

علمی- پژوهشی

ارائه و بررسی روش‌های کاربردی جهت بهبود تولید شبکه در

شبیه‌سازی موتورهای احتراق داخلی با کد کیوا

مالک قیومی^۲مرکز تحقیقات پیشران‌نهاب
دانشگاه جامع امام حسین(ع)محمد مهدی دوستدار^۱گروه مهندسی هوافضا
دانشگاه جامع امام حسین(ع)

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶)

چکیده

در این پژوهش به مشکل شبکه‌سازی در تحلیل دینامیک سیالات عددی برای موتورهای احتراق داخلی پرداخته شده است. تولید شبکه برای موتورهای احتراق داخلی خصوصاً برای کد متن‌باز KIVA که یکی از رایج‌ترین حلگرها در زمینه‌ی شبیه‌سازی موتور و احتراق می‌باشد، بسیار مشکل و زمان‌بر است. در این نوشتار روشی سریع و بهینه برای شبکه‌بندی کامل محفظه احتراق با تمام جزئیات به همراه سوپاپ‌ها و متناسب با کد KIVA-3V با استفاده از نرم‌افزار ANSYS ICEM CFD معرفی شده است. در این روش، تولید شبکه و متحرک‌سازی آن در ANSYS ICEM CFD و KIVA بررسی شده است و مهم‌ترین مشکلات در رابطه با شبکه‌ی تولیدی شناسایی و راه‌های رفع آن ارائه شده است. علاوه بر این، خطاها و نواقص نرم‌افزاری نیز شرح داده شده‌اند. روند تولید شبکه‌ی پیشنهادی در این نوشتار به گونه‌ای است که علاوه بر رفع بسیاری از مشکلات تولید شبکه، زمان اختصاص داده شده به فرآیند تولید شبکه به حداقل ممکن کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است این روش عمومی بوده و برای هندسه‌های مختلف غیر موتوری نیز قابل استفاده است.

واژه‌های کلیدی: دینامیک سیالات محاسباتی، موتورهای احتراق داخلی، تولید شبکه، متحرک‌سازی

An Investigation of Applied Techniques to Improve Grid Generation in ICEs Simulations by KIVA

Doustdar, M. M.

Aerospace Engineering Group
Imam Hossein University

Ghayoumi, M.

Nahab Propulsion Research Center
Imam Hossein University

(Received: 19/February/2022; Accepted: 07/March/2022)

ABSTRACT

In this investigation, grid generation difficulties in CFD analysis of internal combustion engines (ICEs) have been studied. Grid generation is primitive, extremely complicated and time consuming task in ICEs simulations. The KIVA open source code is one of the most popular CFD solvers in ICEs simulations. Grid generation for this solver is the most complex and difficult task. In the present work a methodology has been developed for rapid grid preparation in KIVA-3V code by using commercial grid generator, ANSYS ICEM CFD. In this methodology, all geometry details of ICEs, including valves and intake/exhaust ports, are taken into account. In this paper, the focus is not on modifying the KIVA code original mesh generator, however, the most popular grid generation and dynamic mesh management errors and some bugs in ICEM CFD and KIVA have been inspected and explained. By using the procedure described here, many of grid generation difficulties will be eliminated and grid generation time will be greatly reduced. It should be noted that many of features in this paper are general and can be used for geometries other than ICEs.

Keywords: Numerical Simulation, ICEs, Grid Generation, Dynamic Mesh

۱- استاد (نویسنده پاسخگو): mdostdar@ihu.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد: mghayoumi@ihu.ac.ir

۱- مقدمه

استفاده در زمینه‌ی احتراق است که از سوی آزمایشگاه ملی لوس آلاموس^۲ و به صورت متن باز^۳ ارائه می‌شود. نسخه‌ی اولیه‌ی این کد در سال ۱۹۸۵ ارائه شد و تاکنون نتایج کار بسیاری از محققین را در خود جای داده است. به دلیل توانایی بالای این کد در شبیه‌سازی جریان سیال، از آن برای انواع مختلف جریان‌های تک فازی و چندفازی، آرام و آشفته، مافوق صوت و مادون صوت و نیز در انواع مختلف موتورهای احتراق داخلی استفاده می‌شود.

تاکنون پژوهش‌های بسیاری با استفاده از کیوا انجام شده است که شمار آن‌ها در گنجایش این نوشتار نیست. در کارهای انجام شده پیرامون شبیه‌سازی موتورهای احتراق داخلی، تولید شبکه یکی از چالش‌های اصلی به کارگیری کد کیوا است، به گونه‌ای که همین موضوع باعث کاهش محبوبیت آن شده است [۴].

در بسته کیوا فرآیند تولید شبکه به کمک تخصیص اعداد و با استفاده از فرمت‌های نوشتاری انجام می‌شود. این کار خصوصاً برای هندسه‌های پیچیده دقت و زمان زیادی را می‌طلبد. علاوه بر این امکان بروز اشتباه و نیاز به اصلاحات بسیار نیز وجود دارد. استفاده از برنامه تولید شبکه آیس‌م^۴ در ایجاد شبکه‌ی مورد نیاز کیوا علاوه بر افزایش دقت شبکه و دقت حل عددی، صرفه‌جویی زیادی نیز در زمان و هزینه به دنبال خواهد داشت.

