

## الگوی سازی فرایند کراکینگ کاتالیتیکی بستر سیال

فاطمه یحیی زاده ساروی\*، محمد رضا قاسمی و علی حکمت ناظمی

دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران.

دریافت: اردیبهشت ۱۳۹۰، بازنگری: آبان ۱۳۹۰، پذیرش: دی ۱۳۹۰

**چکیده:** کراکینگ کاتالیتیکی بستر سیال (FCC) فرایند مهمی برای تبدیل برش‌های سنگین نفتی به برش‌های سبکی چون بنزین و اولفین‌های سبک می‌باشد. در این پژوهش الگوی سازی پایا و یک بعدی رایزر فرایند FCC، با در نظر گیری الگوی سینتیکی ۴ لامپ انجام شد. الگوی با استفاده از معادلات مربوط به موازنه جرم مومنتم و انرژی نوشته و به کمک نرم افزار MATLAB برنامه نویسی شد. فرض شده است که ذرات کاتالیست به صورت خوشه در طول رایزر به سمت بالا حرکت می‌کنند. با استفاده از الگوی به دست آمده، بازده فراورده‌ها، پروفایل دمای درون رایزر، سرعت فاز گاز و جامد، سرعت کاهش فعالیت کاتالیست در طول رایزر مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌ها به دست آمده هم خوانی خوبی با داده‌های صنعتی منتشر شده نشان می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** الگوی سازی، رایزر، کراکینگ کاتالیتیکی، FCC

### مقدمه

ورودی رایزر تعبیه شده است، به قطرات ریزی تبدیل می‌شود. این قطرات کوچک مایع پس از تبخیر با کاتالیست‌های داغ احیا شده به همراه فاز سیال ساز، باعث حرکت رو به بالای ذرات کاتالیست درون رایزر می‌شود. فراورده‌ها هیدروکربنی به تدریج و در طی این فرایند، تولید می‌گردند. بر اثر مکانیسم کراکینگ، بر روی سطوح کاتالیست رسوبات کک تشکیل می‌شود و از فعالیت کاتالیست می‌کاهد. در انتهای رایزر بخار فراورده‌ها به وسیله سیکلون از کاتالیست‌های کک گرفته جدا می‌شود. بخار هیدروکربنی پس از

فرایند FCC از مهمترین روش‌های تولید بنزین، LPG و اولفین‌های سبک از برش‌های سنگین نفتی در پالایشگاه‌ها است. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود این فرایند شامل سه بخش اصلی است. رایزر (بالا برنده)، سیکلون و احیا کننده. مهمترین بخش این فرایند رایزر است که واکنش‌های کراکینگ در آنجا رخ می‌دهد. خوراک این فرایند که بیشتر باقی مانده سنگین به دست آمده از برج تقطیر در خلا (VGO) است، به وسیله افشانک‌هایی که در

صحیح پارامترهای عملیاتی لازم است، الگوی های هیدرودینامیکی ارایه شده است. از الگوی های هیدرودینامیکی ارایه شده می توان به الگوی پیشنهاد شده به وسیله Pugsley و همکاران [۳] اشاره کرد که با ارایه رابطه تجربی زیر برای فاکتور لغزشی  $Sf$  بیان می شود.

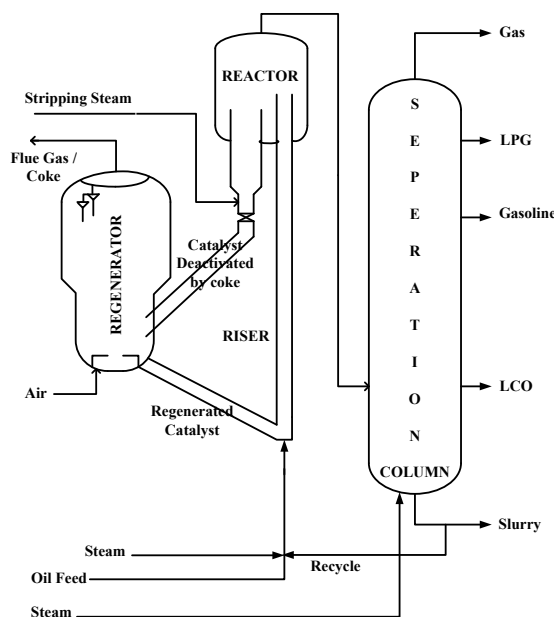
$$Sf = 1 + (5.6/Fr^2) + 0.47 Fr_i^{0.47} \quad (1)$$

در این رابطه  $Sf$  نسبت بین سرعت فاز گاز به جامد را بیان می کند.  $Fr$  و  $Fr_t$  به ترتیب عدد فرود در سرعت ظاهری گاز و سرعت پایانی تک ذره است. Sadeghzadeh و همکاران [۴] نیز از الگوی زیر برای تخمین فاکتور لغزشی استفاده کرده اند:

$$Sf = 1 + (5.6/Fr) + 0.47 Fr_i^{0.47} \quad (2)$$

الگوی هیدرودینامیکی دیگری به وسیله Bollas و همکاران [۵] برای رایزر هایی در مقیاس آزمایشگاهی با قطر کوچک ارایه شد. آن ها دریافتند افت فشار در رایزرهای با قطر کوچک قابل

