

آنالیز حساسیت پارامترهای تولیدی یکی از میادین نفتی ایران با استفاده از روش جامع سو بول

جواد رضائیان^۱، سامان جهانبخشی^۲ و سعید جمشیدی^{۱*}

۱- دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۲- مرکز فناوری میپا

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۳/۲۹

چکیده

استفاده از آنالیز حساسیت یکی از روش‌های مؤثر در ساده‌سازی مدل‌های عددی است. در مدل‌هایی که برای شبیه‌سازی رفتار میادین نفتی ساخته می‌شود، تعداد زیادی متغیر وجود دارد که لزوماً همه این متغیرها تأثیر یکسانی در خروجی مدل ندارند. لذا می‌توان با استفاده از روش‌های آنالیز حساسیت، متغیرهای با اهمیت کمتر را شناسایی کرد و آن‌ها را در مقادیر اسمی ثابت نگه داشت و مدل‌سازی‌ها و پیش‌بینی‌ها را بر مبنای متغیرهای حساس‌تر انجام داد تا در زمان و هزینه صرفه‌جویی شود. روش‌های آنالیز حساسیت به دو دسته روش‌های جامع و روش‌های محلی تقسیم می‌شوند. در این پژوهش ضمن بررسی هر یک از این دو دسته و مزایا و معایب هر یک، روش مناسب برای آنالیز حساسیت در این موضوع معرفی می‌شود که سو بول نام دارد. مزیت روش سو بول نسبت به سایر روش‌ها، جامع بودن و در نظر گرفتن اثرات متقابل پارامترها بر یکدیگر است. در این پژوهش، روش سو بول بر روی مدل سطح یکی از میادین نفتی ایران اجرا شده و شاخص‌های حساسیت سو بول برای هر یک از پارامترها اندازه‌گیری شد که طبق آن، پارامترهایی نظیر اندازه کاهنده، قطر خط لوله و فرکانس پمپ‌های درون‌چاهی بیشترین تأثیر را در میزان دبی نفت تولیدی دارند و در مطالعات بهینه‌سازی تولید میدان باید بیشتر بر روی آن‌ها تمرکز شود. همچنین، میزان حساسیت دبی نفت تولیدی به برخی پارامترها از لحاظ فنی بررسی و تحلیل شد.

کلمات کلیدی: آنالیز حساسیت، روش‌های جامع، روش‌های محلی، روش سو بول، مدل سطح

مقدمه

ایمنی عملیات، زمانی که انجام آزمایش پرهزینه، پرخطر و یا غیرعملی باشد از مدل‌های ریاضی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتار سیستم استفاده می‌شود. مدل‌ها همچنین برای مطالعه عدم قطعیت و آنالیز حساسیت نیز استفاده می‌شوند.

در بسیاری از زمینه‌ها مانند ارزیابی ریسک محیطی، تحلیل عملکرد سیستم‌ها، اطمینان از ساختار یا

*مسئول مکاتبات
آدرس الکترونیکی: jamshidi@sharif.edu
شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2020.4111.2861)

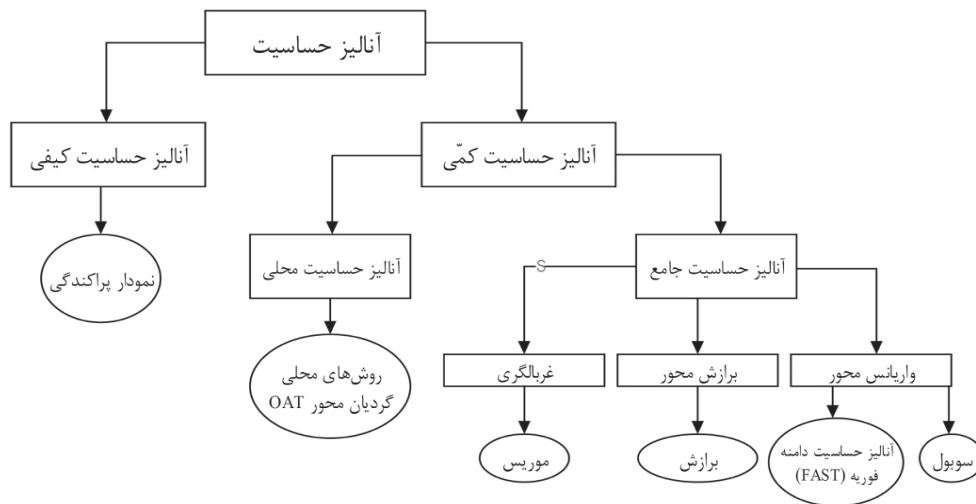
کردند [۶]. المظفر و سپهرنوری به منظور بهینه‌سازی تولید از یک شیل گازی، مؤثرترین پارامترهای شکاف هیدرولیکی و محدودیت‌های چاه را با استفاده از آنالیز حساسیت به‌روش سوبول مشخص کردند [۷]. حمدی و همکاران به بهینه‌سازی تولید یک مخزن شیلی تحت تزریق دوره‌ای گاز پرداختند. بدین‌منظور ابتدا پارامترهای حساس در تولید را تعیین کردند و نشان دادند که بهینه‌سازی پارامترهای حساس، می‌تواند تولید را تا ۳۰٪ افزایش دهد [۸] و جولیانی و همکاران به‌منظور بهینه‌سازی تولید، با آنالیز حساسیت به‌روش سوبول متغیرهای بحرانی را تعیین کردند و با استفاده از آن‌ها، یک مدل جایگزین برای میدان ایجاد کردند [۹].

