

## بهبود سرعت آنالیز گره‌ای در محاسبه‌ی نرخ تولید نفت در چاه‌های فراز آوری مصنوعی با گاز توسط یک مدل جدید پیش‌بینی دما

محمدرضا مهدیانی<sup>\*</sup>، احسان خامه‌چی<sup>۱</sup> • دانشگاه صنعتی امیرکبیر

### چکیده

یکی از رایج‌ترین روش‌های فراز آوری مصنوعی روش فراز آوری با گاز است. تخمین بهره‌وری قبل از اجرای این روش ضروری است. برای این تخمین و محاسبه‌ی مقدار افزایش تولید نفت، از آنالیز گره‌ای و مدل‌های تجربی برای جریان چندفازی خواص سیال و دما استفاده می‌شود. در حالت معمول این روش بسیار طولانی و وقت‌گیر است که یکی از عوامل طولانی بودن آن، تخمین پروفایل دما در چاه است. رایج‌ترین روش جهت محاسبه‌ی دما در آنالیز گره‌ای، روش حسن-کبیر است که روشی دقیق اما طولانی است. استفاده از روش‌های سریع‌تر نیز در چاه‌های فراز آوری مصنوعی با گاز منجر به ایجاد خطای زیادی می‌شود. در این مقاله دمای چند نقطه‌ی انتخابی درون چاه (به‌عنوان نقاط مهم) با استفاده از مدل حسن-کبیر محاسبه شده و توسط دمای این نقاط و ترکیب روش‌های خطی و رگرسیون، دمای سایر نقاط محاسبه گردید. سپس با استفاده از پروفایل دمای محاسبه شده و مدل آنالیز گره‌ای معمول، مقدار نفت تولیدی چند چاه تعیین شد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مدل جدید ضمن افزایش چشم‌گیر سرعت مدل، به دقتی زیاد (در حد مدل حسن-کبیر) نیز منتج می‌شود.

### اطلاعات مقاله

\* دریافت:

۹۴/۵/۱۰

\* ارسال برای داوری:

۹۴/۵/۱۷

\* پذیرش:

۹۴/۶/۳۱

### واژگان کلیدی

مدل‌سازی دما  
فراز آوری مصنوعی  
مدل خطی  
آنالیز گره‌ای

\*نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (mmahdiany@yahoo.com)



## مقدمه

نسبت به سایر روش‌ها عملکرد بهتری دارد. در مقاله‌ی حاضر برای محاسبه‌ی افت دما این روش به‌عنوان روش معیار در نظر گرفته می‌شود.

## ۲- روش حسن-کبیر برای محاسبه‌ی پروفایل دما در چاه

حسن و کبیر با استفاده از موازنه‌ی انرژی زمین اطراف چاه، سیال داخل ناحیه‌ی حلقوی، سیال داخل لوله مغزی و نیز با استفاده از تبدیل لاپلاس معادلات خود را به‌دست آوردند. دمای بدون بُعد  $T_D$  و نیز زمان بدون بُعد  $t_D$  به‌شکل روابط ۱ و ۲ تعریف می‌شوند که یکای دما در آنها فرانهایت است.

$$T_D = -\frac{2\pi K_e}{q_{ae}}(T_{wb} - T_{ei}) \quad (1)$$

$$t_D = \frac{K_e t}{\rho_e C_e r_a^2} \quad (2)$$

که با استفاده از موازنه‌ی زمین اطراف چاه روابط ۳ و ۴ را خواهیم داشت:

$$T_D = \left[0.4063 + \frac{1}{2} \ln(T_D)\right] \left[1 + \frac{0.6}{t_D}\right] \quad t_D > 1.5 \quad (3)$$

$$T_D = 1.1218 \sqrt{t_D} (1 - 0.3\sqrt{t_D}) \quad t_D < 1.5 \quad (4)$$

که به‌شکل پیوسته طبق روابط ۵ و ۶ هستند:

$$T_D = \ln(e^{-0.2 t_D} + (1.5 - 0.3719 e^{-t_D})\sqrt{t_D}) \quad (5)$$

$$q_{ae} = -\frac{w_a C_{pa}}{A}(T_a - T_{ei}) \quad (6)$$

$$A = \frac{C_{pa} w_a}{2\pi} \left[ \frac{K_e + (r_a U_2 T_D)}{r_a U_2 K_e} \right] \quad (7)$$