ورود به ستون جداسازی از یکدیگر تفکیک می گردند. کاتالیست ها نیز وارد احیا کننده شده و کک روی سطح کاتالیست در برخورد با هوا در دمای بالا می سوزد و از سطح کاتالیست حذف می شود. کاتالیست های احیا شده وارد ورودی رایزر شده و گرمای لازم برای تبخیر خوراک جدید و عملیات کراکینگ را فراهم می کنند. مکانیسم پیچیده هیدرودینامیک و سینتیک فرایند FCC یکی از چالش های مهم برای پژوهشگران در زمینه الگوی سازی این فرایند است. حتی با گذشت بیش از شش دهه از ابداع این فرایند همچنان پژوهش برای دستیابی به الگوی های دقیق تر ادامه دارد. نخستین الگوی سینتیکی به وسیله Weekman و همکاران [۱] در سال ۱۹۶۸ ارایه شد. در این الگوی فرآورده ها در ۳ گروه اصلی طبقه بندی شدند: خوراک تبدیل نشده (VGO)، بنزین و کک به همراه گازهای سبک (الگوی ۳ لامپه). با جدا شدن کک از لامپ گاز، الگوی سینتیکی ۴ لامپه تشکیل شد [۲]. پس از آن الگوی های دقیق تری با افزایش تعداد لامپ ها به وجود آمد که سبب افزایش تخمین پارامترهای سینتیکی و پیچیدگی در عملیات محاسباتی می شد. از آن جایی که درک هیدرودینامیک بسترهای سیال برای انتخاب

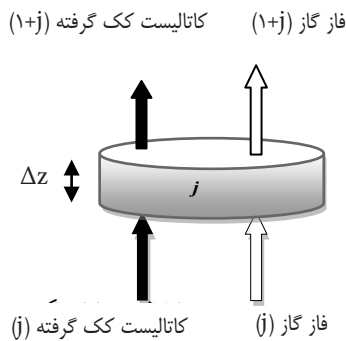


شکل ۱ شمای کلی فرایند FCC

سبب این حرکت خوشه ای ذرات را می‌شود. به دلیل اهمیت فراوان فرایند FCC برای تولید بنزین، ارایه الگویی که رفتار پیچیده این سامانه را پیش بینی کند تا بتوان در طراحی از آن استفاده کرد و نیز بازده حداکثر تولید بنزین را تخمین زد، بسیار با ارزش خواهد بود. این الگوی سازی به کمک الگوی سینتیکی ۴ لامپه برای کل رایزر (مهمترین بخش فرایند) در شرایط پایا و یک بعدی انجام شد. الگوی شامل معادلات موازنه جرم، مومنتم و انرژی است که با نرم افزار MATLAB کدنویسی شده است. نتیجه‌ها به دست آمده از الگوی با داده‌های صنعتی و همچنین با نتیجه‌ها به دست آمده از الگوی ارایه شده به‌وسیله‌ی [۹] Gupta و [۱۰] Heydari مقایسه شد.

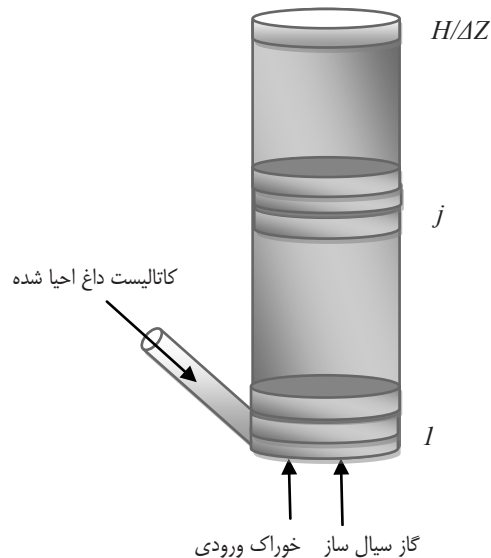
#### الگوی سازی رایزر

الگوسازی با تقسیم بندی رایزر به المان‌های کوچک حجمی و مساوی ( $\Delta z$ ) آغاز می‌شود. (شکل ۲).



صرف نظر کردن نیست. تاثیر افت فشار بر شبیه سازی رایزرهای صنعتی FCC به وسیله‌ی Becerril و همکاران [۶] مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج آن‌ها نشان داد که تخمین درصد تبدیل و میزان بازده فراورده‌ها با تغییر افت فشار بهبود می‌یابد و از این رو الگوی سازی باید با در نظر گیری افت فشار انجام گیرد. نسبت سرعت گاز به جامد که به عنوان عبارتی به نام فاکتور لغزشی شناخته شده است، که بر عملکرد بهینه بستر سیال موثر است. تاثیر قطر ذرات خوراک بر عملکرد رایزر به وسیله‌ی Nayak و همکاران [۷] به کمک نرم افزار FLUENT مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها دریافتند که با تعبیه افشانک‌هایی که خوراک را به قطرات ریزتر تبدیل می‌کند می‌توان بازده بنزین را افزایش داد. در این الگوی سازی همچنین سرعت تبخیر قطرات خوراک با سرعت برخورد به ذرات کاتالیست مورد بررسی قرار گرفت.

