

## ارزیابی میزان فعالیت گنبد‌های نمکی منطقه لارستان با استفاده از شاخص‌های تکتونیکی و روش سری

### زمانی SBAS

افشان قاسمی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.  
محمدرضا ثروتی - استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.  
شهرام بهرامی\* - دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.  
بهمن رحیم زاده - استادیار زمین‌شناسی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۲۱      تأیید نهایی: ۱۳۹۸/۱۰/۲۸

### چکیده

گنبد‌های نمکی به عنوان یکی از رخداد‌های مهم زمین ریخت‌شناسی ضمن بالآمدن با حوادث مهمی همراه هستند که مطالعه آن‌ها می‌تواند در درک رخداد‌های مانند دی‌پایرسم، عملکرد ساختاری، تشکیل مخروط افکنه‌ها مارا یاری دهد. علاوه بر این، گنبد‌ها دارای اهمیت‌های مختلف اقتصادی، گردشگری، علمی و ... هستند که ارزیابی فعالیت‌های آن‌ها در برنامه‌ریزی‌ها و فعالیت‌های مختلف علمی بسیار حائز اهمیت است. در این تحقیق پس از شناسایی و مورفومتری گنبد‌های نمکی منطقه لارستان (با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰)، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ و تصاویر گوگل ارث)، با استفاده از ۹ شاخص دایره‌واری (C)، شاخص برافراشتگی (Bh)، شاخص کشیدگی (Bs)، شاخص انتگرال هیپسومتری (Hi) و مساحت زیر منحنی هیپسومتری (y)، شاخص نسبت انشعاب (BR)، شاخص میانگین طول آبراهه درجه ۱ (LN1)، شاخص تراکم زهکشی (Dd) و شاخص فرکانس آبراهه (Fs) به ارزیابی وضعیت فعالیت گنبد‌ها پرداخته شده است و سپس با استفاده از ۲۷ تصویر راداری (از تاریخ ۲۰۱۴/۱۰/۱۴ تا ۲۰۱۶/۱۰/۲۷) و روش سری زمانی SBAS، میزان جابجایی عمودی منطقه محاسبه شده است. نتایج حاصله بیانگر این است که در میزان جابجایی عمودی منطقه علاوه بر حرکت گنبد‌های نمکی، عوامل تکتونیکی، فرسایش و فرورانشست نیز تاثیرگذار بوده است. در واقع نتایج محاسبه شاخص‌ها حاکی از فعال بودن برخی از گنبد‌های نمکی است و نتایج حاصل از روش سری زمانی SBAS نیز بیانگر جابجایی عمودی منطقه و فعال بودن منطقه از نظر تکتونیکی است. اما با توجه به اینکه بعضی از گنبد‌ها نمکی از جمله گنبد چهل که در محاسبه شاخص‌ها دارای امتیاز بالایی بوده ولی در نتیجه حاصله از طریق سری زمانی SBAS در محدوده فرورانشست قرار داشته است، می‌توان گفت که علاوه بر ویژگی خاص گنبد‌های نمکی، عوامل دیگری نیز مانند فرورانشست ناشی از افت آب‌های زیرزمینی و عوامل تکتونیکی، فرسایش و ... نیز در میزان بالآمدگی و یا فرورانشست منطقه تاثیرگذار هستند.

واژگان کلیدی: گنبد‌های نمکی، شاخص‌های تکتونیکی، SBAS، لارستان.

## مقدمه

حرکات دیابیری از مهم‌ترین رخداد‌های زمین‌شناسی است که همواره به لحاظ ریخت‌شناسی و پدیده‌های مرتبط با آن مورد بحث مورد بحث بوده است و مناطق دگرشکلی منحصر بفردی را برای بررسی‌های ساختاری فراهم می‌نماید. رسوبات تبخیری (شیل، دولومیت، گچ و نمک) و گنبد‌های نمکی همراه آن‌ها، تقریباً ۲۴ درصد از سطح قاره‌ها را در برگرفته‌اند و حتی در نیمکره شمالی این رقم به ۴۳ درصد می‌رسد (ثروتی، ۱۳۸۱). در ایران نیز، در مناطق مرکزی و زاگرس فارس، گنبد‌های نمکی بخش عمده‌ای از مناطق را در برگرفته‌اند.

گنبد‌های نمکی زاگرس فارس از یک طرف به خاطر وجود منابع معدنی و هیدروکربنی (جنیون<sup>۱</sup>، ۱۹۸۶) و پدیده‌های منحصر بفرد ژئومورفولوژیکی از لحاظ اقتصادی، زیست‌محیطی و گردشگری حائز اهمیت هستند و از طرف دیگر نیز به عنوان یک فرایند موثر در جهت مطالعات مختلف در مورد زلزله موثر هستند (بربریان<sup>۲</sup>، ۱۹۹۵؛ رامسی و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۰۸). بنابراین بررسی وضعیت تکتونیکی آن‌ها بسیار حائز اهمیت خواهد بود. ژئومورفولوژی تکتونیکی، به مطالعه فرایندهای پویا و دینامیک موثر در شکل دهی چشم اندازهای موجود در آن می‌پردازد. در سال‌های اخیر ژئومورفولوژی تکتونیکی به طور چشم‌گیر، یکی از ابزارهای عمده و اساسی و موثر در تشخیص شکل‌های تکتونیکی فعال و نقشه‌های خطر لرزه‌ای و همچنین درک و فهم تاریخچه چشم اندازهای کنونی سطح زمین بوده است (رامسی<sup>۴</sup>، ۲۰۰۸). اندازه‌گیری کمی لندفرم‌ها این امکان را به ژئومورفولوژیست‌ها می‌دهد تا نقش تکتونیکی‌های فعال را در تغییر شکل چشم اندازها بررسی کنند (کلر و پینتر<sup>۵</sup>، ۲۰۰۲). ژئومورفولوژی تکتونیکی به مطالعه لندفرم‌هایی می‌پردازد که تحت تاثیر فعالیت‌های زمین ساختی ایجاد شده‌اند. بررسی کمی لندفرم‌های مربوط به مناطق تکتونیکی فعال در بازسازی تاریخچه تکتونیکی و درک تکامل لندفرم‌ها، ابزاری بسیار مناسب است (مایر<sup>۶</sup>، ۱۹۸۶؛ اشتوبر زیسو و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۰۸). برای بررسی اثرات تدریجی تکتونیک در طی هزاران سال باید به بررسی عوارض ریخت‌شناسی پرداخت که آن‌ها را حفظ کرده‌اند. یکی از عوارضی که نسبت به تغییرات زمین‌ساختی عکس‌العمل نشان می‌دهد، گنبد‌های نمکی است که شکل و ویژگی‌های کمی آن می‌تواند تحت تاثیر تکتونیک‌های فعال باشد. با توجه به موارد مذکور، هدف از تحقیق حاضر این است که ضمن شناسایی گنبد‌های نمکی در لارستان فارس، به ارزیابی وضعیت فعالیت آن‌ها با استفاده از شاخص‌های مختلف پرداخته شود و سپس با استفاده از تصاویر راداری و روش تداخل سنجی راداری، میزان بالآمدگی گنبد‌های نمکی محاسبه و با نتایج حاصله از شاخص‌های تکتونیکی مقایسه شود.

