

# تحلیل حساسیت وزن‌های چندمعیاره در ارزیابی تناسب پتانسیل منابع هیدروکربنی با استفاده از سامانه اطلاعات مکانی

محمد کریمی<sup>1\*</sup>، محمدعرب امیری<sup>2</sup>، عباس علیمحمدی سراب<sup>3</sup>

- 1- استادیار سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
- 2- دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
- 3- دانشیار سیستم‌های اطلاعات مکانی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

دریافت: 92/4/19 پذیرش: 92/12/1

## چکیده

در فرایند اکتشاف منابع هیدروکربنی، نقشه‌های متعدد زمین‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک مورد نیاز هستند. علاوه بر این، با توجه به قابلیت‌های سیستم اطلاعات مکانی و با فراگیر شدن کاربردهای روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در GIS، این روش برای تهیه نقشه تناسب پتانسیل منابع هیدروکربنی مناسب به نظر می‌رسد. همچنین به منظور فهم رفتار مدل، تصمیم‌گیری چندمعیاره GIS مبنای فرایند تحلیل حساسیت ضروری می‌نماید. بنابراین در این مقاله، یک روش تحلیل حساسیت برای سنجش وابستگی خروجی مدل به وزن‌های معیارهای ورودی و شناسایی معیارهای حساس به تغییرات وزن معرفی می‌شود. برای اجرای این مدل، برگه 1:25000 اهواز که حاوی میادین نفتی عظیمی است، انتخاب شد. برای این منظور، لایه‌های GIS شامل شاخص کل کربن آلی، شاخص بازده پتانسیل برای تولید هیدروکربن، شاخص  $T_{max}$ ، مجاورت به محور طاقدیس‌ها و وجود مناطق دارای آنومالی باقی‌مانده ثقل بوگه بالا یا مجاورت به آن‌ها استفاده شدند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد وجود مناطق دارای آنومالی ثقل بوگه بالا یا مجاورت به آن‌ها دارای بالاترین حساسیت و شاخص  $T_{max}$  دارای کمترین حساسیت در میان تمام معیارها هستند. نقشه تناسب نهایی در مجموع حدود 82 درصد از ذخایر شناخته‌شده را در طبقات بسیار مناسب و مناسب تقسیم‌بندی کرده است.

واژه‌های کلیدی: اهواز، پتانسیل هیدروکربن، تحلیل حساسیت، تصمیم‌گیری چندمعیاره، GIS.



## 1- مقدمه

اکتشاف نفت فرایندی پیچیده است که داده‌های زیادی را درگیر می‌کند. زمانی که اطلاعات سطحی و زیرسطحی ترکیب می‌شوند، اطلاعات باارزشی درباره مناطق با پتانسیل بالای منابع هیدروکربنی برای مطالعات بیشتر فراهم می‌شود. در نتیجه، با به‌کارگیری یک مدل GIS مبنای، می‌توان مناطق دارای پتانسیل نفت و گاز را برای مطالعات بیشتر، شامل عملیات لرزه‌نگاری و حفر چاه‌های اکتشافی روی نقشه نشان داد (Wadidi, 2003).

در شماری از تحقیقات گذشته، ارتباط پارامترهای مختلف زمین‌شناسی و وجود هیدروکربن با استفاده از مدل‌های GIS مبنای بررسی شده است (Echeverría & Jongsma, 2001; Liping, 2011). در تحقیقی دیگر، یک روش ارزیابی چندمعیاره GIS مبنای براساس منطق فازی برای اکتشاف نفت معرفی شده است. هدف ارزیابی چندمعیاره، داشتن یک ایده کلی از مناطق اکتشافی مناسب بود، نه تعیین نقاط حفاری؛ بنابراین نتایج جزئیات ضروری برای یک حوزه یا تحلیل بلوک را شامل نمی‌شد (Bingham, Zurita-Milla & Escalona, 2012). تونسی<sup>1</sup> (2005) نیز یک سیستم خبره فازی براساس فرایند استدلال تقریبی برای ارزیابی نفت طراحی کرد. در این روش، پارامترهای زمین‌شناسی شامل تله، مخزن، پوش و سنگ منشأ در نظر گرفته شدند؛ اما اینکه این روش در یک محیط مکانی استفاده شده باشد، در این مقاله به روشنی نیامده است.

در تحقیقات پیشین در ایران نیز مرادیان (1382) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، نشانه‌های روی زمین، مانند محور طاقدیس‌ها، گسل خوردگی‌ها و سازندها را در منطقه آغاجاری استخراج کرد؛ سپس لایه‌های اطلاعاتی مستخرج را برای تحلیل و برهم‌نهی وارد GIS نمود و یک نقشه احتمال وقوع تهیه کرد که دارای صحت 76 درصد بود. اما از آنجا که فقط عوارض و نشانه‌های سطحی در آن به کار رفته بود، نتایج در مراحل بسیار ابتدایی قابل استفاده بود.

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره ابزارهای پشتیبانی تصمیم‌گیری هستند که برای تحلیل مسائل تصمیم‌گیری، تولید راه‌حل‌های گزینه‌ای و ارزیابی گزینه‌ها براساس ارزش‌های تصمیم‌گیرنده طراحی شده‌اند. هدف اصلی این روش، کمک به تصمیم‌گیرنده در انتخاب بهترین گزینه از تعدادی

1. Tounsi

گزینه تحت وجود چندین معیار انتخاب و اولویت‌های معیارهای گوناگون است (Eldrandaly Et al., 2005). از سوی دیگر، قابلیت‌های GIS در مدیریت داده‌های مکانی، استفاده از آن را در ارزیابی معیارمبنا برای انتخاب مناطق پتانسیل‌دار نفتی توجیه می‌کند؛ به این دلیل که غالب معیارهای پتانسیل‌یابی نفتی داده‌های مکانی هستند. در این تحقیق، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی<sup>1</sup> (AHP) که یکی از رایج‌ترین ابزارهای تصمیم‌گیری چندمعیاره است، استفاده می‌شود. این روش در کاربردهای متنوعی در تصمیم‌گیری چندمعیاره GIS مبنا استفاده شده است (Marinoni, 2004; Malczewski, 1999; Eldrandaly Et al., 2005).

تحلیل حساسیت روابط اطلاعات ورودی و خروجی مدل را بررسی می‌کند و به منابع تغییراتی که خروجی‌های مدل را تحت تأثیر قرار می‌دهند، می‌پردازد (Saltelli & Chan, 2000). در فرایند مدل‌سازی، تحلیل حساسیت به‌عنوان پیش‌نیاز در نظر گرفته می‌شود؛ زیرا قابلیت اطمینان به مدل را با ارزیابی عدم قطعیت‌های موجود در نتایج شبیه‌سازی مشخص می‌کند. همچنین، تحلیل حساسیت به‌عنوان یک فرایند بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود؛ زیرا جمع‌آوری داده‌ها مهم‌ترین و پرهزینه‌ترین بخش GIS است (Kocabas & Dragicevic, 2004). با تحلیل حساسیت، امکان تجزیه تغییرات خروجی مدل به منابع ورودی عدم قطعیت فراهم می‌شود. شناسایی اهمیت عدم قطعیت‌های ورودی برای جدا کردن فاکتورهایی که جهت رسیدن به یک دقت خواسته‌شده به اندازه‌گیری باصحت نیاز دارند، مفید است (Crosetto, Tarantola & Saltelli, 2000). وزن معیارها اغلب بیشترین سهم را در عدم قطعیت دارد؛ زیرا تصمیم‌گیرنده به‌طور مطلق از ارجحیت میان معیارها آگاه نیست و ممکن است وجود و مقیاس معیارها ناشناخته باشد. دلگادو و سندرا<sup>2</sup> (2004) هم به اینکه چگونه تحلیل حساسیت در مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره GIS مبنا به‌کار می‌رود، توجه کردند.