حرکت ذرات کاتالیست به صورت مجموعه ای از ذرات با سرعت یکسان (خوشه) به وسیله‌ی Flinger و همکاران [۸] مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها دریافتند که وجود فاکتور لغزشی زیاد درون رایزر



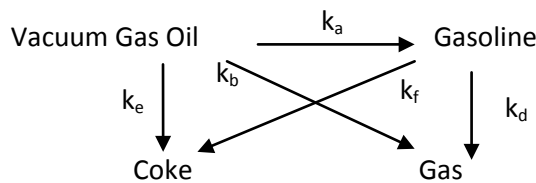
شکل ۲ المان حجمی درون رایزر

که  $(U_c/j)$  سرعت فاز جامد در هر المان است.

#### الگوی سینتیکی

بررسی ویژگی‌های سینتیکی و ترمودینامیکی هر لامپ نیازمند آزمایش‌های متعددی است. برای توسعه الگوی‌هایی که برای واحدهای FCC و ماکزیمم کردن فراورده‌ها در نظر گرفته می‌شود، همواره محدودیت‌هایی وجود دارد. از این قبیل محدودیت‌ها می‌توان به افزایش تعداد متغیرهای سامانه که به صورت پر حجمی با بالا رفتن تعداد لامپ‌ها افزایش می‌یابد و غیر خطی شدن مساله و ... اشاره کرد [۱۲]. بنابراین از الگوی ۴ لامپه می‌توان به عنوان الگوی ساده و جامعی که نه تنها باعث افزایش سرعت محاسبات و عدم نیاز به تخمین حجم بالایی از پارامترها می‌شود بلکه همان‌طور که نشان داده خواهد شد، نتیجه‌ها به دست آمده از الگوی، بازده فراورده‌ها مهمی چون بنزین و کک را با دقت خوبی بیان می‌کند.

در این مقاله از الگوی سینتیکی ۴ لامپه (شکل ۳) استفاده گردید: VGO (خوراک)، بنزین ( $C_5^+$ )، گاز (متان، اتان، هیدروژن،  $C_3$  و  $C_4$ ) و کک [۲].



شکل ۳ الگوی سینتیکی چهار لامپ

سرعت واکنش از روابط زیر به دست می‌آید:

$$r_{a(j)} = k_{(a(j))} y_{1(j)}^2 \phi_{(j)} \quad (6)$$

$$r_{(b(j))} = k_{(b(j))} y_{1(j)}^2 \phi_{(j)} \quad (7)$$

$$r_{(d(j))} = k_{(d(j))} y_{1(j)}^2 \phi_{(j)} \quad (8)$$

$$r_{(e(j))} = k_{(e(j))} y_{2(j)} \phi_{(j)} \quad (9)$$

$$r_{(f(j))} = k_{(f(j))} y_{2(j)} \phi_{(j)} \quad (10)$$

$k$  در رابطه‌های فوق ثابت سرعت واکنش و  $\phi$ ، ضریب فعالیت

این المان‌ها از پایین رایزر شماره گذاری شده‌اند. به هر المان دو فاز وارد می‌شود. فاز گازی شامل بخار فراورده‌ها و بخار سیال ساز (مثل نیتروژن)، و فاز جامد شامل کاتالیست کک گرفته می‌باشد. سینتیک واکنش ۴ لامپه در نظر گرفته شد که شامل خوراک (VGO)، بنزین، گازهای سبک و کک می‌باشد.

#### فرضیات

- \* فاز گاز از قانون گاز ایده آل پیروی می‌کند [۱۱].
- \* کاتالیست و گاز در هر المان دمای یکسانی دارند.
- \* از تغییرات در جهت شعاع رایزر صرف نظر شد.
- \* شرایط در کل رایزر پایا و مقادیر ورودی در هر المان با مقادیر موجود در هر المان برابر در نظر گرفته شده است.
- \* خوراک ورودی در المان اول پس از برخورد با کاتالیست داغ تبخیر و عملیات کراکینگ آغاز می‌شود.
- \* فرض شده است که تمام کک روی سطح کاتالیست پس از احیا شدن حذف می‌شود.
- \* کراکینگ خوراک از نوع واکنش‌های درجه دو و کراکینگ بنزین از نوع واکنش‌های درجه یک در نظر گرفته شده است.

