

شبیه سازی جریان آشفته در یک سیکلون

احمد رضا عظیمیان^۱، احمد صداقت^۲، سید ایمان روح الامین^۳

دانشکده مکانیک-دانشگاه صنعتی اصفهان

E-mail: azimian@cc.iut.ac.ir

چکیده

در این مقاله سعی شده است، معادلات حاکم بر جریان سیال آشفته در یک سیکلون، با استفاده از روش حجمهای محدود و به کمک الگوریتم سیمپل-سی، حل گردد. تنشهای رینولدز با استفاده از دو مدل $RNG k-\epsilon$ و RSM محاسبه می شوند. برای تحلیل جریان با آشفتگی بالا هنده ای از یک سیکلون استیرمان با حدود ۵۰۰۰۰۰ المان بصورت بی سازمان تهیه شده و سپس به کمک جداسازیهای مرتبه سه (*Quick*) معادلات حاکم حل شده اند. نتایج مدل RSM توافق خوبی را با داده های تجربی، در سرعتهای مملسی و محوری نشان می دهند. درحالی که نتایج مدل $RNG k-\epsilon$ هرچند در سرعتهای مماسی دقت مطلوبی دارد ولی سرعتهای محوری را تنها در نقاط محیطی سیکلون، که تنشها همگن هستند، می تواند پیش بینی کند. بخصوص این مدل در پیش بینی جریان برگشتی هسته سیکلون ناتوان است. بنابراین مدل $RNG k-\epsilon$ در جریانهای همگن یا جریانهای آشفته در سرعتهای کم قابل استفاده است، و مدل مناسب برای تحلیل جریان آشفته در سیکلون، مدل RSM می باشد.

واژه های کلیدی: RSM - $RNG k-\epsilon$ - اغتشاشات ناهمگن - سیکلون استیرمان.

مقدمه

جداکننده سیکلون، یکی از مشهورترین وسایل جدا کننده گرد و غبار است که در صنعت یافت می شود. این وسیله جدا کننده دارای مزایای ویژه ای است که (در محدوده تغییر اندازه بخصوصی از غبار) سبب برتری آن می شود، از جمله این مزایا می توان به عدم وجود قطعات متحرک در سیکلون، امکان کار در دماهای بالا، امکان ساخت از مواد مختلف را نام برد. که به همراه افت فشار متوسط، گستره گذردهی حجم سیالی و بازده مناسب در سیستمهای گاز-جامد و گاز-مایع آن را به یکی از بهترین وسایل جدا کننده غبار در صنایع مختلف تبدیل کرده است.

وجه مشخصه سیکلون نسبت به دیگر وسایل جدا کننده غبار این است که در این وسیله عامل جدایش غبار، نیروی گریز از مرکزی می باشد که توسط جریان گاز چرخنده در سیکلون اعمال می گردد. همانند اکثر وسایل صنعتی، اگر بتوان جریان داخل محفظه سیکلون را بدرستی پیش بینی کرد می توان تحلیل صحیحی از راندمان و افت فشار سیکلون بدست آورد، و یا حتی راندمان وسیله را بهبود بخشید. بر این اساس دادهای آزمایشگاهی عملکرد سیکلونها [۱]، در دهه های ۳۰ و ۴۰ میلادی با استفاده از روشهای: لوله های ضربه (Impact tubes)، سیمهای داغ الکتریکی، و کاربرد لیزر (*Laser Doppler*) اندازه گرفته می شدند، که استفاده از این وسایل بسیار وقت گیر بوده و هزینه آنها هم بسیار بالا است.

^۱استاد

^۲استادیار

^۳دانشجوی کارشناسی ارشد

روش در جریانهای پیچیده سریع با ناهمسانگردی زیاد مورد ارزیابی قرار گیرد.

