

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مدل سازی و شبیه سازی پیشرفته سیستم های فرآوری مواد معدنی

Advanced Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems

مدرس: محمد جهانی چگنی

m.jahani1983@gmail.com

بهمن ماه ۱۴۰۲

سرفصل‌های وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

درس پیش نیاز	اختیاری	نوع درس	تعداد واحد	مدل سازی و شبیه سازی پیشرفته سیستم های فراوری مواد معدنی
			۳	
	نظری	نوع واحد	تعداد ساعت	
			۴۸	
آموزش تکمیلی عملی: دارد ☐ ندارد ☒ سفر علمی ☐ کارگاه ☐ آزمایشگاه ☐				Advanced Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems

اهداف کلی درس:

آشنایی با مدل‌های ریاضی فرایندهای فراوری مواد معدنی شامل خردایش، طبقه‌بندی و جدایش و شبیه‌سازی رایانه‌ای مدارها با چیدمان‌های رایج در کارخانه‌های فراوری مواد معدنی
 آشنایی بیشتر با مفاهیم مطرح در مهندسی فرایند و مدل‌سازی ریاضی فرایندهای مختلف مورد استفاده در کارخانه‌های فراوری مواد معدنی
 آشنایی بیشتر با کاربرد شبیه‌سازی در طراحی کارخانه‌های جدید
 توانایی بیشتر دانشجویان برای استفاده از شبیه‌سازی رایانه‌ای برای بهینه‌سازی عملکرد کارخانه‌های فراوری مواد معدنی در حال کار

سرفصل‌های وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

سرفصل درس:

مدل‌سازی و شبیه‌سازی پیشرفته در:

- توزیع اندازه ذرات
- آزادی کانی
- طبقه‌بندی اندازه ذره
- خردایش
- جدایش جامد - مایع
- جدایش نقلی
- جدایش مغناطیسی
- فلوتاسیون
- شبیه‌سازی کارخانه‌های کانه‌آرایی
- کار با نرم افزارهای مختلف مورد استفاده در مدل‌سازی و شبیه‌سازی کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی
مانند MODSIM و PFC3D

* دانشجوی موظف است در قالب مباحث نظری آموزش داده شده طبق نظر استاد مربوط، یک پروژه مستقل ارائه نماید.



دفرنس‌های درس

- 1- “**Finite Element Modeling for Stress Analysis**”, R. D. Cook, John Wiley & Sons, 1979.
- 2- “**Fundamentals of Finite Element Analysis**”, D. V. Hutton, 1st edition, Mc Graw Hill, 2004.
- 3- “**The Combined Finite-Discrete Element Method**”, Antonio Munjiza, 1st edition, John Wiley & Sons, 2004.
- 4- “**Introduction to Finite Element Methods**”, Carlos A. Felippa, 1st edition, University of Colorado, 2001.

- 5- **“An Introduction to the Finite Element Method”**, J. N. Reddy, 3rd Edition, McGraw-Hill, 2005.
- 6- **“Solution Manual for An Introduction to the Finite Element Method”**, J. N. Reddy, 3th Edition, McGraw-Hill, 2005.
- 7- **“Finite Element Procedures”**, K-J Bathe, 2nd edition, Massachusetts Institute of Technology, 2014.
- 8- **“The Finite Element Method – Its Basis & Fundamentals”**, O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor & J. Z. Zhu, 6th edition, Elsevier, 2005.

- 9- “**Concepts and Applications of Finite Element Analysis**”, R. D. Cook, D. S. Malkus, M. E. Plesha, R. J. Witt, 4th Edition, John Wiley & Sons, 2002.
- 10- “**The Finite Element Method in Engineering**”, Singiresu S. Rao, 4th Edition, Elsevier, 2005.
- 11- “**Introduction to the Finite Element Method**”, Evgeny Barkanov, Riga Technical University, 2001.

- 12- “**COMSOL 5 for Engineers**”, M. Tabatabaian, Mercury Learning and Information, David Pallai, 2016.
- 13- “**Multiphysics Modeling using COMSOL – A First Principles Approach**”, R. W. Pryor, Jones and Bartlett Publishers, 2011.
- 14- “**The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS**”, 2nd edition, E. Madenci & I. Guven, Springer, 2015.
- 15- “**Smoothed Particle Hydrodynamics – a meshfree particle method**”, G. R. Liu & M. B. Liu, World Scientific Publishing Co., 2003.

- 16- “**Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH): an Overview and Recent Developments**”, M.B. Liu & G.R. Liu, Arch Comput Methods Eng (2010) 17: 25–76.
- 17- “**Smoothed Particle Hydrodynamics**”, J. J. Monaghan, Annu. Rev. Astron. Astrophys. 1992. 30:543-74.
- 18- “**Numerical methods: simulations with smoothed particle hydrodynamics**”, Philip Anderson, Nobel Lecture, 1977.

درفنس های درس

- 19- **“Fluid Simulation using Smoothed Particle Hydrodynamics”**, Burak Ertekin, MSc Computer Animation and Visual Effects, Bournemouth University, 2015.
- 20- **“Application of the Smoothed Particle Hydrodynamics model SPHysics to free-surface hydrodynamics”**, Alejandro Jacobo Cabrera Crespo, PhD Thesis, UNIVERSIDADE DE VIGO, 2008.
- 21- **“Lagrangian Fluid Dynamics Using Smoothed Particle Hydrodynamics”**, Micky Kelager, University of Copenhagen, 2006.

- 22- **“Simulation and Rendering of a Viscous Fluid using Smoothed Particle Hydrodynamics”**, Marcus Vesterlund, Master Thesis, 2004.
- 23- **“Smoothed particle hydrodynamics”**, J. J. Monaghan, Rep. Prog. Phys. 68 (2005) 1703–1759.
- 24- **“The implementation of Smooth Particle Hydrodynamics in LAMMPS.”**, G. C. Ganzenmuller, M. O. Steinhauser & P. Van Liedekerke, 2011.

- 25- **“Smoothed Particle Hydrodynamics Real-Time Fluid Simulation Approach”**, David Staubach, Bachelor Thesis, 2010.
- 26- **“Coupled CFD-DEM modeling: formulation, implementation and application to multiphase flows”**, Hamid Reza Norouzi, Reza Zarghami, Rahmat Sotudeh-Gharebagh, Navid Mostoufi, School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. John Wiley & Sons, 2016.

- ۱- «شبیه‌سازی واحدهای فرآوری مواد معدنی به روش اجزای گسسته - توسعه یک نرم افزار»، محمد جهانی چگنی، رساله دکتری، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، ۱۳۹۴.
- ۲- «نرم‌افزار شبیه‌سازی KMPCDEM»، مرکز تحقیقات فرآوری مواد کاشی‌گر (KMPPRC) (Kashigar Mineral Processing Research Center)،
<http://www.kmpc.ir/>.
- ۳- «مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی فرآیند جدایش در جداکننده نلسون به روش ترکیبی CFD-DEM»، محمدرضا فتاحی، رساله دکتری، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، ۱۳۹۶.

- ۴- «دینامیک سیالات محاسباتی ۱»، وحید اصفهانیان، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، ۱۳۹۰.
- ۵- «دینامیک سیالات محاسباتی ۲»، وحید اصفهانیان، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، ۱۳۸۸.
- ۶- «راه اندازی و تهیه دستورالعمل کاربردی نرم افزار ABAQUS/CAE»، محمد حسین سورگی، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۴.

سایت‌های مفید برای دانلود رفرنس‌ها

<http://gen.lib.rus.ec/scimag/index.php>

<http://sci-hub.cc/>

<http://bookzz.org/>

<http://booksc.org/>

www.Liberica.org/books/

www.slideshare.net/?ss

<http://b-ok.org/>

<http://sci-hub.bz/>

<http://www.telsmith.com/>

سایت‌های مفید برای یادگیری

www.smenet.org

<http://www.metso.com/>

www.Metsominerals.com

www.sciencedirect.com

<http://www.denvermineral.com/>

<http://hardinge.com/>

<http://www.min-eng.com/>

<http://www.kmpc.ir/>

<https://www.multotec.com/>

<http://www.bureauveritas.com/home>

<http://www.pala.com/>

<http://cfdiran.ir/>

<https://www.cfdem.com/>

<http://finite-element.blog.ir/>

<https://scholar.google.com/>

ژورنال‌های معتبر برای دانلود مقاله‌ها

- ☐ Particuology
- ☐ Advanced Powder Technology
- ☐ Powder Technology
- ☐ Minerals Engineering
- ☐ International Journal of Mineral Processing
- ☐ International Journal of Mining Science and Technology
- ☐ International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials
- ☐ Physicochemical Problems of Mineral Processing (PPMP)
- ☐ Engineering Computations
- ☐ Applied Mathematical Modelling
- ☐ Engineering with computers
- ☐ Granular Matter
- ☐ Computer methods in applied mechanics and engineering
- ☐ Advances in Engineering Software
- ☐ Computer physics communications
- ☐ Computers & chemical engineering
- ☐ International journal for numerical methods in engineering

برنامه هفتگی

برنامه هفتگی استاد در ترم 4022																X
روز/ساعت	08:00 09:00	09:00 10:00	10:00 11:00	11:00 12:00	12:00 13:00	13:00 14:00	14:00 15:00	15:00 16:00	16:00 17:00	17:00 18:00	18:00 19:00	19:00 20:00	20:00 21:00	21:00 22:00	22:00 23:00	
شنبه	برنامه سازی کامپیوتر گروه: 01 هر هفته محل: کلاس شماره 8- دانشکده معدن															
یک شنبه	کنترل فرایندهای فرآوری مواد معدنی (دکتر) گروه: 01 هر هفته محل: کلاس شماره 9- دانشکده معدن	بیوفناوری در فرآوری مواد معدنی گروه: 01 هر هفته محل: کلاس شماره 9- دانشکده معدن			کنترل فرایندهای فرآوری مواد معدنی (دکتر) گروه: 01 هر هفته محل: کلاس شماره 9- دانشکده معدن											
دوشنبه		فلوتاسیون و آزمایشگاه گروه: 01 هر هفته محل: کانه آرایه و فلوتاسیون			کانه آرایه پیشرفته گروه: 01 هر هفته محل: کلاس شماره 9- دانشکده معدن											
سه شنبه	برنامه سازی کامپیوتر گروه: 01 هر هفته محل: کلاس شماره 9- دانشکده معدن			فلوتاسیون و آزمایشگاه گروه: 01 هر هفته محل: کلاس شماره 3- دانشکده معدن												
چهارشنبه																
پنج شنبه																

نحوه ارزیابی

ارائه کلاسی: ۶ نمره (کوپل دو روش)

حضور غیاب: صفر نمره (به ازای هر غیبت نیم نمره کسر می شود)

مثبت‌های کلاسی و تحقیقات کوچک: حداکثر ۲ نمره

امتحان پایان ترم: ۶ نمره

نرم افزار: ۸ نمره (نصب نرم افزار مربوطه، آشنایی کامل با نرم افزار، ران کردن نرم افزار و انجام شبیه سازی های ساده، و توضیح نرم افزار در کلاس)

فهرست مطالب

❖ فصل اول: آشنایی با روش اجزای گسسته (DEM) (Discrete Element Method)

❖ فصل دوم: آشنایی با روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) (Computational Fluid

(Dynamics)

❖ فصل سوم: آشنایی با روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) (Smooth Particle

(Hydrodynamics)

❖ فصل چهارم: آشنایی با روش اجزای (المان) محدود (FEM) (Finite Element Method)

وظایف دانشجو (نحوه انجام پروژه)

❖ آشنایی با روش‌های موجود در پروژه (دو روش و کوپل آن‌ها)

❖ آشنایی با تمام نرم‌افزارهای موجود (تجاری یا متن باز) در زمینه این دو روش‌ها

❖ آشنایی با مزایای کوپل کردن دو روش

❖ آشنایی با نحوه کوپل کردن، نرم‌افزارها و روش‌های موجود برای کوپل کردن

❖ یافتن سه مقاله جدید درباره این روش‌ها (به صورت مجزا) و مقالات ترکیبی دو روش (کوپل)

❖ مروری بر تجهیزات فرآوری شبیه‌سازی شده با این روش‌ها تا سال ۲۰۲۴

❖ یافتن تجهیزاتی که با این روش‌ها قابل انجام است اما تاکنون توسط هیچ پژوهشگری انجام نشده است.

❖ علت عدم انجام شبیه‌سازی تجهیزات باقیمانده (شامل مشکل تعداد ذرات، هندسه دشوار، مشکل مش‌بندی و غیره)

❖ تحقیق (۲ نمره اضافه دارد):

❖ فصل پنجم: روش حجم محدود (FVM) (Finite Volume Method)

❖ فصل ششم: آشنایی با روش اجزای (المان) مرزی (BEM) (Boundary Element Method)

❖ فصل هفتم: آشنایی با روش تفاضل (تفاضلهای) محدود (FDM) (Finite Difference Method)



فصل اول: روش اجزای گسسته (راگ) Discrete Element Method (DEM)

❖ **زمان بر بودن و پرهزینه بودن** تست‌های آزمایشگاهی و پایلوت در واحدهای فرآوری مواد معدنی سبب شده‌اند که این تست‌ها به تدریج جای خود را به روش‌های مدل‌سازی (بویژه مدل‌سازی عددی) دهند، به طوری که امروزه در بسیاری از کشورهای پیشرفته دنیا این روش‌ها جایگزین روش‌های آزمایشگاهی شده‌اند.

❖ **روش اجزای گسسته (DEM)** یک روش **مدل‌سازی عددی** است که توسط **Cundall** در بین سال‌های 1971 تا 1974 جهت تحلیل مشکلات مکانیک سنگ‌ها ایجاد شد.

❖ **روش اجزای گسسته** روشی مناسب برای مدل‌سازی عددی و شبیه‌سازی رفتار دیسک‌ها و **کره‌های مجزا** در فضای دوبعدی و سه‌بعدی است.

- ❖ در حال حاضر تعدادی نرم افزار تخصصی در زمینه روش اجزای گسسته در کشورهایی مانند ایالات متحده، آلمان، فرانسه، استرالیا، کانادا، انگلستان، هلند، سوئیس، اسپانیا وجود دارد.
- ❖ مشکلی که وجود دارد این است که برخی از این **نرم افزارها تجاری** هستند و هزینه اجاره آنها بسیار سنگین است، ضمناً امکان تهیه بسیاری از آنها در ایران وجود ندارد.
- ❖ دسته دیگر این نرم افزارها **نرم افزارهای متن باز** هستند که به صورت آزادانه و رایگان در دسترس هستند، اما مشکل نرم افزارهای متن باز این است که تقریباً اکثر آنها در سیستم عامل ویندوز قابل اجرا نیستند و تنها با سیستم عامل لینوکس اجرا می شوند. مشکل دیگر این نرم افزارها مسئله کامپایل کردن آنها به گونه ای که توانایی انجام شبیه سازی مورد نظر ما را داشته باشند.

❖ از آنجایی که تمام نرم افزارهای متن باز به صورت کدهای منبع هستند، کامپایل کردن این کدها و ساختن فایل اجرایی از آنها بسیار دشوار است و انجام این کار تنها در سیستم عامل های مبتنی بر لینوکس امکان پذیر است.

کاربردهای DEM در فرآوری مواد معدنی

- ❖ در سال ۱۹۹۰ روش‌های عددی جهت رفع مشکلات مربوط به آسیاهای گردان مورد استفاده قرار گرفتند.
- ❖ با آغاز قرن بیست و یکم، روش اجزای گسسته به طور گسترده‌ای در مدل‌سازی آسیاهای گلوله‌ای، نیمه‌خودشکن و گریز از مرکز مورد استفاده قرار گرفت. محققان از این روش برای پیش‌بینی حرکت بار، توان مصرفی آسیا، جدایش ابعادی گلوله‌ها، جدایش ابعادی سنگ‌های کوچک از گلوله‌های بزرگ‌تر، میزان استهلاک آسترها در آسیاهای گلوله‌ای و بررسی سرعت بحرانی آسیای گلوله‌ای استفاده کردند.
- ❖ در سال‌های اخیر فعالیت‌های بسیاری جهت بهینه‌سازی عملکرد آسیاها صورت گرفته است.

مروری بر کارهای انجام شده در ایران در زمینه DEM

- ❖ استفاده از روش اجزای گسسته در ایران در رشته مهندسی معدن و بویژه در گرایش فرآوری مواد معدنی سابقه چندانی ندارد.
- ❖ اولین پژوهش در سال ۲۰۰۷ در گرایش مکانیک سنگ انجام شد. در این پژوهش رفتار شکست سنگ درون یک سنگ شکن فکی با استفاده از روش اجزای گسسته و نرم افزار PFC3D شبیه سازی شد.
- ❖ در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۷ با استفاده از روش اجزای گسسته و نرم افزار PFC3D، تأثیر سرعت چرخش آسیای گلوله ای بر میزان خردایش و شکل بار درون آسیا مورد بررسی قرار گرفت.
- ❖ در مطالعه دیگری در سال ۲۰۱۰، شبیه سازی عملیات سنگ شکنی و فرآیند سرندکنی با استفاده از چند طبقه سرند آزمایشگاهی انجام شد. در این پژوهش منحنی های توزیع دانه بندی به دست آمده از روش اجزای گسسته برای دو نوع سنگ گرانیتی و آهکی در دو حالت مکعبی و کروی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند.

مروری بر کارهای انجام شده در ایران در زمینه DEM

❖ در سال ۲۰۱۰ در پژوهش دیگری شبیه سازی سرندهای صنعتی با روش اجزای گسسته و با استفاده از نرم افزار PFC3D انجام شد. در این پژوهش شبیه سازی های اجزای گسسته برای یک سرند موزی شکل سه صفحه ای کوچک مقیاس انجام شد.

❖ در سال ۲۰۱۱ در پژوهش دیگری پارامترهای مؤثر بر عملکرد آسیاهای گردان به روش اجزای گسسته و با استفاده از نرم افزار PFC3D مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت و بهینه سازی این پارامترها با طراحی و ساخت یک آسیای گلوله ای شفاف انجام شد.

مروری بر نرم افزارهای موجود در زمینه شبیه سازی به روش اجزای گسسته (نرم افزارهای تجاری)

<https://www.demsoftware.net/software/>



Advanced Conveyor Technologies



208-745-6914 (Idaho)
507-345-5748 (Minnesota)

[HOME](#) | [NEWTON](#) | [OVERVIEW](#) | [PRICING](#) | [DEMO](#) | [TUTORIALS](#) | [CURRENT VERSION](#) | [EXAMPLES](#) | [FAQ](#)

Newton Overview

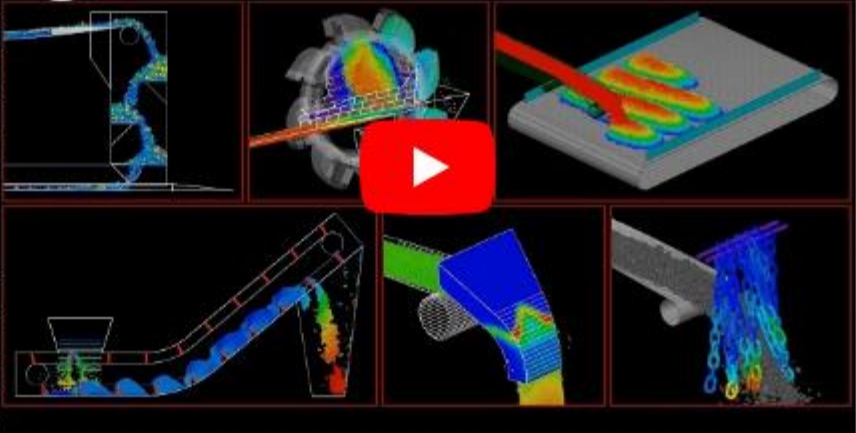
Newton is a general purpose Discrete Element Method (DEM) simulation package used to quickly and accurately model three-dimensional behavior of granular flow. A variety of constitutive models have been included to model a wide range of material properties including wet, sticky, cohesive material. Material degradation, surface wear, impact damage, energy dissipation, and other fundamental parameters can easily be analyzed.

Newton is extremely flexible and can handle a wide variety of material properties and geometries including conveyor transfer chutes, apron feeders, chain feeders, bucket elevators, and more. It is developed and maintained by the engineering group at AC-Tek.



Newton DEM Software

Advanced Conveyor Technologies, Inc.
www.atek.com www.demsoftware.net
info@atek.com



مروری بر نرم افزارهای موجود در زمینه شبیه سازی به روش اجزای گسسته (نرم افزارهای تجاری)

http://www.technalysis.tech/dem_software.aspx



مروری بر نرم افزارهای موجود در زمینه شبیه سازی به روش اجزای گسسته (نرم افزارهای تجاری)

<https://www.itascacg.com/software/pfc>

**U.S. MINNEAPOLIS**
Itasca Regions

CONSULTING SOFTWARE LEARNING EVENTS ABOUT 

SIGN IN

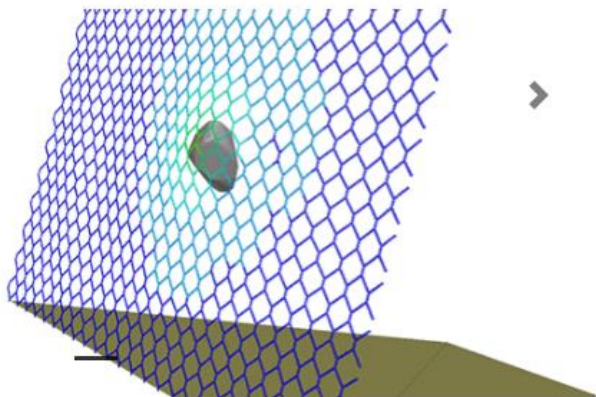
Order PFC

PFC
> PFC
> Why Choose PFC?
> Distinct Element Method in PFC
> PFC System Requirements
> New in PFC 7.0

- Contact Models
- Rigid Blocks and Clumps
- Particle Inlets
- Multi-Threaded FISH

> Features in PFC

- User Interface in PFC
- Construction in PFC
- FISH Scripting in PFC

**PFC™ VERSION 7.0**
General Purpose Distinct-Element Modeling Framework


Description

PFC (Particle Flow Code) is a general purpose, [distinct-element modeling](#) (DEM) framework that is available as two- and three-dimensional programs (*PFC2D* and *PFC3D*, respectively). *PFC Suite* includes both *PFC2D* and *PFC3D*. *PFC2D* can also be purchased separately.

Software Support

- Request Help
- PFC 7.0* Documentation
- Documentation
- Software Forum
- FAQs
- Find Software Agent
- Training
- Applied Examples
- Tutorials
- Utility Files

PFC UPDATES

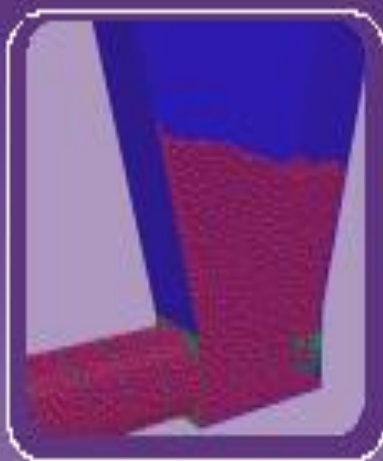
- [PFC 7.00 Update](#)
- [Itasca Linux 7.00 Update](#)
- [PFC 6.00 Update](#)

مروری بر نرم افزارهای موجود در زمینه شبیه سازی به روش اجزای گسسته (نرم افزارهای تجاری)

Particle Flow Code in three dimensions



OVERVIEW



OPTIONS



NEW IN 4.0



SALES



PFC3D™

مروری بر نرم افزارهای موجود در زمینه شبیه سازی به روش اجزای گسسته (نرم افزارهای تجاری)

Particle Flow Code in two dimensions



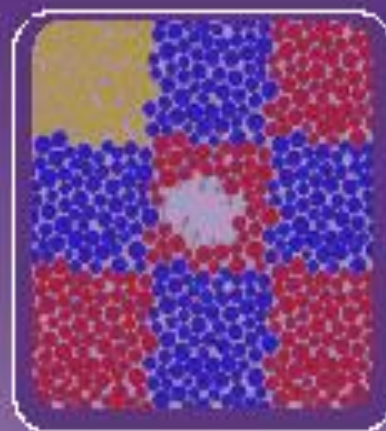
OVERVIEW



OPTIONS



NEW IN 4.0



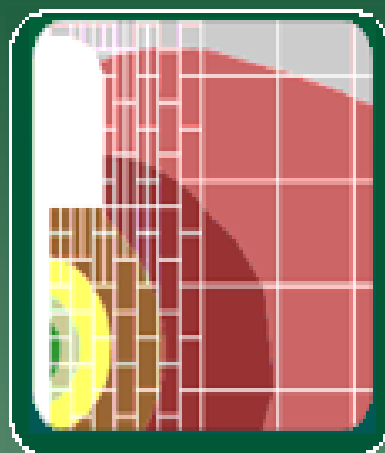
SALES



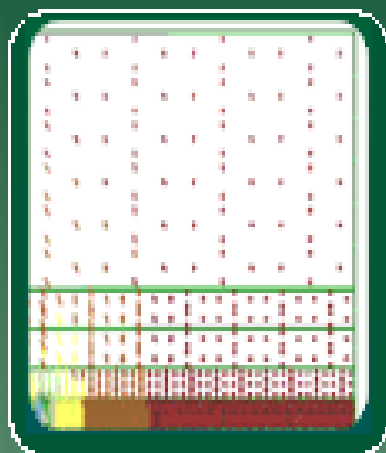
PFC2D™

مروری بر نرم افزارهای موجود در زمینه شبیه سازی به روش اجزای گسسته (نرم افزارهای تجاری)

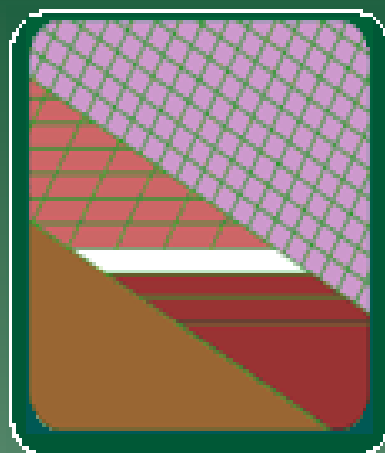
Universal Distinct Element Code



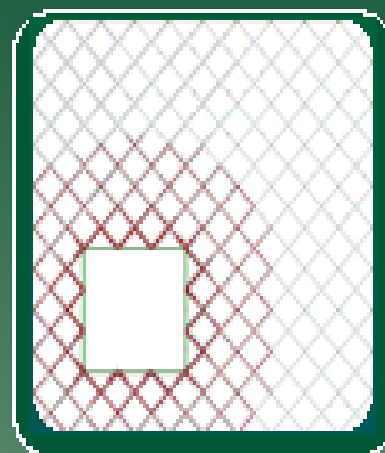
OVERVIEW



OPTIONS



NEW IN 5.0



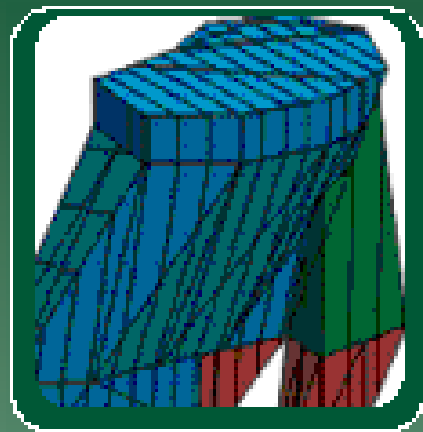
SUMMARY



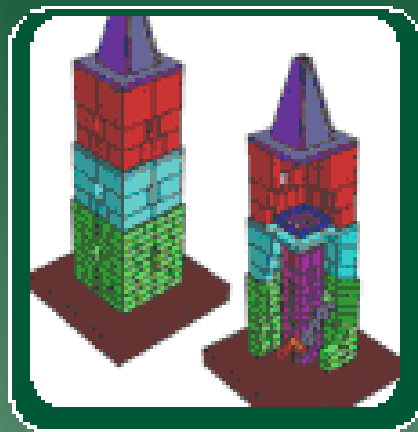
UDEC™

مروری بر نرم افزارهای موجود در زمینه شبیه سازی به روش اجزای گسسته (نرم افزارهای تجاری)

Three Dimensional Distinct Element Code



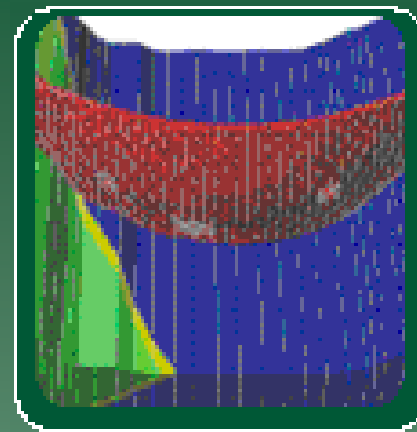
OVERVIEW



OPTIONS



NEW IN 4.1



SUMMARY



*3DEC*TM

مروری بر نرم افزارهای موجود در زمینه شبیه سازی به روش اجزای گسسته (نرم افزارهای تجاری)

<https://altair.com/edem/features>



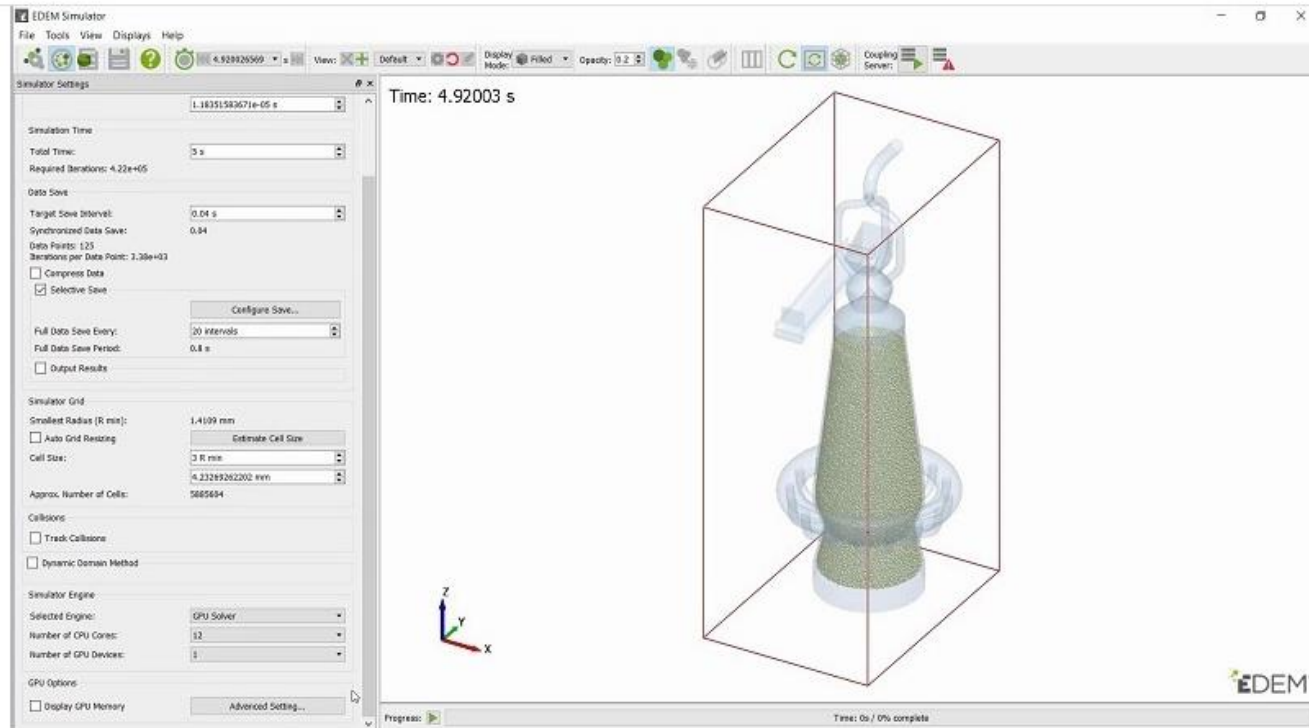
Why Altair

Products

Industries

Altair One

Resources



EDEM Simulator

مروری بر نرم افزارهای موجود در زمینه شبیه سازی به روش اجزای گسسته
(نرم افزارهای تجاری)



DEMSolutions

مروری بر نرم افزارهای موجود در زمینه شبیه سازی به روش اجزای گسسته (نرم افزارهای تجاری)

<https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-rocky>

Why Ansys ▾ Products & Services ▾ Learn ▾

Ansys

Search All Ansys



Home > Products > Fluids > Ansys Rocky

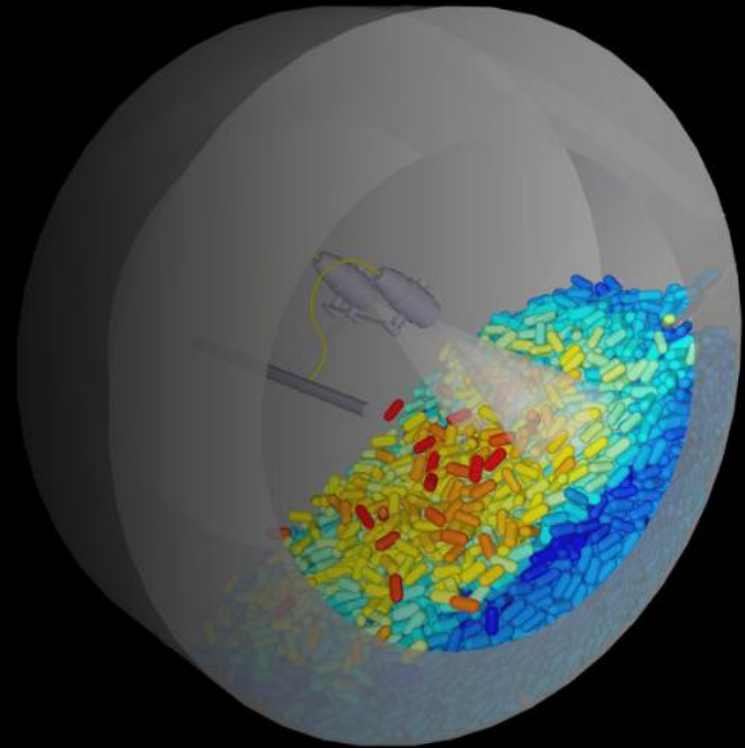
Ansys Rocky

Particle Dynamics Simulation Software

Ansys Rocky is the industry-leading discrete element method (DEM) software used for simulating the motion of granular and discontinuous material.

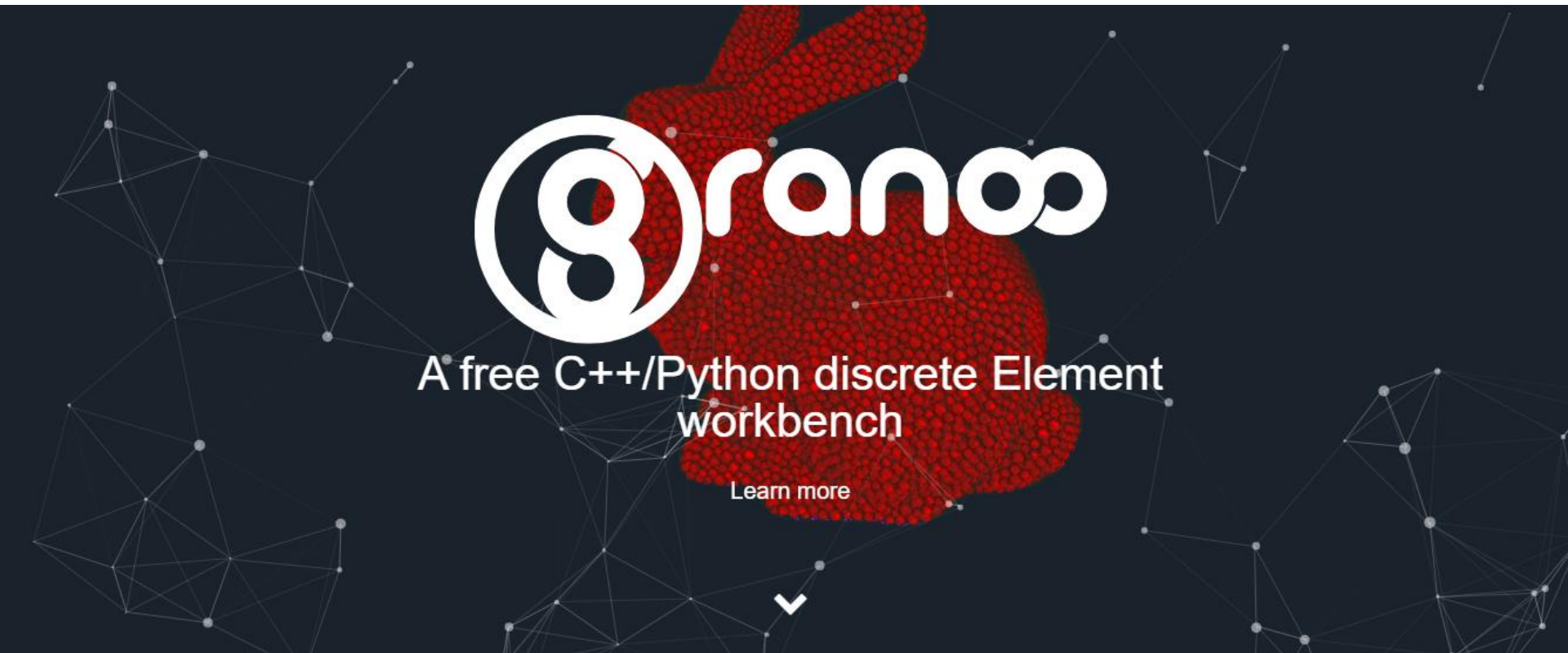
FREE TRIAL ▸

CONTACT US ▸



مروری بر نرم افزارهای موجود در زمینه شبیه سازی به روش اجزای گسسته (نرم افزارهای تجاری)

<https://www.granoo.org/>



What is GranOO ?

GranOO is **not a software**, GranOO is a collection of C++ libraries and tools that help users for building a specific DEM simulation. Python bindings have been recently released to improve user experience.

مروری بر نرم افزارهای موجود در زمینه شبیه سازی به روش اجزای گسسته (نرم افزارهای تجاری)

<http://www.applieddem.com/software/what-is-dem.aspx>



SOFTWARE

TRAINING

CONSULTING

COMPANY

BUY NOW

BULK FLOW ANALYST™

WHAT IS DEM

TRY IT!

