., 1997; Salvini et al., 2001; Salvini and Storti, 2002; Bernal and Hardy, 2002; Grando and McClay, 2004; Tavani et al., 2007). در طول چین‌خوردگی، هندسه‌های خاص مشاهده شده در چینه‌های رشدی، به جنبش لولا مرتبط است. در نتیجه، هندسه چینه‌های رشدی می‌تواند یک روش کارآمد برای مطالعه سینماتیک چین‌خوردگی باشد و برای مدل‌سازی ضروری است (Hardy and Poblet, 1994; Ahmadi et al., 2006; Mercier et al., 2007; Livio et al., 2009). رفتار لولای چین‌ها در چین‌های مرتبط با گسل و چین‌های جدایشی عمدتاً در بحث چینه‌های رشدی مطرح می‌شود. سؤال اصلی این است که آیا لولاها ثابت هستند و یا اینکه در طول رشد چین مهاجرت می‌کنند (Mercier et al., 2007). زیرا نمایش هندسه چینه‌های رشدی و

### تاقدیس نره

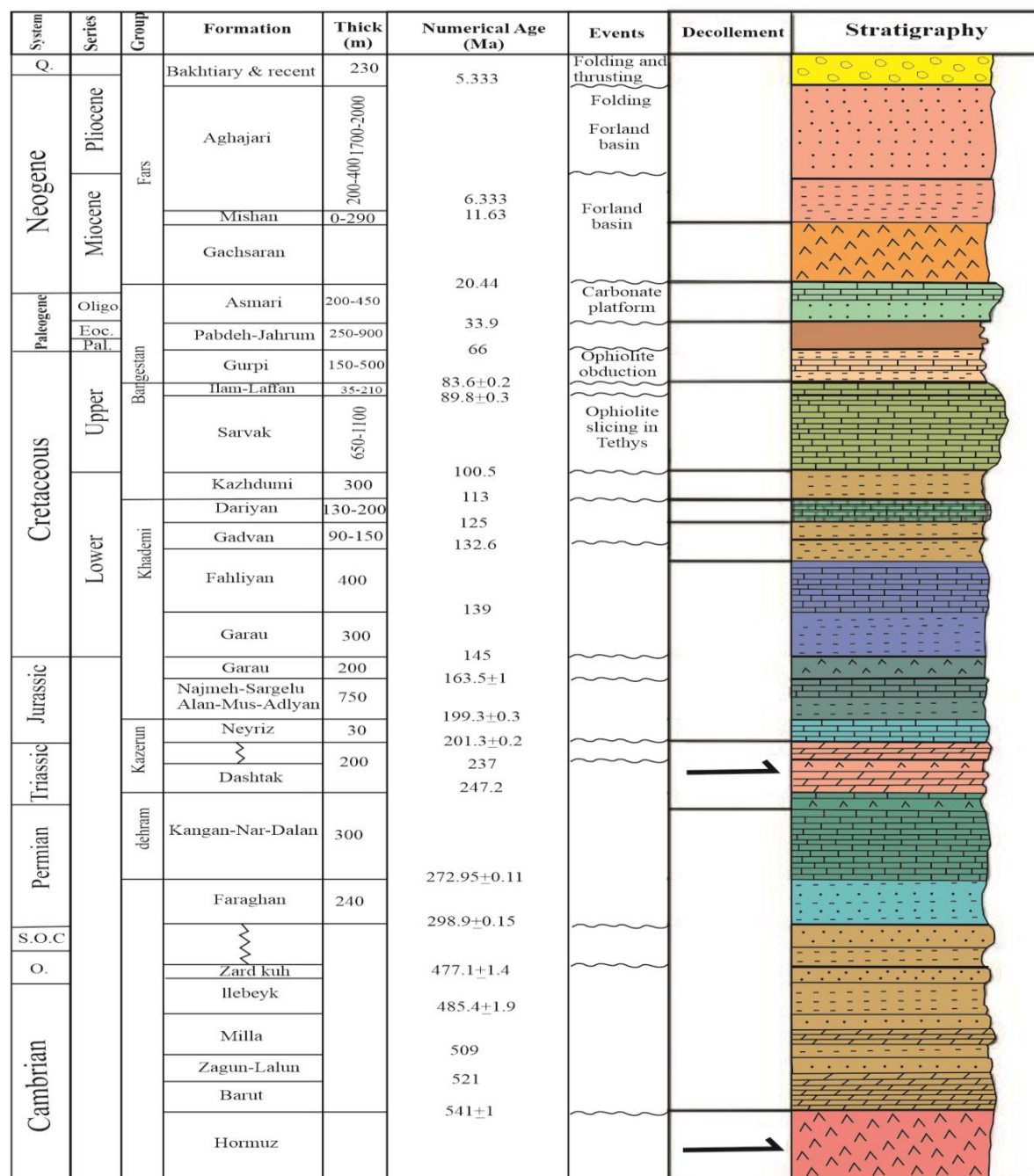
تاقدیس نره بر روی بلندای فارس در ادامه شرقی تاقدیس‌های کوه سورمه و کوه لار قرار دارد. قدیمی‌ترین و گسترده‌ترین بیرون‌زدگی در این تاقدیس گروه بنگستان است ولی بخش‌های بالای گروه خامی نیز در مجاورت گسل عرضی تاقدیس نره رخنمون دارند. این تاقدیس در مجاورت شمالی یک پله پی‌سنگی قرار گرفته است و افزایش بیشتر این ساختارها نسبت به ساختارهای جنوبی آن‌ها که با ارتفاع بیشتر و رخنمون‌های قدیمی‌تر مشخص می‌شود، در اثر این پله پی‌سنگی است. تاقدیس نره از سمت شمال غرب با تاقدیس‌های کوه لار به صورت گسله و با آرایش نردبانی راست‌بر و از سمت جنوب شرق نیز با تاقدیس تخته با آرایش نردبانی راست‌بر می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

به منظور مطالعه هندسی تاقدیس در سطح و عمق نیاز به طراحی برش ساختاری از منطقه داریم. طراحی برش‌های ساختاری به نحوی انجام می‌شود که ضمن بهره‌گیری از داده‌های لرزه‌نگاری در ترسیم برش‌ها، از داده‌ها و مفاهیم زمین‌شناسی در تفسیر خطوط لرزه‌نگاری و بیشترین اطلاعات موجود استفاده گردد و داده‌های کافی جهت تهیه برش ساختاری فراهم شود. برش‌ها بر خطوط لرزه‌ای منطبق بوده و یا در نزدیک آن‌ها انتخاب گردیدند (شکل ۴). در بازدید صحرایی، داده‌های برداشت شده جهت ترسیم برش ساختاری شامل شیب و جهت شیب لایه‌ها و شناسایی مرز سازندها بر اساس شواهد سنگ‌شناسی، ساختارهایی نظیر چین‌ها، گسل‌ها و همچنین ساختارهای رسوبی و شواهد سن‌یابی چین‌خوردگی در امتداد برش عرضی برداشت شد و در نقشه پایه منطقه مورد مطالعه (نقشه‌های ۱:۵۰۰۰۰) جانمایی گردید. برش‌های ساختاری عرضی بر روی این تاقدیس (شکل ۵) با روش کینک در نرم‌افزار Move 2018 ترسیم شدند. در برش‌ها، سری نمکی هرمز به عنوان افق گسسته اصلی و سازند دشتک به عنوان افق گسسته میانی در نظر گرفته شده است.

