مروري بر مطالعات اختلاط جتي مخازن

طاهر يوسفي اميري[۱] و جعفر صادق مقدس[۲*]

[۱]دانشجوي كارشناسي ارشد مهندسي شيمي- دانشگاه صنعتي سهند تبريز

[۲]استاديار دانشكده مهندسي شيمي- دانشگاه صنعتي سهند تبريز

(تاريخ دريافت ۸۶/۱۲/۲۰ , تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸۷/۱/۲۰ , تاريخ تصويب ۸۷/۲/۱۵)

چكيده

اختلاط، يك واحد عملياتي مهم در بسياري از كاربردهاي مهندسي شيمي است. اختلاط جتي به دليل سادگي، كارآيي بالا و هزينه پايين، در حال گسترش و جايگزين شدن مخلوط‌كننده‌هاي مرسوم مي‌باشد. مطالعات زيادي در زمينه اختلاط جتي مخازن انجام شده است، اما هيچ مرور جامعي بر اين مطالعات و بررسي نتايج آنها صورت نگرفته است. اين مقاله مروري بر مطالعات اختلاط جتي مخازن دارد كه اين مطالعات در دو دسته‌ي كلي مطالعات تجربي و مطالعات شبيه‌سازي كامپيوتري بر اساس تكنيك ديناميك سيالات محاسباتي (CFD)[۱] قرار مي گيرند. اثر پارامترهاي هندسي و عملياتي مختلف بحث شده و تحليلي از اطلاعات موجود در متون ارائه گرديده است. با وجود اختلافات و پراكندگي موجود در داده‌ها نتيجه‌گيري‌هايي عمومي، به عنوان راهنمايي در انتخاب طرح بهينه، به دست آمده است.

واژه هاي كليدي: اختلاط جتي - زمان اختلاط - ديناميك سيالات محاسباتي - ميدان سرعت - الگوي جريان

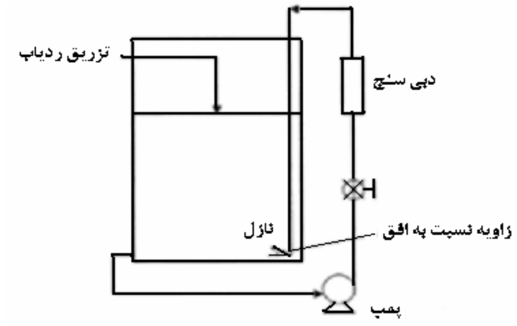
مقدمه

واژه اختلاط براي فرآيندهايي كه جهت كاهش درجه غير يكنواختي سيستم يا كاهش گراديان خواصي نظير غلظت، ويسكوزيته يا دما در يک سيستم انجام مي گيرند، به كار مي‌رود [۱]. اختلاط واحد عملياتي مهمي در بسياري از كاربردهاي مهندسي شيمي شامل صنايع شيميايي، پتروشيمي، نفت، غذايي، دارويي، كاغذسازي، پلاستيک، لاستيک و سراميک مي‌باشد. اختلاط مي‌تواند براي اهداف مختلفي نظير يكنواخت كردن تركيب و خواص فيزيكي، جلوگيري از لايه لايه شدن و رسوب ذرات معلق يا براي بهبود شدت انتقال جرم و انرژي و نيز واكنش شيميايي به كار رود [۱-۲]. سه نوع مرسوم اختلاط سيالات شامل اختلاط مكانيكي با همزن، اختلاط استاتيكي و اختلاط جتي مي‌باشد [۱،۳-۴]. اختلاط جتي هم براي اختلاط مخازن و هم براي اختلاط جريان خطوط لوله به كار مي‌رود [۱-۲]. در اختلاط جتي يک جريان سريع سيال (جت سيال) به داخل سيال ساكن يا كند (سيال توده) تزريق مي‌شود. سرعت نسبي و تنش‌هاي پرتوان بين جت و توده مايع يک لايه اختلاط آشفته در مرز جت ايجاد مي‌كند، اين لايه اختلاط در جهت جت رشد مي‌كند و توده مايع با جت كشيده شده و مخلوط مي‌شود[۱،۳-۴]. در اختلاط جتي مخزن، قسمتي از محتويات مخزن توسط يک پمپ بيرون كشيده شده و به صورت يک جت سرعت بالا از طريق يک نازل به مخزن برگشت داده مي‌شود، جت مايع قسمتي از توده مايع اطراف را به همراه خود كشيده و يک الگوي چرخشي داخل مخزن ايجاد مي‌كند كه به اختلاط محتويات مخزن منتهي مي‌شود[۲و۵]. شكل (۱) ساختاري از اختلاط جتي را نشان مي‌دهد. همان طور كه در شكل (۲) نيز ديده مي‌شود، جت مي‌تواند كنار ورود[۲] يا محوري[۳] باشد[۲]. مخلوط‌كننده‌هاي جتي چندين مزيت نسبت به همزن‌هاي مكانيكي دارند. در اختلاط جتي مخزن، هيچ جزء متحركي داخل مخزن وجود ندارد و ساختاري ساده دارند. مخلوط‌كننده جتي تنها به پمپي براي چرخش، نازلي ارزان و اندكي كار لوله‌كشي نياز دارد. بنابراين هزينه‌هاي ساخت، نگهداري و عمليات پايين بوده و نصب و عمليات آن ساده مي‌باشد. مخصوصاً از نظر هزينه براي مايعات و دوغاب‌هاي داراي ويسكوزيته پايين‌تر از ۱۰۰۰cP و نيز براي تانک‌هاي ذخيره بزرگ و تانک‌هاي زيرزميني بهتر مي‌باشند. كارآيي بهتر و اختلاط سريع تر از ديگر مشخصه‌هاي آنهاست [۲-۳ و ۵-۷].

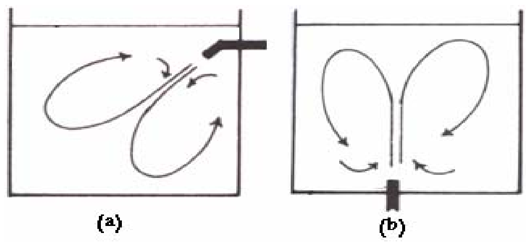
در حدود ۵۰ سال اخير مطالعات گسترده‌اي در زمينه اختلاط جتي مخازن صورت گرفته است. اين مطالعات در دو دسته اصلي قرار مي‌گيرند: مطالعات تجربي و مطالعات شبيه‌سازي كامپيوتري بر اساس تكنيك CFD. اكثر مطالعات تجربي تلاش نموده‌اند، رابطه‌اي ارائه دهند كه زمان اختلاط را به عنوان معياري مهم در اختلاط به

* نويسنده مسئول : تلفن / فاكس : ۳۴۵۹۱۵۵ – ۰۴۱۲ , Email: jafar.moghaddas@sut.ac.ir

شرايط عملياتي و هندسي مرتبط كند[۵-۶]. بنابراين با توجه به تنوع شرايط روابط زيادي ارائه شده‌اند. در نتيجه انتخاب رابطه صحيح دشوار خواهد بود[۶]. همچنين به دليل تنوع تكنيك‌هاي آزمايشگاهي به كار رفته و نيز تفاوتِ روش‌ها و نگرش‌هاي به كار گرفته شده توسط محققين مختلف براي فرمول‌بندي روابط هر تلاشي براي مقايسه زمان‌هاي اختلاط حاصل از روابط موجود به اختلافات گسترده در نتايج حاصل منتهي مي‌شود[۷]. بنابراين ضروري است كه محدوديت‌ها و حيطه كاربرد هر يك از روابط براي طراحي اختلاط جتي مخازن معلوم گردد.



شكل۱: نمائي از سيستم اختلاط جتي در مخازن.



شكل۲:(a) جت كنار-ورود (b) جت محوری.

در سال‌هاي اخير CFD به عنوان آزمايشگاهي مجازي و ابزاري پرقدرت در مدلسازي هيدروديناميك اختلاط جتي و مطالعه جزئي‌تر آن و نيز رفع محدوديت‌هاي مطالعات تجربي استفاده شده است. هيچ مرور جامعي در مورد اختلاط جتي مخازن و كنار هم قرار دادن مطالعات مختلف و بحث در مورد پارامترهاي موثر در آن و نيز ارائه نتايجي كلي به گونه‌اي كه راهنمايي براي محققين اين زمينه باشد، وجود ندارد. از اين رو احساس مي‌شود كه مروري جامع بر مطالعات اختلاط جتي لازم باشد. در مقاله حاضر اثر پارامترهاي مختلف در اختلاط بحث شده و تحليلي از اطلاعات ارائه شده در متون به عمل آمده است و نتيجه‌گيري‌هايي عمومي از شرايط هندسي و عملياتي اختلاط جتي مخازن، كه بتواند در انتخاب طرح بهينه مفيد باشد، ارائه شده است.

مطالعات تجربي

اكثر مطالعات تجربي تلاش كرده‌اند تا رابطه‌اي را براي محاسبه زمان اختلاط بر اساس پارامترهاي عملياتي و هندسي ارائه دهند[۵-۶]. روشي كه در بيشتر مطالعات براي اندازه‌گيري زمان اختلاط به كار رفته است، روش تزريق ردياب[۴] مي‌باشد. در اين روش ردياب (معمولاً پالسي از محلول الكتروليت) به داخل تانك تزريق مي‌شود، سپس غلظت ردياب در يك يا چند نقطه از تانك نسبت به زمان اندازه‌گيري مي‌شود. زمان اختلاط به صورت زماني در نظر گرفته مي‌شود كه در آن غلظت ردياب در محل اندازه‌گيري دقيقاً (يا تقريباً) به غلظت متوسط نهايي مورد انتظار براي ردياب برسد. براي كمي‌كردن زمان اختلاط پارامتر m به صورت زير تعريف مي‌شود:

$$m = \frac{\left| c - \bar{c} \right|}{\bar{c}} \qquad (۱)$$

زمان اختلاط زمان از لحظه تزريق تا زماني كه m به مقدار مورد نظر برسد، در نظر گرفته مي‌شود. در شروع تزريق m=۱ و در اختلاط كامل m=۰ مي‌باشد. مثلاً اگر m=۰/۰۵ در نظر گرفته شود، بدين معناست كه زمان رسيدن به ۹۵% اختلاط كامل به عنوان زمان اختلاط در نظر گرفته شده است [۲].

اولين كار در زمينه اختلاط جتي توسط Fossett & Prosser [۸] و Fossett [۹] انجام گرفته است. آنها مشاهده كردند كه اختلاط با جت در زماني بسيار كوتاه‌تر از ابزارهاي اختلاط مرسوم اتفاق مي افتد. آنها با استفاده از يک سيستم آزمايشگاهي (D= ۱۵۲/۴ cm و H = ۲۵/۷ cm) اختلاط جتي را مورد بررسي قرار دادند. طرح پيشنهادي آنها يک جت كنار ورود زاويه‌دار كه از نزديک كفِ تانک استوانه‌اي كف صاف تزريق مي‌شد، بود. آنها يک تكنيک هدايتي را براي اندازه‌گيري زمان اختلاط در اختلاط جتي به كار بردند. آنها مقدار كمي از محلول ردياب را (به صورت يک پالس بسيار طولاني) به حلقه گردش تزريق كرده و درجه‌ي اختلاط را با استفاده از يک جفت الكترود كه در مركز تانک فرو برده شده‌اند، تعيين كردند. زمان اختلاط، زمان از شروع تزريق تا زمانيكه به دليل يكنواخت شدن غلظت و عدم تفاوت بين غلظت‌هاي اندازه‌گيري شده، عدد صفر در گالوانومتر متصل به الكترودها خوانده مي‌شود، مي‌باشد. Fossett & Prosser [۸] رابطه ساده زير را براي محاسبه

زمان اختلاط در یک تانک با قطر D ، قطر جت (قطر نازل) d_j و سرعت جت v_j پیشنهاد کردند:

$$t_m = ۹/۰ \frac{D^۲}{v_j d_j} \quad (۲)$$

این مطالعه اعداد رینولدز جت در محدوده ۸۰۰۰۰-۴۵۰۰ یعني رژیم جت آشفته را پوشش ميدهد، ($\mathrm{Re}_j = \rho v_j d_j / \mu$ که براي Rej< ۱۰۰ جت آرام و براي۲۰۰۰-۱۰۰۰ <Rej جت آشفته مي باشد) اگرچه رابطه وابستگي صریحي به عدد رینولدز را نشان نميدهد. آنها قابلیت کاربرد رابطه (۲) براي مخازن بزرگ (H=۴/۵۷m ,D=۴/۵۷m و H=۱۰ m ,D= ۴۳/۹m) را نیز امتحان کردند که مورد تایید قرار گرفت. در مطالعه مذکور مدت تزریق سهم زیادي از زمان اختلاط کلي را مي گرفت و محتویات تانک معمولا قبل از اتمام تزریق، به ۹۰-۵۰% یکنواختي ميرسیدند. Fossett [۹] بعداً پیشنهاد کرد که براي پالس سریع ردیاب رابطه زیر مناسب تر ميباشد:

$$t_m = ۴/۵ \frac{D^۲}{v_j d_j} \quad (۳)$$

Fox & Gex [۱۰] تحقیق را به هر دو رژیم جت آشفته و آرام بسط دادند و همچنین مطالعات تطبیقي اختلاط با استفاده از جت و پروانه را انجام دادند. آنها روشي بر اساس PH را براي اندازهگیري زمان اختلاط نهایي با ترکیب مختلف پارامترها مانند قطر جت، سرعت جت، قطر تانک، ویسکوزیته مایع، قطر پروانه، سرعت چرخش پروانه و... به کار بردند و دریافتند که مهمترین پارامتري که زمان اختلاط را تعیین ميکند، فلاکس مومنتوم اضافه شده به تانک از طریق جت و یا از طریق پروانه ميباشد و روابطي را به فرم گرافیکي براي تعیین زمان اختلاط براي ترکیب معیني از پارامترها ارائه دادند. آنها اظهار کردند که زمان اختلاط تابعي قوي از عدد رینولدز در رژیم جت آرام و تابعي ضعیف از آن در رژیم جت آشفته ميباشد. آنها آزمایش های خود را براي سه تانک با ابعاد ۴/۲۷ m، ۱/۵۲m و ۰/۲۹m انجام دادند و معادلات زیر را براي زمان اختلاط پیشنهاد کردند:

$$t_m = \frac{C_۱ H^{۰/۵} D}{\mathrm{Re}_j^{۱/۳۳} \left(v_j d_j\right)^{۰/۶۷} g^{۰/۱۶۷}}$$

$$۲۵۰ < \mathrm{Re}_j < ۲۰۰۰ \quad (۴\text{- الف})$$

$$t_m = \frac{C_۲ H^{۰/۵} D}{\mathrm{Re}_j^{۰/۱۷} \left(v_j d_j\right)^{۰/۶۷} g^{۰/۱۶۷}}$$

$$۲۰۰۰ < \mathrm{Re}_j < ۱/۶ \times ۱۰^۵ \quad (۴\text{- ب})$$

ثوابت $C_۱$ و $C_۲$ بر اساس قطر تانک مشخص ميشوند.