#### موازنه جرم

موازنه جرم برای فاز جامد و فاز گاز به ترتیب با معادلات ۳ و ۴ نشان داده شده است:

$$C_{rate} + y_{4(j+1)} \times F_{rate} - C_{rate} - y_{(4(j))} \times F_{rate} = r_{coke(j)} \times C_{rate} \times \tau_{(j)} \quad (3)$$

$$y_{(4(j+1))} = y_{(4(j))} + r_{(coke(j))} * CTO * \tau_{(j)}$$

$$y_{i(j+1)} \times F_{rate} - y_{i(j)} \times F_{rate} = r_{i(j)} \times C_{rate} \times \tau_{(j)}$$

$$y_{(i(j+1))} = y_{(i(j))} + r_{i(j)} * CTO * \tau_{(j)}$$

$i=1$ - VGO,  $2$ - Gasoline,  $3$ - Light gases (4)

$C_{rate}$  و  $F_{rate}$  به ترتیب دبی جرمی کاتالیست و خوراک و  $CTO$  نسبت بین این دو می‌باشد.  $Y_{\%}$  درصد جرمی کک و  $Y_i$  درصد جرمی فراورده‌ها گازی است.  $r$  سرعت تولید یا مصرف لامپ‌ها و  $(\tau_{(j)})$  زمان اقامت ذرات کاتالیست در هر المان می‌باشد:

$$\tau_{(j)} = \Delta z / U_{c(j)} \quad (5)$$

$$\rho_{g(j)} = \left( \frac{P_{(j)} \times M_{ave(j)}}{R \times T_{(j)}} \right)$$

چگالی خوشه و مبه وسیله‌ی چگالی خوشه به همراه کک و کسر حجمی خوشه از معادلات زیر به دست خواهد آمد.

$$\rho_{c(j)} = \rho_p (1 - \varepsilon_c) + \rho_{g(j)} \times \varepsilon_c$$

$$\frac{\rho_{c(j)}}{\rho_{c(j)}} = \frac{C_{rate} + Y_{4(j)} \times F_{rate}}{C_{rate} + Y_{4(j)} \times F_{rate}} \frac{\rho_{coke}}{\rho_{coke}}$$

$$\delta_{c(j)} = \frac{C_{rate} + Y_{4(j)} \times F_{rate}}{A_r \rho_{c(j)} U_{c(j)}}$$

R ثابت جهانی گاز، P، فشار در هر ارتفاع از رایزر، T، Mave و A<sub>r</sub>، به ترتیب، دمای گاز (یا جامد، فرض تعادل گرمایی در نظر گرفته شده است)، میانگین جرم ملکولی فاز گاز و سطح مقطع رایزر است.

پس از محاسبه پارامترهای مورد نظر در هر المان با حل عددی معادله ۱۲، با استفاده از روش تفاضلات محدود، سرعت فاز جامد به صورت معادله ۲۲ محاسبه می‌شود:

$$U_{c(j+1)} = U_{c(j)} + \frac{A_r \Delta z}{C_{rate} + Y_{4(j)} \times F_{rate}} \left[ \sum F_{(j)} - \frac{F_{rate}}{A_r} U_{c(j)} \times \left( \frac{Y_{4(j+1)} - Y_{4(j)}}{\Delta z} \right) \right]$$

موازنه انرژی

از موازنه انرژی حول المان z رابطه ۲۳ به دست می‌آید. در این رابطه مشاهده می‌شود که گرمای کاتالیست سبب افزایش دمای خوراک و گاز سیال ساز شده و گرمای لازم را برای واکنش کراکینگ فراهم می‌کند.

$$[C_{rate} Cp_{cat} + y_{4(j-1)} F_{rate} Cp_{coke} + S_{rate} Cp_{steam} + y_{1(j-1)} F_{rate} Cp_{VGO} + y_{2(j-1)} \times F_{rate} \times Cp_{Gasoline} + y_{3(j-1)} F_{rate} Cp_{Gas}] (T_{(j-1)} - T_{(j)}) = C_{rate} \times \tau_{(j-1)} \sum r_1 \Delta H_1 \quad (23)$$

با استفاده از معادله ۲۴ دما در هر المان محاسبه می‌شود:

$$\rightarrow T_{(j+1)} = T_{(j)} - \frac{C_{rate} \times \tau_{(j)} \sum r_1 \times \Delta H_1}{C_{rate} \times Cp_{cat} + S_{rate} \times Cp_{steam} + F_{rate} \times \sum Y_{i(j)} \times Cp_i}$$

l= a, b, d, e and f.

r و ΔH به ترتیب سرعت و آنتالپی واکنش تبدیل توده‌های هیدروکربنی است.

## نتیجه‌ها و بحث

الگوی با استفاده از برنامه MATLAB کدنویسی شد و سپس

کاتالیست هستند که با رابطه تجربی ۱۱، [۱۳] تخمین زده می‌شود:

$$\varphi_{(j)} = (1 + B) / (B + \exp(A * Cc_{(j)}))$$

$$A = ۴.۲۹, B = ۱۰.۴$$

Cc در صد وزنی کک بر روی سطح کاتالیست در هر المان است [۱۳].