معادلات حاکم:

معادلات حاکم بر جریان گاز در یک سیکلون، معادلات پیوستگی و ممنتوم هستند. که در یک سیستم مختصات غیر شتابدار، برای حالت پایدار، در یک جریان غیر قابل تراکم بدین صورت نوشته می شوند:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

این معادلات دارای شکل کلی معادلات نویر استوکس هستند، که با متوسط گیری زمانی این معادلات جمله اضافی تنشهای رینولدز به سمت راست معادله افزوده شده است. برای بستن دستگاه معادلات فوق باید تنشهای رینولدز بطرز صحیحی مدل گردند. یک روش متداول استفاده از روش بوزینسک (Boussinesq) [۹]، است که تنشهای رینولدز را به گرادیان سرعت متوسط مربوط می کند و به عنوان مثال این شیوه در مدل $k-\varepsilon$ استفاده شده است:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

روش حذف مقیاس در $k-\varepsilon$ RNG منجر به معادله دیفرانسیل زیر، برای ویسکوزیته معشوش می شود:

$$d \left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \right) = 1.72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^3 - 1 + c_v}} d\hat{v} \quad (4)$$

که $\hat{v} = \mu_{eff} / \mu$ بوده و $c_v \approx 100$ می باشد. این معادله در نواحی با رینولدز پایین جواب مناسب تری نسبت به

در سالهای اخیر با ظهور کامپیوترهای دیجیتال قوی، وسایلی فراهم شده است که بتوان با استفاده از مدل‌های ریاضی، جریانهای داخل سیکلون را پیش بینی کرد. هر چند این روشها نیز به نوبه خود توسط محدودیتهای سخت افزاری و نرم افزاری، حافظه در دسترس و مقدار واحد پردازشگر مرکزی (CPU) که برای شبیه سازی لازم است مواجهند، که این عوامل خود را در انتخاب مدل فیزیکی و اغتشاشی مناسب در مقالات مختلف نمایانده است.

اولین نتایج بدست آمده در مدلسازی سیکلونهای گازی توسط بویسان و همکارانش [۲] ارائه شد. آنها با این فرض که جریان داخل سیکلون نسبت به محور سیکلون دارای تقارن می باشد، یک هندسه دو بعدی را با استفاده از مدل تنشهای جبری برای محاسبه شش مولفه تنش رینولدز استفاده نمودند، که با توجه به ورودی نامتقارن سیکلون و ناهمسانگردیهای موجود در هسته جریان، این فرض از اعتبار پایینی برخوردار بود.

از دیگر شبیه سازیهای تقارن محوری می توان به پژو-هشای صورت گرفته توسط بویسان و همکارانش [۳] و دیویدسون و همکارانش [۴] اشاره کرد، که به علت محدودیت مربوط به دو بعدی بودن، نتایج آنها قابل استناد نیست. با افزایش قدرت محاسباتی کامپیوترها و به علت نامناسب بودن هندسه های تقارن محوری، تلاشهای محاسباتی به تحلیل هندسه های سه بعدی گرایش یافت، که از جمله این تحقیقات می توان به پژوهشهای صورت گرفته توسط: زو و سو (Zhou and Soo) در دهه ۹۰، بر اساس مدل $k-\varepsilon$ ، کیم و لی [۵] براساس مدل RSM، دیاکوسکی و ویلیامز (Dyakowski and Williams)، بر اساس یک مدل پیشرفته $k-\varepsilon$ ، گریفیس و بویسان (Griffiths and Boyson) بر اساس مدل $k-\varepsilon$ RNG، گورتون [۶] بر اساس مدل RSM، هوکاسترا و همکارانش [۷] بر اساس مدل‌های $k-\varepsilon$ استاندارد و RNG، و فردر - یکسون [۸] بر اساس مدل RSM، را اشاره کرد.

در این مقاله یک سیکلون بازده بالای نوع استیرمان با هندسه نشان داده شده در شکل (۱) با استفاده از مدل‌های RSM و $k-\varepsilon$ RNG شبیه سازی شده و نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه شده اند. همچنین سعی شده تا با بررسی تواناییهای هرمدل در پیش بینی الگوی جریان در مقاطع مختلف سیکلون، دقت این دو

$k-\epsilon$ استاندارد، برای μ می دهد و در رینولدز های بالا تقریباً با حالت استاندارد برابر است. روش دیگر برای مدل کردن تنشهای رینولدز، استفاده از معادلات انتقالی برای هر عبارت در تئور تنش است، که با یک معادله اضافی برای تعیین مقیاس (معمولاً برای ϵ)، پنج معادله اضافی در حالت دو بعدی و هفت معادله اضافی در حالت سه بعدی ایجاد می نماید [۱۰]، [۱۱] و [۱۲].