کالدونین (قبل از دونین)، بین سازندهای سیاهو و سرچاهان و ناپیوستگی دیگر، بعد از دونین همزمان با فاز تکتونیکی هرسنین رخ داده است. گروه دهرم به سن پرموتریاس که معادل سازند خوف در کشورهای عربی حاشیه جنوب خلیج فارس نظیر امارات متحده عربی و عمان است (Maurer et al., 2009)، سنگ مخزن ذخایر گازی در بلندای فارس را تشکیل می‌دهد. ستبرای میانگین این گروه حدوداً ۱۰۰۰ متر در منطقه مورد مطالعه است. این گروه از سازندهای کنگان و دالان (آهک، دولومیت و کمی رسوبات تبخیری انیدریتی) در بالا و سازند فراقان (ماسه‌سنگ و کمی شیل) در قاعده تشکیل شده است (Szabo and Kheradpir, 1978; Rahimpour et al., 2010).

سازند دشتک به سن تریاس میانی بر روی گروه دهرم به عنوان سنگ‌پوش گروه دهرم واقع شده است. ستبرای مقطع تیپ آن در کوه سیاه حدود ۸۰۰ متر است. این سازند عمدتاً از رسوبات تبخیری شامل انیدریت به همراه دولومیت و کمی شیل تشکیل شده است. از بلندای قدیمی فارس به سمت شمال شرق در فارس داخلی و زاگرس مرتفع، سازند دشتک و کنگان با دولومیت‌های سازند خانه‌کت بصورت گسترش جانبی بین‌انگشتی جایگزین می‌شوند. بر روی سازند دشتک، سازند نیریز با ستبرای حدود ۷۰ متر واقع شده است که بر روی آن رسوبات گروه خامی به سن ژوراسیک قرار دارد. این گروه که شامل سازندهای سورمه، هیث، فهلیان، گدوان و داریان است، ستبرای میانگین حدود ۱۱۰۰ متر دارد و عمدتاً از آهک و دولومیت به همراه مقداری شیل در بخش‌های بالایی تشکیل شده است. گروه بنگستان پس از ۷۰ متر شیل‌های سازند کژدمی در قاعده از حدود ۲۵۰ متر سنگ‌های آهکی مقاوم مربوط به سازندهای سروک و ایلام تشکیل شده است. سازند شیلی و مارنی گورپی با ستبرای حدود ۱۳۰ متر جوان‌ترین سازند کرتاسه است که توسط یک لایه کلیدی شیل‌های ارغوانی از سازند پابده به سن پالئوسن که از حدود ۲۴۰ متر شیل و آهک‌های نازک لایه تشکیل شده، جدا می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳- ستون چینہ‌شناسی ایالت زمین‌شناسی فارس. اقتباس از (Alavi, 2004; Abdollahie Fard et al., 2006; Soleimany et al., 2011; Valero et al., 2015) و داده‌های چاه (NIOC, 2010, 2018).

Fig.3. Stratigraphic column of the Fars geological state (Alavi, 2004; Abdollahie Fard et al., 2006; Soleimany et al., 2011; Valero et al., 2015 and well data of NIOC, 2010, 2018).

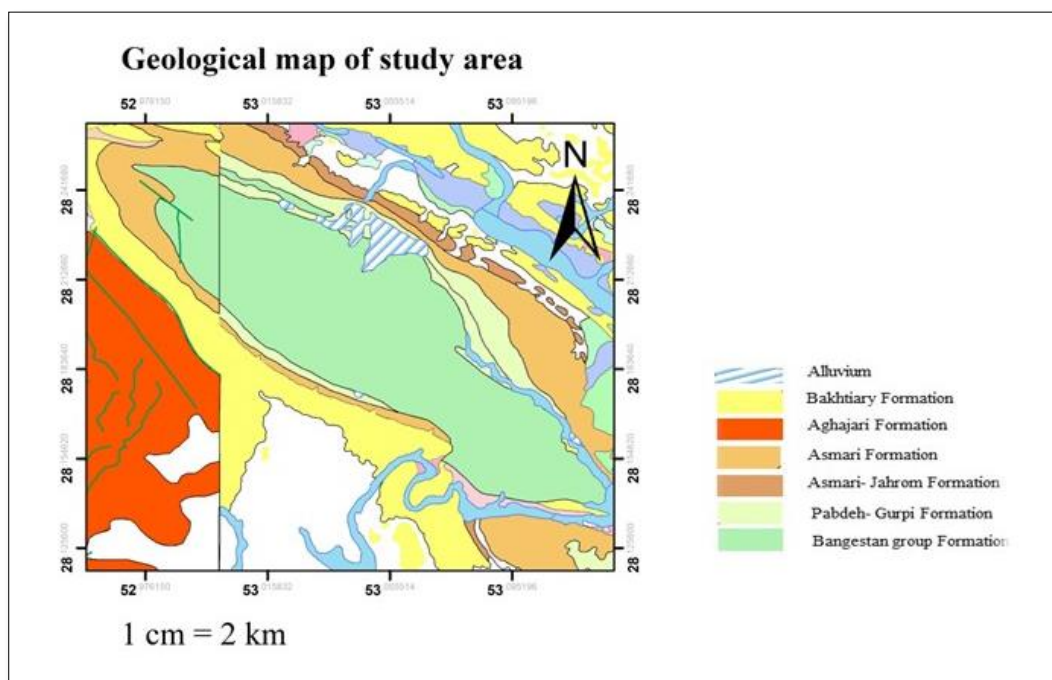


Fig.4. Geological map of study area.

شکل ۴- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (Petrokav Zagros., 2012).

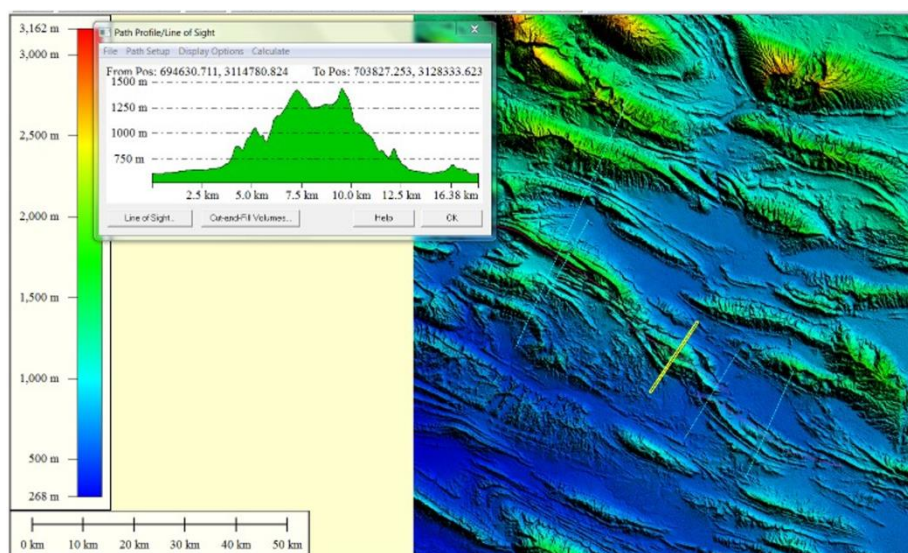


Fig.5. The position of the selected cross-section of the Nahreh anticline and its elevation profile.

