دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

بهینه سازی الگوریتم عددی چیدمان ذرات کروی با استفاده از روش المان‌های گسسته و پیاده سازی بر روی پردازنده گرافیکی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک تبدیل انرژی

سید امیر حسینی‌مقدم

استاد راهنما
دکتر محمود اشرفی زاده

1390

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته تبدیل انرژی

آقای سیدامیر حسینی‌مقدم

تحت عنوان:

بهینه سازی الگوریتم عددی چیدمان ذرات کروی با استفاده از روش المان‌های گسسته و پیاده سازی بر روی پردازنده گرافیکی

در تاریخ 1390/2/24توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهائی قرار گرفت.

1. استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر محمود اشرفی‌زاده
2. استاد مشاور پایان نامه	دکتر ابراهیم شیرانی
3. استاد داور پایان نامه	دکتر حمید هاشم‌الحسینی
4. استاد داور پایان نامه	دکتر احمد صداقت
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر سعید ضیایی راد

بر خود لازم می‌دانم نهایت تشکر و قدردانی خود را از این عزیزان ابراز دارم:

دوست ارجمند و یار عزیزم جناب آقای کامل که با دقت و استادی به گردآوری این جانب دارندوی با حفظ دقت تحقیق صبورانه بنده را از هیچ کمکی دریغ نکرده‌اند.

دوستان و همکارانم در مرکز ابررایانش شیخ بهایی آقایان مهدی رحمانی، رشید امین صافی، وحید ظهیری، محمد مهدی و خانم‌ها ویلقوش. بلداد و به ویژه ریاست آن مرکز جناب آقای دکتر محمد وداشهرفی‌زاده که راهنمایی‌های این تحقیق را از هیچ‌گونه مساعدتی در طی این تحقیق دریغ ایشان در تمامی مراحل تحقیق برخوردار بوده‌ام.

صمیمانه می‌خواهم که به ثمر رسیدن این رساله را مدیون کمک‌های مادی و معنوی ایشان هستم.

دوستان و یار عزیزم آقایان محسن لاهوتی، محمد ترابی، جلال دارابی، امیر بهادر مژدهی، حامد باقری پوشه‌ام آذر پیرامون عزیزانی که در طول مدت تحصیلات کارشناسی ارشد و انجام این تحقیق راهنمایی و حمایت ایشان بهره‌مند بوده‌ام.

و از همه دوستانی که به هر عنوان در این تحقیق این جانب را یاری نمودند سپاسگزارم.

سیدامیر حسینی‌مقدم

بهار یکهزار و سیصد و نود

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع
این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی
اصفهان می‌باشد

تقدیم به آنان که بیاندای ما تحلی، پیشرفت ایران دادند و صدایت می زنند تا به آنان بپیوندی!

تقدیم به آنان که با دیدن مرو فقیت دیگران برق شوق در چشمانشان موج می زند، آنان که حضورشان معنی دار است!

و در نهایت احترام، سهم خود را از این تلاش کوچک تقدیم می کنم به

پدرم سید حسن حسینی، با روحی فداکاری و گذشت،

مادرم انیس یاوری، تبلور زیبا ترین مهربانان،

که عشق را به من آموختند و هرچه دارم از این دو است.

و خواهران بی نظیرم

اشرف، مهدی، الهه و حسین حسینی که عزیزترین افراد عالم اند و همواره یار و حامی من بوده و هستند.