با وجود مزایای بسیار تولید شبکه به کمک آیس‌م، هنوز مشکلات زیادی برای شبکه‌سازی کیوا وجود دارد و به ادعان بسیاری از محققین، بخش زیادی از زمان شبیه‌سازی و تحلیل را به خود اختصاص می‌دهد؛ بنابراین یافتن راه حلی مناسب برای این مشکل دغدغه‌ی بسیاری از کاربران کیوا است و پژوهش‌های مختلفی در این زمینه انجام شده است. تیانپن و همکاران [۵] فرآیند جدیدی را برای تولید شبکه با کد K3PREP در مراحل جداگانه برای محفظه احتراق و سپس درگاه‌های ورود و خروج ایجاد کرده‌اند. نیشاد [۶] استراتژی جدیدی را برای تولید شبکه در آیس‌م ارائه کرده است که در آن ابتدا اجزاء و صفحات هندسه شبکه‌بندی

قلب یک موتور محفظه احتراق آن است و تحقیق و پژوهش‌های بسیاری که در زمینه‌ی موتور در سال‌های متمادی انجام شده است، بازتاب غنی بودن فرآیند احتراق است که هنوز هم فرصت‌های بسیاری برای تحقیق و پژوهش فراهم می‌کند [۱]. کارایی موتورهای احتراق داخلی تابع پیچیده‌ای از علوم مختلف بوده و اجزاء موتور نیز ارتباط تنگاتنگی دارند و از این رو تحقیق و توسعه در این زمینه کاری پیچیده است که در همه‌ی ابعاد آن از عهده‌ی روش‌های تجربی بر نمی‌آید.

وجود مدل‌های مختلف شبیه‌سازی و همچنین کدهای عددی پیشرفته و کامپیوترهای سریع باعث شده است روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی کاربرد وسیعی پیدا کرده و در بسیاری موارد راهگشای تحقیقات و تحلیل‌های مهندسی باشند. روش‌های عددی غالباً نیازمند صرف هزینه و زمان کمتری نسبت به روش‌های تجربی هستند و درعین حال اطلاعات بیشتر و جزئی‌تری را در اختیار محققین قرار می‌دهند. با این وجود به دنبال پیچیدگی موتور و محفظه احتراق، حل عددی نیز در این زمینه دشواری زیادی دارد.

یکی از چالش‌های اصلی به کارگیری دینامیک سیالات محاسباتی در شبیه‌سازی موتورهای احتراق داخلی، بحث تولید شبکه برای این موتورهاست. مشکلات تولید شبکه برای موتورهای احتراق داخلی از دو جهت نشأت می‌گیرد: اول پیچیدگی هندسه و دوم متحرک بودن آن. پیچیدگی هندسه باعث می‌شود تولید شبکه‌ی اولیه دشوار شود و متحرک بودن قسمت‌های مختلف نیز شبکه بندی مجدد و اصلاح شبکه را می‌طلبد [۲]. متأسفانه از دیدگاه فناوری، تولید شبکه هنوز به همان میزان که کاری علمی است، کاری هنری نیز هست. با اینکه ریاضیات سعی می‌کند، تولید شبکه را به فرآیندی خودکار و بدون دخالت کاربر تبدیل کند اما تولید شبکه هنوز هم فرآیندی است علمی و هنری که به سلیقه و خواست کاربر وابسته است [۳].

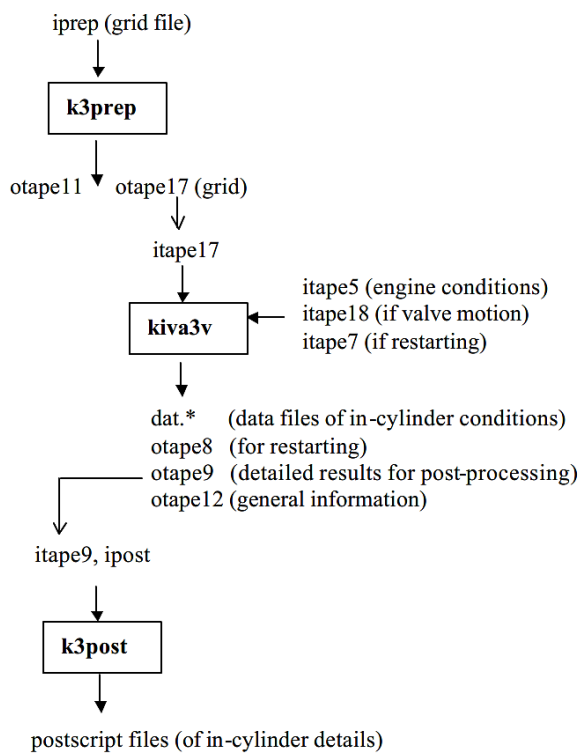
در میان کدها و نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی، کد کیوا^۱ یکی از رایج‌ترین ابزارهای مورد

² Los Alamos National Laboratory

³ Open Source

⁴ ANSYS ICEM CFD

¹ KIVA



شکل (۱): فرآیند کلی اجرای کد کیوا [۱۱]