مروری بر روش‌های آنالیز حساسیت

سالتلی و همکاران [۲]، هلتنون [۱۰-۱۲] و همکاران، فری و همکاران [۱۳ و ۱۴] و کاکوچی [۱۵] مطالعات جامعی را در زمینه آنالیز حساسیت انجام داده‌اند. براساس این مطالعات، روش مطلوب در آنالیز حساسیت روشی است که بدون بعد، کمی^۱، جامع و مستقل از نوع مدل^۲ باشد [۲، ۱۰-۱۱ و ۱۶]. مستقل از نوع مدل بودن بدین معنی است که روش بتواند مدل‌های با ساختارهای مختلف را بدون در نظر گرفتن فرضیات موجود پوشش دهد. به همین دلیل استفاده از روش‌های جامع (نظیر برزش^۳، اثرات ابتدایی^۴، یا تجزیه واریانس^۵) نسبت به روش‌های محلی (نظیر آنالیز دیفرانسیلی^۶ و آنالیز محدوده اسمی^۷) در اولویت قرار دارد. شکل ۱ یک دسته‌بندی کلی از روش‌های آنالیز حساسیت را نمایش می‌دهد.

مدل‌های پیچیده‌ی کامپیوتری چندین مقدار (عدد یا تابع) خروجی را محاسبه می‌کنند که به تعداد زیادی پارامتر ورودی و متغیرهای فیزیکی وابسته‌اند. برخی از این پارامترها و متغیرهای ورودی ممکن است ناشناخته، نامشخص، یا دارای یک محدوده تعریف وسیع و مبهم باشند. پارامترهای ورودی شامل متغیرهای مهندسی یا عملیاتی هستند که شرایط میدان را توصیف می‌کنند. با استفاده از آنالیز حساسیت می‌توان پارامترها را براساس میزان تأثیرگذاری در خروجی رتبه‌بندی کرد. می‌توان با شناخت مهم‌ترین پارامترها اقدام به جمع‌آوری اطلاعات دقیق‌تر درباره این پارامترها کرد و با شناخت کم‌اهمیت‌ترین پارامترها، آن‌ها را از مدل حذف نموده و از پیچیدگی آن کاست. سالتلی آنالیز حساسیت را به‌صورت مطالعه دو مورد تعریف می‌کند [۱ و ۲]: چگونه می‌توان تغییرات در خروجی یک مدل را به تغییرات در متغیرهای ورودی مختلف تقسیم کرد و یا این که مدل موردنظر چگونه به متغیرهای ورودی به آن وابسته است. اهداف متعددی از آنالیز حساسیت دنبال می‌شود که می‌توان به درک مدل، ساده‌سازی مدل و اولویت‌بندی پارامترها اشاره کرد [۳]. فرآیند بررسی و تأیید کدهای کامپیوتری نیز یکی از اهداف اصلی آنالیز حساسیت است. با آنالیز حساسیت می‌توان تشخیص داد که عدم قطعیت در خروجی یک مدل تا چه اندازه از هر یک از منابع مختلف عدم قطعیت در ورودی‌های مدل ناشی می‌شود [۴]. از آنالیز حساسیت می‌توان برای تعیین متغیرهای ورودی با بیشترین تأثیر بر خروجی، متغیرهای بدون تأثیر یا با تأثیر اندک و یا تعیین برخی اثرات متقابل در مدل استفاده نمود. این فرآیند موجب فهم عمیق‌تری از مدل در راستای کاهش عدم قطعیت در خروجی مدل می‌شود [۵]. در صنعت نفت از آنالیز حساسیت با اهداف مختلفی استفاده شده است. الهورایشاوی و همکاران با استفاده از آنالیز حساسیت، فاکتورهای مؤثر در ترکیب تزریق ژل و تزریق آب کم‌شور را تعیین

1. Quantitative
2. Model-Free
3. Regression
4. Elementary Effects
5. Variance Decomposition
6. Differential Analysis
7. Nominal Range analysis



شکل ۱ دسته‌بندی روش‌های مختلف آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت محلی و جامع

این اهداف می‌تواند شامل مواردی از قبیل تعیین و در اولویت قرار دادن مؤثرترین متغیر ورودی، تعیین ورودی‌های بی‌تأثیر جهت ثابت نگه داشتن آن‌ها در مقادیر اسمی، پیاده‌سازی نقشه رفتار خروجی مدل براساس تابعی از مقادیر ورودی و تمرکز بر روی دامنه مشخصی از ورودی‌ها و کالیبره کردن برخی ورودی‌های مدل با استفاده از برخی اطلاعات موجود (مشاهدات واقعی خروجی‌ها، محدودیت‌ها و ...) باشد. در این پژوهش از آنالیز حساسیت به‌روش سوپول به‌علت دقت بالا و توانایی در نظر گرفتن اثرات متقابل متغیرها بر یکدیگر، استفاده می‌شود. همچنین زمانی که آنالیز حساسیت کمی بیشتر مد نظر باشند، باید از روش‌های واریانس‌محور مانند سوپول استفاده کرد. روش‌های آنالیز حساسیت مبتنی بر واریانس مهم‌ترین روش‌های مبتنی بر آنالیز واریانس دو روش FAST^۴ و سوپول^۵ هستند [۱]. در این روش‌ها با استفاده از تجزیه واریانس مدل شاخص‌های اصلی و کلی آنالیز حساسیت به دست می‌آیند. این شاخص‌ها به ترتیب نشان‌دهنده اثر جزئی و کلی هر کدام از ورودی‌ها روی واریانس خروجی هستند.

اولین پیشینه تاریخی آنالیز حساسیت به‌روش‌های محلی^۱ باز می‌گردد. در این روش‌ها، تأثیر یک انحراف جزئی در مقادیر ورودی بر تغییر در خروجی مدل سنجیده می‌شود. این روش مبتنی بر محاسبه یا تخمین مشتقات جزئی مدل در یک نقطه مشخص است. استفاده از روش محلی این امکان را فراهم می‌کند که یک مدل با تعداد زیادی متغیر ورودی مورد بررسی قرار گیرد. استفاده از این رویکرد معمولاً در حل مسائل وسیع زیست‌محیطی مانند مدل‌سازی شرایط آب‌وهوایی، اقیانوس‌شناسی و آب‌شناسی متداول‌تر است [۱۷].