در مورد گنبد‌های نمکی و حرکات تکتونیکی تحقیقات مختلفی صورت گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

تالبوت<sup>۸</sup> (۱۹۹۰) با استفاده از لرزه نگاری به بررسی گسترش ساختارهای نمکی در چند حوضه رسوبی مثل ساختارهای ژوراسیک لوآن<sup>۹</sup> در خلیج مکزیک در یک محیط دریایی و ساختارهای نمکی ایران مرکزی در یک بیابان خشک با

۱ . Jenyon

۲ . Berberian

۳ . Ramsey et al

۴ . Ramsey

۵ . Keller & Pinter

۶ . Mayer

۷ . Shtober-Zisu et al

۸ . Talbot

۹ . Loan

رسوبات در برگیرنده نرم و کم چگالی تر پرداخته است. فرویا<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۷) میزان بالآمدگی گنبد‌های نمکی کانپون‌لند در ایالت یوتای آمریکا را ۲-۳ میلی‌متر در سال برآورد کرده است. بهرامی<sup>۲</sup> (۲۰۱۳) تاثیر عوامل تکتونیکی بر مخروطه افکنه تقادیس دانه خشک در استان کرمانشاه را مورد ارزیابی قرار دادند. کولون<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۶) نیز میزان جابجایی عمودی گنبد‌های نمکی منطقه کوکا در کشور چین را ۵ سانتی‌متر در سال برآورد کرده‌اند.

محمدپناه (۱۳۹۱) میزان جابجایی گنبد‌های نمکی در گرمسار-ایوانکی را مورد مطالعه قرار داده است و نرخ بالآمدگی سالانه این گنبد‌ها را حدود ۵ سانتی‌متر در سال برآورد کرده است. سهیلی (۱۳۹۲) به مقایسه رفتار سائیزمورفوتکتونیکی ایران جنوبی و تغییر سطح اساس ناشی از دیاپیریسیم فعال در گنبد نمکی سیاهو را مورد مطالعه قرار داده است و تغییرات سالانه آن را حدود حدود ۲/۲ سانتی‌متر (بالآمدگی) برآورد کرده است. افشاری و همکاران (۱۳۹۵) میزان رشد و پیشروی گنبد نمکی گچین در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۰۶ را مورد مطالعه قرار داده و نشان داده است که این گنبد در بین سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۷ دارای ۸ میلی‌متر بالآمدگی، در بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۹ دارای ۱۵ میلی‌متر بالآمدگی و در بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۰ دارای ۱۱ میلی‌متر بالآمدگی بوده است.

#### محدوده مورد مطالعه

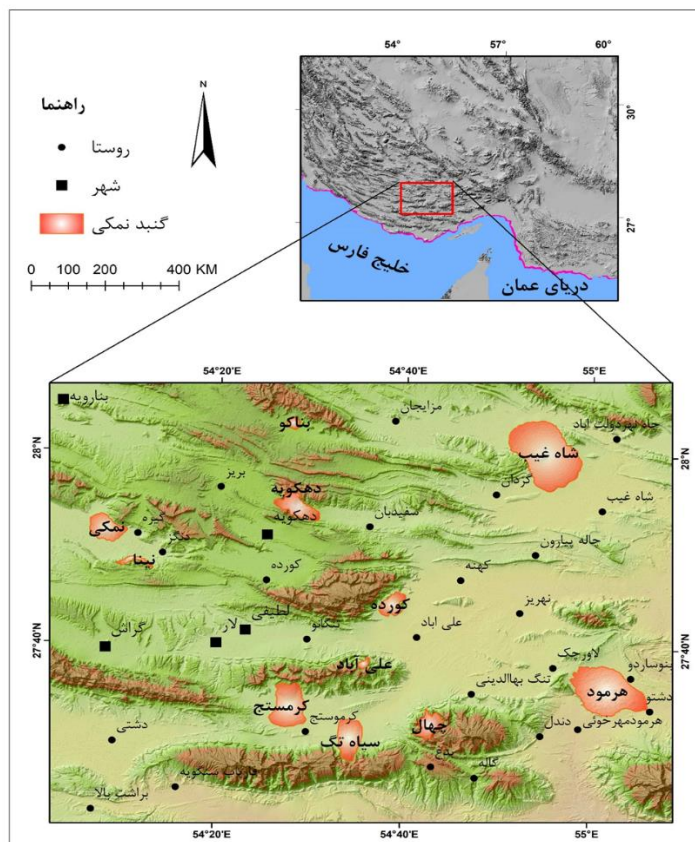
محدوده مطالعاتی در تحقیق حاضر شامل گنبد‌های نمکی منطقه لارستان است که در محدوده جغرافیای بین ۶۷° و ۲۷° عرض شمالی و ۳۴' و ۵۴° طول شرقی قرار دارد و از نظر تقسیمات سیاسی در جنوب استان فارس و شهرستان لارستان واقع شده است (شکل ۱). محدوده مطالعاتی با مساحت ۶۰۰۰ کیلومترمربع از نظر ژئومورفولوژی شامل واحد کوهستان، مخروطه‌افکنه، گنبد‌های نمکی، دشت و پادگانه‌های آبرفتی می‌باشد. جهت یافتگی کوه‌های محدوده به صورت شمال غرب-جنوب شرق و غربی-شرقی می‌باشد. این منطقه از نظر آب و هوایی نیز اقلیم نیمه خشک را دارد و دارای تابستان‌های گرم و خشک با زمستان‌های معتدل و مرطوب است. این منطقه در تقسیمات مورفوتکتونیکی که از سوی آقناباتی (۱۳۸۵) صورت گرفته است، در پهنه زاگرس استان فارس قرار دارد. گنبد‌های نمکی زاگرس فارس از سری هرمز و به سن اینفراکامبرین می‌باشند. تنها فاز کوهزایی که این زون متحمل شده است، فاز کوهزایی پسادین در زمان پلیوسن است که منجر به چین‌خوردگی تمامی واحدهای منطقه شده است (کنت<sup>۴</sup>، ۱۹۸۷). گنبد‌های نمکی مربوط به سازند هرمز، چین‌های زاگرس را بدون داشتن جهت خاصی سوراخ کرده و خود را به سطح زمین رسانده‌اند. این گنبد‌های نمکی با رسوبات دوران کرتاسه و به طور محلی با رسوبات ژورا سیک برخورد دیاپیری داشته‌اند. بنابراین سن آن‌ها از ژوراسیک قدیمی‌تر است. بطور کلی سن این تشکیلات را به پروتروزوئیک و اینفراکامبرین نسبت می‌دهند و آن را هم‌ارز تشکیلات سلطانیه در ایران می‌دانند. مجموعه درهمی از آهک، مارن، شیل، گچ و نمک عمده پوشش گنبد‌های نمکی فارس را تشکیل می‌دهد. در شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی نشان داده شده است.