فهرست مطالب

فهرست مطالب ..... هشت
فهرست شکل‌ها ..... یازده
فهرست جداول ..... چهارده
چکیده 1
فصل اول: مقدمه 2
1-1- مقدمه 2
1-1-1-پروژه‌های نفت و گاز 2
1-1-2 - تعیین راندمان سوخت جامد موشک 3
1-1-3 - تولید بستر فشرده‌ی دیجیتالی برای شبیه‌سازی فرآیندهای شیمیایی مختلف 3
1-2- الگوریتم‌های چیدمان ذرات 5
1-2-1- الگوریتم‌های دینامیکی: 5
1-2-2- الگوریتم‌های هندسی: 5
1-3- مروری بر انواع الگوریتم‌های چیدمان ذرات: 6
1-3-1- الگوریتم زنجیره‌ای 6
1-3-2- الگوریتم فشرده سازی کلی 8
1-3-3- الگوریتم پایداری هندسی 11
1-3-4- الگوریتم هندسی بر اساس مشهای چهار وجهی 13
فصل دوم: الگوریتم المان‌های گسسته.....18
2-1- تاریخچه و کاربرد روش المان‌های گسسته 18
2-2- نمای کلی الگوریتم DEM 19
2-3- هندسه برخورد 22
2-4- بررسی فیزیکی برخورد 23
2-5- نیروی برخورد 25
2-5-1- نیروی فنریت 26
2-5-2- محاسبه ضریب فنریت 28
2-5-3- نیروی دمپینگ 30
2-5-4- نیروی برشی 32
2-6- نیروی اعمال شده از طرف مرزها 33
2-6-1- مکانیزم کنترل نیرو 33
2-7- روش‌های جستجوی ذرات 34

2-7-1- لیست همسایگی ورلت 35
2-7-2- روش سلول مرتبط 36
2-7-1- لیست پیوندی خطی 38
فصل سوم: پردازش گرافیکی 41
3-1- روش پردازش گرافیکی و فناوری کودا 42
3-2- کودا، معماری نوین برای پردازش موازی در علوم مختلف 44
3-3- مدل برنامه‌نویسی قابل توزیع در کودا 45
3-4- پیکره بندی نخ‌های محاسباتی کودا 47
3-5- فضای حافظه کارت گرافیکی 48
3-6- بهینه سازی برنامه کامپیوتری 49
3-6-1- افزایش درصد اشتغال مجموعه پردازنده‌ها 50
3-6-2- بهینه‌سازی در نحوه‌ی دسترسی به حافظه 50
3-7- پیاده‌سازی الگوریتم DEM بر روی پردازنده گرافیکی 53
3-7-1- پیکره بندی حافظه GPU و CPU 53
3-7-2- ذخیره سازی مقادیر اولیه برای موقعیت‌ها ، شعاع‌ها و سرعت‌های ذرات 54
3-7-3- کرنل لیست همسایگی 54
3-7-4- محاسبه نیروهای بین ذره‌ای 55
3-7-5- محاسبه سرعت و موقعیت جدید ذرات 56
3-7-6- کنترل جریان اجرای برنامه 56
3-8- استفاده از تکنیک‌های همراستا سازی اطلاعات و حافظه مشترک 57
فصل چهارم: تشریح چیدمان..... 59
4-1- تعیین گام زمانی چندگانه 62
4-2- چیدمان در لایه فوقانی 63
4-3- تشخیص ذرات آزاد 66
4-4- انواع مختلف چیدمان‌های ذرات 68
4-4-1- چینش منظم و متراکم 68
4-4-2- چینش تصادفی (متراکم و یا غیر متراکم) 70
فصل پنجم: نتایج و پیشنهادات 72
5-1- مقدمه 72
5-2- بررسی صحت نتایج چیدمان 73
5-3- بررسی تراکم 79

5-4- بررسی اثر پارامترهای فیزیکی چیدمان 84
5-5- گام زمانی متغیر 85
5-6- لیست همسایگی 88
5-7- تاثیر پردازنده گرافیکی در افزایش سرعت 92
5-8- جریان دانه‌ای 94
5-9- نتیجه‌گیری و پیشنهادات 96
مراجع: 98