از موازنه‌ی انرژی سیال داخل ناحیه‌ی حلقوی روابط ۸ و ۹ ایجاد خواهد شد:

$$B = \frac{w_a C_{pa}}{2\pi r_t U_1} \quad (8)$$

$$C_{pa} \frac{dT_a}{dz} = \frac{C_{pa}}{A}(T_{ei} - T_a) + \frac{C_{pa}}{B}(T_t - T_a) \quad (9)$$

CJ از معادله‌ی الوز [۶] (رابطه‌ی ۱۰) به‌دست می‌آید:

$$C_J = \frac{1}{C_{pi}} \left[ \frac{x}{\rho_g} \left( -\frac{T}{z} \left( \frac{\partial z}{\partial T} \right)_p \right) + \frac{1-x}{\rho_L} \right] \quad (10)$$

حسن و کبیر با فرض کوچک بودن کسر جرمی گاز، از جمله‌ی دوم صرف نظر کرده و  $C_J$  را به‌صورت  $C_J = \frac{1}{C_{pi} \rho_L}$  در نظر گرفتند. آنها همچنین جملات دوم و سوم را حذف و رابطه‌ی ۱۱ را ارائه کردند:

با گذشت زمان و ادامه‌ی تولید، رفته‌رفته فشار مخزن افت کرده و در نتیجه تولید نفت کاهش می‌یابد. این فرآیند تا جایی ادامه می‌یابد که دیگر تولید، صرفه‌ی اقتصادی ندارد. در این شرایط از روش‌های مختلف فزآوری مصنوعی استفاده می‌شود تا تولید دوباره به حد اقتصادی برگردد. یکی از این روش‌ها فزآوری با گاز است. در این روش، گاز از نقطه‌ای داخل لوله مغزی تزریق می‌شود تا با حل شدن آن در نفت و از طریق کاهش وزن ستون نفت، تولید افزایش یابد. برای پیش‌بینی عملکرد این روش، قبل از آغاز آن با استفاده از آنالیز گره‌ای، مقدار افزایش تولید تخمین زده می‌شود. در آنالیز گره‌ای چاه به چندین قسمت تقسیم می‌شود. با دانستن فشار سرچاهی، فشار و دمای متوسطی برای بالاترین بخش فرض می‌شود که با دانستن آنها و استفاده از روابط تجربی، خواص نفت و گاز تخمین زده می‌شود و با استفاده از یک معادله‌ی جریان دوفازی، فشار در انتهای بخش محاسبه می‌گردد. سپس دوباره فشار متوسط در درون بخش محاسبه می‌شود که اگر به اندازه‌ی کافی به فشار متوسط فرض شده نزدیک بود فشار انتهای بخش قابل قبول است و در غیر این صورت، محاسبات با فشار متوسط جدید تا جایی تکرار می‌شود که فشار متوسط جدید و قدیم برابر شوند. اکنون فشار انتهای بخش اول، فشار ابتدای بخش بعدی است و محاسبات ذکر شده برای بخش‌های بعدی نیز تکرار می‌شود تا در نهایت فشار ته‌چاهی تعیین گردد. اکنون با فرض نرخ‌های جریانی دیگر، فشارهای ته‌چاهی متناظر آنها محاسبه شده و نمودار فشار ته‌چاهی بر حسب نرخ جریان رسم می‌شود. جهت محاسبه‌ی فشار و نرخ تولید چاه، این نمودار با نمودار عملکرد چاه تقاطع داده می‌شود.

از مهم‌ترین بخش‌ها در آنالیز گره‌ای، تخمین دمای درون چاه است که روش‌های مختلفی برای آن وجود دارد. در ادامه، کارهای مختلف انجام شده برای محاسبه‌ی پروفایل دما در درون چاه بررسی خواهند شد.