تحلیل حساسیت روش رایجی در حوزه تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی نیست و این موضوع در مطالعات تصمیم‌گیری چندمعیاره همچنان در مراحل آغازین است. علاوه بر این، روش تحلیل حساسیتی که بیشتر استفاده می‌شود، مبتنی بر تغییر وزن‌های فاکتورهای ورودی است تا اینکه مشخص کند آیا در نتایج خروجی تغییر چشمگیری صورت می‌گیرد (Delgado & Sendra, 2004).

1. Analytical Hierarchical Process

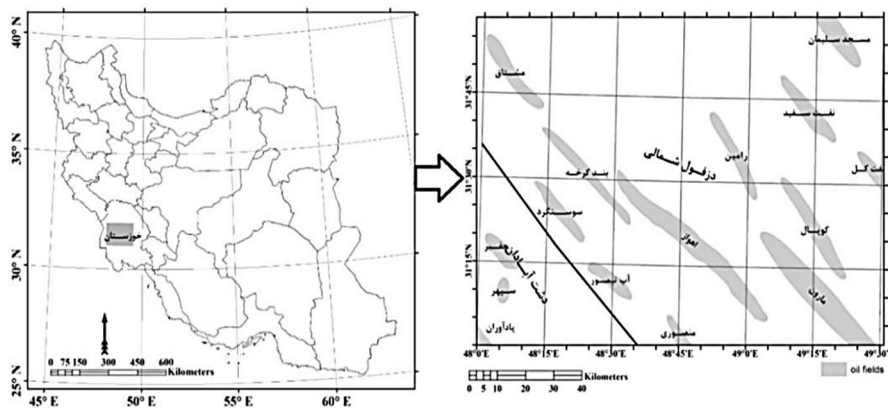
2. Delgado & Sendra



شاید مهم‌ترین کمبود فرایند تحلیل حساسیت موجود در کاربردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر GIS، نبود بینشی درباره جنبه‌های مکانی حساسیت وزن‌ها باشد (Chen, Yu & Khan, 2010). بنابراین، پیشنهاد می‌شود فرایند تحلیل حساسیت باید حساسیت وزنی را به صورت جغرافیایی متصورسازی کند و تحلیل مکانی حساسیت را ساده‌تر کند.

در این مقاله، کمبودهای ذکر شده در بالا با ارائه روشی جدید برای بررسی ابعاد مکانی حساسیت وزنی چندمعیاره حل شده است. بنابراین، با ارائه روش تحلیل حساسیت عمومی در یک مدل AHP-MCDM مبتنی بر GIS که به عنوان مدل AHP-SA به کار می‌رود، حساسیت مدل به تغییرات وزن معیارها ارزیابی، و سپس تغییرات مکانی مربوط به حساسیت وزن پارامترها متصورسازی می‌شود. اجرای روش ذکر شده تصمیم‌گیران را قادر می‌سازد فرایند ساده و جامعی را برای ارزیابی حساسیت وزنی معیارها در فضای جغرافیایی انجام دهند (Chen, Yu & Khan, 2010).

در این تحقیق، یک روش تحلیل حساسیت در مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره با فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی GIS مبنای جهت پتانسیل‌یابی منابع هیدروکربنی معرفی شده است. منطقه مطالعه قسمتی از فروافتادگی دزفول است که اغلب در دزفول شمالی واقع شده و دارای منابع عظیم هیدروکربنی (غالباً نفت) است (شکل 1).



شکل 1 موقعیت منطقه مطالعه به همراه میادین موجود

## 2- ویژگی‌های کلی منطقه مطالعه

در کمربند چین‌خوردگی زاگرس کنونی و در فراساحل مجاور آن، میداین چشمگیر نفت و گاز وجود دارند که به ترتیب شامل 8 و 15 درصد از مخازن نفت و گاز دنیا هستند. تقریباً تمام میداین نفتی در ناحیه نسبتاً کوچک فروافتادگی دزفول واقع شده‌اند که بیش از 60,000 کیلومترمربع وسعت دارند (Bordenave & Hegre, 2010).

در این منطقه، نفت خارج‌شده از سنگ منشأ به ساختارهای زاگرس که از قبل موجود بودند، مهاجرت کرده است. علاوه بر این، چین‌خوردگی زاگرس باعث شکستگی‌هایی شده که مهاجرت عمودی هیدروکربن‌ها به سمت مخازن را افزایش می‌دهد. در نتیجه این مسیر مهاجرت کوتاه، نفت‌ها به‌طور مستقیم می‌توانند به سنگ‌های منشأ مربوط شوند. سنگ‌های منشأ اصلی منطقه، سنگ‌های منشأ کژدمی و پابده هستند که غالب مخازن منطقه را پر کرده‌اند (Bordenave & Hegre, 2005).

بیشتر ذخایر نفتی ایران در طاق‌دیس‌های بزرگ در دو مخزن به تله افتاده‌اند: مخزن اول آهک آسماری پرانرژی است که در بیشتر منطقه خواص مخزنی عالی خود را حفظ کرده و به‌خوبی توسط تبخیری‌های گچساران پوش شده است (Bordenave, 2002). این مخزن حاوی حدود 75 درصد مخازن نفتی ایران در خشکی است. مخزن دوم گروه بنگستان شامل آهک سروک و سازند ایلام است که توسط مارن‌های گورپی / پابده پوش شده است. این مخزن نیز حاوی حدود 23 درصد از مخازن ایران است. این دو مخزن در بیشتر فروافتادگی دزفول یک مخزن واحد را تشکیل می‌دهند (Bordenave & Hegre, 2005).

## 3- روش تحقیق

هیدروکربن ترکیبی است شامل گاز هیدروکربن حرارتی و زیستی، میعانات گازی، نفت‌های خام و قیر طبیعی (Magoon & Dow, 1994). به‌منظور تهیه نقشه تناسب پتانسیل نفت، داده‌های زمین‌شناسی متعددی مورد استفاده قرار می‌گیرند (جدول 1). پس از پیش‌پردازش و برش، تمام داده‌ها در یک پایگاه داده به‌صورت رستری با سایز سلول 250 متر وارد شدند. همه داده‌ها در سیستم مختصات UTM (زون 39 شمالی، دیتوم WGS\_1984) تصویر شدند.