۱ . Furuya et al

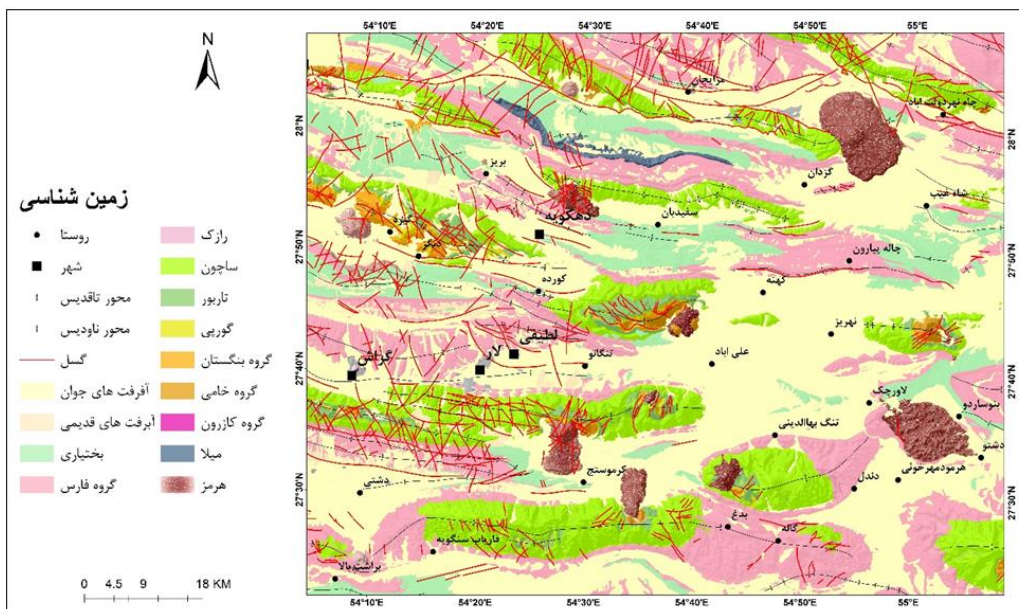
۲ . Bahrami

۳ . Colón et al

۴ . Kent



شکل ۱: نقشه موقعیت محدوده مطالعاتی



شکل ۲: نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

### مواد و روش‌ها

این تحقیق بر مبنای روش‌های توصیفی-تحلیلی و میدانی استوار است. داده‌های تحقیق شامل نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ (سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح)، نقشه‌های زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ (سازمان زمین شناسی کشور)، مدل

رقومی ارتفاعی ۳۰ متر<sup>۱</sup> SRTM، ۲۷ تصاویر راداری ماهواره سنتینل ۱<sup>۲</sup> و اطلاعات مورفومتری گنبد‌های نمکی است که از طریق بازدیدهای میدانی و استفاده از تصاویر گوگل ارث بدست آمده است. ابزارهای تحقیق نیز شامل نرم‌افزارهای GMT برای تهیه نقشه میزان جابجایی منطقه، Arc GIS جهت تهیه نقشه‌ها، گوگل ارث جهت ارزیابی وضعیت منطقه و همچنین ۹ شاخص برای ارزیابی وضعیت فعالیت گنبد‌های نمکی می‌باشد. روش انجام کار در این تحقیق در ۳ مرحله انجام شده است که در ادامه به تشریح مراحل پرداخته شده است:

**مرحله اول:** در این مرحله ابتدا اطلاعات مورفومتری مربوط به گنبد‌های نمکی جمع‌آوری شده و سپس به منظور ارزیابی وضعیت فعالیت گنبد‌های نمکی از ۹ شاخص دایره‌واری (C)، شاخص برافراشتگی (Bh)، شاخص ک‌شیدگی (Bs)، شاخص انتگرال هیپسومتری (Hi) و مساحت زیر منحنی هیپسومتری (y)، شاخص نسبت انشعاب (BR)، شاخص میانگین طول آبراهه درجه ۱ (LN1)، شاخص تراکم زهکشی (Dd) و شاخص فرکانس آبراهه (Fs) استفاده شده است. با توجه به اینکه وضعیت فعالیت هر گنبد از نظر شاخص‌های مختلف متفاوت بوده است، به منظور ارزیابی کلی گنبد‌ها از نظر تمامی شاخص‌ها، به گنبد‌های نمکی از نظر میزان فعالیت برای هر شاخص امتیاز داده شده است، در واقع امتیازدهی به صورت نسبی بوده و با توجه به اینکه در این تحقیق ۱۱ گنبد مورد ارزیابی قرار گرفته شده است، به هر گنبد از نظر وضعیت تکتونیک‌کی امتیاز ۱ تا ۱۱ داده شده و در نهایت مجموع امتیازات برای هر گنبد محاسبه شده است و به این صورت گنبد‌های نمکی از نظر میزان فعالیت بر اساس شاخص‌ها مقایسه شده‌اند.

**مرحله دوم:** در این تحقیق به منظور ارزیابی وضعیت منطقه و محاسبه میزان جابجایی عمودی آن از ۲۷ تصویر راداری ماهواره سنتینل ۱ (همه تصاویر به صورت SLC، دارای پولاریزیشن VV و حالت مداری صعودی هستند) و روش تداخل سنجی راداری و سری زمانی SBAS استفاده شده است. پس از تهیه تصاویر، به منظور ارزیابی میزان جابجایی منطقه با استفاده از روش سری زمانی SBAS، ابتدا وضعیت بیس لاین زمانی و مکانی تصاویر بررسی شده است و سپس بر اساس آن زوج تصاویر برای تشکیل اینترفروگرام انتخاب شده است. پس از تهیه نقشه‌های اینترفروگرام، نقشه نهایی میزان جابجایی عمودی منطقه در بازه زمانی ۲ ساله (۲۰۱۴/۱۰/۱۴ تا ۲۰۱۶/۱۰/۲۷) تهیه شده است. در جدول ۱ تاریخ تصاویر مورد استفاده نشان داده شده است.

جدول ۱: تاریخ تصاویر مورد استفاده

ردیف	تاریخ	ردیف	تاریخ	ردیف	تاریخ
۱	۲۰۱۴/۱۰/۱۴	۱۰	۲۰۱۵/۰۷/۰۵	۱۹	۲۰۱۶/۰۴/۱۸
۲	۲۰۱۴/۱۱/۰۷	۱۱	۲۰۱۵/۰۷/۲۹	۲۰	۲۰۱۶/۰۵/۱۲
۳	۲۰۱۴/۱۲/۰۱	۱۲	۲۰۱۵/۰۸/۲۲	۲۱	۲۰۱۶/۰۶/۰۵
۴	۲۰۱۵/۰۱/۱۸	۱۳	۲۰۱۵/۱۰/۰۹	۲۲	۲۰۱۶/۰۶/۲۹
۵	۲۰۱۵/۰۲/۱۱	۱۴	۲۰۱۵/۱۱/۲۶	۲۳	۲۰۱۶/۰۷/۲۳
۶	۲۰۱۵/۰۳/۰۷	۱۵	۲۰۱۵/۱۲/۲۰	۲۴	۲۰۱۶/۰۸/۱۶
۷	۲۰۱۵/۰۳/۳۱	۱۶	۲۰۱۶/۰۱/۱۳	۲۵	۲۰۱۶/۰۹/۰۹
۸	۲۰۱۵/۰۵/۱۸	۱۷	۲۰۱۶/۰۳/۰۱	۲۶	۲۰۱۶/۱۰/۰۳
۹	۲۰۱۵/۰۶/۱۱	۱۸	۲۰۱۶/۰۳/۲۵	۲۷	۲۰۱۶/۱۰/۲۷

۱ . <https://dwtkns.com/srtm30m/>۲ . <https://scihub.copernicus.eu>



**مرحله سوم:** پس از محاسبه شاخص‌های مختلف جهت ارزیابی وضعیت فعالیت گنبد‌های نمکی و همچنین تهیه نقشه میزان جابجایی عمودی منطقه، در این مرحله به ارزیابی ارتباط بین شاخص‌ها و نقشه میزان جابجایی منطقه پرداخته شده است.