## ۱- سابقه‌ی تحقیق در پیش‌بینی پروفایل دما در چاه

تحقیقات زیادی برای پیش‌بینی دما در هر نقطه‌ی چاه انجام شده است. کیرکپاتریک [۱] توزیع دما را به‌صورت خطی در نظر گرفت. رمی [۲] برای پیش‌بینی دما، چاه را با قطر صفر در نظر گرفت و معادله‌ای ارائه کرد که برای چاه‌های عمیق، نرخ‌های تولید زیاد و چاه‌های تازه تکمیل شده مناسب نیست [۵-۲]. ساگار [۳] روش رمی را توسعه داد و آلوز [۶] روشی قابل‌استفاده برای چاه و لوله‌های سطحی ارائه کرد. فرشاد [۷] مدلی با شبکه‌های عصبی ساخت. شینو و بگ [۸] نیز فاصله‌ی آرامش رمی را تصحیح کردند. مدل آنها در برخی موارد نسبت به مدل رمی (که از معتبرترین مدل‌هاست) نتیجه‌ی بهتری دارد و در سایر موارد نتیجه‌ی هم‌تراز با آنرا می‌دهد [۹]. روش حسن-کبیر [۴] روش جدیدتری است که مختص فزآوری با گاز ارائه شده و در این مورد

$$\beta = \frac{(T_{as} - T_{es})e^{\lambda_1 L} + (1 - \lambda_1 B')(g_g L + B'' g_g + T_{es} - T_{tbh})}{e^{\lambda_1 L}(1 - \lambda_2 B') - e^{-\lambda_2 L}(1 - \lambda_1 B')} \quad (20)$$

$$- \frac{g_g e^{\lambda_1 L}(B'' - B')}{e^{\lambda_1 L}(1 - \lambda_2 B') - e^{-\lambda_2 L}(1 - \lambda_1 B')}$$

برای مدل سازی مسأله باید لوله مغزی به بخش های مختلفی تقسیم شده و دما در هر یک از این بخش ها محاسبه شود. برای این کار می توان با استفاده از روش حسن-کبیر و طبق معادلات ذکر شده دما را در نقاط مختلف محاسبه کرد. این روش دقت بسیار زیاد، اما محاسباتی طولانی دارد و به دلیل آنکه در مسائل بهینه سازی باید تابع هدف بارها و بارها محاسبه شود سرعت را به شدت کاهش می دهد. روش دیگری که در بسیاری از نرم افزارهای شبیه سازی مانند vfpی نیز استفاده می شود، در نظر گرفتن دما به صورت خطی در تمامی طول چاه است. این روش برای تولید طبیعی قابل قبول است اما در فراز آوری مصنوعی با گاز مناسب نیست؛ چراکه ضریب کلی انتقال حرارت در بالا و پایین نقطه ی تریق متفاوت است. در این مقاله با استفاده از ترکیب روش های خطی، روش حسن-کبیر و همچنین رگرسیون، مدلی ارائه شده که ضمن داشتن دقتی زیاد (در حد روش حسن-کبیر)، سرعتی بسیار بیشتر از روش حسن-کبیر (در حد مدل های خطی) دارد.

### ۳- مدل سازی دمای درون چاه

قبل از مدل سازی و مقایسه ی دمایی باید مدلی برای تولید از چاه و تخمین نرخ جریان معرفی کرد. برای ساخت این مدل از روش آنالیز گره ای که قبلاً

$$B' = \frac{w_t C_{pt}}{2\pi r_i U_1} \quad (11)$$

$$T_{ei} = T_{es} + g_g z \quad (12)$$

$$B'' = B' + \frac{B'}{B} A - A \quad (13)$$

$$t_{tp} = g_g z + T_{es} + B'' g_g \quad (14)$$

$$\lambda_1 = -\frac{B''}{2AB'} + \frac{B'}{2AB'} \sqrt{1 + \frac{4AB'}{B''^2}} \quad (15)$$

$$\lambda_2 = -\frac{B''}{2AB'} - \frac{B'}{2AB'} \sqrt{1 + \frac{4AB'}{B''^2}} \quad (16)$$