Van de Vusse [۱۱] مایعات با دانسیتهي مختلف را در یک تانک ذخیره لایهبندي کرد و زمان اختلاط را از ابتداي شروع به کار پمپ تا زماني که دانسیتهي نمونه گرفته شده از تانک در محدوده دانسیتهي متوسط نهایي باشد، در نظر گرفت. او با بررسي اختلاطِ جت کنار ورود کج و بر اساس اندازهگیري تفاوت دانسیته در تانکِ (H<۱۱/۸ m و D=۳۶ m) داراي نازلي با زاویه ثابت $\theta = \frac{۵\pi}{۳۶}$، اعتبار رابطه زیر را براي محاسبه زمان اختلاط تأیید نمود:

$$t_m = \frac{۸/۷ D^۲ \sin\theta}{d_j v_j} \quad (۵)$$

Okita & Oyama [۱۲] تانکهاي با قطر ۰/۴ m و ۱/۰ m را به کار بردند. ردیاب از مرکز تانک نزدیک سطح مایع تزریق ميشد. آنها زمان اختلاط را به صورت زمان بین افزودن ردیاب و لحظهاي که هیچ تفاوتي بین غلظت اندازهگیري شده توسط دو پروب وجود ندارد، تعریف کردند. یکي از پروبها نزدیک کف تانک روي دیوار و دیگري نزدیک سطح مایع روي دیوار نصب شده است. آنها مشاهده کردند که زمان اختلاط در رژیم آشفته ($\mathrm{Re}_j > ۵۰۰۰$) به عدد رینولدز بستگي ندارد و نتایج خود را با دقت ۳۰ ± % براي هر دو ساختار جت محوري و کنار ورود با معادلات زیر رابطه بندي کردند:

$$t_m = \frac{۱/۸ \times ۱۰^۴}{\mathrm{Re}_j} \frac{D^{۱/۵} H^{۰/۵}}{v_j d_j}$$

$$۱۰۰۰ < \mathrm{Re}_j < ۵۰۰۰ \quad (۶\text{- الف})$$

$$t_m = \frac{۲/۶\, D^{۱/۵} H^{۰/۵}}{v_j d_j}$$

$$۵۰۰۰ < \mathrm{Re}_j < ۸۰۰۰۰ \quad (۶\text{- ب})$$

Coldrey [۱۳] طرحي اصلاح شده براي اختلاط جتي کنار ورود زاویهدار استفاده شده توسط Fossett & Prosser [۸] ارائه کرد. او پیشنهاد کرد که

استفاده از طولاني ترين طول جت ممکن (براي مثال جتي که به دورترين گوشه‌ي مخزن هدايت شود)، احتمالاً مؤثرترين اختلاط را توليد کرده و زمان اختلاط را از آنچه که توسط Fossett و Prosser [۸] ارائه شده کمتر مي‌کند. او با فرض اينکه زمان اختلاط به طور معکوس با مقدار مايع کشيده شده توسط جت متناسب مي‌باشد، معادله اي مستقل از عدد رينولدز براي رژيم جت آشفته فرموله کرد. نتايج کنوني نشان مي‌دهند که مسأله‌اي که زمان اختلاط را کوتاهتر مي‌کند، بيش از يک تخمين ساده‌ي طول جت را شامل مي‌شود.

Hiby & Modigell [۱۴] و همچنين Racz & Wassink [۱۵] تکنيک ردياب را براي اندازه‌گيري زمان اختلاط براي سيستم هاي جت محوري به کار بردند. Hiby & Modigell داده هاي خود را با رابطه زير فرموله کردند:

$$t_m = ۳/۲\frac{D^{۲}}{v_j d_j} \qquad ۶۰۰۰ < \mathrm{Re}_j < ۳۶۰۰۰ \quad (۷)$$

و Racz & Wassink پيشنهاد کردند که:

$$t_m = ۳/۹\frac{D^{۲}}{v_j d_j} \quad (۸)$$

Lane & Rice [۷] مقايسه کمي معتبري را بين سه طرح مختلف انجام دادند. اين طرح‌ها شامل طرح Coldrey [۱۳]: جت کنار ورود زاويه‌دار در تانك استوانه‌اي با کف صاف، طرح Hiby & Modigell [۱۴]: جت محوري عمودي در تانك استوانه‌اي با کف صاف و طرح پيشنهادي خودشان يعني جت محوري عمودي در تانكِ با کف نيمکره‌اي شکل بود. آنها نتيجه گرفتند که اين طرح که براي اولين بار مطرح مي‌شد، به طور چشمگيري زمان اختلاط را کاهش مي‌دهد. آنها روش تزريق نمک را براي اندازه‌گيري زمان اختلاط به کار بردند. اينجا رديابي هدايت، پاسخ موجي را نشان مي‌دهد که امواج با گذشت زمان ميرا مي‌شوند. آنها ۹۵% يکنواختي را به عنوان معياري براي زمان اختلاط به کار بردند و براي هر طرح رابطه‌اي را براي زمان اختلاط بر اساس سرعت جت، ابعاد تانک و خواص سيال فرموله کردند. آنها يک فاکتور زمان اختلاط F را معرفي کردند که تابعي از عدد رينولدز مي باشد. روابط حاصله به صورت زير مي‌باشد:

الف- طرح Coldrey

$$t_m = F_{۱}\frac{H^{۰/۵}D^{۱}}{\left(v_j d_j\right)^{۰/۶۶۷} g^{۰/۱۶۶}} \quad (\text{۹-الف})$$

ب- طرح Hiby & Modigell

$$t_m = F_{۲}\frac{H^{۰/۵}D^{۰/۹۷۵}}{\left(v_j d_j\right)^{۰/۶۵} g^{۰/۱۷۵}} \quad (\text{۹- ب})$$

ج- طرح Lane & Rice

$$t_m = F_{۳}\frac{H^{۰/۵}D^{۰/۷۵}}{\left(v_j d_j\right)^{۰/۵} g^{۰/۲۵}} \quad (\text{۹-ج})$$

$F_{۱}$، $F_{۲}$ و $F_{۳}$ نيز از شکل (۳) بدست مي‌آيند.

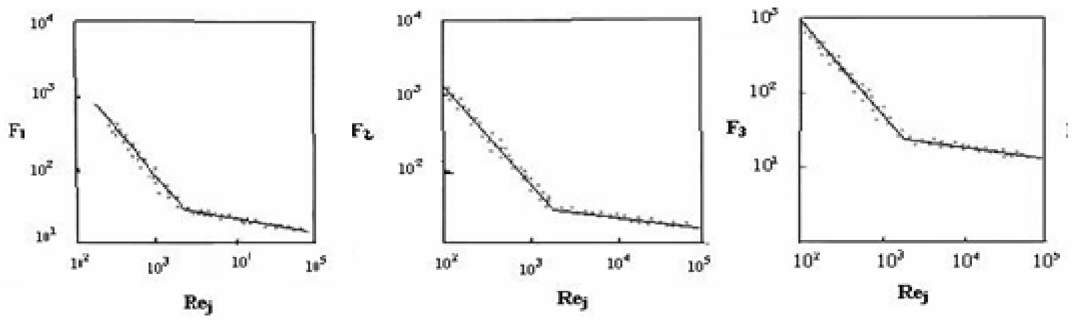
Maruyama [۱۶] با استفاده از دو تانک با قطرهاي ۱۰۴cm و ۵۶cm تاثير چندين پارامتر هندسي را بررسي کرد. آب شير به عنوان سيال کاري و محلول NaCl به عنوان ردياب استفاده شده است. حجم ردياب $۵۰۰\ cm^3$ براي تانک بزرگ و $۲۰۰ cm^3$ براي تانک کوچک مي‌باشد. ردياب به صورت پالس تزريق شده و تغييرات غلظت با استفاده از پروب هدايتي به صورت منحني پاسخ بدست مي‌آيد. زمان اختلاط زمان لازم براي کاهش تغييرات غلظت به محدوده ۱% غلظت متوسط نهايي در نظر گرفته مي‌شود. آنها با به کار بردن محل تزريق، قطرها و زواياي مختلف جت درتانک هاي با قطر و ارتفاع مختلف زمان اختلاط بي بعد را براي مجموعه اي از پارامترها به صورت گرافيکي نشان داده‌اند که بر اساس اين نمودارها مي‌توان تاثير تغيير هر يک از پارامترهاي اشاره شده را ديد. با وجود پراکندگي داده‌ها آنها محدوده زمان اختلاط بي‌بعد را به صورت زير ارائه کرده‌اند:

$$\left(\frac{t_m}{t_R}\right)\left(\frac{L}{d_j}\right) = ۲/۵ - ۷ \quad (۱۰)$$

که $t_R = \frac{D}{(gH)^{۰/۵}}$ مي باشد.

البته آنها با بي بعدسازي زمان اختلاط ارائه شده توسط Fossett & Prosser [۸] و Fox & Gex [۱۰] و Van de Vusse [۱۱] و Okita & Oyama [۱۲]مشاهده کردند که محدوده زمان اختلاط بي‌بعد توسط اين محققين نيز ۹-۲/۶ مي‌باشد.

Simone & Fonade [۱۷] جت هاي پايدار و ناپايدار را به کار بردند و نتيجه گرفتند که جت‌هاي ناپايدار نسبت به جت‌هاي پايدار از نظر انرژي بازدهي بالايي دارند.



شکل۳ : محاسبه F_1 و F_2 و F_3 موجود در معالات ۹ [۷].

آنها براي اندازه‌گيري زمان اختلاط، هدايت‌پذيري را در هشت نقطه تانک دنبال مي‌کردند. رابطه‌اي که آنها براي زمان اختلاط استخراج کردند، به صورت زير مي‌باشد:

$$t_m (gH)^{۰/۵} D J_s^{\frac{۲}{۳}} \approx ۱ \qquad (۱۱)$$

که $J = \rho A v_j^۲$ و $J_s = \frac{J}{\rho v_j g}$ مي باشد.

Orfaniotis و همکارانش [۱۸] دريافتند که زمان اختلاط با ويسکوزيته مايع افزايش مي‌يابد. آنها همچنين گزارش کردند که جت‌هاي متناوب ۱۵% زمان اختلاط کمتري را نسبت به جت‌هاي پايدار با توان ورودي يکسان نتيجه مي‌دهند. آنها زمان اختلاط را به صورت زير نشان دادند.

$$\frac{t_m}{t_R} J_s^{۰/۴۱} = ۱۱/۳ \qquad (۱۲)$$

Grenville & Tilton [۱۹] يک رابطه بهبود يافته که تطابق بهتري از داده هاي زمان اختلاط را براي مخازن مخلوط شده با جت آشفته مي‌دهد، پيشنهاد دادند. آنها فرض کردند که زمان اختلاط با شدت اختلاط در انتهاي مسير آزاد جت جائي که سرعت‌ها و شدت آشفتگي بسيار پايين است (اين شدت بر اساس انرژي جنبشي آشفته و شدت از بين رفتن آن به دست مي‌آيد)، کنترل مي‌شود. اين رابطه بدون در نظر گرفتن زاويه تزريق به صورت زير مي‌باشد:

$$t_m = ۳/۰ \frac{L^۲}{d_j v_j} \qquad (۱۳)$$

آنها پيش بيني کردند که براي يک حجم معين يک هندسه‌ي بهينه براي مخزن وجود دارد که باعث مي‌شود اختلاط مطلوب با حداقل کردن توان ورودي به دست آيد.

