



مدلسازی عددی ساز و کار تشکیل ساختار نمکی قم با استفاده از روش المان محدود و مقایسه آن با روش عددی دیفرانسیل محدود

دانشگاه تهران
دانشکده‌گان فنی دانشگاه تهران
دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی

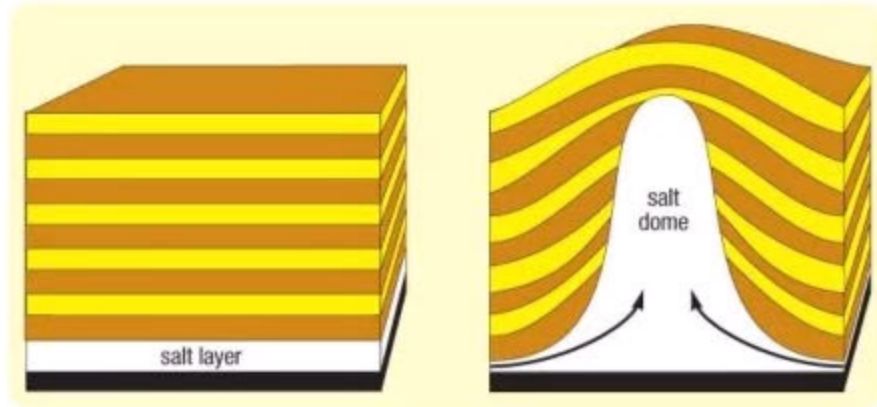
نویسندگان:

دکتر نسترن عبدالملکی
عضو هیئت مدیره شرکت اطلس پیمایش شار
abdolmaleki@alumni.ut.ac.ir

دکتر عباس بحرودی
دانشیار دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران
bahrodi@ut.ac.ir

گنبد های نمکی

قرارگیری لایه نمک در زیر لایه های رسوبی و روباره



- لایه نمک نازک ←

تغییر شکل محلی

- ضخامت لایه نمک بیشتر ←

تشکیل دیاپیر نمکی

مقدمه

ضرورت تحقیق

پیشینه تحقیق

منطقه هدف

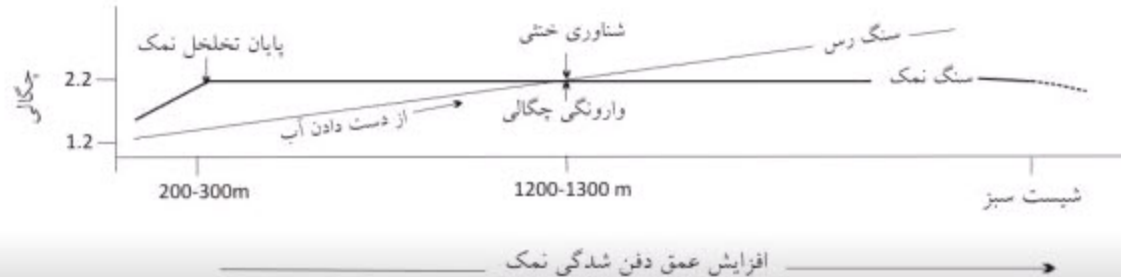
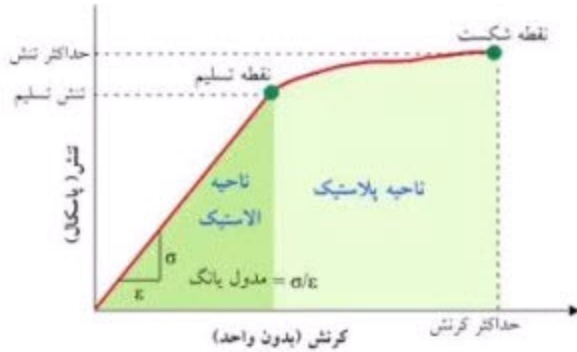
روش تحقیق

ارزیابی نتایج

نتیجه گیری

ویژگی های نمک

- پاسخ نمک به تنش ها به دو صورت تغییر شکل الاستیک و تغییر شکل پلاستیک
- رفتار خزشی Creep Movement
- تراکم ناپذیری و چگالی پایدار در اعماق مختلف ← نیروی شناوری نمک
- گرانروی نمک Viscosity