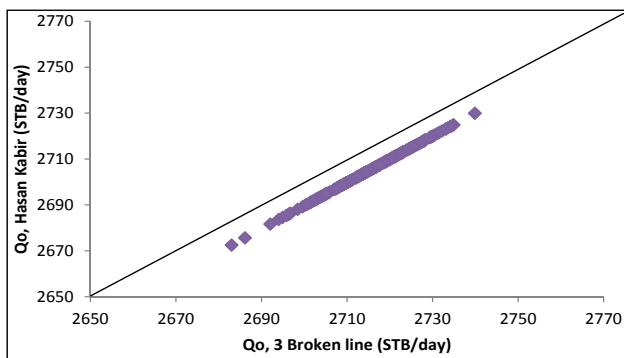
$$T_t = \alpha e^{\lambda_1 z} + \beta e^{\lambda_2 z} + g_g z + B'' g_g + T_{es} \quad (17)$$

دمای لوله مغزی طبق رابطه ی ۱۸ محاسبه می شود:

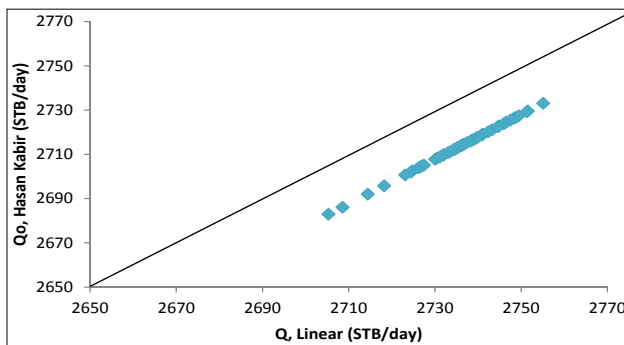
$$T_a = T_t - B' \frac{dT_t}{dz} = (1 - \lambda_1 B') \alpha e^{\lambda_1 z} + (1 - \lambda_2 B') \beta e^{\lambda_2 z} + g_g (B'' - B') + g_g z + T_{es} \quad (18)$$

با اعمال دو شرط مرزی سطح و پایین ترین قسمت لوله ی مغزی روابط ۱۹ و ۲۰ را خواهیم داشت:

$$\alpha = \frac{T_{tbh} - T_{es} - \beta e^{\lambda_2 L} - g_g L - B'' g_g}{e^{\lambda_1 L}} \quad (19)$$

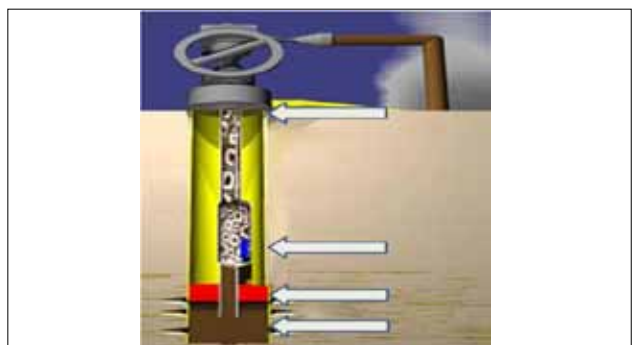


شکل ۱ | نمودار مقایسه ی مقدار نفت تولیدی با روش سه خط شکسته و روش حسن-کبیر



شکل ۲ | نمودار مقایسه ی مقدار نفت تولیدی روش خطی و روش حسن-کبیر

معادله	ویژگی
استندینگ <sup>۱</sup>	فشار و دمای بحرانی
بیل <sup>۳</sup>	گرانروی نفت مرده
پاپای <sup>۴</sup>	تراکم پذیری گاز
لی <sup>۵</sup>	گرانروی گاز
وگل <sup>۶</sup>	عملکرد مخزن
چیو-کنالی <sup>۷</sup>	گرانروی نفت زنده
اصلاح شده ی هاگدورن- براون <sup>۸</sup>	جریان دو فازی
لستر <sup>۹</sup>	نسبت گاز محلول به نفت



شکل ۳ | نقاطی که دمای آنها با روش حسن-کبیر محاسبه می شود



ضریب ۰/۹۹۶۳ برای نفت تولیدی به دست می آید. اکنون مدل، کامل شده و در بخش بعدی عملکرد آن بررسی خواهد شد.