## بحث و نتایج

در این تحقیق با استفاده از ۲ روش، محاسبه شاخص‌های مربوط به گنبد‌های نمکی و همچنین استفاده از روش سری زمانی SBAS به ارزیابی میزان فعالیت گنبد‌های نمکی محدوده مطالعاتی پرداخته شده و نتایج بدست آمده از طریق این روش‌ها تحلیل شده است. در ادامه به تشریح این مراحل پرداخته شده است:

**- ارزیابی وضعیت گنبد‌های نمکی با استفاده از شاخص‌های مورد نظر:** در این تحقیق به منظور ارزیابی وضعیت تکنیکی گنبد‌های نمکی از ۹ شاخص استفاده شده است.

یکی از شاخص‌های مورد استفاده، شاخص دایره‌واری (C) است. برای محاسبه این شاخص از معادله  $C = (E * (3.14 * 4)) / (D * D)$  استفاده شده است که در این شاخص E بیانگر مساحت و D نیز بیانگر محیط گنبد است. با توجه به اینکه گنبد‌های که دایره‌ای شکل هستند، کم‌تر دچار فرسایش شده‌اند و از نظر تکنیکی فعال‌تر هستند، هر چه میزان C به ۱ نزدیک‌تر باشد، بیانگر دایره‌ای بودن و فعال بودن گنبد است. شاخص دیگر، شاخص شاخص برافراستگی (Bh) است. این شاخص بر اساس رابطه  $H_{max} - H_{min} = Bh = H$  می‌باشد که در این رابطه Hmax مقدار ارتفاع بیشینه و Hmin ارتفاع کمینه گنبد نمکی است. در این شاخص ارتفاع بیش‌تر نشان دهنده فرسایش کم‌تر و در نتیجه فعالیت تکنیکی بیش‌تر می‌باشد (استراهلر، ۱۹۵۲). شاخص کشیدگی (Bs)، دیگر شاخص مورد استفاده است که بر اساس وضعیت شکل گنبد می‌باشد و با استفاده از رابطه  $Bs = Bi / Bw$  محاسبه می‌شود (الهمدونی و همکاران، ۲۰۰۸). در این رابطه، Bs: شاخص شکل گنبد، Bi: طول گنبد و Bw: عرض گنبد در عرض‌ترین بخش آن است. در صورتی که مقادیر این شاخص از ۴ بیش‌تر باشد، بیانگر گنبد‌های طولی با فعالیت زمین‌ساختی زیاد است. در صورتی که بین ۳ تا ۴ باشد، بیانگر گنبد‌های با فعالیت زمین‌ساختی متوسط است و در صورتی که میزان Bs کم‌تر از ۳ باشد، بیانگر دایره‌ای بودن و فعالیت زمین‌ساختی کم منطقه است. شاخص دیگر، انتگرال هیپسومتری (Hi) است. شاخص انتگرال هیپسومتری بیانگر مساحت زیر منحنی هیپسومتری است که بر اساس رابطه  $Hi = H_{mean} - H_{min} / H_{max}$  می‌باشد (رودیگر و همکاران، ۲۰۰۹: ۲۰۶). در این رابطه Hi: شاخص انتگرال هیپسومتری، Hmean: ارتفاع میانگین حوضه، Hmin: حداقل ارتفاع حوضه و Hmax: حداکثر ارتفاع حوضه می‌باشد. در این رابطه در صورتی که میزان Hi بیش‌تر از ۵/ باشد، بیانگر بال‌آمدگی و شکل‌گیری توپوگرافی جدید است. در صورتی که میزان Hi بین ۵/ تا ۴/ باشد، بیانگر وضعیت زمین‌ساختی نسبتاً فعال است و همچنین در صورتی که میزان Hi از ۴/ کم‌تر باشد، بیانگر حوضه‌های پست با فعالیت‌های زمین‌ساختی کم است (ده بزرگی و همکاران، ۲۰۱۰: ۳۳۳). در این تحقیق علاوه بر شاخص انتگرال هیپسومتری از شاخص مساحت زیرمنحنی هیپسومتری (Y) نیز استفاده شده است که مساحت زیاد زیرمنحنی بیانگر جوان بودن گنبد و فرسایش کم آن می‌باشد.

در این تحقیق علاوه بر شاخص‌های مربوط به گنبد‌های نمکی، از شاخص‌های وضعیت زهکشی گنبد‌ها نیز استفاده شده است که از جمله آن‌ها، شاخص نسبت انشعاب (BR) است. نسبت انشعابات، تخمینی کلی از تکامل شبکه آبراهه‌ها با درجات مختلف است (سانگ و چن، ۲۰۰۴: ۲۳۱). نسبت انشعابات برای هر رده از آبراهه از تقسیم تعداد کل آبراهه‌های

۱. Rudiger et al

۲. Sung & Chen

آن درجه بر تعداد کل آبراهه‌های یک درجه بالاتر محاسبه می‌شود (گارنیری و پیروتا، ۲۰۰۸: ۲۶۷). تکتونیک نقش مهمی در تعداد آبراهه‌های با درجات مختلف داشته و بنابراین نسبت انشعابات در گنندهای جوان بسیار بالاتر از گنندهای فرسایش یافته و قدیمی می‌باشد. شاخص میانگین طول آبراهه درجه ۱ (LN1)، شاخص زهکشی دیگر محسوب می‌شود. آبراهه‌های درجه ۱ از حساسیت بالایی در برابر حرکات تکتونیک برخوردارند و از شاخص‌های مناسب برای شناسایی فعالیت‌های تکتونیک محسوب می‌شوند (جردن، ۲۰۰۷: ۵۴۷). هرچه مقادیر بدست آمده شاخص LN1 بالاتر باشد، نشانگر تکتونیک فعال است به طوری که در مناطق دارای بالا آمدگی سریع، تنها شبکه‌های درجه یک توسعه می‌یابند (زوچیویکس، ۱۹۹۸: ۱۲۷). شاخص دیگر، شاخص تراکم زهکشی (Dd) است. تراکم زهکشی بالا نشان دهنده فعال تر بودن مناطق از نظر تکتونیک است (زوچیویکس، ۱۹۹۸: ۱۲۷). تراکم زهکشی بر اساس رابطه  $Dd = Lu / A$  از تقسیم مجموع طول تمام آبراهه‌های یک حوضه به مساحت کل حوضه محاسبه می‌شود (توکر و همکاران، ۲۰۰۱: ۱۸۷). شاخص فرکانس آبراهه (Fs) نیز از پارامترهای کمی مربوط به مورفومتری شبکه زهکشی است، فرکانس بالا نشان دهنده مناطق تکتونیک فعال به ویژه در گنندهای جوان است. شاخص فرکانس آبراهه بر اساس رابطه  $Fs = Nu/A$ ، از نسبت تعداد آبراهه‌ها در تمامی درجات یک حوضه به مساحت در یک منطقه به کیلومتر مربع محاسبه می‌شود (سردیوی و همکاران، ۲۰۰۵: ۴۱۵ & دوی و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۹). مطابق موارد مذکور، وضعیت گنندهای نمکی از نظر ۹ شاخص مورد ارزیابی قرار گرفته شده و نتایج حاصله در جدول ۲ نشان داده شده است. در شکل ۳ وضعیت نمونه‌هایی از گنندهای نمکی محدوده مطالعاتی و تغییرات صورت گرفته در آن‌ها نشان داده شده است.