موازنه مومنتم

موازنه مومنتم در حالت پایا برای فاز خوشه به صورت زیر بیان می‌شود [۱۴]

$$\frac{d(\bar{\rho}_c \delta_c U_c^2)}{dz} = \Sigma F = 0.5 C_D A_p \rho_g (U_g - U_c)^2 + \frac{2 f_g \delta_c \bar{\rho}_c U_c^2}{D_r} - \varepsilon_c \bar{\rho}_c g$$

که در آن، (ρ<sub>c</sub>)<sup>-</sup> و δ<sub>c</sub> به ترتیب چگالی فاز جامد و کسر حجمی خوشه است. سمت راست این معادله مجموع نیروهای موثر بر خوشه را در رایزر بیان می‌کند که به ترتیب شامل نیروی کششی (F<sub>D</sub>)، نیروی شناوری (F<sub>B</sub>) و نیروی گرانش (F<sub>G</sub>) می‌باشد. نیروی کششی، ناشی از اختلاف سرعت فاز گاز و جامد است که باعث حرکت رو به بالای ذرات کاتالیست می‌شود [۱۴]، نیروی شناوری بر اساس اختلاف فشار بین دیواره و جامد بیان شده است [۹] و نیروی گرانشی، برابر با وزن خوشه می‌باشد. در این معادله، C<sub>D</sub>، ضریب کششی (معادلات ۱۳ و ۱۴) [۱۵] است که به کمک عدد رینولدز (معادله ۱۵) تعیین می‌شود. همچنین A<sub>p</sub>، کل مساحت تصویر شده بر واحد حجم (معادله ۱۶)، و ρ<sub>g</sub> و U<sub>g</sub> به ترتیب چگالی و سرعت فاز گاز (معادلات ۱۷ و ۱۸) می‌باشند. در این عبارات، f<sub>s</sub> ضریب اصطکاک فاز جامد، D<sub>r</sub> قطر رایزر، ε<sub>c</sub> و g به ترتیب تخلخل خوشه و شتاب جاذبه می‌باشند.

$$\begin{cases} Re_{(j)} < 1000 & C_{D(j)} = \frac{24}{Re_{(j)}} (1 + 0.15 \times Re_{(j)}^{0.687}) \\ Re_{(j)} > 1000 & C_{D(j)} = 0.44 \end{cases}$$

$$Re_{(j)} = \rho_{g(j)} \times (1 - \varepsilon_c) | (U_{g(j)} - U_{c(j)}) | \times d_c / \mu_g \quad (15)$$

در معادله ۱۳، μ<sub>g</sub>، گرانیوی فاز گاز است.

$$A_p = 1.5 \frac{\varepsilon_c}{d_c}$$

که در آن d<sub>c</sub> قطر خوشه است. که به وسیله‌ی Flinger و همکاران [۸]، ۶ میلی متر تخمین زده شده است.

رایزر هم تجمع کاتالیست بیشتر بوده و هم فعالیت کاتالیست و دمای رایزر همچنان زیاد است، در نتیجه فرایند شکست سریعتر رخ می‌دهد. با پیشروی در طول رایزر و افزایش تولید فراورده‌ها جانبی روند افزایش شدید بازده بنزین، کمتر خواهد شد زیرا بنزین تبدیل به کک و گاز می‌شود (شکل ۴-الف). با توجه به این شکل مشخص می‌شود که الگوی توانسته پیش بینی خوبی از الگوی بازده فراورده‌ها داشته باشد زیرا مقادیر به دست آمده از الگوی خروجی رایزر با مقادیر صنعتی گزارش شده تطابق خوبی دارد.