شکل ۵- موقعیت مقطع عرضی انتخاب شده از تاقدیس نره و نیمرخ ارتفاعی آن.

سازند آغاچاری بر روی سازند آسماری و همراه با چینه‌های رشدی مشاهده می‌شود (شکل ۸) در حالی که در یال شمالی و، توالی عادی سازندها پس از آسماری (البته با چینه‌های رشدی در گروه فارس) دیده می‌شود. این

### هندسه تاقدیس نره

هندسه تاقدیس نره در خط لرزه‌نگاری و برش ساختاری نشان داده شده است (شکل‌های ۶ و ۷). در بخش‌های غربی در یال جنوبی تاقدیس،

افق راهنما تفسیر شده‌اند و سازند دشتک به عنوان افق گسسته میانی عمل کرده است که دچار افزایش ضخامت شده و از سازند آسماری به بعد و در سازندهای جوان‌تر چینه‌های رشدی مشاهده می‌گردد (شکل ۶).

بر اساس برش ساختاری، این تاقدیس به دلیل عملکرد افق‌های جدایش میانی چند محوره است و گسلی که در یال جنوبی این تاقدیس وجود دارد، در افق دشتک محو می‌گردد و گسل دیگری در همین یال وجود دارد که تا افق هرمز ادامه دارد و سبب شیب زیادتر یال جنوبی گردیده است. بر اساس برش ساختاری، هندسه تاقدیس در زیر افق دشتک با هندسه تاقدیس در بالای این افق تفاوت دارد که نشانه عملکرد این افق به عنوان افق جدایش میانی است. بعد از منطقه محوری این تاقدیس در یال جنوبی، گسل‌های نرمال وجود دارند که این گسل‌ها در ابتدا در ناحیه محور تاقدیس تشکیل شده‌اند و سپس به یال جنوبی مهاجرت کرده‌اند و این می‌تواند شاهد خوبی از مهاجرت لولا باشد (شکل ۷).

پدیده می‌تواند در اثر عملکرد گسل پی‌سنگی یاد شده پس از رسوب‌گذاری سازند آسماری باشد. به طوری که با چین‌خوردگی ساختمان پس از رسوب‌گذاری سازند آسماری، شیب‌دار شدن بخش جنوبی تاقدیس اتفاق افتاده و عدم رسوب‌گذاری سازندهای میشان و گچساران در بخش‌هایی از یال جنوبی، باعث گردیده که لایه‌های ماسه‌سنگی آجاجاری در یال جنوبی به صورت onlap بر روی لایه‌های آسماری قرار گیرند. با این حال در یال شمالی، توالی گچساران میشان و آجاجاری بصورت عادی همراه با چینه‌های رشدی رسوب‌گذاری کرده‌اند که بیانگر فعالیت کوهزایی در زمان رسوب‌گذاری این سازندها است. وجود گسل پی‌سنگی و فعال بودن آن در زمان چین‌خوردگی سبب چین‌خوردگی زود هنگام ساختارهای شمالی این گسل نسبت به ساختمان‌های مجاور شده است. وجود چینه‌های رشدی در سازندهای آجاجاری و بختیاری نیز تدوام چین‌خوردگی تا زمان پلیوسن و پلیوستوسن را نشان می‌دهد. ارتباط تاقدیس‌های نره و تخته در افق دهرم از طریق ناودیس بین دماغه شرقی تاقدیس نره و دماغه غربی تاقدیس تخته و در عمق بیش از ۳۶۰۰ متری است. در این تاقدیس و در تفسیر خطوط لرزه‌ای، افق‌های آسماری، سروک، داریان، سورمه، دشتک و کنگان به عنوان

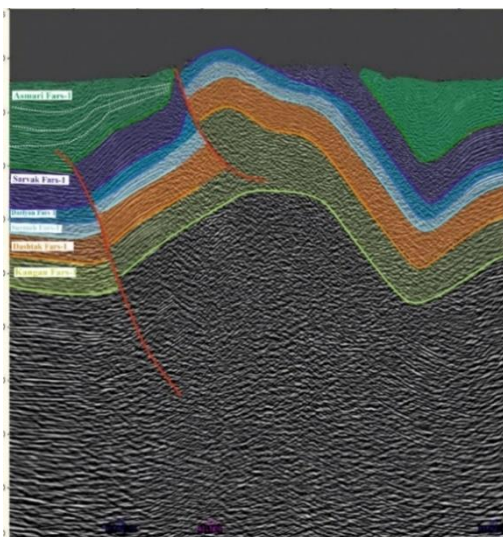
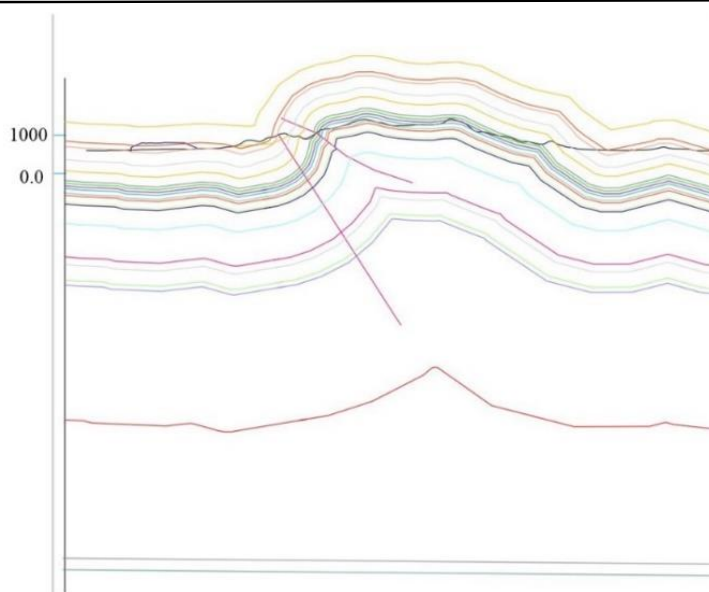