PRE-PROCESSING

- CAD OPTIONS

- AUTOCAD

- DXF

- SOLIDWORKS

- BFA MODELER

- MATERIAL

CHARACTERIZATION

- ADVANCED SHAPES

- MATERIAL

CHARACTERIZATION

SIMULATIONS

- MOTION

CHARACTERIZATION

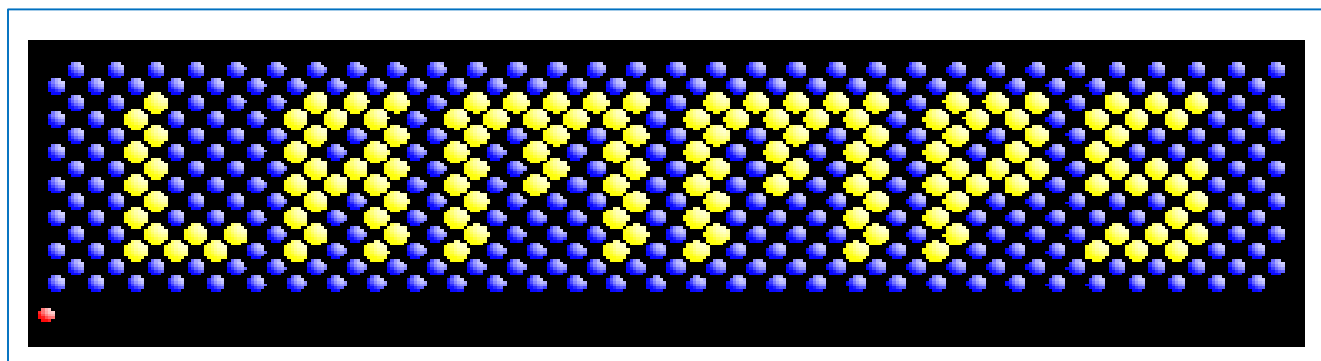
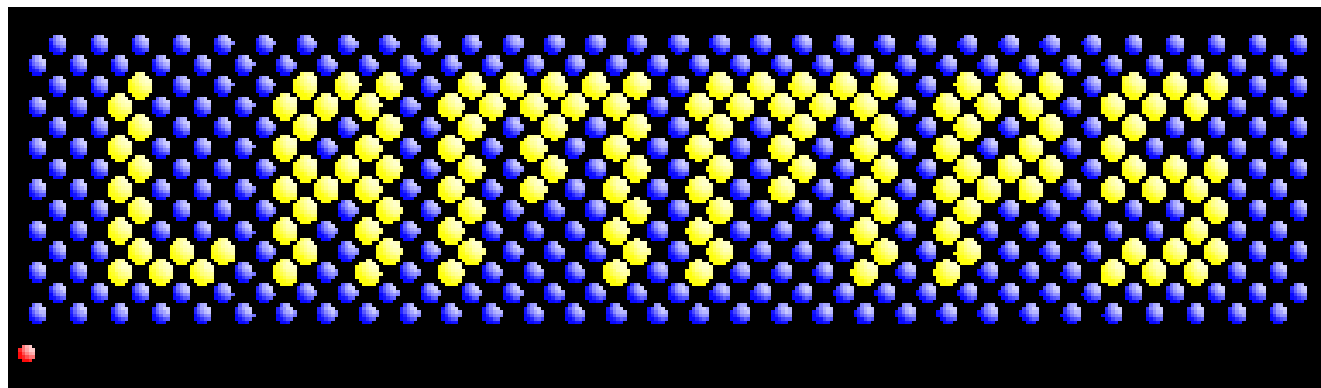
EXECUTION

WHAT IS DISCRETE ELEMENT MODELING?



Discrete Element Method, (DEM), is a set of modeling techniques and equations specifically used to solve problems in engineering and applied sciences that exhibit gross discontinuous mechanical behavior. DEM explicitly models the motion and mechanical interactions of each object in the physical problem throughout a

مروری بر نرم افزارهای موجود در زمینه شبیه سازی به روش اجزای گسسته (نرم افزارهای غیر تجاری و متن باز)

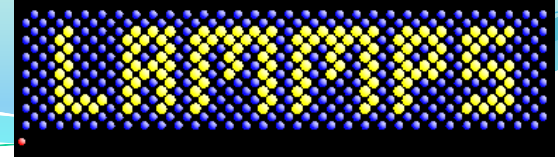
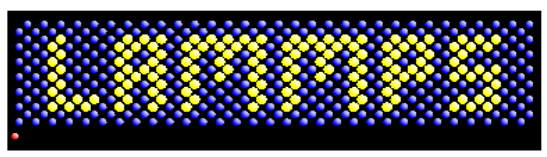


5/30/2012

Visitors

 1,777	 398
 1,300	 305
 660	 292
 580	 260
 558	 223
 442	 195

 **FLAG** counter



معرفی نرم افزار LAMMPS

❖ LAMMPS مخفف Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator و به معنای

شبیه ساز به طور گسترده موازی اتمی/مولکولی بزرگ مقیاس است.

❖ LAMMPS یک کد دینامیک مولکولی کلاسیک است که مجموعه ای از ذرات را در یک حالت مایع، جامد، یا

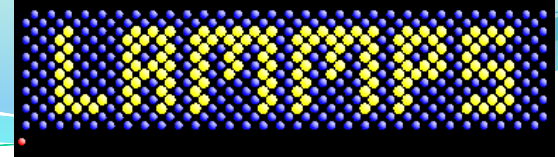
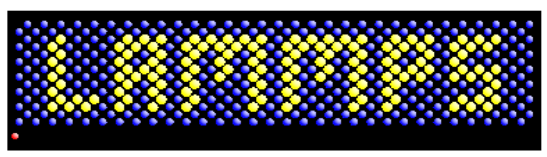
گاز مدل می کند.

❖ LAMMPS می تواند سیستم های اتمی، پلیمری، بیولوژیکی، فلزی، دانه ای، و درشت دانه را با استفاده از شرایط

مرزی و میدان های نیرو متفاوتی مدل کند.

❖ LAMMPS می تواند سیستم هایی با تنها تعداد محدودی ذره تا سیستم هایی با میلیون ها و یا حتی میلیارد ها ذره را

مدل کند.



معرفی نرم افزار LAMMPS

❖ LAMMPS مخفف Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator و به معنای

شبیه ساز به طور گسترده موازی اتمی/مولکولی بزرگ مقیاس است.

❖ LAMMPS یک کد دینامیک مولکولی کلاسیک است که مجموعه ای از ذرات را در یک حالت مایع، جامد، یا

گاز مدل می کند.

❖ LAMMPS می تواند سیستم های اتمی، پلیمری، بیولوژیکی، فلزی، دانه ای، و درشت دانه را با استفاده از شرایط

مرزی و میدان های نیرو متفاوتی مدل کند.

❖ LAMMPS می تواند سیستم هایی با تنها تعداد محدودی ذره تا سیستم هایی با میلیون ها و یا حتی میلیارد ها ذره را

مدل کند.

معرفی نرم افزار LIGGGHTS

<https://www.cfdem.com/about-cfdemrproject>

❖ LIGGGHTS یک نرم افزار متن باز شبیه سازی ذرات به روش اجزای گسسته است.

❖ LAMMPS Improved for General Granular and Granular Heat مخفف

Transfer Simulations و به معنای LAMMPS بهبود یافته برای شبیه سازی های دانه ای عمومی و انتقال حرارت دانه ای است.

About ▾

Aspherix® solver and GUI ▾

LIGGGHTS® ▾

CFDEM®coupling ▾

CFD ▾

Forums

Contact

DCS Computing



ANNOUNCEMENTS

Aspherix® and CFDEM®coupling Training in April / May 2023

Register for 4th Aspherix® and CFDEM® Conference in Linz / Austria in April 2023

Aspherix® Basic - easy-to use, lightweight & inexpensive DEM!

Open PhD position at Johannes Kepler University

More about Aspherix®, the successor of LIGGGHTS®

LIGGGHTS® OPEN SOURCE DISCRETE ELEMENT METHOD PARTICLE SIMULATION CODE

DEM stands for Discrete Element Method.

[Wikipedia article on DEM](#)

WHAT IS LIGGGHTS®?

LIGGGHTS® is an Open Source Discrete Element Method Particle Simulation Software. It can be used for the simulation of particulate materials, and aims to for applications it to industrial problems LIGGGHTS® is currently used by a variety of research institutions and companies world-wide.

LIGGGHTS®-PUBLIC features:

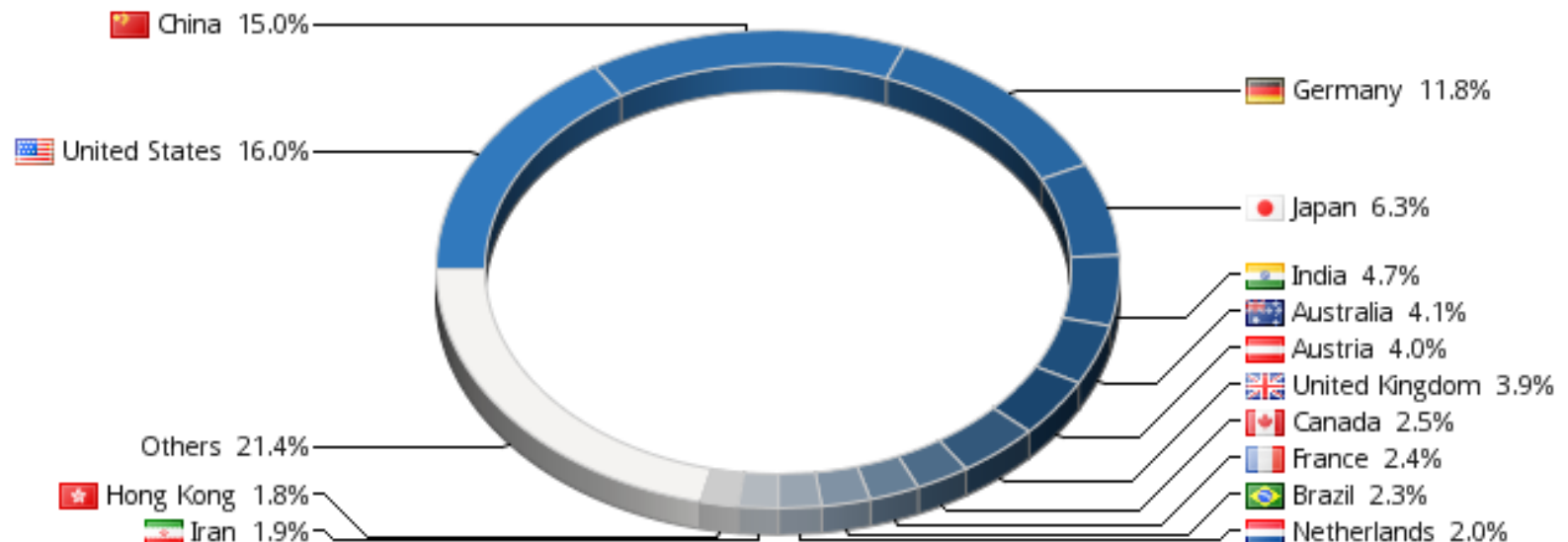
ANNOUNCEMENTS

Aspherix® and CFDEM®coupling Training in April / May 2023

Register for 4th Aspherix® and CFDEM® Conference in Linz / Austria in April 2023

Aspherix® Basic - easy-to use, lightweight & inexpensive DEM!

173 different countries have visited this site. 236 flags collected. [View all details »](#)

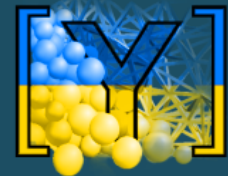


معرفی نرم افزار Yade

<https://yade-dem.org/doc/>

Yade | Documentation »

modules | index



Quick search

Go

Welcome to Yade - Open Source Discrete Element Method

The Yade project is a strong community based entirely on peaceful international cooperations. This diverse foundation has bound us to many brilliant scientists from Ukraine and Russia who are unjustly affected by the current hostilities perpetrated by Russia on Ukraine. We, the Yade developers and users, hope for the immediate cessation of aggression followed by the prompt restoration of peace in Ukraine. We stand with the people of Ukraine, the citizens of Russia, and the thousands of Russian scientists who [vehemently protest this war](#). As these scientists point out, this unlawful invasion puts many innocent lives at risk in both Ukraine and Russia. Without a doubt, we will continue to keep these Ukrainians and Russians in our thoughts as we await a peaceful conclusion ahead.

Yade is an extensible open-source framework for discrete numerical models, focused on the Discrete Element Method. The computation parts are written in c++ using a flexible object model and allowing independent implementation of new algorithms and interfaces. Python is used for rapid and concise scene construction, simulation control, postprocessing and debugging.

Yade is located at yade-dem.org, which contains [this documentation](#) and [wiki](#). Development is kindly hosted on [launchpad](#) and [GitLab](#) ; they are used for source code, bug tracking and source downloads and more. Building, regression tests and packages distribution are hosted on servers of the Grenoble Geomechanics group at Laboratoire 3SR, UMS Gricad and Gdańsk University of Technology.

Yade supports high precision calculations (following [this publication](#)) and Python 3 (see [backward compatibility](#) for Python 2). The development branch is on [GitLab](#).

This documentation describes Yade version 2024-02-09.git-0a8af55, see [changelogs](#). You can also download a PDF version of this documentation.

Acknowledging Yade

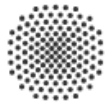
Please make sure you read the "Acknowledging Yade" section if you plan to use Yade for publications.

Documentation

معرفی نرم افزار Pasimodo

<https://www.itm.uni-stuttgart.de/en/software/pasimodo/>

University of Stuttgart > Faculty07 >



University of Stuttgart
Institute of Engineering and Computational
Mechanics



Home > Software > Pasimodo



Pasimodo

Pasimodo is a program package for particle-based simulation methods.

What is Pasimodo?

توزیع های مختلف لینوکس



توسعه دادن و کامپایل کردن نرم افزارهای LAMMPS/LIGGGHTS مستلزم آشنایی با سیستم عامل لینوکس و زبان های برنامه نویسی C، C++، فرترن و پایتون است.

CFD-DEM کوپل

SPH-DEM کوپل

SPH-FEM کوپل

Paul W. Cleary

Expertise:

- discrete element modelling (DEM)
- smooth particle hydrodynamics (SPH)
- coupled fluid flow-particulate flow-structure interaction
- mineral processing
- material forming
- biomed flow and structure deformations
- digital flow effects
- ship hydrodynamics and swimming
- pyroprocessing (smelting)
- geophysical flows (landslides, tsunamis, pyroclastic flows, dam breaks)



Dr Paul Cleary and his team work on the maths of moving materials.

Profile

Name: Dr Paul Cleary

Title: Leader, Computational Modelling

Qualifications:

- BSc (Hons)
- PhD

Current project: developing maths-based software for modelling flowing fluids in animation and games

Paul W. Cleary

فرآیند یا وسیله شبیه سازی شده	تعداد مقالات
Mixers	4
Ball Mill	3
Granular Flows	4
Hopper	1
Screw Feeder	1
Screening Processes	1
Screw Conveyor	2
Vezin Samplers	1
Mill/Tumbling Mills	2
Fluidized Beds	1
Sampler/Stream Cutters	3
AG/SAG Mill	4
Particle Beds	1
Rotating Drum	1
Particulate Materials	1
Rock Crushing	1
Stirred Mill	1
Banana Screen	3

روش اجزای گسسته (DEM)

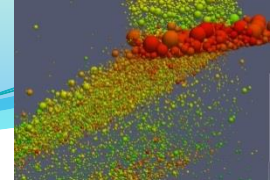
- ❖ روش اجزای گسسته (Discrete Element Method) یا راگ (DEM) یک روش عددی قدرتمند برای شبیه‌سازی کردن رفتار مکانیکی سیستم‌هایی با تعداد زیادی از ذرات است.
- ❖ تمرکز این روش بر روی حرکت و اندرکنش ذرات است، بنابراین ذرات فیزیکی واقعی، که طیفی را از پودرهای مقیاس میکرو تا تشکیلات سنگی عظیم در بر می‌گیرند، به صورت اجسام هندسی صلب نشان داده می‌شوند.
- ❖ رایج‌ترین مدل برای اندرکنش ذرات که در روش اجزای گسسته استفاده می‌شود **مدل هرتز (Hertz)** است.
- ❖ در طی سه دهه گذشته، با بهبود مدل‌های برخورد و قدرتمندتر شدن سیستم‌های کامپیوتری کاربردهای روش اجزای گسسته به سرعت افزایش یافته‌اند.
- ❖ در اینجا، کاربرد **ذرات کروی** بسیار رایج است. درحالی‌که شبیه‌سازی‌ها با ذرات کروی می‌توانند میلیون‌ها ذره را منظور کنند، استفاده از ذرات غیرکروی هنوز هم کار ساده‌ای نیست.

روش اجزای گسسته (DEM)

- ❖ در حالیکه برای ذرات کروی هندسه بوسیله **شعاع** توصیف می‌شود و نیروهای اندرکنشی می‌توانند به آسانی بوسیله قوانین برخورد مانند برخورد هرتزی محاسبه شوند، برای ذرات غیرکروی نمایش هندسه و محاسبه نیروهای برخورد بسیار پیچیده‌تر است.
- ❖ روش اجزای گسسته بر اساس یک **رویکرد لاگرانژی** است، بدین معنا که مواد دانه‌ای را به صورت مجموعه‌ای از ذرات مجزا تلقی می‌کند، که هر یک از آن‌ها بوسیله قوانین فیزیکی کنترل می‌شوند.
- ❖ هر یک از ذرات با همسایه‌هایش از طریق برخوردهای ذره به ذره‌ای که می‌توانند در هر **گام زمانی** تشکیل شوند یا شکسته شوند، اندرکنش می‌کند.
- ❖ گام زمانی در روش اجزای گسسته آنقدر کوچک انتخاب می‌شود که در طی یک گام زمانی آشفته‌گی‌های حاصل از هر ذره نمی‌توانند به بیشتر از **همسایگان بلا فصلش** تکثیر شوند. در هر گام زمانی متوالی، **نیروهای برآیند** روی هر ذره به طور انحصاری به وسیله **اندرکنش آن با ذرات مجاورش** تعیین می‌شوند.

روش اجزای گسسته (DEM)

- ❖ پیش‌بینی‌های راگ می‌توانند به آسانی از روی **داده‌های شبیه‌سازی** انجام شوند که به دست آوردن آن‌ها به طور تجربی **دشوار و پرهزینه** خواهد بود.
- ❖ نقطه قوت دیگر مدل‌سازی اجزای گسسته **سهولت انجام مطالعات پارامتری** برای مطالعه کردن اثرات خواص ذرات، شرایط فرآیند، یا طراحی تجهیزات است. بعلاوه، از آنجایی که راگ یک رویکرد گسسته است، ذرات می‌توانند **توزیعی از خواص** داشته باشند. بنابراین ذرات درون سیستم می‌توانند برای مثال توزیعی از اندازه‌ها داشته باشند.
- ❖ عیب روش راگ این است که گام زمانی باید **بی‌نهایت کوچک** انتخاب شود که این امر سبب افزایش شدید زمان شبیه‌سازی‌ها می‌شود.
- ❖ در سال‌های اخیر، افزایش شدید در **توان محاسباتی** قابل‌دسترس این امکان را به شبیه‌سازی‌های اجزای گسسته داده است که به ابزاری چندمنظوره برای کاربردهای صنعتی تبدیل شوند.
- ❖ با بلوغ شبیه‌سازی اجزای گسسته، اکنون اجرا کردن شبیه‌سازی‌هایی با میلیون‌ها ذره با شکل‌های پیچیده و نیروهای چسبنده بین ذرات در زمان‌های قابل‌تحمل در تک‌پردازنده‌ها (**کامپیوترهای رومیزی**) دارد ممکن می‌شود.

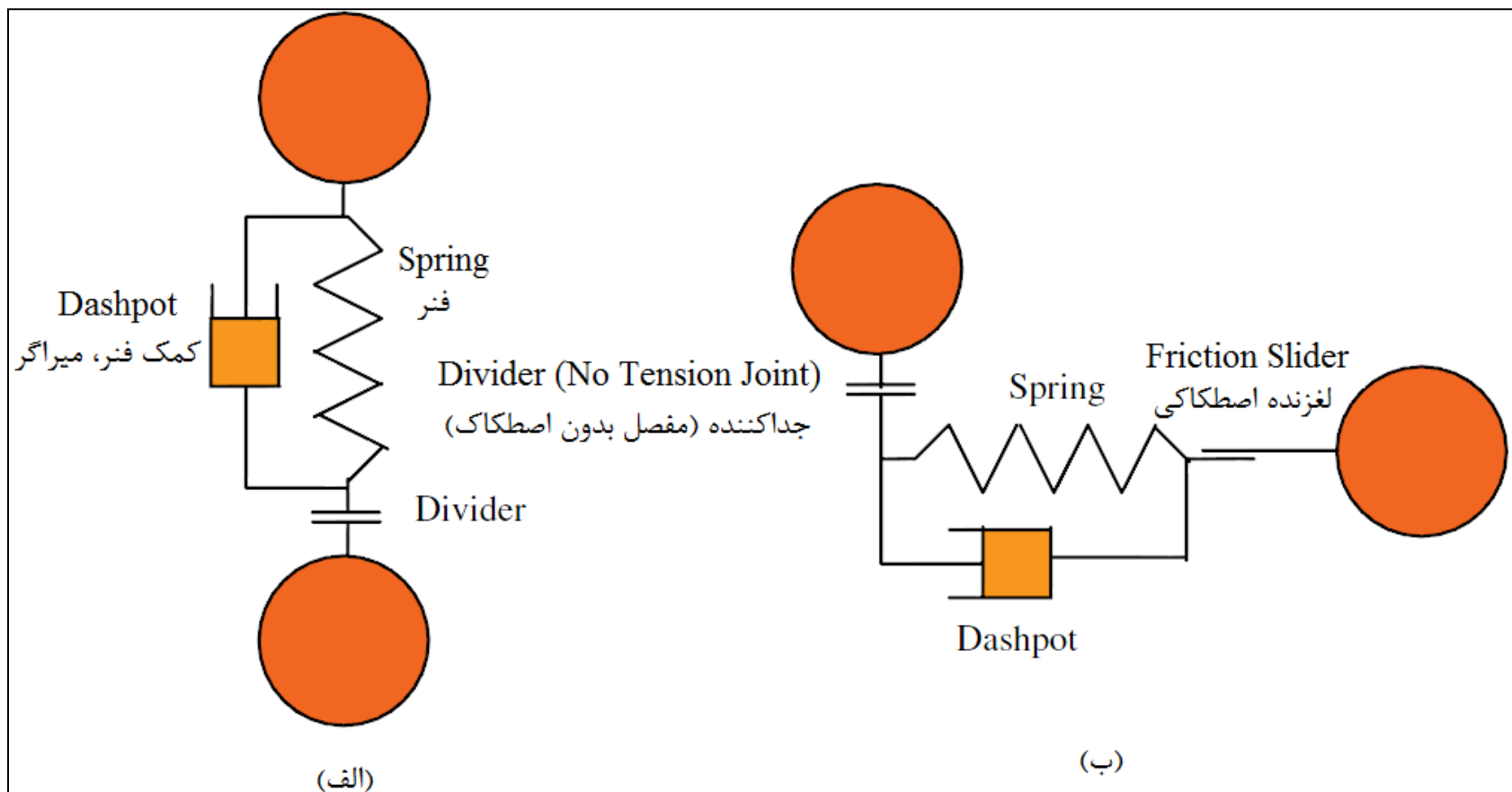


روش اجزای گسسته (راگ)

- روش اجزای گسسته (راگ) یک تکنیک عددی است که برای پیش‌بینی کردن رفتار جریان‌های ذراتی که در آن‌ها **برخورد** حاکم است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر یک از ذرات در این جریان ردیابی می‌شوند و همه برخوردها بین ذرات و بین ذرات و مرزها مدل می‌شوند.
- نوع راگ استفاده‌شده در لایتز گاهی اوقات روش **ذرات نرم** (soft particle) نامیده می‌شود. به ذرات اجازه داده می‌شود که همپوشانی داشته باشند و این میزان همپوشانی به همراه یک **قانون نیروی برخورد** برای تعیین کردن نیروهای لحظه‌ای حاصل از شناخت مکان‌ها، جهت‌ها، سرعت‌ها و چرخش‌های جاری ذرات مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- یک مدل برخورد دانه‌ای **هرتز-میندلین** (Hertz-Mindlin) جدید در لایتز پیاده‌سازی شده است. در این مدل برخورد، اندرکنش‌ها میان ذرات و ذره-دیوار بر طبق یک مدل **فنر-کمک فنر** (spring-dashpot) در جهات عمود و مماس بر خطوط مراکزشان هستند.

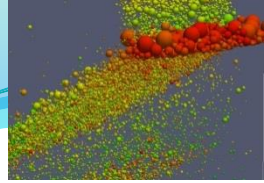
روش اجزای گسسته (راگ)

روش شبیه‌سازی



مدل های برخورد دو دیسک صلب که در تحلیل راگ استفاده می شوند: (الف) جهت عمود؛ (ب) جهت مماسی

روش اجزای گسسته (راگ)



این مدل دانه‌ای از فرمول زیر برای نیروی اصطکاکی بین دو ذره دانه‌ای استفاده می‌کند؛ هنگامی که فاصله r بین دو ذره با شعاع‌های R_i و R_j کمتر از فاصله تماسشان ($d = R_i + R_j$) است. هنگامی که $r > d$ ، هیچ نیرویی بین این ذرات وجود ندارد:

$$\mathbf{F} = (k_n \delta \mathbf{n}_{ij} - \gamma_n \mathbf{v} \mathbf{n}_{ij}) + (k_t \delta \mathbf{t}_{ij} - \gamma_t \mathbf{v} \mathbf{t}_{ij})$$

k_n = ثابت الاستیک برای برخورد عمود

$\delta \mathbf{n}_{ij} = d - r$ = همپوشانی عمود (فاصله همپوشانی دو ذره)

γ_n = ثابت میرایی ویسکوالاستیک برای برخورد عمود

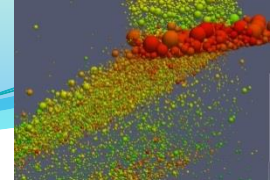
$\mathbf{v} \mathbf{n}_{ij}$ = سرعت عمود نسبی (مؤلفه قائم سرعت نسبی دو ذره)

k_t = ثابت الاستیک برای برخورد مماسی

$\delta \mathbf{t}_{ij}$ = همپوشانی مماسی (بردار جابجایی مماسی بین دو ذره کروی)

γ_t = ثابت میرایی ویسکوالاستیک برای برخورد مماسی

$\mathbf{v} \mathbf{t}_{ij}$ = سرعت مماسی نسبی (مؤلفه مماسی سرعت نسبی دو ذره)



روش اجزای گسسته (راگ)

برای مدل هرتز-میندلین، ضرایب k_n, k_t, γ_n و γ_t به صورت زیر از روی خواص مواد محاسبه می شوند:

$$k_n = \frac{4}{3} Y^* \sqrt{R^* \delta_n}$$

$$\gamma_n = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^*} \geq 0$$

$$k_t = 8 G^* \sqrt{R^* \delta_n}$$

$$\gamma_t = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^*} \geq 0$$

معادلات زیر می توانند برای دو ذره در حال تماس تعریف شوند:

$$S_n = 2 Y^* \sqrt{R^* \delta_n}$$

$$S_t = 8 G^* \sqrt{R^* \delta_n}$$

$$\beta = \frac{\ln(e)}{\sqrt{\ln^2(e) + \pi^2}}$$

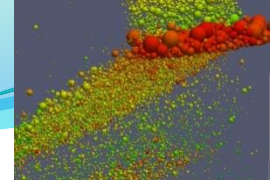
$$\frac{1}{Y^*} = \frac{(1-v_1^2)}{Y_1} + \frac{(1-v_2^2)}{Y_2} \quad \frac{1}{m^*} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}$$

$$\frac{1}{G^*} = \frac{2(2+v_1)(1-v_1)}{Y_1} + \frac{2(2+v_2)(1-v_2)}{Y_2}$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

که در آن ها Y مدول یانگ است، G مدول برشی است، v نسبت پواسون است، e ضریب استرداد است، m جرم است و R شعاع یک ذره است. اندیس های 1 و 2 نماینده دو ذره در تماس است.

$$G = \frac{Y}{2(1+v)}$$



روش اجزای گسسته (راگ)

برای هر ذره، حرکت انتقالی و حرکت دورانی، که می‌توانند بوسیله قانون دوم حرکت نیوتن توصیف شوند، به ترتیب زیر تعیین می‌شوند:

$$\dot{\mathbf{v}} = \frac{\sum \mathbf{F}}{m} + \mathbf{g}$$
$$\dot{\boldsymbol{\omega}} = \frac{\sum \mathbf{M}}{I}$$

که در آن‌ها $\mathbf{v}$ بردار سرعت یک ذره است، $\mathbf{F}$ نیروی برخوردی است که روی یک ذره عمل می‌کند، m و $\mathbf{g}$ جرم یک ذره و شتاب گرانشی هستند، $\boldsymbol{\omega}$ بردار سرعت زاویه‌ای است، $\mathbf{M}$ و I بر گشتاور ناشی از نیروی مماسی و گشتاور لختی (Moment of inertia) دلالت می‌کنند.



معرفی نرم افزارهای شبیه سازی راگ

نرم افزارهای متن باز	نرم افزارهای تجاری
Ascalaph	Bulk Flow Analyst TM
BALL & TRUBAL	Chute Analyst TM
dp3D	Chute Maven [®]
ESyS-Particle	EDEM [®]
LAMMPS	ELFEN
LIGGGHTS	GROMOS 96 TM
SDEC	MIMES
LMGC90	PASSAGE [®] /DEM
Pasimodo	PFC2D TM & PFC3D TM
Yade	SimPARTIX [®]
MechSys	STAR-CCM+
-	UDEC TM and 3DEC TM
-	DEMPack
-	MFiX
-	KMPCDEM

نرم افزارهای تخصصی در زمینه راگ به دو صورت وجود دارند:

➤ دسته اول نرم افزارهای تجاری هستند که هزینه اجاره آنها بسیار قابل توجه است و امکان تهیه آنها برای همگان وجود ندارد.

➤ دسته دوم نرم افزارهای متن باز هستند که به صورت آزادانه و رایگان در دسترس هستند، این نرم افزارها اکثراً در سیستم عامل ویندوز قابل اجرا نیستند و تنها در سیستم عامل های مبتنی بر لینوکس قابل اجرا هستند. از آن جایی که نرم افزارهای متن باز به صورت کدهای منبع هستند، کامپایل کردن این کدها و ساختن فایل اجرایی از آنها بسیار دشوار است و انجام این کار تنها در سیستم عامل های مبتنی بر لینوکس امکان پذیر است.



معرفی نرم افزارهای شبیه سازی راگ

به منظور شبیه سازی های راگ، نسخه ای از بسته نرم افزاری لایتز مطابق با نیازها توسعه داده شد.

❖ LAMMPS Improved for General Granular and مخفف

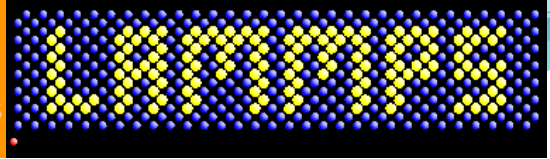
Granular Heat Transfer Simulations و به معنای LAMMPS بهبود یافته برای

شبیه سازی های دانه ای عمومی و انتقال حرارت دانه ای است.

❖ LAMMPS Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel مخفف

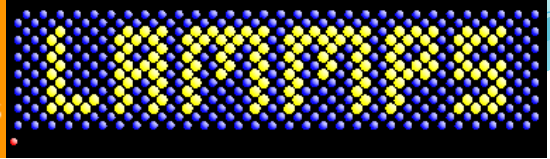
Simulator و به معنای شبیه ساز به طور گسترده موازی اتمی/مولکولی بزرگ مقیاس

است.



ویژگی‌های لمپس و لایتر

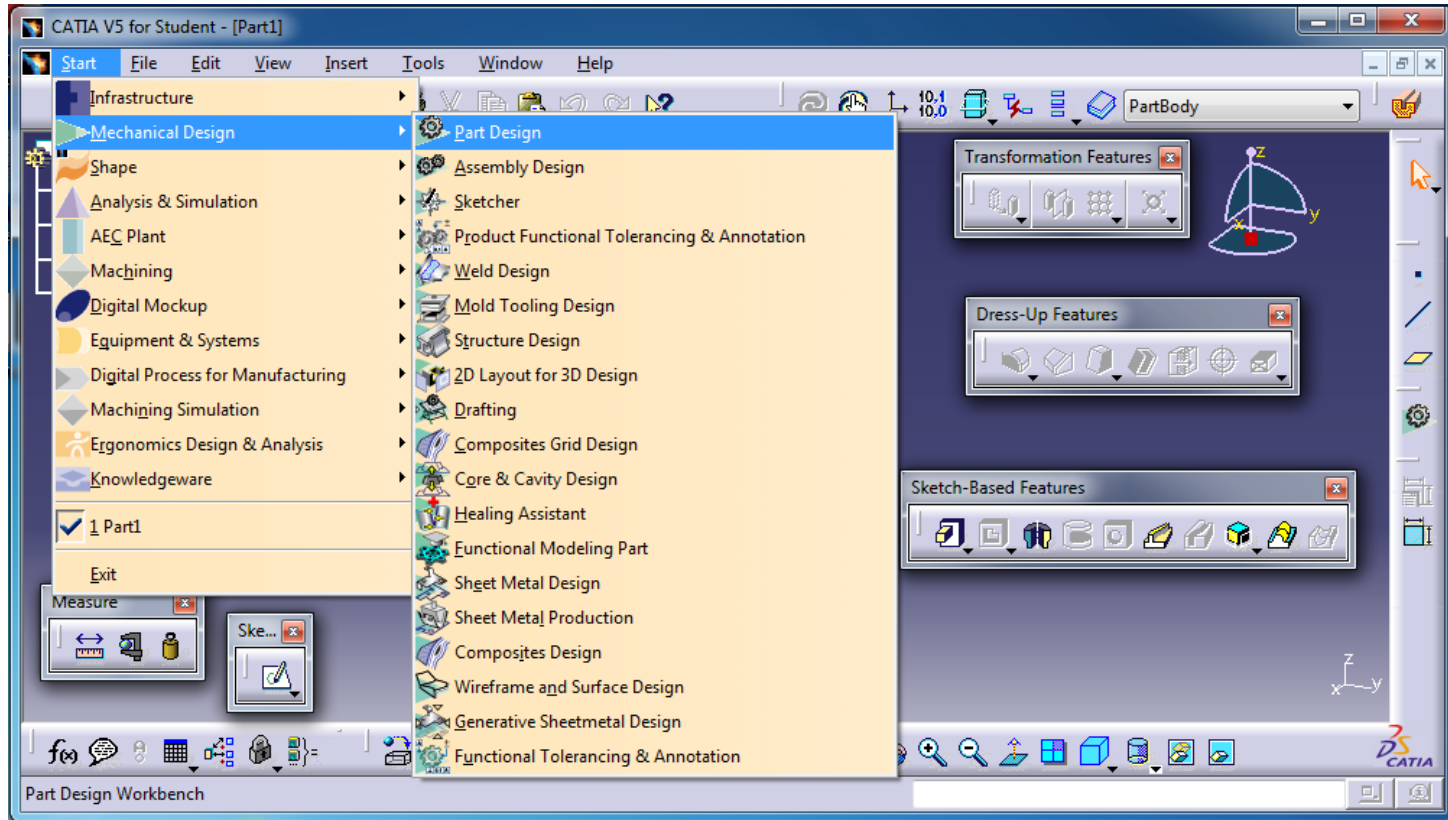
- لمپس یک شبیه‌ساز موازی ذرات در مقیاس اتمی، مزو، یا پیوسته است. اگر ذرات دانه‌ای درشت‌دانه شبیه‌سازی شوند، این روش راگ نامیده می‌شود.
- لمپس پیاده‌سازی‌ها را برای پتانسیل‌های دانه‌ای **خطی (هوک)** و **غیرخطی (هرتز)** هر دو ارائه می‌دهد.
- لایتر این ویژگی‌ها را برای شبیه‌سازی‌های دانه‌ای بهبود می‌دهد، این ویژگی‌های بهبودیافته شامل وارد کردن هندسه از **فایل‌های CAD** (از نرم‌افزارهایی مانند SolidWorks و Catia برای ترسیم هندسه استفاده می‌شود و فایل حاصل با فرمت stl ذخیره می‌شود.) و قابلیت **مش متحرک**، امکانات برای درج ذرات و بسته‌بندی، مدل‌های برخورد متعدد، ذرات غیرکروی که بوسیله روش چندکره‌ای کنترل می‌شوند، یک مدل ذرات پیوندیافته، تحلیل تنش دیوار و پیش‌بینی فرسودگی، و قابلیت شش درجه آزادی برای اجسام صلب می‌شوند.



ویژگی‌های لمپس و لایتز

- لایتز و لمپس هر دو در پردازنده‌های تکی یا به صورت موازی با استفاده از تکنیک‌های عبوردهنده پیام (Message Passing Interface (MPI)) و تجزیه مکانی (spatial-decomposition) حوزه شبیه‌سازی اجرا می‌شوند.
- این کد به نحوی طراحی شده است که تغییر، بهبود، اصلاح و گسترش آن با قابلیت‌های جدید آسان باشد.
- در کاربرد نرم‌افزار لایتز، برنامه‌نویسی کردن برای مدل‌های برخورد تعریف‌شده توسط کاربر امکان‌پذیر است اما هیچ رابط کاربری وجود ندارد و همه کد برای توصیف فرآیند شبیه‌سازی باید به صورت متن درآورده شود.