جدول 1 توصیف داده‌های مورد استفاده در منطقه مطالعه

فاکتورها	زیر فاکتورها	انواع
ژئوشیمی	خصوصیت (کمیت) سنگ منشأ	غناى کل کربن آلی (TOC)*
		بازده پتانسیل برای تولید هیدروکربن (S <sub>1</sub> +S <sub>2</sub> )*
ژئوفیزیک	تقل سنجی	شاخص T <sub>max</sub> *
		آنومالی باقی مانده نقل بوگه*
زمین شناسی	زمین شناسی سطح الارضی	نقشه محور طاق‌دیس‌ها*

(منبع داده‌ها: مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران)

### 3-1- فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی

AHP روشی رایج در تصمیم‌گیری چندمعیاره است که ساعتی (1977) آن را معرفی کرد. در این روش، مسئله پیچیده به ساختار سلسله‌مراتبی با المان‌های تصمیم‌گیری (هدف، ویژگی‌ها، معیارها و گزینه‌ها) تقسیم می‌شود. AHP براساس سه قانون: تجزیه هدف کلی (پتانسیل‌یابی منابع هیدروکربنی)، مقایسه زوجی معیارها و ترکیب اولویت‌ها بنا شده است (Bunruamkaew & Murayam, 2011). این روش از مقیاس اعداد مطلق برای بیان برتری یا قضاوت استفاده می‌کند که ساعتی (1980) ارائه کرده است. در ساختار سلسله‌مراتبی، تمام المان‌های پایین هرم با ماتریس زوجی زیر مقایسه می‌شوند:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{21} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

A ماتریس مقایسه زوجی و المان‌های آن است. همچنین، باید توجه شود که این ماتریس

یک ماتریس متقابل است؛ یعنی:

$$a_{ij} = 1/a_{ji}$$

رابطه 1

پس از نرمال‌سازی ماتریس A با روش‌هایی، مانند مقادیر ویژه، وزن‌های نسبی المان‌ها در هر ماتریس مقایسه زوجی محاسبه می‌شوند. وزن‌های نسبی (W) از معادله زیر به دست می‌آیند:

$$AW = \lambda_{max}W \quad \text{رابطه 2}$$

$\lambda_{max}$  برابر بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس A است. در مرحله بعد، شاخص سازگاری برای اطمینان از سازگاری مقایسه زوجی بررسی می‌شود:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{رابطه 3}$$

RI یک ثابت است که متناظر با مقدار سازگاری تصادفی متوسط بوده و متناسب با n به دست می‌آید. جدول شاخص‌های تصادفی ماتریس‌های با درجه 1-15 توسط ساعتی (1980) ارائه شده است. سپس نسبت سازگاری (CR) با معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{رابطه 4}$$

به طور کلی، اگر نسبت سازگاری کمتر از 0.1 باشد، مقایسه زوجی سازگاری قابل قبولی دارد؛ بنابراین وزن‌های حاصل می‌توانند استفاده شوند؛ در غیر این صورت، ماتریس باید تغییر داده شود.

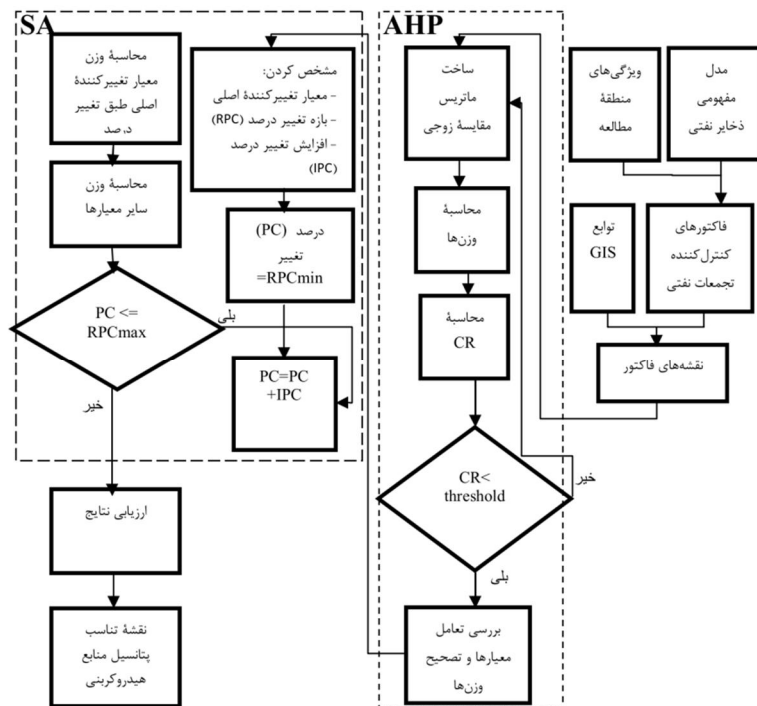
### 3-2- فرایند تحلیل حساسیت

برای انجام تحلیل حساسیت روش‌های متفاوتی وجود دارد. کمپلونگو<sup>1</sup> (2000) و سلتلی و چان<sup>2</sup> (2000) این روش‌ها را به طور کامل مرور کرده‌اند. یک روش رایج و ساده در تحلیل حساسیت، روش تغییر هر فاکتور ورودی در یک زمان<sup>3</sup> (OAT) برای مشاهده اثر آن بر خروجی است

---

1. Campolongo  
2. Saltelli & Chan  
3. one at a time

(Daniel, 1973). در این روش، هر تغییری در خروجی به‌وضوح به‌علت تغییر یک فاکتور است. با تغییر یک فاکتور، تمام فاکتورهای دیگر می‌توانند ثابت نگه داشته شوند و نتایج مقایسه می‌شوند (Chen, Yu & Khan, 2010). روش اجرا شده در این تحقیق نیز OAT است. برای تحلیل حساسیت معیارها، سه روش رایج وجود دارد: تغییر مقادیر معیارها، تغییر وضع اهمیت نسبی معیارها و تغییر وزن معیارها (Ibid). در این تحقیق، از تغییر وزن معیارها به‌منظور شناسایی معیارهایی که به تغییر وزن حساس‌اند و کمی‌سازی تغییرات در اولویت معیارها استفاده شده است (شکل 2).



شکل 2 فلوچارت روش SA و AHP برای تهیه نقشه تناسب پتانسیل منابع هیدروکرینی



در این الگوریتم، کاربر باید سه پارامتر را تعریف کند: معیار تغییرکننده اصلی، بازه تغییر درصد<sup>1</sup> (RPC) و افزایش تغییر درصد<sup>2</sup> (IPC). معیار تغییرکننده اصلی معیاری است که وزن آن در اجراهای جاری تغییر خواهد کرد. بازه تغییر درصد می‌تواند مجموعه‌ای محدود از تغییرات درصد گسسته از وزن‌های اصلی معیارها باشد. در این روش، می‌توان یک بازه را برای تمام معیارها به کار برد، یا برای هر معیار بازه متفاوتی استفاده کرد (Ibid). پارامتر افزایش تغییر درصد نیز بیان‌کننده درصدی است که وزن هر معیار تغییر می‌کند که نباید از بازه تغییر درصد تجاوز کند؛ همچنین با تغییر پارامتر افزایش تغییر درصد، یک اجرا ساخته می‌شود. پس از تغییر وزن معیار تغییرکننده اصلی طبق افزایش تغییر درصد، وزن معیارهای دیگر نیز برای برقراری قیدی که مجموع وزن معیارها باید برابر یک باشد، تغییر می‌کنند. تعداد اجراهای مورد نیاز برای یک مسئله تصمیم‌گیری با معادله زیر محاسبه می‌شود (Ibid):

$$Runs = \sum_{i=1}^n r_i \quad \text{رابطه 5}$$

$n$  تعداد معیارها و  $r_i$  تعداد افزایش تغییر درصد در محدوده بازه تغییر درصد معیار  $i$  است. وزن معیار تغییرکننده اصلی با معادله زیر تغییر می‌کند (Ibid):

$$W(C_m, pc) = W(C_m, 0) + W(C_m, 0) \times pc, \quad 1 \leq m \leq n \quad \text{رابطه 6}$$

$W(C_m, pc)$  وزن تغییر داده شده معیار تغییرکننده اصلی  $C_m$ ،  $W(C_m, 0)$  وزن اصلی معیار تغییرکننده اصلی و  $pc$  درصد تغییر است. به منظور برقراری اینکه جمع وزن تمام معیارها برابر یک باشد (که یکی از شروط روش وزن‌دهی AHP است)، وزن سایر معیارها طبق معادله زیر محاسبه می‌شود (Ibid):

$$W(C_i, pc) = (1 - W(C_m, pc)) \times \frac{W(C_i, 0)}{1 - W(C_m, 0)}, \quad i \neq m, 1 \leq i \leq n \quad \text{رابطه 7}$$

1. range of percent change  
2. increment of percent change

$W(C_i, pc)$  وزن تغییرکرده معیار  $i$  و  $W(C_i, 0)$  وزن اصلی معیار  $i$  است.