مقدمه

ضرورت تحقیق

پیشینه تحقیق

منطقه هدف

روش تحقیق

ارزیابی نتایج

نتیجه گیری

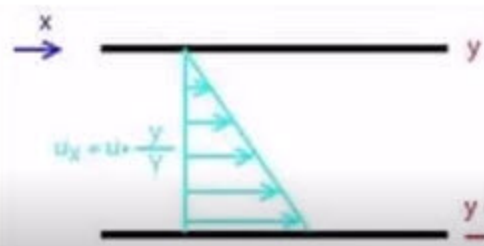
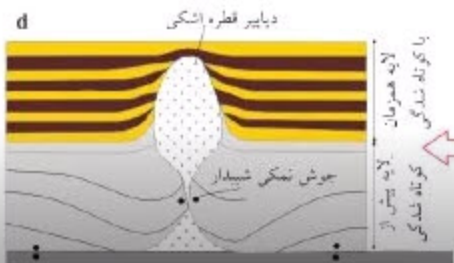
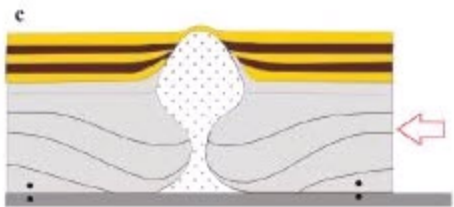
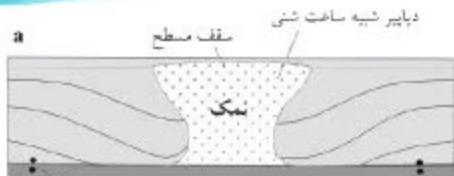
ساز و کارهای موثر در پدیده دیاپیرسم نمک

نیروی محرکه داخلی (نیروی ذاتی نمک)

- قرارگیری لایه نمک در زیر لایه های رسوبی چگال تر
- ایجاد ناپایداری گرانشی رایلی تیلور
- نیروی شناوری نمک (تراکم ناپذیر)

ساز و کار خارجی

- فشار دائمی منجر به رفتار خزشی نمک
- بارگذاری تفریقی



مقدمه

ضرورت تحقیق

پیشینه تحقیق

منطقه هدف

روش تحقیق

ارزیابی نتایج

نتیجه گیری

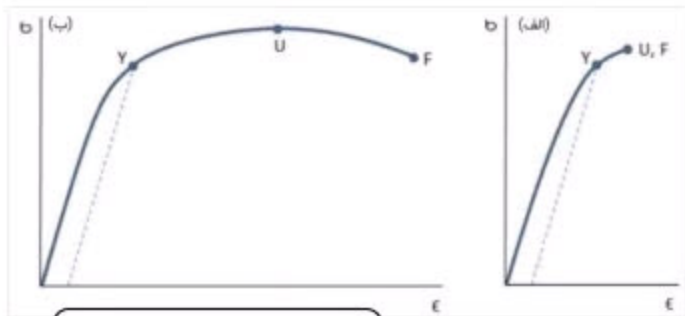
دو نظریه برای مدلسازی دیاپیرسم نمک

مدل ۱

- روباره و نمک هر دو ماده شکل پذیر
- نیروی شناوری تنها نیروی موثر در دیاپیرسم
- عامل محرک در دیاپیرسم تنها نیروی ذاتی نمک
- ناپایداری رایلی-تیلور

مدل ۲

- روباره شکننده و نمک ماده شکل پذیر
- عامل محرک هم نیروی ذاتی نمک و هم عوامل خارج
- نیروی شناوری نمک به تنهایی کافی نیست.