فهرست شکل‌ها

شکل 1-1: شبیه سازی جریان سیال در بستر فشرده 3
شکل 1-2: شبیه سازی موتور موشک 3
شکل 1-3: شبیه سازی بستر فشرده برای تولید اکسیژن 4
شکل1-4: مراحل تشکیل زنجیره اولیه 6
شکل1-5: مراحل کوچک شدن زنجیره اولیه..... 7
شکل1-6: مراحل چیدمان ذرات جدید 7
شکل1-7: مراحل حذف دانه‌ها از زنجیره اولیه 8
شکل1-8: حرکت ذره در یک جهت مشخص..... 8
شکل1-9: جهات تصادفی برای فشرده‌سازی محلی 10
شکل1-10: مراحل چیدمان الگوریتم فشرده‌سازی..... 10
شکل1-11: تصویر مثلث نقاط تماس 11
شکل 1-12: الگوریتم پایداری هندسی 12
شکل1-13: تابع وارون در حالت یک بعدی و دو بعدی 13
شکل1-14: مراحل عملکرد تابع وارون 14
شکل1-15: مراحل پر کردن چهار وجهی‌ها 15
شکل1-16: اعمال چیدمان بر روی شکل‌های پیچیده 16
شکل 2-1: نمای کلی الگوریتمDEM 20
شکل2-2: برخورد یک گلوله با یک سطح صیقلی 22
شکل2-3: هندسه تماس گلوله با سطح صیقلی 22
شکل2-4: برخورد بین دو گلوله 23
شکل2-5: نمای شماتیک برخورد و تداخل بین دو گلوله 24
شکل6.3: نیروی برخورد 25
شکل2-7: شبیه‌سازی نیروی برخورد بین دو گلوله 25
شکل2-8: برخورد بین دو گلوله و تداخل 26
شکل2-9: مدل وینک لر 27
شکل2-10: نمودار نیروی عمودی برخورد_تداخل برای چند مدل تماس 31
شکل2-11: نمودار نیروی عمودی برخورد_تداخل برای چند مدل تماس 34
شکل 2-12: ناحیه verlet دایروی (دو بعدی) و ذرات ذخیره شده در لیست 36
شکل 2-13: شماره سلول ها و ذرات در یک سیستم دو بعدی 37
شکل 2-14: سلول های همسایه مورد بررسی در اطراف سلول با رنگ خاکستری 37

شکل 2-15: ترکیبی از دو روش VL و LC 38
شکل 2-16: مرزهای جعبه ای در اطراف هر ذره 38
شکل 2-17: تصویر ذرات بر روی محور x برای دو زمان متفاوت 39
شکل 2-18: محتویات لیست اطلاعات مختصات ذرات بر روی دیگر محورها 40
شکل 2-19: مشخص کردن جفت مرزهای برخوردی با توجه به لیست همسایه 40
شکل 3-1: مقایسه قدرت محاسبات در CPU و GPU 43
شکل 3-2: مقایسه پهنای باند انواع CPU و GPU 43
شکل 3-3: طراحی ریزپردازشگرها در پردازشگر گرافیکی و مقایسه آن با پردازشگر اصلی 43
شکل 3-4: در GPU تعداد بیشتری از ترانزیستورها به پردازش اختصاص می‌یابد 44
شکل 3-5: قابلیت برنامه‌نویسی به زبان‌های مختلف در معماریِ کودا 45
شکل 3-6: توزیع مساله در قالب رشته‌ها، بلوک ها و گرید در پردازشگر گرافیکی 48
شکل 3-7: انواع مختلف حافظه روی Device 49
شکل3-8: دسترسی همخط به حافظه 51
شکل 3-9: دسترسی غیرهمخط به حافظه 52
شکل 3-10: چهار عضو ساختار float4 57
شکل 3-11: ایجاد آرایه یک بعدی از ساختار float4 57
شکل3-12: ساختار حافظه در لیست همسایگی 58
شکل 3-13: همراستاسازی اطلاعات در لیست همسایگی 58
شکل 4-1: نماهای مختلف یک لایه 60
شکل 4-2: نماهای مختلف چند لایه در ظرف مکعبی 61
شکل4-3: مراحل مختلف چیدمان ذرات کروی در یک ظرف استوانه‌ای..... 65
شکل 4-5 : ذرات مقید و آزاد 66
شکل4-6: نمونه‌ای از ذرات مقید و آزاد (دو بعدی) 67
شکل4-7: حالت‌های مختلف مرکز جرو نسبت به نقاط تماس 67
شکل4-8 : چیدمان منظم مکعبی (سمت چپ) چیدمان منظم شش ضلعی (سمت راست) 69
شکل 4-9: قفل شدن ذرات کروی 71
شکل 4-9: عدد تماس برای ذره مورد نظر برابر 6 می‌باشد 72
شکل 5-1: چیدمان شش ضلعی (راست)، چیدمان مربعی (چپ) 73
شکل 5-2: چیدمان مربعی (چپ)، چیدمان شش ضلعی (راست) 74
شکل 5-3: چیدمان ذرات کروی در ظرف مربعی به ابعاد 100×100 75
شکل 5-4: نماهایی از قفل شدن ذرات در ظرف مربعی 76