پروژه حل فاز گازی در کیوا با نام ALE^2 و بر اساس روش حجم محدود است. در این روش که مفاهیم اولیه آن توسط هیرت و همکارانش [۱۲] و همچنین پراچت [۱۳] برای حل مسائل شامل مرزهای متحرک ایجاد شده است، موقعیت گره‌ها^۲ می‌تواند به صورت تابعی از زمان متغیر باشد و به همین دلیل امکان توصیف لاگرانژی و یا اویلری فراهم می‌شود. در روش ALE هر سیکل یا گام زمانی به دو فاز لاگرانژی و فاز بازچینش^۴ قابل تقسیم است. در فاز لاگرانژی، نقاط با سرعت سیال حرکت می‌کنند و در فاز بازچینش جریان سیال منجمد فرض می‌شود و نقاط به موقعیت جدیدی که برایشان تعریف می‌شود حرکت می‌کنند و سپس جریان بر روی شبکه‌ی محاسباتی جدید، نگاشته می‌شود. در این حالت شبکه می‌تواند دارای مرزهای منحنی و متحرک باشد.

۳- تولید شبکه در آیسیم

نرم‌افزار تولید شبکه آیسیم در سال ۱۹۹۰ شکل گرفت و در سال ۲۰۰۰ توسط شرکت انسیس خریداری شد [۱۴].

می‌شوند و سپس شبکه به سایر نواحی بسط داده می‌شود. جیانون [۲] روش تجزیه‌ی هندسه^۱ را برای تسریع فرآیند شبکه‌بندی در کیوا پیشنهاد داده است که بر اساس آن نواحی دارای هندسه‌ی پیچیده و بدون حرکت مانند سرسیلندر از سایر نواحی جدا شده و جداگانه بازبینی می‌شوند. همچنین لیو و همکارانش [۷] برای تسریع فرآیند شبکه‌بندی کیوا، شبیه آنچه جیانون انجام داده بود، شبکه را در دو فاز جداگانه بررسی کرده‌اند که در فاز متحرک، نوع اتصال سلول‌ها و برخی زیربرنامه‌های کیوا را تغییر داده‌اند.

پژوهش‌های انجام شده پیرامون شبکه‌بندی کیوا اغلب عمومی نبوده و تنها برای هندسه‌های خاص کاربرد دارند. همچنین بسیاری از این روش‌ها با دستکاری زیادی در کد کیوا عملی می‌شوند که احتمال بروز خطا و همچنین پیچیدگی حل عددی را افزایش می‌دهند. در این مقاله روشی سریع و بهینه برای شبکه‌بندی کامل محفظه احتراق با تمام جزئیات به همراه سوپاپ‌ها و متناسب با کد کیوا-۳ معرفی شده است که با کمترین دستکاری در کد عملی می‌شود. همچنین مشکلات و خطاهای مرسوم و منابع خطا در تطبیق شبکه‌ی تولیدی برای کیوا بررسی شده است.

۲- شبکه محاسباتی در کد کیوا

در نسخه سوم کیوا به بعد (از سال ۱۹۹۳) بحث تولید شبکه و توانایی برنامه در شبیه‌سازی هندسه‌های پیچیده یکی از مسائل مهم و مورد توجه در ارتقاء برنامه بوده است [۸] و در نسخه کیوا-۳ (۱۹۹۷) امکان شبیه‌سازی سوپاپ‌ها در آن ارتقاء داده شده است [۹].

فرآیند اجرای کد کیوا به اختصار در نمودار شکل ۱ آمده است. در بسته‌ی کیوا، کدی با نام K3PREP وظیفه‌ی تولید شبکه را برعهده دارد که در آن همه‌ی جزئیات هندسه و شبکه در فرمت‌های نوشتاری فراخوانی می‌شود. جزئیات اجرای کد کیوا در مراجع [۸-۱۰] به تفصیل شرح داده شده است.

² Arbitrary-Lagrangian-Eulerian Method

³ Nodes

⁴ Rezone

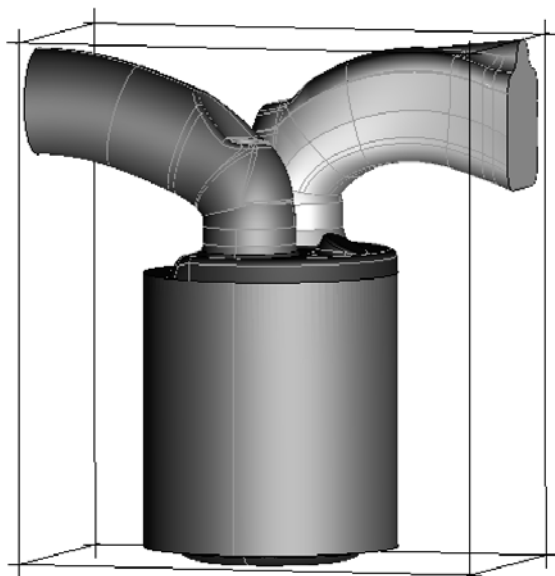
¹ Geometry Decomposition

۴- تولید شبکه آیسِم برای کیوا-۳

روش‌های بسیاری برای تولید شبکه در آیسِم وجود دارد که تنها برخی از آن‌ها را می‌توان در تولید شبکه برای کیوا استفاده نمود. هنگام به‌کارگیری بسیاری از روش‌های غیرمجاز در آیسِم، رابط کاربری هنگام تولید فایل خروجی برای کیوا خطاری نشان نمی‌دهد و در هنگام اجرای کیوا ممکن است خطایی نشان داده شود که مستقیماً به شبکه اشاره نداشته باشد.