از اواخر دهه ۱۹۸۰ میلادی، به منظور غلبه بر محدودیت‌های روش‌های محلی (فرضیات خطی و نرمال بودن^۲ مدل، تغییرات محلی)، گروه جدیدی از روش‌ها در قالب‌های آماری توسعه داده شد. گروه جدید، "آنالیز حساسیت جامع"^۳ نامیده شد، زیرا تمام بازه تغییرات متغیرهای ورودی را در نظر می‌گیرد [۱۸]. روش‌های جامع به‌دلیل دقت و برتری آن‌ها در محاسبات بسیار مورد توجه محققان مدل‌های عددی و مدل‌سازان قرار گرفت. سالتلی و همکاران [۲] و پاپنبرگر و همکاران [۱۹] تأکید کردند که قبل از انتخاب روش و انجام آنالیز حساسیت، لازم است اهداف مطالعه به‌صورت دقیق مشخص گردد.

1. Local Sensitivity Analysis
2. Linearity and Normality Assumptions
3. Global Sensitivity Analysis
4. Fourier Amplitude Sensitivity Test
5. Sobol' Sensitivity Analysis

آنالیز حساسیت به روش سوپول

ایجادشده از محدوده‌های نمونه‌گیری، در مدل اجرا شده و توزیعی از مقادیر خروجی (f) را می‌سازند که واریانس کلی آن (D) توسط روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$f_0 = \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n f(\theta_s) \quad (۴)$$

$$D = \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n f^2(\theta_s) - f_0^2 \quad (۵)$$

در روابط فوق f_0 میانگین توزیع خروجی مدل و θ_s نمایان‌گر مجموعه پارامترهای مرتبط با نمونه‌ی s است. برای محاسبه واریانس‌های D_i و D_{-i} ابتدا دو ماتریس A و B هر کدام با N مجموعه پارامتر تشکیل داده می‌شوند. مجموعه نمونه‌های A مطابق روابط ۴ و ۵ برای محاسبه واریانس مجموع به کار می‌رود. مجموعه نمونه‌های B برای نمونه‌گیری مجدد یا ثابت کردن هر پارامتر در صورت لزوم در عبارات زیر به کار می‌رود:

$$D_i = \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n f(\theta_s^A) f(\theta_{-is}^B) f_0^2 \quad (۶)$$

$$D_{-i} = \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n f(\theta_s^A) f(\theta_{is}^B) f_0^2 \quad (۷)$$

در روابط ۶ و ۷، مجموعه پارامترهای θ_i با بالانویس مشخص شده که هر پارامتر از کدام مجموعه انتخاب شده‌است. نام مجموعه نمونه‌ها با بالانویس A و B مشخص شده‌است. پارامترهای گرفته شده از هر مجموعه همچنین با زیروند i (پارامتر نام) یا $\sim i$ (همه پارامترها به جز i) مشخص شده‌اند. با این روند می‌توان شاخص‌های حساسیت مرتبه اول و کل را با $N(p+2)$ مرحله اجرای مدل محاسبه کرد که p تعداد پارامترهایی است که شاخص باید برای آن‌ها محاسبه شود.

روش نمونه‌برداری لاتین هایپر کیوب (LHS)

نمونه‌برداری لاتین هایپر کیوب یک روش تصادفی لایه‌بندی شده^۵ است.

روش سوپول، یک روش آنالیز حساسیت جامع و واریانس محور است که واریانس در خروجی مدل را به هر یک از پارامترهای ورودی و اثر متقابل پارامترها ربط می‌دهد. در حالت کلی، رابطه بین واریانس خروجی و واریانس پارامترهای ورودی مدل و تقابل آن‌ها را می‌توان به صورت رابطه ۱ نوشت:

$$D(f) = \sum_i D_i + \sum_{i < j} D_{ij} + \sum_{i < j < k} D_{ijk} + D_{12...p} \quad (۱)$$

که در این رابطه $D(f)$ واریانس کلی خروجی تابع f، D_i واریانس مرتبه اول جزء نام، D_{ij} جزء مرتبه دوم و معرف اثر متقابل پارامترهای i و j و $D_{12...p}$ شامل تمامی اثرات متقابل بالاتر از مرتبه سوم (تا درجه p) بین اجزاء است. شاخص آنالیز حساسیت مرتبه اول^۱ و کل^۲ به صورت روابط ۲ و ۳ تعریف می‌شوند [۲۰]:

$$S_i = D_i / D \quad (۲) \text{ شاخص مرتبه اول:}$$

$$S_{T_i} = 1 - D_{-i} / D \quad (۳) \text{ شاخص کل:}$$

شاخص حساسیت مرتبه اول، نسبت واریانس خروجی حاصل از جزء i بدون در نظر گرفتن اثرات متقابل با سایر اجزاء را اندازه‌گیری می‌کند. شاخص حساسیت کل، از تفاضل ۱ و نسبت واریانس خروجی تحت تأثیر D_{-i} به دست می‌آید که D_{-i} نشان‌دهنده تمامی اجزاء بدون i است. در محاسبه شاخص حساسیت کل، پارامتر i از آنالیز حذف شده و کاهش در واریانس کل اندازه‌گیری می‌شود [۲۱]. اختلاف بین شاخص حساسیت مرتبه اول و شاخص حساسیت کل یک جزء، نشان‌دهنده اثرات متقابل آن جزء با سایر اجزاء است. شاخص‌های آنالیز حساسیت سوپول با روشی که توسط سوپول و سالتلی [۲۲] ارائه شده‌است محاسبه می‌شوند. در این روش، شاخص‌های حساسیت با استفاده از انتگرال عددی در قالب روش مونت کارلو^۳ به صورت تقریبی محاسبه می‌شوند. برای نمونه‌گیری لازم است از روشی که توزیع جامعی از فضای نمونه به دست دهد، استفاده کرد که در این پژوهش از روش نمونه‌گیری لاتین هایپر کیوب^۴ استفاده می‌شود. مجموعه پارامترهای

1. First-Order
2. Total-Order
3. Monte Carlo
4. Latin Hypercube
5. Stratified

سرچاهی کنترل می‌شود و پس از آن از طریق یک خط لوله مشترک به پایانه^۲ می‌رسد. مدل چاه و سطح‌الارض میدان مورد مطالعه شامل ۱۱ چاه، تجهیزات درون‌چاهی (پمپ الکتریکی شناور و لوله مغزی) و سرچاهی (کاهنده) و خط لوله می‌باشد که در شکل ۲ مشاهده می‌شود. مخزن ۱ شامل چهار چاه به شماره‌های ۸، ۱۲، ۱۵ و ۱۶ و مخزن ۲ شامل هفت چاه به شماره‌های ۱، ۲، ۵، ۶، ۷، ۱۳ و ۱۴ است. فشار مخزن ۱ در محدوده ۱۵۰۰ psi و فشار مخزن ۲ در محدوده ۲۵۰۰ psi است. متغیرهای مدل سطح‌الارض این میدان را می‌توان در پنج گروه تفکیک کرد که در جدول ۱ آمده است.