#### 4- معیارهای شناسایی وقوع میادین هیدروکربنی

کاربرد نظریه ذکر شده با استفاده از داده‌های مکانی در برگه 1:25000 اهواز به منظور پتانسیل‌یابی منابع هیدروکربنی اجرا می‌شود. معیارهای شناسایی منابع هیدروکربنی در منطقه به سه گروه کلی زمین‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک تقسیم‌بندی شدند که در ادامه شرح داده می‌شوند.

##### 4-1- ژئوشیمی

سنگ‌های رسوبی که قادر به تولید نفت بوده‌اند، هستند یا ممکن است بشوند، سنگ منشأ نامیده می‌شوند (Tissot, 1984). یک سنگ منشأ بالقوه فقط زمانی که به سطح مناسبی از بلوغ حرارتی برای تولید نفت می‌رسد، سنگ منشأ مؤثر می‌شود. سنگ‌های منشأ مؤثر به وسیله کمیت (مقدار مواد آلی)، کیفیت (نوع مواد آلی) و بلوغ حرارتی (میزان حرارت تدفین) مشخص می‌شوند (Peters & Cassa, 1994). چنانچه نفت به صورت عمودی از سنگ منشأ به مخزن مهاجرت کند، توزیع و بلوغ سنگ‌های منشأ، تعریفی مناسب از نواحی دارای پتانسیل است (Bordenave, 2002). پارامترهای مربوط به کمیت و بلوغ حرارتی در جدول شماره دو آمده است.

جدول 2 پارامترهای ژئوشیمیایی مربوط به کمیت و بلوغ سنگ منشأ

راک اوال پیرولیزیز		TOC (wt. %)	پتانسیل هیدروکربن		کمیت
S <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>				
2/5-0	0/5-0	0/5-0	ضعیف		
5-2/5	1-0/5	1-0/5	متوسط		
10-5	2-1	2-1	خوب		
20-10	4-2	4-2	بسیار خوب		
20<	4<	4<	عالی		
TAI	T <sub>max</sub> (°C)	(%)Ro	مرحله بلوغ حرارتی نفت		بلوغ
2/6-1.5	435>	0/6-0/2	نابالغ		
2/7-2/6	445-435	0/65-0/6	اولیه		
2/9-2/7	450-445	0/9-0/65	پیک		
3/3-2/9	470-450	1/35-0/9	نهایی		
3/3<	470<	1/35<	فرابالغ		

(source: Peters & Cassa, 1994)

در این تحقیق پس از تهیه مقادیر متوسط و بیشینه پارامترهای  $T_{max}$ ،  $S_1+S_2$ ،  $TOC$  در 13 چاه موجود، هریک به‌طور جداگانه درون‌یابی و نقشه‌های مربوطه تهیه شدند؛ سپس تمام نقشه‌ها با توجه به مقادیر حد آستانه تعریف‌شده در جدول شماره دو طبقه‌بندی شدند (جدول 3).

#### 2-4- زمین‌شناسی

تله مانعی زیرزمینی است که باعث تجمع موضعی نفت و گاز می‌شود. تله‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند: تله‌هایی که توسط تغییر شکل‌های ساختمانی پدید آمده‌اند، پدیده‌های چینه‌ای و ترکیبی از هر دو (Allen & J.R. Allen, 2005).

اگرچه وجود هیدروکربن جزء حیاتی تله در نظر گرفته می‌شود، غیاب هیدروکربن در یک تله ممکن است نتیجه شکست سایر پارامترها، مانند سنگ منشأ فعال یا مسیرهای مهاجرت باشد (Ibid). از آنجایی که تله‌های ساختمانی و به‌ویژه تله‌های طاق‌دیس حای بیشترین نفت و گاز کشف‌شده در منطقه هستند، مجاورت به محور طاق‌دیس‌ها فاکتوری مهم در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، پس از استخراج محور طاق‌دیس‌ها از نقشه زمین‌شناسی سطحی، منطقه مطالعه براساس مجاورت به محور طاق‌دیس‌ها به پنج طبقه تقسیم شد (جدول 3). برای به‌دست آوردن کلاس‌های مجاورت غیرتجمعی بهینه، یک قانون بدیهی استفاده شد؛ یعنی تعداد پیکسل‌های کلاس‌های مجاورت غیرتجمعی باید به تدریج و نه الزاماً یکنواخت با افزایش فاصله از محور طاق‌دیس‌ها افزایش یابند.

#### 3-4- ژئوفیزیک

به‌منظور آشکارسازی بیشتر چارچوب ساختاری منطقه توسط روش‌های ژئوفیزیکی، پردازش داده‌ها بر بهبود ویژگی‌های با طول موج کوتاه متمرکز می‌شوند. تعدادی از روش‌های استاندارد شامل درون‌یابی، فیلترسازی و گسترش روبه‌پایین و بالا در تعیین دقیق توپوگرافی پی‌سنگ و توزیع منبع کاربرد دارند (Li & Morozov, 2007). در این تحقیق از سه مجموعه نمونه ثقل‌سنجی موجود در سه ناحیه مختلف با نام‌های آبادان، بیدزرد و یمه استفاده شد. نمونه‌های موجود توسط مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران فیلتر بالاگذر شده و به آنومالی باقی‌مانده ثقل بوگه تبدیل شده بودند. در این مرحله، پس از ورود داده‌ها به GIS، گریدهای

مورد نظر تهیه و هرکدام به پنج طبقه هم‌مساحت طبقه‌بندی شدند؛ از سوی دیگر به دلیل اینکه نفت‌گیرهای طاقدیسی در مناطق با آنومالی باقی‌مانده ثقل بوگه بالاتر یافت می‌شوند (Li & Morozov, 2007)، بالاترین طبقه هریک استخراج و به‌عنوان مناطق با آنومالی باقی‌مانده ثقل بالا در نظر گرفته شدند. بنابراین، برای تهیه نقشه فاکتور نهایی، وجود مناطق دارای آنومالی باقی‌مانده ثقل بوگه بالا و مجاورت با آن‌ها در نظر گرفته شد. از آنجا که این مناطق حدود یک‌پنجم منطقه مطالعه را شامل می‌شدند، برای محاسبه مجاورت به این مناطق نیز براساس فاصله از این مناطق، چهار طبقه هم‌مساحت دیگر استخراج شدند (جدول 3).