ماده شکل پذیر

ماده شکننده

مقدمه

ضرورت تحقیق

پیشینه تحقیق

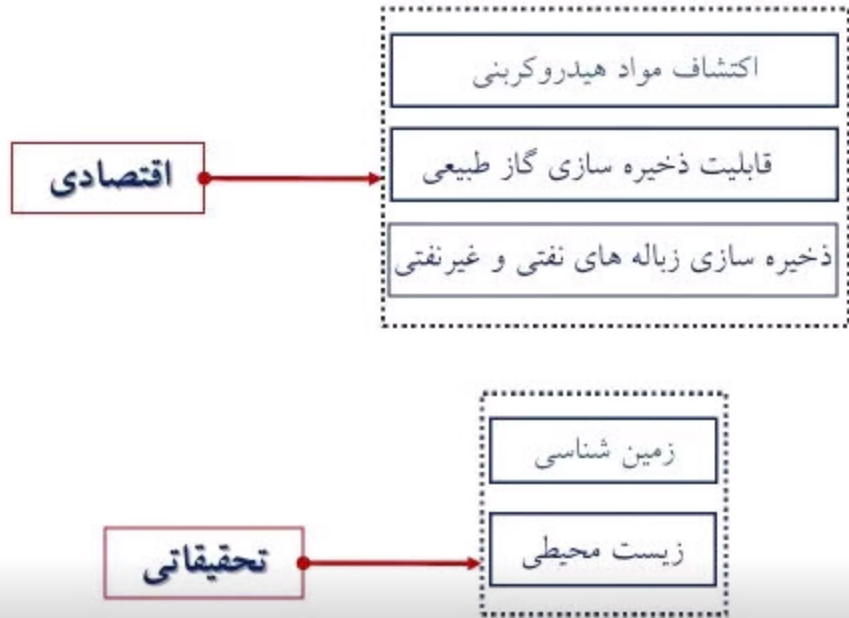
منطقه هدف

روش تحقیق

ارزیابی نتایج

نتیجه گیری

مهمترین جنبه‌های مطالعاتی ساختارهای نمکی



- بررسی میزان فعالیت گنبد نمکی

- برآورد مکانیزم تشکیل دیاپیر

- تعیین الگوی صعود نمک

- تخمین ویسکوزیته موثر نمک در منطقه مورد

مطالعه ←

- تعیین رئولوژی نمک در آن منطقه

ضرورت تحقیق

پیشینه تحقیق

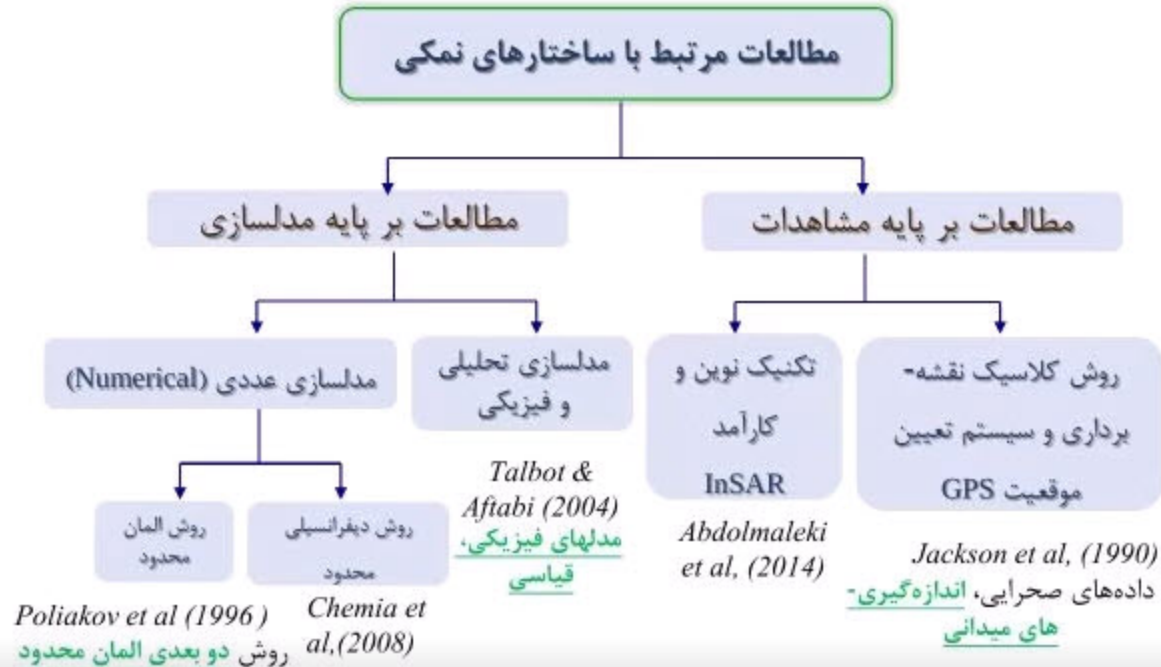
منطقه هدف

روش تحقیق

ارزیابی نتایج

نتیجه گیری

طبقه بندی مطالعات پیشین



مقدمه

ضرورت تحقیق

پیشینه تحقیق

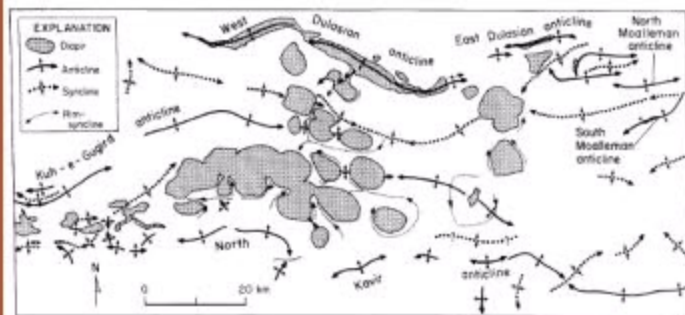
منطقه هدف

روش تحقیق

ارزیابی نتایج

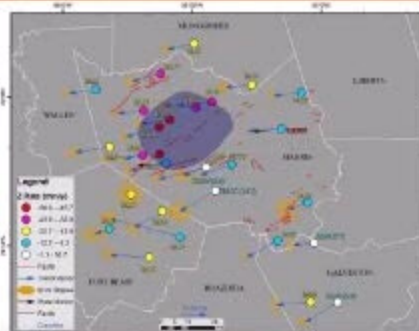
نتیجه گیری

روش کلاسیک مشاهداتی



Jackson et al, (1990)

- ❖ مطالعه ساختارهای داخلی و خارجی
- ❖ دیپیرهای حوزه رسوبی کویر بزرگ
- ❖ تهیه نقشه ساختاری با استفاده از داده‌های
- ❖ صحرایی، مشاهدات و اندازه‌گیری‌های میدانی



Engelkemeir et al, (2010)

- ❖ استخراج الگو و جهت تغییر شکل های سطح منطقه Houston.
- ❖ به ویژه استخراج میدان جابجایی افقی
با استفاده از ایستگاه های GPS (به صورت نقاط رفرانس و متحرک در سطح منطقه)