هندسه سیکلون و شرایط حل:

شکل بندی سیکلون مورد بررسی در شکل (۱) نشان داده شده است. این یک سیکلون بازده بالای نوع استیرمان با قطر بدنه $D = 0.705m$ و قطر لوله خروجی (Vortex finder)، $d = D/2$ می باشد. سیال مورد بررسی جریان هوای ترکم ناپذیر با دانسیته $\rho = 1.225 \frac{kg}{m^3}$ و ویسکوزیته $\mu = 1.7894 * 10^{-5} \frac{kg}{ms}$ است که با دبی حجمی $0.08 \frac{m^3}{s}$ از سیکلون عبور می کند. برای بررسی الگوی جریان، از هندسه ای با شبکه چند ساختاری (block structured) با حدود ۵۰۰۰۰۰۰ المان حجمی نظیر آنچه که در شکلهای (۲) و (۳) نشان داده شده است، استفاده شده است. المانهای محیطی سیکلون از نوع شش وجهی و در قسمت هسته مرکزی از نوع ترکیبی است. برای دخول جریان از شرط مرزی سرعت ورودی و در مرز خروجی جریان از شرط فشار خروجی، استفاده شده است. شرایط روی دیواره عدم لغزش بوده و به منظور در نظر گرفتن آثار گرادیان فشار بر الگوی جریان از توابع دیوار غیر تعادلی، استفاده شده است. تمام نتایج آمده در این بررسی بر اساس روش گسسته سازی درجه سه بوده و برای ایجاد کوپل ملیین معادلات پیوستگی و ممنوم از الگوریتم سیمپل-سی استفاده شده است.

نتایج:

به منظور مقایسه پیش بینی ها با نتایج آزمایشگاهی نتایج حاصل از شبیه سازی در مقاطعی با فواصل 0.078 ، 0.072 ، 0.066 ، 0.062 ، 0.059 ، 0.041 از رأس سیکلون در دو راستای مماسی و محوری استخراج شده و با نتایج

آزمایشی اسلاک و همکارانش [۱۳]، مقایسه شده است. در شکلهای (۴) تا (۱۱) توزیع سرعت مماسی جریان در مقاطع مختلف براساس روشهای RSM و $k-\epsilon$ به همراه نتایج آزمایشگاهی، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، روش RSM در تخمین سرعت مماسی جریان اطراف سیکلون در تمامی مقاطع، تطبیق بسیار خوبی را نشان می دهد، عدم تطابق ناچیز موجود در مقطع 0.72 در نواحی محیطی احتمالاً به علت نفوذ جریان راهگاز ورودی است. در مقاطع دیگر تا مقطع 0.41 با افت قدرت گردباد داخلی این تطابق بهتر می شود و در مقطع 0.59 به بعد که سرعت مماسی جریان افزایش یافته و جریان شتاب می گیرد دو مرتبه این تطابق کمتر می شود، بخصوص در مقطع 0.77 این موضوع نمایان تر است و مدل RSM نیز در این مقطع، بیشترین سرعت مماسی را با دقت تخمین نمیزند. این روند در سرعت مماسی مرکز سیکلون برعکس است، و هر جایی که بیشترین سرعت مماسی افزایش یافته مقادیر مربوط به مدل RSM به نتایج تجربی نزدیکتر شده است، به هر حال در مورد جریان هسته سیکلون به علت تشکیل گردابه ها و نوسانات سرعت موجود نمی توان بحث کرد. روش RNG با دقت کمتر این رفتار جریان را تخمین میزند، و همانطور که از توالی پروفیلهای سرعت مماسی در مقاطع مختلف پیدا است با پیشروی جریان در راستای محوری، این روش الگوی جریان را به صورت یک ورتکس اجباری تخمین زده است، و بیشترین حد سرعت مماسی به دیواره ها متمایل شده است. در شکلهای (۱۲) تا (۱۹) توزیع سرعت محوری جریان در مقاطع مختلف براساس روشهای RSM و $k-\epsilon$ به همراه نتایج آزمایشگاهی، نشان داده شده است. در روش RSM دقت تعیین سرعت محوری با پیشروی جریان و افزایش سرعت مماسی در ناحیه سیلندری سیکلون یعنی تا مقطع 0.66 کاهش می یابد، ولی با ورود جریان به ناحیه مخروطی دقت محاسبات در هسته جریان بهتر می شود. به هر حال روش RSM توزیع سرعت محوری را نیز تا حدود زیادی تخمین میزند، بخصوص در هسته مرکزی جریان که ساختار جریان بطور کامل سه بعدی بوده و همراه با ناهمسانگردی تنش ها می باشد، این روش قادر به پیش بینی جریان معکوس ایجاد شده در جریان است. این در حالی است که، مدل RNG

مرکزی جریان و استفاده از گسسته سازیهای درجه دو و بالاتر توصیه می شود. مدل تنشهای رینولدز با توجه به ناهمگنی موجود در تنش ها شاید یکی از بهترین گزینه ها در بررسی سیکلونها باشد.