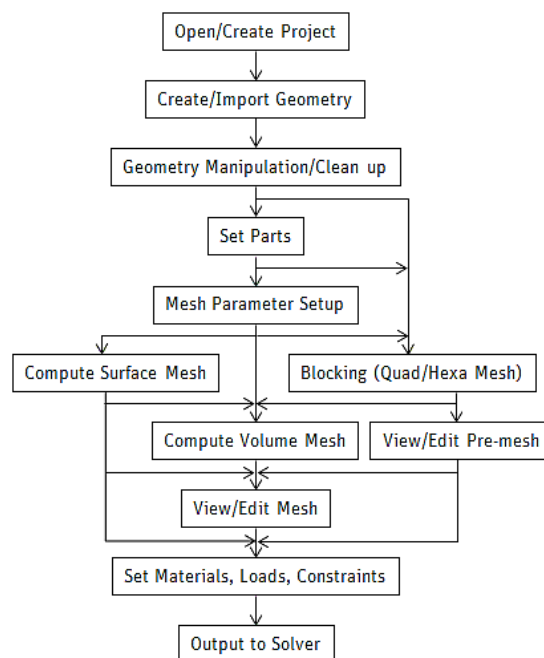
در برنامه‌ی آیسِم، نوع شبکه‌ی تولیدی برای کیوا باید از نوع Block-Structured باشد. بدین منظور در بخش بلوک‌بندی برنامه آیسِم، مطابق فرآیند بالا به پایین که در بخش قبل اشاره شد، یک بلوک سه بعدی در اطراف هندسه به‌گونه‌ای که تمام حجم هندسه را در برگیرد، مطابق شکل ۳ ایجاد می‌شود. سپس باید بلوک ایجاد شده را به بلوک‌های کوچک‌تر تقسیم کرد. این کار در گوشه‌ها، قسمت‌های مختلف هندسه و همچنین در مکان‌هایی که بلوک‌ها در دسته‌ی خاصی متناسب با تنظیمات کیوا قرار می‌گیرند، انجام می‌شود. برای نمونه لازم است در مقاطع ۱ تا ۶ در شکل ۴ بلوک‌ها برش داده شوند.

پس از ایجاد و تقسیم‌بندی بلوک‌ها و همچنین حذف بلوک‌های زائد، می‌بایست نقاط، خطوط و در صورت لزوم صفحات بلوک‌ها به هندسه تصویر شوند؛ به‌عبارت‌دیگر با این کار مشخص می‌شود که هر خط و سطح بلوک به کدام قسمت هندسه اختصاص دارد.



شکل (۳): بلوک‌بندی اولیه هندسه (موتور XU7)

فرآیند تولید شبکه در برنامه آیسِم طی مراحل نمودار شکل ۲ عملی می‌شود. این نرم‌افزار توانایی تولید شبکه‌ی باسازمان - بلوک‌های را دارد.



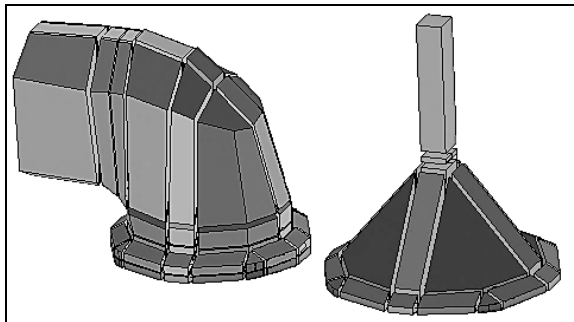
شکل (۲): فرآیند تولید شبکه در آیسِم [۱۵]

ویژگی بلوک‌بندی در آیسِم، محیط تولید شبکه‌ی تجسمی را ارائه می‌کند و هنگامی که شبکه‌ای شش‌وجهی با سازمان (ویا چهارگوش در دوبعد) هدف تولید شبکه باشد، می‌توان از این محیط بهره گرفت. در این محیط سطوح، خطوط و نقاط بلوک‌ها به سطوح، خطوط و نقاط هندسه مرتبط می‌شوند و شبکه‌ی نهایی به کمک بلوک‌های ایجاد شده تولید می‌شود.

فرآیند بلوک‌بندی در آیسِم با دو استراتژی قابل پیاده‌سازی است. مسیر از بالا به پایین^۱ که در آن ابتدا بخش‌های بیرونی هندسه بلوک‌بندی می‌شود. سپس بلوک ایجاد شده، به بلوک‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شود و با حذف و یا اتصال قسمت‌های مختلف بلوک‌ها، جزئیات هندسه و بخش‌های درونی، بلوک‌بندی می‌شوند. مسیر دیگر از پایین به بالا است که در آن فرآیند بلوک‌بندی از یک بلوک دوبعدی شروع شده و سپس بلوک‌های دیگری به آن اضافه می‌شود. با بسط بلوک‌های ایجاد شده، بلوک‌ها سه بعدی می‌شوند و اصلاحات لازم روی آن‌ها صورت می‌گیرد.