جدول 3 معیارهای پتانسیل‌یابی منابع هیدروکربنی

وضعیت معیار	بسیار مناسب (1)	مناسب (2)	نسبتاً مناسب (3)	کمتر مناسب (4)	نامناسب (5)
شاخص TOC (wt. %)	4<	2 - 4	1 - 2	0/5 - 1	0 - 0/5
شاخص S <sub>1</sub> +S <sub>2</sub> (mgHC/grock)	24<	12 - 24	6 - 12	3 - 6	0 - 3
شاخص T <sub>max</sub> (°C)	435-470	-	470<	-	435>
مجاورت (متر) با محور طاقدیسی‌ها	0-1500	1500 - 3950	3950 - 7500	7500-14800	-67780 14800
وجود مناطق با آنومالی باقی‌مانده ثقل بوگه بالا و مجاورت (متر) با آن‌ها	0	0 - 2285.5933	- 4571.1865 2285.5933	- 9001.1725 4571.1865	50495.0574 9001.1725 -

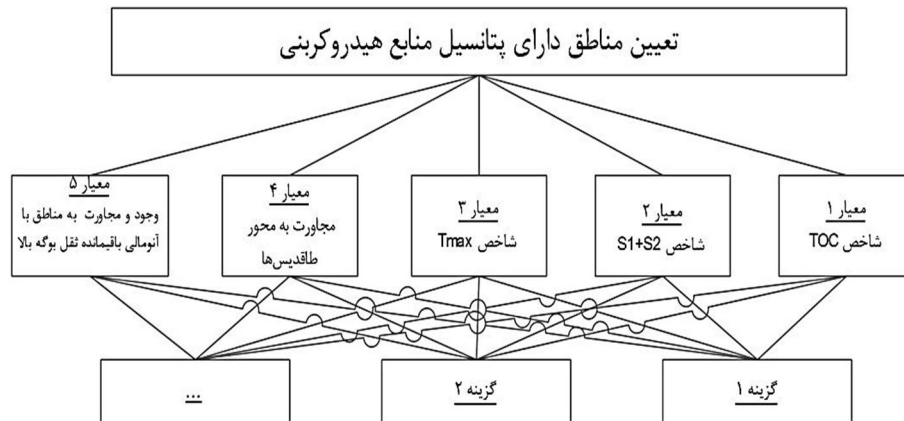
## 5- اجرا

سه جزء اصلی در اجرای این فرایند شامل فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، ارزیابی حساسیت وزنی و تصویرسازی مکانی هستند. بنابراین، در این فرایند از نرم‌افزارها و روش‌های گوناگونی برای اجرا استفاده می‌شود. ترکیب این روش‌ها و محیط‌های گوناگون روشی مؤثر برای نشان دادن قابلیت‌های GIS است. همچنین، در این روش با تغییر پارامترهای تحلیل حساسیت، تعداد بسیاری از سناریوهای تصمیم‌گیری همراه اطلاعات کمی و نقشه‌ای می‌توانند تولید شوند.

### 5-1- اجرای پایه

همان‌طور که در بخش‌های قبل ذکر شد، تمام داده‌های مکانی شامل نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده معیارها به‌شکل رستری با اندازه سلول 250 متر در پایگاه داده مکانی ذخیره شدند؛ سپس این نقشه‌ها براساس مقادیر حد آستانه تعریف‌شده در جدول شماره سه به پنج طبقه بسیار مناسب تا نامناسب طبقه‌بندی شدند. بنابراین، نقشه‌های معیارها به‌شکل نقشه‌های رستری با مقادیر صحیح که نشان‌دهنده سطوح تناسب ذکرشده بود، ذخیره شدند و در مدل مورد استفاده قرار گرفتند.

برای وزن‌دهی به معیارها با روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، تمام معیارها هم‌سطح لحاظ می‌شوند (شکل 3)؛ سپس برای به‌دست آوردن وزن‌های شاخص‌های مرتبط با تهیه نقشه تناسب پتانسیل منابع هیدروکربنی، معیارها در ماتریس مقایسه زوجی باید مقایسه شوند. بنابراین، پرسش‌نامه‌ای طراحی شد و در اختیار هشت متخصص مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران قرار گرفت. مقادیر اولویت معیارها بر یکدیگر مطابق مقیاس معرفی‌شده در مقاله ساعتی (1980) به‌دست می‌آیند. پس از تکمیل پرسش‌نامه توسط متخصصان، سازگاری ماتریس مقایسه زوجی هریک بررسی می‌شود. همچنین، اگر مقدار نسبت سازگاری محاسبه‌شده توسط هریک از متخصصان کوچک‌تر از 0.1 نبود، پرسش‌نامه‌ای جدید به آن‌ها داده شد؛ سپس برای محاسبه نظرهای اجماع عمومی طبق مقاله ساعتی (1980)، میانگین هندسی تمام مقایسات زوجی پرسش‌نامه‌ها محاسبه و یک ماتریس مقایسه زوجی تهیه شد. سپس وزن‌های معیارها توسط نرم‌افزار EXPERT CHOICE محاسبه شدند. درنهایت، پس از بررسی سازگاری مقایسه زوجی برای تصمیم‌گیری گروهی، نسبت سازگاری 0.0328 محاسبه شد. بنابراین، وزن‌های محاسبه‌شده می‌توانند به‌عنوان وزن‌های اولیه معیارها در نظر گرفته شوند (جدول 4).



شکل 3 ساختار سه‌سطحه، شامل هدف، معیارها و گزینه‌ها

یکی از فرضیات اصولی در روش AHP این است که المان‌های هم‌سطح به‌طور کامل از یکدیگر مستقل‌اند (Song Et al., 2003). بنابراین، چنانچه المان‌ها وابستگی داشته باشند، نتیجه ارزیابی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. برای بررسی این وابستگی‌ها و بهینه کردن روش AHP در صورت وابستگی المان‌ها، روش‌های متفاوتی وجود دارد. یکی از این روش‌ها را که به‌سادگی قابل بررسی و بسیار مؤثر است، سانگ<sup>1</sup> و همکاران (2003) طراحی کردند. در این روش، دو پرسش‌نامه به هر متخصص داده شد که یکی برای مقایسه زوجی AHP و دیگری برای وابستگی المان‌های تصمیم‌گیری بود. در این روش نیز مانند روش AHP، برای محاسبه میزان وابستگی براساس نظرهای جمع نیز، میانگین هندسی تمام مقایسات در یک ماتریس تهیه شد.

فرض می‌کنیم ماتریس  $d(i, j)$  شامل مجموعه درجات وابستگی (به درصد) میان المان‌های ارزیابی  $i$  و  $j$ ، وزن المان  $i$ ،  $w_i$  و وزن تقاطعی  $i$  و  $j$ ، و  $w'_{ij}$  وزن تصحیح شده  $i$  باشد. در این روش، پس از محاسبه وزن‌های معیارها با روش AHP، رابطه درجه وابستگی میان معیارها و وزن‌های محاسبه شده اولیه توسط نسبت‌های ساده که در معادلات زیر ارائه شده‌اند، محاسبه می‌شود و در واقع، وزن‌های اولیه تصحیح می‌شوند (جدول 4). از مزایای این روش سادگی

1. Song

محاسبه آن است. این مدل محاسبات را تا جایی تکرار می‌کند که میان معیارها هیچ وابستگی نباشد (Song Et al., 2003). بنابراین، وزن‌های تصحیح‌شده معیارها به جای وزن‌های اولیه محاسبه‌شده با روش AHP برای اجرای پایه استفاده می‌شوند.