مراجع:

- Smagorinsky, J., (1963). General experiments with the primitive circulation equation, I. The basic experiment, Month Wea Rev, 91: 99-164.
- Boysan, F., Ayers, W., and Swithenbank, J., (1982). Fundamental mathematical modelling approach to cyclone design. Trans. Inst. Chem. Eng., V 60, NO. 4, p. 222-230
- Boyson, F., Swithenbank, J. and Ayers, W. H., (1996). Mathematical modelling of gas particle flows in cyclone separators. Encyclopedia of Fluid Mechanics. Volume 4 - Solids and Gas Flows. Chapter 42, pp. 1307-1329 (Gulf Publication. ISBN 87201-516-5).
- Davidson, M. R., (1988). Numerical calculations of flow in a hydrocyclone operating with out an air core. Appl Math Modelling, 12: 119-128.
- Kim, J. and Lee, K., (1990). Experimental study of particle collection by small cyclones. Aerosol Sci. Technol, 12, p. 1003-1015.
- Gorton-Hulgerth, A. (1998). Messung und Berechnung der Geschwindigkeitsfelder und Partikelbannennim Gaszyklon. Phd-Thesis. Technical University Graz.
- Hoekstra, A., Derksen, J., and Akker, H. V. D., (1999). An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones. Chem. Eng. Science, 54, p. 2055-2065.
- Fredricson, C., (1999). Exploratory experimental and teoretical studies of cyclone gasification of wood powder. Phd-Thesis. Lulea Tekniska Universitet.
- J.O. Hinze. *Turbulence*. McGraw-Hill Publishing Co., New York, 1975.
- M.M. Gibson and B.E. Launder. Ground Effects on Pressure Fluctuations in the Atmospheric Boundary Layer. *J. Fluid Mech.*, 86: 491-511, 1978.

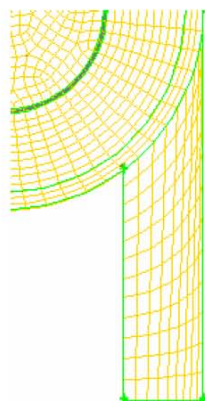
$k-\epsilon$ که بر اساس ساختار همگن جریان آشفته بنا نهاده شده است قادر به پیش بینی این جریان برگشتی نیست، و جریان درون سیکلون را از نوع V (حداکثر سرعت در هسته مرکزی) پیش بینی می کند. شاید بتوان دلیل این رفتار را در توزیع و چگونگی بررسی تنش ها در این دو مدل جستجو کرد. بر خلاف مدل RSM که هر یک از شش مؤلفه تنش رینولدز از معادلات انتقالی بدست می آیند، در مدل $k-\epsilon$ سه مؤلفه تنش عمودی با هم برابر بوده و $\frac{2}{3}$ انرژی جنبشی در نظر گرفته می شوند:

$$\overline{u'^2} = \overline{v'^2} = \overline{w'^2} = \frac{2k}{3} \quad (5)$$

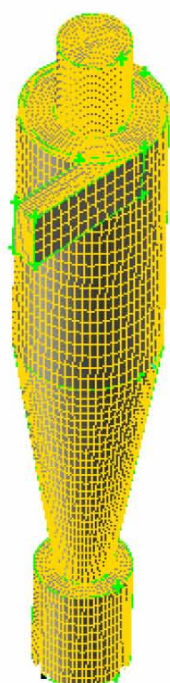
برای بررسی صحت این فرض ها شدت تنشهای رینولدز در شکل (۲۰)، در مقطع $r = 0.38m$ ، بطور نمونه به تصویر کشیده شده است. همانطور که در شکل مشخص است در نواحی اطراف لوله مرکزی، یعنی از شعاع $R = 0.05125$ تا بدنه سیکلون، که تخمین تنشهای عمودی با دقت معقولی در مدل $k-\epsilon$ تخمین زده شده است تطابق خوبی در نتایج دو مدل با نتایج آزمایشگاهی مشاهده می شود، اما در شعاع های داخل لوله مرکزی (vortex finder)، که مابین تنشهای رینولدز تخمینی در مدل RSM و آنچه که در مدل $k-\epsilon$ تخمین زده شده است اختلاف فاحشی وجود دارد، نتایج از هم فاصله گرفته و مدل $k-\epsilon$ قادر به پیش بینی الگوی جریان نیست.