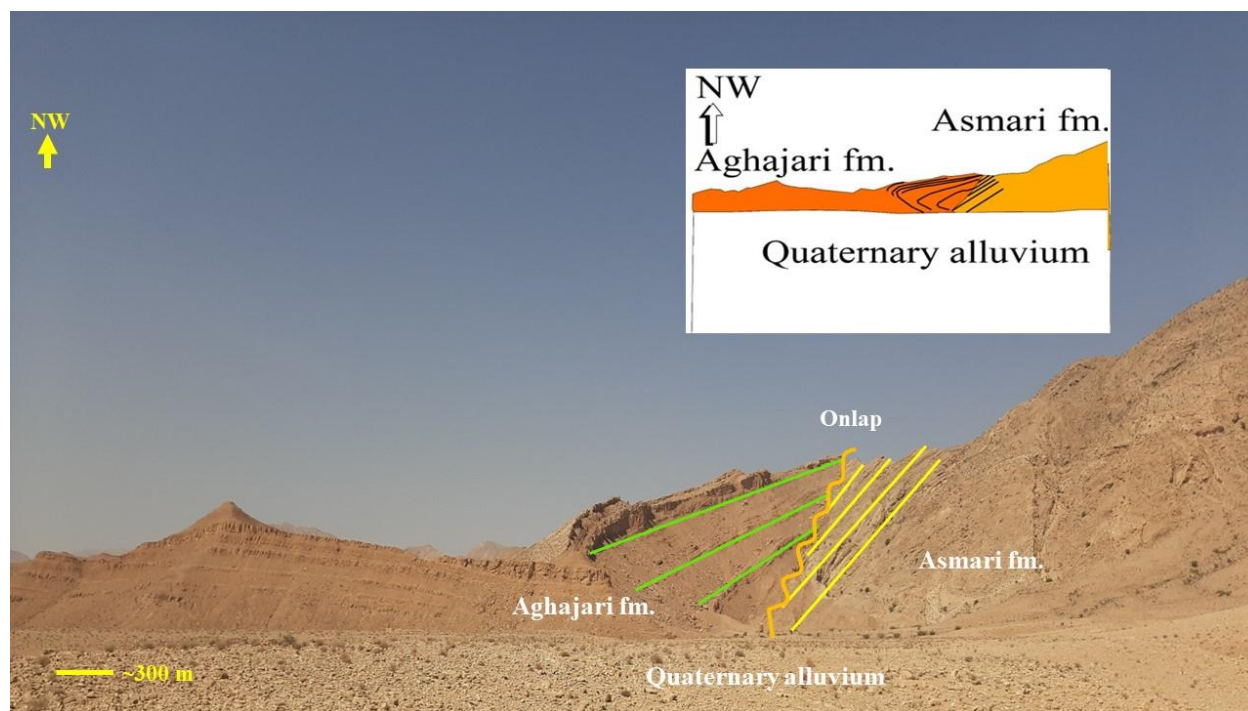
Fig.6. Seismic line 92LN07, Nahreh anticline.

شکل ۶-خط لرزه‌نگاری 92LN07، تاقدیس نره



شکل ۷- برش ساختاری F- F' ترسیم شده از تاقدیس نره.

Fig.7. F-F' structural section drawn from the Nahreh anticline.



شکل ۸ - پیش‌نشینی (onlap) سازند آغاچاری بر روی سازند آسماری، دید عکس به سمت شمال غرب.

Fig.8. Onlap of the Aghajari Formation on the Asmari Formation, view to the northwest.



شکل ۹. چینه‌های رشدی در سازند بختیاری، یال جنوبی تاقدیس نره، دید عکس به سمت غرب

Fig.9. Growth strata in the Bakhtiary Formation, southern side of the Nahreh anticline, view to the west.

که هرچه اصطکاک با حضور یک واحد شکل‌پذیر کاهش یابد تقدم زمانی توسعه چین‌خوردگی به گسلش افزایش می‌یابد (Mitra, 2003; Hughes, 2013). لایه‌های نمک‌دار سازند سری هرمز به سن ایدیاکارن - کامبرین پیشین یا معادل‌های جانبی آن به عنوان افق اصلی سطح گسستگی پایینی دارای خواص الاستیکی و شکل‌پذیر پوشاننده پی‌سنگ برای پهنه فارس پیشنهاد شده‌اند (Jackson, 1980; Berberian, 1995; Talbot and Alavi, 1996). در ساده‌ترین حالت عملکرد یک لایه نامقاوم قاعده‌ای مانند نمک به عنوان یک سطح گسستگی قاعده‌ای در زیر یک واحد مقاوم و ضخیم مانند کربنات‌ها و ماسه‌سنگ‌ها سبب مهاجرت شکل‌پذیر لایه نامقاوم قاعده‌ای به طرف هسته تاقدیس‌ها در طی پیشرفت کوتاه‌شدگی و رشد تاقدیس‌ها و فروافتادگی ناودیس‌های محصور کننده آن می‌شود. چین‌های گسسته ممکن است در مراحل پیشرفت دگر ریختی با گسلش همراه شوند (Motamedi and Pour Kermani, 2006) که در این حالت به آن چین جدایشی گسل خورده گفته می‌شود (شکل ۱۰). با توجه به برش ساختاری ترسیم شده، تاقدیس نره یک چین جدایشی نامتقارن با لایه جدایشی نازک و از نوع یک مطابق با Mitra (2002) است.

در بخش‌های غربی ساختار، در یال جنوبی تاقدیس، سازند آجاجاری بر روی سازند آسماری همراه با چینه‌های رشدی (Growth strata) مشاهده می‌شود. چینه‌های رشدی نشان از فعالیت چین‌خوردگی در زمان رسوب‌گذاری این سازند دارد. پیش‌نشینی سازند آجاجاری بر روی سازند آسماری در یال جنوبی تاقدیس نره می‌تواند در اثر عملکرد گسل پی‌سنگی پس از رسوب‌گذاری سازند آسماری و چین‌خوردگی و سپس فرسایش سازندهای قبیل‌تر از سازند آجاجاری باشد و هنگام برخاستگی تاقدیس، ماسه‌سنگ سازند آجاجاری به صورت چینه‌های رشدی بر روی سازند آسماری رسوب‌گذاری کرده است (شکل ۸ و ۹). وجود چینه‌های رشدی در سازندهای آجاجاری و بختیاری تا دوام چین‌خوردگی تا زمان پلیوسن و پلیوستوسن را نشان می‌دهد.