شکل 5-5: چیدمان در پروژه حاضر (راست)، چیدمان با حل تحلیلی (چپ) 77
شکل 5-6: چیدمان در پروژه حاضر (راست)، چیدمان با حل تحلیلی (چپ) 78
شکل 5-7: برش یک مقطع از چیدمان و بررسی تداخل 79
شکل 5-8: بررسی اثر افزایش ابعاد ظرف بر تراکم 80
شکل 5-9: اثر افزایش D_{max}/D_{min} بر تراکم 81
شکل 5-10: اثر افزایش D_{max}/D_{min} بر تعدادگلوله‌ها 81
شکل 5-11: چیدمان در ظروف استوانه‌ای و مکعبی به همراه نمایش ذرات آزاد 82
شکل 5-12: اثر افزایش D_{max}/D_{min} بر درصد گلوله‌های آزاد 83
شکل 5-13: اثر افزایش D_{max}/D_{min} بر عدد تماس 83
شکل 5-14: بررسی افزایش ضریب اصطکاک بر تراکم 84
شکل 5-15: بررسی افزایش ضریب نیروی برشی بر زمان سکون 84
شکل 5-16: بررسی اثر افزایش تداخل مجاز بر تراکم 85
شکل 5-17: تغییرات گام زمانی در چند مرحله ریزش 86
شکل 5-18: تغییرات گام زمانی سرعت در چند مرحله ریزش 86
شکل 5-19: بزرگنمایی گام زمانی سرعت 87
شکل 5-20: تغییرات گام زمانی شتاب 87
شکل 5-21: بزرگنمایی گام زمانی شتاب 88
شکل 5-22: تعداد تجدید لیست همسایگی در یک مرحله از چیدمان 89
شکل 5-23: بررسی افزایش شعاع همسایگی بر زمان چیدمان 90
شکل 5-24: بررسی افزایش شعاع همسایگی بر تعداد تجدید لیست همسایگی 90
شکل 5-25: بررسی افزایش مقدار جابجایی بر تعداد تجدید لیست همسایگی 91
شکل 5-26: بررسی افزایش مقدار جابجایی بر زمان استقرار گلوله‌ها 91
شکل 5-27: مقایسه MPUPS برای پردازنده مرکزی و گرافیکی 93
شکل 5-28: مقایسه MPUPS برای پردازنده مرکزی و گرافیکی 93
شکل 5-29: اثر افزایش بلوک‌ها بر سرعت اجرا 94
شکل 5-30: جریان شکست موج در زمان‌های مختلف 95
شکل 5-31: جریان در استوانه گردان با سرعت زاویه‌ای متغیر 96

فهرست جداول

جدول3-1: مشخصات ساختار حافظه‌های مختلف 49
جدول3-2: مشخصات ساختارهای استفاده شده در کد 57
جدول 4-1: درصد تراکم و تخلخل برای انواع مختلف چیدمان 70
جدول 5-1: تفاوت در تعداد گلوله‌ها برای دو چیدمان مربعی و شش ضلعی 75
جدول 5-2: بررسی اثر افزایش ابعاد ظرف 80
جدول5-3: مشخصات دو چیدمان در ظرف مکعبی و استوانه‌ای 82
جدول5-4: مشخصات کارت گرافیکیTesla C1060 91