محاسبه جابجایی های سطحی ساختار نمکی تنها در نقاط خاص و عدم پیوستگی میدان جابجایی

مقاله

ضرورت تحقیق

پیشینہ تحقیق

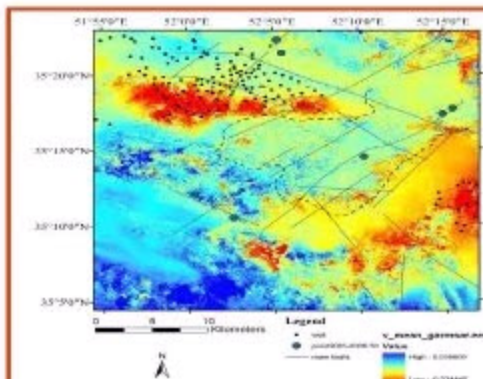
منطقه هدف

روش تحقیق

ارزیابی نتایج

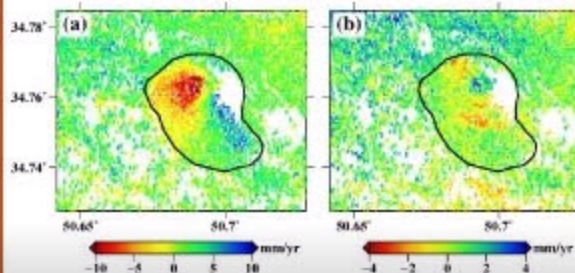
نتیجہ گیری

فن آوری رادار اینترفرومتری



Baikpour et al, (2010)

- ❖ ارزیابی میزان فعالیت گنبد نمکی گرمسار با استفاده از تکنیک رادار اینترفرومتری
- ❖ تعداد تصاویر و بازه زمانی محدود با تک جهت تصویربرداری
- ❖ تحلیل جابجایی تنها در راستای خط دید ماهواره



Abdolmaleki et al, (2014)

- ❖ استخراج ترند کلی جابجایی گنبد نمکی قم
- ❖ عوامل موثر در تغییرات سطح دیابیر در فصول مختلف
- ❖ اندازه گیری تغییرات زمانی-مکانی سطح گنبد نمکی قم
- ❖ آنالیز جابجایی در دو راستای افقی و عمودی

مقدمه

ضرورت تحقیق

پیشینه تحقیق

منطقه هدف

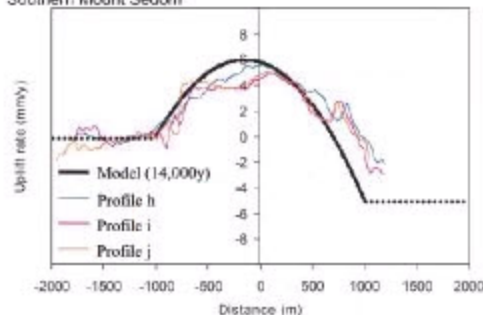
روش تحقیق

ارزیابی نتایج

نتیجه گیری

مدلسازی تحلیلی و فیزیکی

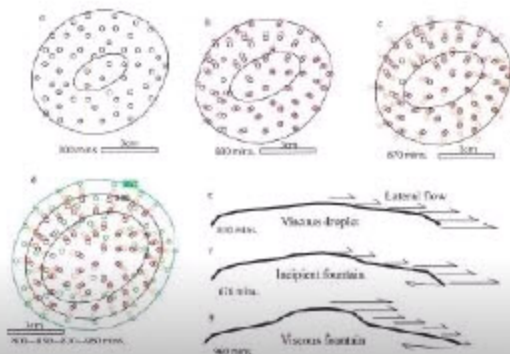
Southern Mount Sedom



Weinberger et al, (2006)

- ❖ برآورد ویسکوزیته نمک و نرخ کرنش، با استفاده از یک مدل تحلیلی یک بعدی با فرض ساده ویسکوزیته نیوتنی
- ❖ معتبرسازی مدل از طریق فیت توپوگرافی مدل به توپوگرافی موجود
- ❖ مدلسازی دیاپیرسم پیچیده نمک با مدل تحلیلی

Aftabi et al, (2010)



- ❖ اندازه‌گیری جابجایی‌های سطحی گنبد نمکی سیاهو در زاگرس به کمک رادار با تصاویر محدود
- ❖ مقایسه نرخ پخش‌شدگی گرانشی و نرخ صعود نمک
- ❖ استفاده از آزمایشات فیزیکی و مدل‌های قیاسی
- ❖ عدم استفاده از تکنیک SBAS