جدول ۲: نتایج محاسبه شاخص‌ها برای گنندهای نمکی

ردیف	گنبد	سیاه طاق	چهل	کرمستج	هرمود	علی‌آباد	کوردده	نینا	نمکی	دهکویه	شاه غیب	بناکو
۱	C	۶۶۶	۳۵۴	۶۴۴	۶۴۲	۵۹۷	۵۶۲	۱۰۵	۶۵۲	۳۷۱	۵۷۱	۸۷۹
۲	Bh	۶۵۹	۱۰۸۷	۷۰۳	۴۰۱	۴۶۵	۴۲۹	۴۵۴	۵۱۲	۷۷۵	۶۸۴	۲۴۸
۳	Bs	۱۸۳۷	۱۶۲۲	۱۱۹۴	۱۶۰۹	۱۷۲۲	۱۶۰۹	۵۳۹۷	۱۵۳۹	۲۰۶۳	۱۵۳۷	۱۲۵۹
۴	Hi	۴۹۲	۶۵۱	۳۲۴	۴۳۶	۷۲۵	۶۱۶	۳۶۸	۴۰۸	۵۴۴	۴۱۵	۶۸۱
۵	y	۵۴۹	۳۷۵	۷۵۳	۶۰۶	۳۱۰	۴۲۸	۴۸۵	۶۲۶	۴۹۰	۶۱۹	۲۸۶
۶	BR	۱۹۸۹	۲۰۶۶	۲۱۶۵۰	۱۸۳۶	۱۶۵۷	۱۹۳۹	۲۰۶۱	۲۱۷۴۸	۳۱۵۴۰	۹۰۶۶	۳۲۳۸
۷	LN1	۱۴۴	۱۵۲	۱۵۰	۱۴۶	۱۰۸	۱۳۰	۱۴۵	۱۶۲	۱۳۴	۱۳۲	۱۱۵
۸	Dd	۸۰۰۶	۸۳۴۵	۸۱۳۵	۷۹۸۸	۸۲۲۱	۷۸۵۳	۱۵۳۵۵	۸۱۱۳	۸۰۱۱	۷۶۹۷	۶۶۱۸
۹	Fs	۵۷/۵۴	۵۳/۸	۵۶/۹	۵۹/۱	۷۳/۸	۶۴	۱۱۹/۹	۵۴/۳	۶۶/۶	۵۷/۲	۵۸

۱. Guarnieri &amp; Pirrotta

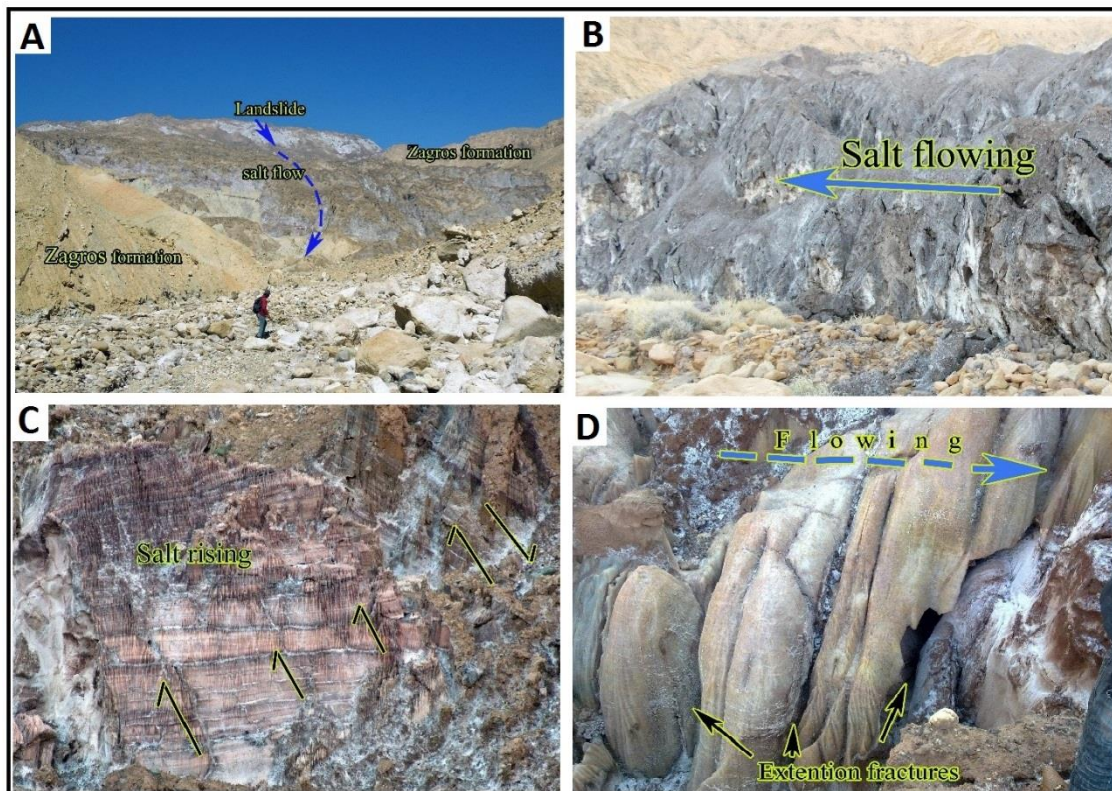
۲. Jordan

۳. Zuchiewicz

۴. Tucker

۵. Sreedevi et al

۶. Devi et al



شکل ۳: رانش نمک یال شرقی گنبد "نمکی" و جریان یافتگی آن در امتداد دره، در بین سازندهای زاگرس (دید به شمال غربی). (b) جریان نمک بصورت نمک‌رود در گنبد "نمکی". (c) حاشیه گنبد نینا و صعود نمک در این گنبد جوان در امتداد طاقدیس. (d) درزه‌های بزرگ و کوچک در حاشیه گنبد کرم‌وستج، راستای درزه‌ها تقریباً شرقی-غربی و شیب میانگین درزه‌ها حدود ۸۰ درجه با شیب رو به جنوب (دهانه گنبد) واقع در یال شمالی گنبد.