چکیده

مدل‌سازی بسترهای متخلخل به منظور مطالعه و پیش‌بینی فرآیندهای صنعتی در رشته‌های مختلف نظیر مکانیک سنگ، شیمی، مهندسی پلیمر و عمران از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می‌باشد. روش المان‌های گسسته با نام اختصاری DEM، که یکی از مهم‌ترین اعضای خانواده‌ی روش‌های عددی، که به منظور بررسی رفتار دینامیکی تعداد زیادی از ذرات در ابعاد مختلف به کار گرفته می‌شود، از جمله روش‌هایی می‌باشد که برای تولید بسترهای متخلخل از آن استفاده می‌شود. در کار حاضر با استفاده از این الگوریتم و تکنیک پردازش موازی بر روی کارت گرافیکی به بررسی ضرایب و نیروهای مناسب، جهت یک چیدمان تصادفی برای ذرات کروی با اندازه متفاوت و تعداد زیاد (بیش از یک میلیون ذره) پرداخته شده است. سپس برای صحت‌سنجی، درصد تراکم و تخلخل، عدد تماس و تعداد ذرات آزاد برای این چیدمان در ظرف مکعبی و استوانه‌ای گزارش شده است. در این الگوریتم از تکنیک‌های تولید لایه‌ای بستر فشرده به منظور افزایش سرعت حل عددی و گام‌های زمانی چندگانه به منظور تضمین پایداری الگوریتم در مراحل آغازین و افزایش سرعت اجرای برنامه در مراحل پایانی چینش استفاده شده است. هم‌چنین پیاده‌سازی الگوریتم مذکور بر روی پردازنده گرافیکی GPU و بهینه‌سازی الگوی ذخیره‌سازی اطلاعات در حافظه برای لیست همسایگی و نحوه انتقال اطلاعات از پردازنده مرکزی به پردازنده گرافیکی باعث افزایش سرعت در حدود 50 برابر نسبت به پردازنده مرکزی CPU شده است. در انتها برای نشان دادن توانایی الگوریتم فوق دو مسئله شکست سد و جریان در استوانه گردان با نمایش زمان واقعیِ حل عددی شبیه‌سازی شده است.

واژه‌های کلیدی: روش المان‌های گسسته، پردازنده گرافیکی، پردازش موازی ،تراکم، بسترهای فشرده ، جریان دانه‌ای.

فصل اول
مقدمه

1-1-مقدمه

مسئله مدل‌سازی ساختمان بسترهای فشرده[1] با دانه‌های کروی به منظور مطالعه‌ی جریانِ سیال از میان دانه‌ها تاکنون بارها مورد بررسی قرار گرفته و الگوریتم‌های متعددی برای آن پیشنهاد شده است [10-1]. از نتایج این شبیه‌سازی‌ها عموما در بررسی خواص متالورژی پودرها، مطالعه ساختار و جریان سیالات با لزجت بسیار بالا (نظیر پلیمرها) و نیز در بررسی خواص و ساختمان برخی از کریستال‌ها استفاده می‌شود. در ذیل چند نمونه از کاربردهای صنعتی این پروژه آورده شده است.

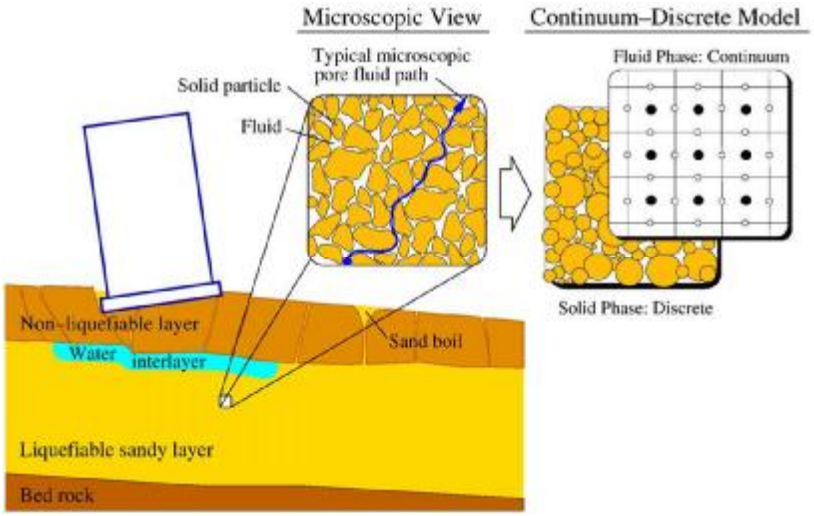
1-1-1-پروژه‌های نفت و گاز

بررسی جریان‌های چند جزیی، تراکم ناپذیر و مخلوط نشدنی در بستر فشرده در صنعت از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می‌باشد. یک نمونه بسیار مهم برای این جریان، جریان نفت، آب و گاز طبیعی در مخازن زیرزمینی می‌باشد. مدل‌سازی بستر فشرده به منظور مطالعه این جریان می‌تواند در مراحل اکتشاف و استخراج نفت و نیز در پروژه‌های تزریق آب و گاز طبیعی[2] به چاه‌های نفتی،که موجب افزایش بهره‌وری آن‌ها می‌شود، مفید واقع شود [12-11]. در شکل 1-1 نمایی از این نوع شبیه‌سازی‌ها را می‌توان مشاهده نمود. جریان دیگری که در دسته بندی فوق قرار می‌گیرد جریان آب، هوا و پساب‌های صنعتی در سفره‌های سنگی زیرزمینی است که شناخت آن برای سازمان‌هایی که در زمینه‌ی حفاظت از محیط زیست فعالیت می‌نمایند، اهمیت زیاد دارد[13].