مقدمه

ضرورت تحقیق

پیشینه تحقیق

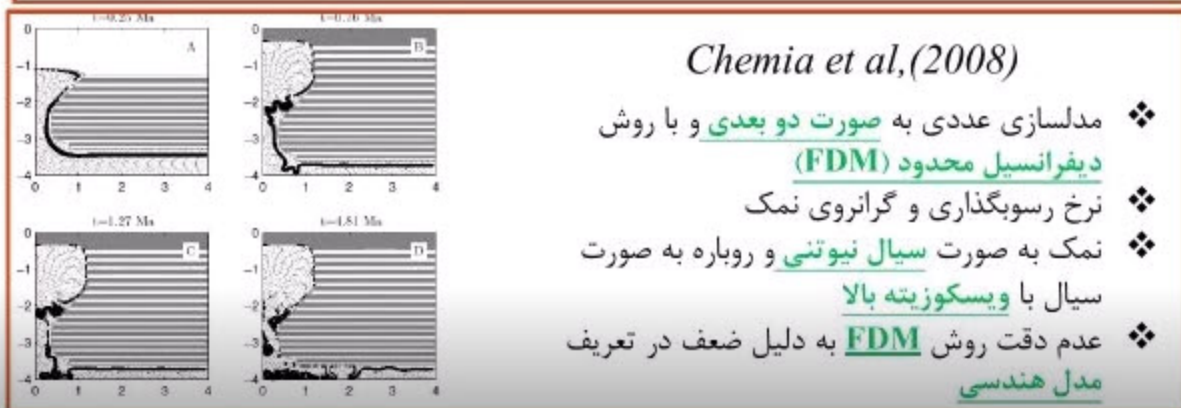
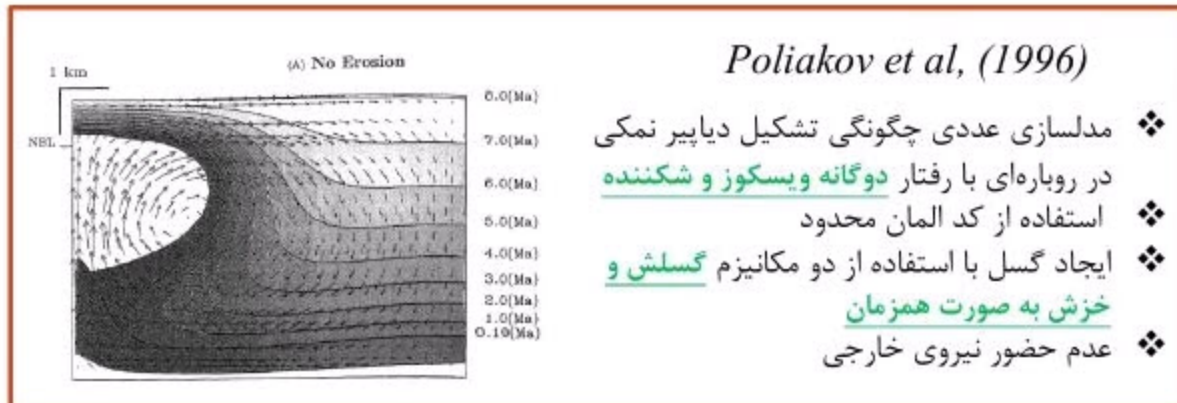
منطقه هدف

روش تحقیق

ارزیابی نتایج

نتیجه‌گیری

مدلسازی عددی المان محدود و دیفرانسیل محدود



مقدمه

ضرورت تحقیق

پیشینه تحقیق

منطقه هدف

روش تحقیق

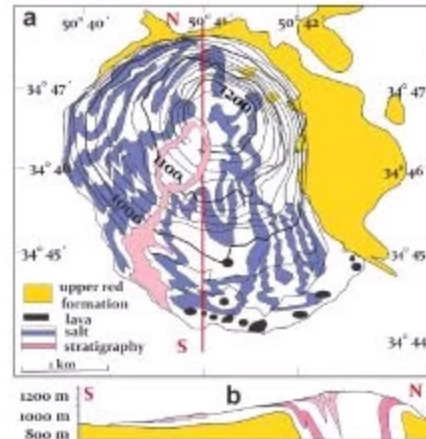
ارزیابی نتایج

نتیجه گیری

کوير بزرگ ايران: گنبد نمکی قم



برگرفته از Jackson et al, (1990)



برگرفته از Talbot & Aftabi (2004)



مقدمه

ضرورت تحقیق

پیشینه تحقیق

منطقه هدف

روش تحقیق

ارزیابی نتایج

نتیجه گیری

- ساختار نمکی بیرون زده و فعال در قسمت شمال غربی شهر قم
- ارتفاع گنبد نمکی قم نسبت به (MSL) و فلات اطراف به ترتیب برابر ۱۲۳۵ و ۳۱۵ متر
- یک کره هموار به قطر ۲.۵ کیلومتر و حاشیه از سازند قرمز
- دارای جابجایی سطحی وابسته به زمان (Abdolmaleki et al, 2014)

تعیین مکانیزم تشکیل و الگوی صعود گنبد نمکی قم

روش تحلیلی و روش عددی دو روش جهت تعیین میزان تغییر شکل های ناشی از بارگذاری و حل معادلات دیفرانسیل جزئی