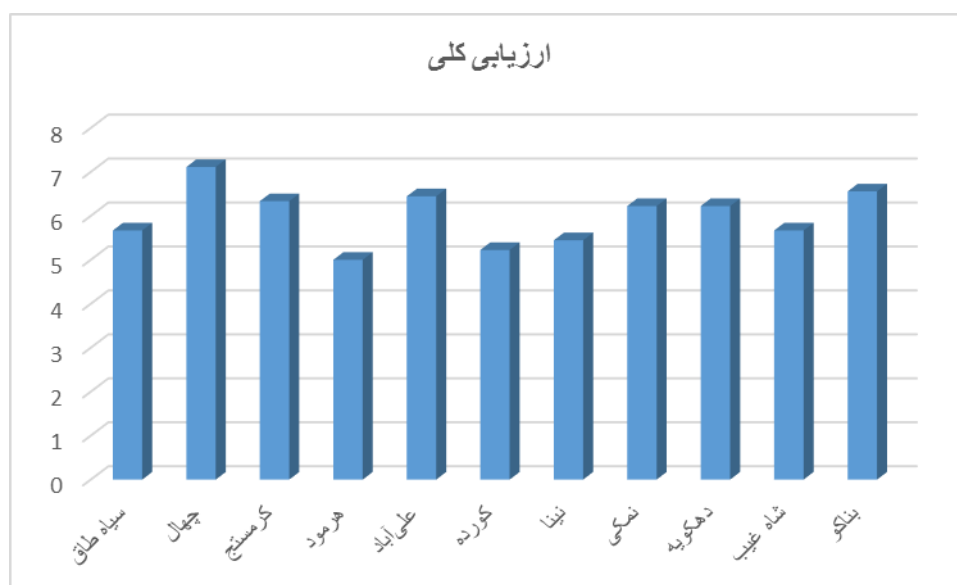
### طبقه‌بندی نسبی فعالیت‌های تکتونیکی:

در این تحقیق با استفاده از شاخص‌های مختلف، وضعیت تکتونیکی گنبد‌های نمکی مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به اینکه وضعیت تکتونیکی هر گنبد از نظر شاخص‌های مختلف متفاوت بوده است، به منظور ارزیابی کلی گنبد‌ها از نظر تمامی شاخص‌ها، به گنبد‌های نمکی از نظر میزان فعالیت برای هر شاخص امتیاز داده شده است، در واقع امتیازدهی به صورت نسبی بوده است و با توجه به اینکه در این تحقیق ۱۱ گنبد مورد ارزیابی قرار گرفته است، به هر گنبد از نظر وضعیت تکتونیکی امتیاز ۱ تا ۱۱ داده شده است. در جدول ۳ و شکل ۴ نتایج ارزیابی کلی شاخص‌ها نشان داده شده است. نتایج ارزیابی‌ها بیانگر این است که گنبد‌های نمکی چهال با میانگین ۷/۱۱، بناکو با ۶/۵۵ و علی‌آباد با ۶/۴۴ امتیاز از هر شاخص، دارای بالاترین امتیاز هستند و به عنوان فعال‌ترین گنبد‌ها محسوب می‌شوند و همچنین گنبد‌های نمکی هرمود با میانگین ۵، کورده با ۵/۲۲ و نینا با ۵/۴۴ امتیاز از نظر شاخص‌های مورد مطالعه به عنوان گنبد‌های با فعالیت کم تکتونیکی محسوب می‌شوند.



جدول ۳: نتایج ارزیابی کلی شاخص‌های گندهای نمکی

مجموع	Fs	Dd	LN1	BR	y	Hi	Bs	Bh	C	گنبد	ردیف
۵/۶۶	۵	۵	۶	۴	۵	۶	۳	۷	۱۰	سیاه طاق	۱
۷/۱۱	۱	۱۰	۱۰	۶	۱۰	۹	۵	۱۱	۲	چهل	۲
۶/۳۳	۳	۸	۹	۷	۱	۱	۱۱	۹	۸	کرمستج	۳
۵	۷	۴	۸	۲	۴	۵	۶	۲	۷	هرمود	۴
۶/۴۴	۱۰	۹	۱	۱	۱۱	۱۱	۴	۵	۶	علی‌آباد	۵
۵/۲۲	۸	۳	۴	۳	۸	۸	۶	۳	۴	کورده	۶
۵/۴۴	۱۱	۱۱	۷	۵	۷	۲	۱	۴	۱	نینا	۷
۶/۲۲	۲	۷	۱۱	۸	۲	۳	۸	۶	۹	نمکی	۸
۶/۲۲	۹	۶	۳	۱۰	۶	۷	۲	۱۰	۳	دهکویه	۹
۵/۶۶	۴	۲	۵	۱۱	۳	۴	۹	۸	۵	شاه غیب	۱۰
۶/۵۵	۶	۱	۲	۹	۹	۱۰	۱۰	۱	۱۱	بناکو	۱۱

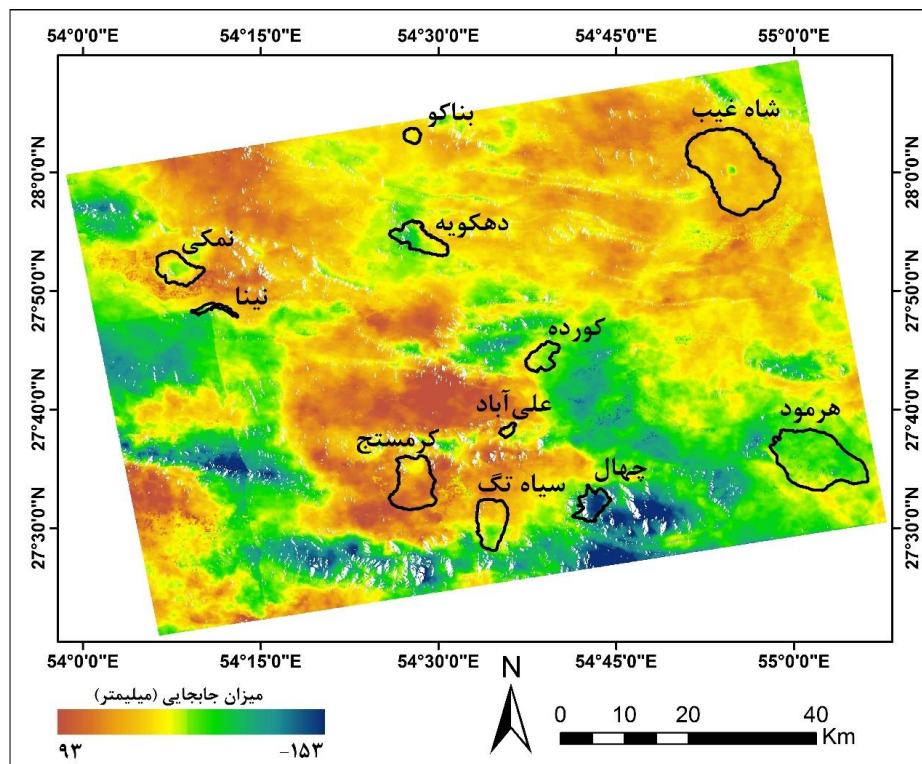


شکل ۴: نمودار نتایج ارزیابی کلی شاخص‌ها

### ارزیابی وضعیت جابجایی منطقه با استفاده روش سری زمانی SBAS

در این تحقیق به منظور ارزیابی میزان جابجایی عمودی منطقه با استفاده از روش سری زمانی SBAS از ۲۷ تصویر راداری از تاریخ ۲۰۱۴/۱۰/۱۴ تا ۲۰۱۶/۱۰/۲۷ استفاده شده است. پس از تهیه تصاویر، ابتدا وضعیت بیس‌لاین زمانی و مکانی آن‌ها بررسی شده است و بر اساس آن زوج تصاویر برای تشکیل اینترفروگرام انتخاب شده است. در شکل ۵ وضعیت بیس-لاین زمانی و مکانی تصاویر و در جدول ۴ مشخصات زوج تصاویر انتخابی برای تشکیل اینترفروگرام نشان داده شده است.