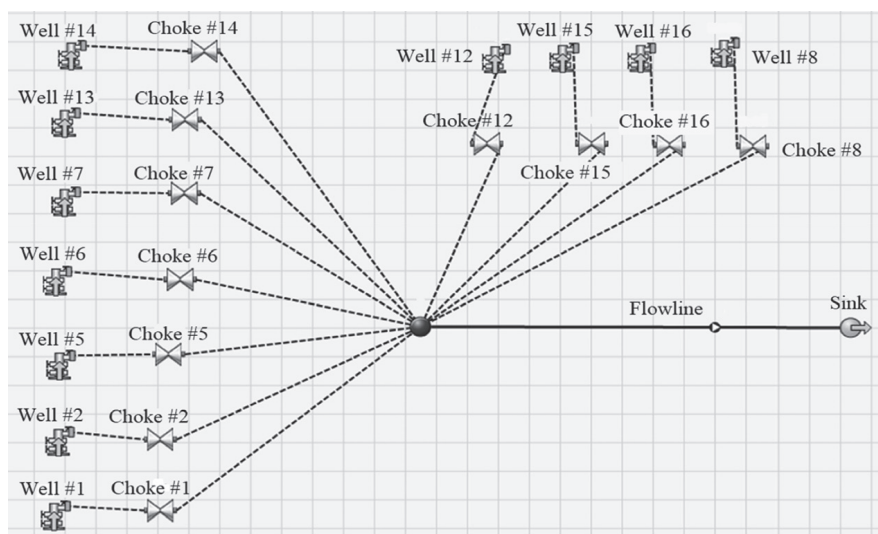
آنالیز حساسیت پارامترهای مدل سطح

در بهینه‌سازی مدل سطح میدان، هدف رسیدن به بیشترین دبی تولیدی نفت است. لذا تابع هدف برای آنالیز حساسیت، دبی نفت تولیدی است. مدل سطح میدان ۴۰ پارامتر ورودی متغیر دارد که به‌صورت یکنواخت در طول محدوده تغییرات تغییر می‌کنند.

در این روش محدوده تعیین‌شده برای هر پارامتر ورودی به بخش‌هایی با توزیع مساوی تقسیم می‌شود تا تمام فضای نمونه به‌صورت برابر شبکه‌بندی شود [۱۱، ۲۳ و ۲۴]. سپس برای نمونه‌برداری، شبکه‌ها به‌صورت تصادفی انتخاب شده و در هر سطر یا ستون تنها از یک شبکه نمونه‌برداری می‌شود. اگر تابع هدف یکنوا یا جمع‌پذیر باشد، روش لاتین هاپیرکیوب نسبت به سایر روش‌های نمونه‌برداری در تعداد نقاط کمتر جواب دقیق‌تری می‌دهد [۲].

معرفی میدان مورد مطالعه

میدان مورد مطالعه در این پژوهش، یک میدان نفتی واقع در آب‌های خلیج فارس است. تولید این میدان از دو مخزن صورت می‌گیرد. نفت تولیدی از این میدان API بالایی داشته و نفت سبک و باکیفیت به حساب می‌آید. حدود دو دهه از بهره‌برداری این میدان می‌گذرد و روش‌های فرازآوری مصنوعی و تزریق آب به‌منظور حفظ فشار مخازن اجرا می‌شود. به‌علت افت فشار مخازن، در برخی چاه‌ها از پمپ الکتریکی شناور استفاده شده است. تولید از تمامی چاه‌ها توسط کاهنده^۱



شکل ۲ شماتیک مدل سطح‌الارض میدان

1. Choke
2. Sink

جدول ۱ متغیرهای مدل سطح میدان

پارامتر	تعداد متغیرهای این گروه	حداقل مقدار	حداکثر مقدار
اندازه کاهنده	۱۱	۰/۲۱۸۷۵ in	۲ in
قطر خط لوله	۱	۱۰ in	۲۰ in
فرکانس پمپ	۸	۳۰ Hz	۹۰ Hz
تعداد مراحل پمپ	۸	۱۵	۱۳۰
قطر لوله مغزی	۱۱	۲/۵ in	۷ in
فشار پایانه	۱	۳۰ psi	۱۰۰ psi

که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، قطر لوله‌های مغزی تأثیر چندانی در عدم قطعیت دبی نفت تولیدی ندارند. علت پایین بودن حساسیت تابع هدف به قطر لوله مغزی، استفاده از پمپ درون چاهی در مسیر تولید است. در صورتی که پمپ در مسیر سیالات تولیدی وجود نداشت، قطر لوله مغزی به علت تأثیر آن در افت فشار سیالات، شاخص حساسیت بالاتری داشت. فشار پایانه با توجه به این که در انتهای مسیر قرار دارد و تولید همه چاه‌ها به آن متصل است، به نظر می‌رسید باید حساسیت بیشتری در دبی نفت تولیدی داشته باشد، اما همان‌طور که مشاهده می‌شود، حساسیت اندکی ایجاد کرده است. علت این موضوع می‌تواند محدوده تغییرات فشار پایانه باشد. با توجه به فشار مخازن و افت فشاری که در طول مسیر به سیال اعمال می‌شود، فشار سیال در انتهای مسیر به اندازه‌ای نیست که تغییر آن بتواند تغییر محسوسی در دبی نفت تولیدی ایجاد کند. در نمودار شکل ۴ پارامترهایی که تأثیر کمتری دارند حذف شده و تنها پارامترهای با تأثیر بیش از ۱٪ نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، به جز دو پارامتر اندازه کاهنده چاه شماره ۵ و تعداد مراحل پمپ چاه شماره ۱۵، سایر پارامترها رفتار قابل انتظار دارند. در ادامه به بیان علت تأثیر زیاد این دو پارامتر پرداخته می‌شود. تقریباً یک‌چهارم تولید میدان از چاه شماره ۵ است. همچنین این چاه فشار بالایی دارد و بدون پمپ در حال تولید طبیعی است.