رابطه 8

$$w_{ij} = \min(w_i, w_j) \times d(i, j)$$

رابطه 9

$$w'_i = w_i - (0.5)(w_{ij})$$

رابطه 10

$$w'_j = w_j - (0.5)(w_{ij})$$

جدول 4 وزن‌های محاسبه‌شده برای معیارها با روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی

معیارها	شاخص TOC (wt. %)	شاخص S <sub>1</sub> +S <sub>2</sub> (mgHC/grock)	شاخص T <sub>max</sub> (°C)	مجاورت (متر) با محور طاق‌دیس‌ها	وجود مناطق با آنومالی باقی‌مانده ثقل بوگه بالا و مجاورت (متر) با آن‌ها
وزن نهایی	0/0539	0/0828	0/0365	0/3399	0/4869
وزن تصحیح‌شده	0/0528	0/0836	0/0359	0/3345	0/4932

در میان تمام معیارها، وجود مناطق دارای آنومالی باقی‌مانده ثقل بالا و مجاورت با آن‌ها بیشترین وزن را دارد. این بدین معناست که این معیار بر ارزیابی نتایج تأثیر زیادی خواهد داشت. این معیار توسط روش ژئوفیزیکی ثقل‌سنجی حاصل می‌شود که قادر به تصویر کردن آنومالی‌های حاصل از وجود مخازن نفتی است. از آنجا که نفت‌گیرهای موجود در منطقه نفت‌گیرهای طاق‌دیس نامتقارن هستند و همچنین تعدادی از طاق‌دیس‌ها روی سطح زمین مشخص نیستند و توسط روش‌های زیرزمینی کشف می‌شوند، به این معیار وزن بیشتری از معیار مجاورت با محور طاق‌دیس‌های حاصل از نقشه زمین‌شناسی سطحی تعلق می‌گیرد.

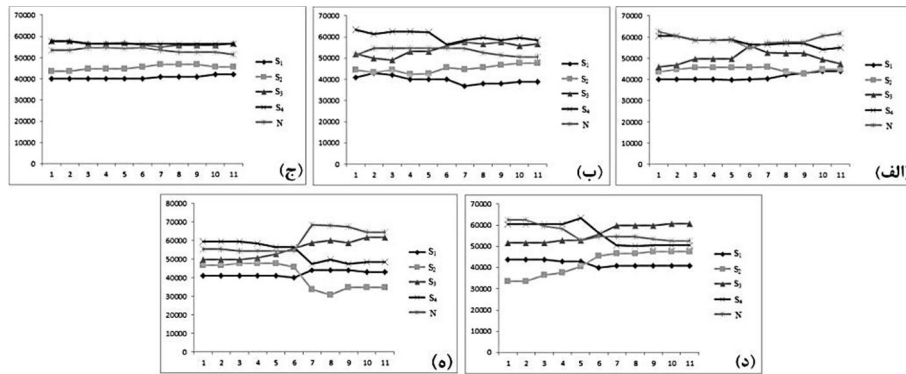


همچنین، در مقایسه با تغییرات مکانی قابل توجه دو معیار مجاورت با محور طاق‌دیس‌ها و وجود مناطق دارای آنومالی باقی‌مانده ثقل بالا و مجاورت با آنها، معیارهای شاخص  $T_{max}$ ، شاخص TOC و شاخص بازده پتانسیل برای تولید هیدروکربن تقریباً همگن هستند. معیار شاخص  $T_{max}$  کوچک‌ترین وزن را در میان تمام معیارها دارد؛ زیرا این معیار در منطقه مطالعه تقریباً یکنواخت است. این شاخص به منظور بررسی بلوغ است و از آنجا که سنگ‌های منشأ موجود در منطقه مطالعه تقریباً در همه جا به سطح مناسبی از بلوغ حرارتی رسیده‌اند، بلوغ سنگ‌های منشأ مسئله‌ای مهم در منطقه نیست. بنابراین، کمترین وزن به این معیار داده می‌شود. در مرحله بعد، نقشه‌های معیارها برای تولید نقشه تناسب جمع می‌شوند. نقشه به دست آمده الگوی مکانی و توزیع کلاس‌های تناسب منابع هیدروکربنی را نشان می‌دهد. نقشه تناسب براساس حد آستانه‌ای مشخص به پنج طبقه بسیار مناسب ( $S_1$ )، مناسب ( $S_2$ )، نسبتاً مناسب ( $S_3$ )، کمتر مناسب ( $S_4$ ) و نامناسب ( $N$ ) طبقه‌بندی شد (شکل 5-الف).

## 5-2- تحلیل حساسیت

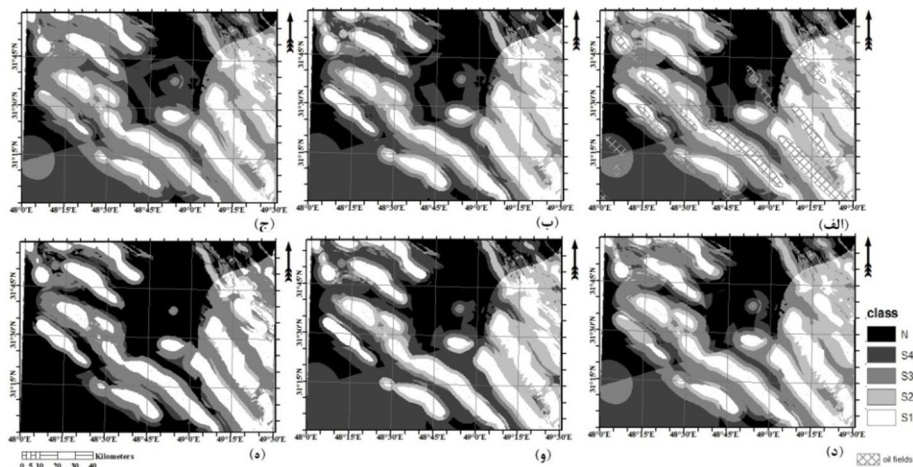
به منظور انجام تحلیل حساسیت، بازه تغییر درصد  $\pm 10\%$  و افزایش تغییر درصد  $\pm 2\%$  برای تمام معیارها به کار برده شدند. از آنجا که از یک سو استفاده از یک بازه تغییر درصد برای تمام معیارها عمومی تر است و از سوی دیگر در نظر گرفتن بازه‌های تغییر درصد متفاوت برای معیارها ممکن است نتایج بررسی را تحت تأثیر قرار دهد، در این تحقیق از بازه‌های تغییر درصد یکسان برای همه معیارها استفاده شد. همچنین، از آنجا که پنج معیار برای پتانسیل‌یابی استفاده شد و از سوی دیگر با توجه به بازه تغییر درصد و افزایش تغییر درصد، به ازای هر یک از معیارها ده نقشه تناسب تولید می‌شود؛ بنابراین با توجه به رابطه 5، تحلیل حساسیت این مطالعه شامل 50 اجراست که هر اجرا یک نقشه تناسب جدید ایجاد می‌کند. نمودارهای تغییر تعداد پیکسل‌های هر طبقه نقشه‌های تناسب برحسب شماره اجرا با تغییر وزن هر یک از معیارها در شکل شماره چهار آمده است.





شکل 4 نمودار تغییر تعداد پیکسل‌های نقشه‌های تناسب خروجی در هر اجرا برای معیارها: الف- شاخص TOC؛ ب- شاخص  $S_1+S_2$ ؛ ج- شاخص  $T_{max}$ ؛ د- مجاورت به محور طاق‌دیس‌ها؛ ه- وجود مناطق دارای آنومالی ثقل بالا و مجاورت با آن‌ها

در شکل بالا محورهای افقی شماره اجرا و محورهای عمودی تعداد پیکسل‌ها هستند. نقشه به دست آمده از اجرای پایه و چند نمونه از نقشه‌های حساسیت پارامترها بر اساس بیشترین تغییرات نسبت به نقشه حاصل از اجرای پایه در شکل شماره پنج آمده است.