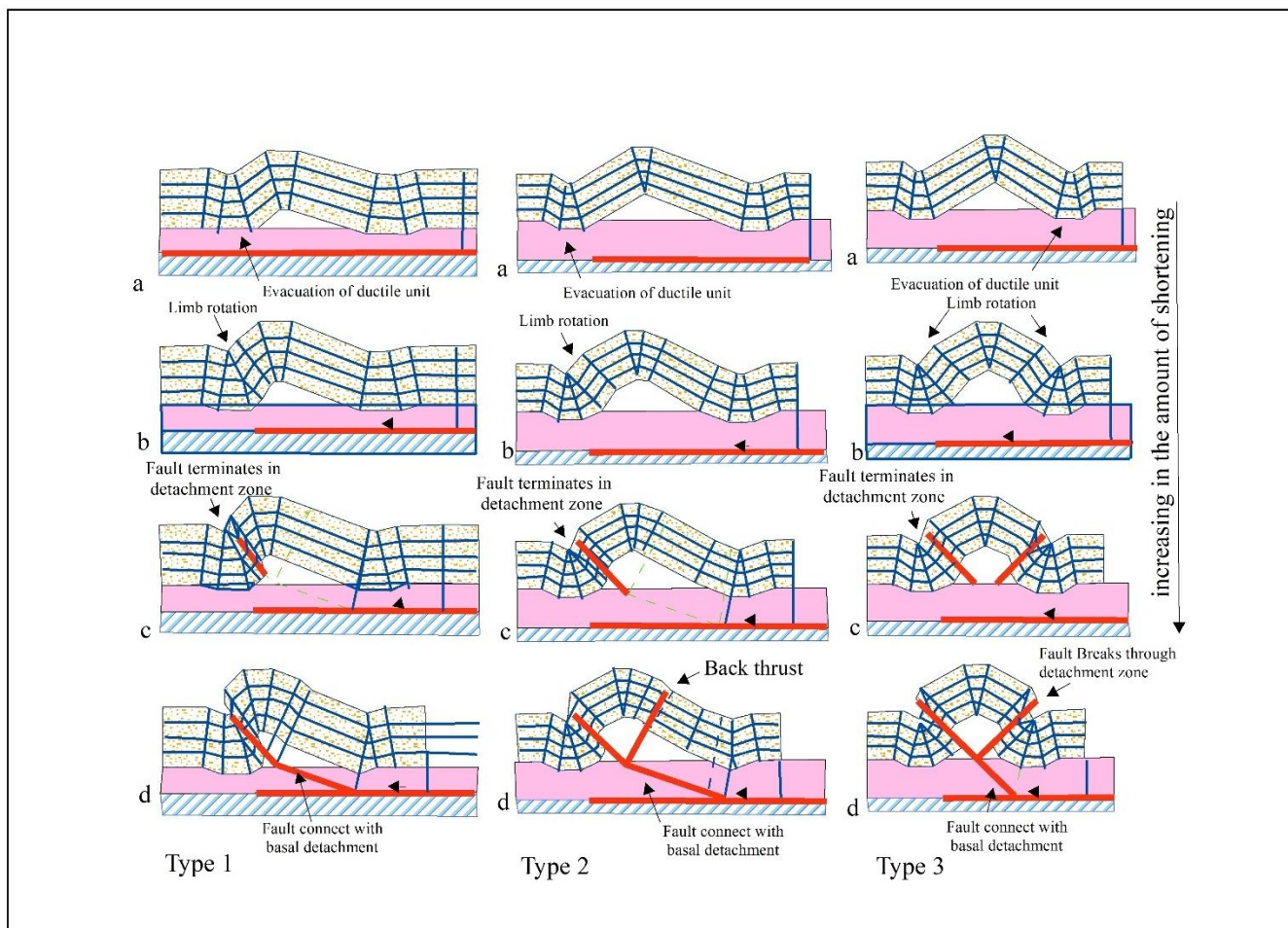
## بحث

تاریخچه تحولات یک حوضه رسوبی شامل حوادث زمین‌شناسی است که در طول زمان بر حوضه رسوبی اثر کرده و تغییراتی در نوع رسوبات، نرخ رسوب‌گذاری و شرایط حاکم بر حوضه رسوبی ایجاد کرده است. چین‌خوردگی در کمربندهای چین و راندگی وابسته به میزان اصطکاک بوده است که در قاعده رسوبات در حال کوتاه‌شدگی وجود دارد به گونه‌ای

## هندسه چین‌های رشدی

که اینچنین هندسه‌ای یا بدلیل مهاجرت لولا (a)، یا بدلیل چرخش یال‌ها حول محور ثابت (b) مطابق مدل رافینی و مرسیر (Rafini and Mercier, 2002) می‌تواند ایجاد گردد (شکل ۱۱). خطوط ۱ تا ۵ به صورت شماتیک تکامل یال چین را در طبقات قبل از رشد نشان می‌دهد (شکل ۱۱). در طبیعت، نمونه‌های کمی وجود دارد که هندسه چین‌های رشدی را نشان دهد. اکثر مطالعاتی که انجام شده‌اند روی یک یال متمرکز شده‌اند و رابطه بین هندسه چین‌های رشدی و مدل چین را نشان نمی‌دهند. در اکثر اوقات هندسه چین‌های رشدی به طور کامل و در دو طرف یال چین مشاهده نمی‌گردد. چین‌های رشدی یکی از ویژگی‌های هندسی ارزشمند در یال چین‌هاست که عموماً در زمان رخمون‌یافتن چین‌ها، در معرض فرسایش شدید قرار می‌گیرند (Mercier et al., 2007). برای حل این مشکل، خطوط بریدگی فرسایش عمیق در مدل اصلی رافینی و مرسیر (Rafini and Mercier, 2002) اعمال شد. نتایج نشان می‌دهد که تشخیص تفاوت بین دو مدل سینماتیکی در بازدهی‌های صحرایی بر این اساس بسیار دشوار است، زیرا تفاوت در شیب‌ها آنقدر کوچک است که در اندازه‌گیری‌های میدانی (یا با چشم غیرمسلح) قابل تشخیص نیست. با این حال، با استفاده از نموداری که شیب چین‌های رشدی را در مقابل تعداد یا ضخامت لایه‌ها قرار می‌دهد، می‌توان تفاوت بین مدل‌ها (مهاجرت لولا و چرخش یال) را تشخیص داد.

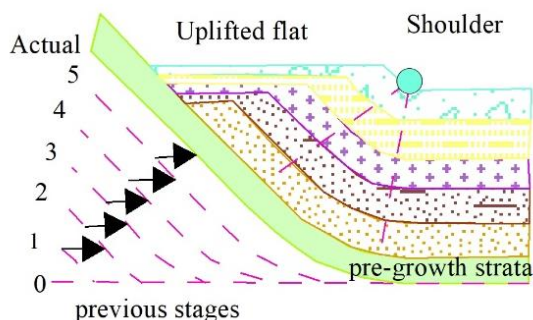
ناپیوستگی در چین‌های رشدی ناشی از ویژگی سینماتیک چین‌ها است. به دلیل مهاجرت محور کینک‌باندها، تاقدیس و چرخش پیشرونده یال، سه نوع ناپیوستگی چین‌های رشدی شناسایی شده‌اند (Hardy and Poblet, 1994): ۱- چین‌های رشدی مربوط به مهاجرت محور کینک‌باند در تاقدیس‌های فعال. ۲- چین‌های رشدی مربوط به مهاجرت محور کینک‌باند در ناودیس فعال و ۳- لایه‌های رشدی مربوط به چرخش یال زمان چین‌خوردگی در پیش‌بوم. مدل‌های سینماتیکی الگوهای پیش‌نشینی (onlapping) در چین‌های رشدی را نشان می‌دهند که با مهاجرت محور کینک‌باند و چرخش یال ایجاد می‌شوند (Hardy and Poblet, 1994). مفهوم نظری هندسه چین‌های رشدی برای تمایز سینماتیک لولا استفاده شده است. لولاهای ثابت چین‌های جدایشی ناهماهنگی هستند که عمدتاً با چرخش یال در اطراف لولاهای ثابت مشخص می‌شوند. مثال‌های کمی از این چین‌های جدایشی وجود دارد (مثلاً Epard and Groshong, 1995). با این حال، لولاهای متحرک معمولاً به چین‌های مرتبط به گسل مربوط می‌شوند (Homza and Wallace, 1995; Epard and Groshong, 1995; Poblet and McClay, 1996; Storti and Poblet, 1997; Salvini and Storti, 2002). ایجاد چین‌های رشدی ناشی از تغییر موقعیت لولای چین می‌باشد بدین ترتیب