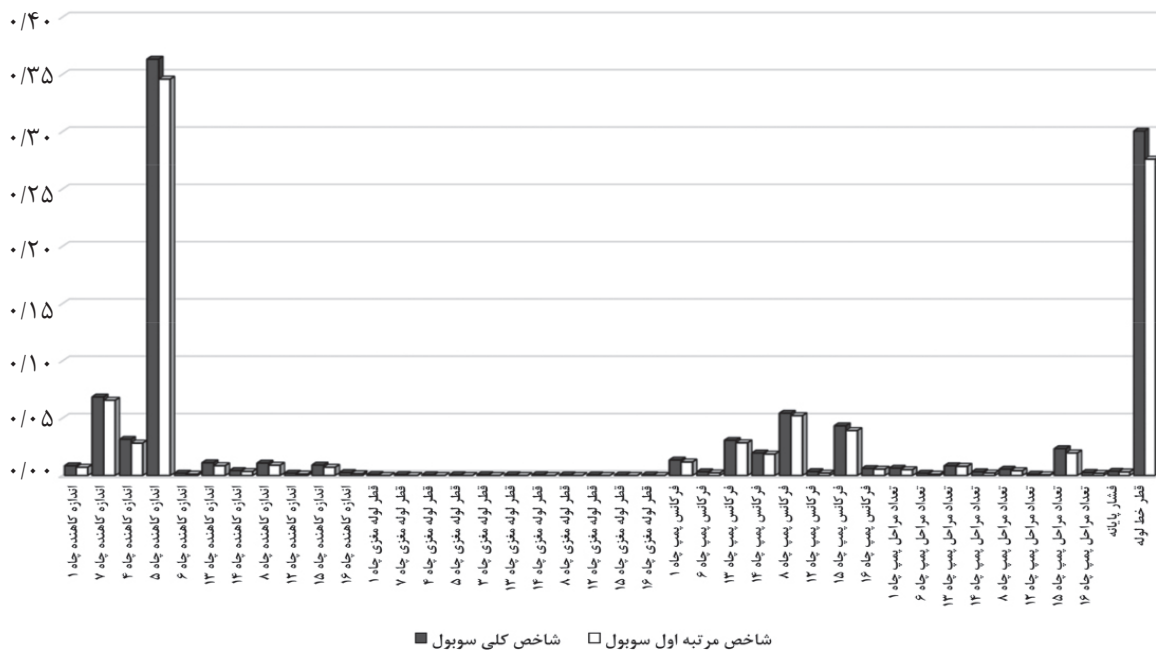
برای بررسی دقیق‌تر عدم قطعیت در خروجی مدل، باید واریانس خروجی به جمع واریانس‌های حاصل از پارامترهای نامطمئن مختلف مدل تجزیه شود. به عبارت دیگر، باید سهم هریک از پارامترهای نامطمئن ورودی و نیز سهم اثرات متقابل آن‌ها بر همدیگر در واریانس خروجی تعیین گردد که این کار توسط آنالیز حساسیت سوپول صورت می‌گیرد.

انتخاب نقاط نمونه

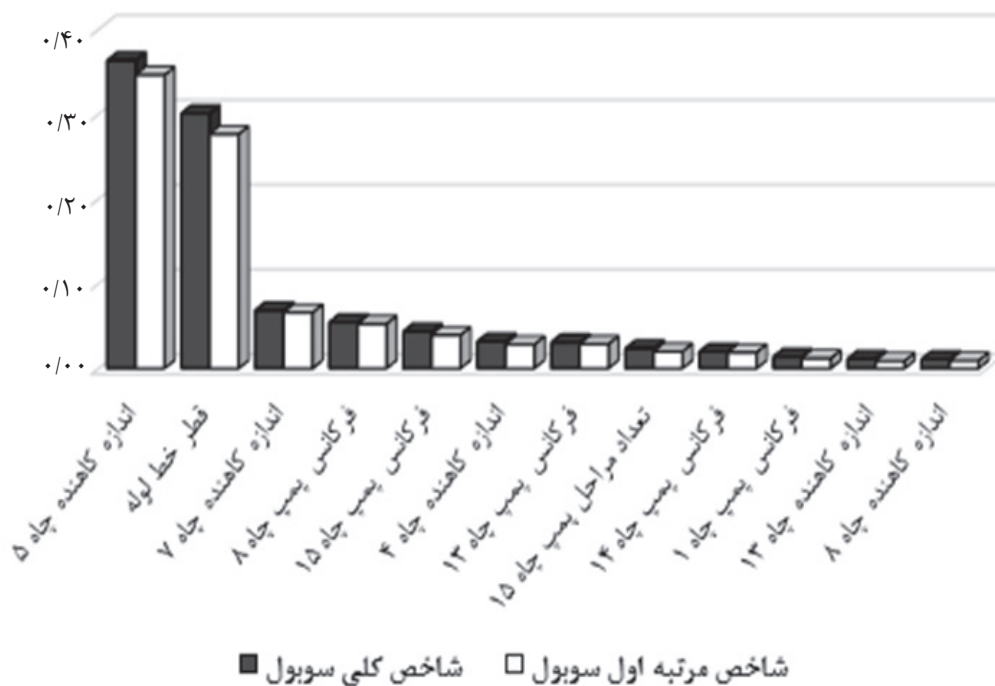
برای آنالیز حساسیت با استفاده از روش سوپول لازم است ابتدا دو مجموعه نقطه کاملاً مستقل به عنوان نقاط نمونه انتخاب شوند تا ماتریس‌های ورودی را تشکیل دهند. تعداد نقاط لازم برای تشکیل هر ماتریس، به نوع تابع، تعداد متغیرهای ورودی و پیچیدگی تابع هدف بستگی دارد. هرچه تعداد نقاط انتخابی بیشتر باشد، دقت محاسبه ضرایب سوپول بیشتر شده و بار محاسباتی نیز افزایش می‌یابد. نقاط نمونه با استفاده از روش لاتین هاپرکیوب انتخاب می‌شوند.