جمع بندی:

همانطور که از نمودارها بر می آید مدل $k-\epsilon$ قادر به پیش بینی جریانهای با کرنش بالا، که ناهمگنی تنش ها در آنها نقش اساسی دارد نیست، بنابراین، این روش را می توان تنها برای بررسی جریانهای با سرعت کم یا جریانهایی که ناهمسانگردی زیادی در آنها وجود ندارد، مثل جریان اطراف لوله خروجی سیکلون بکار برد. الگوی جریان به شدت به ساختار مش بندی و گسسته سازیهای با درجه بالا، (هر چند در این مقاله نتایج نمایش داده نشده است اما، در طی تحلیل سیکلون، گسسته سازیهای درجه یک قادر به تخمین صحیح الگوهای جریان نبود)، وابسته است. بنابراین در بررسی چنین مواردی استفاده از الگوهای غیر ساختاری بخصوص در هسته



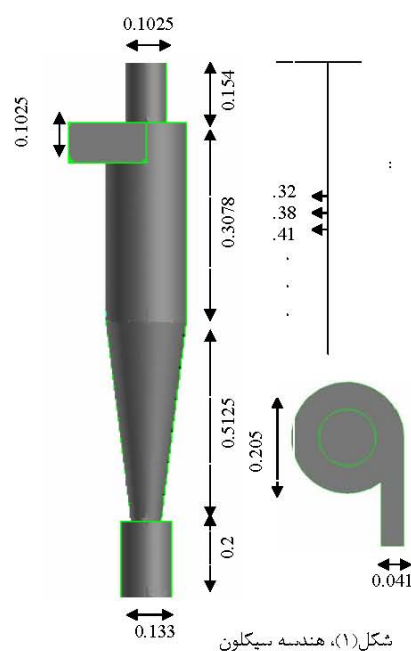
شکل (۲)، نمایی از بالای سیکلون



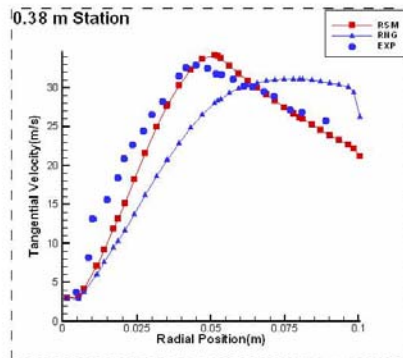
شکل (۳)، نمونه ای از هندسه مش بندی شده

11. B. E. Launder. Second-Moment Closure :Present... and Future? *Inter. J. Heat Fluid Flow*, 10(4):282{300, 1989.
12. B.E.Launder, G. J. Reece, and W. Rodi. Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure. *J. Fluid Mech.*, 68(3):537{566, April 1975.
13. Slack, M., Boysan, F., Prasad, R., and Bakker, A.(2000). Advances in cyclone modelling using unstructured grids. *Trans .I.Chem.E.*, 78 Part A. p.1098-1104.

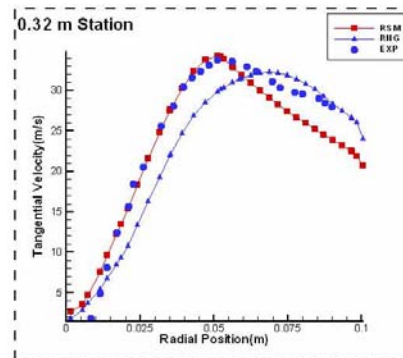
شکل ها و نمودارها:



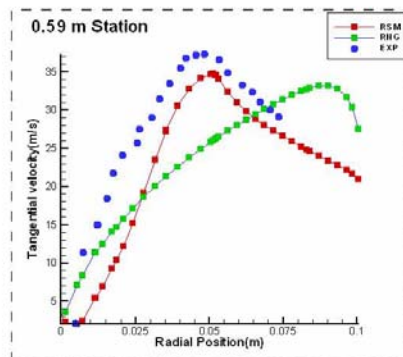
شکل (۱)، هندسه سیکلون



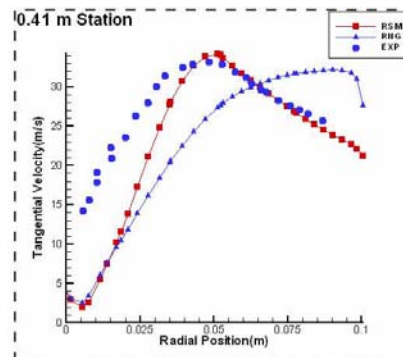
شکل (۵)، سرعت‌های مماسی در مقطع ۰/۳۸ متر



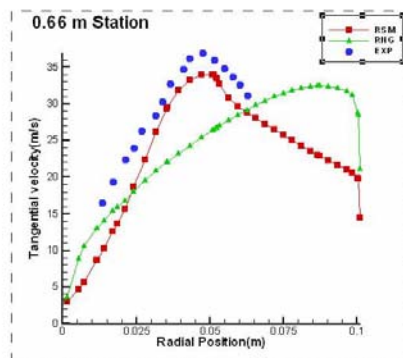
شکل (۴)، سرعت‌های مماسی در مقطع ۰/۳۲ متر



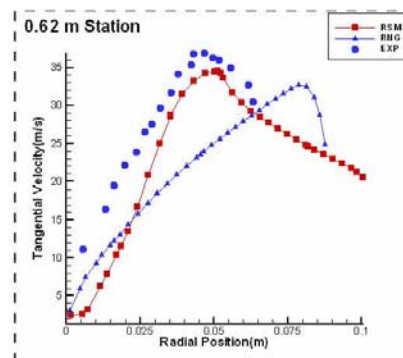
شکل (۷)، سرعت‌های مماسی در مقطع ۰/۵۹ متر



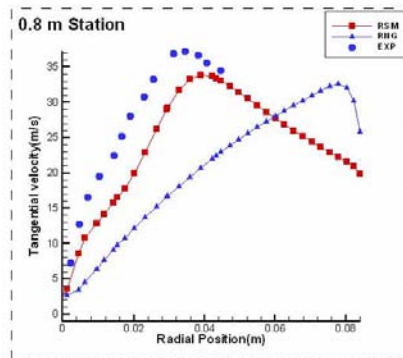
شکل (۶)، سرعت‌های مماسی در مقطع ۰/۴۱ متر



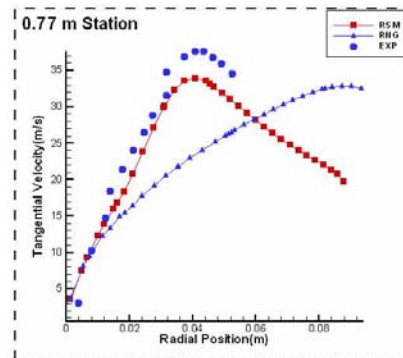
شکل (۹)، سرعت‌های مماسی در مقطع ۰/۶۶ متر



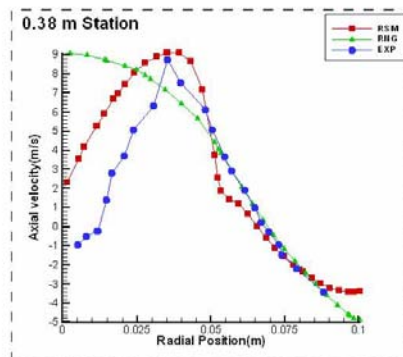
شکل (۸)، سرعت‌های مماسی در مقطع ۰/۶۲ متر



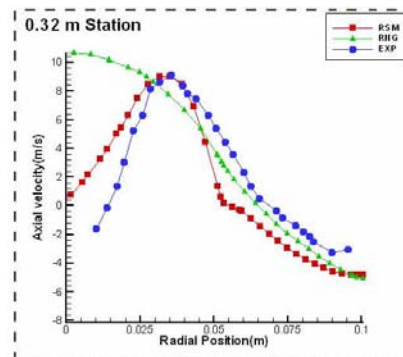
شکل (۱۱)، سرعت‌های مماسی در مقطع ۰/۸ متر