---

[1] Packed bed

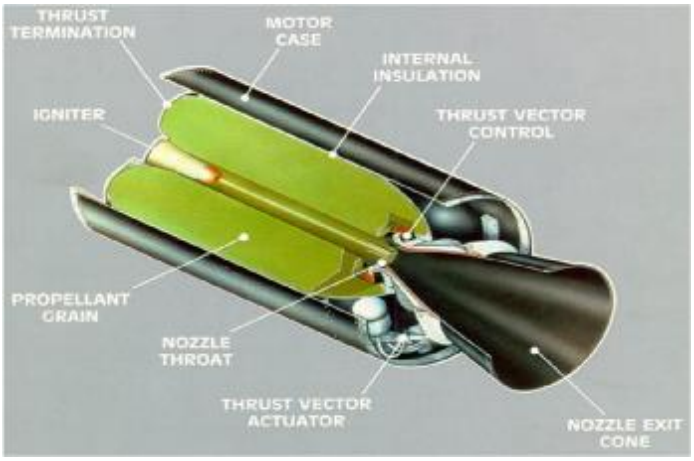
[2] Water Alternating Gas (W.A.G.) projects



شکل: 1-1 شبیه سازی جریان سیال در بستر فشرده

1-1-2 - تعیین راندمان سوخت جامد موشک که متناسب با تراکم اجزای دانه‌ای شکل سوخت می‌باشد

در سیستم‌های با پیشرانش جامد (مثل موتور موشک‌ها که به صورت شماتیک در شکل 1-2 نمایش داده شده است) به منظور برآورد نمودن قدرت و مصرف سوخت باید تراکم ذرات سوخت یک مقدار از پیش تعیین شده باشد [14] که با استفاده از پروژه حاضر می‌توان مقدار تراکم مذکور را پیش‌بینی نمود.



شکل 1-2 شبیه سازی موتور موشک

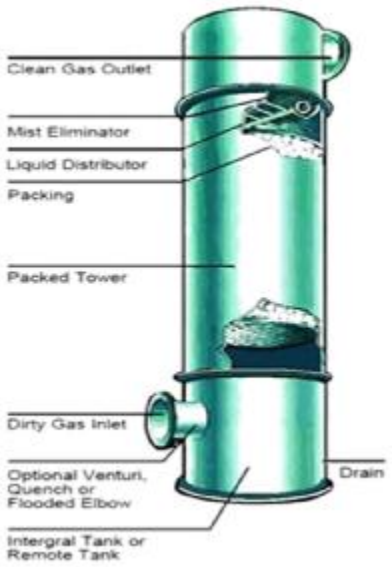
1-1-3 - تولید بستر فشرده‌ی دیجیتالی برای شبیه‌سازی فرآیندهای شیمیایی مختلف

بسترهای فشرده[1] معمولا دانه‌های جامد (عمدتا کروی) هستند که در ظرف مربوطه چینش می‌گردند و جایگاه مهمی در صنایع مختلف دارند. از این بسترها در عملیات کروماتوگرافی[2] [15]، در میله‌های سوختی، در فیلترها و نیز به عنوان جایگاهی برای مواد شیمیایی، کاتالیزورها[16] استفاده می‌شود.

[1] Packed Bed
[2] Chromatography

یک کاربرد عمده این بسترهای فشرده، همان‌گونه که در شکل 1-3 مشاهده می‌شود در سیستم‌های تولید اکسیژن[1] است. این سیستم‌ها دسته‌ای از بسترهای فشرده هستندکه در آن‌ها از دانه‌های زئولیتی[2] استفاده می‌شود. زئولیت‌ها دسته‌ای از مواد کریستالی هستند که ضریب جذب سطحی نیتروژن و اکسیژن در آن در فشارها و دماهای متفاوت تغییر می‌نماید که از این خاصیت استفاده شده است و با استفاده از سیکلهای تناوب فشار[3](PSA) و یا تناوب دما[4](TSA) تجهیزاتی برای جداسازی نیتروژن و اکسیژن از هوای استاندارد طراحی و ساخته شده است[17].