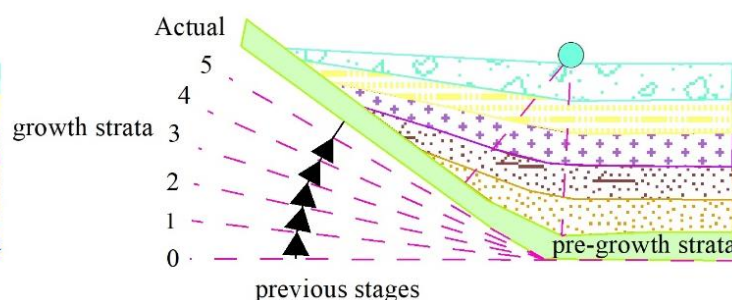
شکل ۱۰- نقش لایه‌های نامقاوم و هندسه گسل‌ها بر مکانیسم چین‌خوردگی و الگوی تکاملی جنبشی چین‌های جدایشی گسل خورده (Mitra, 2002). چین جدایشی نامتقارن با واحد نازک نامقاوم در نوع یک. چین جدایشی نامتقارن با واحد ضخیم نامقاوم نوع دو. چین جدایشی متقارن نوع سه. در هر مدل از a تا d مقدار کوتاه شدگی افزایش می‌یابد: ۱- شکل‌گیری چین اولیه، ۲- رشد چین با چرخش پیش‌یال، ۳- انتشار گسل در واحدهای مقاوم، ۴- اتصال گسل به افق جدایشی (Mitra, 2002).

Fig.10. The role of non-resistant layers and the geometry of faults on the mechanism of folding and the kinematic evolution pattern of faulted detachment folds (Mitra, 2002). Asymmetric detachment fold with thin incompetent unit in type one. Asymmetric detachment fold with type two thick incompetent unit. Symmetric detachment fold type three. In each model from a to d, the amount of shortening increases: 1. the formation of the initial fold, 2. the growth of the fold with the rotation of the front edge, 3. the propagation of the fault in the competent units, 4. the connection of the fault to the detachment horizon (Mitra, 2002).

## a: hinge migration



## b: limb rotation around fixed hinge

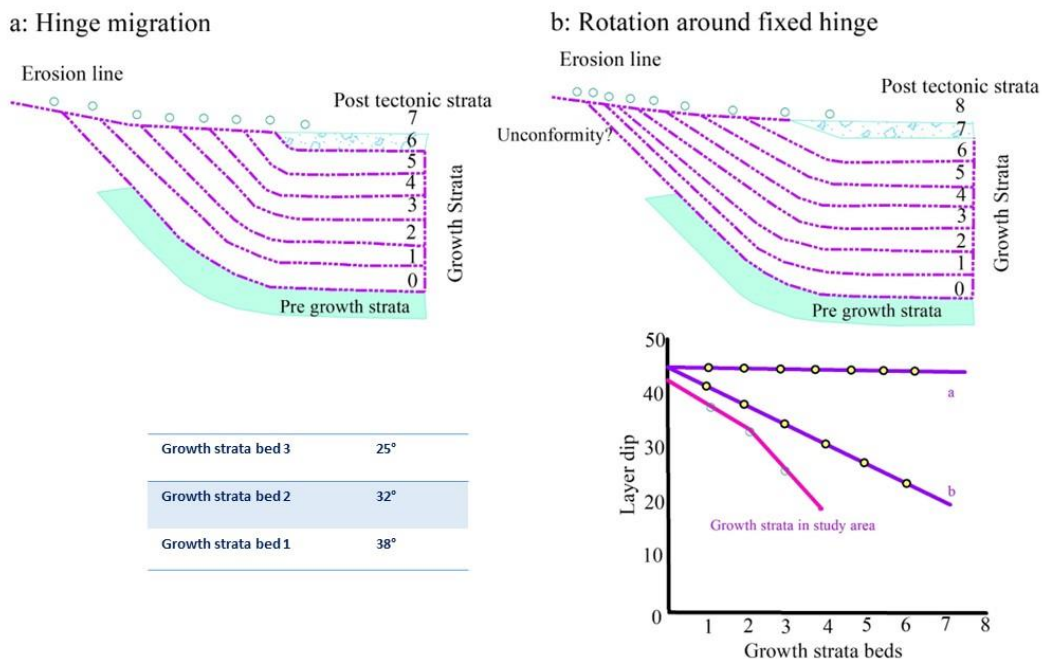


شکل ۱۱- هندسه مورد انتظار در طبقات رشد به دست آمده با جنبش مختلف لولا. a- با مهاجرت لولا. b- با چرخش یال حول محور ثابت (Ahmadi et al., 2013). خطوط ۱ تا ۵ به طور شماتیک تکامل یال چین را در طبقات قبل از رشد نشان می‌دهد.

Fig. 11. Expected geometry in growth strata obtained with different hinge kinematics. a) with hinge migration, b) with limb rotation around fixed hinges (Ahmadi et al., 2013). Lines 1–5 show schematically the evolution of the fold limb in the pre-growth strata.

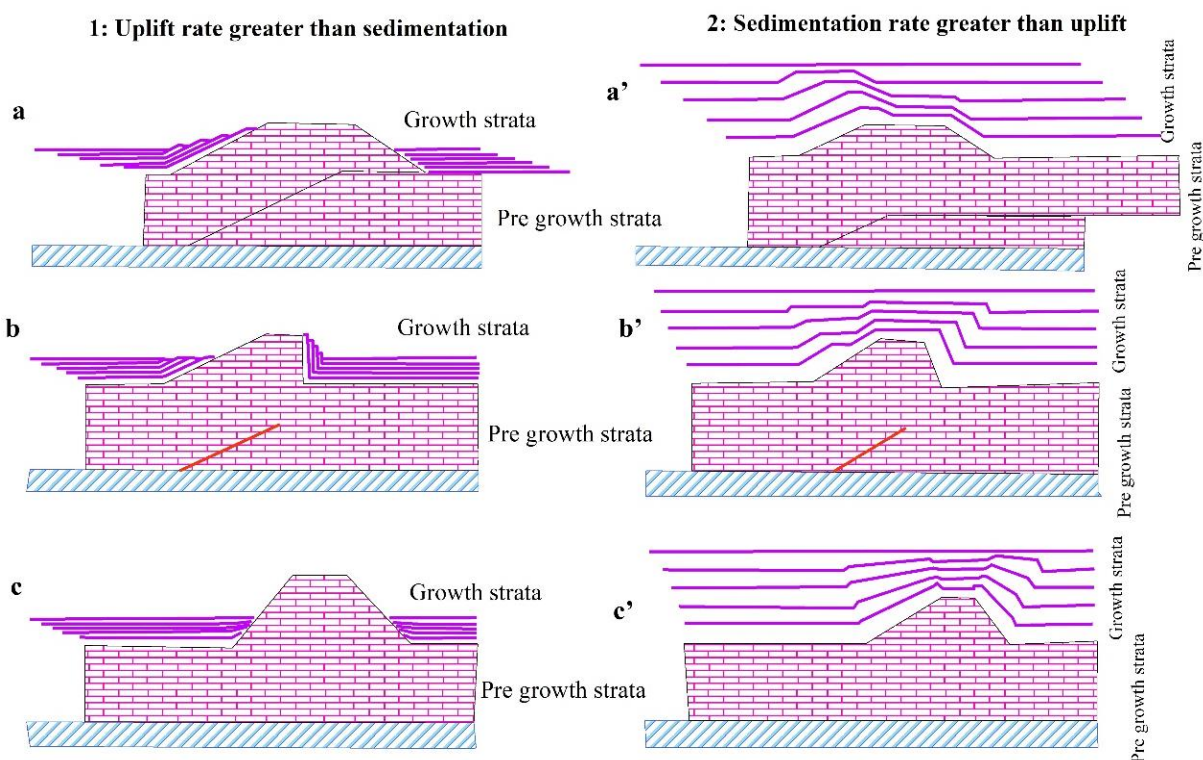
چین را کنترل می‌کند. با نسبت بالای رسوب‌گذاری به بالاآمدگی ( $R > 1$ ) ساختار تاقدیس در کف حوضه زیر چینه‌های رشدی غوطه‌ور می‌ماند (شکل ۱۳). این امر به ویژه در مورد تاقدیس‌های دور از ساحلی با دامنه کم، همانطور که در بسیاری از پروفیل‌های لرزه‌ای دیده می‌شود، صادق است. نسبت‌های کم رسوب به بالاآمدگی ( $R < 1$ ) معمولاً باعث می‌شود ساختار تاقدیس از حوضه بیرون بیاید (شکل ۱۳). این مورد برای بیشتر چین‌های قاره‌ای موجود در طبیعت صادق است. سری رسوبی چینه‌های رشدی در اثر فرآیندهای فرسایشی ایجاد شده و عمدتاً شامل رسوبات آواری است که در چنین مواردی، چینه‌های رشدی در معرض فرسایش عمیق هستند. با توجه به مطالعات صورت گرفته تاقدیس نره با مدل C چین‌های جدایشی و با نسبت بالاآمدگی بیشتر به رسوب‌گذاری مطابق (شکل ۱۳) همخوان است.