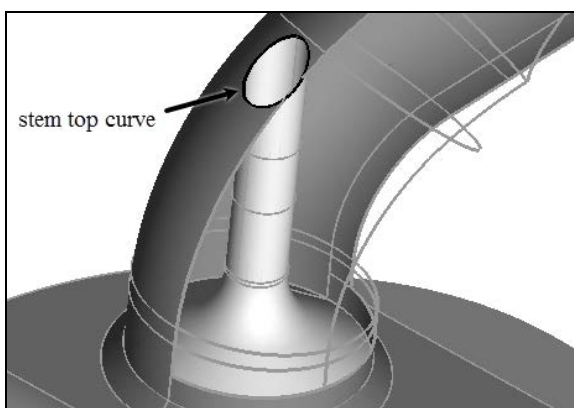
¹ Top-Down Approach

بلوک‌های تفکیک شده برای مجرا و سوپاپ ورودی را نشان می‌دهد.



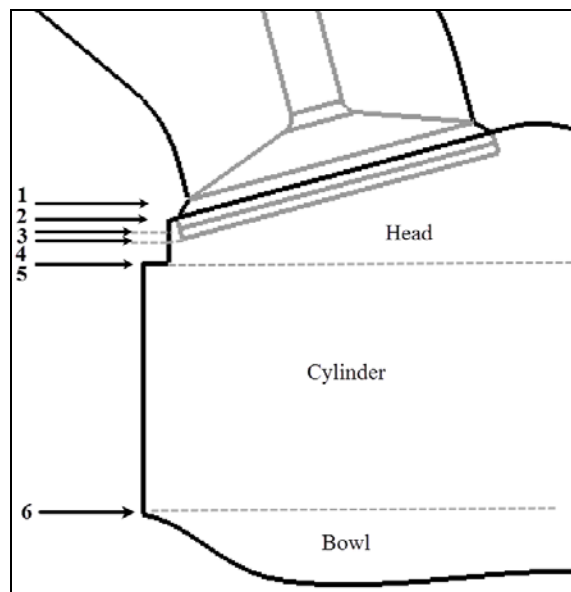
شکل (۶): بلوک‌های سوپاپ و مجرای ورودی

تصویر و تخصیص نادرست خطوط بلوک‌ها به خطوط هندسه از مشکلات رایج در برنامه‌ی آپسیم است و باعث تجمع شبکه در مکان‌های خاص و ایجاد سلول‌هایی با حجم منفی می‌شود. در گوشه‌ها و سطوح پیچیده می‌توان از تخصیص نقاط و سطوح نیز کمک گرفت. خطوط مشترک بین نواحی سلولی و یا شرایط مرزی متفاوت می‌تواند جزء هرکدام از طرفین قرار بگیرد. برای نمونه، خط قطع‌کننده میله سوپاپ^۱ در درگاه ورودی نشان داده شده در شکل ۷ می‌تواند شرط مرزی مرتبط با میله سوپاپ و یا شرط مرزی مربوط به درگاه ورودی را بگیرد.



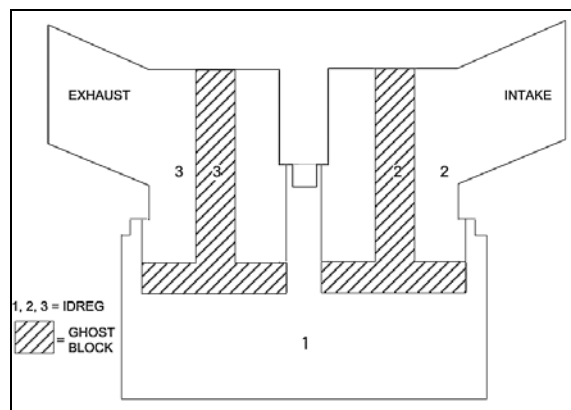
شکل (۷): خط مشترک بین میله سوپاپ و درگاه ورودی

جهت دستگاه مختصات محلی همه‌ی بلوک‌ها (ijk- directions) باید یکسان باشد. این دستگاه در فرآیند اتصال



شکل (۴): مکان‌های پیشنهادی برای برش بلوک اولیه

برای تفکیک قسمت‌های داخلی شبکه، لازم است علاوه بر هندسه، بلوک‌های ایجاد شده نیز بر اساس آنچه در دستورالعمل کیوا برای کد K3PREP مشخص شده است، دسته‌بندی و نام‌گذاری شوند. برای نمونه تخصیص پارامتر IDREG برای نواحی فیزیکی مختلف حل در هندسه محفظه احتراق یک موتور پیستونی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل (۵): سه ناحیه‌ی فیزیکی در هندسه‌ی محفظه

احتراق همراه با سوپاپ‌ها در کیوا [۹]