شکل ۶: نقشه میزان جابجایی منطقه از تاریخ (۲۰۱۶/۱۰/۲۷ تا ۲۰۱۴/۱۰/۱۴)

جدول ۵: محاسبه میزان حداکثر و حداقل جابجایی هر گنبد در طی دوره زمانی از تاریخ (۲۰۱۶/۱۰/۲۷ تا ۲۰۱۴/۱۰/۱۴)

ردیف	گنبد	میزان جابجایی (میلی متر)
۱	سیاه طاق	۷۷ تا -۳۳
۲	چهل	-۱۳۲ تا -۱۵۳
۳	کرمستج	۸ تا ۹۳
۴	هرمود	-۸۹ تا -۲
۵	علی آباد	-۳ تا ۱۷
۶	کورده	-۳۳ تا ۱۲
۷	نینا	-۱۲ تا ۵۵
۸	نمکی	-۱۷ تا ۴۹
۹	دهکویه	-۴۸ تا ۳۹
۱۰	شاه غیب	-۷ تا ۸۷
۱۱	بناکو	۲۱ تا ۲۸

### ارزیابی نتایج بدست آمده از طریق محاسبه شاخص‌ها و روش SBAS

بر اساس نتایج بدست آمده از طریق محاسبه شاخص‌ها، در بین گنندهای نمکی، گنبد نمکی هرمود دارای کمترین میزان فعالیت است و با توجه به اینکه در نتیجه بدست آمده از طرق روش SBAS در منطقه بدون بالآمدگی و فرونشست قرار دارد، با نتایج حاصله از شاخص‌ها مطابقت دارد. اما بعضی از گنندهای نمکی مانند گنبد چهل از نظر شاخص‌ها مورد نظر، به عنوان فعال‌ترین گنبد محسوب می‌شود، در حالی که در نقشه میزان جابجایی منطقه در مناطقی قرار دارند که بدون بالآمدگی بوده و حتی فرونشست داشته‌اند که این وضعیت بیانگر متاثر بودن عوامل مختلف از جمله

افت آب‌های زیرزمینی، فرسایش و ... است. با توجه به موارد مذکور می‌توان گفت که منطقه مورد مطالعه تحت تاثیر سازندهای نمکی دارای بالآمدگی است و میزان بالآمدگی آن در بعضی از مناطق ۹۳ میلی‌متر در طی ۲ سال بوده است، اما تحت تاثیر عوامل مختلف مانند افت آب‌های زیرزمینی در بخش‌های جنوبی محدوده، منطقه با فرونشست مواجه بوده است، بنابراین می‌توان گفت که در میزان جابجایی عمودی منطقه علاوه بر سازندهای نمکی که باعث بالآمدگی شده‌اند، افت آب‌های زیرزمینی و عوامل تکتونیکی سبب فرونشست منطقه شده است.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از ۲ روش محاسبه شاخص‌های مربوط به گندهای نمکی و همچنین استفاده از روش سری زمانی SBAS به ارزیابی وضعیت گندهای نمکی محدوده مطالعاتی پرداخته شد. نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌ها بیانگر این است که در بین گندهای نمکی، گندهای نمکی چهار با میانگین ۷/۱۱، بناکو با ۶/۵۵، علی‌آباد با ۶/۴۴ و کرم‌ستج با ۶/۳۳ امتیاز از هر شاخص، دارای بالاترین امتیاز هستند و به عنوان فعال‌ترین گندها محسوب می‌شوند و همچنین گندهای نمکی هرمود با میانگین ۵، کورده با ۵/۲۲ و ۵/۴۴ امتیاز از نظر شاخص‌های مورد مطالعه به عنوان گندهای با فعالیت کم تکتونیکی محسوب می‌شوند. نتایج حاصل از ارزیابی میزان جابجایی عمودی منطقه بیانگر این است که محدوده مطالعاتی در طی دوره زمانی ۲ ساله (از تاریخ ۲۰۱۴/۱۰/۱۴ تا ۲۰۱۶/۱۰/۲۷) بین ۱۵۳- تا ۹۳ میلی‌متر جابجایی داشته است که بیانگر این است که این منطقه در طی دوره زمانی مورد مطالعه حداکثر ۱۵۳ میلی‌متر فرونشست و حداکثر ۹۳ میلی‌متر بالآمدگی داشته است. ارزیابی نقشه نهایی بیانگر این است که بخش عمده‌ای از منطقه دارای بالآمدگی بوده است، در واقع نیمه شمالی منطقه را بالآمدگی و بخش‌هایی از نیمه جنوبی را فرونشست در بر گرفته است. بررسی میزان انطباق و ارتباط فعالیت گندهای نمکی با نقشه میزان جابجایی منطقه نیز بیانگر انطباق نسبی نتایج حاصله است. بر اساس نتایج بدست آمده از طریق محاسبه شاخص‌ها در بین گندهای نمکی، گنبد هرمود با میانگین ۵ امتیاز دارای پایین‌ترین امتیاز بوده و کم‌ترین فعالیت را داشته است. نتایج حاصله از طریق روش SBAS نیز بیانگر این است که این گنبد در محدوده فرونشست قرار دارد و بدون بالآمدگی می‌باشد. همچنین گندهای نمکی کورده و نینا نیز به ترتیب با میانگین ۵/۲۲ و ۵/۴۴ امتیاز دارای کم‌ترین امتیاز هستند و بر اساس نتایج حاصله از طریق روش سری زمانی SBAS، بخش‌های زیادی از محدوده گندهای نمکی کورده و نینا در محدوده فرونشست قرار دارند و دارای کم‌ترین میزان بالآمدگی بوده‌اند. همچنین بخش‌های زیادی از گنبد سیاه طاق نیز که دارای ۵/۶۶ امتیاز است، در محدوده فرونشست قرار دارد. اما گنبد شاه‌غیب نیز که دارای میانگین ۵/۶۶ امتیاز است در محدوده بالآمدگی قرار دارد. همچنین بخش‌هایی از گندهای نمکی دهکویه و نمکی که دارای میانگین امتیاز ۶/۲۲ هستند و نسبت به سایر گندها دارای وضعیت متوسطی هستند، در محدوده فرونشست و بخش‌های از آنها نیز دارای بالآمدگی بوده است. گندهای نمکی بناکو، علی‌آباد و کرم‌ستج که به ترتیب با میانگین امتیازات ۶/۵۵، ۶/۴۴ و ۶/۳۳ امتیاز بعد از گنبد چهار دارای بالاترین امتیاز هستند، در محدوده بالآمدگی قرار دارند و با نتایج بدست آمده از طریق روش SBAS مطابقت دارند، اما گنبد نمکی چهار با ۷/۱۱ امتیاز دارای بالاترین امتیاز است، با نتایج بدست آمده از طریق روش SBAS و در محدوده فرونشست قرار دارد.