مدل مهاجرت لولا، با شیب چینه‌های رشدی ثابت، حتی در جدیدترین لایه‌ها مشخص می‌شود. در حالی که مدل چرخش یال، کاهش تدریجی شیب چینه‌های رشدی را با نزدیک شدن به خط لولا نشان می‌دهد. در این مطالعه نیز با توجه به اندازه‌گیری مقدار شیب چینه‌های رشدی و ترسیم آن و مقایسه با مدل‌های ارائه شده، سازوکار چرخش حول لولای ثابت را نشان می‌دهد (شکل ۱۲). سایر پارامترهای مهم مانند نرخ رسوب و نرخ بالا آمدن را می‌توان با همان واحدهای نرخ رسوب (به عنوان مثال  $m/Ma$ ) بیان کرد. این میزان بالاآمدگی وابسته به کوتاه شدن افقی است که نرخ تغییر شکل است. با این حال، برای مهاجرت لولای چین‌ها، نرخ بالاآمدگی وابسته به شیب یال است که در نتیجه سبب تبدیل آن‌ها به چین‌های نامتقارن می‌شود. نسبت نرخ رسوب‌گذاری به نرخ بالاآمدگی ( $R$ ) مورفولوژی



شکل ۱۲- شیب خطوط لایه‌های چینه‌های رشدی در موارد فرسایش عمیق. a- با مهاجرت لولا. b- با چرخش یال حول لولای ثابت (Ahmadi et al., 2013). مقدار شیب چینه‌های رشدی در منطقه مورد مطالعه اندازه‌گیری شده و در نمودار با رنگ قرمز ترسیم شده است.

Fig. 12. Dip trend lines of growth strata layers in deep erosion cases. a) with hinge migration, b) with limb rotation around fixed hinge (Ahmadi et al., 2013). The slope of the growth strata in the study area was measured and plotted in red color in the image.



شکل ۱۳- نمونه‌هایی از مدل‌های چین خوردگی و هندسه چینه‌های رشدی مورد انتظار آن‌ها. مورد ۱ هندسه‌هایی را توصیف می‌کند که نرخ بالا آمدگی بیشتر از نرخ رسوب‌گذاری است که باعث می‌شود همه انواع چین‌ها در سطح نمایان شوند. مورد ۲ زمانی به دست می‌آید که نرخ رسوب‌گذاری بیشتر از بالا آمدگی تکتونیکی باشد و چین از حوضه بیرون نمی‌آید (Rafini and Mercier, 2002). مدل‌های a - a' چین خم گسلی، b - b' چین انتشار گسلی و مدل‌های c - c' چین جدایشی.

Fig. 13. Examples of fold models and their expected growth strata geometry. Case 1 describes geometries when the uplift rate is greater than the sedimentary rate (which causes all fold types to emerge at the surface). Case 2 is obtained when the sedimentation rate is greater than tectonic uplift, and the fold does not emerge from the basin (the case treated here using modelling software developed from Rafini and Mercier (2002)). Models a and a' are fault-bend fold, models b and b' are fault-propagation fold and models c and c' are detachment fold.

سازندهای گروه خامی شده است و شیب زیاد سازند بختیاری نیز نشانگر عملکرد این گسل بعد از نهشته شدن سازند بختیاری است. حضور چینه‌های رشدی در خطوط لرزه‌ای و عملیات صحرایی در سازندهای جوان آغاچاری و بختیاری و پیش‌نشینی (Onlapping) سازند آغاچاری بر روی آسماری در یال جنوبی تاقدیس نره می‌تواند در اثر عملکرد گسل پی‌سنگی پس از رسوب‌گذاری سازند آسماری باشد. پس از چین خوردگی و فرسایش سازندهای قدیمی‌تر، هنگام برخواستگی تاقدیس، ماسه‌سنگ سازند آغاچاری به طور onlap بر روی سازند آسماری رسوب‌گذاری کرده است. وجود

## نتیجه‌گیری

تاقدیس نره در سطح و بر روی رخنمون ایلام - سروک دارای دو محور است که آن‌ها نیز به صورت آرایش نردبانی راست‌بر نسبت به هم قرار گرفته‌اند. تاقدیس نره یک چین نامتقارن با شیب بیشتر در یال جنوبی است. گسل معکوس یال جنوبی این تاقدیس سبب افزایش شیب و جا به جایی سازندها شده است. یال جنوبی تاقدیس نره از یک گسل راندگی متأثر شده است. در بخش شرقی یک گسل با حرکت راستالغز سبب رخنمون