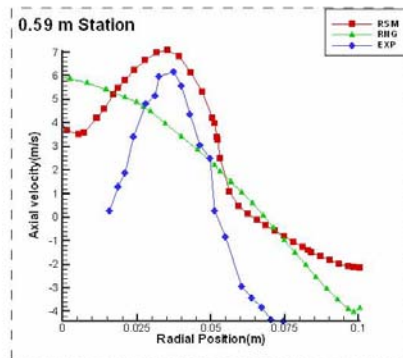
شکل (۱۰)، سرعت‌های مماسی در مقطع ۰/۷۷ متر



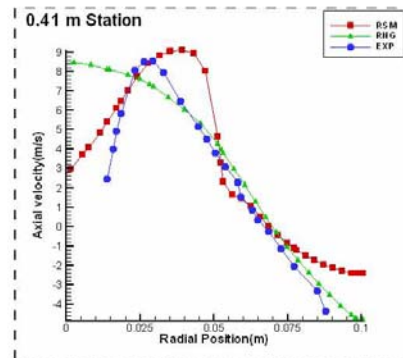
شکل (۱۳)، سرعت‌های محوری در مقطع ۰/۳۸ متر



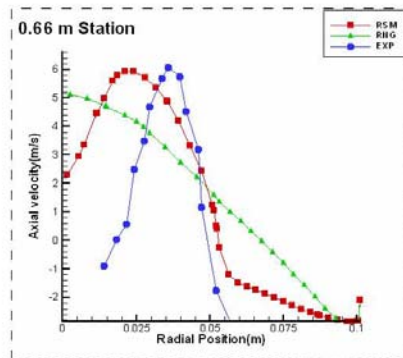
شکل (۱۲)، سرعت‌های محوری در مقطع ۰/۳۲ متر



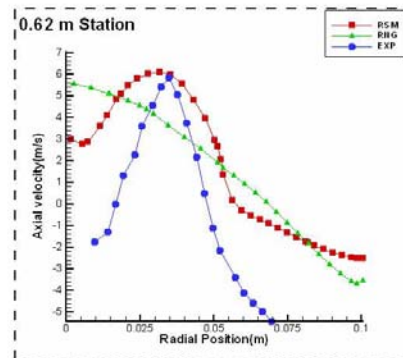
شکل (۱۵)، سرعت‌های محوری در مقطع ۰/۵۹ متر



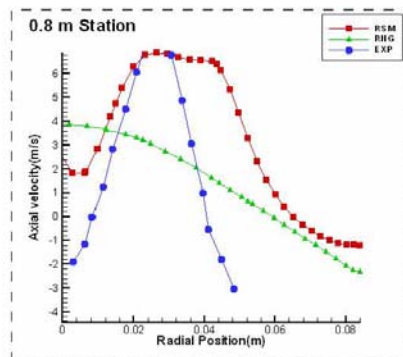
شکل (۱۴)، سرعت‌های محوری در مقطع ۰/۴۱ متر



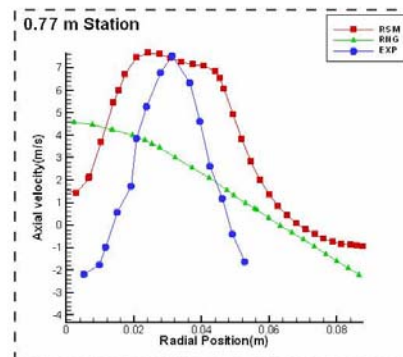
شکل (۱۷)، سرعت‌های محوری در مقطع ۰/۶۶ متر



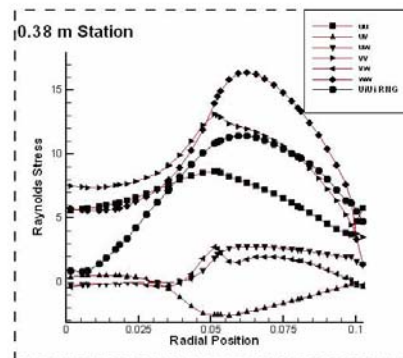
شکل (۱۶)، سرعت‌های محوری در مقطع ۰/۶۲ متر



شکل (۱۹)، سرعت‌های محوری در مقطع ۰/۷۷ متر



شکل (۱۸)، سرعت‌های محوری در مقطع ۰/۷۷ متر



شکل (۲۰)، تنش‌های رینولدز در مقطع ۰/۳۸ متر