اين حالت وقتي پيش مي‌آيد که نسبت ظاهري مخزن (نسبت ارتفاع به قطر مخزن) $R = \frac{۱}{\sqrt{۲}}$ باشد.

Grenville & Tilton [۲۰] در مقاله‌اي ديگر تاثير زاويه تزريق را نيز وارد کرده و رابطه زير را پيشنهاد نمودند:

$$t_m = k \frac{D^۲ H}{d_j v_j L} \qquad (۱۴)$$

اگر $\theta > ۱۵^o$؛ $k = ۹/۳۴$ و براي $\theta > ۱۵^o$ $k = ۱۳/۸$ مي باشد.

بر اساس اين مطالعات تجربي و نتايج و روابط حاصل از آنها مي توان تاثير پارامترهاي مختلف را بر عملکرد اختلاط استخراج نمود.

تاثير قطر و ارتفاع تانك

از همه روابط تجربي ارائه شده مي‌توان ديد که با افزايش قطر يا ارتفاع تانك و در نتيجه افزايش مقدار سيال مخلوط شونده زمان اختلاط مورد نياز بالاتر مي‌رود.

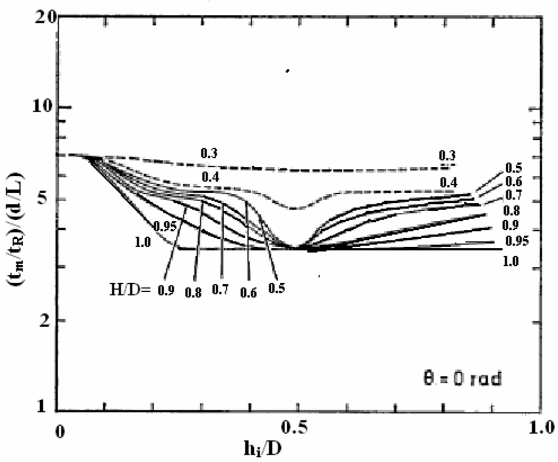
تاثير سرعت و قطر جت

با افزايش سرعت جت در قطر ثابت جت و افزايش قطر جت (قطر نازل) در سرعت ثابت جت ميزان مومنتوم اضافه شده توسط جت به مايع توده افزايش يافته، در نتيجه قدرت همزنندگي جت بالا رفته و مناطق بيشتري از تانک را هم مي‌زند که اين باعث کاهش زمان اختلاط مي شود.

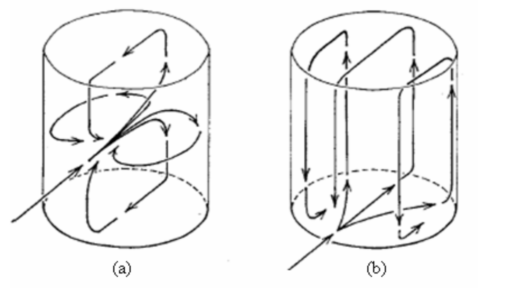
تاثير محل تزريق جت

يکي از مهم ترين مطالعات انجام شده براي بررسي تأثير اين پارامتر و يافتن محل بهينه نازل توسط

Maruyama و همکارانش [۱۶] انجام گرفته است. شکل (۴) نتايج کار آنها را در نسبت‌هاي مختلف H/D نشان مي‌دهد. همانطور که از شکل پيداست، براي حالتي که قطر تانک با ارتفاع تانک برابر مي‌باشد، محدوده‌ي بهينه محل نازل از سطح مايع تا سه چهارم عمق مايع مي‌باشد. ولي با کوچکتر شدن اين نسبت محدوده‌ي بهينه‌ي محل نازل از دو حد گفته شده دور شده و به سمت ميانه تانک تمايل مي‌يابد. دليل بالا بودن زمان اختلاط در ارتفاع تزريق پايين، تاثيرات کف تانك بر جت و تبديل جت مدور به جت ديواري است. جت ديوار به طور وسيعي در طول ديوار پخش مي‌شود و چرخش هايي ايجاد مي‌کند که اغلب از حلقه هاي دوبعدي تشکيل شده‌اند. در حالي که جت مدور داراي چرخش هاي سه بعدي و با شدت بيشتر مي‌باشند (شکل ۵).



شکل۴: زمان اختلاط بي بعد به صورت تابعي از ارتفاع نازل در نسبت هاي مختلف H/D [۱۶].

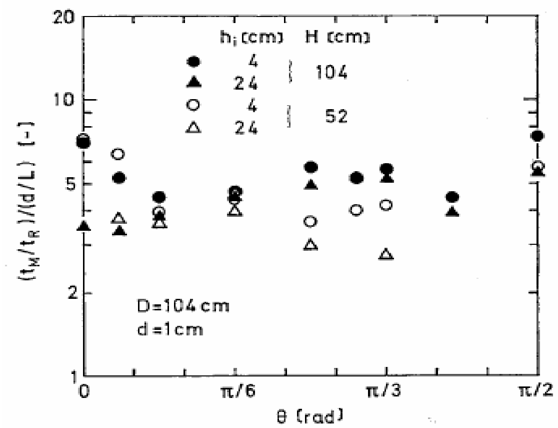


شکل۵ : الگوی جریان ایجاد شده با a) جت مدور[۵] و b) جت دیواری[۶] [۱۶].

تاثير زاويه تزريق

Coldrey [۱۳] و Lane & Rice [۷] مطرح کردند که هندسه‌ي با بيشترين طول جت که براي تانک با قطر و ارتفاع يکسان و تزريق از نزديکي کف تانک، در زاويه‌ي ۴۵ به دست مي‌آيد، کمترين زمان اختلاط را نتيجه مي‌دهد. ولي نتايجي که Maruyama [۱۶] براي اين حالت ارائه کرد، همان طور که در شکل (۶) ديده مي‌شود، يک ماکزيمم محلي در $\theta = ۰^o$، يک مينيمم محلي در $\theta = ۱۵ - ۲۵^o$، يک ماکزيمم محلي در $\theta = ۴۵ - ۵۰^o$، يک مينيمم در $\theta = ۷۵^o$ و نهايتاً يک ماکزيمم در $\theta = ۹۰^o$ دارد.

بالا بودن زمان اختلاط براي $\theta < ۱۵^o$ به دليل تاثير ديوار و تبديل جت مدور به جت مسطح (ديواري) که باعث مي‌شود، قدرت همزنندگي جت به دليل مقاومت ديوارها و دور بودن از مرکز مايع کاهش يابد. اين افزايش زمان اختلاط در $\theta < ۱۵^o$ توسط Grinville & Tilton [۲۰] نيز گزارش شده است. همانطور که در شکل (۶) نيز ديده مي شود، وقتي محل تزريق بالاتر برده مي‌شود، زمان اختلاط در $\theta < ۱۵^o$ به دليل دور شدن جت از کف تانک و عدم تأثير ديوار بر آن کاهش مي‌يابد. به طور کلي بايد گفت که زاويه بهينه بر اساس هندسه تانک و جت تغيير مي‌کند و مقدار يکساني براي همه هندسه ها وجود ندارد. ولي اساس تعيين آن طول جت بيشتر و ايجاد الگوي جريان قويتر در مناطق بيشتري از تانک مي‌باشد.



شکل ٦ : زمان اختلاط بي بعد به صورت تابعي از زاويه جت براي هندسه هاي مختلف [١٦].

تأثير جت هاي چندگانه

Perona [۲۱] گزارش کرده است که جت دوگانه زمان اختلاط کمتري را نسبت به جت تنها مي‌دهد. Simone & Fonade [۱۷] گزارش دادند که جت هاي متناوب بهتر از جت هاي پايدار کار مي‌کنند. به هر حال کار آزمايشگاهي زيادي بر روي جت هاي چندگانه انجام

نگرفته و رابطه‌ي آزمايشگاهي خاصي براي جت هاي چندگانه ارائه نشده است.

تأثير ميزان جلو آمدگي نازل

زمان اختلاط به مقداري كه جت به داخل تانك فرو آمده باشد، بستگي دارد. براي جت هاي محوري به سمت بالا زمان اختلاط با افزايش مقدار برآمدگي افزايش مي‌يابد. براي مثال براي تانك با قطر ۳۱ cm و ۳۲۰ < Re_j <۵۵۰۰۰ ثابت شده است كه زمان اختلاط براي جلوآمدگي هاي ۳/۳ و ۵ و ۱۰ برابر قطر جت در مقايسه با جت تراز با كف به ترتيب ۲/۲ و ۲/۹ و ۳ برابر افزايش مي‌يابد[۲۲].

تاثير محل خروجي

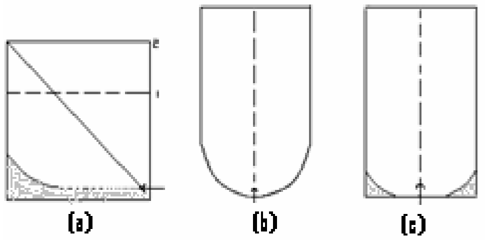
خروجي محلي است كه از آن مايع از تانك گرفته مي‌شود و به نازل فرستاده مي‌شود. Fox & Gex [۱۰] اشاره كرده اند كه محل خروجي نزديک محل جت نباشد. Revill [۲] نيز اشاره كرد كه مناطق مرده در تانك به موقعيت نسبي جت و خروجي بستگي دارد.

تأثير ويسكوزيته سيال

ويسكوزيته مي‌تواند زمان اختلاط را تحت تأثير قرار دهد. سيالات ويسكوز مشكلات بيشتري براي اختلاط خواهند داشت. Orfaniotis [۱۸] گزارش كرده است كه زمان اختلاط با افزايش ويسكوزيته بالاتر مي‌رود.

تأثير هندسه‌ي تانک

Lane & Rice [۷] يک مقايسه‌ي كمي معتبر براي سه نوع طرح اختلاط جتي با استفاده از تكنيک آزمايشگاهي يكسان انجام داده‌اند. اين سه طرح شامل طرح Coldrey [۱۳] كه يک جت كنار-ورود زاويه‌دار با تانك استوانه‌اي كف صاف، طرح Hiby & Modigell [۱۴] كه يک جت محوري عمودي در يک تانک استوانه‌اي كف صاف و طرح Lane & Rice [۷] كه يک جت محوري عمودي در تانک با كف نيمكره‌اي است، مي‌باشد(شكل ۷). آنها روابطي را براي هر يک از اين سه نوع طراحي استخراج كردند و مشاهده نمودند كه تانک با كف نيمكره‌اي كمترين زمان اختلاط را مي‌دهد. براي تانک‌هاي كف صاف جت محوري عمودي زمان اختلاط كمتري را نســـبت به جت كنار ورود زاويه‌دار مي‌دهد. عملكرد بهتر طرح Lane & Rice [۷] به اين واقعيت نسبت داده مي‌شود كه در اين طراحي، جت جريان مايعي در سراسر تانک ايجاد مي‌كند. حركت جابجايي ايجاد شده توسط جت به سراسر تانک گسترش مي‌يابد و تمام مايع در معرض اختلاط قرار مي‌گيرد و مناطق كمتر مخلوط شده كه مايع در آنها ساكن و يا جنبش كمي دارد و فرآيند اختلاط را به تاخير مي‌اندازند، حذف مي‌شود. اين مناطق مرده در شكل (۷) نشان داده شده‌اند. طرح Hiby & Modigell در مقايسه با طرح Coldrey استعداد كمتري براي اين مناطق دارد.



شكل۷ : a) طرح Coldrey (b طرح Lane & Rice (c طرح Hiby & Modigell مناطق تيره: نواحي كم‌سرعت [۷].

تاثير عدد رينولدز

نتيجه اي كه از همه روابط و كارها حاصل شده است، اين است كه زمان اختلاط در رژيم جريان آرام تابعي قوي از عدد رينولدز بوده ولي تابعيت ضعيفي از عدد رينولدز در جريان آشفته دارد. براي نمونه يكي از روابط ارائه شده در اين مورد رابطه Lane & Rice [۷] مي‌باشد كه به صورت زير است:

$$t_m = F_{۳} \frac{H^{۰/۵} D^{۰/۷۵}}{\left(v_j d_j\right)^{۰/۵} g^{۰/۲۵}} \qquad (\text{ج -۹})$$

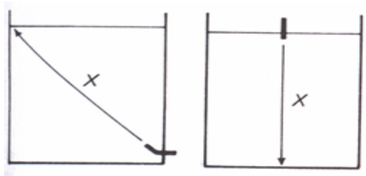
در اين رابطه F_3 پارامتري است كه بر اساس عدد رينولدز و از شكل (۳) به دست مي‌آيد. همان طور كه ديده مي‌شود، تغييرات اين پارامتر و در نتيجه زمان اختلاط با عدد رينولدز نتيجه گفته شده را تصديق مي‌كند.

انتخاب پارامترها

Revill [۲] با مطالعه در زمينه‌ي اختلاط جتي پيشنهادهای زير را در انتخاب نوع جت و پارامترها ارائه كرده است:

- اگر $۰/۷۵ \le H/D \le ۳$ جت محوري استفاده شود.
- اگر $۰/۲۵ \le H/D \le ۱/۵$ جت كنار ورود بكار رود.