روش تحلیلی

- راه حل دقیقی برای محاسبه پارامترهای معادلات دیفرانسیل
-
- جواب مساله به صورت تقریبی

روش عددی

روش عددی

- پیچیدگی های موجود در پدیده دیاپیرسم نمک
- حضور تغییر شکل های بزرگ
- بارگذاری نامنظم
- تعدد پارامترهای زمین شناسی موثر

روش عددی
دیفرانسیل محدود

روش عددی المان
محدود

مقدمه

ضرورت تحقیق

پیشینه تحقیق

منطقه هدف

روش تحقیق

ارزیابی نتایج

نتیجه گیری

روش های عددی مدلسازی تغییر شکل گنبد نمکی

روش المان محدود

روش دیفرانسیل محدود:

- ۱- تخمین مشتقات موجود در معادلات دیفرانسیل جزئی توسط ترکیب خطی از مقادیر تابع در نقاط گریدی
- ۲- نوشتن معادلات دیفرانسیل به صورت جداگانه برای هر گره
- ۳- جایگزینی روابط مشتق با معادلات تفاضلی

Flac 2D

- ❖ مدلسازی هندسی: انواع لایه ها، تعداد آنها و هندسه قرارگیری آنها
- ❖ تعداد کل المان ها برای ایجاد هندسه مدل: ۸۸۴۰۰۰
- ❖ بارگذاری غالب به صورت فشار گرادیانی

۱- تقسیم ساختار به اجزا کوچکتر

۲- تعریف یک تابع چند جمله ای برای جابجایی هر المان

۳- یافتن رابطه کرنش- جابجایی و تنش- کرنش

۴- استخراج ماتریس سختی

$$[K_E] = \iint_{-1}^1 t[B]^T [D][B] |J| dS dT$$

۵- اعمال شرایط مرزی برای بهبود معادله کلی

۶- محاسبه جابجایی های کل

$$\epsilon_x = \frac{du}{dx}$$

$$\sigma_x = E \epsilon_x$$

$$\{f\} = [K] \{d\}$$

MIDAS GTS NX

مقدمه

ضرورت تحقیق

پیشینه تحقیق

منطقه هدف

روش تحقیق

ارزیابی نتایج

نتیجه گیری

پیش پردازش مدلسازی عددی

X راستای افقی، Z راستای قائم و Y راستای عمود بر صفحه

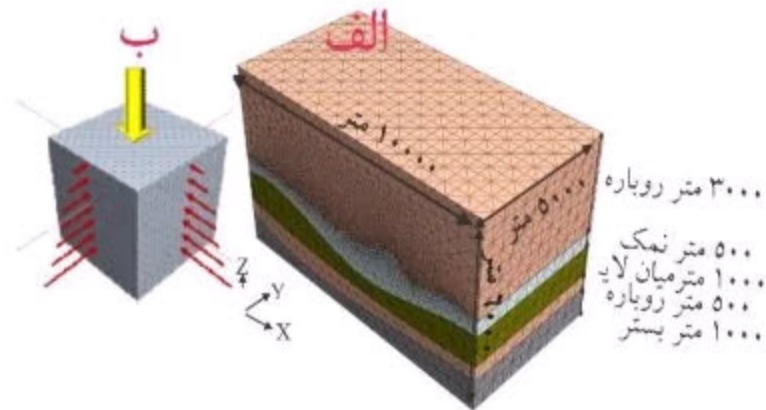
نوع بارگذاری اعمال شده به صورت فشاری

عدم آزادی حرکت مدل در راستای Y

کف مدل دارای محدودیت حرکت در سه جهت

طرفین مدل نیز دارای محدودیت حرکت در راستای X

شرایط مرزی



مدلسازی هندسی

مش بندی مثلثی

رفتار شکننده مبتنی بر قانون موهر-کولومب برای روباره

مقدمه

ضرورت تحقیق

پیشینه تحقیق

منطقه هدف

روش تحقیق

ارزیابی نتایج

نتیجه گیری

پیش پردازش مدلسازی عددی

نام لایه	چگالی (kg/m ³)	مدول یانگ (KPa)	ضریب پرواسن	چسبندگی (Kpa)	زاویه اصطکاک	مقاومت کششی (KPa)
روباره	27	9,500,000	0.27	600	35	2000
نمک	22	25,000	0.25	350	30	2500
میان لایه	23	3500000	0.28	600	23	500
سنگ پستر	30	20,000,000	0.3	10000	45	25000