محاسبه شاخص‌های کلی و مرتبه اول

پس از تشکیل دو ماتریس ورودی، تابع هدف در دو مجموعه نقاط محاسبه می‌گردد. برای محاسبه اثرات پارامتر i ، ستون i از ماتریس A با ستون i از ماتریس B جایگزین می‌شوند. در نقاط جدید تشکیل شده تابع فراخوانی شده و شاخص‌های کلی و مرتبه اول سوپول با استفاده از معادلات ۲ و ۳ محاسبه می‌شوند. شکل ۳ شاخص‌های حساسیت مرتبه اول و کل را برای هر یک از ۴۰ پارامتر ورودی نشان می‌دهد. همان‌طور



شکل ۳ شاخص‌های کلی و مرتبه اول سوپول برای متغیرهای مختلف



شکل ۴ متغیرهای با تأثیر بیش از ۱٪

غیرعادی دیگر، حساسیت بالای دبی نفت تولیدی به تعداد مراحل پمپ چاه شماره ۱۵ در مقایسه با سایر پمپ‌ها است. در توجیه این رفتار باید دو موضوع دبی و فشار چاه را در نظر داشت.

لذا تنها پارامتری که در تولید این چاه اثرگذار است، اندازه کاهنده است. از آنجایی که یک‌چهارم تولید میدان تنها توسط این کاهنده کنترل می‌شود، حساسیت بالای دبی نفت تولیدی نسبت به اندازه این کاهنده قابل توجیه است. رفتار

شاخص‌های کلی سوپول به‌علت در نظر گرفتن اثرات متقابل پارامترها، همواره اندکی بزرگتر از یک و مجموع شاخص‌های مرتبه اول به‌علت بررسی پارامتر به‌صورت تنها، همواره اندکی کوچکتر از یک است.

نتیجه‌گیری

آنالیز حساسیت به‌روش سوپول از این جهت که حساسیت پارامترها را با در نظر گرفتن اثرات متقابل آن‌ها می‌سنجد، در انتخاب پارامترهای حساس بسیار موفق عمل می‌کند. در نظر گرفتن اثرات متقابل پارامترها در آنالیز حساسیت مدل‌های بزرگ و با تعداد پارامتر زیاد، ضروری است. همان‌طور که در نتایج این پژوهش نیز مشاهده شد، برخی پارامترها ممکن است به‌تنهایی تأثیری در خروجی مدل نداشته باشند، اما هنگامی که در کنار سایر پارامترها دیده شوند، حساسیت آن‌ها مشخص شود. مانند قطر لوله مغزی که در این پژوهش شاخص سوپول مرتبه اول آن صفر به‌دست آمد که یعنی تغییر قطر لوله مغزی هیچ تأثیری در دبی نفت تولیدی ندارد، اما وقتی در تعامل با سایر پارامترها بررسی شد، اندکی حساسیت نشان داد. همچنین، روش سوپول نیاز به تعداد دفعات زیادی اجرای مدل دارد که بار محاسباتی بسیار بالایی ایجاد می‌کند. به همین دلیل در مواقعی که هر بار اجرای مدل زمان زیادی صرف کند، استفاده از روش سوپول امکان‌پذیر نخواهد بود. برای رفع این مشکل می‌توان از مدل جایگزین^۱ مدل اصلی استفاده کرد که زمان اجرای کمتری داشته باشد. همچنین در این مطالعه مشاهده شد که ممکن است متغیری مانند پمپ یک چاه نسبت به پمپ چاه دیگر در مسیر تولید نفت بیشتری قرار داشته باشد، اما حساسیت تابع هدف به آن کمتر باشد که می‌تواند ناشی از تأثیر سایر عوامل مانند فشار مخزن باشد.

چاه شماره ۱۵ رتبه سوم از نظر دبی تولیدی را در بین چاه‌هایی که با پمپ تولید می‌کنند دارد (چاه‌های شماره ۱۳ و ۱۴ رتبه اول و دوم را دارا هستند)، اما از نظر حساسیت تعداد مراحل پمپ رتبه اول را دارد. موضوع دیگری که باید در تحلیل رفتار پمپ در نظر داشت، فشار مخزن است. فشار مخزن در چاه شماره ۱۵ در محدوده ۱۵۰۰ psi و در چاه‌های ۱۳ و ۱۴ در محدوده ۲۵۰۰ psi است. در نتیجه پمپ درون‌چاهی تأثیر بیشتری در تولید از چاه شماره ۱۵ دارد. بدین ترتیب حساسیت بیشتر تعداد مراحل پمپ چاه شماره ۱۵ به نسبت سایر چاه‌ها توجیه می‌شود. تأثیر پارامترهای هر گروه در مجموع در جدول ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۲ مجموع شاخص‌های سوپول مرتبه اول و کلی هر یک از گروه‌ها

گروه	مجموع شاخص کلی سوپول	مجموع شاخص مرتبه اول سوپول
اندازه کاهنده	۰/۵۱۲۹	۰/۴۷۸۵
قطر خط لوله	۰/۳۰۰۵	۰/۲۷۶
فرکانس پمپ	۰/۱۷۳۵	۰/۱۵۹۷
تعداد مراحل پمپ	۰/۰۵۲	۰/۰۴۱۹
قطر لوله مغزی	۰/۰۰۵۷	۰
فشار پایانه	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۳
مجموع	۱/۰۴۸۲	۰/۹۵۹۱