- اگر $H/D \le ۰/۲۵$ يا $H/D \ge ۳$ جت چندگانه به كار رود.
- $X<۴۰۰d_j$. كه X طول مسير جت يعني فاصله بين خروج جت از نازل تا محل برخورد جت به سطح مايع يا ديوار مقابل مي باشد. طول جت براي دو نوع مختلف جت در شكل (۸) نشان داده شده است. اين شرط تضمين مي كند كه مومنتوم جت توسط كشيدن مايع (ماندگي) و اختلاط جت و مايع توده مصرف شود و چرخش ثانويه معقولي داخل توده مايع برقرار شود.
- جت‌هاي كنار ورود بايد در امتداد شعاع تانك و جت‌هاي محوري به طور عمود بر سطح مايع يا كف تانك نصب شوند و نبايد بيش از ۵ d_j در مايع فرو روند.
- اگر تفاوت دانسيته‌ي نسبي دو مايع مخلوط شونده $\frac{\rho_۲-\rho_۱}{\rho_۲} \le ۰/۰۵$ باشد، مسأله لايه لايه شدن مايعات مشاهده نخواهد شد و مي توان از جت نزديك كف جهت‌دهي شده به سمت بالا يا جت نزديك سطح مايع جهت‌دهي شده به سمت پايين استفاده كرد. ولي اگر اين نسبت بزرگتر از ۰/۰۵ باشد، در صورتي كه $V_۱/V < ۰/۵$ باشد، از جت نزديك كف به سمت بالا جهت‌دهي شده و با قسمت خروجي در زير سطح مايع به كار مي‌رود و در صورتي $V_۱/V > ۰/۵$ باشد، از جت به سمت پايين با قسمت خروجي نزديك كف تانك استفاده مي‌شود.



شكل ۸ : طول مسير جت [۲].

روش طراحي

اساسي ترين مراحل طراحي در زير خلاصه شده اند:

۱. مشخص كردن قطر (D) و ارتفاع (H) تانك.

۲. محاسبه نسبت H/D. بر اساس اين نسبت و مطالب بخش ۲-۱۱ نوع جت مشخص مي‌شود.

۳. تعيين طول مسير جت (X).

۴. محاسبه زاويه جت كنار ورود. براي جت به سمت بالا جهت دهي‌شده $\theta = \tan^{-۱} H/D$ و براي جت به سمت پايين $\theta = \tan^{-1} D/H$ مي باشد.

۵. انتخاب سرعت جت. براي جت‌هاي نزديك كف به سمت بالا بايد $v_j \ge v_c$ و براي جت‌هاي نزديك سطح مايع به سمت پايين بايد $v_j \ge ۱.۵v_c$ باشد. كه v_c سرعت بحراني بوده و براي مقادير پايين‌تر از آن مسأله لايه لايه شدن پيش مي آيد. Fossett &Prosser [۸] رابطه زير را براي سرعت بحراني ارائه كرده است:

$$v_c = \left[\frac{۲gGH\left(\frac{\rho_۲-\rho_۱}{\rho_۲}\right)}{\sin^۲\theta}\right] \qquad (۱۵)$$

كه G براي $H/d_j>۸۰$ از شكل (۹) به دست مي‌آيد.

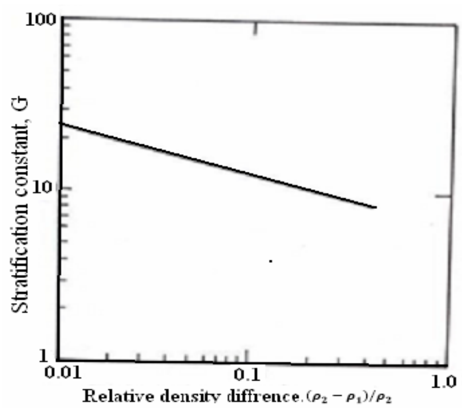
۶. انتخاب قطر جت طوري كه $۵۰ \le X/d_j \le ۴۰۰$ باشد.

۷. محاسبه‌ي زمان اختلاط با يكي از روابط ارائه شده

۸. محاسبه‌ي فشار تخليه پمپ از رابطه‌ي

$$p = \Delta p_۱ + \Delta p_۲ + p_۳$$

كه $\Delta p_۱$ افت فشار در خط لوله از خروجي تانك تا نازل، $\Delta p_۲$ افت فشار در نازل و $p_۳$ فشار استاتيكي مايع داخل تانك مي باشد.



شكل۹ : محاسبه ثابت لايه لايه شدن، G در معادله [۲].

مطالعات اختلاط جتي بر اساس تكنيك CFD

روابط تجربي ارائه شده تنها براي محاسبه زمان اختلاط در محدوده‌ي پارامترهايي كه آزمايش هائی در آن محدوده انجام گرفته قدرت پيش‌بيني خوبي دارند. در مطالعات تجربي تنها داده‌ي موجود زمان اختلاط كلي براي مجموعه‌اي معيني از پارامترهاست و هيچ اطلاعاتي از جزئيات چرخش، الگوي جريان، ميادين سرعت و غلظت در داخل تانك وجود ندارد. در كارهاي آزمايشگاهي تاثير بسياري از پارامترها به طور كامل بررسي نشده است. در روابطي كه طول مسير جت به عنوان يكي از پارامترها استفاده شده به دليل عدم قطعيت در تعيين آن ممكن

است خطاي زيادي پيش آيد[۶و۲۳]. همچنين مانند همه‌ي كارهاي آزمايشگاهي هزينه‌هاي مرتبط بالاتر از هزينه‌هاي مربوط به كارهاي شبيه‌سازي توسط رايانه خواهد بود. جهت رفع اين محدوديت‌ها و مطالعه جزئي‌تر و دقيق‌تر هيدروديناميك اختلاط جتي، تكنيك CFD در انجام تحقيقات وارد گرديده است. معادلات حل شده براي مسائل اختلاط در CFD معادله پيوستگي و معادلات مومنتوم مي‌باشند. اين معادلات با معادلات يك مدل آشفته كه براي محاسبه‌ي جريان‌هاي آشفته و وارد نمودن اثرات آشفتگي در مجموعه معادلات وارد مي‌گردند، تكميل مي‌شوند[۶،۵و۲۳]. از مزاياي مطالعه بر اساس CFD نسبت به مطالعه آزمايشگاهي مي توان به موارد زير اشاره كرد[۲۴]:

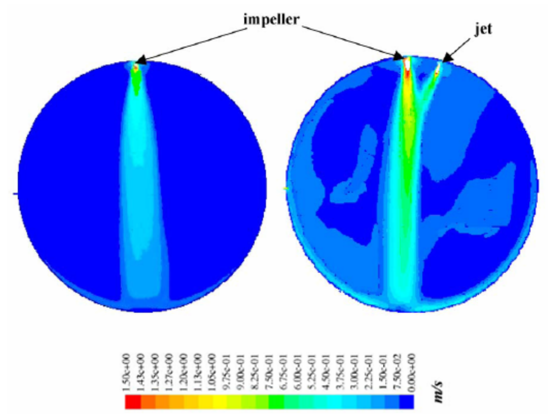
- كاهش اساسي در زمان و قيمت طراحي‌ها
- توانايي مطالعه سيستم هايي كه انجام آزمايشات كنترل شده روي آنها مشكل يا غيرممكن است. (مقياس‌هاي بزرگ صنعتي).
- توانايي مطالعه سيستم ها در شرايط پرخطر و تصادفي
- مطالعه جزئيات فرآيند و بررسي پارامترهاي بيشتر

تكنيك CFD از اويل دهه‌ي ۹۰ براي مطالعه اختلاط جتي مخازن و براي بدست آوردن زمان اختلاط كلي، جزئيات چرخش، الگوي جريان، ميادين سرعت و غلظت و بررسي تاثير پارامترهاي مختلف هندسي و عملياتي در آن مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه مهمترين نتايج حاصل از اين مطالعات آورده مي شود.

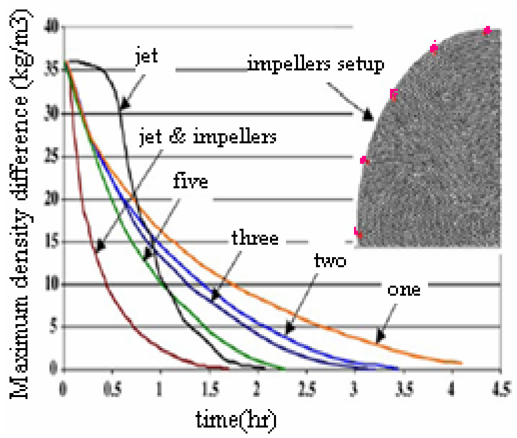
مقايسه اختلاط جتي با اختلاط مكانيكي

Rahimi و همكارانش[۲۵] عملكرد اختلاط در يک مخزن با استفاده از يک يا چند پروانه را با حالتي كه در آن يک پروانه به همراه يک جت براي همزدن استفاده مي‌شود، مقايسه كرده‌اند. مخزن به كار رفته يک تانک استوانه‌اي صنعتي با قطر ۴۴ m و ارتفاع ۱۳ m مي‌باشد. دو سوم تانک با نفت خام با دانسيته‌ي $۸۴۵\, kg/m^۳$ و يک سوم تانک با نفت خام سبكتر با دانسيته‌ي $۸۳۳\, kg/m^3$ پر شده است. هدف، اختلاط اين دو نوع نفت براي رسيدن به مخلوط يكنواختي از آنهاست. حداكثر تفاوت دانسيته در تمام تانک به عنوان معيار پيشرفت اختلاط استفاده شده است. بنابراين انتظار مي‌رود كه در اختلاط كامل اختلاف دانسيته در تمام تانک صفر باشد. آنها ابتدا حالت تك پروانه‌اي را شبيه‌سازي كرده و با مقايسه با نتايج تجربي دقت بالاي شبيه‌سازي تاييد شده است. سپس براي بررسي تاثير وارد كردن جت در اختلاط، علاوه بر پروانه يک جت نيز به داخل تانک تزريق مي‌شود. شبيه‌سازي براي چهار شدت جريان و چهار زاويه مختلف بين جت و پروانه انجام شده است. منظور از زاويه بين جت و پروانه زاويه كمان قرار گرفته بين آنهاست. كمترين زمان اختلاط در زاويه ۱۵ درجه بين جت و پروانه حاصل مي‌شود. نتايج نشان مي‌دهند كه با افزودن يک جت يكنواخت‌شدگي كامل در يک چهارم زمان مورد نياز براي حالت تک پروانه‌اي اتفاق مي‌افتد. دو دليل عمده براي توانايي فوق‌العاده جت در كاهش زمان اختلاط ذكر شده است. دليل اول چرخش سيال به واسطه انتقال ميانبر آن توسط پمپ از يك طرف تانك به طرف ديگر آن مي‌باشد. اين انتقال سيال از قسمتي به قسمت ديگر عمل مخلوط شدن و رسيدن به يكنواختي را تسريع مي‌كند. دليل دوم اين است كه همان طور كه در شكل (۱۰) ديده مي‌شود، در حالت تك پروانه‌اي سيال تنها در منطقه‌ي باريكي در امتداد پروانه حركت مي‌كند، اما در طرح جت-پروانه جريان‌هاي خروجي همديگر را به گونه‌اي تقويت مي‌كنند تا سيال با قدرت بيشتري به سمت ديوار مقابل حركت كند. به محض اين كه سيال به ديوار برخورد مي‌كند در سه جهت محوري، محيطي و شعاعي توزيع مي‌شود. جريان هاي ايجاد شده با پروانه و جت در ميانه تانک به هم مي‌رسند و يک منطقه سرعت بالا در ميانه‌ي تانک ايجاد مي‌كنند. بنابراين اين جريان مقداري از مناطق مركزي تانک را بهم آميخته كه در حالت تک پروانه‌اي اغلب ساكن مي‌باشد. هم چنين در طرح جت-پروانه حلقه‌هاي داخلي در الگوي جريان سيال ايجاد شده و فرآيند يكنواخت‌سازي را بهبود مي‌بخشد. همان طور كه در شكل(۱۰) ديده مي‌شود در حالت جت-پروانه سرعت سيال بالاتر مي‌باشد، به طوري كه در اين حالت ۹۰% حجم سيال سرعتي بالاتر از ۰/۱m/s دارند، در حالي كه اين مقدار براي حالت تك پروانه ۳۵% مي باشد. براي تاييد بيشتر مزيت اختلاط جتي، حالت چند پروانه‌اي نيز با حالت جت-پروانه مقايسه شده است. از نتايج ارائه شده در شكل (۱۱) مي‌توان ديد كه يک جتِ جفت شده با يک پروانه حتي در مقايسه با نصب پنج پروانه عملكرد بهتري دارد. اختلاط كامل با جت منفرد در مقايسه با حالت جت-

پروانه با نيم ساعت تأخير اتفاق مي‌افتد. ولي حتي جتِ منفرد نيز سريعتر از پنج پروانه اختلاط كامل را برقرار مي‌كند.