مقدمه

ضرورت تحقیق

پیشینه تحقیق

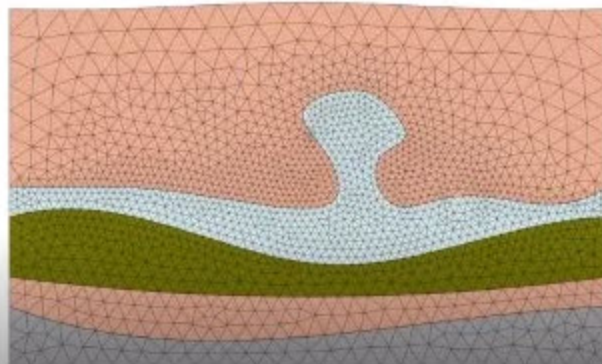
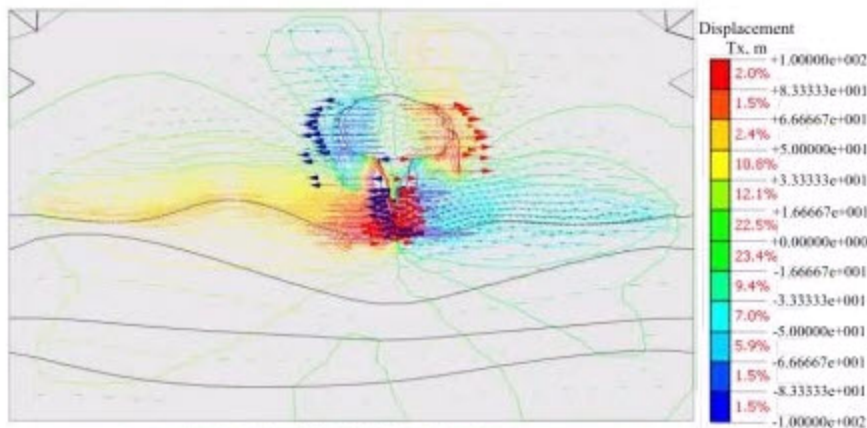
مطابق هدف