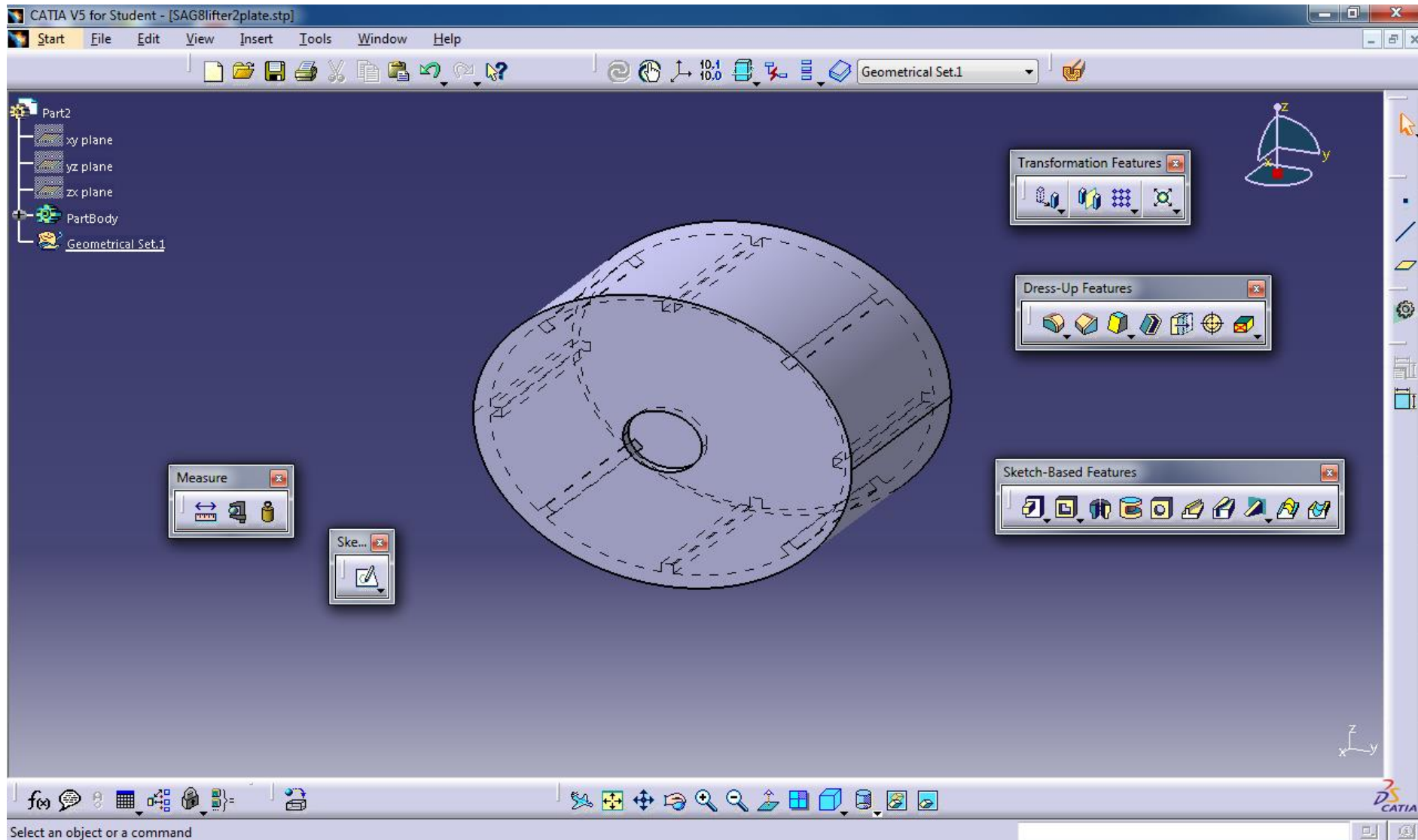
پیش پردازش شبیه سازی های لایتر با CATIA و gms



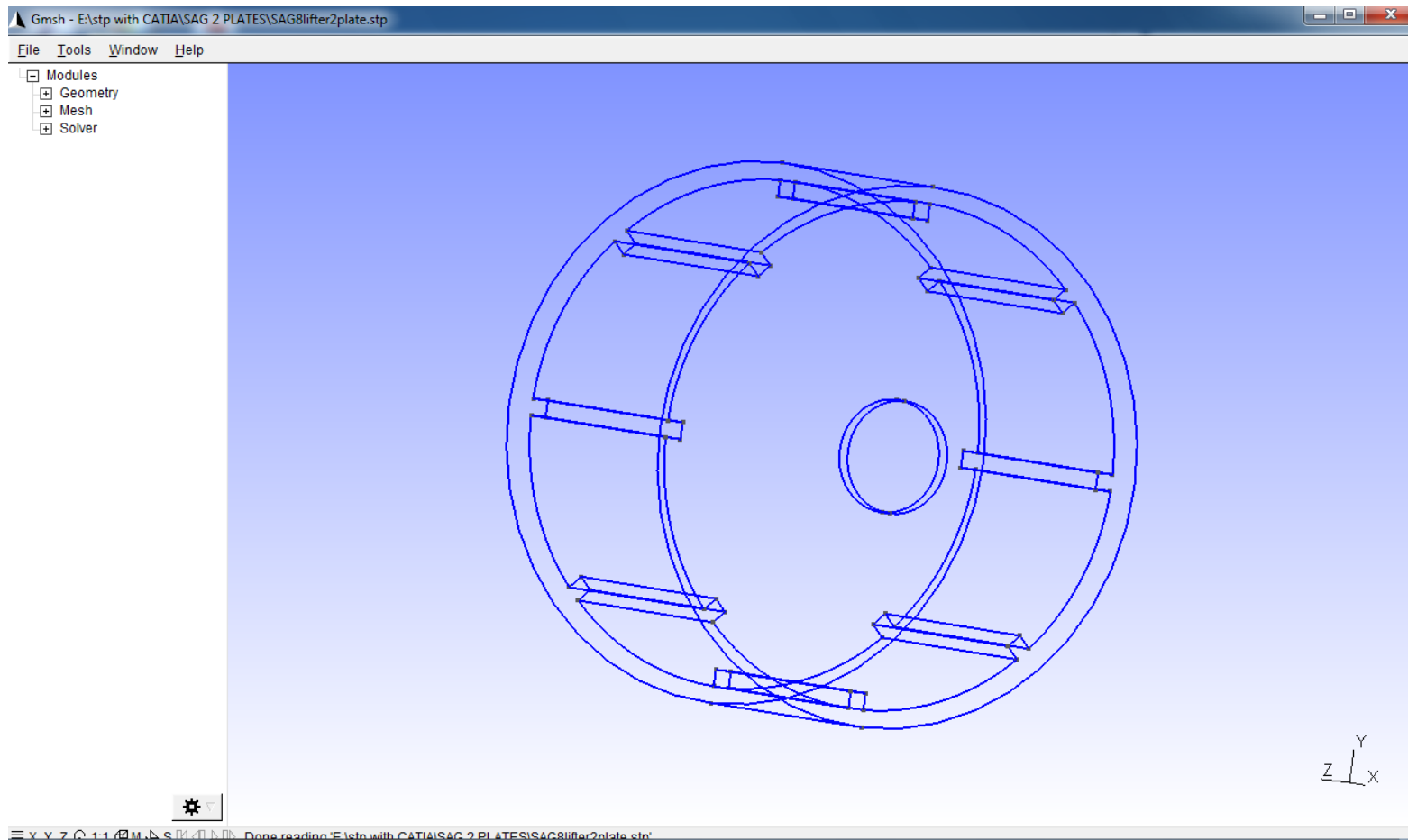
ایجاد هندسه با فرمت STEP (stp).



پیش پردازش شبیه سازی های لایتر با CATIA و gmsh

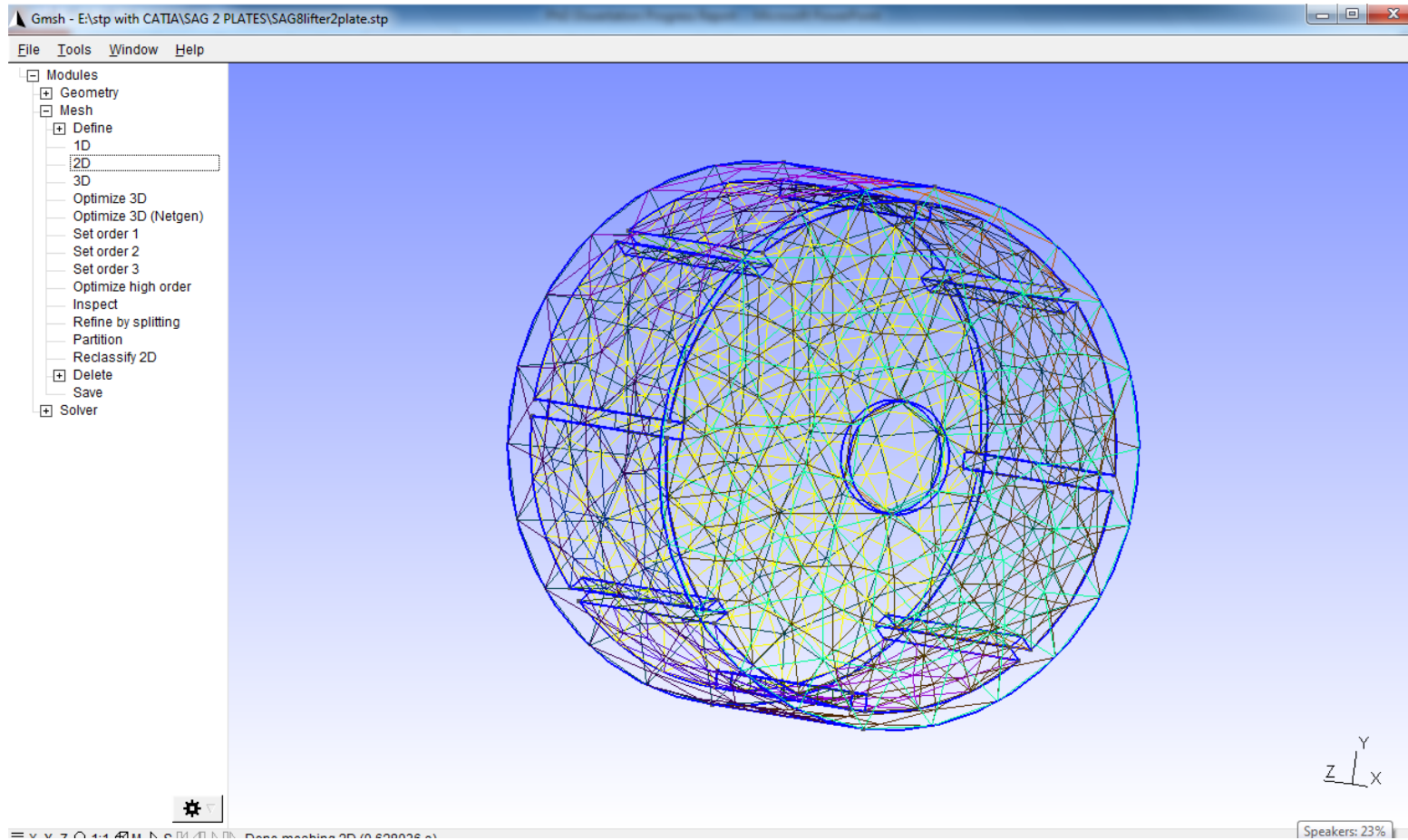


پیش پردازش شبیه سازی های لایتر با CATIA و gmsh



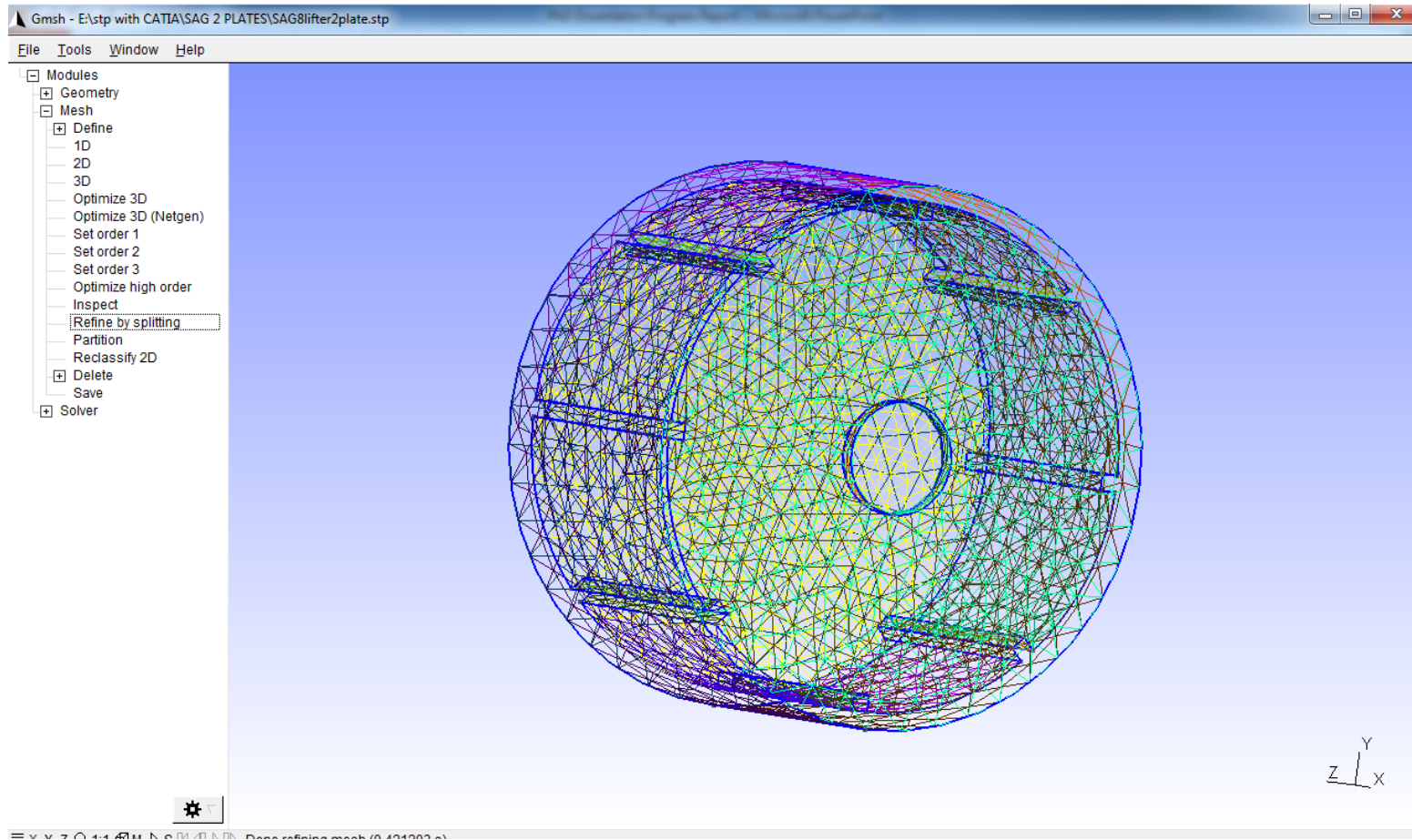
مش بندی و تبدیل فرمت stp به stl توسط نرم افزار gmsh انجام می شود.

پیش پردازش شبیه سازی های لایتر با CATIA و gmsh



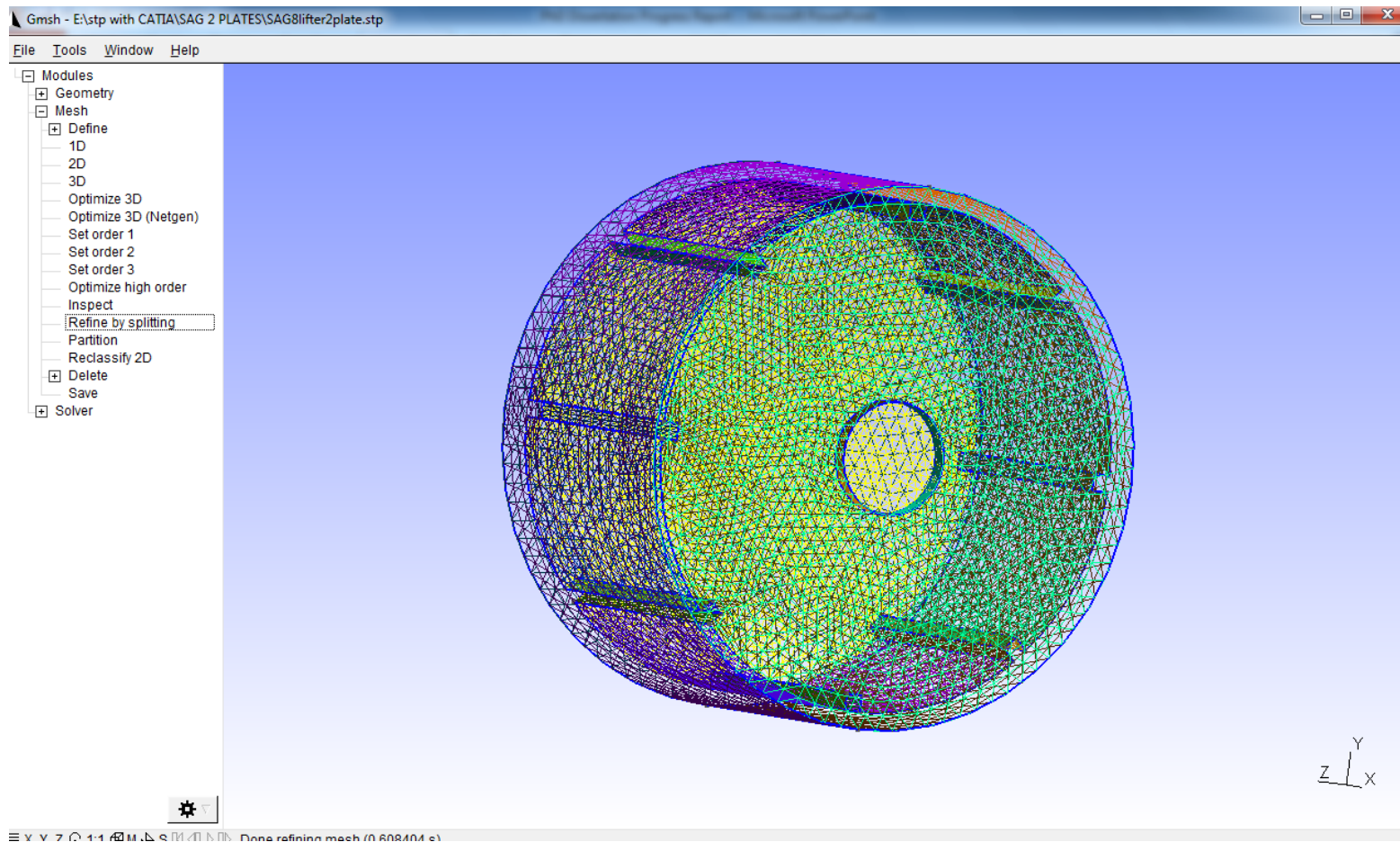
مش بندی و تبدیل فرمت stp به stl توسط نرم افزار gmsh انجام می شود.

پیش پردازش شبیه سازی های لایتر با CATIA و gmsh



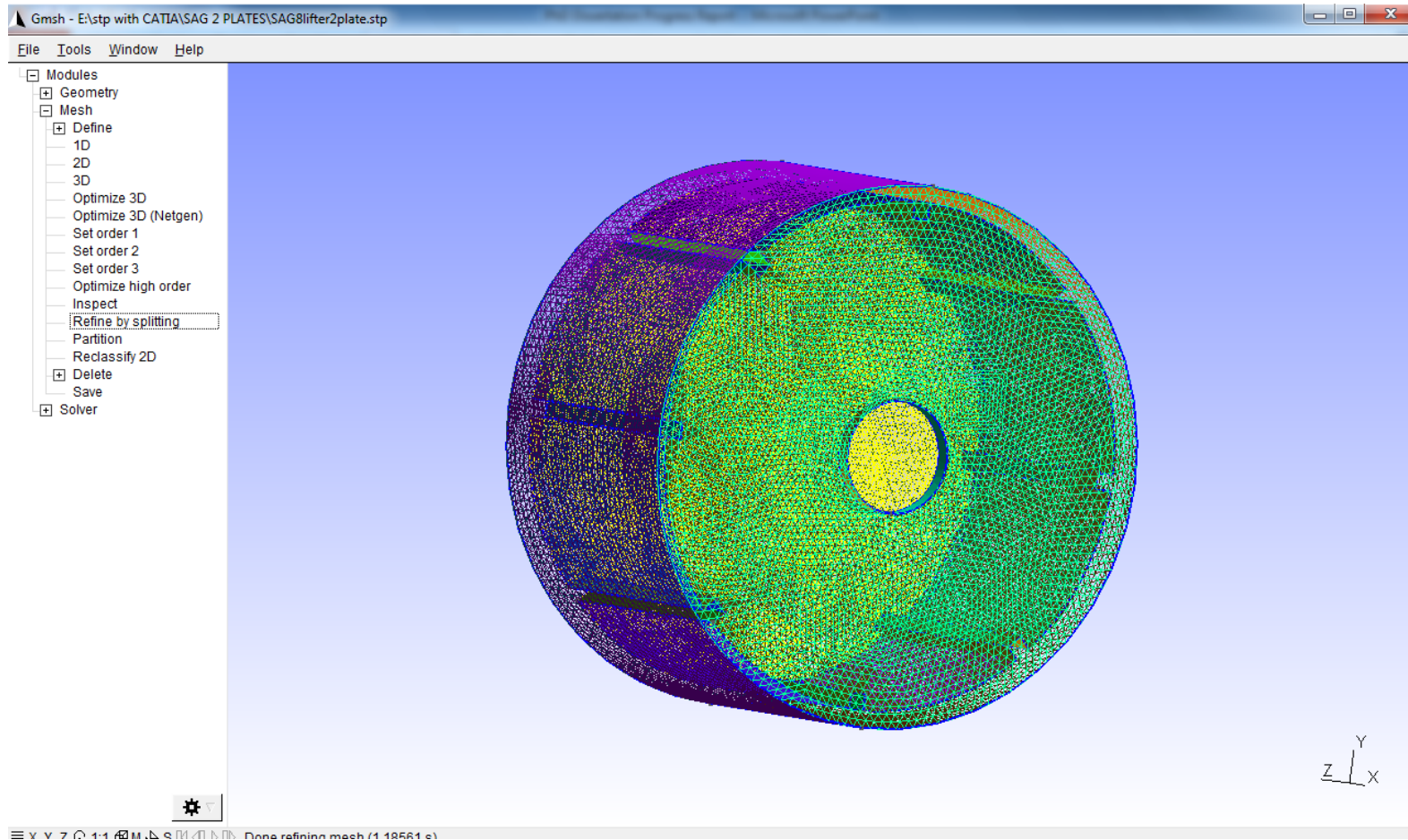
مش بندی و تبدیل فرمت stp به stl توسط نرم افزار gmsh انجام می شود.

پیش پردازش شبیه سازی های لایتر با CATIA و gmsh



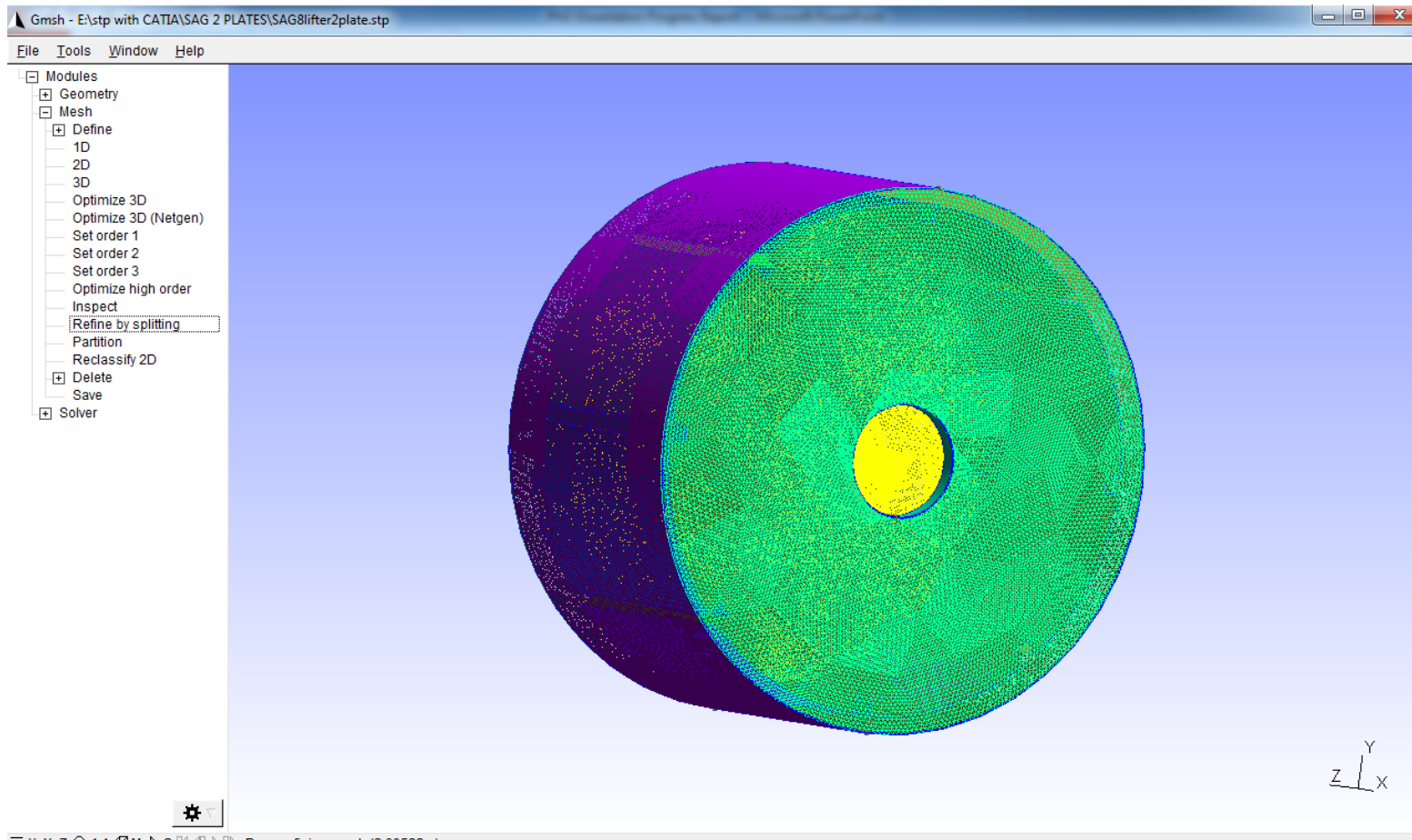
مش بندی و تبدیل فرمت stp به stl توسط نرم افزار gmsh انجام می شود.

پیش پردازش شبیه سازی های لایتر با CATIA و gmsh



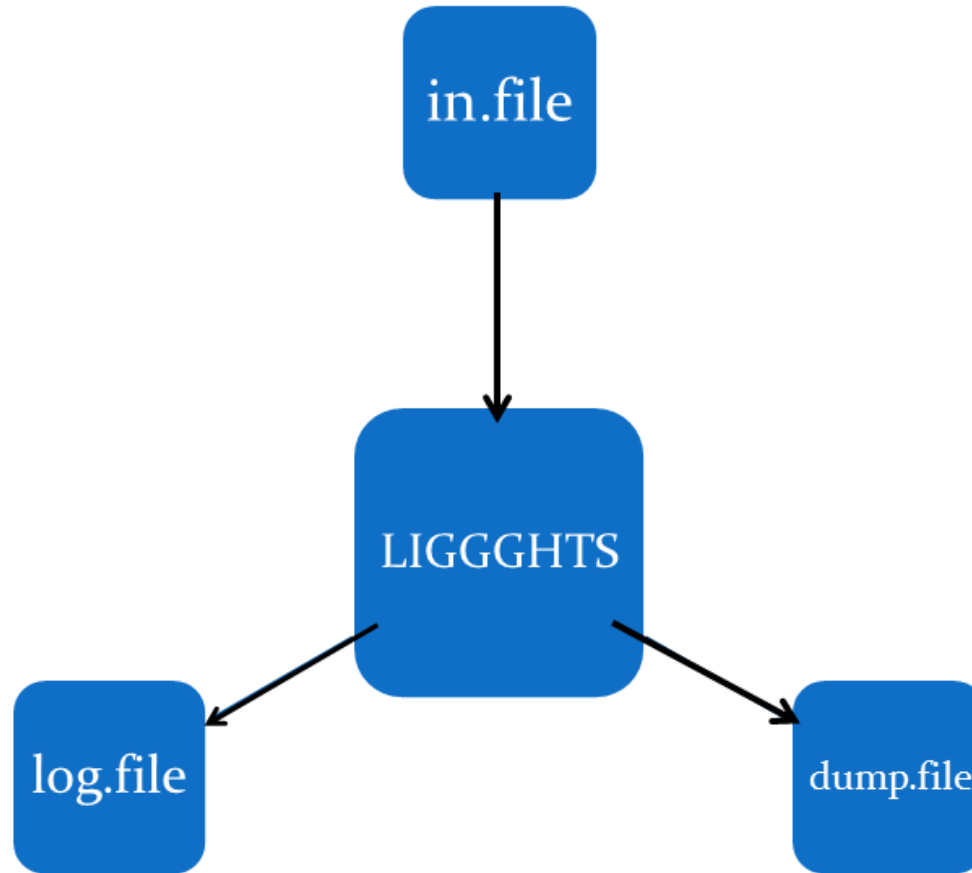
مش بندی و تبدیل فرمت stp به stl توسط نرم افزار gmsh انجام می شود.

پیش پردازش شبیه سازی های لایتر با CATIA و gmsh



مش بندی و تبدیل فرمت stp به stl توسط نرم افزار gmsh انجام می شود.

نحوه پردازش در لایتر

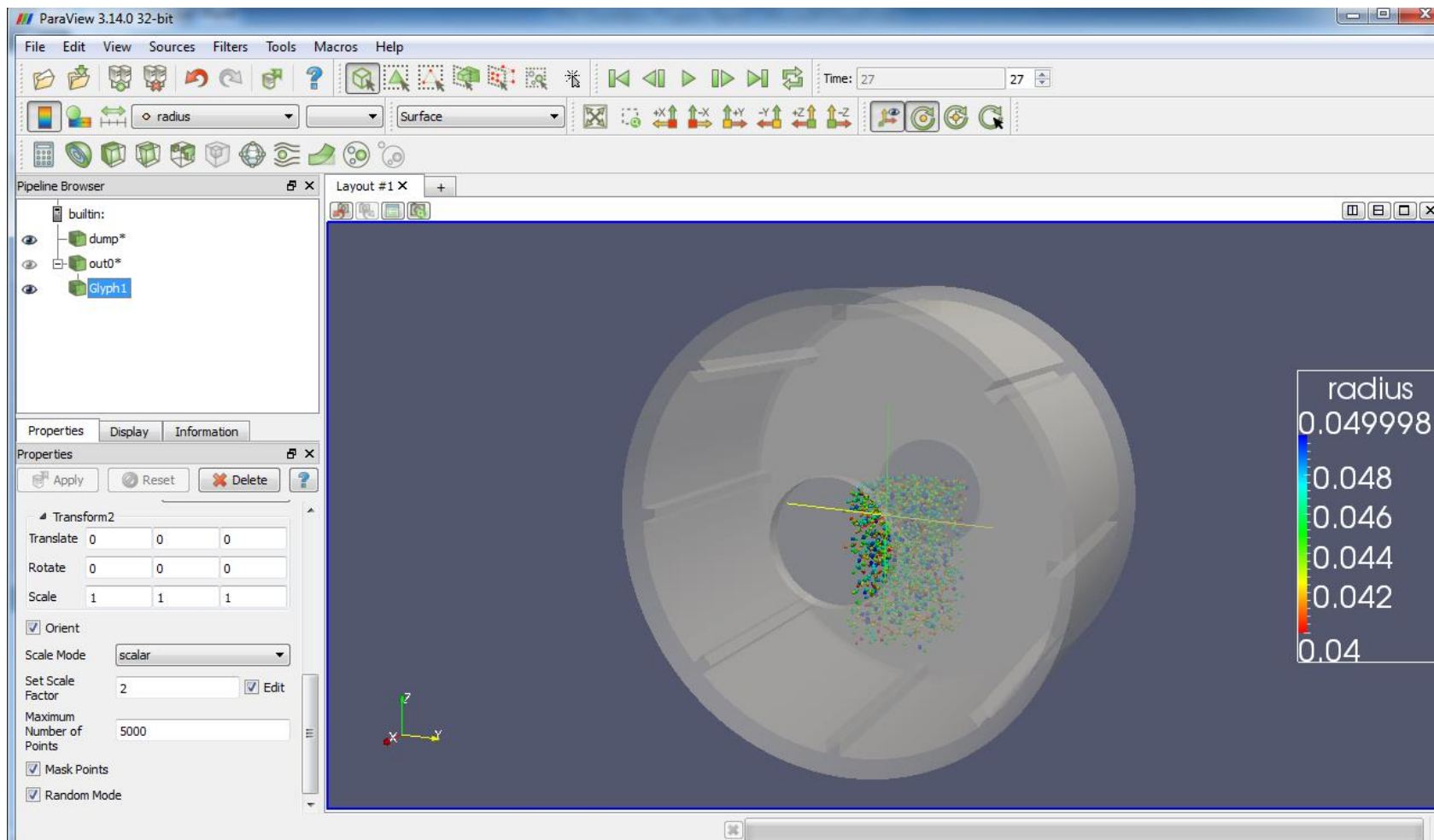


پس پردازش شبیه سازی های لایتر با Pizza.py و Paraview



تبدیل فایل های dump به فرمت vtk توسط Pizza انجام می شود.

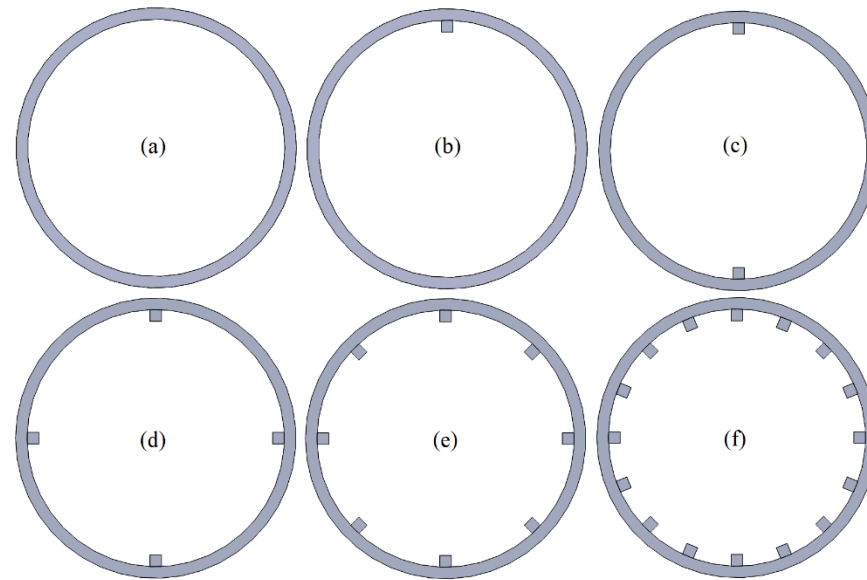
پس پردازش شبیه سازی های لایتر با Pizza.py و Paraview



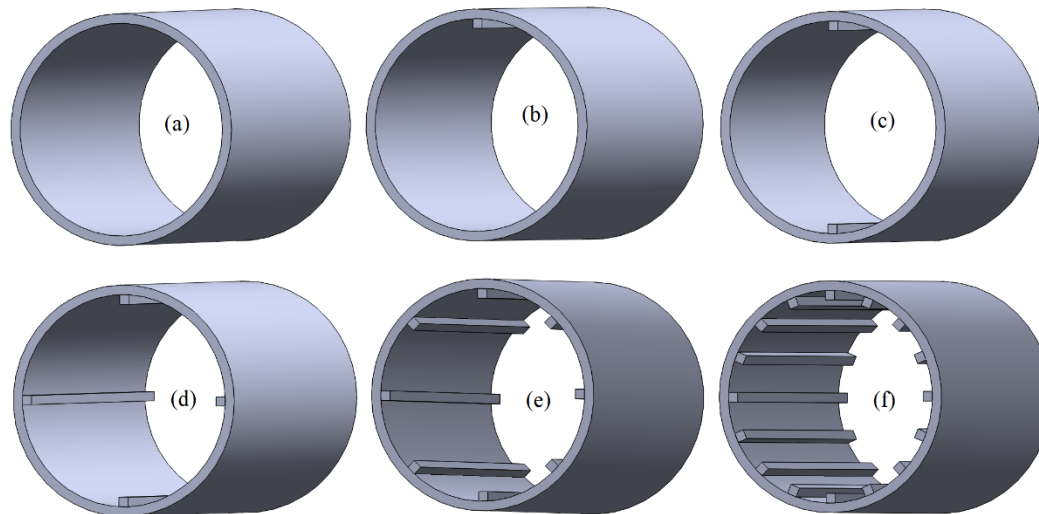
خواندن فایل های با فرمت vtk و انجام شبیه سازی توسط نرم افزار ParaView انجام می شود.