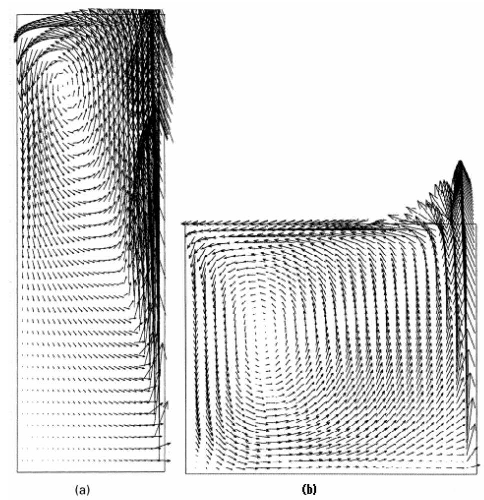
شكل ۱۰ : مقايسه بين ميدان سرعت حالت تک پروانه اي و حالت جت-پروانه با زاويه 15^0 [۲۵].



شكل ۱۱: مقايسه زمان اختلاط براي تعداد مختلف پروانه‌ها، جت منفرد و حالت جت-پروانه [۲۵].

تاثير ارتفاع تانك

Jayanti [۲۳] دو تانك با حجم يكسان ولي با ارتفاع مختلف را شبيه‌سازي نمود. الگوي جريان حاصل شده براي اين دو هندسه براي نصف تانك در شكل (۱۲) نشان داده شده است. جت به صورت محوري از مركز كف تانك تزريق مي‌شود و خروجي در مركز سطح مايع قرار دارد. در تانك بلندتر مركز چرخش در گوشه بالا قرار مي‌گيرد. چرخش نزديك اين مركز قوي است، ولي سرعت جريان در گوشه سمت چپ پايين به طور قابل توجهي كاهش مي‌يابد. اين منطقه چندان از چرخش كلي ايجاد شده متاثر نبوده و فرآيند اختلاط در آن كند است. با كم شدن ارتفاع مخزن، چرخش بسيار قويتر شده است و مناطق با سرعت بسيار پايين مانند حالت قبل وجود ندارد و چرخش تقريباً تمام تانك را در برگرفته است. نمودارهاي تغيير غلظت نشان مي‌دهند كه در تانك بلند در پايان ۱۰۰ s رداب در سه چهارم بالاي مخزن به طور كامل پخش شده و به يكنواختي رسيده است، ولي در يك چهارم پايين آن به دليل جريان ضعيف سيال در آن و غالب بودن مكانيسم نفوذ، اختلاط بسيار كند پيش مي‌رود به گونه‌اي كه حتي پس از ۳۰۰s نيز مناطقي با غلظت ۰٫۵۵ غلظت نهايي وجود دارند. ولي براي تانكِ كوتاه حركت و پخش رداب بسيار سريع مي‌باشد. به گونه اي كه پس از ۲۰s رداب در تمام تانك پخش شده و در حدود ۱۰۰s نيز اختلاط كامل در همه مناطق حاصل مي شود.

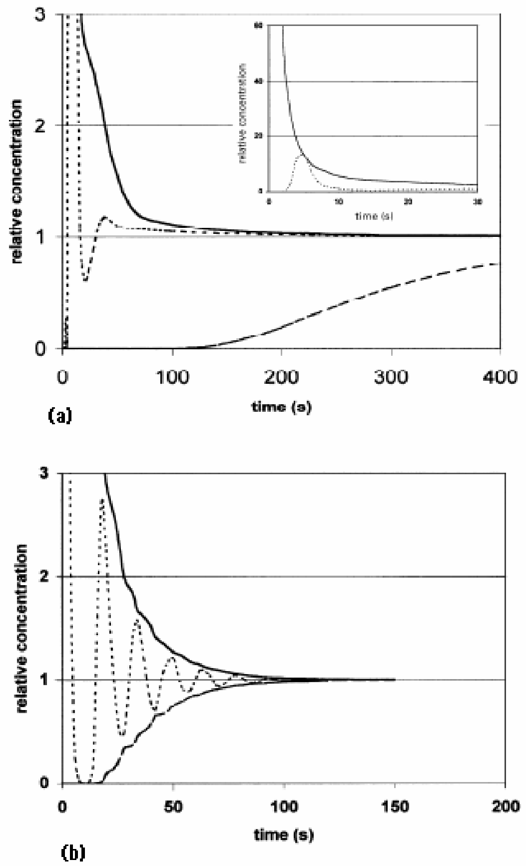


شكل۱۲ : تاثير ارتفاع بر ميادين سرعت و الگوي چرخش [۲۳].

نمودارهاي غلظت ماكزيمم، مينيمم و خروجي براي دو تانك جهت مقايسه در شكل (۱۳) آورده شده‌اند. همان طور كه ديده مي‌شود براي تانك بلند غلظت مينيمم تا حدود ۱۰۰s صفر بوده و پس از آن شروع به افزايش مي‌كند و اين به معناي اين است كه تا ۱۰۰s نقاطي از تانك وجود دارند كه غلظت رداب در آنها صفر بوده و هنوز رداب به آنها نرسيده است. ولي براي تانك كوتاه غلظت مينيمم از ۲۰s شروع به افزايش مي‌كند و اين يعني اينكه رداب در ۲۰s به تمام نقاط تانك مي‌رسد و هيچ نقطه‌اي غلظت صفر ندارد.

هم چنين از اين نمودارها مي‌توان نتيجه گرفت كه در تانك كوتاه، چرخش سيال تمام تانك را پوشش مي‌دهد و جابجايي مكانيسم غالب مي‌باشد. زيرا اولاً كاهش در غلظت ماكزيمم با افزايش مشابهي در غلظت

ماكزيمم همراه است. اگر كاهش غلظت ماكزيمم با افزايش غلظت مينيمم همراه نباشد، بدين معناست كه ردياب در منطقه‌اي خاص پخش شده در نتيجه غلظت ماكزيمم كاهش مي‌يابد، ولي در همين حال مناطق ديگري وجود دارند كه ردياب به كندي در آنها پخش مي‌شود. ثانياً سرعت افزايش غلظت مينيمم زياد است. يعني مناطقي كه غلظت ديرتر از همه بدانجا مي‌رسد، سريعاً غلظت خود را به غلظت ديگر مناطق مي‌رسانند. ثالثاً نوسانات غلظت خروجي زياد است. بدليل اينكه جت كل تانك را جاروب مي‌كند و در نتيجه سيال گذرنده از نقطه خروجي دائماً در حال تغيير و غلظت آن نقطه نوساني خواهد شد. از اين نمودارها نيز مي‌توان ديد كه زمان اختلاط كامل در تانك كوتاه بسيار كمتر مي‌باشد.



شكل ۱۳ : تغييرات غلظت بي بعد ماكزيمم (خط پر)، مينيمم (خط چين كشيده) و خروجي (خط چين كوتاه) نسبت به زمان (a) تانك بلند (b) تانك كوتاه [۲۳].

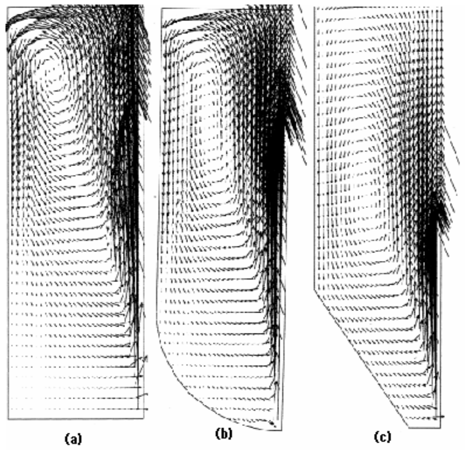
اثر محل پروب

اثر محل پروب براي دو هندسه گفته شده در بخش قبل بررسي شده است . در مورد تانك بلند اگر اختلاط كامل بر اساس دو پروب جاگذاري شده در نيمه بالايي مخزن محاسبه شود، زمان ۶۰s حاصل مي‌شود. اگر يكي از پروب ها در نيمه بالايي و پروب ديگر در ارتفاع ۲۵% تانك قرار داده شود، زمان اختلاط بالاتر از ۶۰s به دست مي‌آيد و اگر زمان اختلاط بر اساس غلظت تمام تانك محاسبه شود، حتي در ۳۰۰s نيز اختلاط كامل حاصل نمي‌شود. ولي براي تانك كوتاه بر اساس دو پروب جاگذاري شده در هر دو نقطه دلخواه زمان اختلاط يكساني به دست مي‌آيد. اين نتايج نشان مي‌دهند كه تاثير محل نمونه گيري بر زمان اختلاط در مخازني كه مناطق مرده يا مناطق كم‌سرعت بيشتري دارند (تانك بلند)، شديدتر است[۲۳].

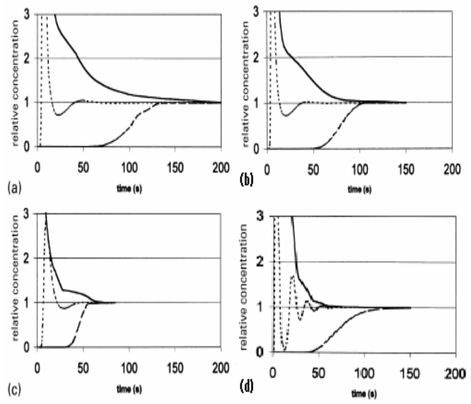
تاثير شكل كف تانك

Jayanti [۲۳] جهت بررسي تاثير شكل كف تانك در تانكي با ارتفاع ۱ m و قطر ۰/۶۴m پنج شكل صاف، نيمكره‌اي، بيضوي، مخروطي با زاويه نيم مخروط ۳۱ درجه و مخروطي با زاويه نيم مخروط ۵۸ درجه در نظر گرفت. تفاوت اصلي شكل نيمكره با شكل صاف پايين‌تر آمدن مركز چرخش و كاهش منطقه كم‌سرعت مي‌باشد (شكل۱۴). در نتيجه غلظت ردياب در قسمت پايين مخزن سريعتر حركت مي‌كند. در شكل نيمكره ردياب در ۷۵s در تمام تانك پخش مي‌شود، در حالي كه در تانك كف صاف اين زمان حدود ۱۰۰s مي‌باشد. زمان اختلاط كلي نيز براي كف نيمكره ۱۸۰ s مي‌باشد كه در مقايسه با كف صاف كه بيش از ۴۰۰ s مي‌باشد، كاهش يافته است. در تانك با كف بيضوي نسبت به كف نيمكره گردش در قسمت بالاي سريعتر بوده ولي منطقه كم‌سرعت در پايين مخزن وسعت بيشتري دارد. بنابراين نقطه افزايش غلظت مينيمم سريعتر بوده ولي سرعت افزايش آن كمتر مي‌باشد. زمان اختلاط كلي براي هر دو مورد تقريباً يكسان است. مركز چرخش در كف مخروطي با زاويه نيم مخروط ۳۱ درجه بسيار پايين و در حدود نصف ارتفاع تانك مي‌باشد. همچنين هيچ منطقه‌ي سرعت پاييني در هيچ جاي ميدان جريان وجود ندارد (شكل۱۴). در اين حالت ردياب بسيار سريع پخش مي‌شود و در مدت ۱۰s تمام قسمت استوانه‌اي تانك را پر مي‌كند و در حدود ۳۰s تمام تانک غلظت غير صفر دارد و در ۶۰s تقريباً به طور كامل مخلوط مي‌شود. وقتي زاويه نيم مخروط ۵۸ درجه در نظر گرفته مي‌شود، عملكرد تانك نسبت به زاويه نيم

مخروط ۳۱ پایین‌تر مي‌آید، ولي زمان اختلاط کلي حدود ۱۳۰ s مي‌باشد (شکل ۱۵). بنابراین بهترین شکل کف تانك براي این هندسه کف مخروطي با زاویه نیم مخروط ۳۱ درجه مي‌باشد. تاثیر داشتن کف مخروطي که براي مورد قبل شکل بهینه بود براي تانکي با ارتفاع یك‌سوم قطر نیز تحقیق شده است. در این هندسه در حالت کف صاف چرخش ایجاد شده قوي و تمام تانك را پوشش مي‌دهد، ولي در کفِ مخروطي یك منطقه کم‌سرعت نزدیك کف تشکیل مي‌شود که فرآیند اختلاط را به تاخیر مي‌اندازد. زمان اختلاط با کفِ صاف ۱۱۰s و با کف مخروطي ۱۳۰s مي‌باشد. بنابراین براي تانك‌هاي با ارتفاع کم شکل مخروطي نتیجه خوبي نمي‌دهد [۲۳].



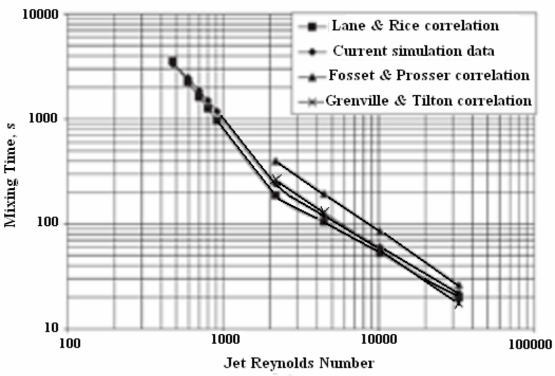
شکل ۱٤ : میدان سرعت و الگوي چرخش براي تانك با شکل کف (a) صاف (b) نیمکره‌اي (c) مخروطي 31^{o} [۲۳].