بر این اساس برای یک موتور پیستونی بلوک‌های تشکیل‌دهنده‌ی سیلندر، سوپاپ و مجرای ورودی و خروجی هرکدام در یک Part قرار می‌گیرند. شکل ۶ نمونه‌ای از

^۱ Stem

وارونگی سلول، حجم منفی ایجاد می‌شود و ادامه‌ی حل امکان‌پذیر نخواهد بود. برخی از دلایل وقوع این خطا عبارت‌اند از: یکسان نبودن مختصات محلی بلوک‌ها و دسته‌بندی نادرست بلوک‌ها یا سطوح هندسه در هر Part؛ همچنین هنگامی که شبکه بسیار ریز شده باشد و در عین حال گام زمانی بزرگ انتخاب شده باشد نیز این خطا رخ می‌دهد.

۵-۳- خطاهای مربوط به شرایط مرزی

باید توجه داشت که تنها منبع این خطا تعریف نادرست شرایط مرزی توسط کاربر نیست، بلکه در صورت رعایت نکردن برخی نکات مربوط به شبکه‌بندی نیز این خطا بروز پیدا می‌کند.

برای مثال گاهی یک سلول به عنوان سیال تعریف شده اما یکی از ۸ گره آن به عنوان گره غیر فعال ($FV=0.0$) تعریف شده است. تعریف نکردن دیوار اشتراکی و یکسان نبودن جهات مختصات محلی بلوک‌ها از عوامل بروز این خطا در حیطه‌ی شبکه‌بندی در آیسیم هستند.

۶-۶- خطاهای نرم‌افزاری

خطاهای نرم‌افزاری^۲ در بسیاری از نرم‌افزارهای تجاری و متن‌باز وجود دارند که گاهی عدم آشنایی با این خطاها باعث سردرگمی پژوهشگران و بدست آمدن نتایج متفاوت در اجراهای مختلف می‌شود. در این قسمت مهم‌ترین خطاهای نرم‌افزاری مربوط به شبکه‌بندی در برنامه‌های آیسیم و کیوا ارائه می‌شود.

۶-۱- اشکال در برنامه آیسیم

مبدل برنامه‌ی آیسیم برای کیوا علامت مشخصه F سلول‌های درون سوپاپ‌ها را به درستی تخصیص نمی‌دهد. این سلول‌ها مربوط به قسمت جامد هستند و باید پارامتر F آن‌ها و پارامتر FV گره‌هایی از آن‌ها که به سمت بخش جامد است، صفر باشد. حال آنکه در آیسیم پارامتر F این سلول‌ها صفر اما FV آن‌ها غیرصفر داده می‌شود و این موضوع منبع بروز خطایی است که در ادامه شرح داده می‌شود.

بلوک‌ها و همچنین در تعریف شرایط مرزی اختصاص داده شده به هر قسمت مؤثر است.

در برنامه آیسیم برای ایجاد شبکه‌ی کیوا-3وی نمی‌توان از O-Grid استفاده کرد. توجه شود که هنگام ایجاد بلوک جدید با کمک بلوک‌های موجود نیز این وضعیت پدیدار می‌شود. لازم به ذکر است در صورت استفاده از O-Grid تنظیم جهت دستگاه مختصات محلی روی برخی از بلوک‌ها به صورت دلخواه امکان‌پذیر نخواهد بود.

۵-۵- خطاهای متداول

در این بخش برخی از خطاها به همراه شیوه‌های برطرف نمودن آن بررسی شده است.

۵-۱- هشدار non-convex

هشدار non-convexity شایع و شناخته‌شده در کیوا است. زیربرنامه‌ای برای بررسی این خطا در کیوا با نام convex وجود دارد که کار اصلی آن بررسی سلول‌ها برای وجود برآمدگی است اما این هشدار برای شبکه‌های تولیدی توسط آیسیم در اثر تغییرات بسیار جزئی در مختصات نقاط سلول‌ها نیز رخ می‌دهد. استفاده از گزینه‌ی Align Vertices و Link-Edges در آیسیم و هم‌راستا بودن نقاط سلول‌ها باعث کاهش بروز این هشدار می‌شود.

این هشدار در گره‌های مربوط به محور نیز اتفاق می‌افتد و دلیل آن این است که مختصات x و y نقاط محور باید دقیقاً صفر 0.00000000 باشند در حالی که آیسیم این نقاط را مثلاً به صورت 0.00000001 ایجاد می‌کند و این موضوع باعث بروز هشدار non-convex cell در کیوا می‌شود. برای رفع این هشدار در گره‌های مربوط به محور می‌توان زیربرنامه‌ای به کیوا اضافه کرد تا مختصات این نقاط را اصلاح کند.

۵-۲- خطای cell inversion

این خطا معمولاً در اثر واژگونی سلول‌ها در فرآیند متحرک-سازی رخ می‌دهد. این واژگونی ممکن است در اثر کشیده-شدن تنها یک گوشه‌ی سلول رخ دهد که در نتیجه با

^۱ نوعی شبکه در آیسیم است که بلوک‌ها در آن بصورت دایره‌های تودرتو مکان‌یابی می‌شوند.