مجموعه نتایج حاصله بیانگر این است که در میزان جابجایی عمودی منطقه علاوه بر حرکت گندهای نمکی، عوامل تکتونیکی، فرسایش و فرونشست نیز تاثیرگذار بوده است. در واقع نتایج محاسبه شاخص‌ها حاکی از فعال بودن برخی از گندهای نمکی است و نتایج حاصل از روش سری زمانی SBAS نیز بیانگر جابجایی عمودی منطقه و فعال بودن منطقه از نظر تکتونیکی است. اما با توجه به اینکه بعضی از گندها نمکی از جمله گنبد چهار که در محاسبه شاخص‌ها دارای امتیاز بالایی بوده ولی در نتیجه حاصله از طریق سری زمانی SBAS در محدوده فرونشست قرار داشته است،



می‌توان گفت که علاوه بر ویژگی خاص گنبد‌های نمکی، عامل دیگری نیز مانند فرونشست ناشی از افت آب‌های زیرمینی و عوامل تکتونیکی، فرسایش و ... نیز در میزان بالآمدگی و یا فرونشست منطقه تاثیرگذار هستند.

## منابع

- افشاری، سمیه؛ آقامحمدی زنجیرآبادی، حسین؛ نوری، محمدرضا (۱۳۹۵)، پایش رشد و پیشروی گنبد‌های نمکی زمین‌شناسی به‌منظور تعیین شدت فعالیت آن‌ها با استفاده از تصاویر SAR (مطالعه‌ی موردی؛ گنبد نمکی گچین)، ماهنامه علمی- ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز، شماره ۱۳۸، صص ۴۶-۵۲
- آقائباتی، سیدعلی (۱۳۸۵)، زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ صفحه
- ثروتی، محمدرضا (۱۳۸۱)، ژئومورفولوژی منطقه‌ای ایران، چاپ اول، انتشارات سازمان جغرافیای نیروهای مسلح
- ثروتی، محمدرضا؛ حمدی، بهاء‌الدین؛ یزدجردی، کورس؛ ادیب پور، محبوبه (۱۳۸۹)، بررسی مورفولوژی گنبد نمکی جهانی در جنوب فیروز آباد، فصل‌نامه جغرافیای طبیعی، سال ۳، شماره ۷، صص ۱۵-۳۹
- سهیلی، سجاد (۱۳۹۲)، مقایسه رفتار سائیزمو تکتونیکی ایران جنوبی و تغییر سطح اساس ناشی از دی‌پایریسم فعال با بهره‌گیری از تداخل‌سنجی راداری (منطقه مطالعاتی: گنبد نمکی سیاهو)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد، دانشکده علوم انسانی
- محمدپناه، ع (۱۳۹۱)، استفاده از تداخل‌سنجی راداری برای بررسی جابجایی روانه‌های نمکی گرمسار-ایوانکی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه تهران. ۱۲۳ صفحه.
- Bahrami, S., 2013. Tectonic controls on the morphometry of alluvial fans around Danekkhoshk anticline, Zagros, Iran. *Geomorphology* 180-181, 217-230.
- Berberian, M. 1995. Master blind thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphometrics, *Tectonophysics*, 241:193-224.
- Colón C, Webb AAG, Lasserre C, Doin M-P, Renard F, Lohman R, Li J, Baudoin PF. 2016. The variety of subaerial active salt deformations in the Kuqa fold-thrust belt (China) constrained by InSAR. *Earth and Planetary Science Letters*, 450: 83-95
- Deh Bozorgi, M. Pour kermani, M. Arian, M. Matkan, A. A. Motamedi, H. Hosseini A. 2010. Quantitative Analysis of Relative Tectonic Activity in The Sarvestan Area, *Geomorphology* 121.
- Devi, R. K. M., Bhakuni, S. S., Kumar Bora, P. 2011. Tectonic implication of drainage set-up in the Sub-Himalaya: A case study of Papumpare district, Arunachal Himalaya, India
- El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacón, J., Keller, E.A., 2007. Assessment of relative active tectonics, southwest border of Sierra Nevada (southern Spain). *Geomorphology* 96, 150-173.
- Furuya, M., Mueller, K., Wahr, J. 2007. Active salt tectonics in the Needles District, Canyonlands (Utah) as detected by interferometric synthetic aperture radar and point target analysis: 1992-2002, *Geodesy and Gravity/Tectonophysics*, First published: 26 June 2007
- Guarnieri, P., Pirrotta, C., 2008. The Response of Drainage Basins to the Late Quaternary Tectonics in the Sicilian Side of the Messina Strait (NE Sicily). *Geomorphology*, 95, pp. 260- 273.
- Jenyon, M. K. 1986. *Salt Tectonics*, Elsevier.
- Jordan, G. 2007. Adaptive smoothing of valleys in DEMs using TIN interpolation from ridgeline elevation: An application to morphotectonic aspect analysis. *Computers & Geosciences*, 33, pp.573-585
- Keller, E.A., Pinter, N. 2002. *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape (2ndEd.)*, Prentice Hall, New Jersey
- Kent, P. E. 1987. in *Dynamical Geology of Salt and Related Structures*, Ed by Lerche. I and O'Brien J.J, pp; 3-37.
- Mayer, L. 1986. Tectonic geomorphology of escarpments and mountain fronts. In: Wallace, r.e.

(Ed.), *Active Tectonics Studies*

- Ramsey, L. A., Walker, R. T., Jackson, J. 2008. *Fold evolution and drainage development in the Zagros mountains of Fars province, SEIran Basin Research*, 20, PP .23-48
- Rudiger, Z.R., Fodor, L., Horváth, E., Telbisz, T. 2009. Discrimination of fluvial, eolian and neotectonic features in a low hilly landscape: A DEM-based morphotectonic analysis in the Central Pannonian Basin, Hungary, *Geomorphology* 104
- Shtober-Zisu, N., Greenbaum, N., Inbar, M., Flexer, A. 2008. *Morphometric and geomorphic approaches for assessment of tectonic activity, Dead Sea Rift (Israel)*. *Geomorphology*, 102, 93-104.
- Sreedevi, P. D., Subrahmanyam, K., Ahmed, S. 2005. *The significance of morphometric analysis for obtaining groundwater potential zones in a structurally controlled terrain*, *Environmental Geology*, 47, pp. 412–420.
- Strahler, A.N., 1952. *Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography*, *Geological Society of America Bulletin*, 63, pp. 1117- 1142
- Sung, O., Chen, Y. C. 2004. *Geomorphic evidence and kinematic model for quaternary transfer faulting of the Pakuashan anticline, central Taiwan*, *Journal of Asian Earth Sciences*, 24, pp.389-404.
- Talbot, C. J. 1990. *Allochthonous Salt Spreading of Symp .on Diapyrism, Iran* , *Geol.Survey*, pp 50-7511
- Tucker, G. E., Catani, F., Rinaldo, A., Bras, R. L. 2001. *Statistical analysis of drainage density from digital terrain data*, *Geomorphology* 36:187-202
- Zuchiewicz, W. 1998. *Quaternary tectonics of the Outer West Carpathians, Poland*. *Tectonophysics*, 297, pp. 121–132.