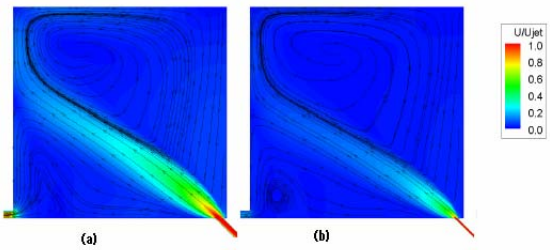
شکل ۱۵: تغییرات غلظت بي بعد ماکزیمم (خط پر)، مینیمم (خط چین کشیده) و خروجي (خط چین کوتاه) نسبت به زمان، تانك بلند با کف (a) نیمکره‌اي (b) مخروطي ۵۸° (c) مخروطي ۳۱° (d) تانك کوتاه با کف مخروطي ۳۱° [۲۳].

تاثیر عدد رینولدز

شکل (۱۶) زمان اختلاط در برابر عدد رینولدز حاصل از شبیه‌سازي Zughbi & Rakib [۳] به همراه چند رابطه تجربي را نشان مي‌دهد. توافق خوبي بین این شبیه‌سازي و نتایج تجربي وجود دارد. به وضوح دیده مي‌شود که با افزایش عدد رینولدز زمان اختلاط پایین مي‌آید و تابعیت زمان اختلاط از عدد رینولدز در جریان آرام قوي بوده اما در جریان آشفته ضعیف مي‌باشد. شکل (۱۷) نیز میدان سرعت را براي تزریق در دو عدد رینولدز مختلف نشان مي‌دهد[۲۶]. مي‌توان دید که سرعت‌ها براي جت با عدد رینولدز بالاتر بیشتر بوده و نیز گرادیان سرعت بزرگتري حاکم است. در نتیجه جریان قویتري داخل تانك ایجاد شده و زمان اختلاط پایین مي‌آید.



شکل ۱۶ : زمان اختلاط در برابر عدد رینولدز [۳].

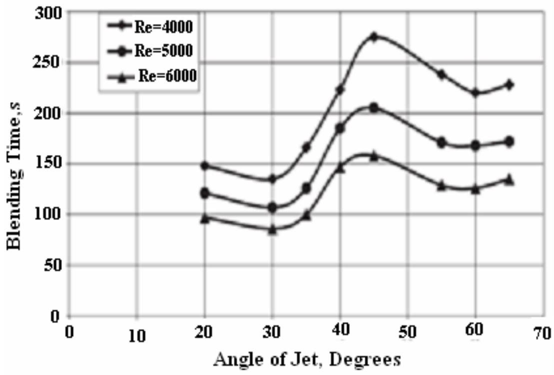


شکل ۱۷ : میادین سرعت براي دو عدد رینولدز(a) بزرگتر (b) کوچکتر [۲۶].

تأثیر زاویه‌ي تزریق

شکل (۱۸) زمان آمیختگي را در مقابل زاویه‌اي که جت به تانک تزریق مي‌شود نشان مي‌دهد[۳]. مي‌توان دید که زمان آمیختگي تابعي قوي از زاویه تزریق مي‌باشد و روند یکنواختي در حرکت از $\theta = ۰^{o}$ تا $\theta = ۹۰^{o}$ وجود ندارد. وقتي زاویه از ۲۵ تا ۶۰ درجه تغییر مي‌کند، زمان آمیختگي بین ۸۰ تا ۱۰۰% تغییر مي‌کند. این نتایج توسط Zughbi & Rakib [۳] براي تانک با قطر و ارتفاع یکسان و تزریق از لبه‌ي پایین تانک ارائه شده‌اند و با نتایج آزمایشگاهي Maruyama [۱۶] که براي چنین سیستمي ارائه شده است تطابق دارد. براي یک ارتفاع معین در تانک تغییر زاویه‌ي جت نه تنها بر طول اختلاط جت تأثیر

ميگذارد، بلکه الگوي جريان کلي داخل تانک را نيز که فاکتور مهمي در تعيين زمان اختلاط ميباشد تحت تاثير قرار ميدهد. بنابراين هر چند که Coldrey [۱۳] و Lane & Rice [۷] اين تئوري را ارائه دادند که طول جت طولانيتر زمان اختلاط کمتري را نتيجه ميدهد، ولي بايد گفت که علاوه بر طول جت فاکتورهاي مهمتر ديگري نيز وجود دارند که بر زمان اختلاط موثرند. بنابراين هميشه طولانيترين طول جت که در مورد حاضر با زاويهي ۴۵° حاصل ميشود، کوتاهترين زمان اختلاط را نتيجه نميدهد.

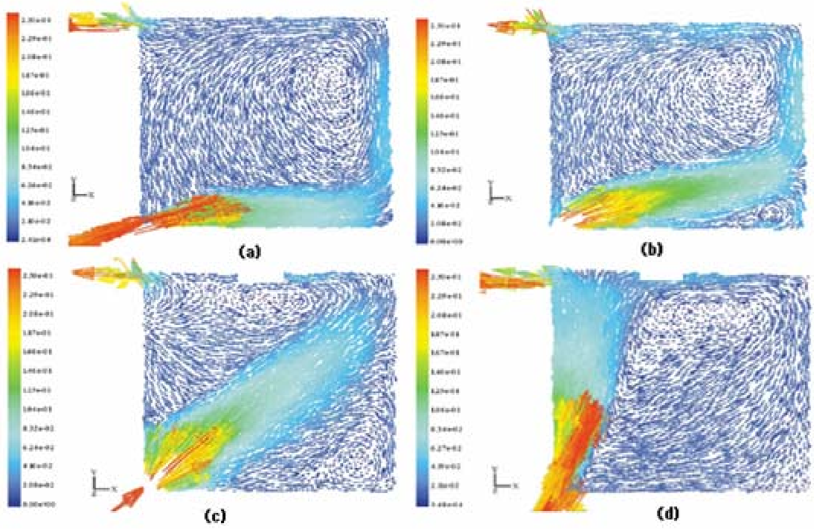


شکل ۱۸ : تابعيت زمان اختلاط از زاويه تزريق جت [۳].

در زاويه ۴۵° به دليل گسترش زياد جت و پايين بودن مومنتوم آن هنگام برخورد به ديوار، جريان برگشتي از ديوار ضعيف بوده، بنابراين چرخش و همزدگي کمتري در توده سيال اتفاق افتاده و زمان اختلاط بالا ميباشد. با کاهش زاويه از ۴۵° حجم بيشتري از سيال، داخل منطقه با همزدگي بيشتر قرار ميگيرد و چرخش جت قويتر ميشود. در نتيجه زمان اختلاط که تابعي از جزء حجمي تحت چرخش قوي ميباشد، کاهش مييابد. اين کاهش تا رسيدن به زاويه بهينه که حدود ۲۵-۳۰ درجه است ادامه مييابد. اگر کاهش باز هم ادامه يابد به دليل وارد شدن اثرات ديوار ، تاثير جت به عنوان مخلوطکننده کاهش يافته و زمان اختلاط بالا ميرود. براي زواياي بزرگتر از ۴۵° جت بعد از برخورد با سطح مايع در طول ديواره تانك برميگردد و سيال را هم ميزند و حلقههاي جريان ايجاد شده بزرگتر ميباشند و منطقه بيشتري از تانك را پوشش ميدهند. بنابراين با افزايش زاويه از ۴۵° زمان اختلاط کاهش مييابد. اين کاهش زمان اختلاط تا زاويه ۷۵° ادامه مييابد. پس از زاويه ۷۵° درجه با افزايش زاويه، جت چرخش کوتاه ايجاد شده و اثرات ديواره جانبي نيز ظاهر ميشود که منجر به افزايش دوباره زمان اختلاط ميشوند. ميادين سرعت و الگوي جريان براي زواياي مختلف در شکل (۱۹) نشان داده شده است.[۳]

تاثير زاويه در تزريق از ارتفاعي از تانک

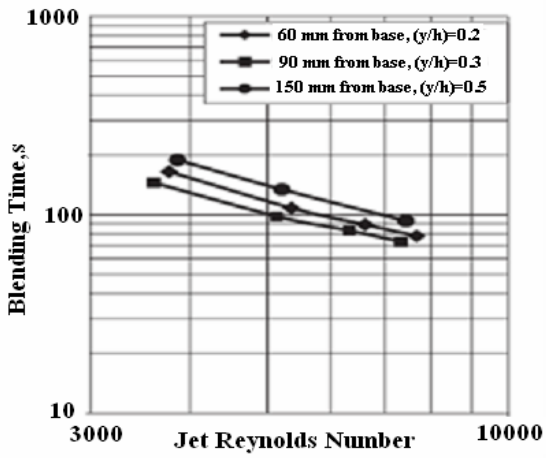
زمان اختلاط براي جت تزريق شده از ارتفاع ۶cm براي سه زاويه مختلف در يک تانک با قطر و ارتفاع برابر ۳۱cm محاسبه شده است[۳]. زاويه ۳۰° که براي تزريق از کف زاويه بهينه بود (بخش ۳-۵) در اين حالت صادق نميباشد. براي عدد رينولدز ۷۰۰۰ زمان اختلاطِ زاويه ۳۰° حدود ۱۵۰% بزرگتر از زاويه ۲۰° مي باشد و اين تفاوت براي اعداد رينولدز کوچکتر، بيشتر ميشود. اين پديده ميتواند بر اساس ميدان سرعت و الگوي جريان براي هريک از اين زوايا توضيح داده شود.



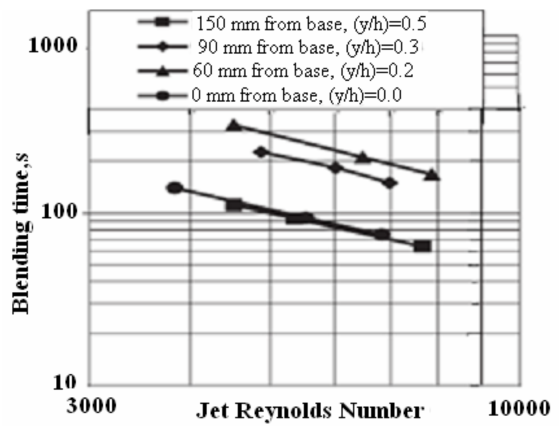
شکل ۱۹ : ميادين سرعت براي جت (a) ۲۰° (b) ۳۰° (c) ۴۵° (d) ۶۰° [۳].

تأثير ارتفاع تزريق جت

شكل (۲۰) تاثير ارتفاع تزريق را براي جت افقي و شكل (۲۱) تاثير اين پارامتر را براي جت °۳۰ نشان مي‌دهد. پيداست كه زمان اختلاط روند يكنواختي با افزايش يا كاهش ارتفاع تزريق نشان نمي‌دهد. براي تزريق افقي ارتفاع بي بعد ۰/۳ كمترين زمان اختلاط را مي‌دهد، در حاليكه براي جت °۳۰، تزريق از كف و نيز ارتفاع بي بعد ۰/۵ نتايج بهتري نشان مي‌دهند[۳]. اين يافته اين نتيجه را تصريح مي‌كند كه بدون شك طول جت در كنترل زمان اختلاط سهيم مي‌باشد، اما در همين حال، تاثير غلتش جت بعد از برخورد به ديوارهاي تانك و بنابراين الگوي جريان نيز پارامترهاي اساسي در تعيين زمان اختلاط مي‌باشند.



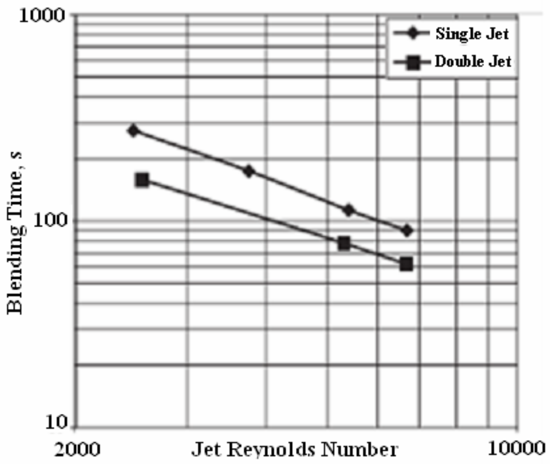
شكل۲۰ : تاثير ارتفاع تزريق بر زمان اختلاط در جت افقي [۳].



شكل۲۱ : زمان اختلاط برحسب عدد رينولدز در چهار ارتفاع مختلف تزريق براي جت °۳۰ [۳].

تاثير جت چندگانه

Rakib & Zughbi [۳] عملكرد جت دوگانه را بــا جت منفرد با مقايسه كرده اند. همانطور كه انتظار مي‌رود براي عدد رينولدز يكسان زمان اختلاط كمتري در مقايسه با جت منفرد حاصل مي‌شود. اين مساله از شكل (۲۲) پيداست. جت منفرد، در رينولدز ۶۶۶۰ زمان اختلاط ۴۵% بزرگتر و در رينولدز ۲۵۰۰ زمان اختلاط ۶۸% بزرگتر را نسبت به ساختار دوجتي نشان مي‌دهد. با كوچكتر شدن رينولدز تفاوت زمان اختلاط دو ساختار بيشتر مي‌شود و بالعكس.