در فرآیند متحرک‌سازی، لازم است شبکه در هر گام زمانی بروزرسانی شود تا از واژگونی و تغییر شکل بیش از حد سلول‌های شبکه جلوگیری شود. روش‌های متنوعی در نرم-افزارهای گوناگون CFD برای بروزرسانی شبکه استفاده می‌شود. روش‌های فنری، روش‌های شبکه‌سازی مجدد و روش‌های لایه‌ای مرسوم‌ترین آن‌ها هستند. در کیوا برای بروزرسانی شبکه از روش لایه‌ای استفاده می‌شود. در این روش سلول‌های محاسباتی با توجه به موقعیت قرارگیری‌شان به لایه‌های مختلف تقسیم می‌شوند. با حرکت مرزهای شبکه، در صورت فشرده شدن و یا کشیده شدن بیش از حد لایه‌های سلولی، با استفاده از روش‌های متنوع، مکان جدیدی برای نقاط موجود در هر لایه تعریف می‌شود. کد محاسباتی کیوا-3وی از پارامتری به نام zsquish برای تقسیم‌بندی لایه‌های مختلف سلولی حجم سیلندر استفاده می‌کند و برای مختصات جدید هر گره، میانگین‌گیری ساده‌ای میان مختصات گره‌های اطراف آن انجام می‌دهد. در مکان‌هایی که سطوح مختلف هندسه نزدیک یکدیگرند، در اغلب موارد این میانگین‌گیری درست عمل نمی‌کند و باعث کشیدگی یا واژگونی سلول‌ها می‌شود. این مشکل در سطح پیستون و کف سوپاپ‌ها در نقطه مرگ بالا و نیز در حرکت سوپاپ‌ها در کنار یکدیگر و یا هنگامی که مسیر یکدیگر را قطع می‌کنند، ممکن است روی دهد. برای حل این مشکل می‌توان روش ساده‌ی میانگین‌گیری کیوا را ارتقا داد و تعداد نقاط بیشتری را درگیر تعریف مکان جدید کرد.

۷- نتیجه‌گیری

پیچیده بودن و متحرک بودن هندسه در موتورهای احتراق داخلی باعث بروز مشکلات فراوان در به‌کارگیری کد کیوا است. هدف اصلی در این مقاله بیان روشی بهینه در نرم‌افزار آیسیم برای تولید شبکه‌ی باکیفیت برای نرم‌افزار کیوا بود. پس از بیان مفاهیم تولید شبکه در نرم‌افزارهای کیوا و آیسیم، روش مورد نظر معرفی گردید و تجربه‌های به‌دست‌آمده از اجرای چندین باره‌ی نویسندگان برای هندسه‌های مختلف، ارائه شد. در این روش می‌توان تمام جزئیات موتور از جمله درگاه‌های ورود و خروج و سوپاپ‌ها را نیز مدل‌سازی کرد. روش معرفی شده در کار حاضر، نوعی روش شبکه‌بندی از بالا به پایین است که به‌راحتی برای هندسه‌های پیچیده قابل پیاده‌سازی است. به‌کارگیری این

در کیوا، 1/8 جرم هر سلول به یک گره اختصاص می‌یابد^۱ و این مقدار برای سلول‌های غیر فعال صفر است. در این کد مقادیر جرم هر گره و نوع آن بررسی می‌شود و در صورتی که سلولی فعال اما جرم آن صفر باشد خطایی در خروجی نمایش داده می‌شود. برای رفع این خطا روش‌های مختلفی وجود دارد، اما بهترین روش ایجاد برنامه‌ای مجزا و یا حلقه-ای جداگانه در برنامه کیوا است که برای سلول‌های شرح داده شده پارامتر FV را صفر قرار دهد.

۶-۲- اشکال در کد کیوا

کد کیوا اصلاحاتی را بر روی سلول‌های دیواره‌ی سیلندر^۲ انجام می‌دهد؛ اما برای هندسه‌های دارای سرسیلندر برآمده در شناسایی سلول‌های دیواره و سرسیلندر دچار اشتباه می‌شود و برخی از سلول‌های سرسیلندر را نیز در تغییرات دیواره دخالت می‌دهد.

کیوا برای تشخیص گره‌های دیواره‌ی سیلندر از پارامتر cyledge در زیربرنامه setup استفاده می‌کند که مقدار آن برای گره‌های روی دیواره 1.0 و برای سایر گره‌ها 0.0 است. برای رفع این مشکل می‌بایست مقدار دهی این پارامتر در برنامه اصلاح شود.

در برنامه‌ی کیوا، زیربرنامه‌هایی با نام^۳ Snapper وجود دارند که با بالا یا پایین رفتن بخش‌های متحرک هندسه، وظیفه‌ی حذف و یا ایجاد لایه‌های سلولی را دارند. در هندسه‌های پیچیده، خصوصاً در مواردی که سوپاپ‌ها زاویه-ی انحراف زیادی دارند، برای جلوگیری از واژگونی سلول‌ها، از زیربرنامه‌های^۴ Rezoner استفاده می‌شود. در کیوا بدین منظور از روش بازچینش استفاده می‌شود که توسط رندی هسل ایجاد شده است [۱۶]. همچنین موسو و همکارانش این مفهوم را توسعه داده‌اند [۱۷]. شیوه‌های جدید پیاده‌سازی این روش در نوشته‌های هسل خصوصاً در مرجع [۱۸] که روش عمومی‌تری است، ارائه شده است.