عموما تصور می‌شود که کارایی این بسترها، با افزایش سطح تماس ذرات جامد با جریان گذرنده از میان آنها افزایش می‌یابد. بدین جهت، در طراحی این بسترها همیشه از ذرات (معمولا کروی) با اندازه‌ها و ابعاد متفاوت استفاده می‌شود تا بدین ترتیب، سطح تماس ذرات جامد[5] با جریان سیال عبوری افزایش یابد[18].



شکل 1-3 شبیه سازی بستر فشرده برای تولید اکسیژن

درک جزئیات مربوط به فرآیندهای انتقال محلی در بستر فشرده رآکتورها یکی از پیش شرط‌های ضروری برای بالا بردن بهره‌وری محصولات این سیستم‌ها می‌باشد. در نتیجه چیدمان ذرات کروی از اهمیت ویژه‌ای در صنایع فرآیندهای شیمیایی برخوردار می‌باشد [19].

در انتخاب روش شبیه‌سازی که در این پروژه مورد استفاده قرارگرفته، به سادگی اجرا،کاهش حجم محاسبات، قابلیت کاربرد درگستره وسیعی از مسائل، قابلیت موازی شدن الگوریتم و امکان استفاده از آن برای شبیه‌سازی دینامیک سیستم‌هایی که از ذرات با اندازه‌های متفاوت تشکیل شده‌اند توجه شده است. در ابتدا به بررسی انواع چیدمان‌های موجود می‌پردازیم.

[1] On Board Oxygen Generating Systems
[2] Zeolite
[3] Pressure Swing Adsorption
[4] Temperature Swing Adsorption
[5] Caged particles

1-2- الگوریتم‌های چیدمان ذرات

تولید بسترهای فشرده کروی با توجه به اهمیت کاربرد صنعتی آن و در نتیجه خواص آن بستر متفاوت می‌باشد. مهمترین ویژگی‌هایی که برای تولید بسترهای فشرده مورد نظر قرار می‌گیرد عبارتند از:

- تراکم بستر فشرده
- عدد تماس[1](تعداد کره‌هایی که در همسایگی یک کره قرار دارند)
- توزیع سایز کره‌ها
- مدل هندسی تماس بین کره‌ها

یکی از چالش‌های بزرگ برای الگوریتم‌های تصادفی پکینگ، تناسب بین سرعت تولید پکینگ و مقدار تراکم آن می‌باشد، یعنی هر چه این سرعت بیشتر باشد مقدار تراکم کاهش می‌یابد. در حال حاضر الگوریتم‌های موجود به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

- الگوریتم‌های دینامیکی
- الگوریتم‌های هندسی

1-2-1- **الگوریتم‌های دینامیکی**:

اساس روش دینامیکی تولید پکینگ‌های کروی، استفاده از قوانین فیزیکی برای تعیین خط سیر دانه‌ها و موقعیت نهایی آنها می‌باشد. این نوع شبیه‌سازی با انتگرال‌گیری از قوانین مختلف تماس امکان پذیر شده است. توسعه الگوریتم‌های دینامیکی متشکل از دو مرحله اصلی می‌باشد که عبارتند از:

مرحله اول) چینش کره‌ها بدون تداخل به صورت تصادفی داخل ظرف با توجه به توزیع سایز کره‌ها.

مرحله دوم) فشردگی همگن محفظه تا تراکم مورد نظر بدست آید.

گسترش عملیات فشردگی سبب تولید پکینگ‌های با تراکم بالا و همچنین کاهش کره‌های آزاد می‌شود. اما این عملیات نیاز به محاسبات بالا و در بعضی از موارد نیاز به بهینه‌سازی‌های گسترده دارد. قابلیت روش‌های دینامیکی در تولید پکینگ‌های همگن با تراکم غیر قابل انکار می‌باشد. تعدد تکنیک‌های تولید و قوانین مختلف تماس باعث انعطاف‌پذیری این روش‌ها شده است. با این حال این روش‌ها دارای اشکالاتی مثل باقی‌ماندن تداخل بین کرات می‌باشندکه اصلا قابل چشم‌پوشی نیستند. همچنین بالا بودن زمان مورد نیاز برای آماده ساختن پکینگ از دیگر اشکالات این روش می‌باشد.