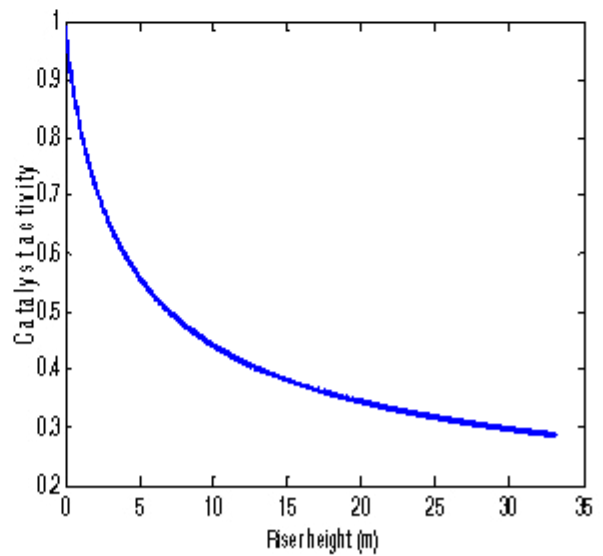
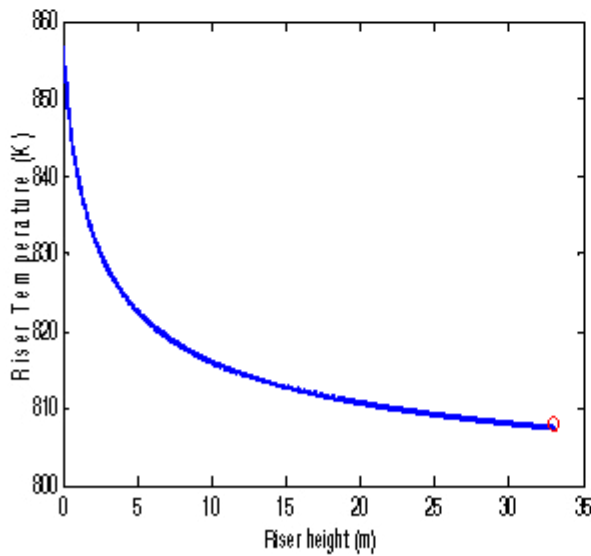
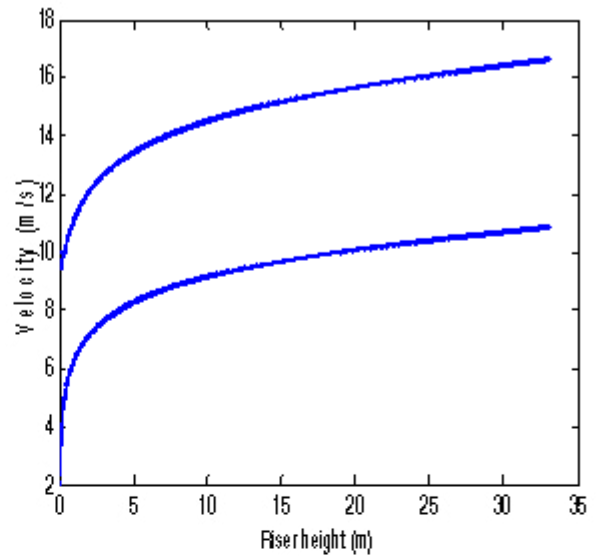
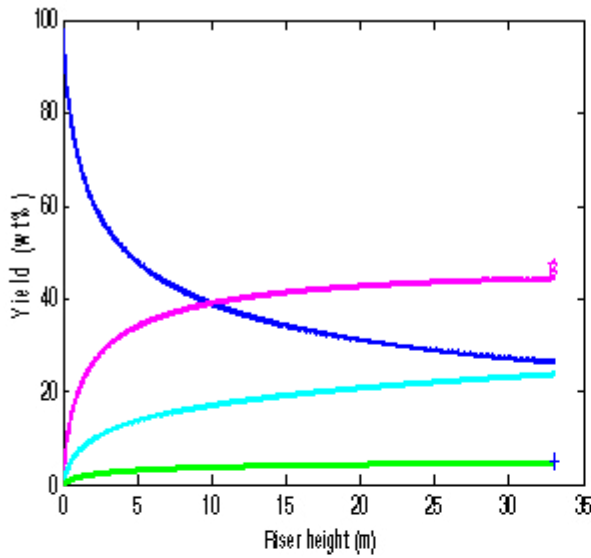
نتیجه‌ها به دست آمده با داده‌های صنعتی که به وسیله‌ی [۱۵] ارائه شده است مقایسه شد. داده‌های استفاده شده برای الگوی سازی در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است. نتیجه‌ها به دست آمده از الگوی پیشنهاد شده برای نمونه ۲ در شکل ۴ نشان داده شده است. با کاهش میزان درصد جرمی بخار هیدروکربنی VGO در طول رایزر و تبدیل آن به فراورده‌ها، بازده فراورده‌ها در طول رایزر افزایش می‌یابد. روند افزایش برای بنزین، در ۵ متر اول رایزر سریعتر است. چون در ابتدای

جدول ۱ پارامترهای سنتیکی [۴]

Reaction	kl	El (kj/mol)	$\Delta Hl$ (kj/kg)
Gas oil to gasoline	۱۱۵۰	۵۹,۶۶	۳۹۳
Gas oil to light gas	۷۳,۶	۴۷,۸۲	۷۹۵
Gas oil to coke	۱,۷۹	۳۰,۹۵	۱۲۰۰
Gasoline to light gas	۴۲۶	۶۸,۸۳	۱۱۵۰
Gasoline to coke	۰,۰۰۰۵۹	۵۷,۷۴	۱۵۱

جدول ۲ شرایط عملیاتی رایزر صنعتی [۱۵]

	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴
Feed rate (kg/s)	۱۹,۹۵	۲۵,۷	۲۶,۹۳	۲۳,۶۱
CTO (kg/kg)	۷,۲۴	۶,۳۳	۵,۴۳	۶,۰۷
Inlet pressure (atm)	۲,۹	۲,۹	۲,۹	۲,۹
Feed temperature (K)	۴۹۶	۴۹۶	۴۹۶	۴۹۶
Cat temperature (K)	۹۶۰	۱۰۳۳	۱۰۰۴	۱۰۰۶
Steam (wt%)	۷	۵/۵	۵	۵/۷۵
Steam temperature (K)	۷۷۳	۷۷۳	۷۷۳	۷۷۳



شکل ۴ نمودارهای به دست آمده از الگوی پیشنهاد شده برای نمونه ۲: (الف) بازده فراورده ها، (ب) سرعت فاز گاز و جامد، (ج) دمای رایزر و (د) فعالیت کاتالیست، در طول رایزر