^۱ Vertex Mass

^۲ Cylinder Liner

^۳ شامل زیربرنامه‌های snapvtop و snapb, snapt, snapvfce می‌شود.

^۴ برای KIVA-3V چهار نوع هندسه‌ی موتور پیش‌بینی شده است که زیربرنامه‌های Rezcomb و Rezone, Rezwedge, Rezpent را شامل می‌شود.

- Geometries”, Los Alamos National Laboratory Report, 1993.
9. Amsden, A.A. “KIVA-3V: A Block-Structured KIVA Program for Engines with Vertical or Canted Valves”, Los Alamos National Laboratory Report, 1997.
 10. Amsden, A.A., O'Rourke, P.J., and Butler, T.D. “KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays”, Los Alamos National Laboratory Report, 1989.
 11. Kong, S.-C. “How to Run KIVA-3V”, ERC-University of Wisconsin-Madison, pp. 1-2, 2001.
 12. Hirt, C., Amsden, A.A., and Cook, J.L. “An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Computing Method for All Flow Speeds”, Computer Physics, Vol. 14, No. 1, pp. 227-253, 1974.
 13. Pracht, W.E. “Calculating Three-Dimensional Fluid Flows at All Speeds with an Eulerian-Lagrangian Computing Mesh”, Computer Physics, Vol. 17, No. 3, pp. 132-159, 1975.
 14. ANSYS-Inc. “ANSYS Acquisition History”, <http://investors.ansys.com/company-information/acquisition-history>.
 15. ANSYS-Inc. “ANSYS ICEM CFD User Manual”, ANSYS-Inc., Pennsylvania, 2015.
 16. Hessel, P.R. “Numerical Simulation of Valved Intake Port and In-Cylinder Flows Using KIVA3”, PhD Thesis, College of Engineering, University of Wisconsin-Madison, 1993.
 17. Musu, E., Gentili, R., and Zanforlin, S. “Four Stroke Engine Geometry for Stratified Charge Combustion”, ASME Fall Technical Conference, Ottawa, Canada, 2005.
 18. Hessel, P.R., Musu, E., Aceves, M.S., and Flowers, D. L. “A General Rezoning Technique for KIVA3V Internal Combustion Engines CFD Simulations”, ASME Fall Technical Conference, San Antonio, 2010.
- روش موجب تسریع فرآیند شبکه‌بندی و افزایش کیفیت شبکه‌ی تولیدی خواهد شد. فرآیند ذکر شده برای موتورهای احتراق داخلی شرح داده شد اما اصول آن کلی بوده و می‌تواند برای سایر کاربردهای نرم‌افزار کیوا نیز استفاده شود.
- خطاهای شرح داده‌شده در این نوشتار، مرسوم‌ترین خطاهای شبکه در کد کیوا هستند که با رعایت نکات ذکر شده می‌توان از بروز آن‌ها جلوگیری کرد. همچنین به‌کارگیری روش‌ها و نکات ذکر شده در این مقاله باعث می‌شود زمان شبکه‌بندی و شبیه‌سازی موتورهای احتراق داخلی به‌طور محسوس‌ی کاهش یابد.
- ### ۸- مراجع
1. Reitz, R.D. “Directions in Internal Combustion Engine Research”, Combustion and Flame, Vol. 160, No. 1, pp. 1-8, 2013.
 2. Jianwen, Yi. “Rapid Mesh Generation and Dynamic Mesh Management for KIVA-3V”, Ford Research Laboratories Report, pp. 1-6, 2000.
 3. Thompson, J.F., Soni, B.K., and Weatherill, N. P. “Handbook of Grid Generation”, pp. 3-20, CRC Press, New York, 1999.
 4. Lakshminarayanan, P.A., Aghav, Y.V., and Shi, Yu. “Multi-dimensional Modelling of Diesel Combustion: Review”, Y. Shi, R. D. Reitz, Modelling Diesel Combustion, Eds., pp. 207-246, New York: Springer, 2010.
 5. Tianpen, Z., Yongfeng, L., and Yan, S. “Grid Generation Research for Intake-Exhaust Closing Internal Combustion Engine Using Kiva Software”, International Conference on Intelligent Control and Computer Application, Zhengzhou, China, pp. 76-79, 2016.
 6. Nishad, K.P. “Modeling and Unsteady Simulation Of Turbulent Multi-phase Flow Including Fuel Injection in IC-engines”, PhD Thesis, The Institute for Energy and Powerplant Technology, Technical University of Darmstadt, 2013.
 7. Liu, Y.F., Zhang, Y.T., and Xiong, Q.H. “Mesh Generation and Dynamic Mesh Management for KIVA-3V”, Beijing Institute of Technology (English Edition), Vol. 18, pp. 41-45, 2009.
 8. Amsden, A.A. “KIVA-3: A KIVA Program with Block-Structured Mesh for Complex