#### ۴- نتایج و بحث

مقدار نفت تولیدی ۵۰ چاه جدید در روش حسن-کبیر و روش سه خط شکسته و البته با وجود ضریب مناسب مقایسه می شود. نتایج نشان می دهد این دو مدل پاسخ های بسیار نزدیک به یکدیگر را پیش بینی می کنند. البته زمان مدل جدید بسیار کوتاه تر از مدل حسن-کبیر است. در این بخش نفت تولیدی چاه هایی با ویژگی های مختلف در نظر گرفته شده است. مقدار نفت تولیدی این چاه ها با فرض نرخ های تزریق مختلفی محاسبه شده است. در ادامه نمودارهای مقادیر تولیدی با استفاده از مدل های مختلف دمایی بررسی می شود. مدل حاصل با داده هایی که تا کنون استفاده نشده اند ارزیابی می شود. در شکل ۳- نمودار مقایسه ای روش حسن-کبیر بر حسب روش خطی دیده می شود که در آن ۵۰ نقطه ای که در آزمایش مدل جدید استفاده شده به کار می روند.

همان طور که مشاهده می شود این روش دقت خوبی ندارد. با این حال در برخی نرم افزارهای تجاری از این روش استفاده می شود. در شکل ۴- نموداری تقاطعی حاصل از مدل این مقاله بر حسب مدل حسن-کبیر برای ۵۰ نقطه ای که در ساخت مدل استفاده نشده اند دیده می شود.

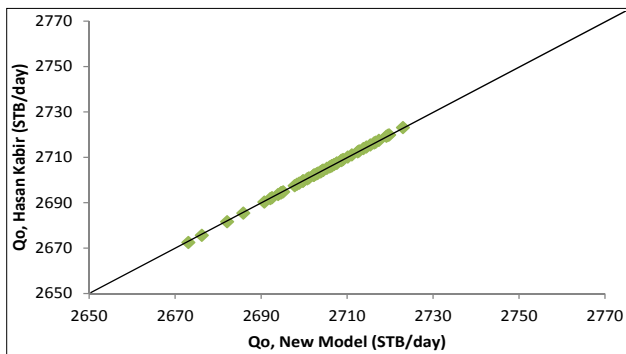
معرفی شد استفاده خواهیم کرد. همان گونه که قبلاً نیز اشاره شد ساخت این مدل نیازمند مدل هایی جهت به دست آوردن خواص سیال و نیز مدلی برای جریان دوفازی این مدل هاست که در جدول ۱ ارائه شده اند.

در این مقاله ابتدا با استفاده از روش حسن-کبیر دما در نقطه ای تزریق و نیز انتهای لوله مغزی (که قطر داخلی تغییر می کند) محاسبه شد. این نقاط در شکل ۱- دیده می شوند.

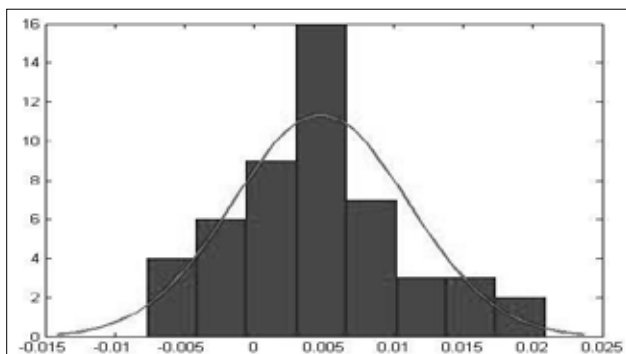
در فاصله ای بین این نقاط، سیستم از هر لحاظ همگن است. بنابراین اگر دما به صورت خطی توزیع شود باید دقت بهتری داشته باشد. برای تحقیق این مطلب ۲۰۰ چاه در نظر گرفته شد. حدود متغیرهای این چاه ها در جدول ۲- دیده می شود.

سپس نفت تولیدی آنها در دو حالتی که دما در کل چاه با روش حسن-کبیر محاسبه شود و اینکه به صورت سه خط شکسته در نظر گرفته شود (محاسبه ای دما در نقطه ای تزریق و انتهای لوله مغزی و سپس اختصاص دما به ناحیه ای بین آنها به صورت خطی) محاسبه و با هم مقایسه گردید. پیش بینی مدل سه خط شکسته حدود ۰/۳ درصد از پیش بینی روش حسن-کبیر بزرگ تر است. در شکل ۲- روش حسن-کبیر با روش سه خط شکسته مقایسه شده است.