شبیه‌سازی آسیاهای گلوله‌ای مقیاس پایلوت و صنعتی

(A)



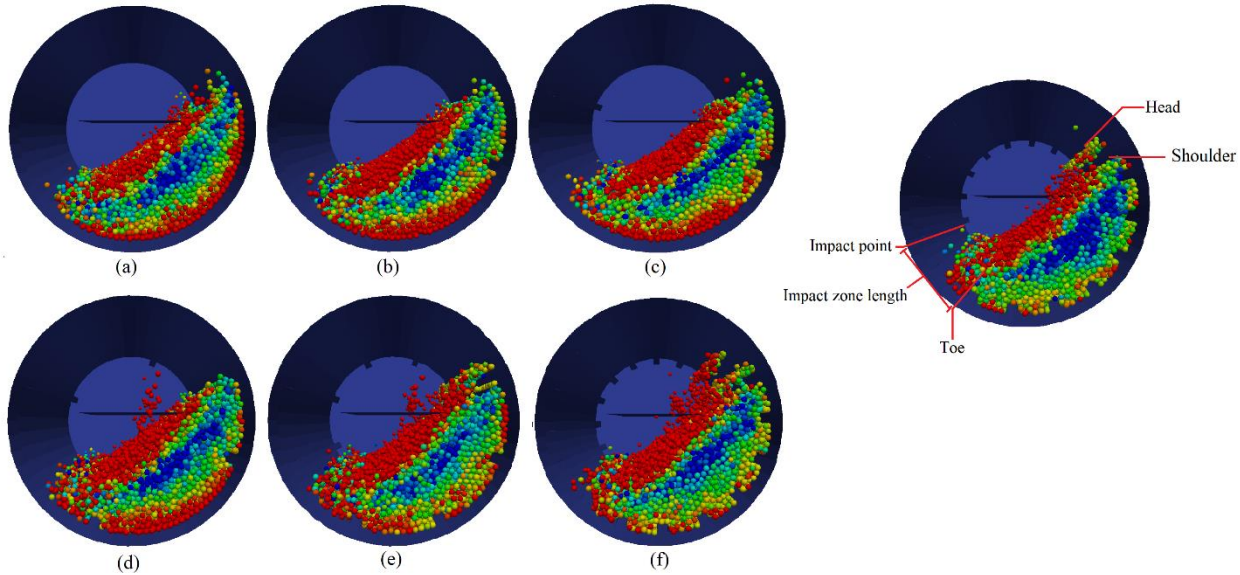
(B)



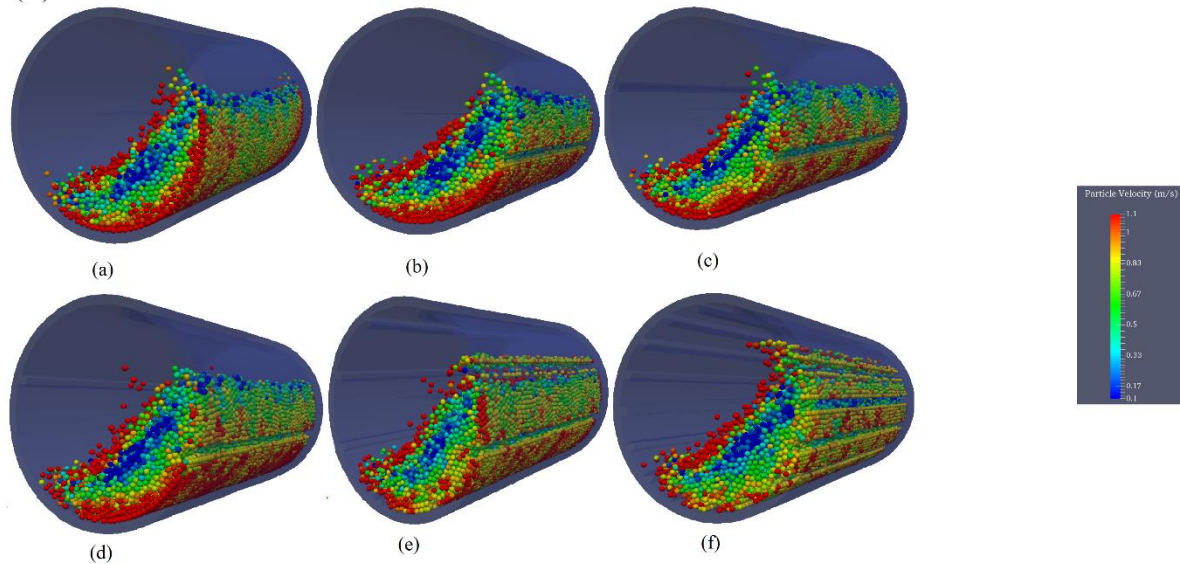
شبیه‌سازی آسیاهای گلوله‌ای مقیاس پیلوت و صنعتی

80% of Critical Speed

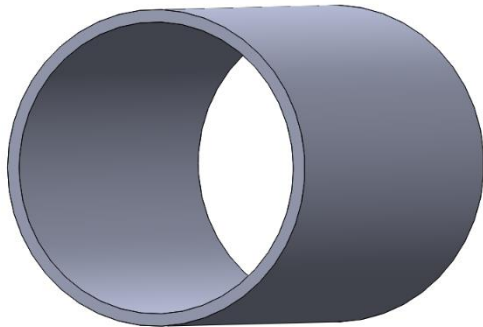
(A)



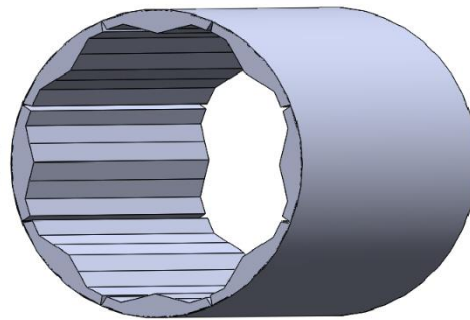
(B)



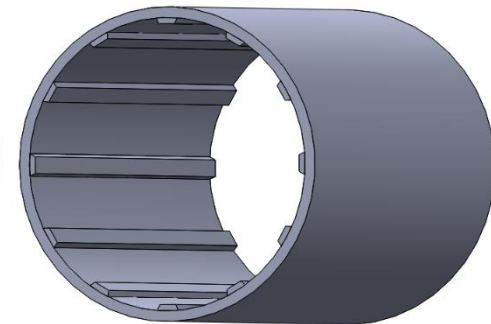
شبه‌سازی آسیاهای گلوله‌ای مقیاس پایلوت و صنعتی



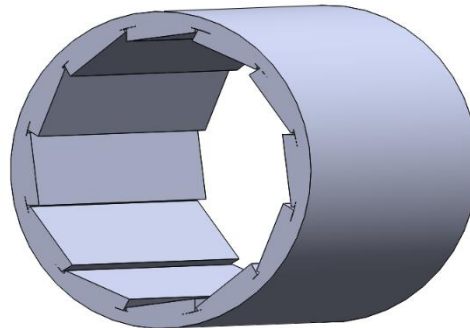
Smooth



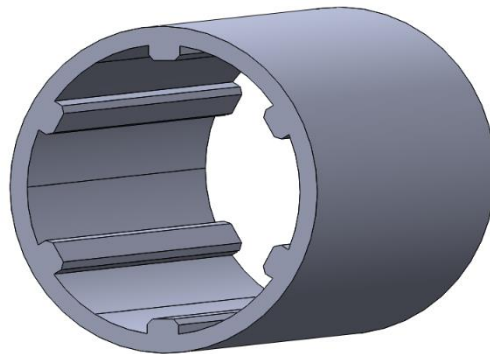
Wave



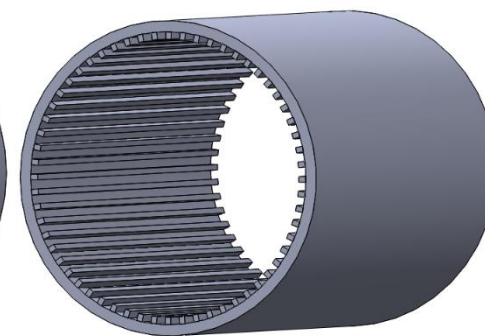
Rib



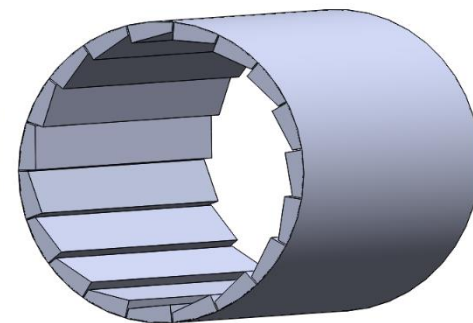
Ship-lap



Lorain



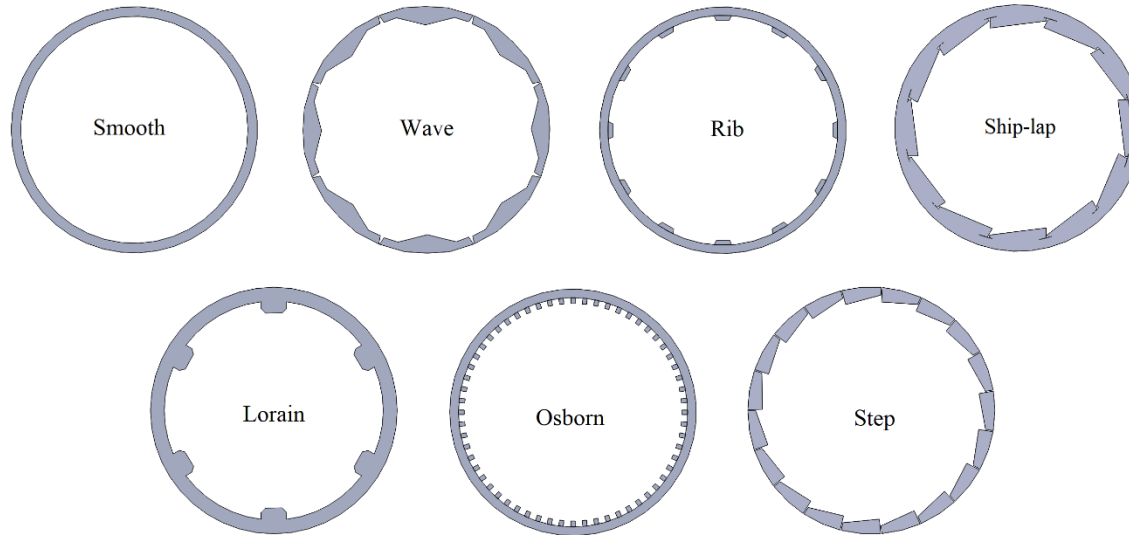
Osborn



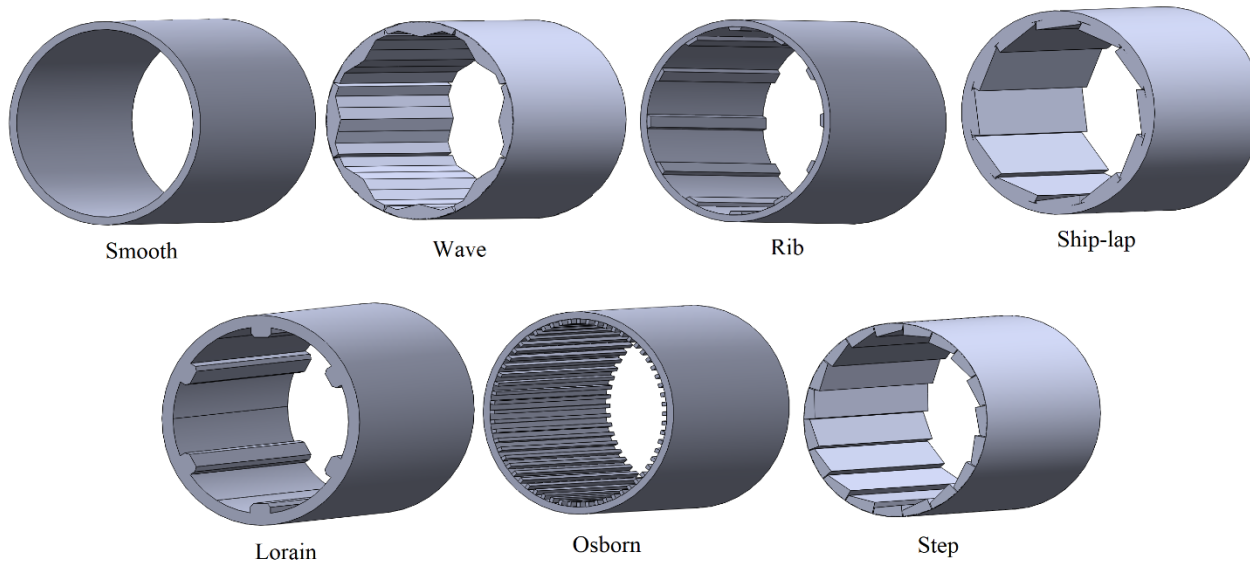
Step

شبه‌سازی آسیاهای گلوله‌ای مقیاس پایلوت و صنعتی

(a)

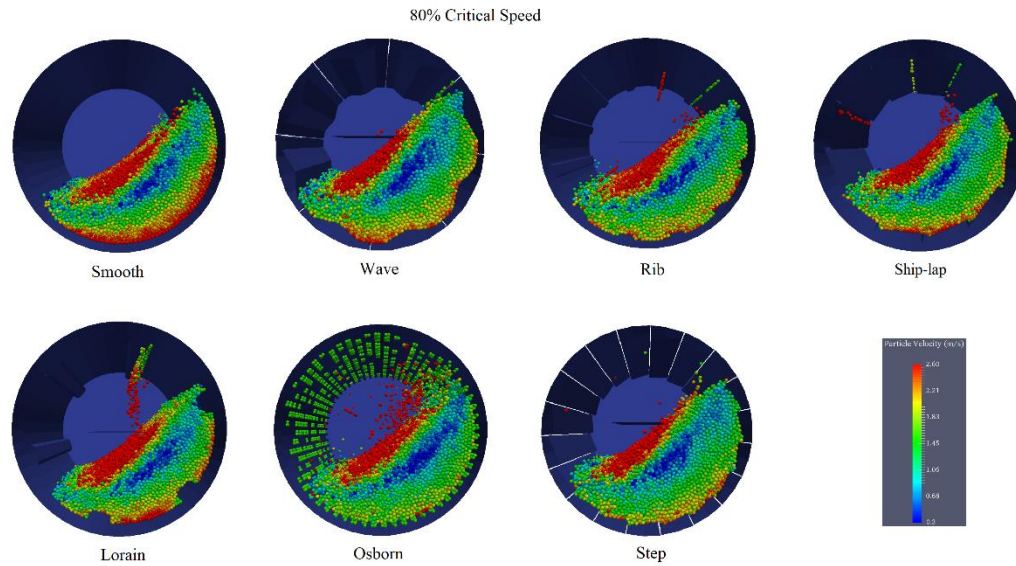


(b)

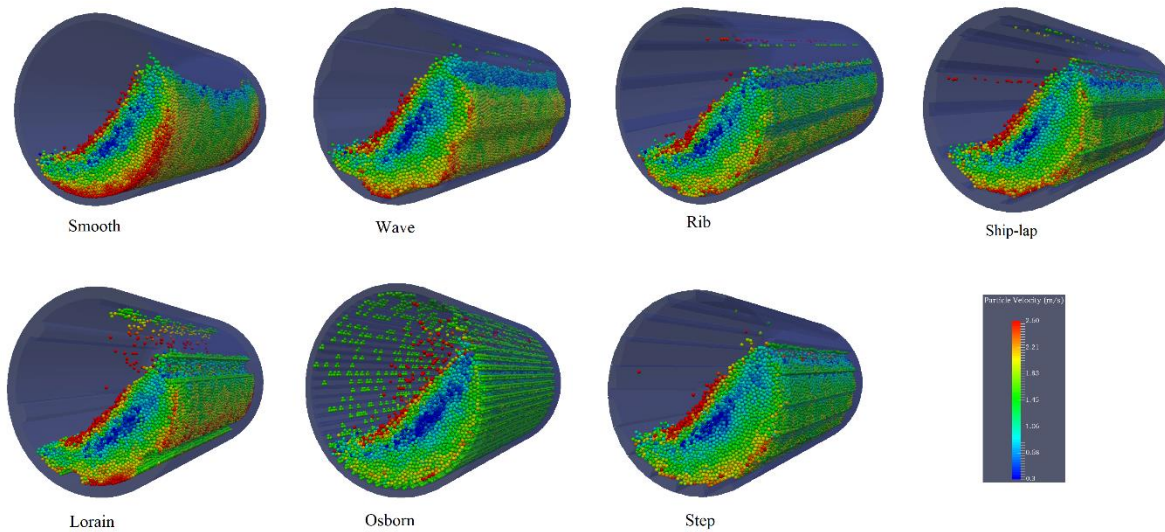


شبیه‌سازی آسیاهای گلوله‌ای مقیاس پایلوت و صنعتی

(a)

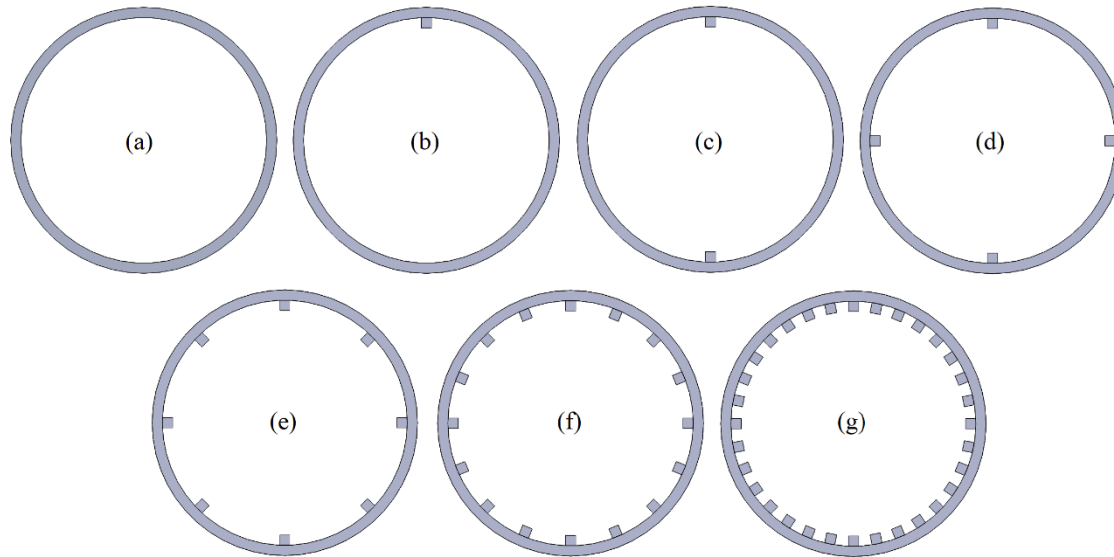


(b)

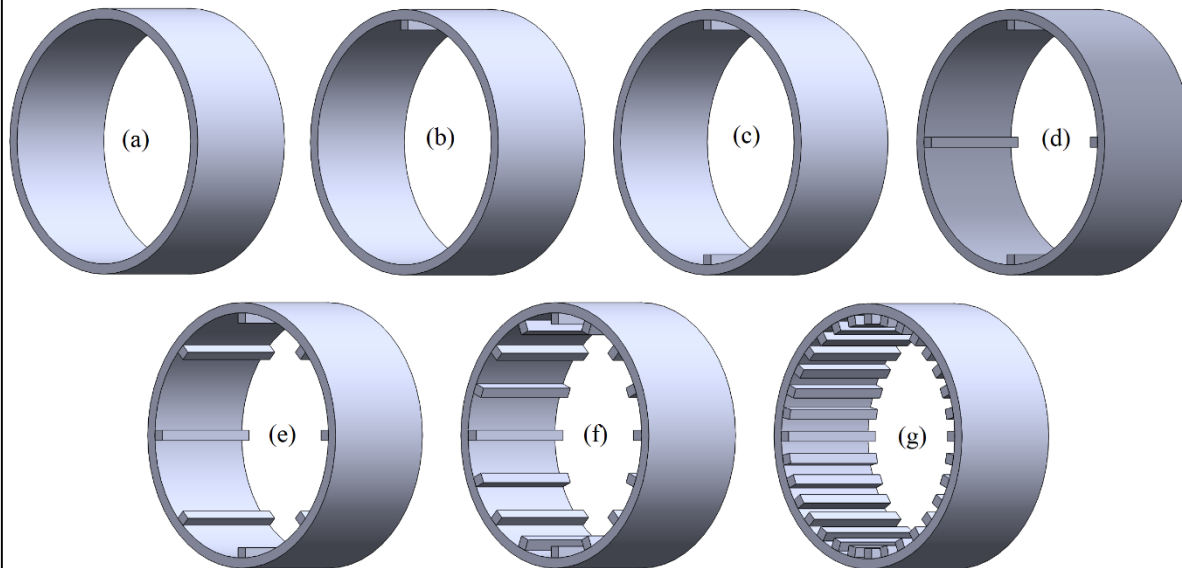


شبیه‌سازی آسیاهای نیمه‌خودشکن مقیاس پیلوت و صنعتی

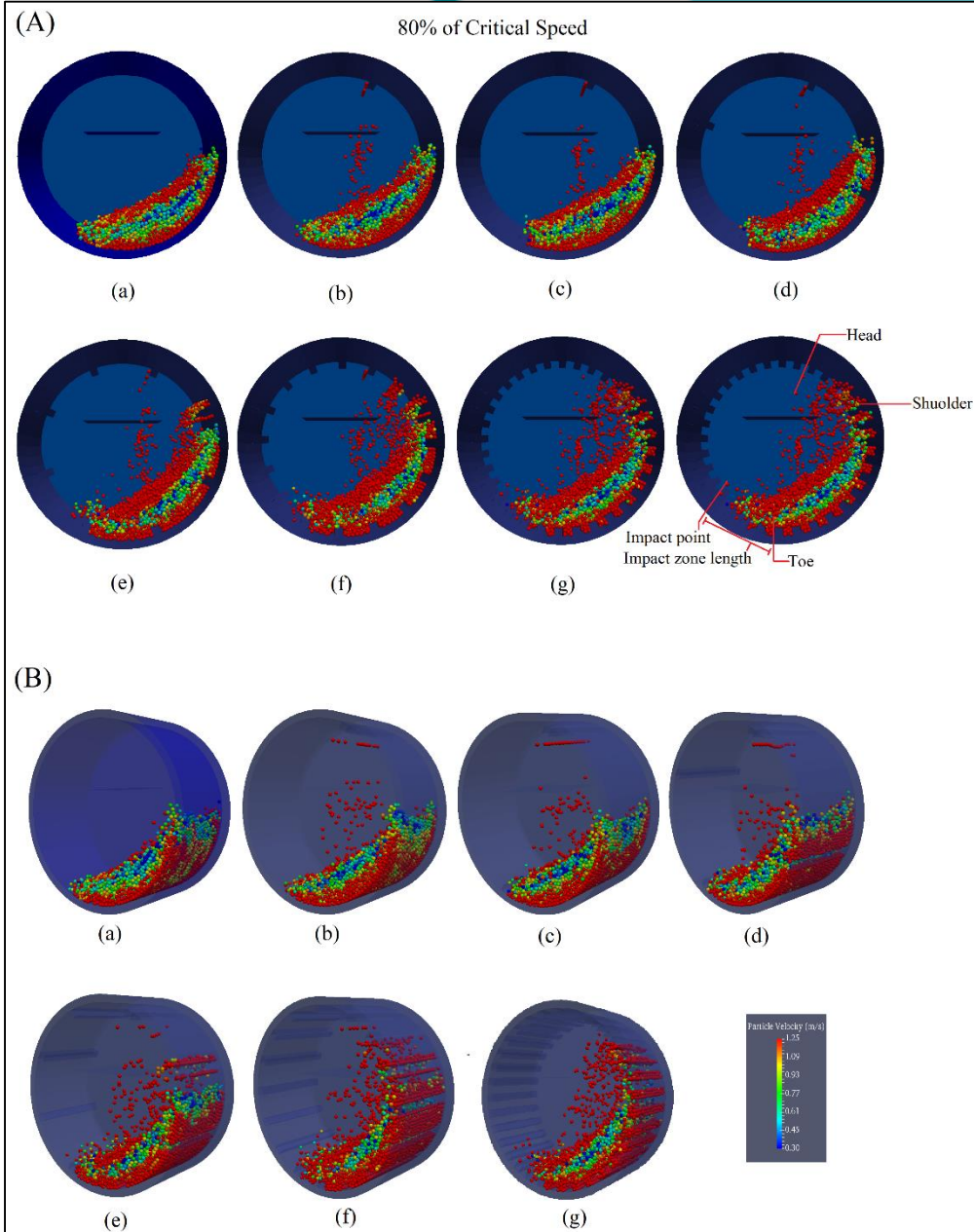
(A)



(B)

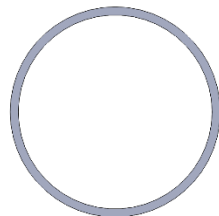


شبیه سازی آسیاهای نیمه خودشکن مقیاس پیلوت و صنعتی

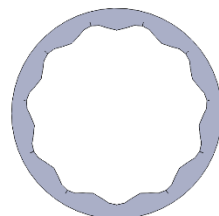


شبیه‌سازی آسیاهای نیمه‌خودشکن مقیاس پیلوت و صنعتی

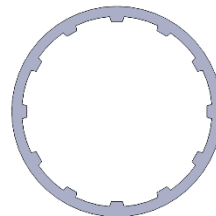
(a)



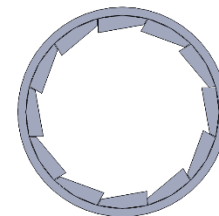
Smooth



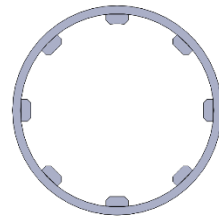
Wave



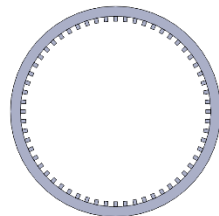
Rib



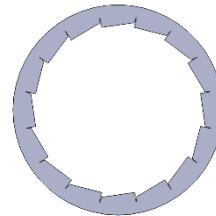
Ship-lap



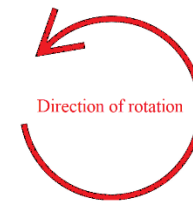
Lorain



Osborn

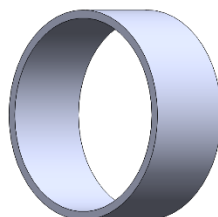


Step

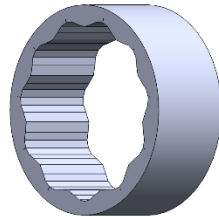


Direction of rotation

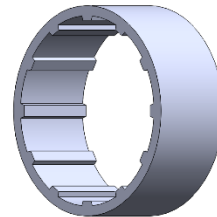
(b)



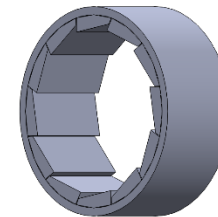
Smooth



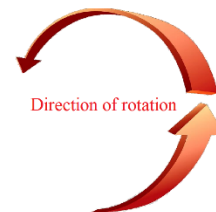
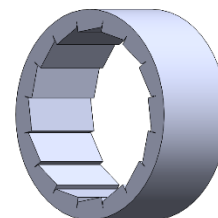
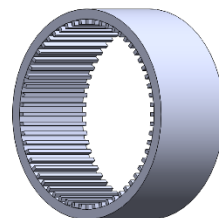
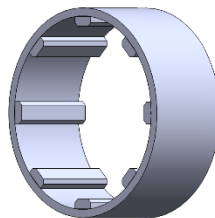
Wave



Rib



Ship-lap

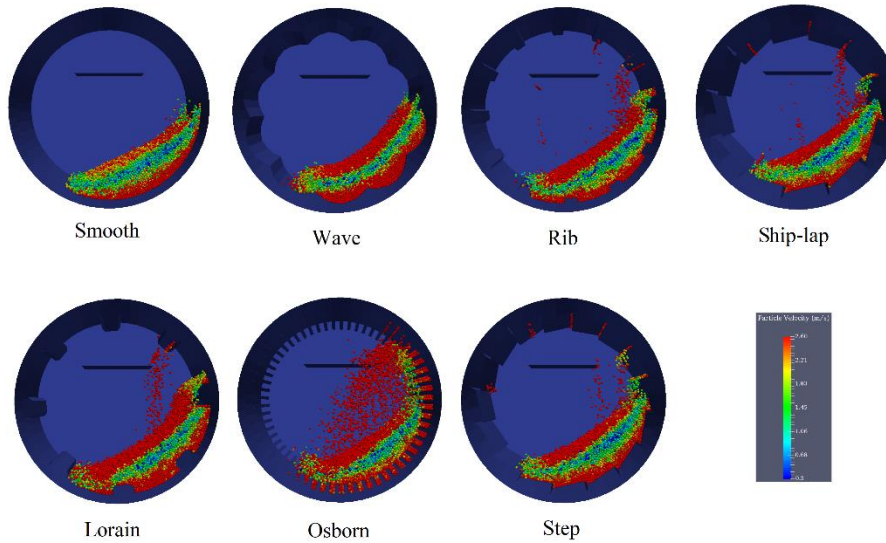


Direction of rotation

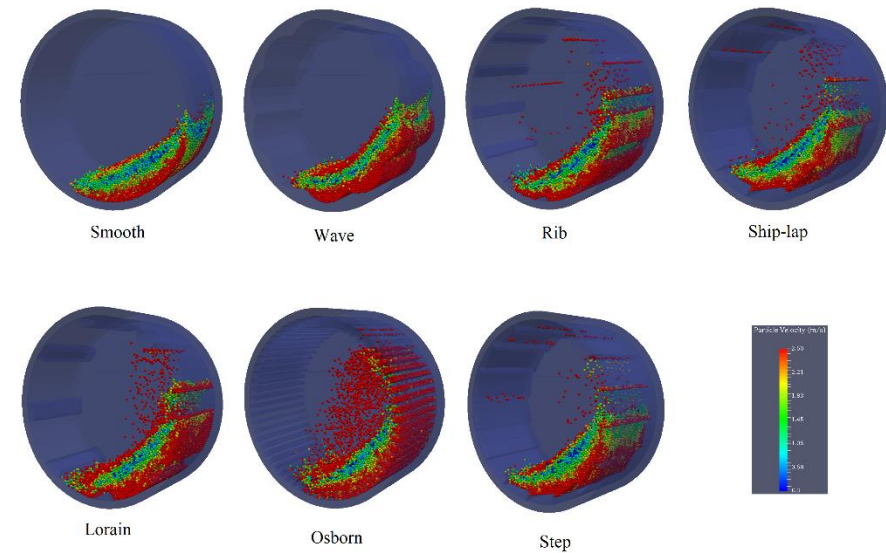
شبیه‌سازی آسیاهای نیمه‌خودشکن مقیاس پایلوت و صنعتی

(a)

80% of Critical Speed



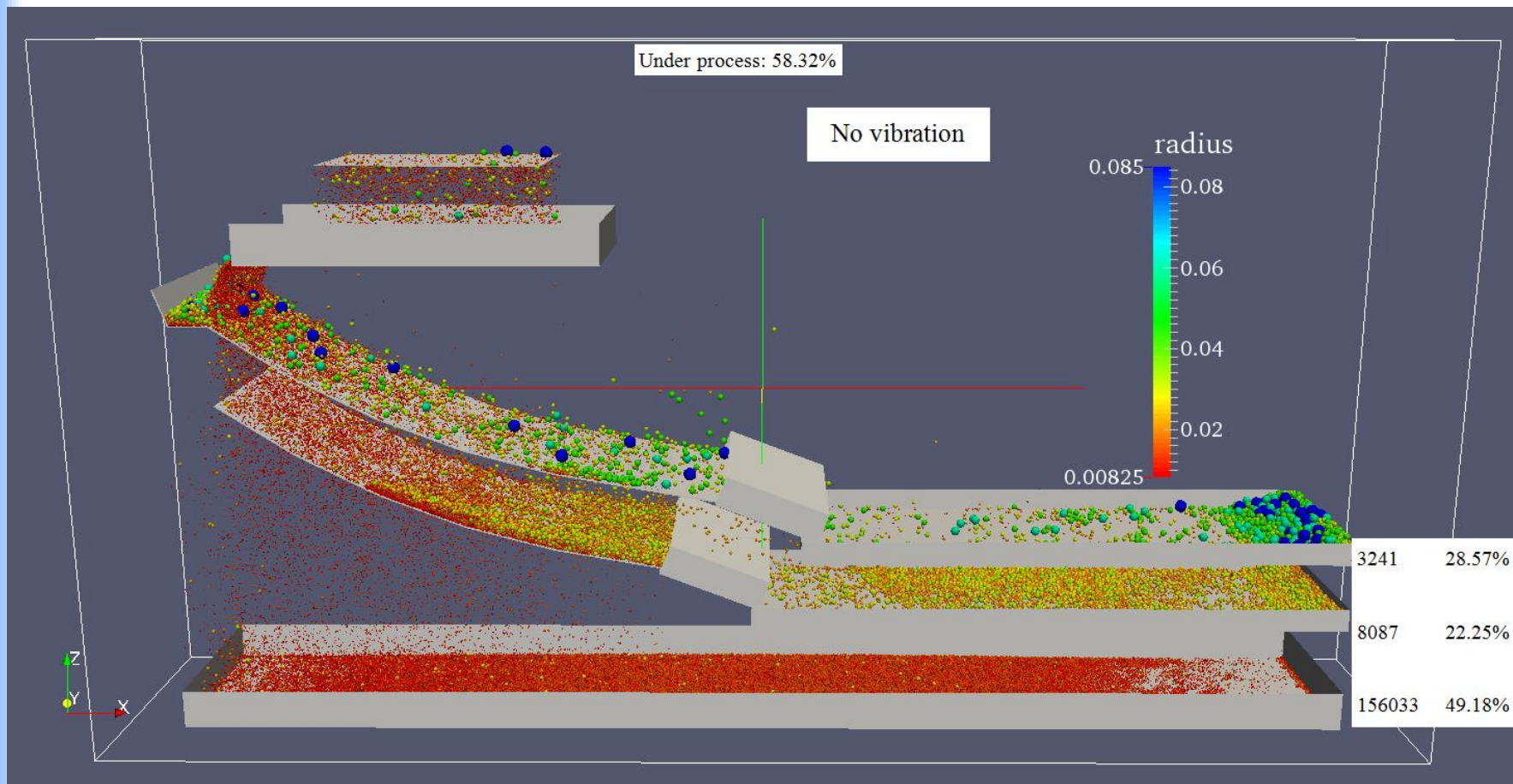
(b)





شبیه‌سازی سرند دو طبقه صنعتی

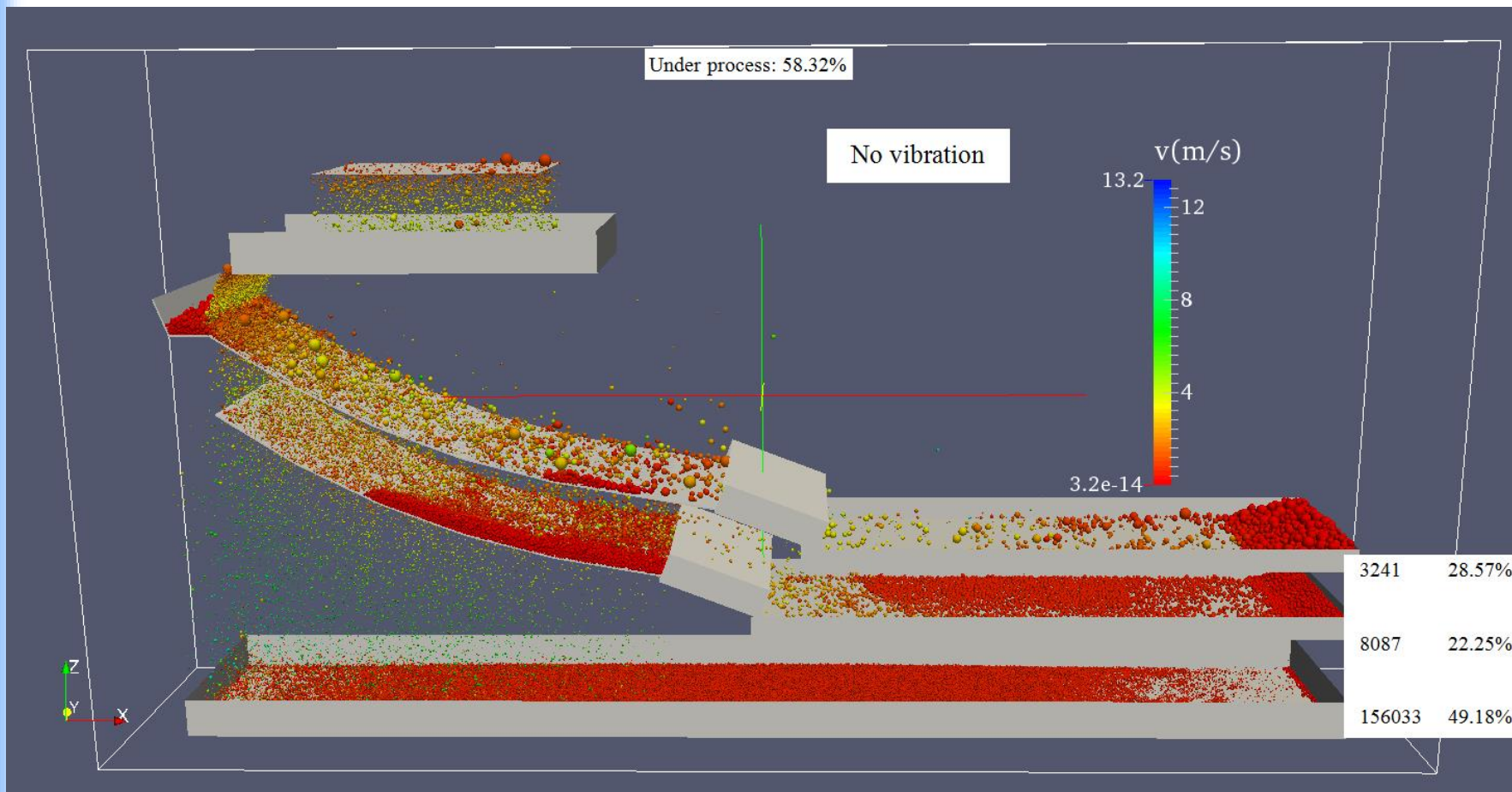
تأثیر بسامد ارتعاش سرند بر بازیابی سرند کنی





شبیه سازی سرنند دو طبقه صنعتی

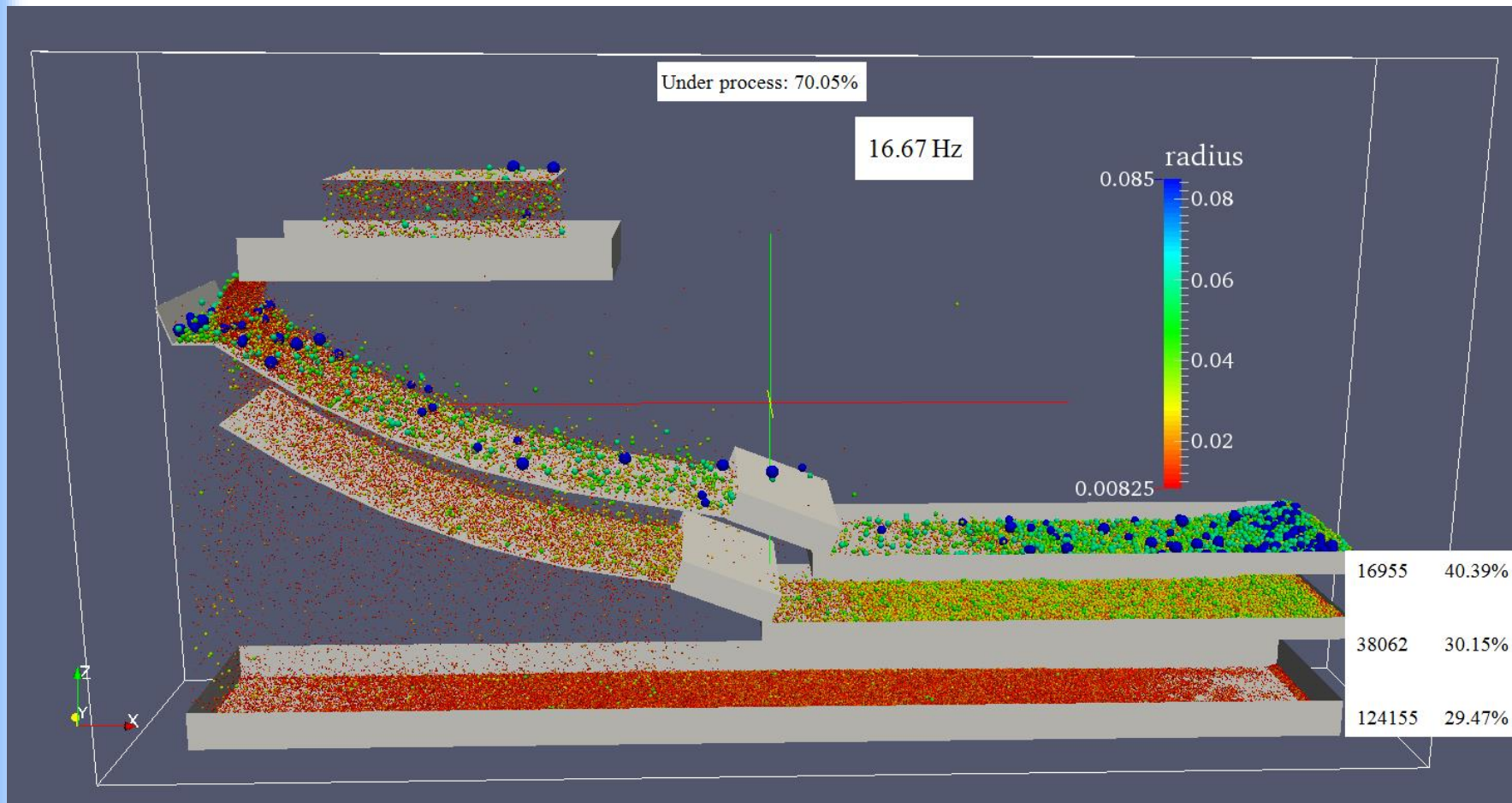
تأثیر بسامد ارتعاش سرنند بر بازیابی سرنندکنی