شکل 5 الف- نقشه تناسب حاصل از اجرای پایه؛ ب- نقشه تناسب با معیار تغییرکننده اصلی شاخص TOC با تغییر وزن 2%؛ ج- نقشه تناسب با معیار تغییرکننده اصلی شاخص  $S_1+S_2$  با تغییر وزن 2%؛ د- نقشه تناسب با معیار تغییرکننده اصلی شاخص  $T_{max}$  با تغییر وزن 4%؛ ه- نقشه تناسب با معیار تغییرکننده اصلی مجاورت با محور طاق‌دیس‌ها با تغییر وزن 2%؛ و- نقشه تناسب با معیار تغییرکننده اصلی وجود مناطق دارای آنومالی ثقل بوگه بالا یا مجاورت با آن‌ها با تغییر وزن 2%



ترکیب تحلیل حساسیت با فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی در محیط GIS باعث بهبود قابلیت اطمینان خروجی تصمیم‌گیری چندمعیاره و افزایش قابلیت‌های GIS می‌شود. روش ارائه‌شده قابلیت جداسازی خروجی هر مرحله اجرا را به‌شکلی ساده برای تفسیر (یعنی نقشه‌ها، جدول‌ها یا نمودارها)، ارزیابی و سنجش نتایج تحلیل حساسیت دارد.

## 6- یافته‌های تحلیل حساسیت

با توجه به اجراهای انجام‌شده برای انجام تحلیل حساسیت (شکل 4) می‌توان دریافت که معیارهای وجود مناطق دارای آنومالی باقی‌مانده ثقل بالا و مجاورت با آن‌ها و شاخص  $T_{max}$  به‌ترتیب بیشترین و کمترین حساسیت را در میان تمام معیارها دارند. حساسیت سایر معیارها شامل معیارهای مجاورت به محور طاق‌دیس‌ها، بازده پتانسیل برای تولید هیدروکربن و شاخص TOC نیز به‌ترتیب کاهش می‌یابد. این روند مطابق وزن‌های اولیه معیارهای محاسبه‌شده است. با توجه به شکل شماره چهار، به نکات زیر می‌توان اشاره کرد:

- از آنجا که با تغییر وزن معیار وجود مناطق دارای آنومالی باقی‌مانده ثقل بالا و مجاورت با آن‌ها در اجراهای 3 تا 7، کلاس‌های نقشه تناسب تغییرات زیادی می‌کنند، این معیار حساس‌ترین معیار است.

- معیار شاخص  $T_{max}$  با تغییر وزن یا به‌عبارتی، به‌ازای هر اجرا نسبتاً پایدار است. تعداد سلول‌ها در هر کلاس حساسیت در این روش به‌ازای هر اجرا تغییر چندانی نمی‌کند. بنابراین، این معیار کمترین حساسیت را در میان تمام معیارها داراست.

- طبقات  $S_1$ ،  $S_2$  و  $N$  با وجود تغییرات به‌نسبت زیاد با تغییر وزن معیارهای مجاورت با محور طاق‌دیس‌ها و وجود مناطق دارای آنومالی ثقل بالا و مجاورت با آن‌ها، نسبتاً پایدارتر از دیگر طبقات هستند. تعداد سلول‌ها در این دو سطح تناسب تقریباً ثابت می‌مانند. بنابراین، این طبقات تاحدودی مستقل از وزن‌های معیارها هستند.

- بیشترین تغییرات طبقه‌بندی در طبقات  $S_3$  و  $S_4$  رخ می‌دهد. به‌جز شاخص  $T_{max}$ ، بیشترین تغییرات در این دو طبقه در تغییرات درصد 2% سایر معیارها اتفاق می‌افتد.

با وجود این واقعیت که بعضی معیارها به تغییرات وزن حساس‌اند، نتایج ارزیابی اجرای پایه (شکل 5- الف) می‌تواند برای تحلیل مناطق دارای پتانسیل منابع هیدروکربنی به کار رود؛ زیرا طبقات  $S_1$ ،  $S_2$  و  $N$  یعنی طبقات بسیار مناسب، مناسب و نامناسب با تغییر وزن متغیرها، نسبتاً پایدارند و از آنجا که هدف تعیین مناطق با پتانسیل بالا برای وجود منابع هیدروکربنی است، (شامل طبقات  $S_1$  و  $S_2$ )، نقشه تناسب به دست آمده از اجرای پایه قابل استفاده است. همچنین، این مطالعه ثابت می‌کند تحلیل حساسیت، روش بهتری برای بهبود قابلیت‌های مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره GIS مبنای خلاق سناریوهای خروجی واقع‌بینانه‌تر فراهم می‌آورد.

## 7- بحث و بررسی

با توجه به نقشه تناسب به دست آمده از اجرای پایه، طبقات  $S_1$  و  $S_2$  در مناطقی قرار دارند که کلاس‌های با کل کربن آلی بیشتر از (wt. %) 4، بازده پتانسیل برای تولید هیدروکربن بیشتر از  $12 \text{ (mgHC/g rock)}$  و  $T_{\max}$  بین  $435-470 \text{ (C)}$  وجود دارند. با توجه به جدول شماره دو، مناطقی که از نظر کمیت و بلوغ حرارتی سنگ منشأ به ترتیب عالی و بالغ هستند، در طبقات بسیار مناسب و مناسب قرار دارند. با توجه به انطباق شاخص‌های سنگ منشأ و طبقات مناسب در منطقه می‌توان نتیجه گرفت مهاجرت نفت در این منطقه اغلب به صورت عمودی بوده است؛ بنابراین سنگ منشأ به عنوان یک فاکتور در پتانسیل‌یابی در منطقه به کار می‌رود. در مورد مجاورت با محور طاقدیس‌ها، به طور کلی با افزایش فاصله تناسب، وجود منابع نفتی کاهش می‌یابد؛ بنابراین صرف نظر از نامتقارن بودن طاقدیس‌های منطقه، مجاورت با محور طاقدیس‌ها می‌تواند به عنوان معیاری مهم جهت پتانسیل‌یابی منابع هیدروکربنی به کار رود. در مورد فاکتور ژئوفیزیکی نیز تناسب منابع نفتی در مناطق دارای آنومالی بالا و نزدیک به این مناطق بیشتر است. این موضوع نشان می‌دهد احتمال وجود تله‌های طاقدیسی موجود در مکان‌های با آنومالی ثقل بالاتر افزایش می‌یابد.

به منظور انجام اعتبارسنجی، ذخایر نفتی شناخته شده در منطقه مطالعه روی نقشه تناسب حاصل از اجرای پایه (شکل 5- الف) قرار گرفته و درصد ذخایر در هر طبقه محاسبه می‌شود؛

گفتنی است روند باید به گونه‌ای باشد که با افزایش تناسب طبقه، درصد میادین پیش‌بینی شده افزایش یابد (جدول 5).

جدول 5 ویژگی‌های پیش‌بینی مکانی نقشه تناسب پتانسیل هیدروکربنی، برگه 1:250000 اهواز

N	S <sub>4</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	طبقه
					خصوصیات پیش‌بینی مکانی
22/55	22/34	21/24	18/75	15/12	زون‌های تناسب (%)
3/65	5/45	9/23	23/89	57/78	میادین درست پیش‌بینی شده (%)

با توجه به این جدول، با افزایش تناسب طبقه، میزان ذخایر نفتی پیش‌بینی شده افزایش می‌یابد؛ بنابراین مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی به خوبی ذخایر نفتی شناخته شده در منطقه را در مناطق با تناسب بالاتر طبقه‌بندی می‌کند.