با وجود آنکه طبق این شکل پیش بینی روش سه خط شکسته خوب است اما می توان دقت آنرا بیش از این نیز بهبود بخشید. با استفاده از شکل ۲- و برازش داده ها بر ساده ترین شکل ممکن معادله (روش خطی با عرض از مبدأ صفر)،



شکل ۴ | نمودار مقایسه ای مقدار نفت تولیدی بر اساس مدل این مقاله و روش حسن-کبیر



شکل ۵ | نمودار میلای توزیع در صد خطای نسبی مدل جدید

متغیر	کمینه	بیشینه
درجه ای سبکی نفت (API)	۲۳/۶۱	۳۴/۱۴
شاخص بهره دهی (STB/psi)	۱/۶۴	۲/۷۵
فشار مخزن (psi)	۲۹۰۰	۴۳۰۰
برش آب (%)	۱/۵	۱۵
قطر داخلی لوله مغزی (in)	۲/۷۵	۴/۸۷
عمق چاه (ft)	۸۳۰۰	۱۰۵۰۰
فشار سرچاهی (psi)	۲۰۷	۵۴۰
عمق تزریق (ft)	۳۹۰۰	۸۵۰۰
گرانروی نفت تزریقی	۰/۶۸	۰/۹۲
قطر داخلی لوله جداری (in)	۴/۳۷	۹/۸۵
قطر خارجی لوله مغزی (in)	۳	۵/۳۳
کشش سطحی	۵۰	۶۴
جرم مخصوص آب	۱/۰۰	۱/۱۲
دمای سرچاهی (°F)	۱۱۰	۱۸۰
جرم مخصوص گاز	۰/۶۷	۰/۹۵
نسبت گاز به مایع (SCF/STB)	۴۱۰	۶۴۰
گرانروی نفت (cp)	۱/۹۷	۳/۵۴
دمای مخزن (°F)	۲۰۰	۳۱۵
فشار حباب (psi)	۴۳۰	۶۵۰
نرخ گاز تولیدی (MMSCF)	۴	۰/۳
عمق لوله مغزی (ft)	۳۴/۶	۹۳۲۰
اندازه ای روزنه	۲۰	۵۸

همان‌طور که در شکل ۴- نیز دیده می‌شود دقت این مدل بسیار زیاد است. در شکل ۵- نمودار میله‌ای توزیع خطا مشاهده می‌شود. در این نمودار کمترین خطا کمتر از ۰/۰۰۵ درصد است و بیشترین خطا نیز از ۰/۰۲ تجاوز نمی‌کند. تا اینجا دقت مدل بیان شد. اما دلیل اصلی تعریف مدلی برای جایگزینی مدل حسن- کبیر کاهش زمان است. در شکل ۶- مقایسه‌ی زمان اجرا برای این دو مدل دیده می‌شود. متوسط زمانی مدل جدید ۰/۰۶ ثانیه است که نسبت به ۰/۱۸ ثانیه‌ی مدل حسن- کبیر ۶۷ درصد کمتر می‌باشد. در این شکل‌ها مقیاس به گونه‌ای انتخاب شده که تفاوت‌ها به خوبی قابل مشاهده باشد. اما با دقت بیشتر مشاهده می‌شود که همه‌ی این مدل‌ها دقت خوبی دارند (جدول-۳).