شبیه‌سازی سرنند دو طبقه صنعتی

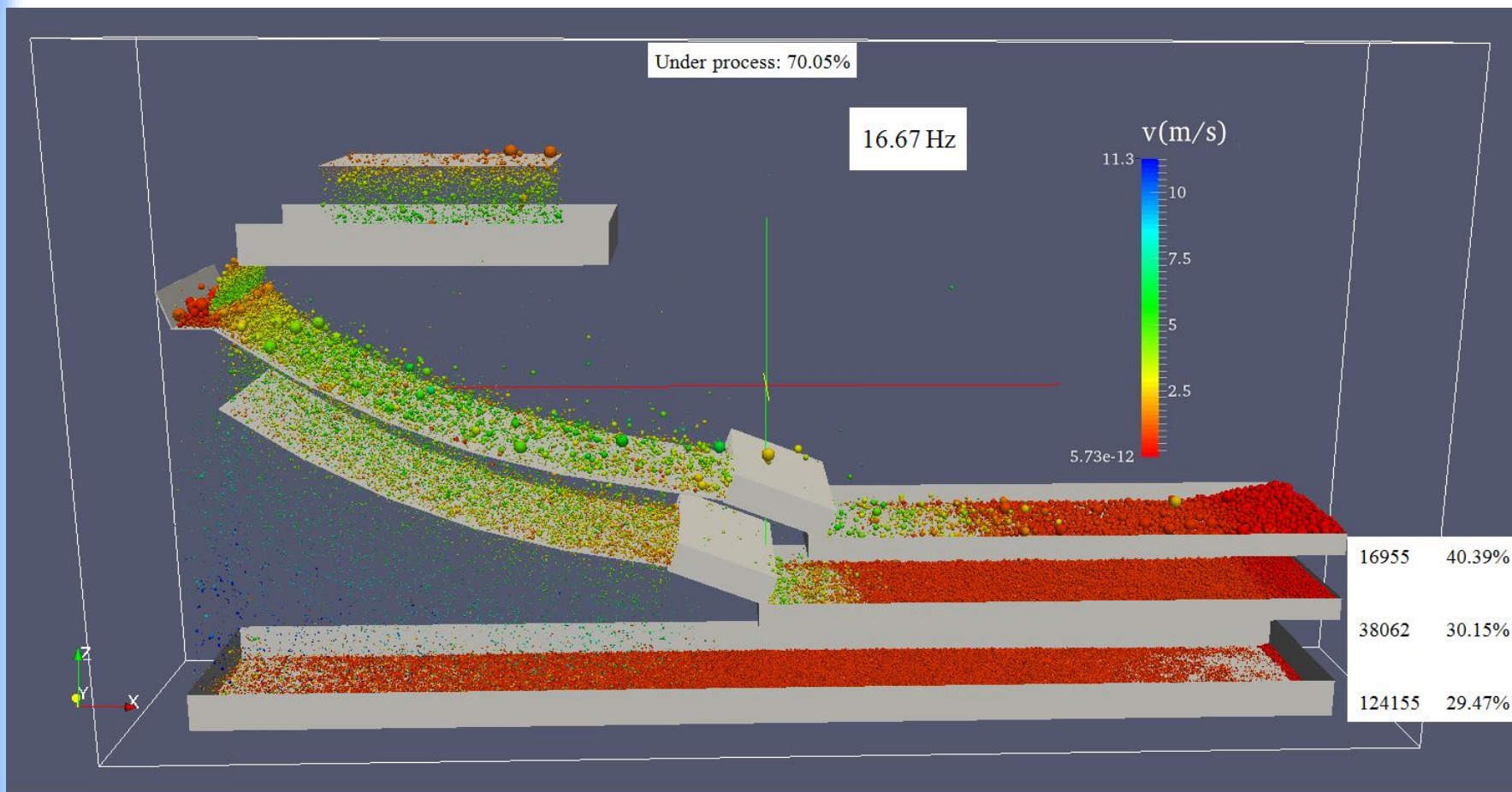
تأثیر بسامد ارتعاش سرنند بر بازیابی سرنند کنی





شبیه سازی سرنند دو طبقه صنعتی

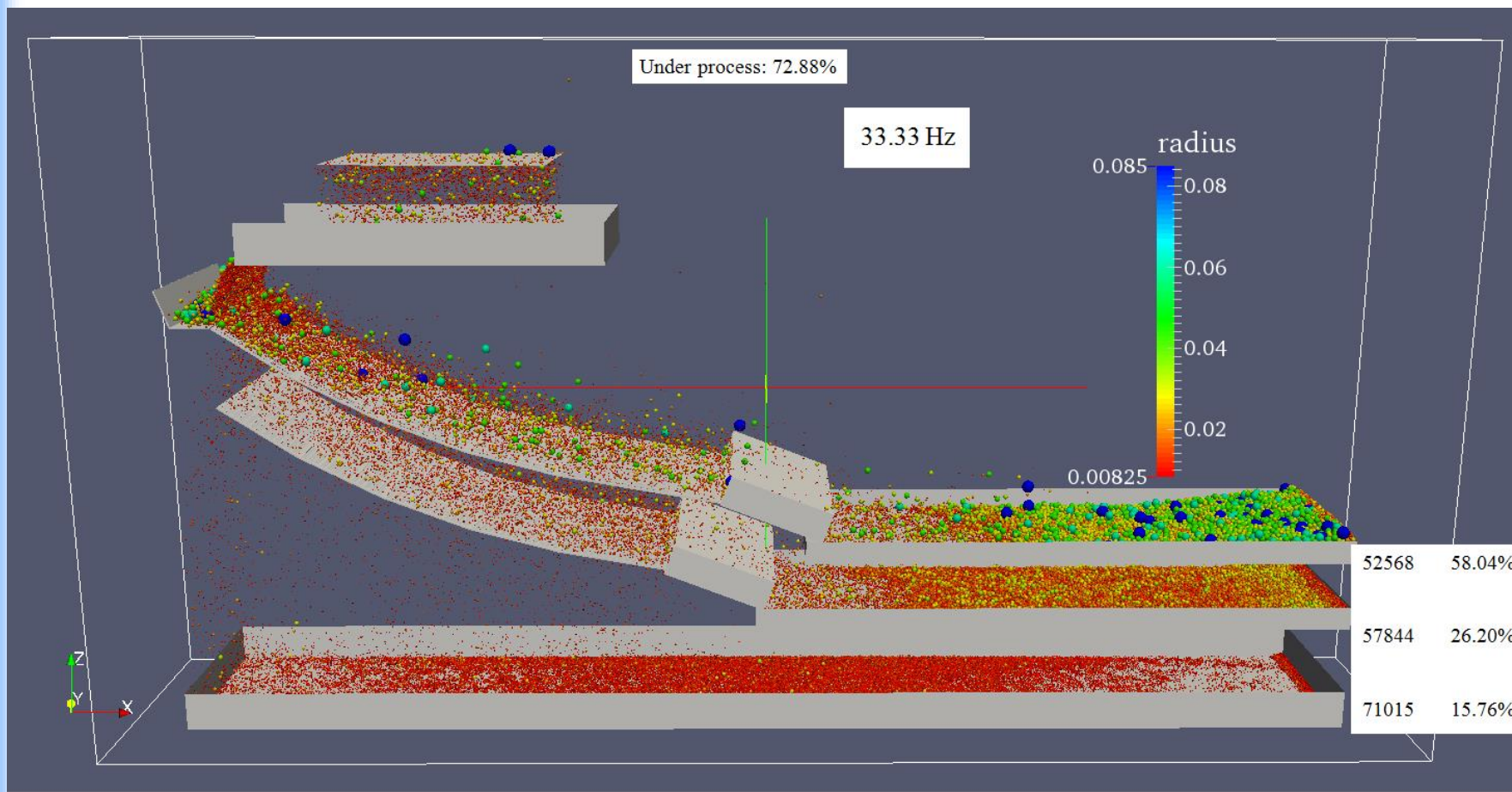
تأثیر بسامد ارتعاش سرنند بر بازیابی سرنندکنی





شبه سازی سرنند دو طبقه صنعتی

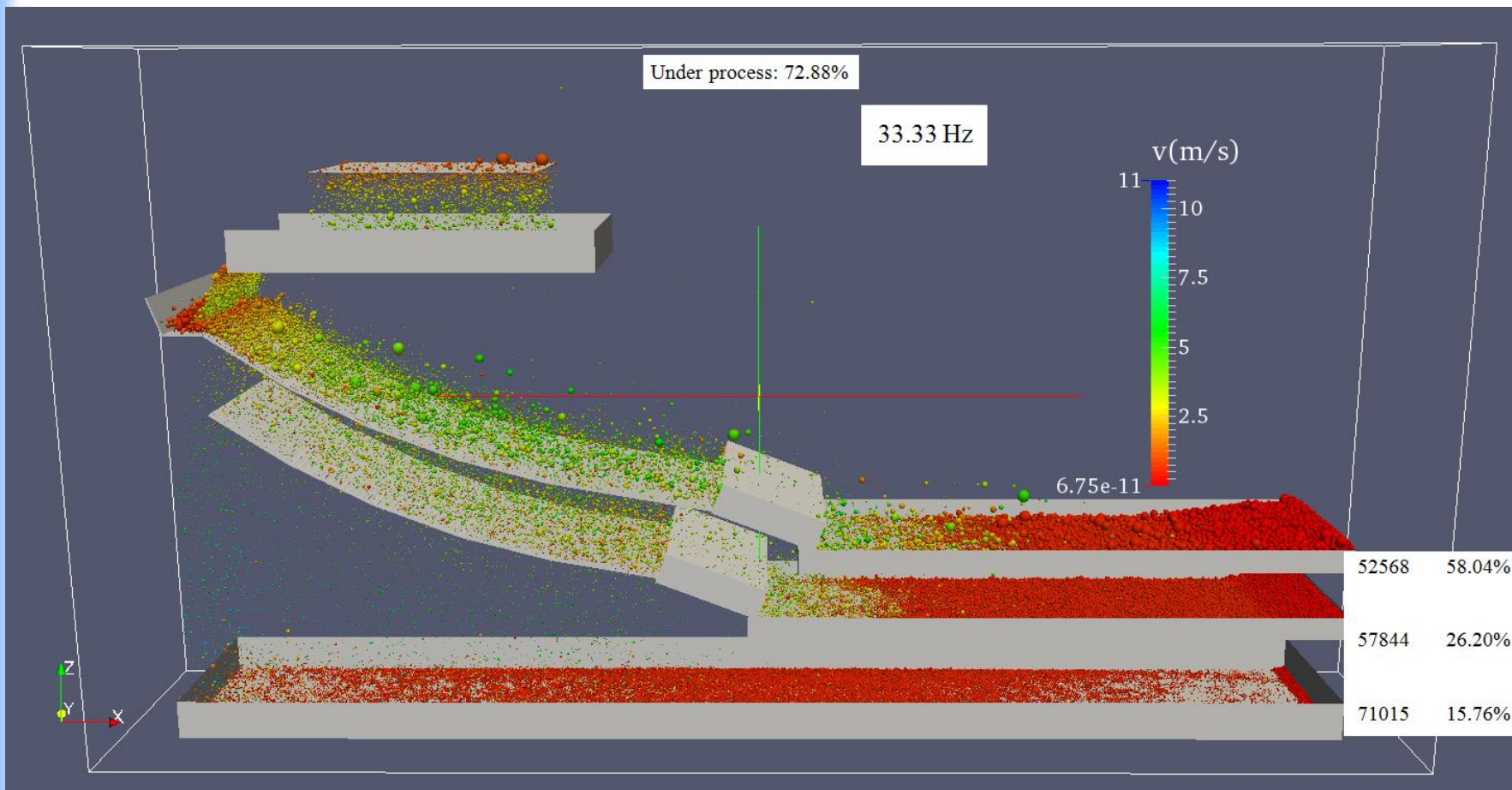
تأثیر بسامد ارتعاش سرنند بر بازیابی سرنند کنی





شبیه سازی سرنند دو طبقه صنعتی

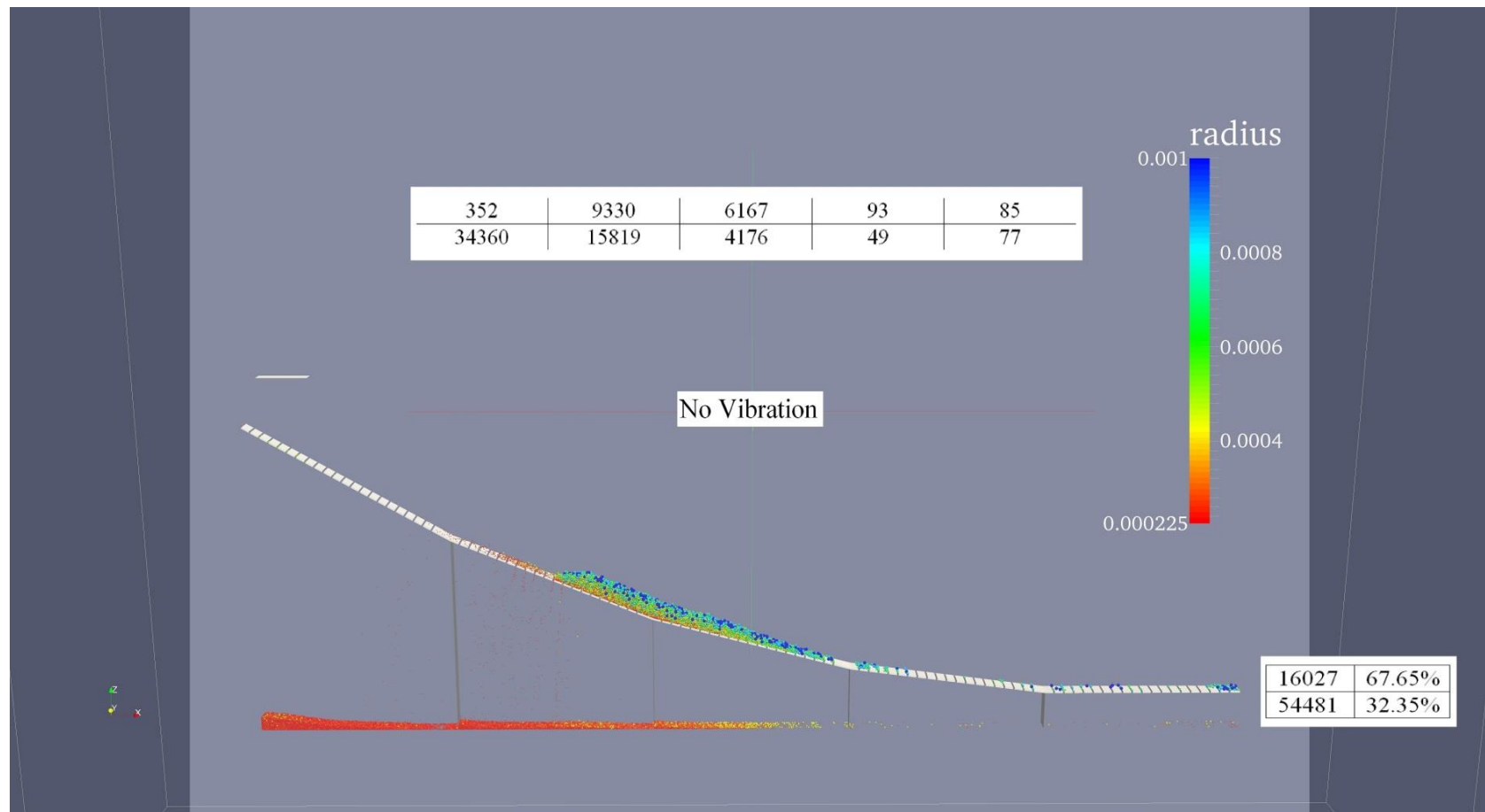
تأثیر بسامد ارتعاش سرنند بر بازیابی سرنندکنی





شبیه سازی سرنده یک طبقه و پنج پنی آزمایشگاهی

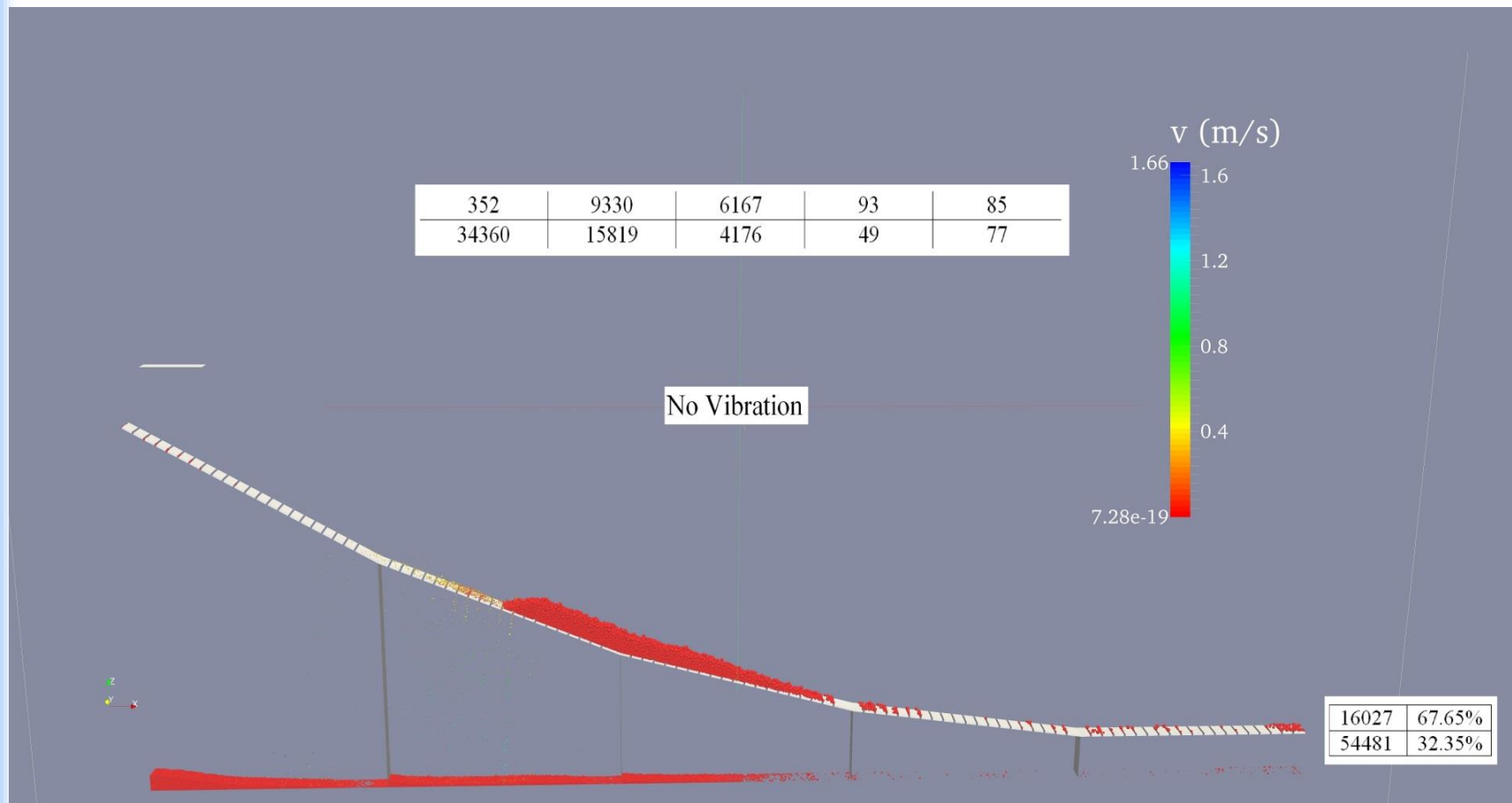
تأثیر بسامد ارتعاش سرنده بر بازدهی سرنده





شبیه سازی سرنده یک طبقه و پنج پنی آزمایشگاهی

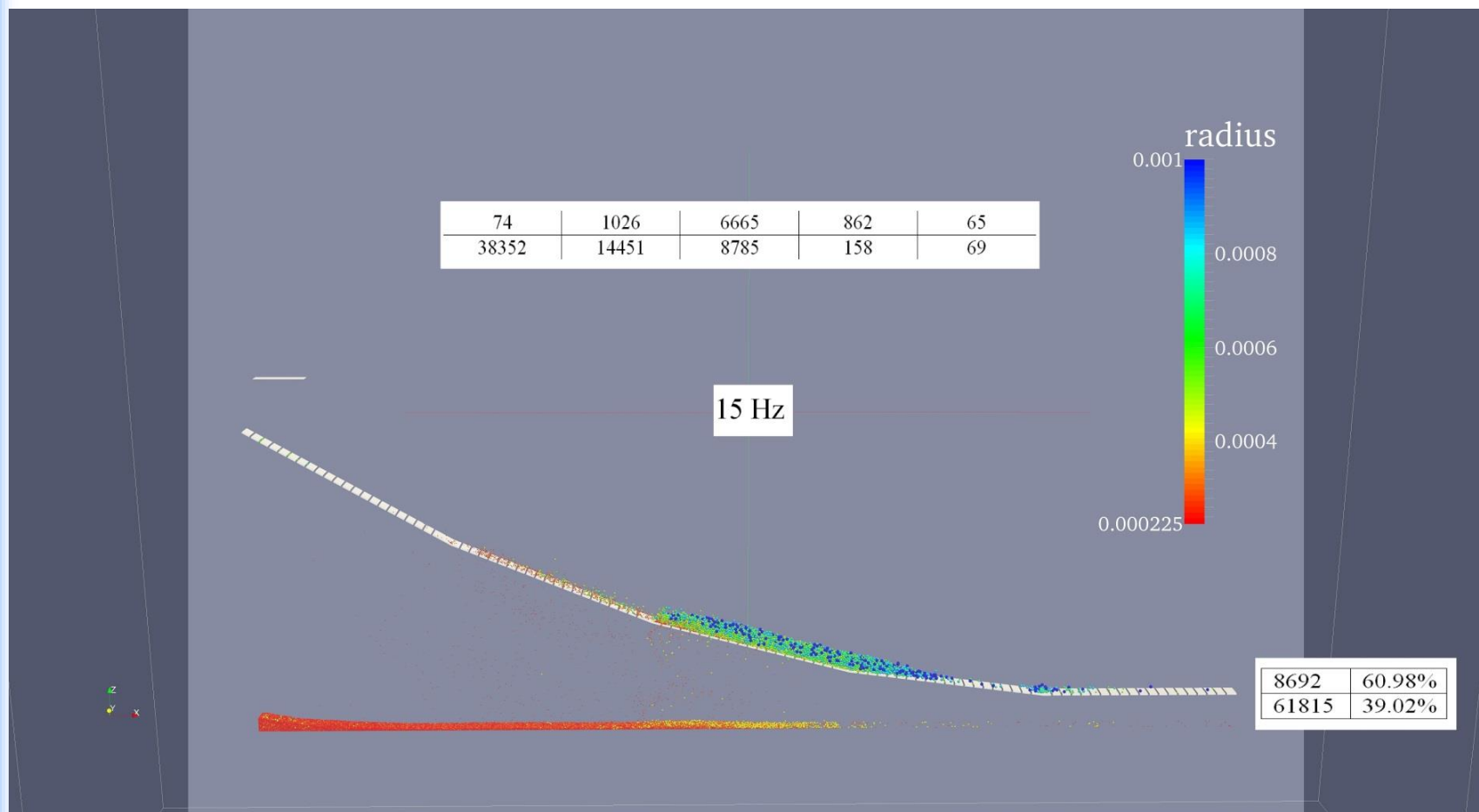
تأثیر بسامد ارتعاش سرنده بر بازدهی سرنده





شبیه سازی سرنده یک طبقه و پنج پنی آزمایشگاهی

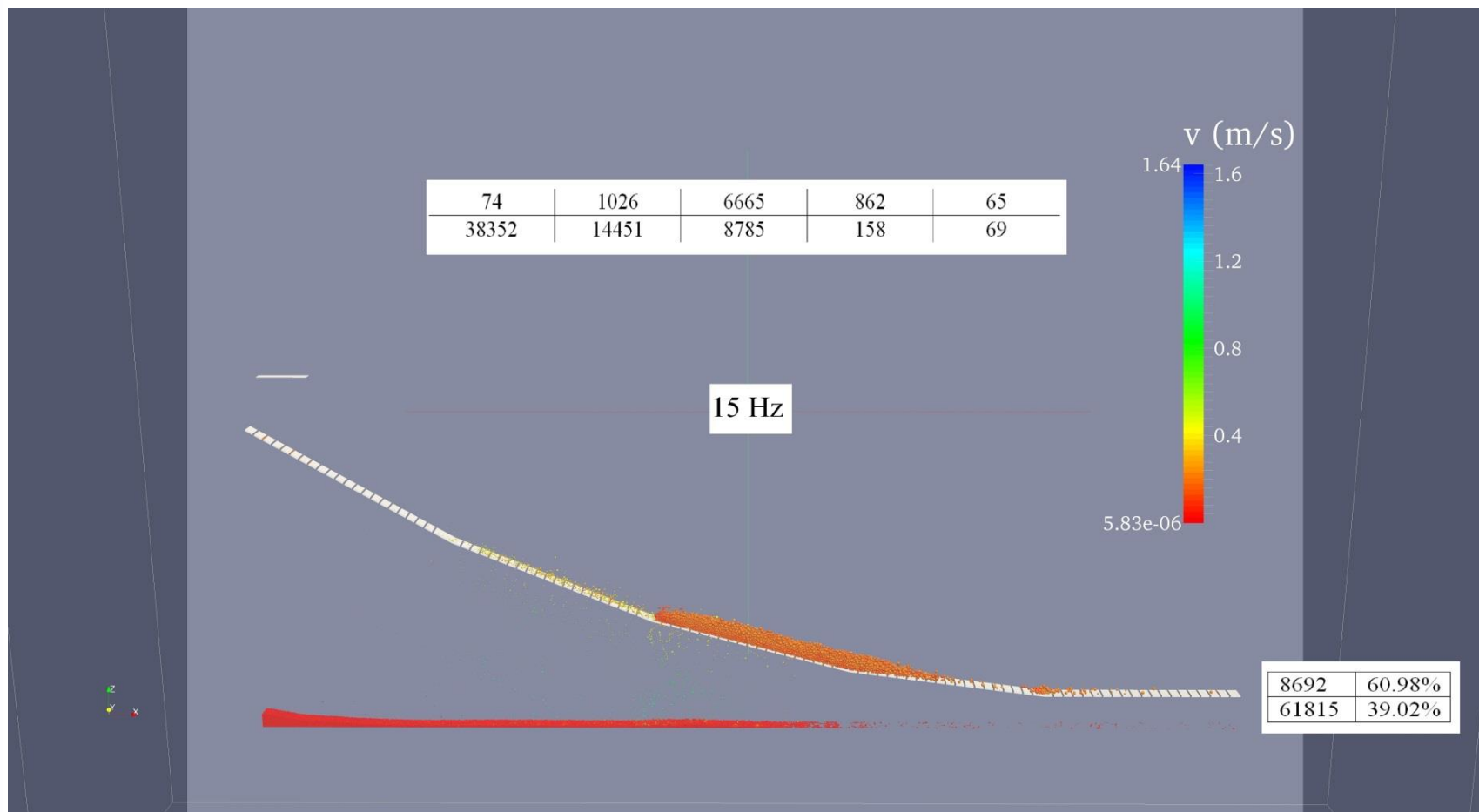
تأثیر بسامد ارتعاش سرنده بر بازدهی سرنده





شبیه سازی سرنده یک طبقه و پنج پنی آزمایشگاهی

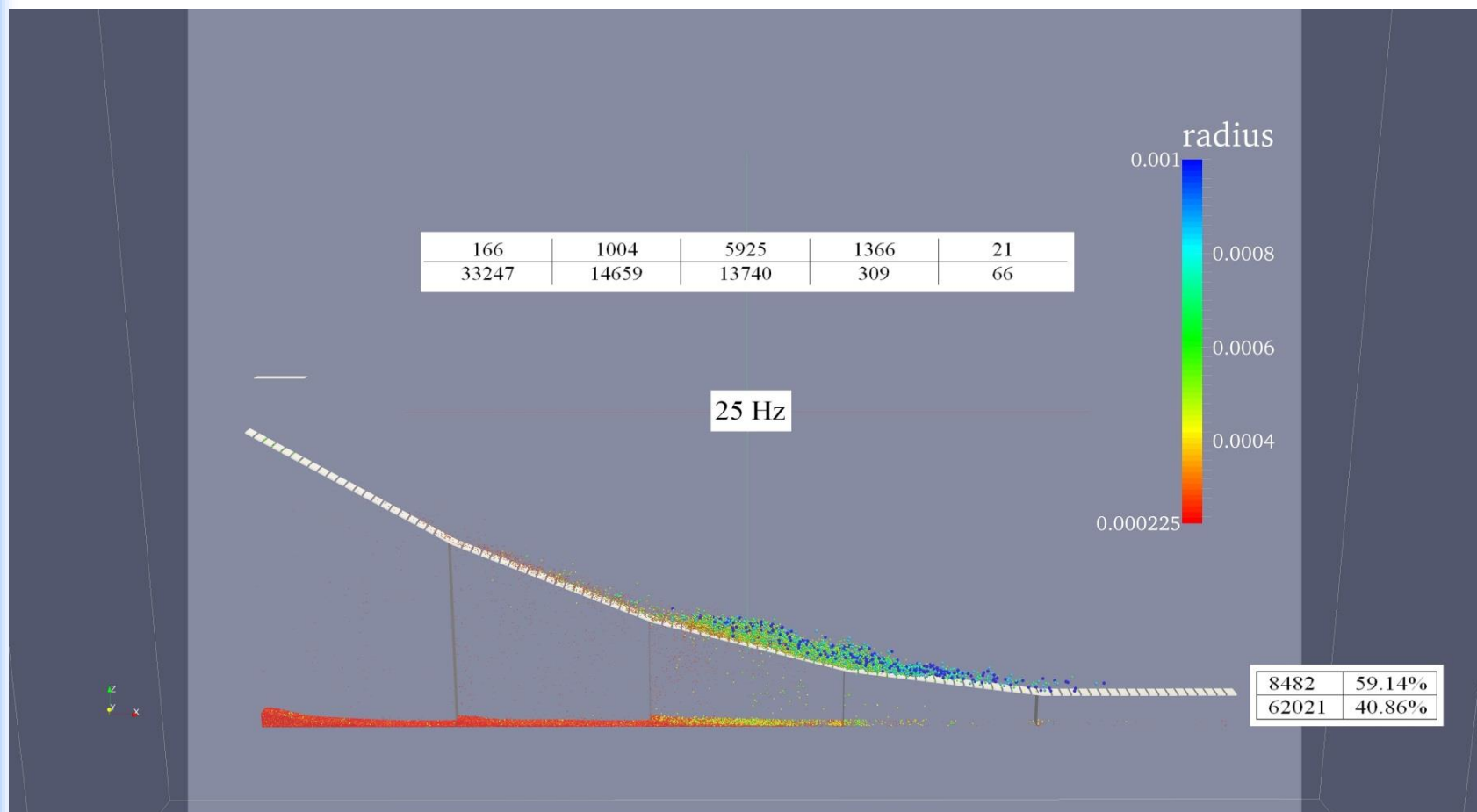
تأثیر بسامد ارتعاش سرنده بر بازدهی سرنده





شبیه سازی سرنده یک طبقه و پنج پنی آزمایشگاهی

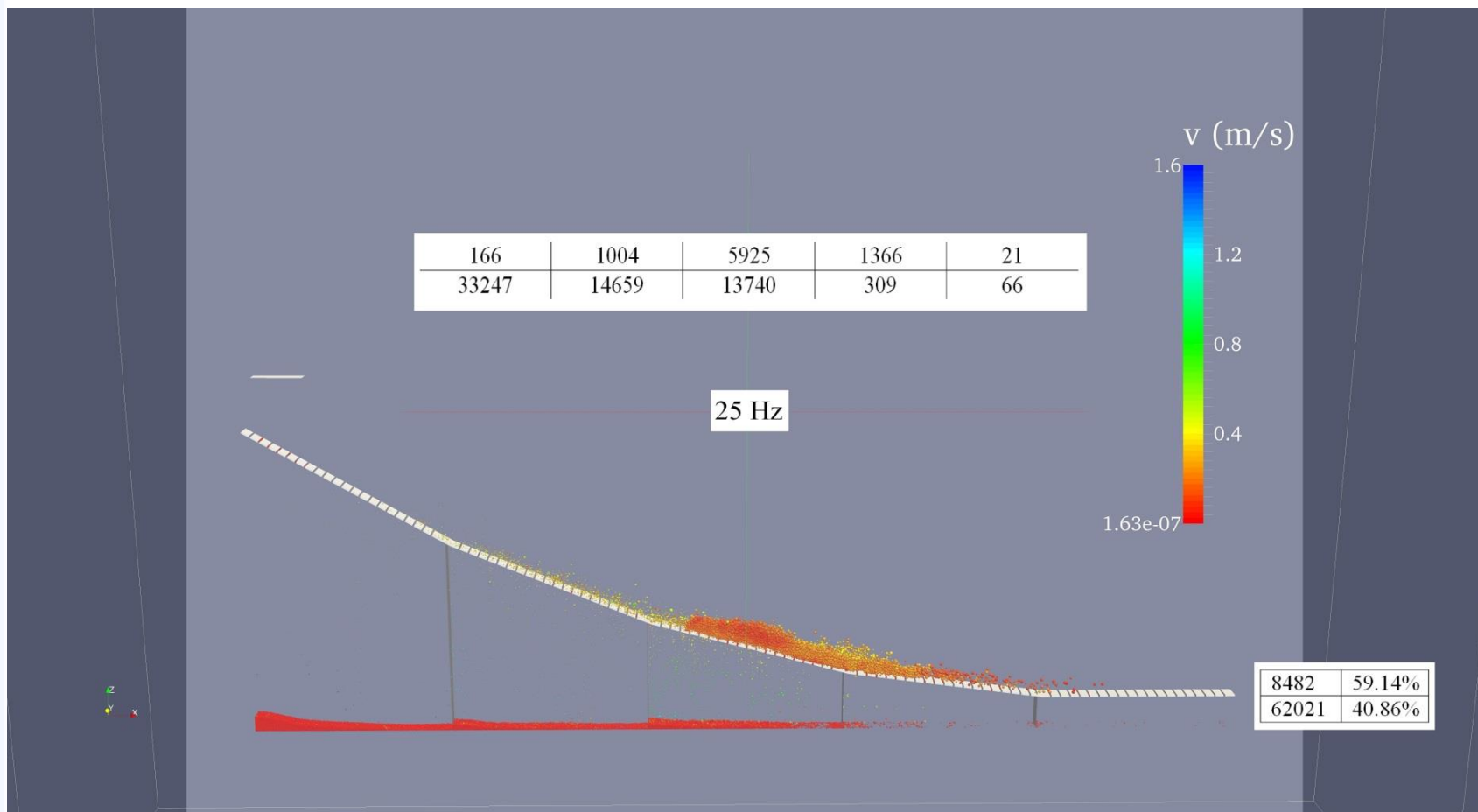
تأثیر بسامد ارتعاش سرنده بر بازدهی سرنده





شبیه سازی سرنده یک طبقه و پنج پنی آزمایشگاهی

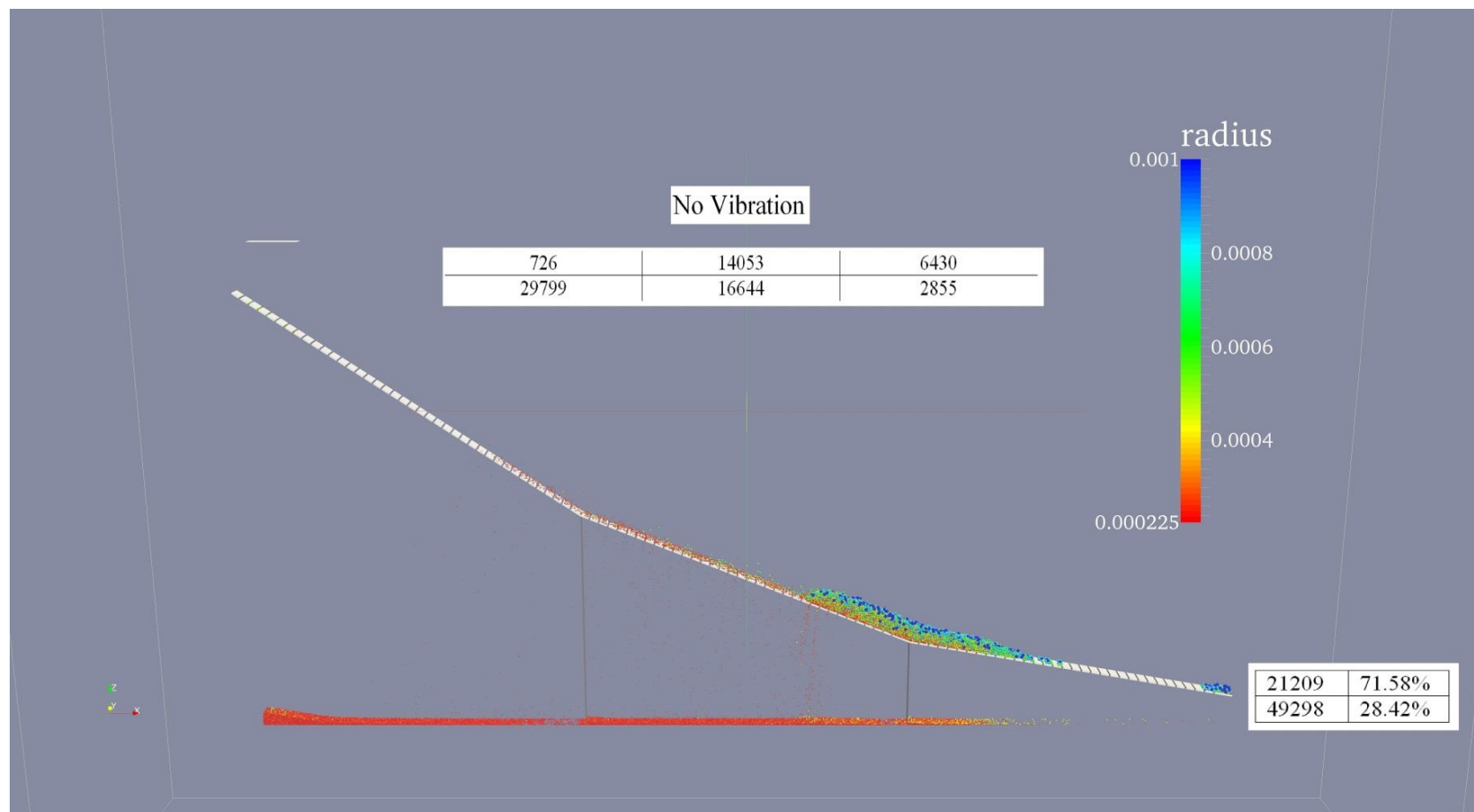
تأثیر بسامد ارتعاش سرنده بر بازدهی سرنده