شكل ۲۲ : زمان اختلاط براي جت تك و جت دوگانه [۳].

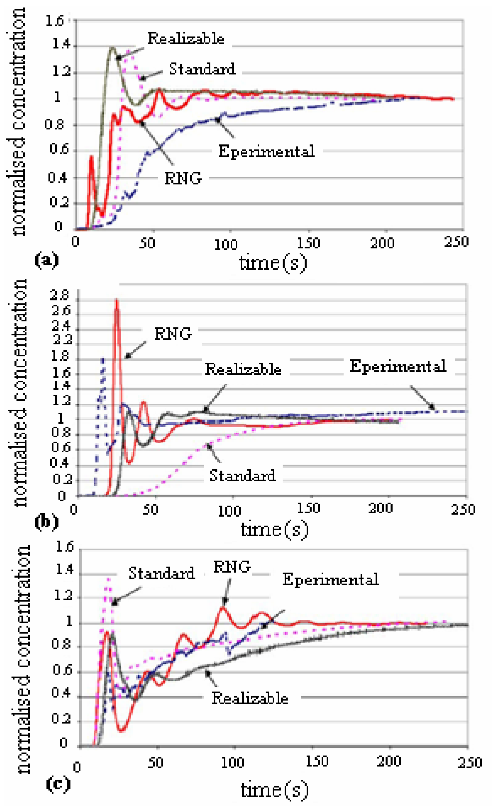
پيش بيني فرايند اختلاط

تكنيک CFD علاوه بر پيش بيني زمان اختلاط كلي و ميادين سرعت براي پيش بيني تغييرات غلظت در نقاط مختلف تانک نيز به كار مي‌رود. تعدادي از شبيه‌سازي‌هاي انجام شده پروفايل‌هاي غلظت را ارائه كرده‌اند، ولي اين پروفايل ها يا با نتايج تجربي مقايسه و تاييد نشده‌اند و يا داراي خطاي زيادي بوده‌اند. نمونه‌اي از مطالعات كه در آنها بهبودهايي در اين زمينه صورت پذيرفته است توسط Patwardhan [۶]، Marek و همكارانش [۲۶] و Rahimi & Parvaresh [۵] انجام گرفته است. اين محققين تغييرات غلظت را در شرايط مختلف پيش‌بيني كرده و نيز اثر برخي پارامترهاي موثر در پيش‌بيني پيشرفت اختلاط را بررسي كرده‌اند. در ادامه در مورد برخي از اين پارامترها بحث مي شود.

تاثير مدل آشفتگي

تاثير استفاده از سه نوع مختلف مدل آشفتگي خانواده‌ي $k-\varepsilon$ شامل مدلهاي استاندارد، RNG و قابل تحقق[۷] بر دقت پيش‌بيني پخش ردياب در تانكي با قطر ۹۰ cm و ارتفاع ۲۰ cm در سه زاويه تزريق مختلف توسط

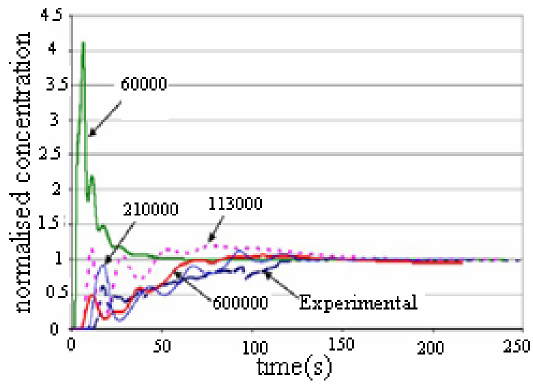
Rahimi و همکارانش[۵] تحقيق شده است كه نتايج در شكل (۲۳) ديده مي شوند. در آرايش جت 0° هر سه منحني تئوري در پيش‌بيني پخش رديابِ تفاوت چشمگيري با آزمايش دارد. به هر حال منحني اختلاط پيش‌بيني شده با مدل RNG روندي مشابه منحني آزمايشگاهي دارد. فرآيند اختلاط پيش بيني شده در آرايش $22/5^{\circ}$ با مدل RNG دقت بالاتري نسبت به دو مدل ديگر دارد. مدل RNG يک تيزي[۸] مشابه منحني تجربي با اندكي تأخير زماني دارد، در حالي كه در نتايج مدلهاي استاندارد و قابل تحقق اين تيزي وجود ندارد. نتايج حاصل با مدل استاندارد كاملاً از منحني آزمايشگاهي دور مي‌باشد. منحني اختلاط پيش‌بيني شده با مدل قابل تحقق نيز تاخير زماني بزرگي نسبت به منحني تجربي دارد. بهترين نتايج پيش‌بيني شده با همه مدلها در طرح جت 45° به دست مي‌آيد. مشابه دو حالت بالا منحني اختلاط پيش‌بيني شده با مدل استاندارد نسبت به حالت تجربي بسيار بزرگتر بوده ولي منحني‌هاي مدل‌هاي RNG و قابل تحقق ملايم‌تر مي‌باشد. بنابراين در همه طرح ها مدل RNG بهترين نتايج را مي‌دهد.



شكل ۲۳ : مقايسه‌ي روند اختلاط پيش‌بيني شده توسط شبيه‌سازي با نتايج تجربي و تاثير مدل آشفتگي بر آن (a) جت °۰ (b) جت °۲۲٫۵ (c) جت °۴۵ [۵].

تاثير تعداد سلول ها

در شكل (۲۴) نتايج شبيه‌سازي انجام شده با تعداد سلول‌هاي مختلف براي يك سيستم نمونه آمده است. وقتي تعداد سلول‌ها كم يا اندازه‌ي سلول‌ها بزرگ باشد، خطاي پيش‌بيني بالاست، به گونه‌اي كه طرح ۶۰۰۰۰ سلول براي اين سيستم نتايج رضايت بخشي نمي‌دهد. از طرفي تغييرات غلظت پيش‌بيني شده با دو طرح ۲۱۰۰۰۰ و ۶۰۰۰۰۰ سلول خيلي به هم نزديك مي‌باشند. اين مساله حاكي از آن است كه كاهش اندازه سلول(افزايش تعداد سلول‌ها) تا حد معيني نتايج را بهبود مي‌بخشد و پس از آن به دليل دقت كافي مدل، افزايش تعداد سلول‌ها ضرورتي نداشته و باعث بالا رفتن دقت شبيه‌سازي نخواهد شد[۵].



شكل۲۴ : نتايج شبيه‌سازي در پيش‌بيني اختلاط با تعداد مختلف سلول‌ها و مقايسه با نتيجه تجربي [۵].

تأثير پارامترهاي آشفتگي

در مدل $k-\varepsilon$ مقادير نفوذپذيري گردابه‌اي[۹] (آشفتگي) با حل معادلات k و ε به صورت زير محاسبه مي‌شود:

$$\nu_{\tau} = C_{\mu} \frac{k^{2}}{\varepsilon} \qquad (16)$$

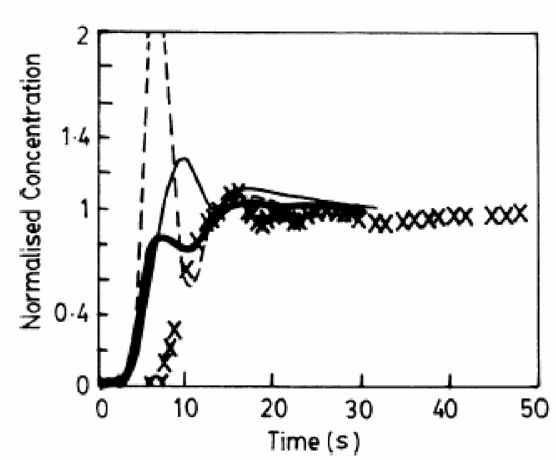
در معادله‌ي ε، در محاسبه ترم توليد S_{ε} دو پارامتر $C_{\varepsilon 1}$ و $C_{\varepsilon 2}$ ظاهر مي شوند كه رابطه بين اين پارامترها چنين است:

$$C_{\varepsilon 1} = C_{\varepsilon 2} - \frac{k^{2}}{\sigma_{\varepsilon}\sqrt{C_{\mu}}} \qquad (17)$$

مقادير پارامترهاي $C_{\mu}, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$ با شبيه‌سازي كامپيوتري بهينه شده و براي شرايط استاندارد به ترتيب ۱/۹۲، ۱/۴۴ و ۰/۰۹ مي‌باشند. بايد تأكيد كرد كه مقادير استاندارد اين پارامترها تنها براي هندسه‌هاي استاندارد

معتبر مي‌باشند[۶]. با اين حال بيشتر محققين در شبيه‌سازي اختلاط از همين مقادير استفاده كرده‌اند. ولي به نظر مي‌رسد، احتمالاً مقادير جديدي از پارامترها براي ساختار اختلاط جتي معتبر باشد. Abujelala & Lilley [۲۸] مقادير متفاوتي از C_μ را براي جريان هاي چرخنده گزارش كرده‌اند. Patwardhan و همكارانش[۶] نشان داده‌اند كه پيش‌بيني‌هاي CFD براي تانک‌هاي همزده مي‌تواند با تغيير مقادير C_μ بهبود يابد.

Patwardhan [۶] حساسيت پيش‌بيني‌هاي CFD به تغيير مقدار C_μ را مطالعه كرده است. اين حساسيت به دو روش تحقيق شده است. در يک مجموعه از شبيه‌سازي‌ها تنها مقدار C_μ تغيير يافته و مقادير $C_{\varepsilon1}, C_{\varepsilon2}$ همان مقادير استانداردشان را دارند. در مجموعه‌ي دوم شبيه سازيها مقادير $C_\mu, C_{\varepsilon1}$ مطابق معادله (۱۷) تغيير كرده‌اند و مقدار $C_{\varepsilon2}$ همان مقدار استانداردش در نظر گرفته شده است. پيش‌بيني‌هاي مدل براي مقادير مختلف C_μ (با $C_{\varepsilon1}$ و $C_{\varepsilon2}$ استاندارد) و نيز اندازه‌گيري‌هاي تجربي در شكل (۲۵) نشان داده شده است. از اين شكل مي‌توان ديد كه افزايش مقدار C_μ به يک تيزي با اندازه‌ي پايين‌تر منتهي مي‌شود. در واقع با افزايش C_μ نفوذپذيري آشفتگي بزرگتر شده و پخش ردياب سريعتر مي‌شود و اين پخش سريع مانع از بالا رفتن غلظت ردياب در مراحل ابتدايي اختلاط (ايجاد پيك بزرگ) مي‌شود. در زمان‌هاي بزرگتر نيز پيش‌بيني‌هاي CFD با C_μ بزرگتر در مقايسه با دو مقدار ديگر C_μ توافق بهتري را با نتايج تجربي مي دهد. اما در مورد زمان رسيدن ردياب به محل پروب (زمان افزايش غلظت در نمودار) بايد گفت كه تغيير C_μ تاثير چنداني ندارد. زيرا حركت ردياب و اختلاط بيشتر توسط انتقال جابجايي انجام مي‌گيرد تا با انتقال پخشي (نفوذپذيري گردابه‌اي) و تغيير C_μ نيز بر ميزان انتقال پخشي تاثير مي‌گذارد. بنابراين به دليل بالا بودن عدد پكلت حتي در مقادير بالاتر C_μ نيز، مكانيسم جابجايي كه موجب رسيدن ردياب به محل پروب مي‌شود، غالب بوده و C_μ تاثير چنداني در اين مورد نخواهد داشت. شكل (۲۶) مقايسه‌اي بين پروفايل غلظت پيش‌بيني شده با الف- هر سه پارامتر استاندارد ب- C_μ كاهش يافته و $C_{\varepsilon1}$ و $C_{\varepsilon2}$ استاندارد و ج- كاهش $C_\mu, C_{\varepsilon1}$ مطابق معادله (۱۷) و $C_{\varepsilon2}$ استاندارد را با نتايج آزمايشگاهي نشان مي‌دهد. از شكل پيداست كه وقتي مقدار C_μ كاهش مي‌يابد، اندازه پيک بزرگتر مي‌شود (كاهش نفوذپذيري گردابه‌اي). ولي وقتي كه مقدار C_μ و $C_{\varepsilon1}$ كاهش مي‌يابند، اندازه تيزي در پروفايل غلظت كاهش مي‌يابد (افزايش نفوذپذيري گردابه‌اي). اين دو نتيجه تواماً نشان مي دهند كه كاهش $C_{\varepsilon1}$ باعث افزايش نفوذپذيري گردابه اي شده و نيز تاثير $C_{\varepsilon1}$ شديدتر از C_μ.



شكل ۲۵ : مقايسه پروفايل غلظت پيش بيني شده با شبيه سازي CFD با نتايج تجربي [۶].