2-2-1- **الگوریتم‌های هندسی**:

این الگوریتم‌ها با استفاده از فضای هندسی کاربردی برای کره‌ها به تولید پکینگ‌های کروی می‌پردازد. در این روش‌ها معمولا ذرات به صورت یکی یکی انداخته می‌شوند و هر ذره به حرکت خود ادامه می‌دهد تا از نظر هندسی به پایداری برسد. یکی از مهمترین اشکالات این روش عدم تراکم نسبی است که از یک مقدار خاصی بیشتر

[1] Coordination Numbers

نمی‌شود. همچنین معمولا به علت جهت‌گیری فشردگی در این روش‌ها یک ناهمگنی در پکینگ باقی می‌ماند. مطلب مهم در وجه تمایز بین آنها، شامل شکل ذرات، مدل‌سازی تماس، راه ارتباطی زمانی و روش بررسی برخوردها می‌باشد. در ادامه در مورد چندین الگوریتم چیدمان توضیحاتی ارائه می‌شود.

1-3- مروری بر انواع الگوریتم‌های چیدمان ذرات:

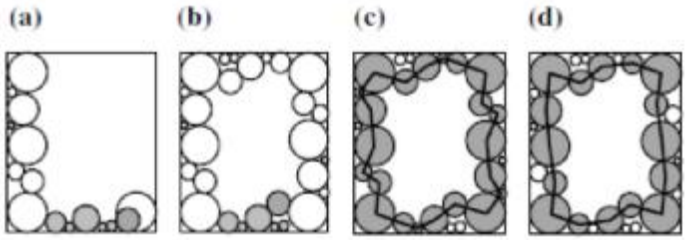
در این قسمت برای نشان دادن پیشینه تاریخی مسئله حاضر چند نوع الگوریتم چیدمان مورد بررسی قرار گرفته شده است.

1-3-1- الگوریتم زنجیره‌ای[21]

هدف الگوریتم: پر کردن یک ظرف محدود با دیواره‌های ثابت توسط دیسک‌هایی با سایز متفاوت.

این الگوریتم مبتنی بر روش‌های هندسی می‌باشد و کلیت الگوریتم به این صورت می‌باشد که بعد از آنکه یک دیسک با اندازه‌ی تصادفی تولید شد در موقعیت مناسب که با دیواره و دیسک‌هایی که قبلا در ظرف قرار گرفته‌اند مماس می‌شود به طوریکه حداقل دو نقطه تماس داشته‌باشد. مراحل اصلی فرآیند به شرح زیر می‌باشد:

- لبه‌های ظرف از زنجیره‌ای از ذرات پر می‌شود به صورتی که دیسک‌ها در تماس با یکدیگر باشند که به این زنجیره، زنجیره اولیه گفته می‌شود که می‌توان در شکل 1-4 مشاهده کرد.
- ذرات بعدی در امتداد داخلی زنجیره اولیه قرار داده می‌شوند به صورتی که به دو ذره از زنجیره متصل شوند و بدین صورت نقاط زنجیره با متصل شدن هر ذره به داخل آن به روز می‌شود.
- هنگامی که دامنه داخلی ظرف به اندازه‌ای پر شد که دیگر دانه‌ای بدون تداخل در داخل زنجیره قرار نگرفت ذرات کوچکتری تولید می‌شوند تا جاهای خالی ظرف را پر کنند. این روند پس از چند تلاش ناموفق که کاربر تعریف می‌کند متوقف می‌شود. در نهایت در صورتی که خواسته باشیم و بعد از شناسایی جاهای خالی ذراتی تولید می‌شود که چیدمان متراکم‌تر شود.



شکل1-4: مراحل تشکیل زنجیره اولیه

مرحله دوم الگوریتم بالا همان طور که در شکل 1-5 نشان داده شده است شامل قرار دادن ذرات جدید و به روز رسانی زنجیره می‌باشد، خود از مراحل زیر تشکیل شده است:

- ابتدا یک ذره با قطر تصادفی و با نام P^{new} تولید می‌شود.