شبیه سازی سرنده یک طبقه و سه پنی آزمایشگاهی

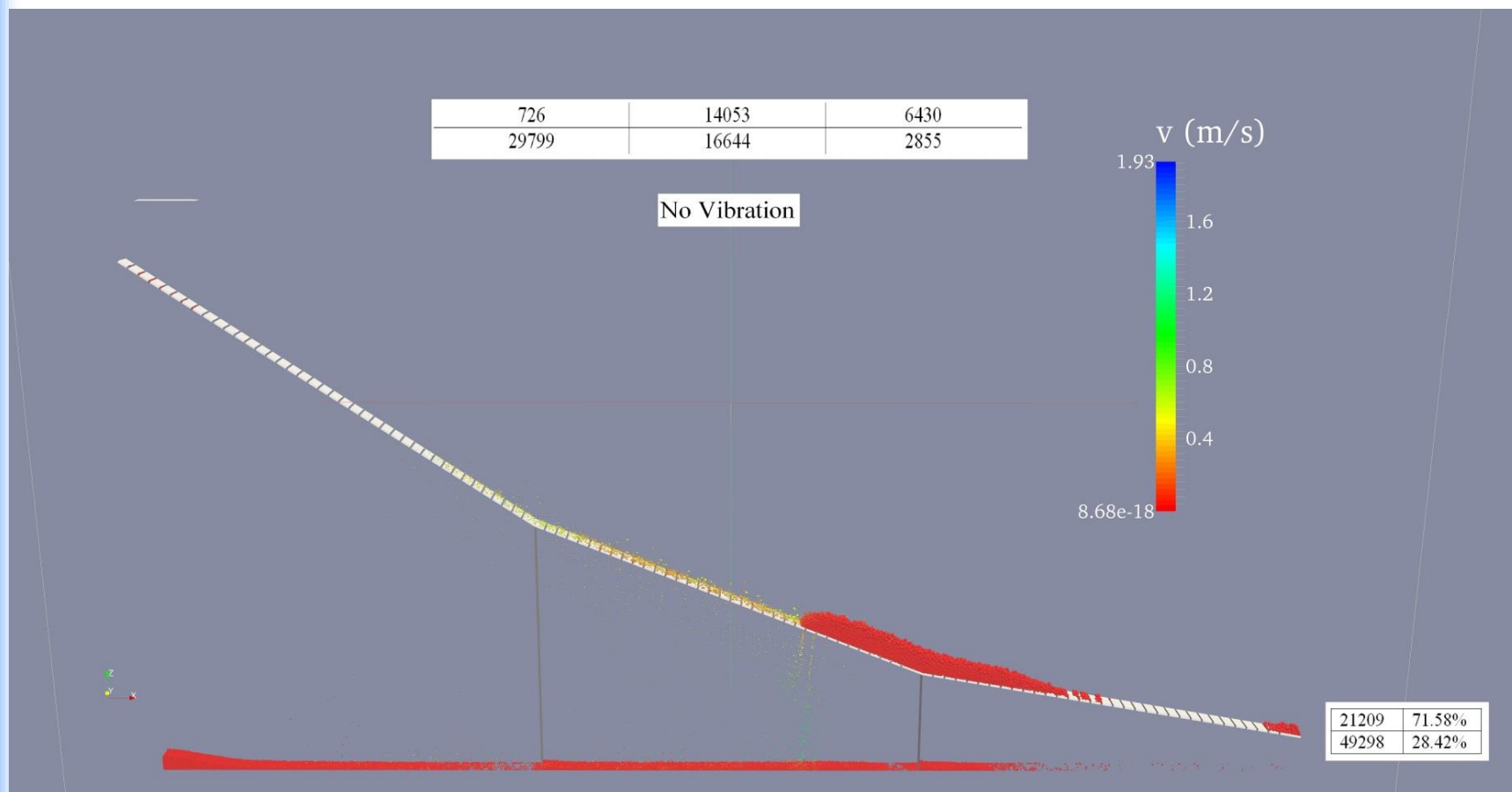
تأثیر بسامد ارتعاش سرنده بر بازدهی سرنده





شبیه سازی سرنده یک طبقه و سه پنی آزمایشگاهی

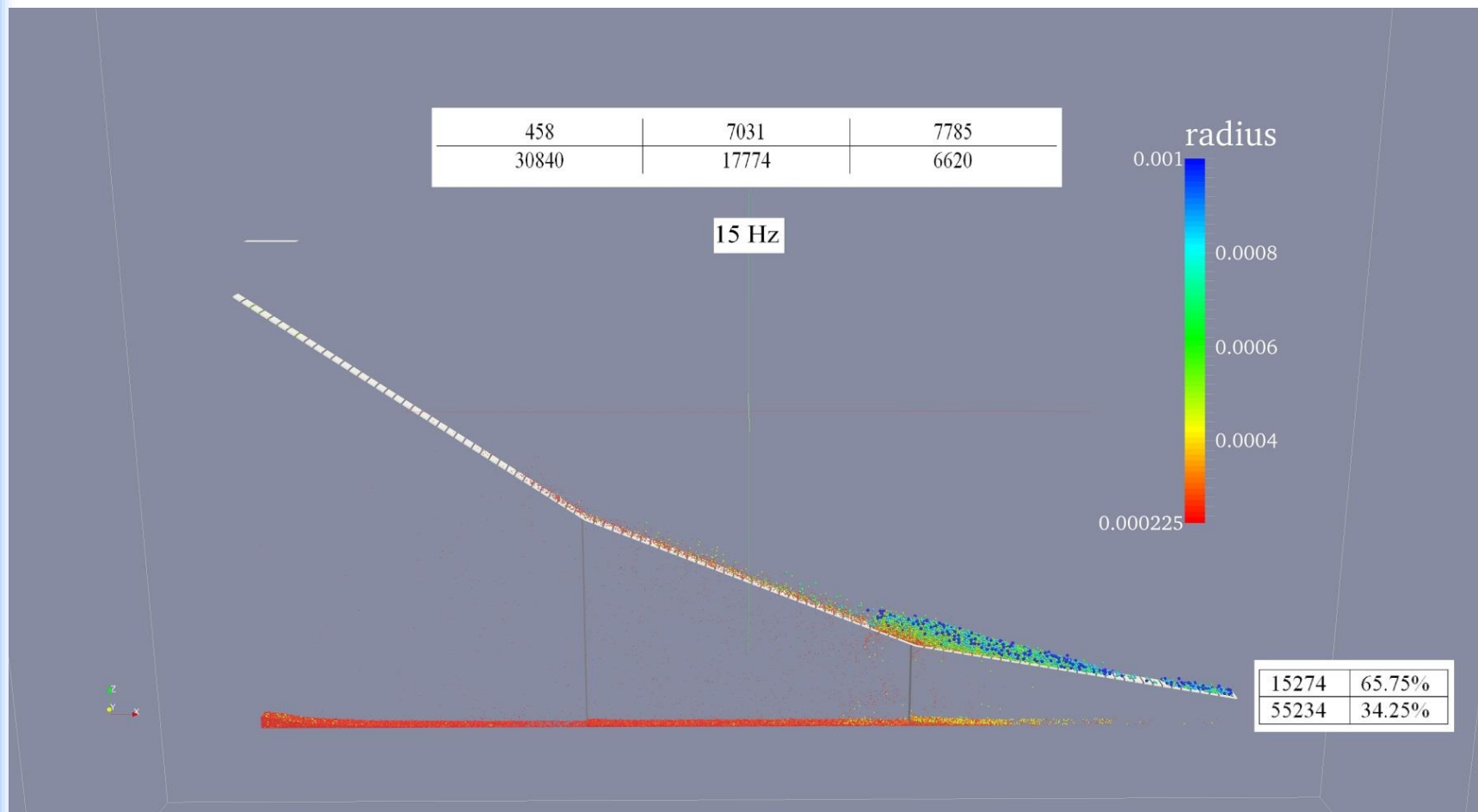
تأثیر بسامد ارتعاش سرنده بر بازدهی سرنده





شبیه سازی سرنده یک طبقه و سه پنی آزمایشگاهی

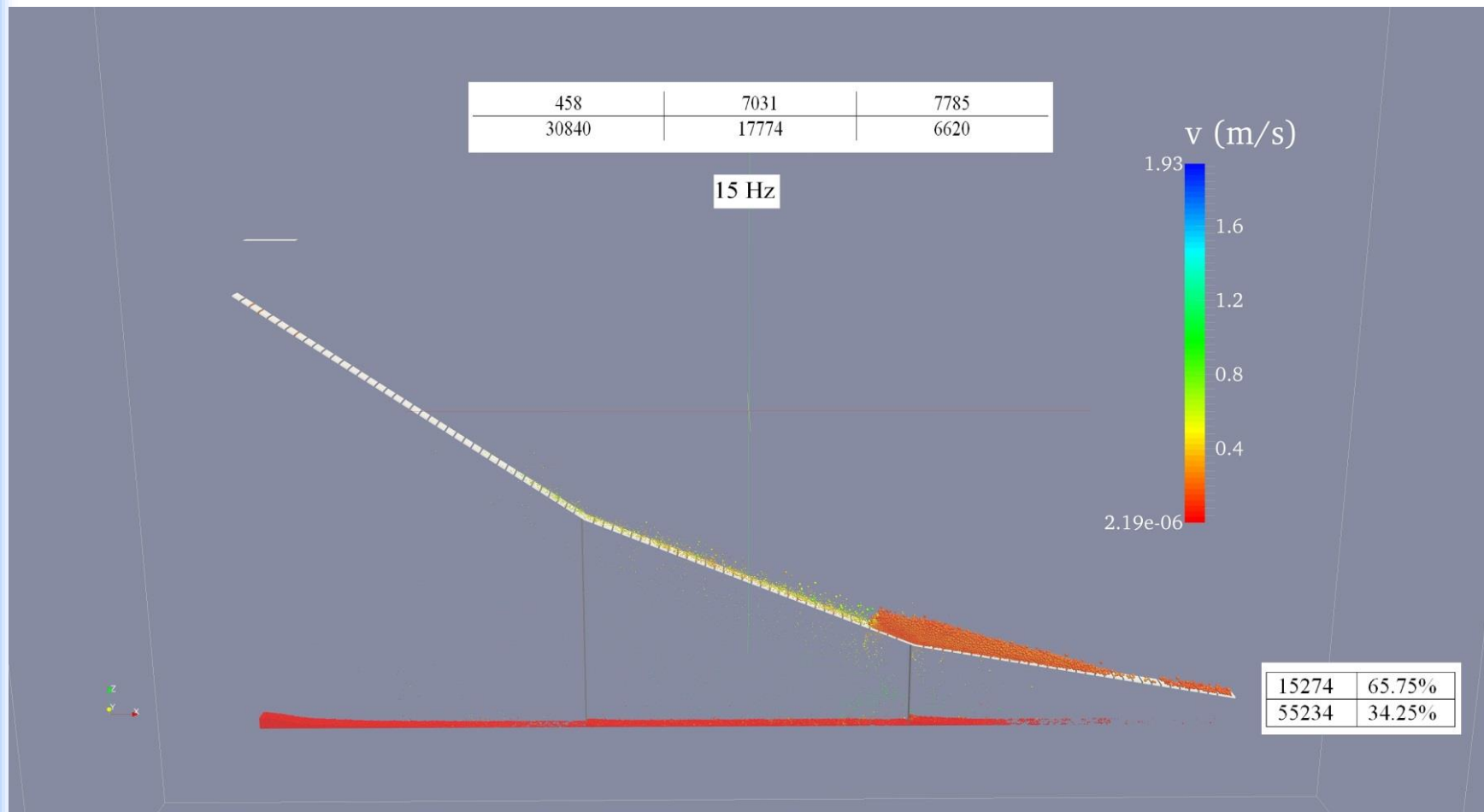
تأثیر بسامد ارتعاش سرنده بر بازدهی سرنده





شبیه سازی سرنده یک طبقه و سه پنی آزمایشگاهی

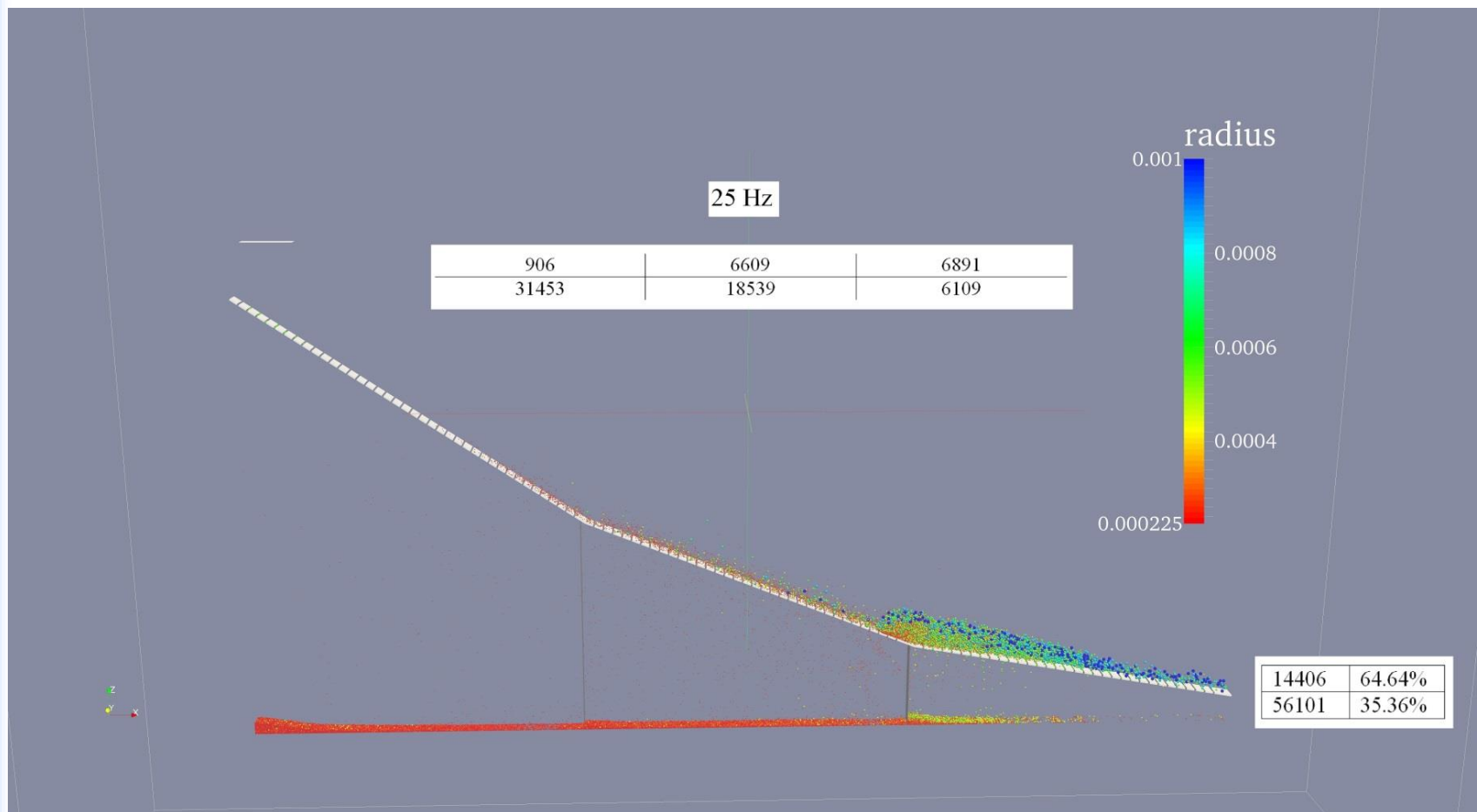
تأثیر بسامد ارتعاش سرنده بر بازدهی سرنده





شبیه سازی سرنده یک طبقه و سه پنی آزمایشگاهی

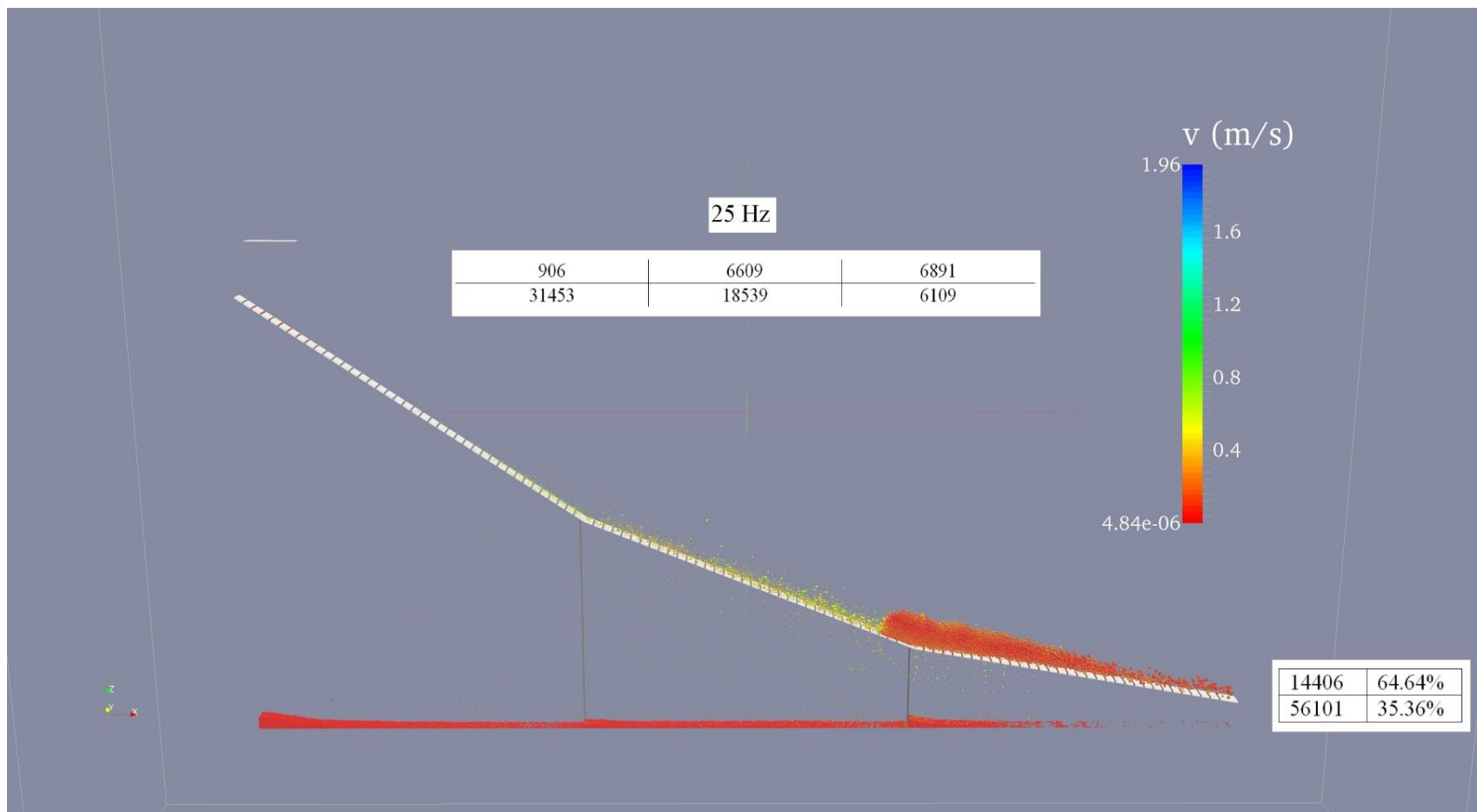
تأثیر بسامد ارتعاش سرنده بر بازدهی سرنده



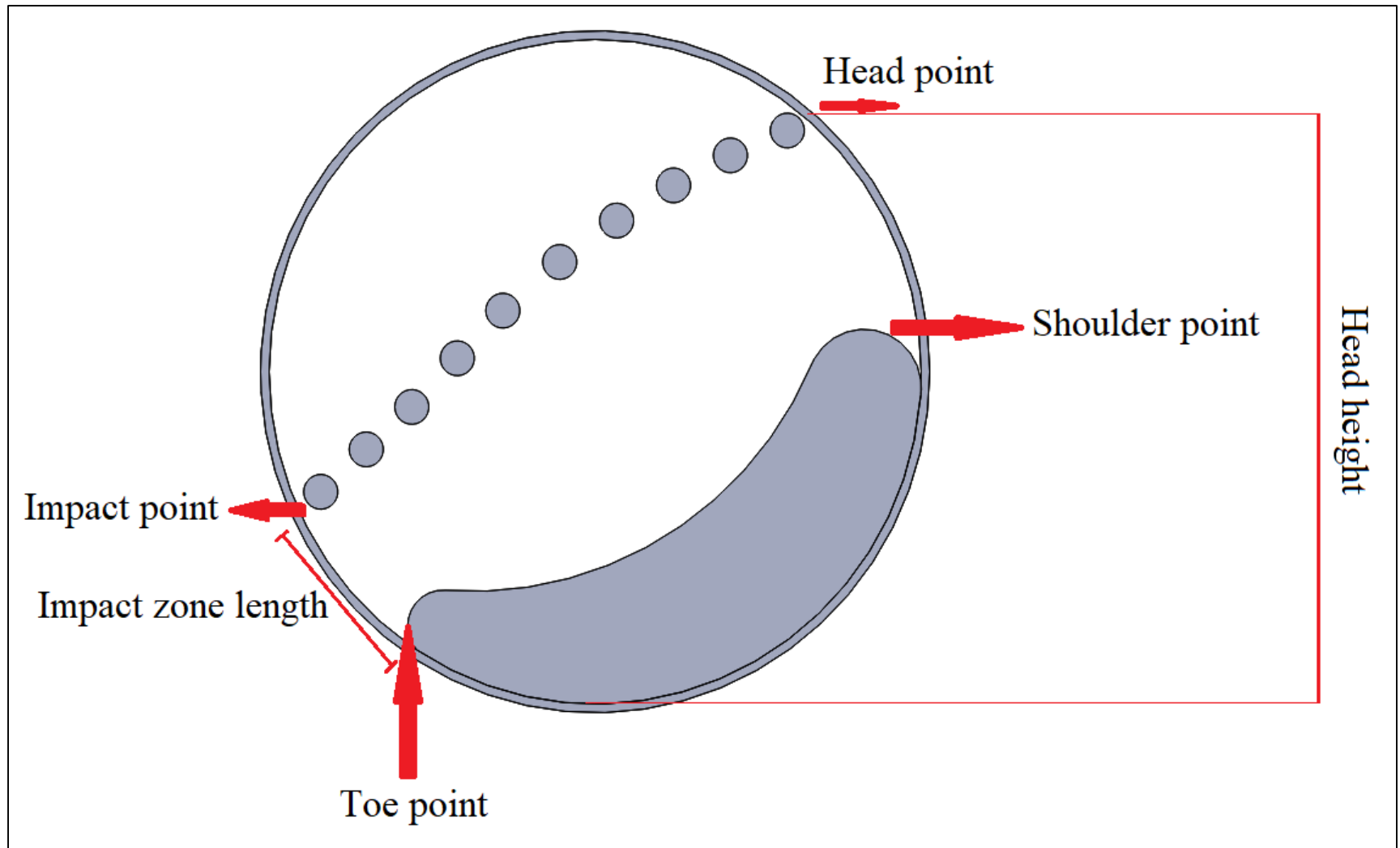


شبیه سازی سرنده یک طبقه و سه پنی آزمایشگاهی

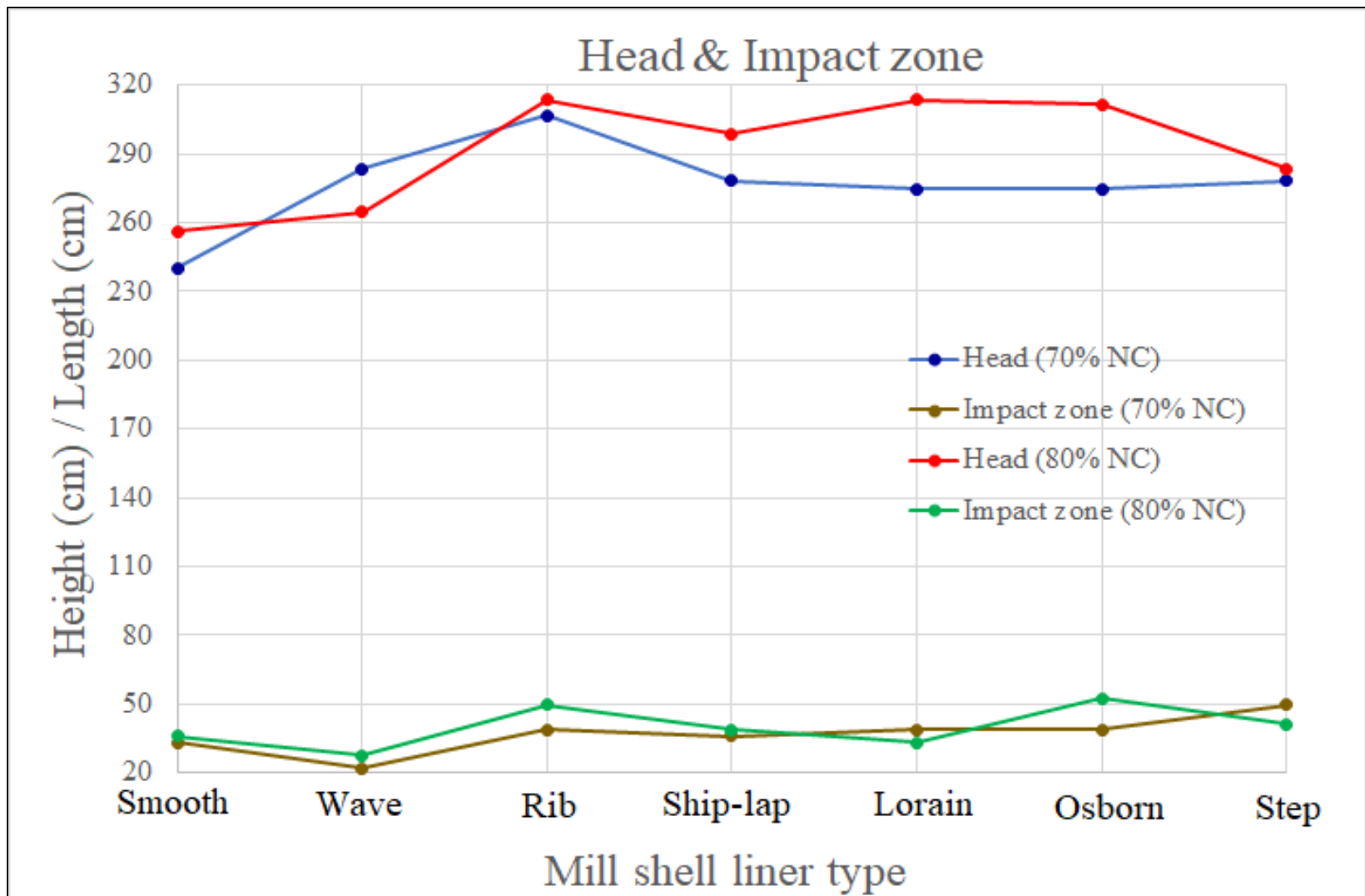
تأثیر بسامد ارتعاش سرنده بر بازدهی سرنده



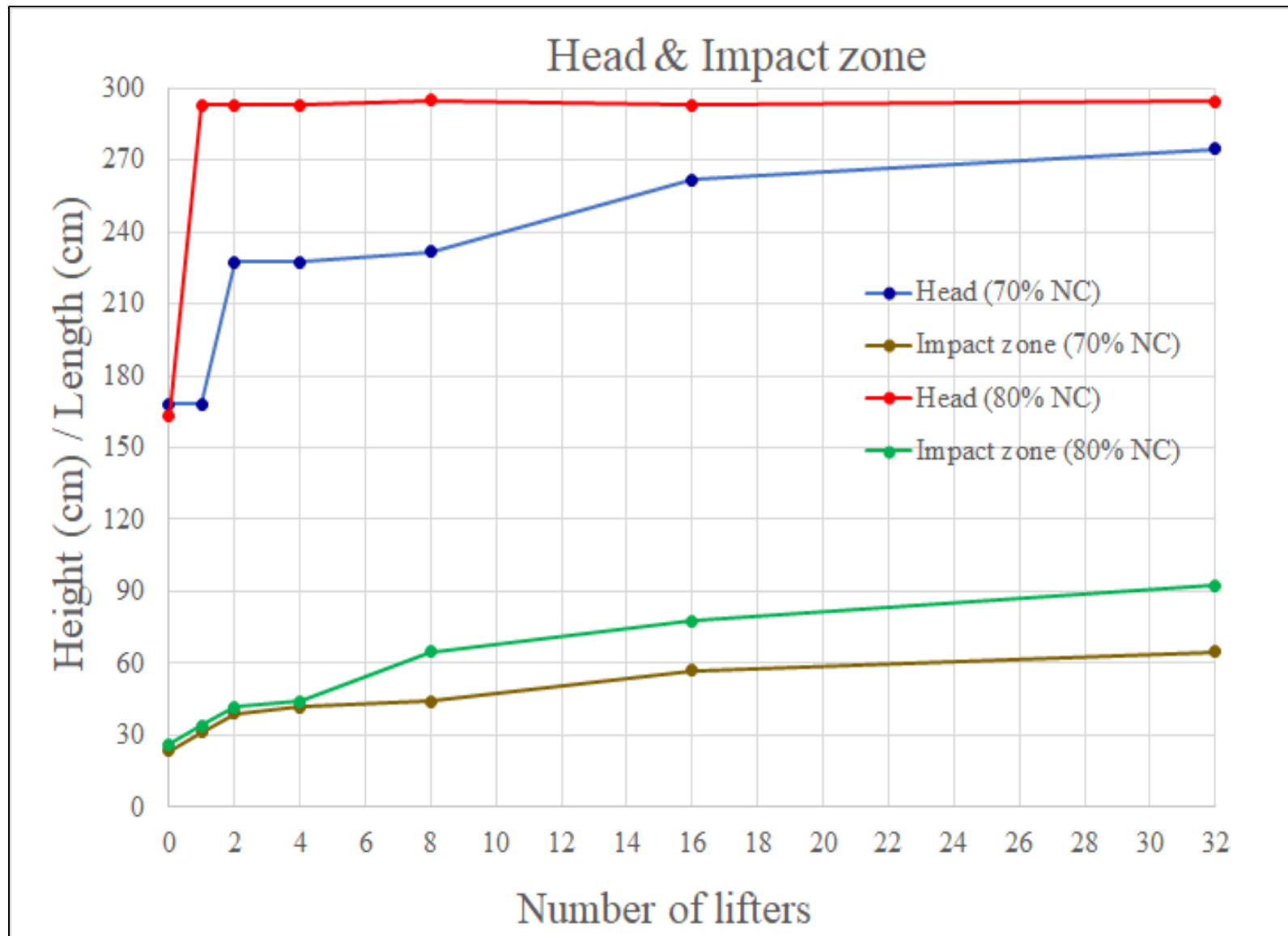
نتایج و بحث - آسیای گلوله‌ای مقیاس پایلوت



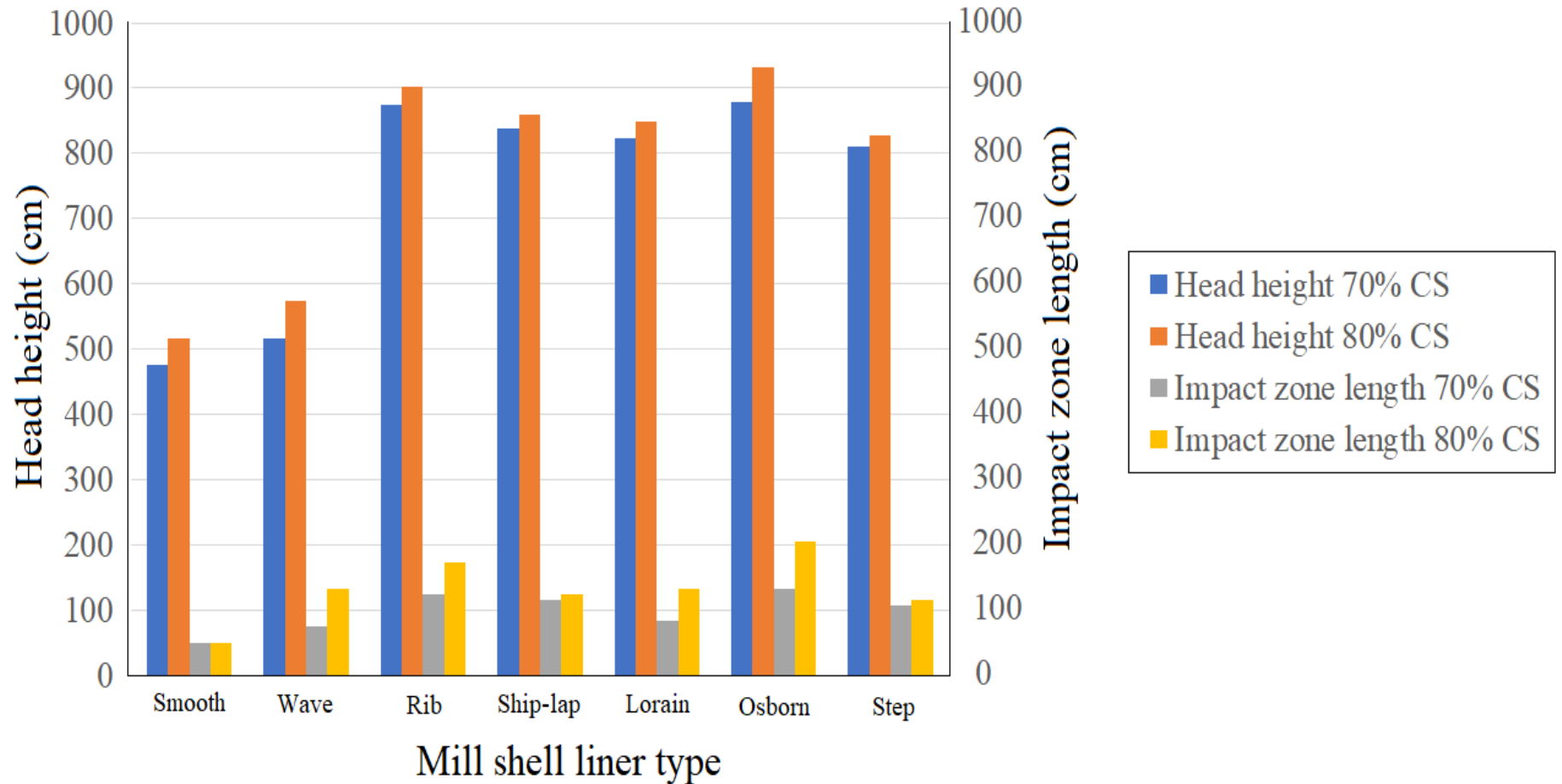
نتایج و بحث - آسیای گلوله‌ای مقیاس صنعتی