موازنه جرم و مومنتم و انرژی است. به کمک موازنه جرم، بازده فراورده‌ها در هر المان از رایزر محاسبه شد. با استفاده از رابطه به دست آمده از حل موازنه مومنتم، به همراه دیگر روابط کمکی، سرعت کاتالیست در هر المان قابل دستیابی است. برای یافتن پروفایل دما در طول رایزر از موازنه انرژی استفاده شد. الگوی بر اساس این واقعیت که ذرات کاتالیست به صورت خوشه در طول رایزر حرکت می‌کند نوشته شده است. قطر این ذرات خوشه در مقالات [۸]، ۶ میلی متر گزارش شده است. الگوی با نرم افزار MATLAB ۲۰۱۰, ۷ برنامه نویسی و دقت آن با نتیجه‌ها گزارش شده در مقالات [۱۵] مقایسه شد. با استفاده از الگوی به دست آمده، بازده فراورده‌ها، پروفایل دمای درون رایزر، سرعت فاز گاز و جامد، سرعت کاهش فعالیت کاتالیست در هر المان بررسی شد. نتایج به دست آمده از الگوی با داده‌های صنعتی، الگوی Gupta [۹] و الگوی Heydari [۱۰] نشان می‌دهد که الگوی پیشنهاد شده دارای تطابق خوبی می‌باشد. و می‌توان با استفاده از این الگوی عملکرد رایزر را برای به دست آوردن حداکثر فراورده‌ها با دقت خوبی بررسی کرد.

در شکل (۴-ب) روند افزایشی فاز گاز، به دلیل تخییر خوراک هیدروکربنی و کراکینگ مواد سنگین به مواد سبکی با چگالی و جرم مولکولی کمتر، مشاهده می‌شود. به دلیل افزایش سرعت فاز گاز سرعت فاز جامد نیز افزایش می‌یابد. همان طور که در شکل (۴-ج) مشاهده می‌کنید، دما در طول رایزر سیر نزولی دارد. این کاهش دما به علت انجام واکنش گرماگیر شکست درون رایزر، می‌باشد. چون واکنش شکست بیشتر در همان ابتدای رایزر رخ می‌دهد، در ۵ متر اول رایزر شدت کاهش بیشتری مشاهده می‌شود. در شکل (۴-د) روند کاهشی فعالیت کاتالیست‌ها را به علت رسوب کک مشاهده می‌کنید.

مقادیر عددی نتیجه‌ها به دست آمده از الگوی، به همراه میزان خطا محاسبه شده در مقایسه با داده‌های صنعتی، الگوی Gupta [۹] و الگوی Heydari [۱۰] در جدول ۳ آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود الگوی حاضر با داشتن در صد خطای کل کمتر عملکرد رایزر FCC را بهتر پیش بینی می‌کند. در این الگوی سازی از الگوی سینتیکی ۴ لامپه استفاده شد. الگوی حاضر در حالت پایا و یک بعدی (از اثر تغییرات در شعاع رایزر صرف نظر شده است) نوشته شده است. اساس الگوی بر پایه

جدول ۳ مقایسه نتیجه‌های به دست آمده از الگوی پیشنهاد شده با داده‌های صنعتی و الگوی ارایه شده به وسیله‌ی [۹] و [۱۰]

	نمونه ۱				نمونه ۲			
	الگوی پیشنهادی	الگوی Gupta	الگوی Heydari	داده صنعتی	الگوی پیشنهادی	الگوی Gupta	الگوی Heydari	داده صنعتی
بازده (%wt)	۴۴/۳۷	۴۴/۰۵	۳۷/۶۱	۴۳/۸۸	۴۴/۵۶	۴۱/۳۲ (۱۲)°	۴۲/۱۹	۴۶/۹۰
بنزین	(۱/۱۳)°	(۰/۳۹)°	(۱۴/۲۸)°		(۴/۹۷)°		(۱۰/۰۱)°	
بازده (%wt)	۵/۰۸۴	۷/۴۱	۶/۵۵	۵/۸۳	۴/۹۶	۶/۴۲	۵/۳۱	۵/۳۴
کک	*(۰/۴۳)	*(۲۷/۱۰)	*(۱۲/۳۰)		*(۶/۹۳)	*(۲۰/۲۲)	*(۰/۵۶)	
دمای (K)	۷۸۷/۸۴	*(۳/۰۱) ۸۱۹	*(۳/۹۰) ۷۶۴	۷۹۵	۸۰۷/۵۸	*(۱/۹۸) ۷۹۲	۸۰۷/۵	۸۰۸
خروجی	*(۰/۸۹)				*(۰/۰۵)		*(۰/۰۵)	