روش AHP-SA ارائه شده در این تحقیق بسیار ساده، مکانی و انعطاف‌پذیر است؛ همچنین مکانیزمی معرفی می‌کند برای بررسی اینکه در مسئله تصمیم‌گیری مورد نظر چگونه تغییر در وزن‌های معیارها، خروجی‌های ارزیابی را به‌طور مکانی و کمی تحت تأثیر قرار می‌دهد. پیشرفت‌های اخیر در این حوزه مطالعاتی، مانند تحلیل حساسیت با تغییر مقادیر حد آستانه معیارها و تغییر اهمیت نسبی معیارها، به GIS و MCDM توان پرداختن به مسائل مکانی را با موفقیت بیشتر می‌دهد (Chen, Yu & Kha, 2010).

## 8- نتیجه

نقشه تناسب پتانسیل منابع هیدروکربنی به‌عنوان راهنمایی برای هدایت عملیات اکتشافی بیشتر در مقیاس منطقه‌ای به‌کار می‌رود.

میادین نفتی موجود در برگه 1:250000 اهواز، اغلب دارای روند شمال غربی - جنوب شرقی هستند که منطبق بر روند چین‌خوردگی زاگرس‌اند. این امر در نقشه‌های پتانسیل تولید شده نیز دیده می‌شود؛ به گونه‌ای که در این نقشه‌ها زون‌های با تناسب بالا دارای روند شمال غربی - جنوب شرقی‌اند. همچنین، نقشه تناسب تهیه شده حدود 34 درصد منطقه مطالعه

را در طبقات بسیار مناسب و مناسب طبقه‌بندی کرد که حدود 82 درصد از میادین نفتی شناخته‌شده را دربرداشتند.

این مقاله یک روش تحلیل حساسیت در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی GIS مبنا برای تحلیل حساسیت وزن معیارها در تصمیم‌گیری چندمعیاره ارائه داد که قابلیت اطمینان خروجی تصمیم‌گیری چندمعیاره را بهبود می‌بخشد.

باینکه نمودارهای نتایج تحلیل حساسیت ارائه‌شده مفید هستند، نمی‌توانند الگوی مکانی حساسیت وزنی در یک ارزیابی یا چگونگی شباهت الگوهای مکانی حساسیت در طول اجراها را مشخص کنند.

## 9- منابع

- مرادیان، هومن، بررسی تشخیص ذخایر نفتی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، تهران: دانشگاه تهران، 1382.

- Allen, P.A. & J.R. Allen, *Basin Analysis: Principles and Applications*, 2<sup>nd</sup> Ed., Malden: Wiley-Blackwell, USA, 2005.

- Bingham, L., R. Zurita-Milla & A. Escalona, "Geographic Information System-based Fuzzy-logic Analysis for Petroleum Exploration with a Case study of northern South America", *AAPG Bulletin*, Vol. 96, No. 11, Pp. 2121- 2142, 2012.

- Bordenave, M., *The Middle Cretaceous to Early Miocene Petroleum System in the Zagros Domain of Iran, and Its Prospect Evaluation*, Paper Presented at AAPG Annual Meeting, Houston, Texas, 2002.

- Bordenave, M. & J. Hegre, "The Influence of Tectonics on the Entrapment of Oil in the Dezful Embayment, Zagros Foldbelt, Iran", *Journal of Petroleum Geology*, Vol. 28, No. 4, Pp. 339- 368, 2005.

- \_\_\_\_\_ "Current Distribution of Oil and gas Fields in the Zagros Fold Belt of Iran and Contiguous Offshore as the Result of the

- Petroleum Systems", *Geological Society, London, Special Publications, Vol. 330, No. 1*, Pp. 291- 353, 2010.
- Bunruamkaew, K. & Y. Murayam, "Site Suitability Evaluation for Ecotourism Using GIS & AHP: A Case Study of Surat Thani Province, Thailand", *Procedia-Social and Behavioral Sciences, Vol. 21, No.*, Pp. 269-278, 2011.
  - Chen, Y., J. Yu & S. Khan, "Spatial Sensitivity Analysis of Multi-criteria weights in GIS-based land Suitability Evaluation", *Environmental Modelling & Software, Vol. 25, No. 12*, Pp. 1582-1591, 2010.
  - Crosetto, M., S. Tarantola, & A. Saltelli, "Sensitivity and Uncertainty analysis in Spatial Modelling Based on GIS", *Agriculture, Ecosystems & Environment, Vol. 81, No. 1*, Pp. 71-79, 2000.
  - Daniel, C., "One-at-a-Time Plans", *Journal of the American Statistical Association, Vol. 68, No. 342*, Pp. 353-360, 1973.
  - Delgado, M.G. & J.B. Sendra, "Sensitivity Analysis in Multicriteria Spatial Decision-Making: A Review", *Human and Ecological Risk Assessment, Vol. 10, No. 6*, Pp. 1173- 1187, 2004.
  - Echeverría, M. & W. Jongsma, *Photogeology and GIS in Oil Exploration in Ecuador*, Paper Presented at GIS for Oil & Gas, Houston, USA, Sep. 17-19, 2001.
  - Eldrandaly, K.A. Et al., "Integrating GIS and MCDM using COM technology", *Int. Arab J. Inf. Technol., Vol. 2, No. 2*, Pp. 162-167, 2005.
  - Kocabas, V. & S. Dragicevic, *Sensitivity Analysis of a GIS-based Cellular Automata Model*, Paper Presented at Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ed. By Altman MO, XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, 2004.

- Li, J. & I. Morozov, "Geophysical Investigations of the Precambrian Basement of the Williston Basin in south-eastern Saskatchewan and South-western Manitoba", *Final Project Report, Williston Basin Targeted Geoscience Initiative II, Vol. No.*, Pp., 2007.
- Liping, Y., *Study on the Relationship between Fault System and Oil-Gas Sedimentary in Junggar Basin Based on GIS*, Paper Presented at Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific, 25-28 March 2011.
- Magoon, L.B. & W.G. Dow, *The Petroleum System*, American Association of Petroleum Geologists, 1994.
- Malczewski, J., *GIS and Multicriteria Decision Analysis*, John Wiley & Sons, 1999.
- Marinoni, O., "Implementation of the Analytical Hierarchy Process with VBA in ArcGIS", *Computers & Geosciences, Vol. 30, No. 6*, Pp. 637- 646, 2004.
- Moradian, H., *Detection Evaluation of Petroleum Reserves Using Satellite Images*, Tehran University, 2003. [In Persian]
- Peters, K.E., & M. R. Cassa, "Applied source rock geochemistry", *Memories-American Association of Petroleum Geologists*, Pp. 93-120 1994.
- Saaty, T. L., "A scaling method for priorities in hierarchical structures", *Journal of Mathematical Psychology, Vol. 15, No. 3*, Pp. 234-281, 1977.
- Saaty, T. L., *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, resources Allocation*", McGraw-Hill, 1980.
- Saltelli, A., & K. Chan, *Scott EM: Sensitivity Analysis*", edited, Chichester, England :John Wiley and Sons Ltd, 2000.

- Song, K. H., S. Y. Hong, S. B. Chung, D. J. Kim, & K. S. Chon, "Development of a methodology for solving dependence relationship between multi-criteria in the AHP technique : A case of Korean rail path in a city area", paper presented at Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 4, Pp. 1587-1601, 2003.
- Tissot, B., & D. H. Welte, "Petroleum Formation and Occurrence", edited, Springer Verlag, Berlin, 1984.
- Tounsi, M., "An approximate reasoning based technique for oil assessment", *Expert Systems with Applications*, Vol. 29, No..2, Pp. 485-491, 2005.
- Wadidi, E., "Intelligent GIS Role in Oil Exploration Era: Survey", edited, The Greater Nile Petroleum Operating Company, Khartoum, Sudan, 2003.