نتایج و بحث - آسیای نیمه خودشکن مقیاس پابلوت

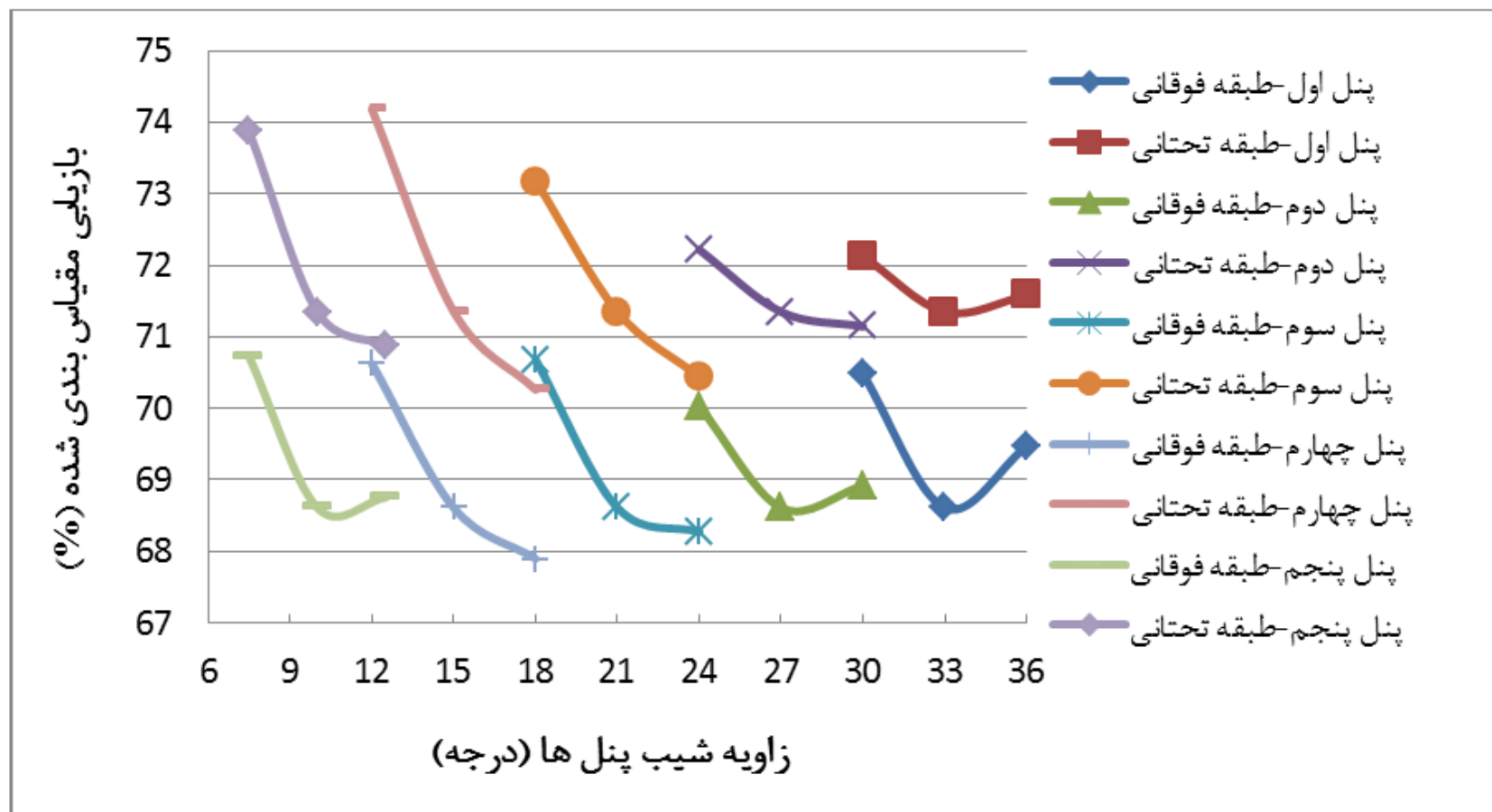


نتایج و بحث - آسیای نیمه خودشکن مقیاس صنعتی





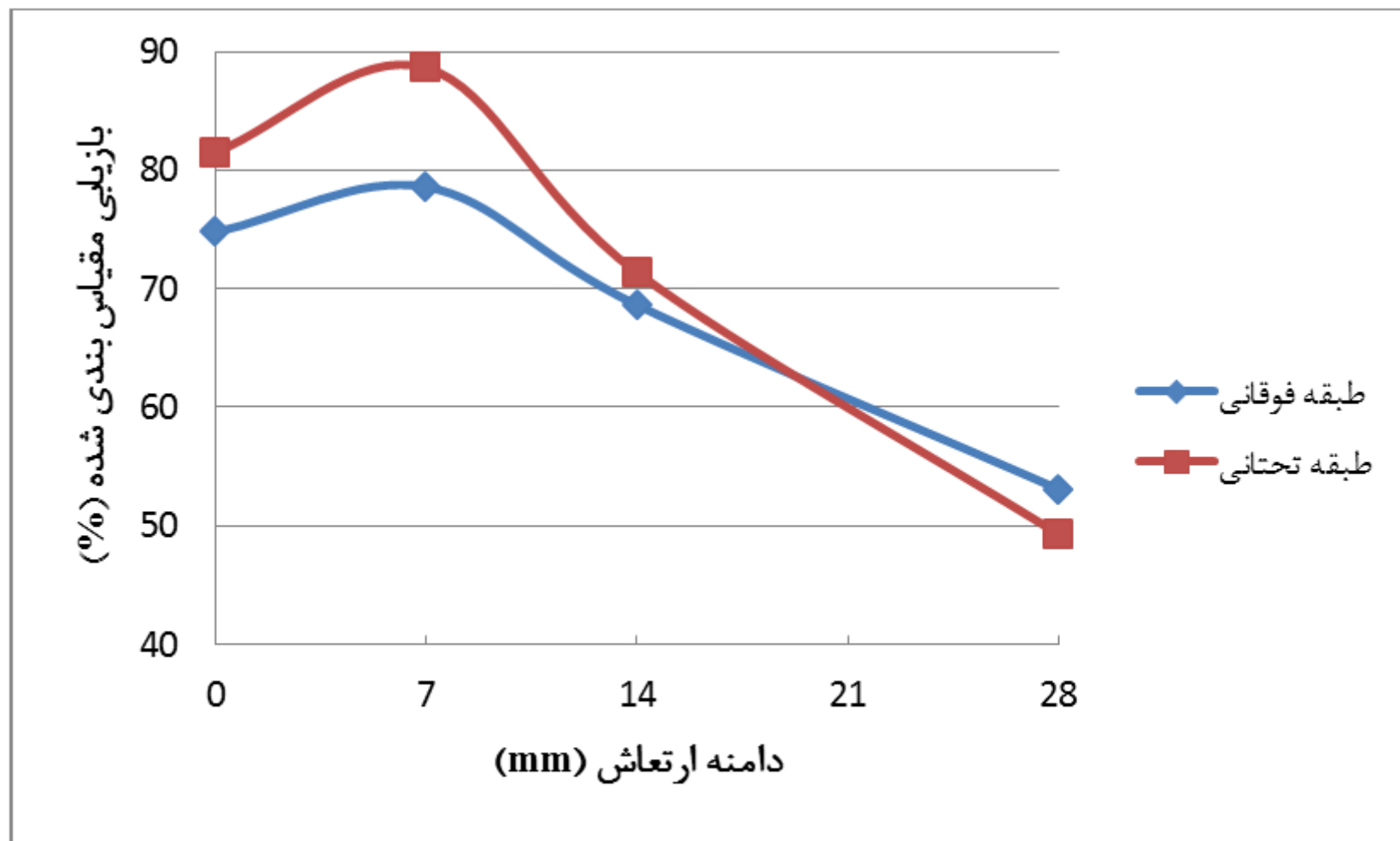
نتایج و بحث - سرند دو طبقه صنعتی



منحنی بازیابی سرندکشی سرند دو طبقه صنعتی بر حسب زاویه شیب هر یک از پنل ها



نتایج و بحث - سرند دو طبقه صنعتی

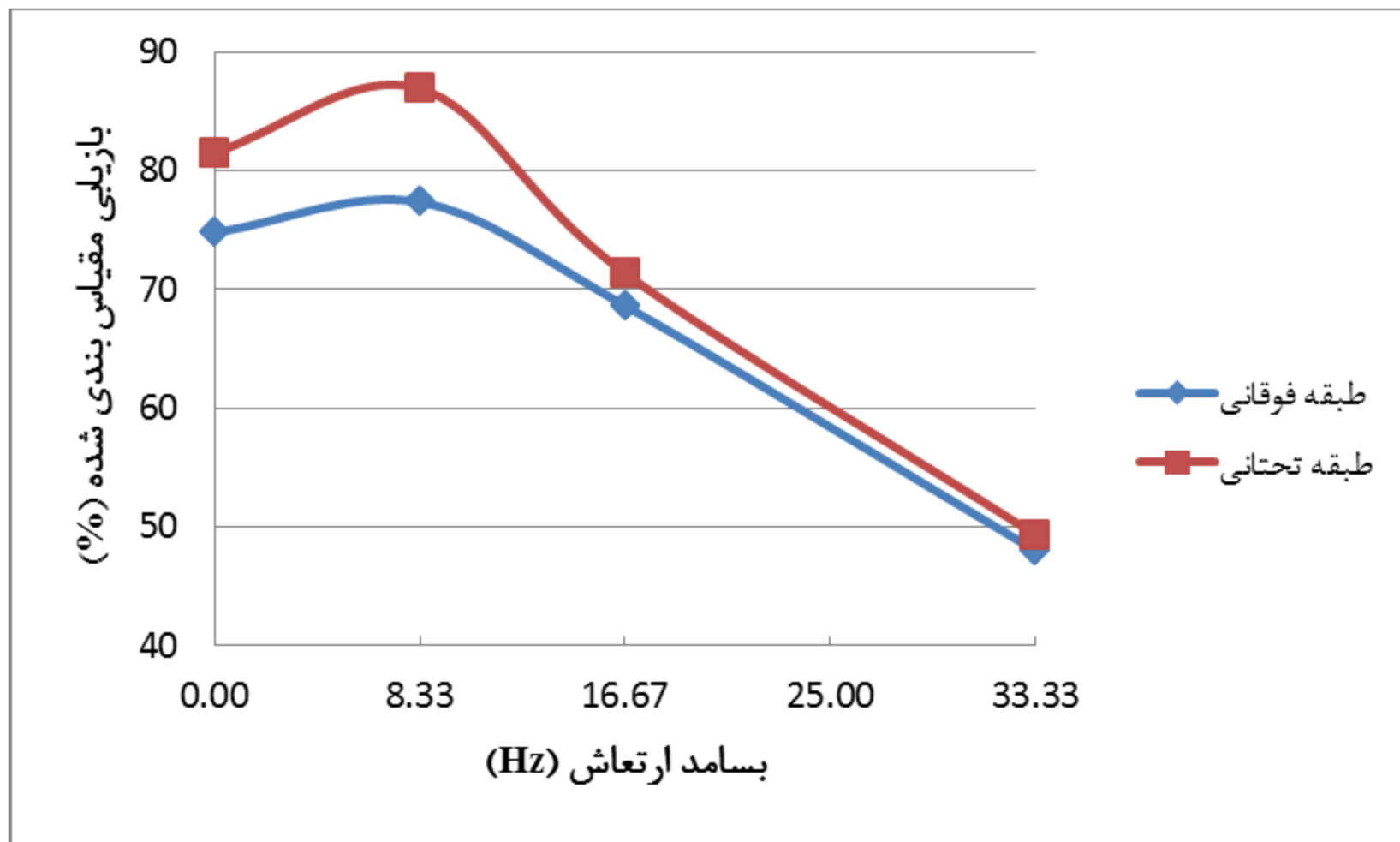


منحنی بازیابی سرندکشی سرند دو طبقه صنعتی بر حسب دامنه ارتعاش

تأثیر دامنه ارتعاش سرند بر بازیابی سرندکشی



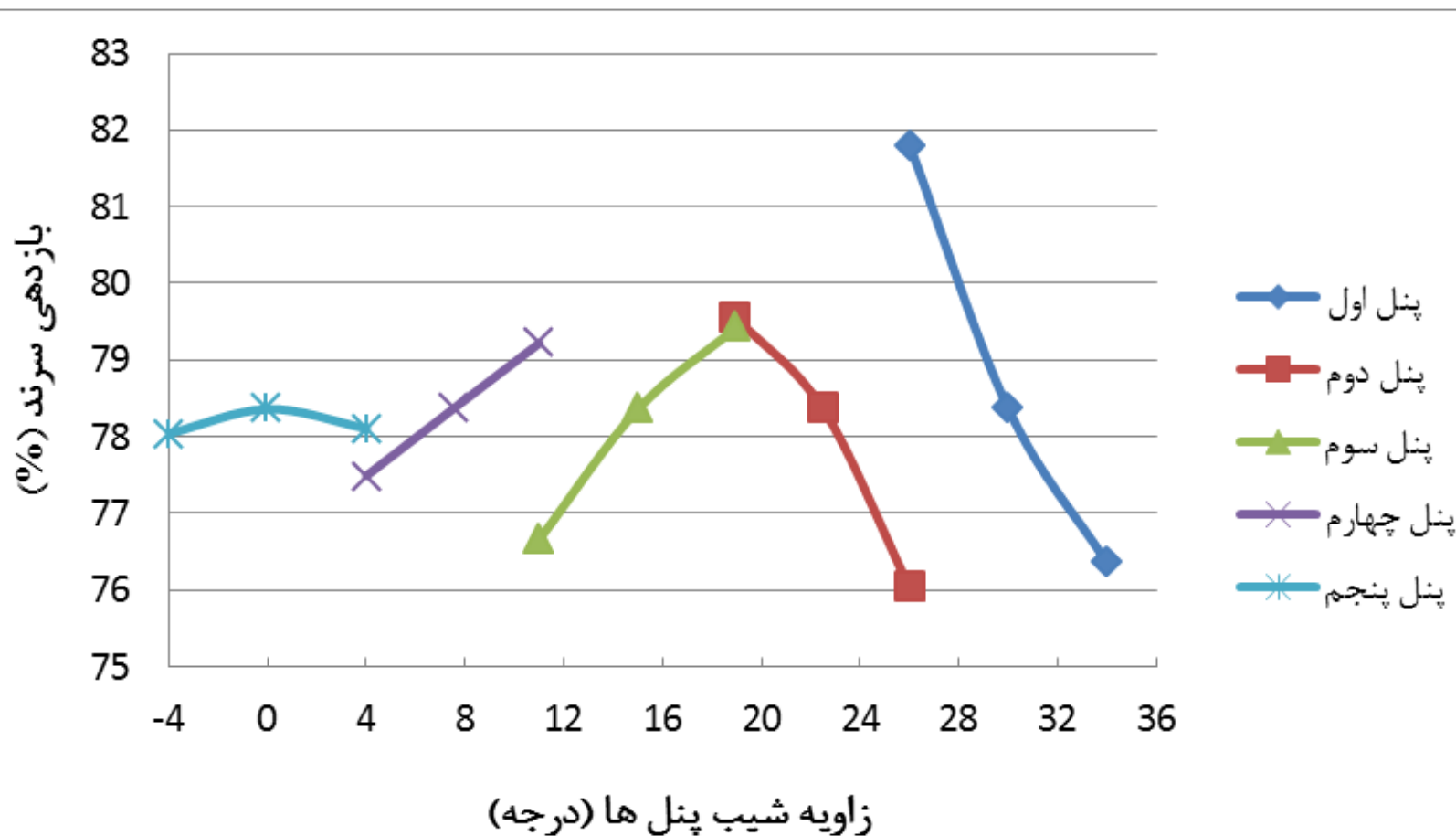
نتایج و بحث - سرنده دو طبقه صنعتی



منحنی بازیابی سرنده سرنده دو طبقه صنعتی بر حسب بسامد ارتعاش



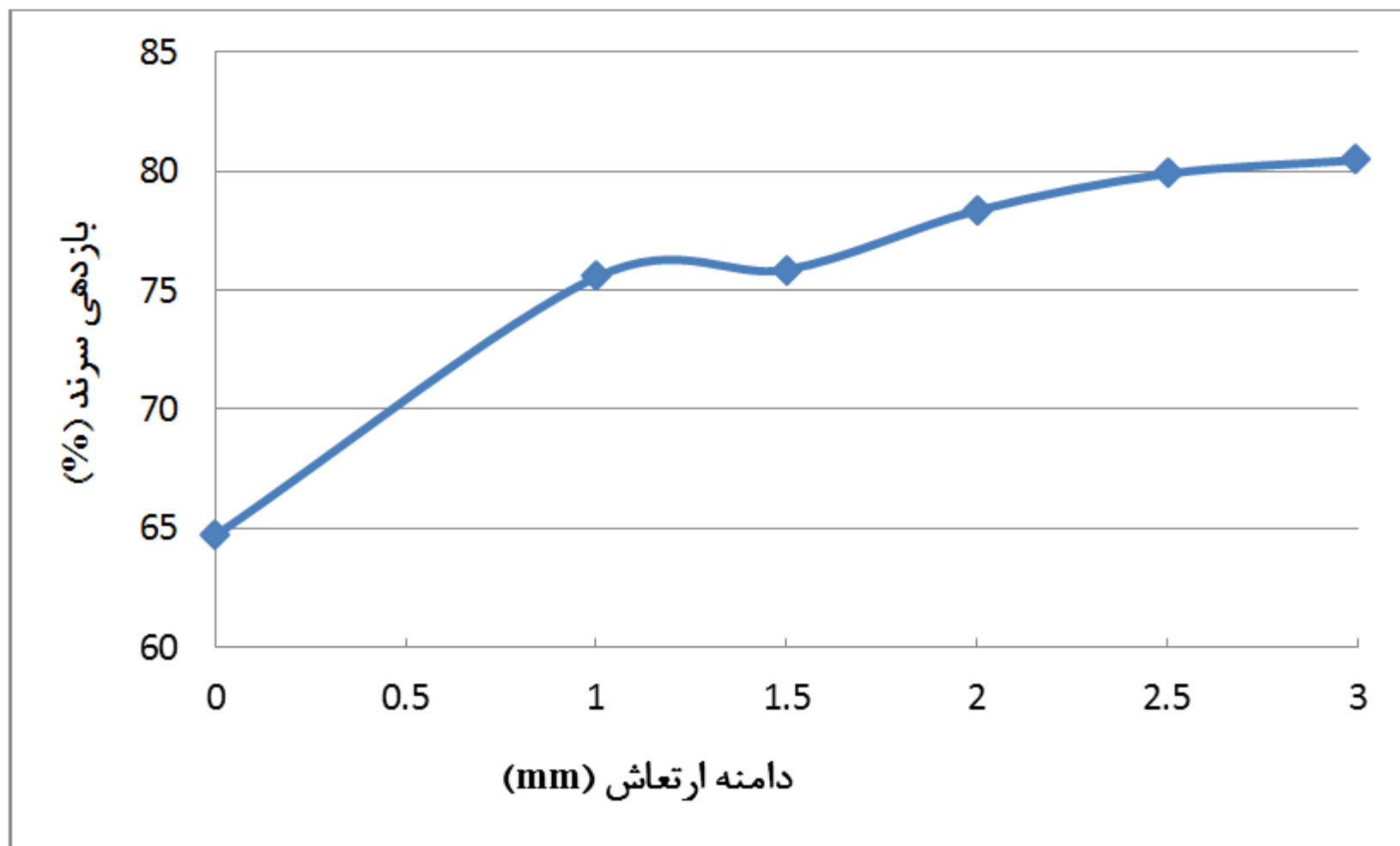
نتایج و بحث - سرند یک طبقه و پنج پنلی آزمایشگاهی