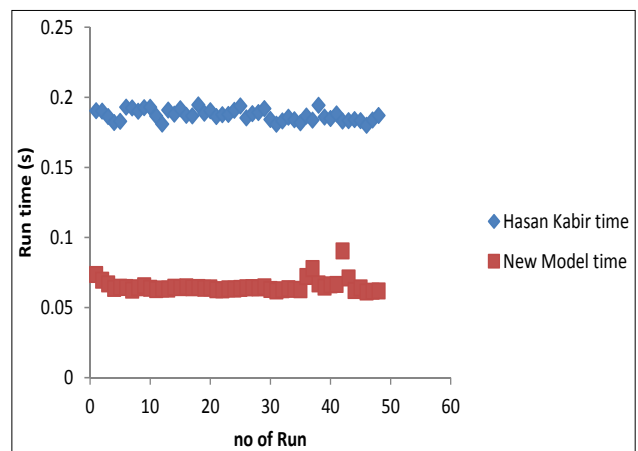
با توجه به این جدول مدل‌های مختلف دما در فراز آوری با گاز دقت قابل قبولی دارند. از نظر زمانی واضح است که زمان اجرا با مدل‌های خطی، سه‌خط شکسته و مدل این پایان‌نامه تقریباً مشابه است؛ چرا که پس از گرد شدن، همه‌ی تا دو رقم اعشار به یک عدد منتج شده‌اند.

#### نتیجه‌گیری

روش حسن- کبیر در محاسبه‌ی پروفایل دما روشی دقیق اما زمان‌بر است و به‌ویژه به دلیل آنکه در مسائل بهینه‌سازی باید تابع هدف بارها و بارها محاسبه شود سرعت را به شدت کاهش می‌دهد. در محاسبه‌ی پروفایل دما روش خطی روشی بسیار سریع‌تر از روش حسن- کبیر است. اما دقت کم است و از این رو برای برخی موارد به‌ویژه فراز آوری با گاز مناسب نیست. روشی که در این مقاله ارائه شد سرعت زیاد روش خطی و دقت زیاد روش حسن- کبیر را دارد که پس از بررسی، عملکرد مناسب آن تأیید شد. ■

جدول ۳ | درصد خطای نسبی و زمان اجرایی مدل‌های مختلف دما

مدل خطی	مدل سه‌خط شکسته	مدل این مقاله	کمیت
۰/۸۲	۰/۳۷	۰/۰۰۶۳	میانگین خطای نسبی (%)
۰/۸۱	۰/۳۸	۰/۰۰۵۴	میانه‌ی خطای نسبی (%)
۰/۸۴	۰/۳۹	۰/۰۲۱	بیشینه‌ی خطای نسبی (%)
۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	متوسط زمان اجرا (s)



شکل ۶ | مقایسه‌ی زمان اجرای شبیه‌ساز با استفاده از مدل حسن-کبیر و مدل این مقاله

#### پانویس‌ها

<sup>1</sup>khamehchi@aut.ac.ir

<sup>5</sup>Lee

<sup>9</sup>Laster

<sup>2</sup>standing

<sup>6</sup>Vogel

<sup>10</sup>Swerdlhoff

<sup>3</sup>Beal

<sup>7</sup>Chew- Connaly

<sup>4</sup>Papay

<sup>8</sup>Modified Hagedorn-Brown

#### منابع

- [1] Kirkpatrick. (1959). Advanced In Gas Lift Technology. Drill And Production Prac, 24.
- [2] Ramey, J. (1962). Wellbore Heat Transmission. JPT, 427, 225.
- [3] Sagar, R. K., Doty, D. R., & Schmidt, Z. (1991, Nov). Predicting Temperature Profile In Flowing Well. SPEPE , 441.
- [4] Hasan, A., & Kabir, C. (1994, Aug). Aspect Of Wellbore Heat Transfer During Two Phase Flow. SPEPF , 211.
- [5] Kabir, C. S. (1996, June). Determination Circulating Fluid Temperature In Drilling Work Over And Well Control Operation. SPEDC , 7479-.
- [6] Alves, I. N., Alhanati, F., & Shoham, O. (1992, Nov). A Unified Model For Predicting Flowing Temperature Distribution In Wellbores And Pipelines. SPEPE , 363.
- [7] F. Farshad\*, J. G. (1999). Predicting Temperature Profiles In Producing Oil Wells Using Artificial Neural Networks. Sixth Latin American And Caribbean Petroleum Engineering Conference. Caracas, Venezuela.
- [8] Shinu, K. C., & Beggs, H. D. (1980, March). Predicting Temperature In Flowing Wells. Energy Source Technology , 211-.
- [9] Takacs, G. (2005). Gas Lift Manual. Hungary: Penwell.