همان‌طور که مشاهده می‌شود، حدود نیمی از عدم قطعیت در دبی نفت تولیدی از میدان مربوط به اندازه کاهنده است و پس از آن قطر خط لوله با حدود ۳۰٪ و فرکانس پمپ با تقریباً ۱۷٪ بیشترین میزان شاخص حساسیت کلی سوپول را دارند. پارامترهای تعداد مراحل پمپ، قطر لوله مغزی و فشار پایانه در مجموع کمتر از ۱۰٪ در عدم قطعیت دبی نفت تولیدی از میدان تأثیرگذارند. همان‌طور که در جدول ۲ نیز مشاهده می‌شود، مجموع

همان‌گونه که در این مطالعه در مقایسه حساسیت تعداد مراحل پمپ شماره ۱۵ نسبت به پمپ‌های ۱۳ و ۱۴ دیده شد. به‌طور کلی گلوگاه‌های تولید، حساسیت بیشتری در توابع هدف مربوط به تولید ایجاد می‌کنند، مانند خط لوله انتقال زیرا در نهایت تمامی نفت تولیدی باید از این مسیر عبور کند و به نوعی بر تولید از تمامی چاه‌ها تأثیرگذار است.

مراجع

- [1]. Saltelli A, Chan K, Scott M (2000) Sensitivity analysis probability and statistics series, John and Wiley & Sons, New York.
- [2]. Saltelli A, Tarantola S, Campolongo F, Ratto M (2004) Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific model, 1, Wiley Online Library.
- [3]. Iooss B, Lemaître P (2015) A review on global sensitivity analysis methods, in uncertainty management in simulation-optimization of complex systems, Springer, 101-122.
- [4]. Saltelli A (2002) Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices, Computer physics communications, 145, 2: 280-297.
- [5]. Iooss, B. and Saltelli A (2017) Introduction to sensitivity analysis, Handbook of Uncertainty Quantification, 1103-1122.
- [6]. Alhuraishawy AK, Alfarge D, Wei M, Bai B, Almansour A (2018) Influencing factors analysis in the combination of gel treatment and low salinity water flooding using sensitivity analysis, in SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia, Society of Petroleum Engineers.
- [7]. Al-Mudhafar WJ, Kamy Sepehrnoori S, SPE-190835-MS. .
- [8]. Hamdi H, Clarkson CR, Ghanizadeh A, Ghaderi SM, Vahedian A, Riazi N, Esmail A (2019) A bayesian approach for optimizing the huff-n-puff gas injection performance in shale reservoirs under parametric uncertainty: A duvernay shale example, in SPE Europec featured at 81st EAGE Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers.
- [9]. Giuliani M, Cadei L, Montini M, Bianco A, Niccolai A, Mussetta M, Grimaccia F (2018) Hybrid artificial intelligence techniques for automatic simulation models matching with field data and constrained production optimization. in international petroleum technology conference, Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, UAE .
- [10]. Helton JC, Johnson JD, Sallaberry CJ, Storlie CB (2006) Survey of sampling-based methods for uncertainty and sensitivity analysis, Reliability Engineering and System Safety, 91, 10-11: 1175-1209.
- [11]. Helton JC, Davis FJ (2003) Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems, Reliability Engineering and System Safety, 81, 1: 23-69.
- [12]. Helton JC, Davis F (2002) Illustration of sampling-based methods for uncertainty and sensitivity analysis. Risk analysis, 22, 3: 591-622.
- [13]. Frey HC, Mokhtari A, Zheng J (2004) Recommended practice regarding selection, application, and interpretation of sensitivity analysis methods applied to food safety process risk models. US Department of Agriculture, Washington, DC.
- [14]. Frey HC, Mokhtari A, Danish T (2003) Evaluation of selected sensitivity analysis methods based upon application to two food safety process risk models. Prepared by North Carolina State University for Office of Risk Assessment and Cost-Benefit Analysis, US Department of Agriculture, Washington, DC.
- [15]. Cacuci DG (2003) Sensitivity and Uncertainty Analysis, Volume 1: Theory (Hardcover), Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC.
- [16]. Saltelli A, Tarantola S, Campolongo F (2000) Sensitivity analysis as an ingredient of modeling. Statistical Science, 15, 4: 377-395.
- [17]. Castangs W, Dartus D, Le Dimet FX, Saulnier GM (2009) Sensitivity analysis and parameter estimation for distributed hydrological modeling: potential of variational methods, Hydrology and Earth System Sciences, 13, 503-517.

- [18]. Saltelli A, Chan K, Scott E (2000) Wiley series in probability and statistics, in sensitivity Analysis, Wiley.
- [19]. Vanrolleghem PA (2010) Modelling aspects of water framework directive implementation, Iwa Publishing.
- [20]. Sobol IM (2003) Theorems and examples on high dimensional model representation, Reliability Engineering and System Safety, 79, 2: 187-193.
- [21]. Homma T, Saltelli A (1996) Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models, Reliability Engineering and System Safety, 52, 1: 1-17.
- [22]. Sobol IM (2001) Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their monte carlo estimates, Mathematics and computers in simulation, 55, 1-3: 271-280.
- [23]. Fisher RA (1992) The arrangement of field experiments, in Breakthroughs in statistics, Springer, 82-91.
- [24]. McKay MD, Beckman RJ, Conover WJ (1979) Comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code, Technometrics, 21, 2: 239-245.