ادامه جدول ۳

	نمونه ۳				نمونه ۴			
	الگوی پیشنهادی	الگوی Gupta	الگوی Heydari	داده صنعتی	الگوی پیشنهادی	الگوی Gupta	الگوی Heydari	داده صنعتی
(%wt)	۴۵,۰۳	۳۸,۴	۴۰,۴۷	۴۲,۷۹	۴۲,۸۸	۴۰,۷۶	۳۹,۰۱	۴۱,۷۸
بازده بنزین	(۸,۱۰)*	(۱۰,۴۷)*	(۵,۵۴)*		(۲,۶۴)*	(۲,۴۴)*	(۶,۶۲)*	
(%wt)	۵,۱۱	۵,۶۰	۵,۷۱	۵,۴۳	۵,۱۷	۶,۲۶	۵,۹۵	۵,۶۹
بازده کک	(۹,۸۹)*	(۳,۱۳)*	(۵,۱۵)*		(۹,۱۲)*	(۱۰,۰۱)*	(۴,۵۰)*	
دمای (K)	۸۰۶,۴	۷۷۰	۷۶۰	۸۰۵	۷۹۰,۰۶	۷۸۹	۷۷۴	۸۰۶
خروجی	(۳,۰۵)*	(۴,۳۴)*	(۵,۶۰)*		(۱,۹۷)*	(۲,۱۰)*	(۳,۹۷)*	

\* در صد خطا

## مراجع

- [1] Weekman, V.M ; A model of catalytic cracking conversion in fixed,moving and fluid-bed reactors. Ind.Eng.Chem.Prod.Res; 7, 90-95;1968.
- [2] Lee , L.S., Chen,Y.W.; Four lamp kinetic model for FCC process. Can.J.Chem.Eng.; 67, 615-619,1989.
- [3] Pugsley, S.T, Berruti, F; A perpective hydrodynamic model for circulating fluidized bed risers.; powder technol; 89,57, 1996.
- [4] Sadeghzadeh, J., Farshi,A. ,Forsat,Kh; A mathematical modeling of the riser reactor in industrial FCC unit.; Petroleum & Coal; 50 (2), 15-24 ,2008.
- [5] Bollas, G.M, Vasalos, I.A, Lappas, A.A, Iatridis ,D; Modeling small diameter FCC riser reactors:A hydrodynamic and kinwtic Approach. Ind.Eng. Chem.Res; 41, 5410-5419, 2002.
- [6] Becerril, E., Maya,R.,Salazar,D; Effect of modeling pressure gradient in the simulation of industrial FCC risers. Chemical Engineering Journal; 100, 181-186, 2004.
- [7] Nayak, S.V, Joshi,S.L,Ranade,V.V; Modeling of vaporization and cracking of liquid oil injected in a gas-solid riser. Chemical Engineering Science; 60, 6049-6066, 2005.
- [8] Flingner, M, Schipper,P.H, Sapre,A.V, Krambeck,F.J; Two phase cluster model in riser reactors: Impact of radial density distribution on yields. Chemical Engineering Science, 49,5813-5818,1994.
- [9] Gupta, R.K; Modeling and Simulation of Fluid catalytic Cracking Unit; India; 50-55 ,2007.
- [10] Heydari, M; Ale Ebrahim, H; Dabir, B; Modeling of an industrial riser in the fluid catalytic cracking unit; American journal of applied science; 7(2) 221-226 ,2010.
- [11] Gupta, A, Subba Rao ,D; Model for the performance of fluid catalytic cracking (FCC) riser reactor:Effect of feed atomization. Chem.Eng.Sci; 56, 4567-4579, 2001.
- [۱۲] اقبال حامد، ایمان؛ الگوی سازی واکنش و الگوی سازی هیدرودینامیک بستر سیال فرایند FCC، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، دانشکده فنی، ۲۲-۲۶، ۱۳۸۸.
- [13] Pitault, I., Forissier,M.,Bernald,J.R; Determination de constantes cinetiques du craquage catalytique par la modelisation du test de microactive (MAT). The Canadian Journal of Chemical Engineering; 73,

498-503, 1995.

[14] Gupta, R.K., Kumar, v. and Srivastava, V.K; A new generic approach for the modeling of fluid catalytic cracking (FCC) riser reactor.; Chem.Eng.Sci; 62, 4510-4528, 2007.

modeles.; Industrial and Engineering Chemistry Research; 18, 1997.

[15] Ali, H., Rohani, S; Dynamic modeling and simulation of a riser-type fluid catalytic cracking unit.; Chem.Eng.Technol; 20, 118-130; 1997.

## Modeling of fluidized catalytic cracking process

F. Yahyazadeh Saravi\*, M. R. Ghasemi and A. Hekmat Nazemi

Islamic Azad University, North Tehran branch, faculty of engineering, Department of chemical engineering

Received: April 2011, Revised: November 2011, Accepted: January 2012

**Abstract:** Fluid catalytic cracking (FCC) is an industrial process to convert heavy petroleum cuts into light products, such as gasoline and light olefins. In this research, a steady state one dimensional model of FCC riser using a four-lump kinetic model was presented. Equations for mass, momentum, and energy balances were written and coded by MATLAB. It is assumed that the catalyst particles in the riser are moving upward as clusters. Using the model, product yield, temperature profile in the riser, gas and solid velocity and catalyst decay rate along the riser were investigated. Obtained results are in good agreement with published industrial data.

**Keywords:** Modeling, riser, catalytic cracking, FCC.