روش تحقیق

ارزیابی نتایج

نتیجه گیری

نتایج جابجایی در مراحل اول دیاپیر با FEM



بازشدگی

جابجایی های افقی

مش بندی مجدد

مقدمه

ضرورت تحقیق

پیشینه تحقیق

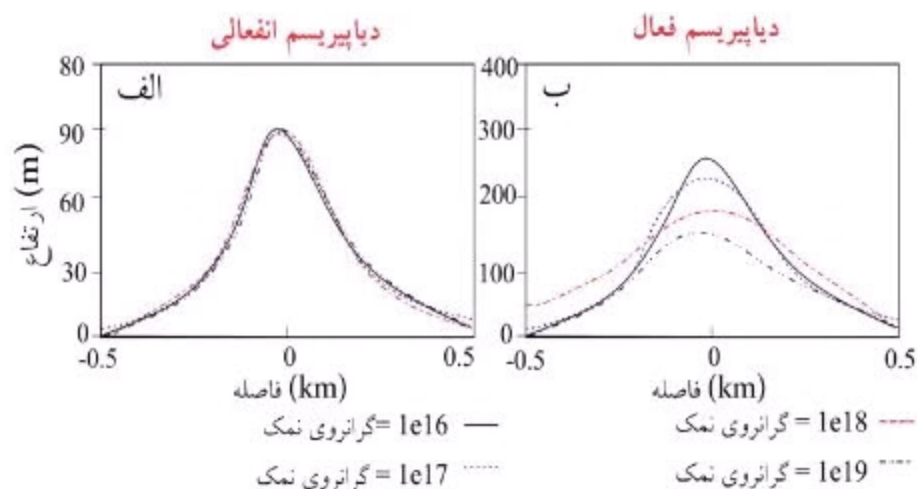
منطقه هدف

روش تحقیق

ارزیابی نتایج

نتیجه گیری

مقایسه مراحل رشد دیاپیر در مدل المان محدود



اولین مرحله صعود نمک: مستقل از گرانروی نمک و متاثر از عامل خارجی فشار

در دیاپیرسم فعال: استرس‌های محلی مانند اختلاف دانسیته و گرانروی نمک تاثیرگذار

مقدمه

ضرورت تحقیق

پیشینه تحقیق

منطقه هدف

روش تحقیق

ارزیابی نتایج

نتیجه گیری

تعیین گرانیروی نمک در گنبد نمکی قم

مقدمه

ضرورت تحقیق

پیشینه تحقیق

منطقه هدف

روش تحقیق

ارزیابی نتایج

نتیجه گیری

• مقایسه نرخ جابجایی حاصل از تداخل سنجی راداری و مدل FEM در

راستای یک مقطع خاص

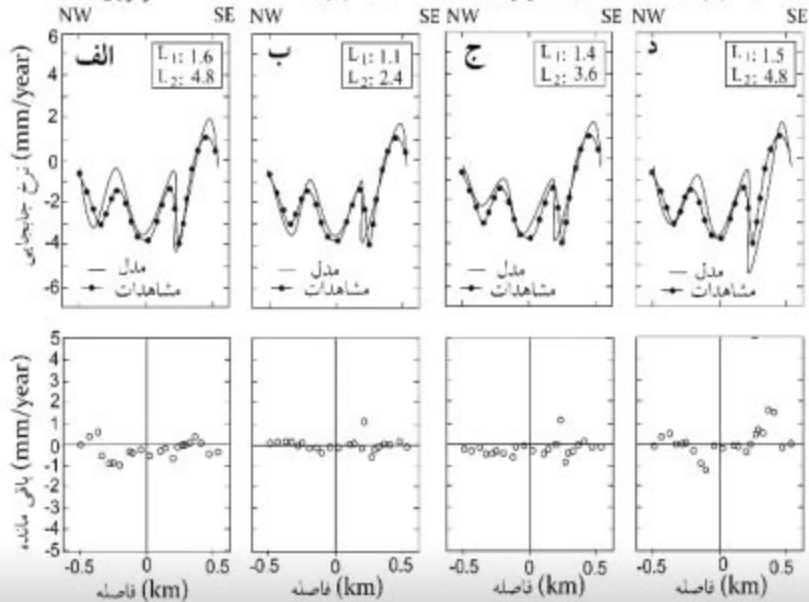
• مشاهدات راداری جهت برآورد گرانیروی نمک برای کوه نمک قم

• بر اساس مقایسه نرخ جابجایی قائم مربوط به مدل و پردازش رادار

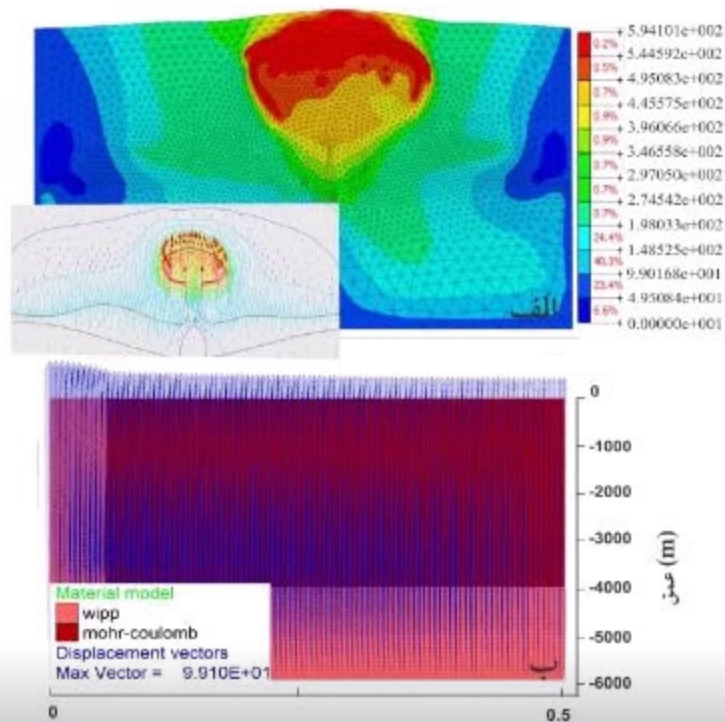
اینترفرومتری

مقدار گرانیروی نمک در بازه ۳-۴ * ۱۰۱۶ پاسکال ثانیه تخمین زده می‌شود

گرانیروی نمک = 5×10^{16} گرانیروی نمک = 4×10^{16} گرانیروی نمک = 3×10^{16} گرانیروی نمک = 2×10^{16}



مقایسه روش المان محدود و دیفرانسیل محدود در گنبد نمکی قم



- انجام مدلسازی هندسی در روش دیفرانسیل محدود پیچیده است.
- عدم مش بندی مجدد و صحیح در پایان هر مرحله در روش دیفرانسیل محدود
- تغییرات سطح لایه ها غیر قابل نمایش
- عدم محاسبه جابجایی صحیح در محل گره ها به دلیل مش بندی نادرست

مقدمه

ضرورت تحقیق

پیشینه تحقیق

منطقه هدف

روش تحقیق

ارزیابی نتایج

نتیجه گیری

نتیجه گیری و تحلیل

- پدیده دیاپیرسم در گنبد نمکی قم در راستای شمالی جنوبی بیشتر متأثر از عامل بیرونی فشار و کوتاه‌شدگی
- تخمین گرانروی نمک با استفاده از داده های راداری در این منطقه برابر $3-4 \times 10^{16}$
- ضرورت حضور نیروی خارجی مانند فشار برای شروع پدیده دیاپیرسم و مرحله انفعالی
- وابستگی میزان صعود نمک در مرحله فعال دیاپیرسم به استرس های محلی مانند ویسکوزیته نمک
- روش FDM قادر به مدلسازی دقیق پدیده دیاپیرسم نمک نمی‌باشد. زیرا این روش تغییر شکل های بزرگ و هندسه پیچیده مدل را نمی‌تواند مدیریت نماید.



مقدمه

ضرورت تحقیق

پیشینه تحقیق

منطقه هدف

روش تحقیق

ارزیابی نتایج

نتیجه گیری

سپاسگزاری

سپاس از استاد گرامی آقای دکتر عباس بحرودی به دلیل حمایت ها و راهنمایی های ارزشمندشان

سپاس از آقای دکتر مهدی معتق استاد گرانقدر به دلیل آماده سازی داده های راداری



Thank You