Sensitivity Analysis of Production Parameters of an Iranian Oilfield using Sobol Method

Javad Rezaeian¹, Saman Jahanbakhshi² and Saeid Jamshidi^{1*}

¹. Department of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

². MAPSA Technology Center

jamshidi@sharif.edu

DOI: 10.22078/pr.2020.4111.2861

Received: March/16/2020

Accepted: June/18/2020

Introduction

Using sensitivity analysis is one of the effective methods to simplify numerical models. There are a lot of parameters in models constructed for the simulation of oilfields. These parameters do not have the same impact on the output of the model. Therefore, utilization of the sensitivity analysis methods help nonsignificant variables be identified and kept at nominal values in order to save time and cost. According to studies, favorable method in sensitivity analysis is a dimensionless, quantitative, global, and model-free method [1-4]. In this study, Sobol method has been selected as a desirable method for sensitivity analysis of production parameters. This method is applied to the surface model of one of Iran's oilfields, and it is characterized that parameters such as choke size, flowline diameter and pump frequency have the greatest effect on the oil production rate.

Methodology

Sobol Method of Sensitivity Analysis

Sobol is a global and variance-based method that correlates the variance in the model's output to each of the input parameters as well as the interaction of the parameters. In general, the relation between variance of the model's output and the input parameters and also their interaction can be written as Equation 1:

$$D(f) = \sum_i D_i + \sum_{i < j} D_{ij} + \sum_{i < j < k} D_{ijk} + D_{12...p} \quad (1)$$

where $D(f)$ is the total variance of the output of the function f , D_i is the first order variance of component i , D_{ij} is a second-order component which represents the interaction of the parameters i and j and $D_{12...p}$ including all higher than second-order interactions (up to p_{th} degree) among components. The first-order and total-order Sobol indices are defined as Equations 2 and 3 [5]:

$$\text{first order Sobol index} : S_i = \frac{D_i}{D} \quad (2)$$

$$\text{total - order Sobol index} : S_{T_i} = 1 - \frac{D_{-i}}{D} \quad (3)$$

The first-order Sobol index calculates the ratio of the variance of the output obtained from component i without considering interactions with other components. The total sensitivity index is obtained from the difference between 1 and the output variance ratio under the impact of D_{-i} , where D_{-i} represents all components except i .

Case Study

The field studied in this research is an oilfield that whose production be made from two reservoirs and located in the Persian Gulf. The well model and the surface model of this field include 11 wells, well equipment (electrical submersible pump and tubing), wellhead facility (choke) and flowline. The surface model variables of this field can be divided into five groups as shown in Table 1.

Table 1 Variables of the surface model.

Group	number of parameters	minimum value	maximum value
Choke size (in.)	11	0.21875	2.00000
Flowline diameter (in.)	1	10	20
Pump frequency (Hz)	8	30	90
Pump stages	8	15	130
Tubing size (in.)	11	2.5	7.0
Sink pressure (psi)	1	30	100

Results and Discussion

Sensitivity Analysis of the Production Parameters

The objective function for the sensitivity analysis in this study is the oil production rate. The surface model has 40 input parameters that change uniformly over their range. Sobol Sensitivity analysis needs two completely independent point sets which should be selected as sample points to form the input matrices

then the objective function is computed in each sets of points. For calculation of the impacts of parameter *i* on sensitivity of model output, column *i* of matrix A is replaced with column *i* of matrix B. In the new points, the function is called and total and first-order Sobol indices are calculated with help of the Equations 2 and 3. In [Figure 1](#), the first-order and total-order Sobol indices for each of the 40 input parameters are shown.

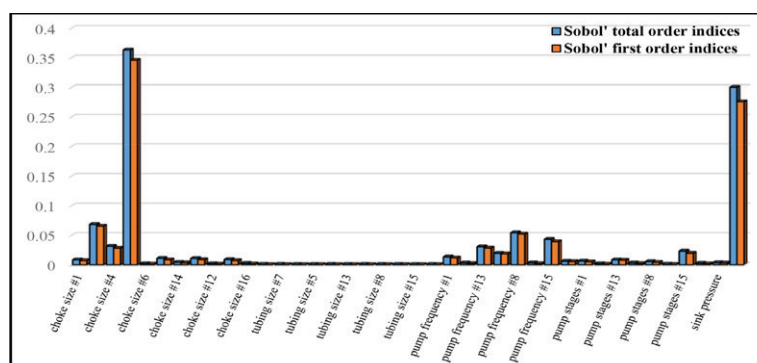


Fig. 1 First-order and total-order Sobol indices for input parameters.

As can be seen in Figure 1, tubing size has little effect on the uncertainty of the oil production rate. Except choke size of well No.5 and the number of pump stages of well No.15, the other parameters have reasonable behavior. Since 25% of the field production come from well No.5, and the production is controlled only by the choke, the high sensitivity of the oil production rate to the choke size of this well is reasonable.

The high sensitivity of the oil production rate to the number of pump stages of well No.15 is related to two factors: rate and pressure. Among the wells producing with pump, well No. 15 is third in terms of production rate. But reservoir pressure is about 1500 psi in well No.15 and 2500 psi in wells No.13 and No.14. As a result, ESP has more impact on production rate of well No.15.

Conclusions

Considering the interaction between parameters is one of the advantages of Sobol method, which is essential in the sensitivity analysis of large models. Some parameters alone may have no effect on the model

output. However, they can be sensitive once they are interacting with other parameters such as tubing size in this study. Furthermore, Sobol method requires a large number of model realizations which impose a high computational burden and make it inappropriate for large models. To overcome this problem, surrogate models should be used.

Generally, objective function is more sensitive to bottlenecks of production such as flowline. Because all produced oil has to cross this path and affects the production of all wells.

References

- Helton JC, Johnson JD, Sallaberry CJ, Storlie CB (2006) Survey of sampling-based methods for uncertainty and sensitivity analysis, *Reliability Engineering & System Safety*, 91, 10-11, 1175-1209.

2. Saltelli A, Tarantola S, Campolongo F, Ratto M (2004) Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific model, 1, Wiley Online Library.
2004: Wiley Online Library.
1. Helton JC, Davis FJ (2003) Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems, Reliability Engineering & System Safety, 81, 1: 23-69.
2. Saltelli A, Tarantola S, Campolongo F (2000) Sensitivity analysis as an ingredient of modeling. Statistical Science, 15, 4: 377-395.
3. Sobol IM (2003) Theorems and examples on high dimensional model representation, Reliability Engineering and System Safety, 79, 2: 187-193.