- Empirical Studies. Harvard University PhD Dissertations. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.03.019>.
- Jackson, J. A., 1980. Reactivation of basement faults and crustal shortening in orogenic belts. *Nature*. Vol. 283, 343-346. <https://doi.org/10.1038/28334a0>.
- Jahani, S., 2008. Salt tectonics, folding and faulting in the eastern Fars and southern offshore provinces (Iran). PhD Thesis. Universite de Cergy- Pontoise.
- Kent, P.E., 1979. The emergent Hormuz salt plugs of southern Iran. *Journal of Petroleum Geology*. Vol. 2, 117-144. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.1979.tb00698.x>.
- Livio, A., Berlusconi, A., Alessandro, M., Michetti, A., Sileo, G., Zerboni, A., 2009. Active fault-related folding in the epicentral area of the December 25, 1222 (Io = IX MCS) Brescia earthquake (northern Italy): seismotectonic implications. *Tectonophysics*. Vol. 476, 320-335.
- Maurer, F., Martini, R., Rettori, R., Hillgartner, H., Cirilli, S., 2009. The geology of Khuff outcrop analogues in the Musandam Peninsula. United Arab Emirates and Oman. *GeoArabia*. Vol. 14, 125-158. <https://doi.org/10.1007/s12517-010-0198-y>.
- Mercier, E., Rafini, S., Ahmadi, R., 2007. Folds kinematics in "folds and thrust belts" The "hinge migration" question. A review. *Thrust belts and foreland basins part IV. Structural modeling/restoration*. Springer 135-147. [https://DOI:10.1007/978-3-540-69426-7\\_7](https://DOI:10.1007/978-3-540-69426-7_7).
- Mitra, S., 2002. Structural models of faulted detachment folds. *AAPG Bulletin*. Vol. 86, 173- 1694. <https://doi.org/10.1306/61EEDD3C-173E-11D7-845000102C1865D>.
- Mitra, S., 2003. A Unified Kinematic Model for the Evolution of Detachment Folds. *Journal of Structural Geology*. Vol. 25, 1659-1673. [http://dx.doi.org/10.1016/S0191-8141\(02\)00198-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00198-0).
- Motamedi, H., Pour Kermani, M., 2006. The role of intermediate detachment levels in variation of structural style over the Gavbandi paleo high (southern Zagros fold-thrust belt). *Journal of sciences (Islamic Azad University)*.
- Motamedi, H., Sherhati, S., Sepehr, M., 2012. Structural style variation and its impact on hydrocarbon traps in central Fars. Southern Zagros folded belt Iran. *Journal of structural geology*. Vol. 377, 124- 133. <https://doi.org/10.101/j.jsg.2012.01.021>.
- Muller, K., Suppe, J., 1997. Growth of Wheeler Ridge anticline, California: geomorphic evidence for fault-bend folding behaviour during earthquakes. *Journal of Structural Geology*. Vol. 19(34), 383-396. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(96\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(96)00112-5).
- Petrokav Zagros., 2012. Marand 1:50,000 Geological map. National Iranian Oil Company Exploration Directorate.
- Poblet, J., Hardy, S., 1995. Reverse modelling of detachment folds; application to the Pico del Aguila anticline in the South Central Pyrennes (Spain). *Journal of Structural Geology*. Vol. 17, 1707-1724. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(95\)00059-M](https://doi.org/10.1016/0191-8141(95)00059-M).
- Poblet, J., McClay, K., 1996. Geometry and kinematics of single layer detachment folds. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. Vol. 80(7), 1085-1109. <https://doi.org/10.1306/64ED8CA0-1724-11D7-8645000102C1865D>.
- Rahimpour, H., Esrafilizadeh, B., Tavakoli, V., 2010. Dolomitization and Anhydrite precipitation in Permo-Triassic carbonates at the South Pars gas field, offshore Iran. controls on reservoir quality. *Journal of Petroleum Geology*. Vol. 33, 43-66. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.2010.00463.x>.
- Rafini, S., Mercier, E., 2002. Forward modelling of foreland basins progressive unconformities. *Sedimentary Geology*. 146, 75-89. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00167-1](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00167-1).
- Salvini, F., Storti, F., 2002. Three-dimensional architecture of growth-strata associated to fault-bend, fault-propagation and decollement anticlines in non-erosional environments. *Sedimentary Geology*. Vol. 146, 57-73. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00166-X](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00166-X).
- Salvini, F., Storti, F., McClay, K., 2001. Self-determining numerical modeling of compressional fault-bend folding. *Geology*. Vol. 29, 839-842. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0839:SDNMOC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0839:SDNMOC>2.0.CO;2).
- Shaw, J. H., Suppe, J., 1994. Active faulting and growth folding in the eastern Santa Barbara Channel. *California Geological Society of America Bulletin*. Vol. 106, 607-626. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1994\)106<0607:AFAGFI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1994)106<0607:AFAGFI>2.3.CO;2).
- Soleimany, B., Poblet, J., Bulnes, M., Sàbat, F., 2011. Fold amplification history unravelled from growth strata: the Dorood anticline, NW Persian Gulf. *Journal of the Geological Society*. Vol. 168(1), 219-234. <https://doi.org/10.1144/0016-76492010-085>.
- Storti, F., Poblet, J., 1997. Growth-stratal architectures associated to decollement folds and fault-propagation folds. Interferences on fold kinematics. *Tectonophysics*. Vol. 282, 353-373. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(97\)00230-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00230-8).
- Suppe, J., Sabat, F., Munoz, J. A., Poblet, J., Roca, E., & Verge, J. 1997. Bed-by-bed fold growth by kink-band migration. Sant Llorenç, de Morunys, eastern Pyrenees.

- Journal of Structural Geology. Vol. 19(34), 443–461. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(96\)00103-4](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(96)00103-4).
- Szabo, F., Kheradpir, A., 1978. Permian and Triassic stratigraphy. Zagros basin. south-west Iran. Journal of petroleum Geology. Vol. 1, 57-82. [https://DOI: 10.4236/ojg.2016.69086](https://DOI:10.4236/ojg.2016.69086).
- Talbot, C. L., Alavi, M., 1996. The past of a future syntaxis across the Zagros. in: Alsop, G. L., Blundell, D.L., Davison, I. (Eds). Salt Tectonics. Vol. 100. Geol. Soc. London Spec Pub. PP. 89-109. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1996.100.01.08>.
- Tavani, S., Storti, F., Salvini, F., 2007. Modelling growth-stratal architectures associated with double edge fault-propagation folding. Sedimentary Geology. Vol.196, 119–132. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2006.04.001>.
- Valero, L., Soleimany, B., Bulnes, M., Poblet, J., 2015. Evolution of the Nourooz anticline (NW Persian Gulf) deciphered using growth strata. Structural inferences to constrain hydrocarbon exploration in Persian offshore anticlines. Marine and Petroleum Geology. Vol. 66, 873-889. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.07.029>.
- Vergés, J., Marzo, M., Muñoz, J. A., 2002. Growth strata in foreland settings: Sedimentary Geology. Vol. 146, 1-9. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00162-2](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00162-2).
- Wang, W., Kano, A., Okumura, T., Ma, Y., Matsumoto, R., Matsuda, N., Ueno, K., Chen, X., Kakuwa, Y., Mahmudy Gharaie, M., Ilkhchi, M., 2007. Isotopic chemostratigraphy of the microbialite-bearing Permian-Triassic boundary section in the Zagros Mountains, Iran. Chemical Geology, Vol. 244(3–4), 708–714.
- Wickham, J., 1995. Fault displacement-gradient folds and the structure at Lost Hills. California (USA). Journal of Structural Geology. Vol. 17(9), 1293–1302. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(95\)00029-D](https://doi.org/10.1016/0191-8141(95)00029-D).
- Zapata, T. R., Allmendinger, R. W., 1996. Growth-stratal records of instantaneous and progressive limb rotation in the Precordillera thrust belt and Bermejo basin, Argentina. Tectonics. Vol.15, 1065–1083. <https://doi.org/10.1029/96TC00431>.
- Zoetmeijer, R., 1993. Tectonic modelling of foreland basins. Published PhD thesis. Amsterdam. University of Vrije.