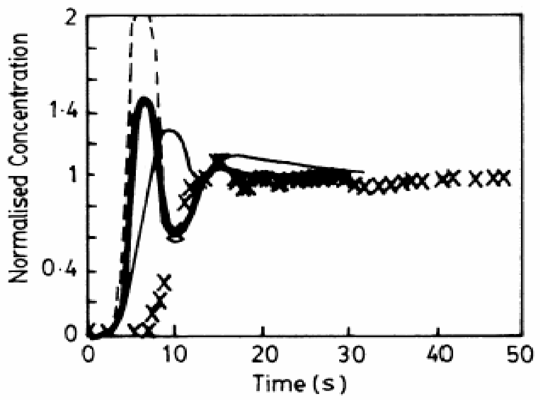
- - - - - - **شبيه سازي با** $C_\mu =$ ۰/۰۴۵ ،

—— **شبيه سازي با** $C_\mu =$ ۰/۰۹

▬▬ **شبيه سازي با** $C_\mu =$ ۰/۱۳۵ ،

×××××× **نتايج تجربي**

شكل (۲۷) مقايسه‌اي بين منحني غلظت پيش‌بيني شده با الف- هر سه پارامتر استاندارد ب- C_μ افزايش يافته و $C_{\varepsilon1}, C_{\varepsilon2}$ استاندارد و ج- افزايش C_μ و $C_{\varepsilon1}$ مطابق معادله (۱۷) و ثابت نگه داشتن $C_{\varepsilon2}$ در مقدار استاندارد استانداردش را با نتايج آزمايشگاهي نشان مي‌دهد. از شكل پيداست كه افزايش مقدار $C_{\varepsilon1}$ به همراه افزايش C_μ باعث افزايش بسيار سريع در تيزي پروفايل غلظت مي‌شود. اين بدين معناست كه مقدار نفوذپذيري گردابه‌اي به طور قابل توجهي با افزايش $C_{\varepsilon1}$ كاهش مي‌يابد. وقتي نتايج حاصل از اشكال (۱۱-۹) كنار هم گذاشته مي‌شوند، مي‌توان گفت كه كه مقادير بالاتر C_μ به همراه مقادير پايين‌تر $C_{\varepsilon1}$ براي پيش بيني تغييرات غلظت بهتر مي‌باشند.



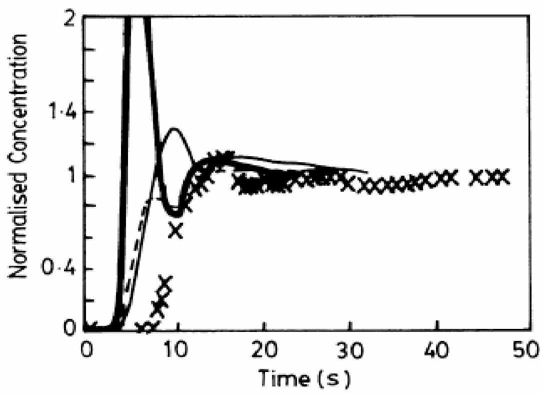
شکل ۲۶ : مقایسه پروفایل غلظت پیش بیني شده با شبیه سازي CFD **با نتایج تجربي [۶].**

- - - - - **شبیه سازي با** $C_{\mu}=۰/۰۴۵$ **و** $C_{\varepsilon۱}=۱/۴۴$

——— **شبیه سازي با** $C_{\mu}=۰/۰۹$ **و** $C_{\varepsilon۱}=۱/۴۴$

▬▬ **شبیه سازي با** $C_{\mu}=۰/۰۴۵$ **و** $C_{\varepsilon۱}=۱/۳۱$

×××× **نتا یج تجربي**



شکل ۲۷ : مقایسه پروفایل غلظت پیش بیني شده با شبیه سازي CFD **با نتایج تجربي [۶].**

— — — **شبیه سازي با** $C_{\mu}=۰/۱۳۵$ **و** $C_{\varepsilon۱}=۱/۴۴$

——— **شبیه سازي با** $C_{\mu}=۰/۰۹$ **و** $C_{\varepsilon۱}=۱/۴۴$

▬▬ **شبیه سازي با** $C_{\mu}=۰/۱۳۵$ **و** $C_{\varepsilon۱}=۱/۵۷$ ،

×××× **نتا یج تجربي**

نتیجه‌گیری

مروري بر مطالعات انجام گرفته در زمینه‌ي اختلاط جتي که شامل مطالعات تجربي و مطالعات شبیه‌سازي بر اساس تکنیك CFD مي‌باشد، انجام گرفت. در مورد نتایج این مطالعات و تاثیر پارامترهاي مختلف هندسي و عملیاتي بحث شد. دیده شد که برخي پارامترها مانند قطر و ارتفاع تانك و سرعت و قطر جت و عدد رینولدز جت اثر مشخص و یکنواختي بر عملکرد اختلاط دارند. اما تاثیر برخي پارامترها مانند زوایه نازل، ارتفاع تزریق، شکل کف تانك موردي بوده و نسبت به تغییر دیگر پارامترها بسیار حساس مي باشند و حالت بهینه بر حسب شرایط سیستم مورد نظر تغییر مي‌کند. با این حال هدف همه‌ي طراحي‌ها باید حذف و یا کاهش مناطق مرده یا کم‌سرعت و ایجاد حرکت و چرخش با سرعت بالا در سراسر حوزه‌ي جریان باشد. از اینجا اهمیت تکنیك CFD در به دست آوردن الگوي جریان و محاسبه‌ي میادین سرعتِ دقیق و جزئي جهت انتخاب حالت بهینه روشن مي شود. پرکاربردترین مدل آشفتگي مدل‌هاي خانواده‌ي $k-\varepsilon$ مي‌باشند که مدل RNG نسبت به دو مدل دیگر این خانواده دقت بالاتري را نتیجه مي دهد. همچنین کاهش اندازه‌ي سلول‌هاي تقسیم‌کننده‌ي حوزه‌ي جریان تا حد معیني دقت شبیه‌سازي را بالا مي‌برد. پارامترهاي قابل تنظیم مدل‌هاي آشفتگي که در متون مقادیري براي آنها ارائه شده است، دقیقاً براي اختلاط جتي مخازن استخراج نشده‌اند. بنابراین با انتخاب مناسب مقدار این پارامترها مي‌توان نتایج بهتري از شبیه‌سازي‌ها گرفت.

فهرست علائم

A : سطح مقطع نازل ($m^۲$)

$C_{\mu}, C_{\varepsilon۱}, C_{\varepsilon۲}$: ثوابت مدل $k-\varepsilon$

c : غلظت ردیاب در محل اندازه گیري

$\bar{c}$: غلظت متوسط نهایي ردیاب

D: قطر تانك ,(m)

d, d_j: قطر نازل یا جت ,(m)

$F_۱, F_۲, F_۳$: ثوابت زمان اختلاط در معادله

G: ثابت معادله(۲)

g: شتاب گرانشي، ($m/s^۲$)

H: ارتفاع تانك ,(m)

h_i: ارتفاع نازل از کف تانك

J: مومنتوم جت ، ($kg\ m/s^۲$)

J_s: اندازه حرکت ویژه‌ي جت، بي بعد

k: انرژي جنبشي آشفته، ($m^۲/s^۲$)

L: طول مسیر جت ,(m)

m: معیار انحراف از اختلاط کامل

R : نسبت ظاهري ,(H/D)

Re_j : عدد رینولدز جت ,($\rho v_j d_j/\mu$)

t_m, t_M: زمان اختلاط

t_R: زمان اقامت متوسط

V: حجم تانك

V_1: حجم مايع سبك

v, v_j: سرعت جت (m/s),

v_c: سرعت بحراني

X: طول مسير جت (m),

ε: شدت استهلاك انرژي جنبشي، (m^2/s^3)

μ: ويسكوزيته‌ي مولكولي (kg m/s),

θ: زوايه تزريق جت نسبت به افق

ν: ويسكوزيته‌ي سينماتيك، (m^2/s)

ν_τ: نفوذپذيري گردابه‌اي(آشفتگي)، (m^2/s)

ρ: دانسيته‌ي سيال (kg/m),

ρ_1: دانسيته‌ي مايع سبك

ρ_2: دانسيته‌ي مايع سنگين

مراجع

1 - Siddiqui, S. W. (2004). *Numerical and Experimental Studies of Non Reactive and Reactive Mixing.* M.Sc. Thesis, King Fahd University Of Petroleum & Minerals, Saudi Arabia.

2 - Revill, B. K., in Harnby, N., Edwards, M. F., Nienow, A. W. (1997). *Mixing In The process industries*. chapter 9, 2nd Ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.

3 - Zughbi, H. D., Rakib, M. A. (2004). “Mixing in a fluid jet agitated tank: effects of jet angle and elevation and number of jets.” *Chem. Eng. Sci.,* Vol. 59, PP.829–842.

4 - Zughbi, H. D., Rakib, M. A. (2002). “Investigations of Mixing in a Fluid Jet Agitated Tank.” *Chem. Eng. Comm*., Vol. 189, No. 9, PP.1038.

5 - Rahimi, M., Parvareh, A. (2005). “Experimental and CFD investigation on mixing by a jet in a semi-industrial stirred tank.” *Chemical Engineering Science*, Vol. 115, PP.85-92.

6 - Patwardhan, A. W. (2002). "CFD modeling of jet mixed tanks. ” *Chem. Eng. Sci.,* Vol. 57, No. 1307–1318.

7 - Lane, A. G. C., Rice, P. (1982). “Comparative Assessment of the Performance of the Three Designs for Liquid Jet Mixing. ” *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.,* Vol. 21, No. 650-653.

8 - Fossett, H. & Prosser, L.E. (1949). “The application of free jets to the mixing of fluids in bulk.” *Roc. Inst. Mech. Eng.,* Vol. 160, PP.224–232.

9 - Fossett, H. (1951). “The action of free jets in mixing of fluids.” *Trans. Inst. Chem. Eng.,* Vol. 29, No. 322.

10 - Fox, E. A. and Gex, V. E. (1956). “Single-phase blending of liquids.” *A. I. Ch. E. J.,* Vol. 2, PP.539–544.

11 - Van de Vusse, J. G. (1959). “Vergleichende ruhrversuche zum mischen losllicher flussigkeiten en einem 12000 m^3 Behalter.” *Chemie-Ingenieur-Technik.,* Vol. 31, PP.583-587.

12 - Okita N. and Oyama, Y. (1963). “Mixing characteristics of jet mixing.” *Japanese Journal of Chemical Engineers*, Vol. 31, No. 9, PP.92–101.

13 - Coldrey, P. W. (1978). “Jet mixing.” *Paper to I. Chem. Eng. Course,* Univ. of Bradford, England.

14 - Hiby, J. W. and Modigell, M. (1978). “Experiments on jet agitation. ” *Sixth CHISA Congress,* Prague.

15 - Racz, I. and Wassink, J. G. (1974). *Chem. Eng. Tech.,* Vol. 46, No. 261.

16 - Maruyama, T., Ban, Y. and Mizushina, T. (1982). “Jet mixing of fluids in tanks.” *Journal of Chemical Engineering of Japan,* Vol. 15, PP.342–348.

17 - Simon, M. and Fonade, C. (1993). “Experimental study of mixing performances using steady and unsteady jets. ” *Canadian Journal of Chemical Engineering,* Vol. 71, PP.507–513.

18 - Orfaniotis, A., Fonade, C., Lalane, M. and Doubrovine, N. (1996). “Experimental study of fluid mixing in a cylindrical reactor.” *Canadian Journal of Chemical Engineering,* Vol. 74, PP.203-212.

19 - Grenville, R. K. and Tilton, J. N. (1996). “A new theory improves the correlation of blend time data from turbulent jet mixed vessels. ” *Chemical Engineering Research Design,* Vol. 74A, PP.390–396.

20 - Grenville, R. and Tilton, J. (1997) “Turbulence for flow as a predictor of blend time in turbulent jet mixed vessels.” *Proceedings of the Nineth European Conference On Mixing,* France, Vol. 11, No. 51, PP. 67–74.

21 - Perona, J. J., Hylton, T. D., Youngblood, E. L. and Cummins, R. L. (1998). “Jet mixing of liquids in long horizontal cylindrical tanks.” *Ind. Eng. Chem. Res.,* Vol. 38, PP.1478–1482.

22 - Lane, A. G. C. (1982). Ph.D. Thesis, Loughborough Univ. of Tech.

23 - Jayanti, S. (2001). “Hydrodynamics of jet mixing in vessels.” *Chem. Eng. Sci.,* Vol. 56, PP.193–210.

24 - Versteeg, H. K. and Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method.* Longman Limited, England.

25 - Rahimi, M. and Parvareh, A. (2006). “CFD study on mixing by coupled jet-impeller mixers in a large crude oil storage tank. ” *Computers and Chemical Engineering,* Vol. 31, No. 7, PP.737-744.

26 - Marek, M., Stoesser, T., Roberts, P. J. W., Weitbrecht, V., Gerhard H. and Jirka, G. H. (2007). *CFD Modeling Of Turbulent Jet Mixing In a Water Storage Tank*. 32nd IAHR Congress, Venice, Italy.

27 - Abujelala, M. T. and Lilley, D. G. (1984). “Limitations and empirical extensions of the ‘k–ε’ model as applied to the turbulent confined swirling flow.” *Chem. Eng. Comm.,* Vol. 31, PP. 223-236.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Computational Fluid Dynamics
2 - Side Entry Jet
3 - Axial Jet
4 - Tracer Injection
5 - Circular Jet
6 - Wall Jet
7 - Realizable
8 - Peak
9 - Eddy Diffusivity (Turbulent Diffusivity)