منحنی بازدهی جدایش سرند آزمایشگاهی پنج پنلی بر حسب زاویه شیب هر یک از پنل ها



نتایج و بحث - سرند یک طبقه و پنج پنی آزمایشگاهی

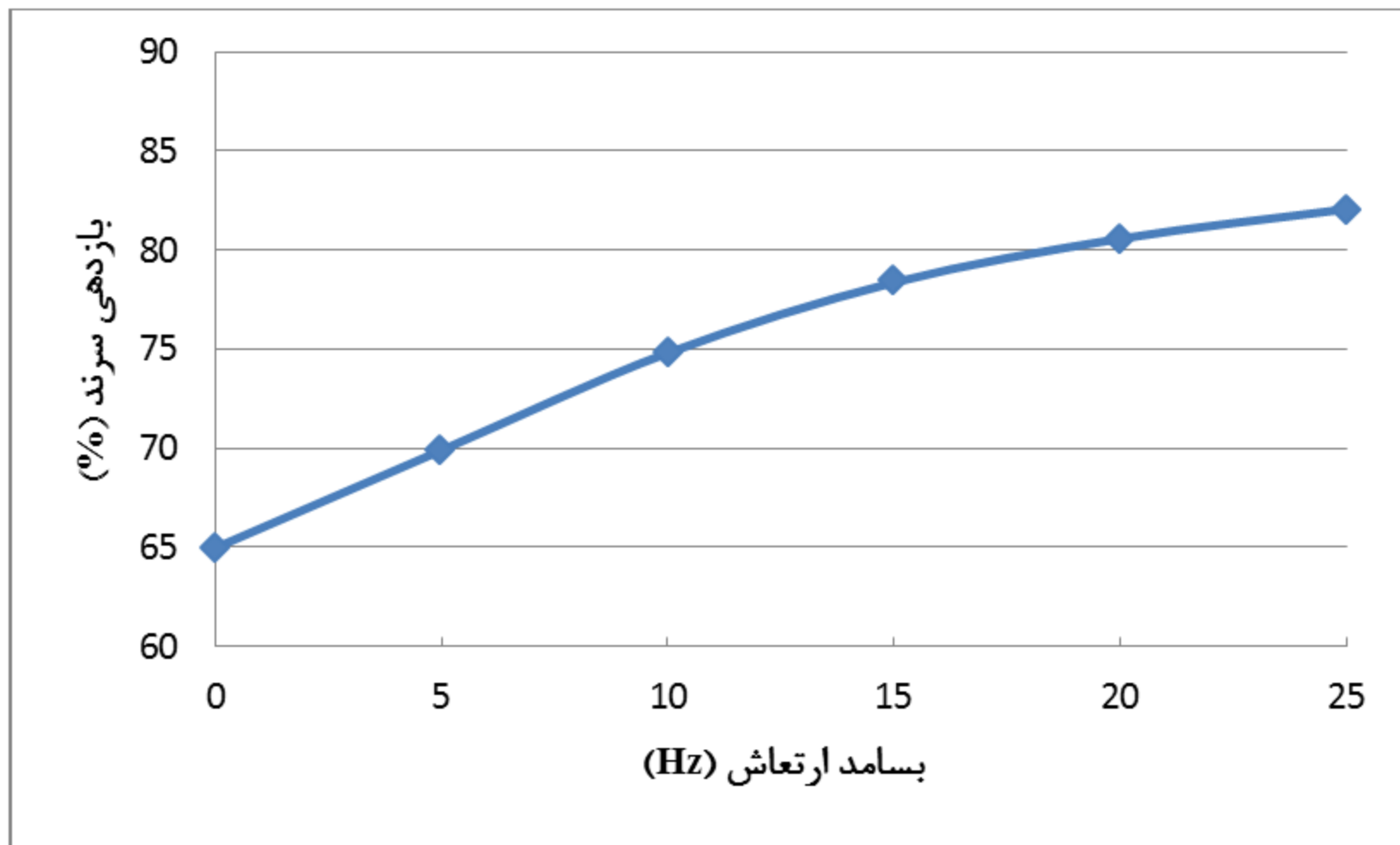


منحنی بازدهی جدایش سرند آزمایشگاهی پنج پنی بر حسب دامنه ارتعاش

تأثیر دامنه ارتعاش سرند بر بازدهی سرند



نتایج و بحث - سرنده یک طبقه و پنج پنی آزمایشگاهی

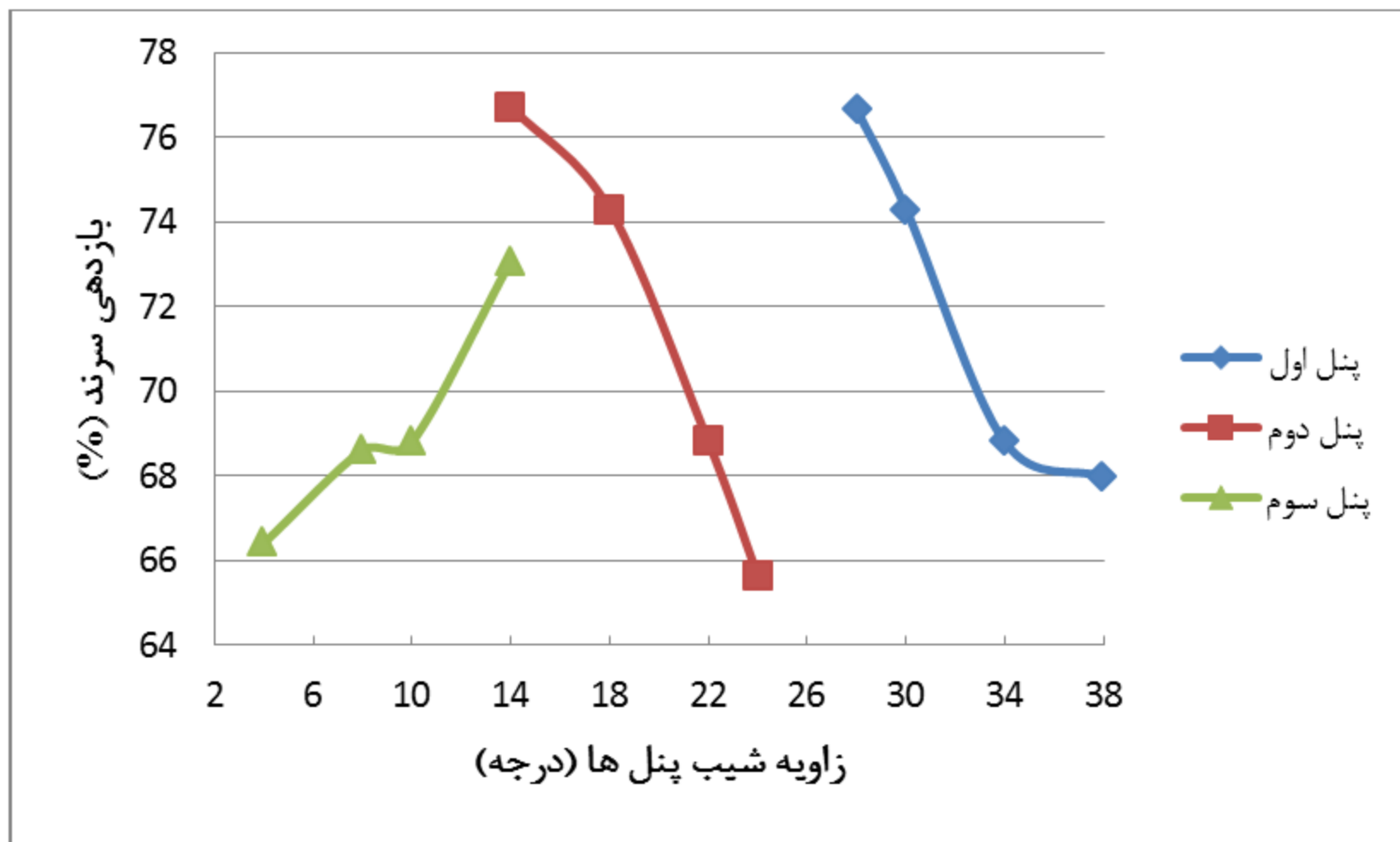


منحنی بازدهی جدایش سرنده آزمایشگاهی پنج پنی بر حسب بسامد ارتعاش

تأثیر بسامد ارتعاش سرنده بر بازدهی سرنده



نتایج و بحث - سرند یک طبقه و سه پنلی آزمایشگاهی

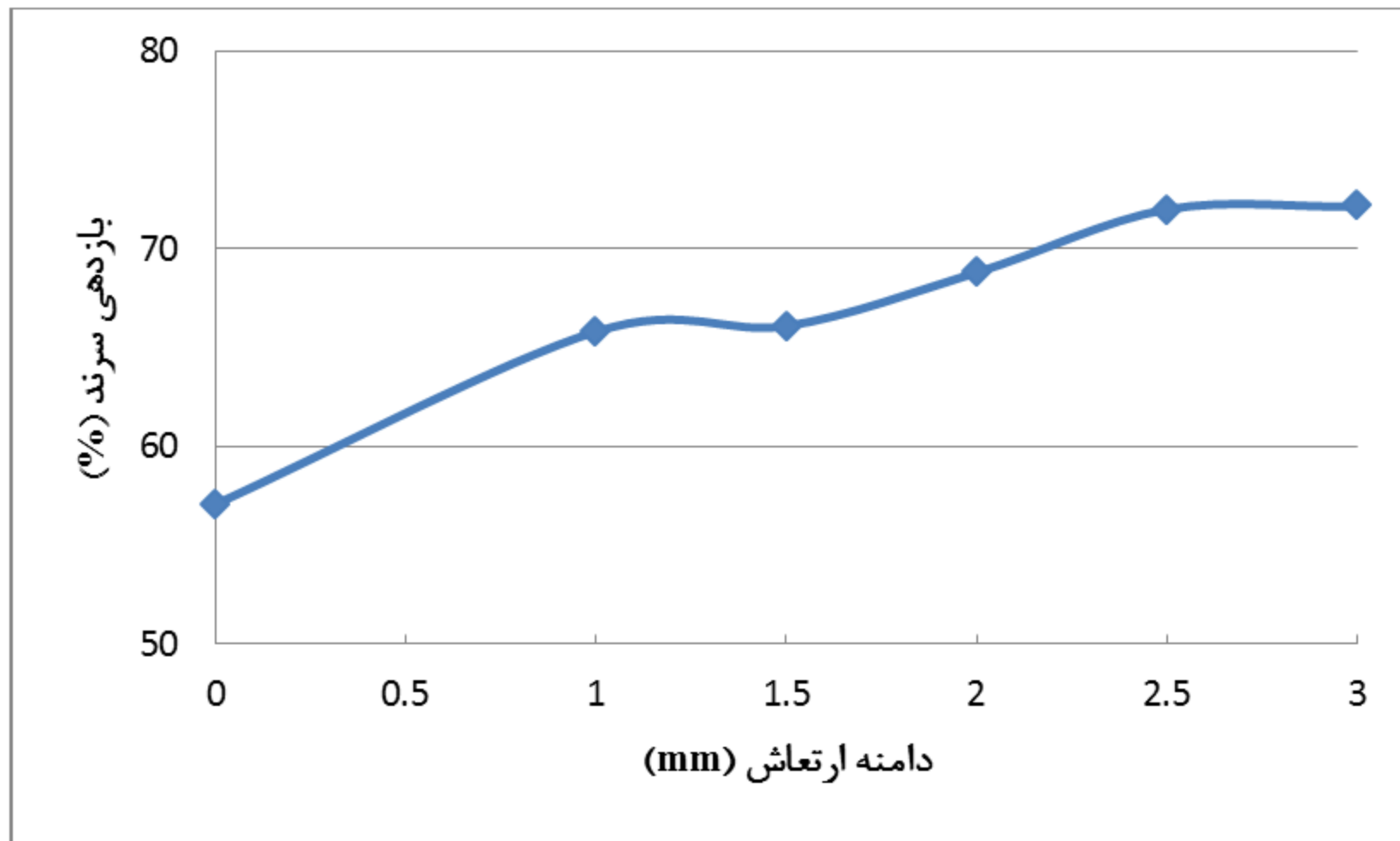


منحنی بازدهی جدایش سرند آزمایشگاهی سه پنلی بر حسب زاویه شیب هر یک از پنل ها

تأثیر زاویه شیب هر پنل بر بازدهی سرند



نتایج و بحث - سرنده یک طبقه و سه پنی آزمایشگاهی

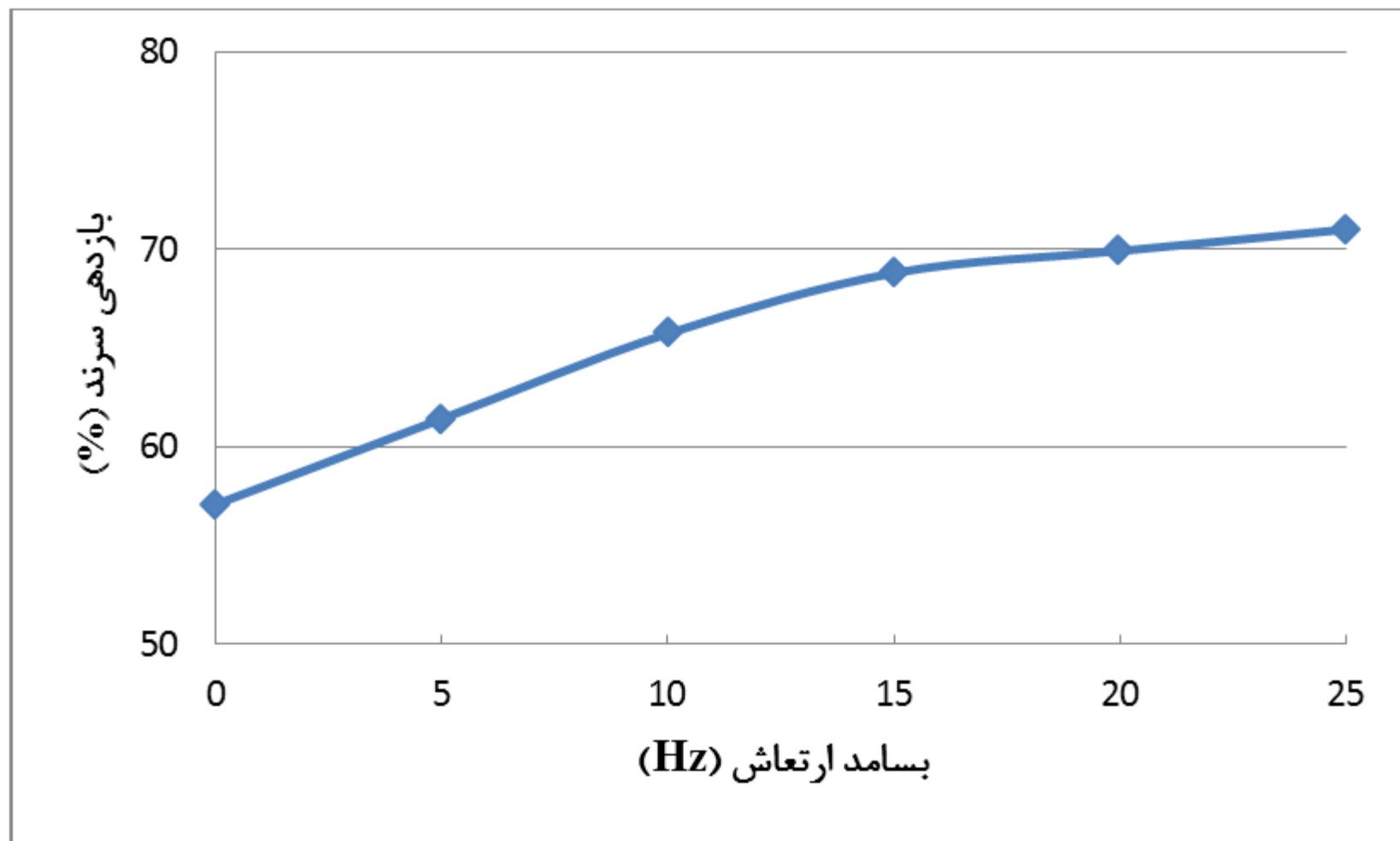


منحنی بازدهی جدایش سرنده آزمایشگاهی سه پنی بر حسب دامنه ارتعاش

تأثیر دامنه ارتعاش سرنده بر بازدهی سرنده



نتایج و بحث - سرند یک طبقه و سه پنلی آزمایشگاهی

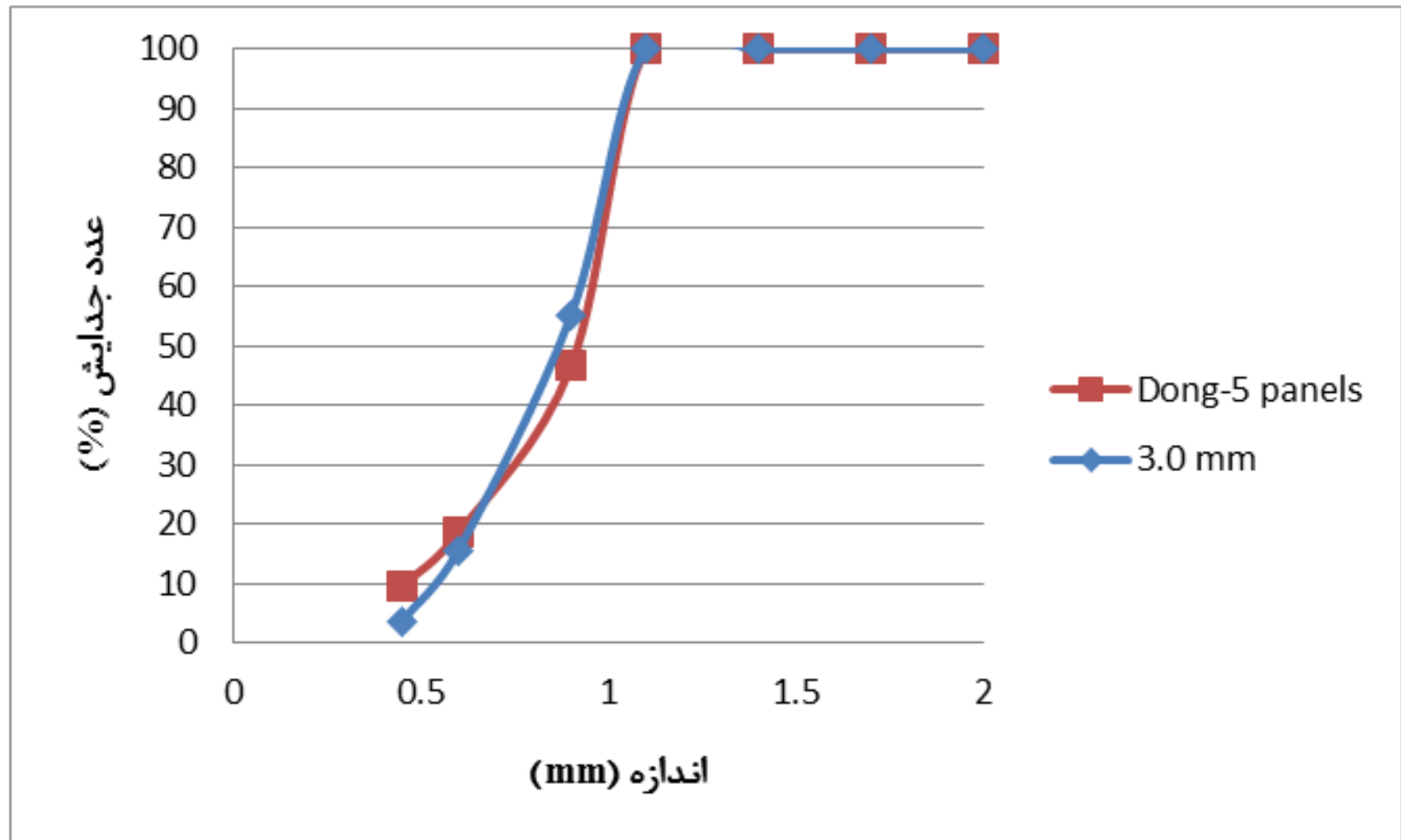


منحنی بازدهی جدایش سرند آزمایشگاهی سه پنلی بر حسب بسامد ارتعاش

تأثیر بسامد ارتعاش سرند بر بازدهی سرند

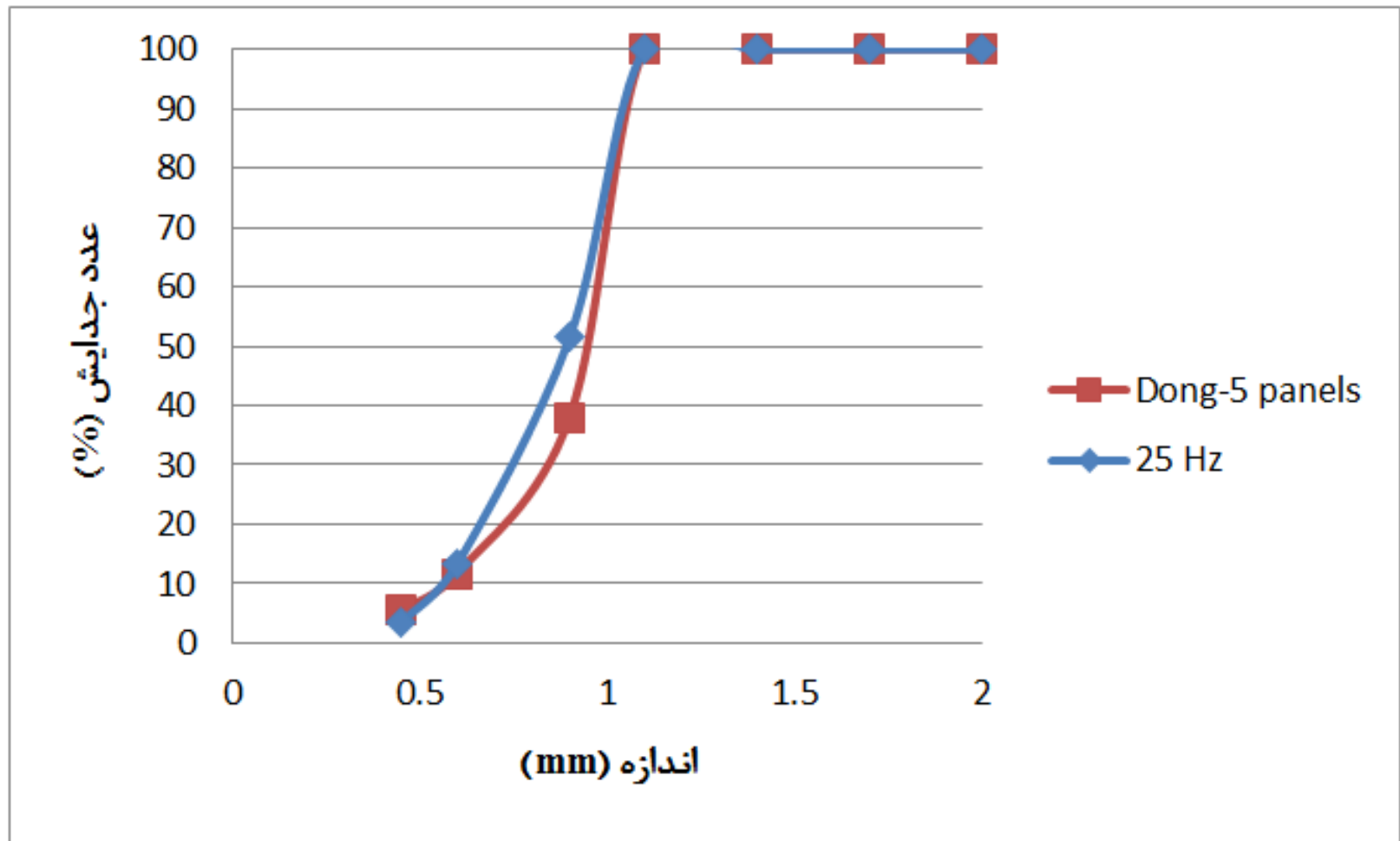


نتایج و بحث - اعتبارسنجی



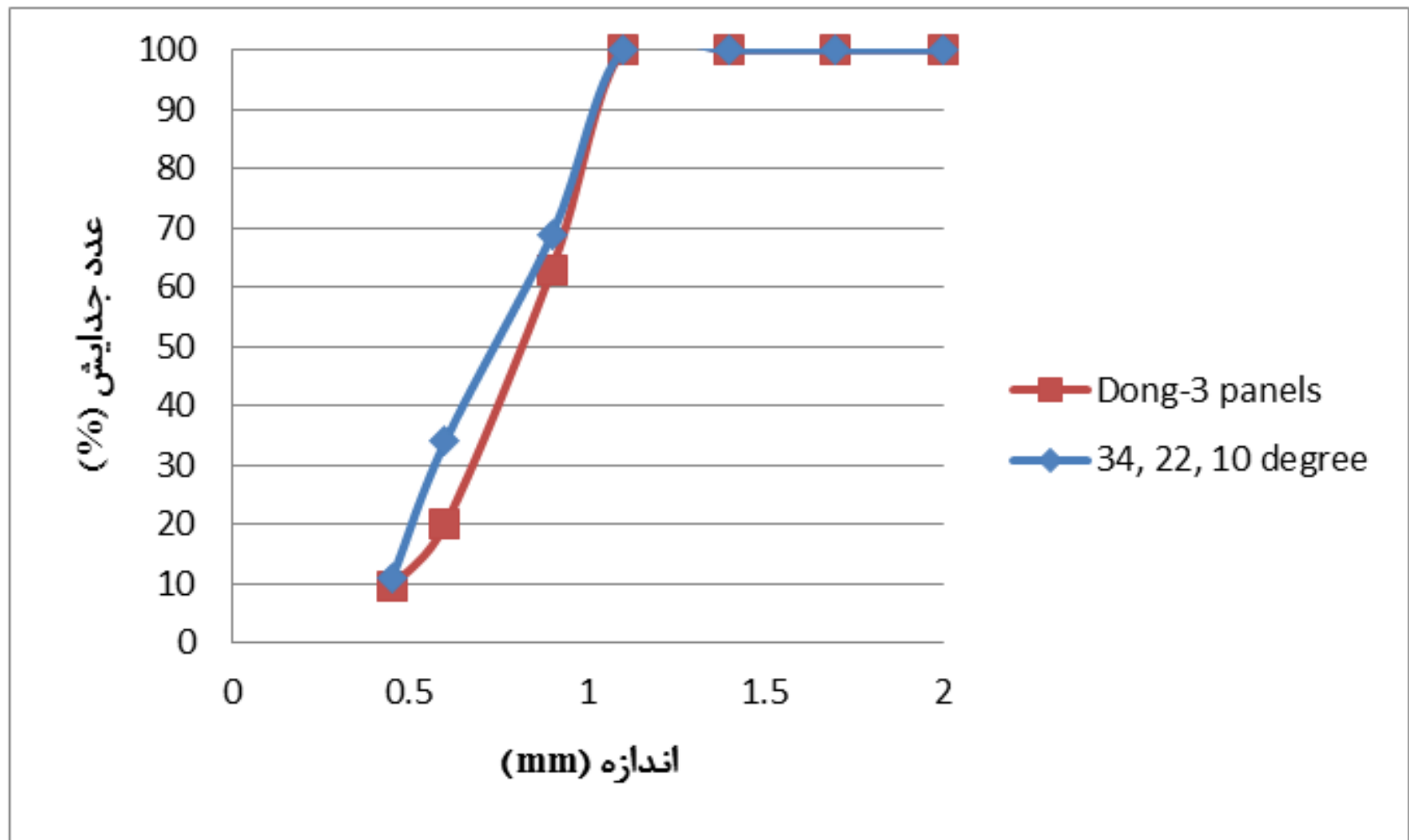


نتایج و بحث - اعتبارسنجی



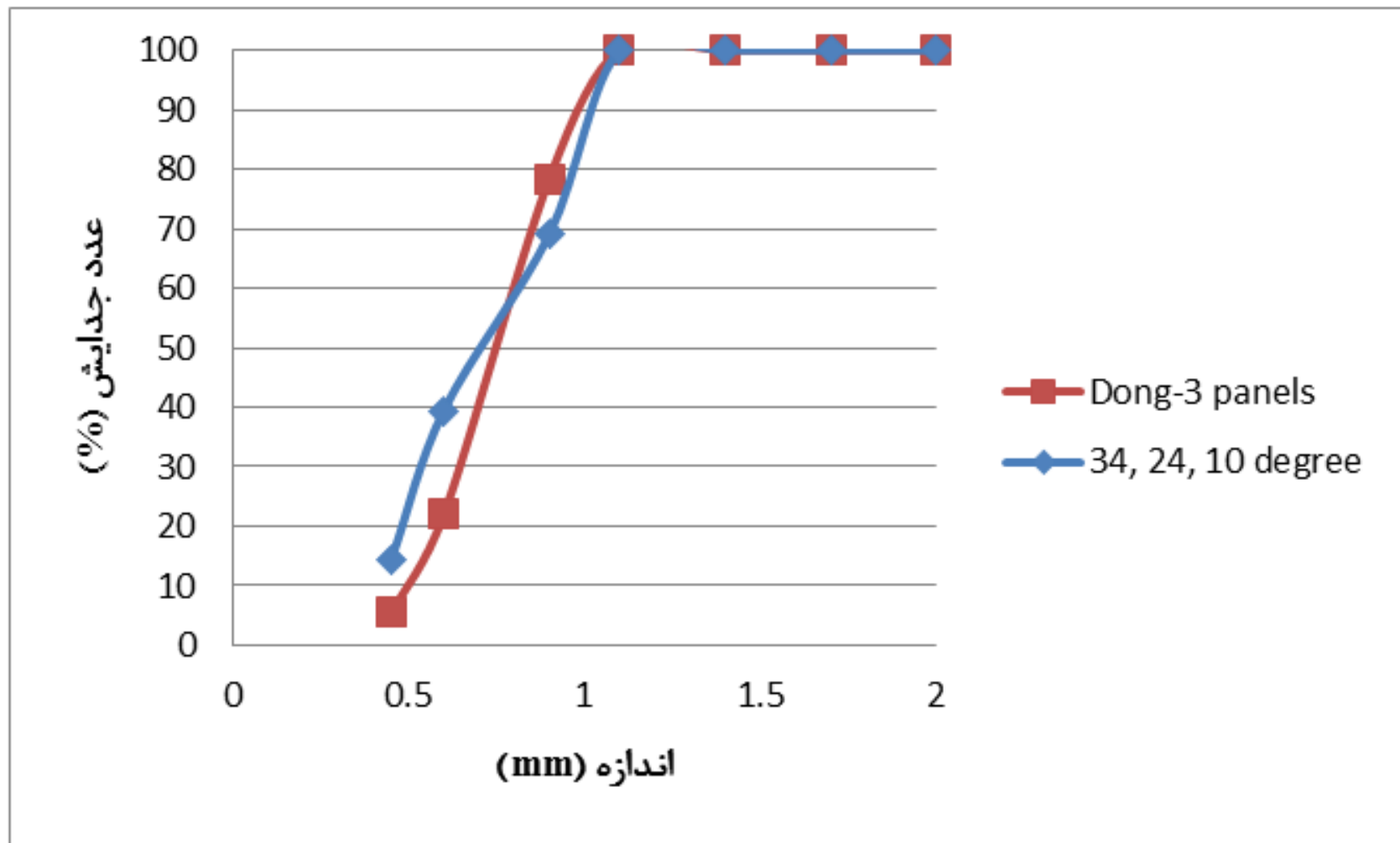


نتایج و بحث - اعتبارسنجی



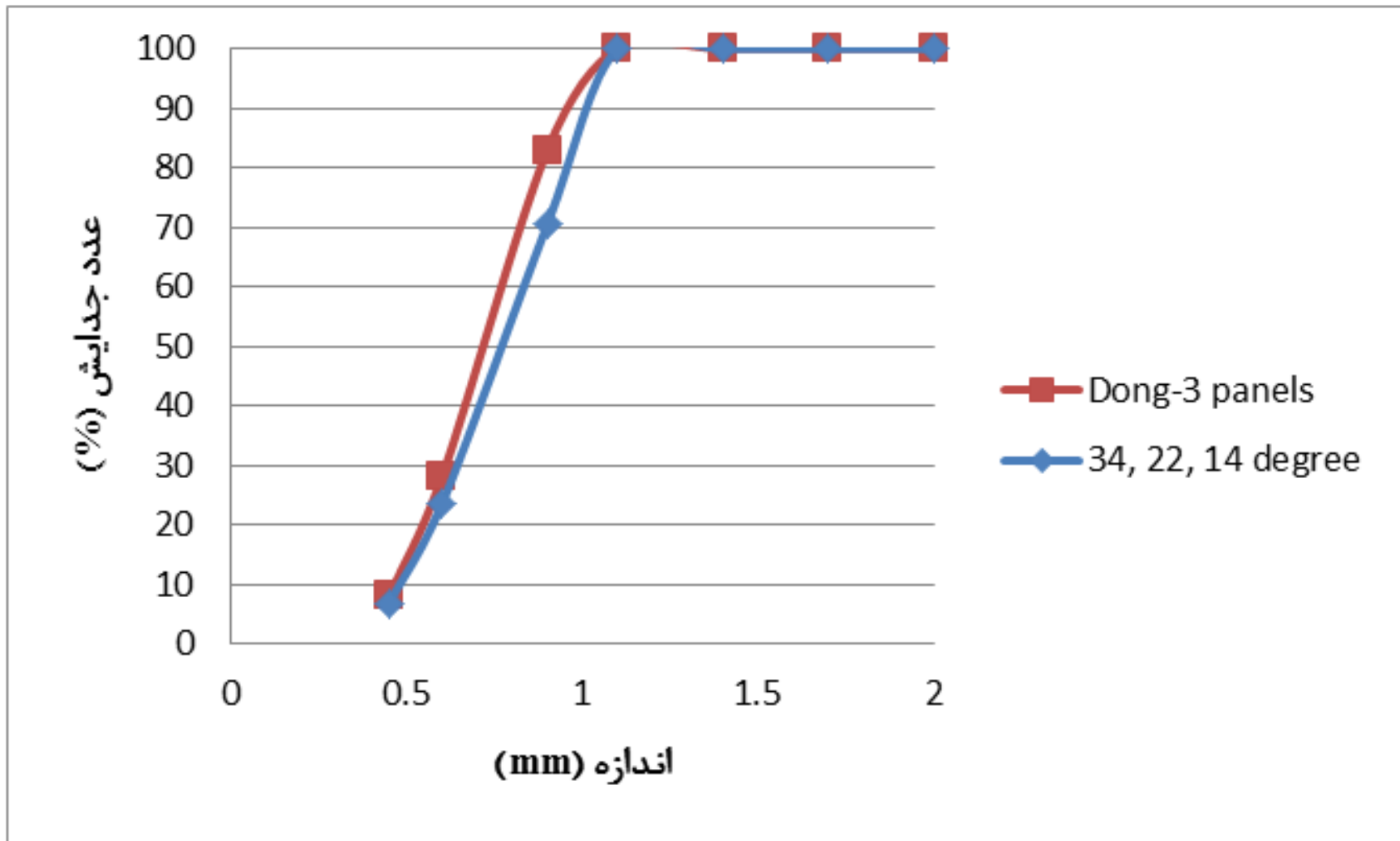


نتایج و بحث - اعتبارسنجی



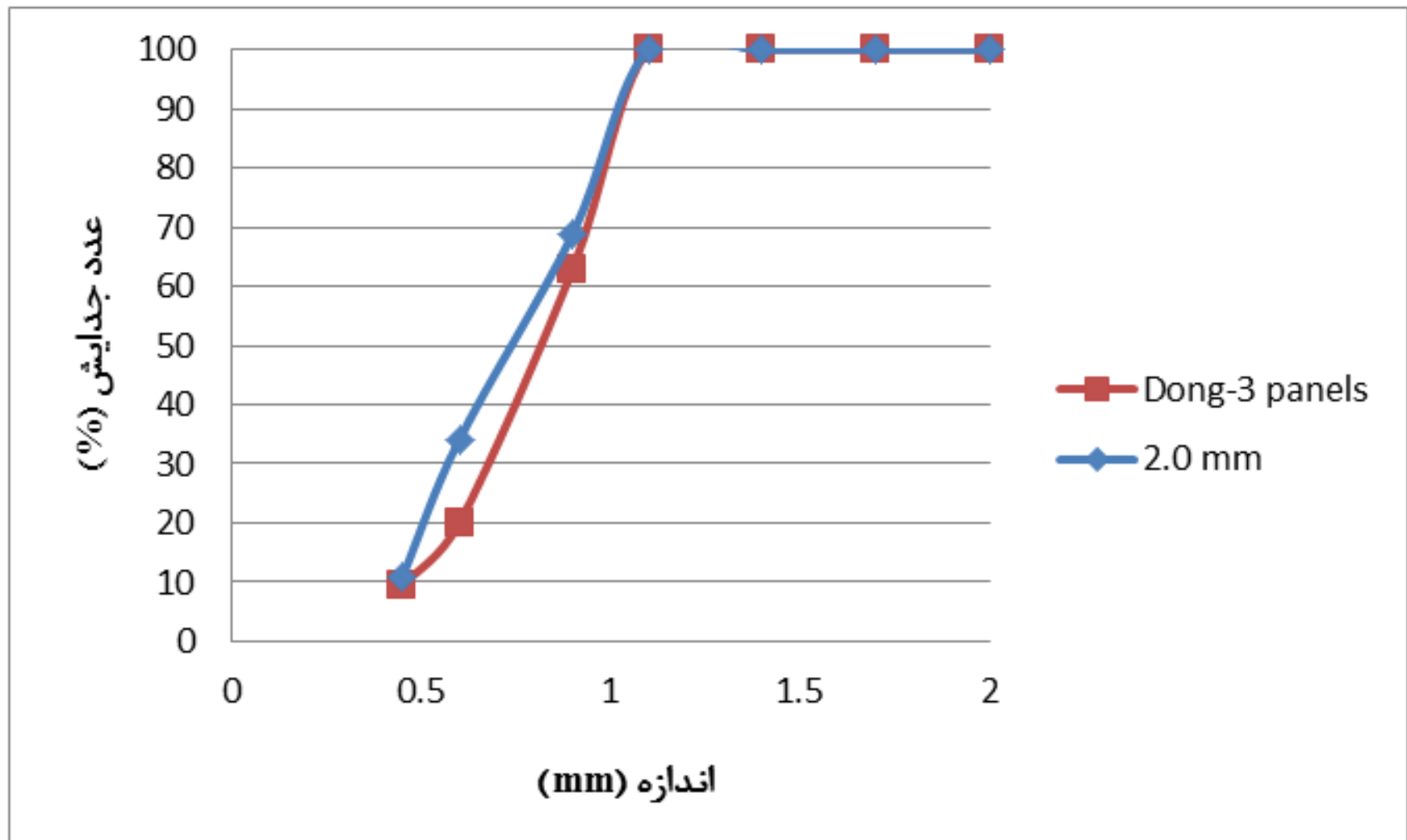


نتایج و بحث - اعتبارسنجی



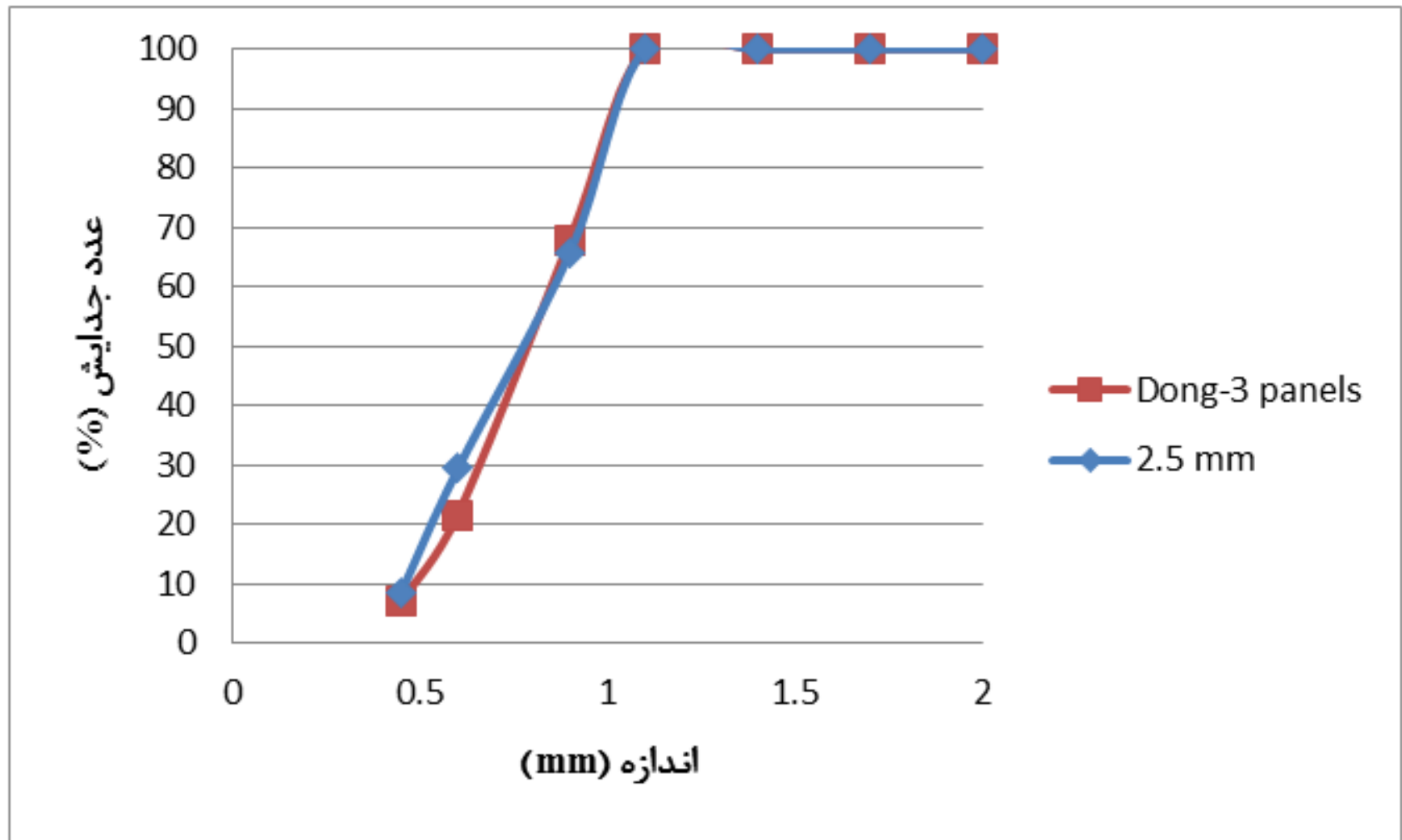


نتایج و بحث - اعتبارسنجی



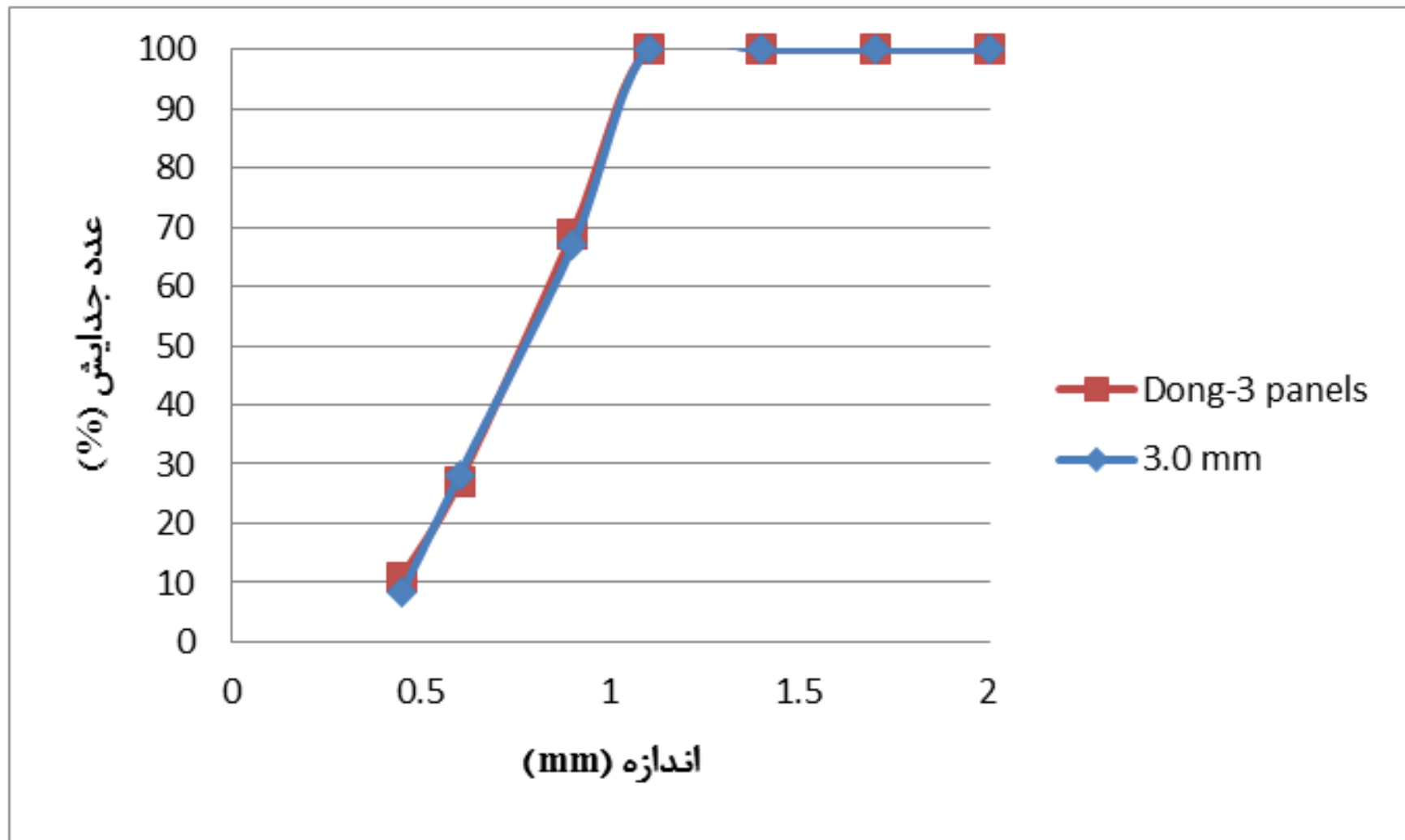


نتایج و بحث - اعتبارسنجی



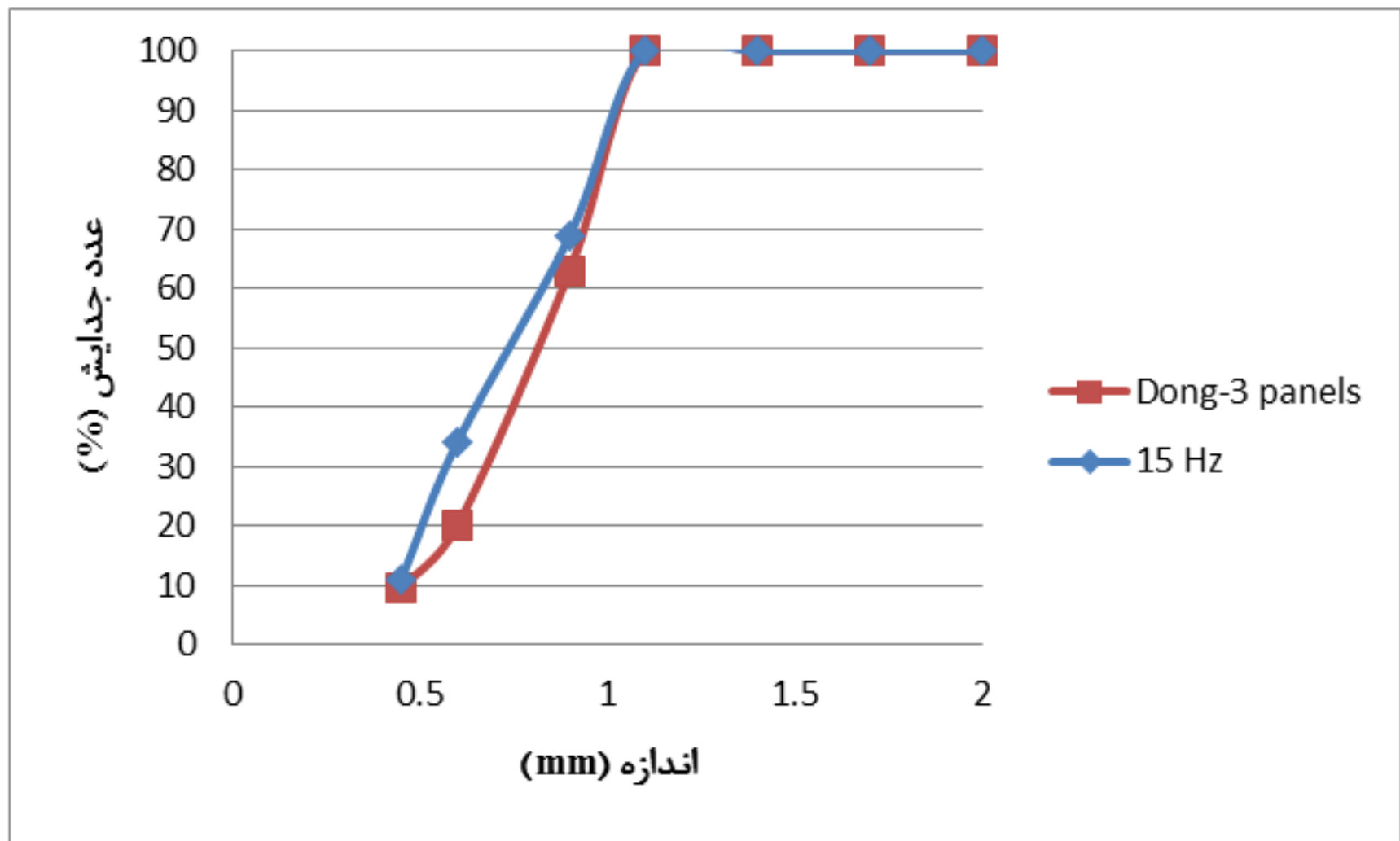


نتایج و بحث - اعتبارسنجی



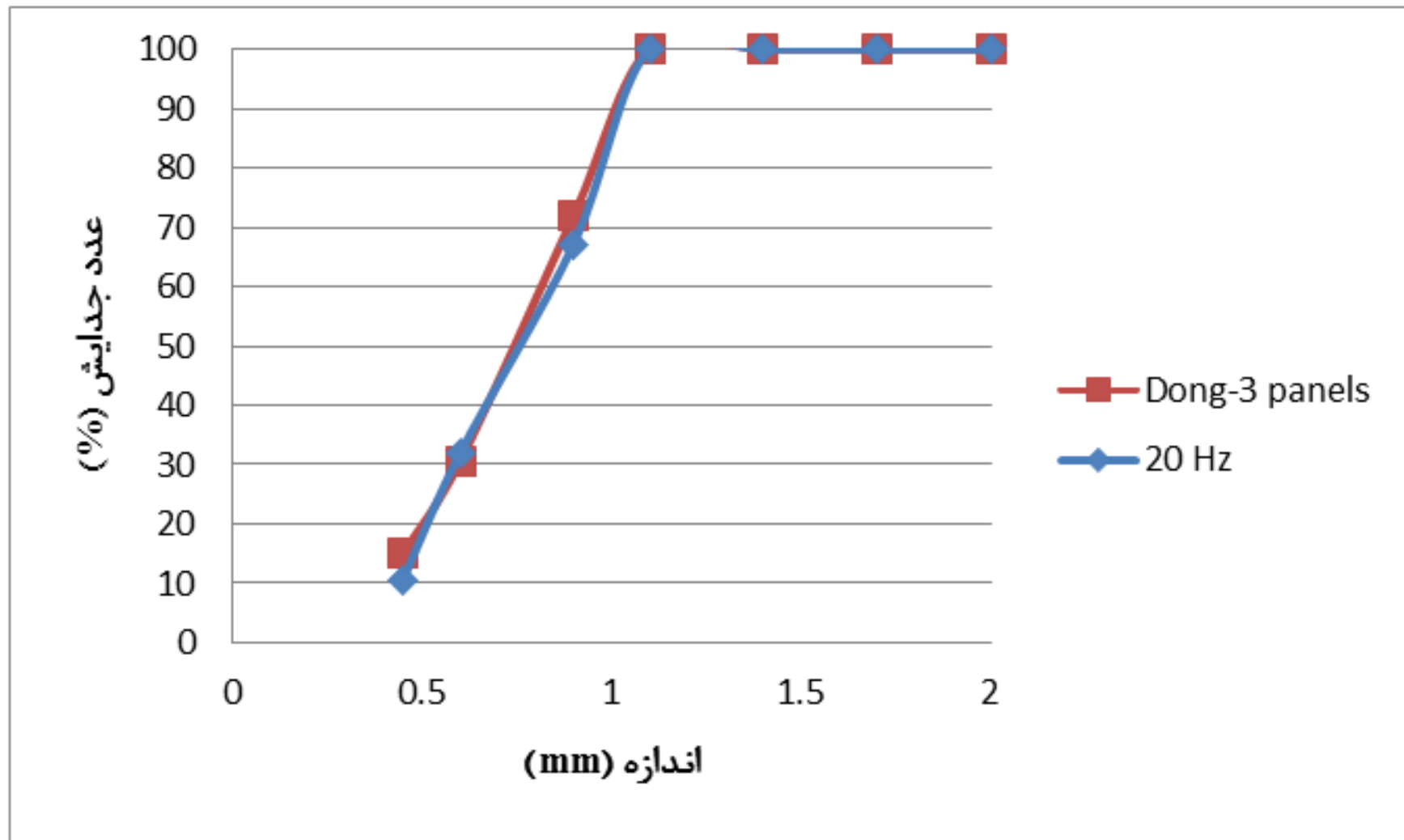


نتایج و بحث - اعتبارسنجی



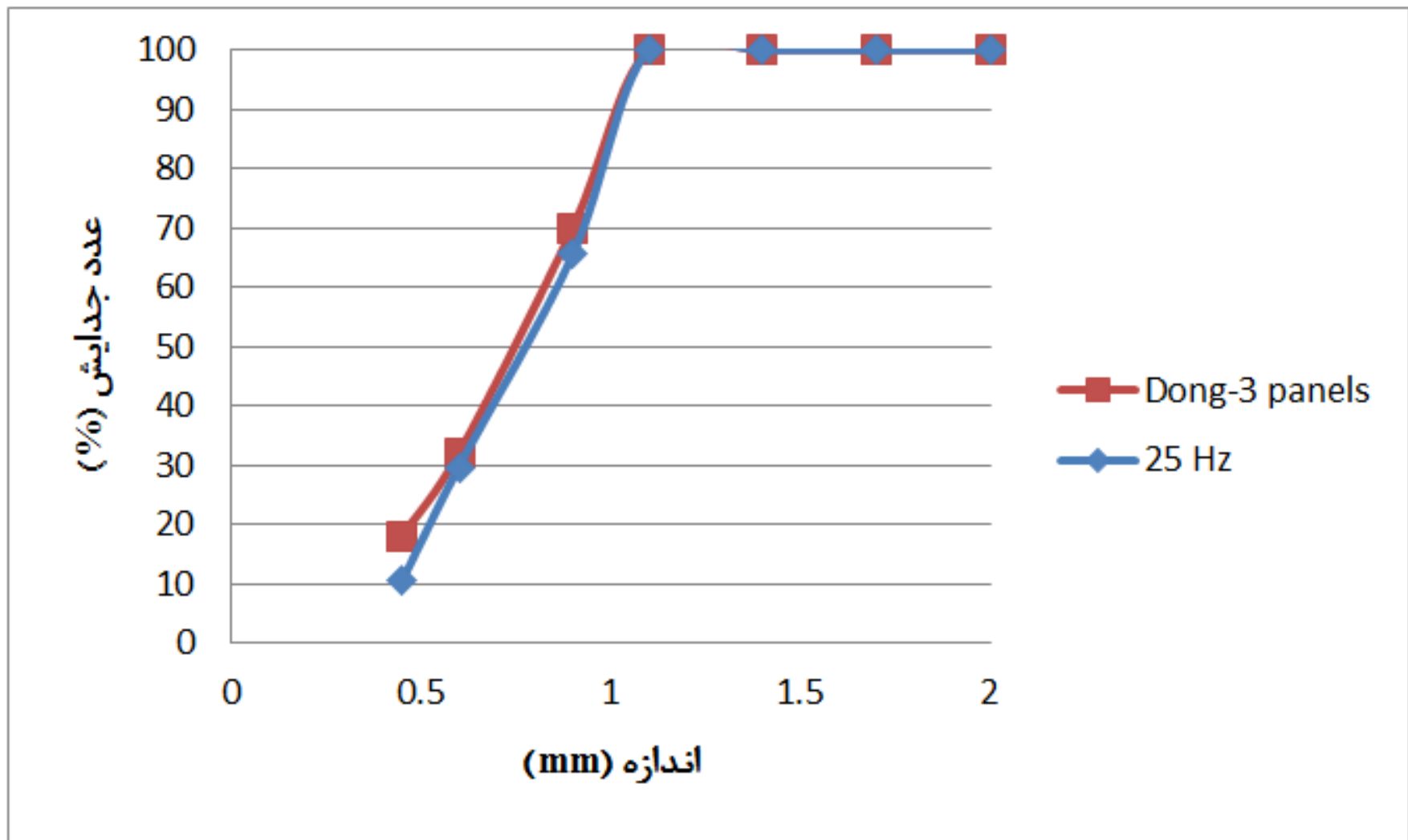


نتایج و بحث - اعتبارسنجی

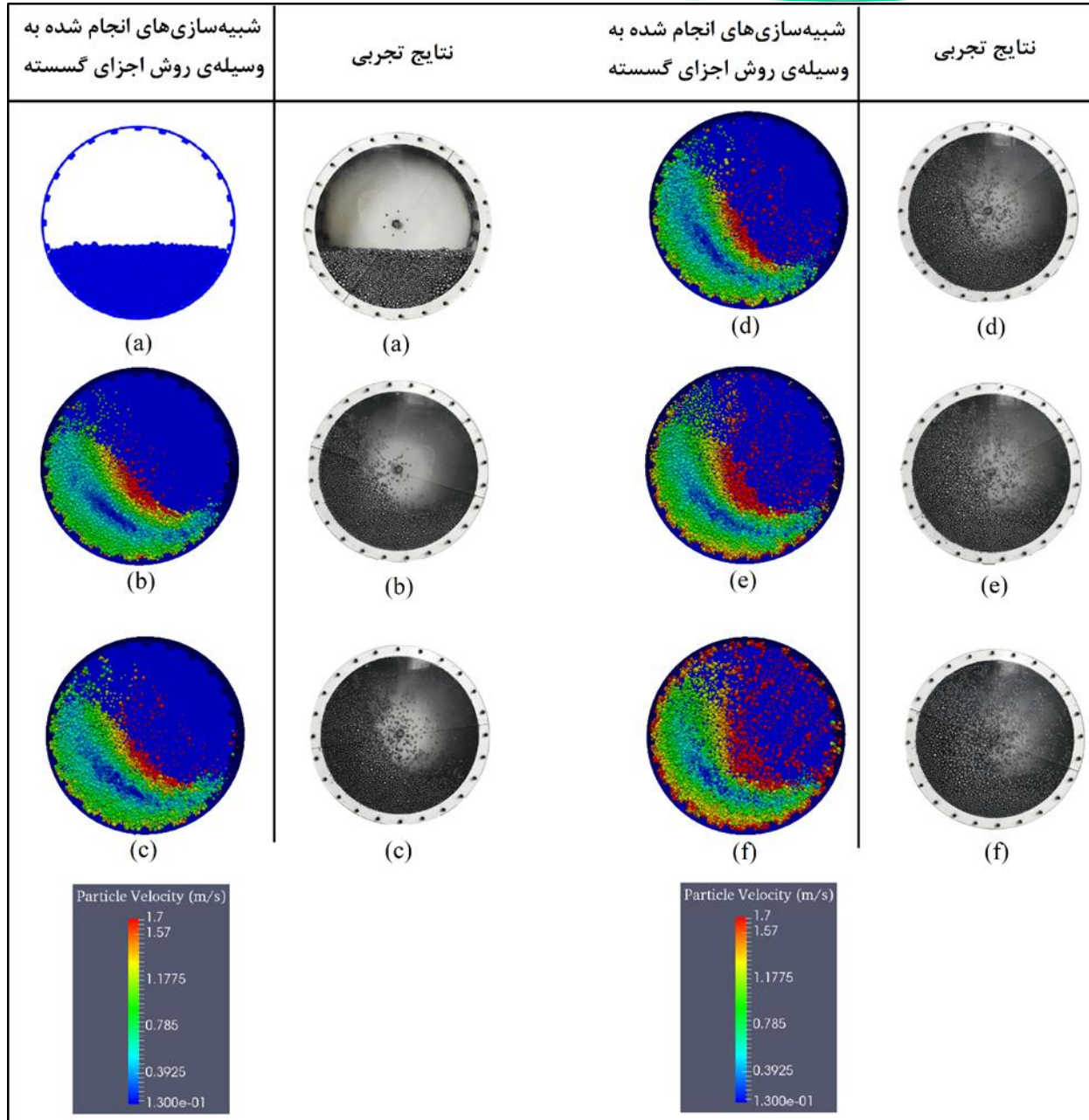




نتایج و بحث - اعتبارسنجی



نتایج و بحث - اعتبارسنجی





نتایج و بحث - اعتبارسنجی

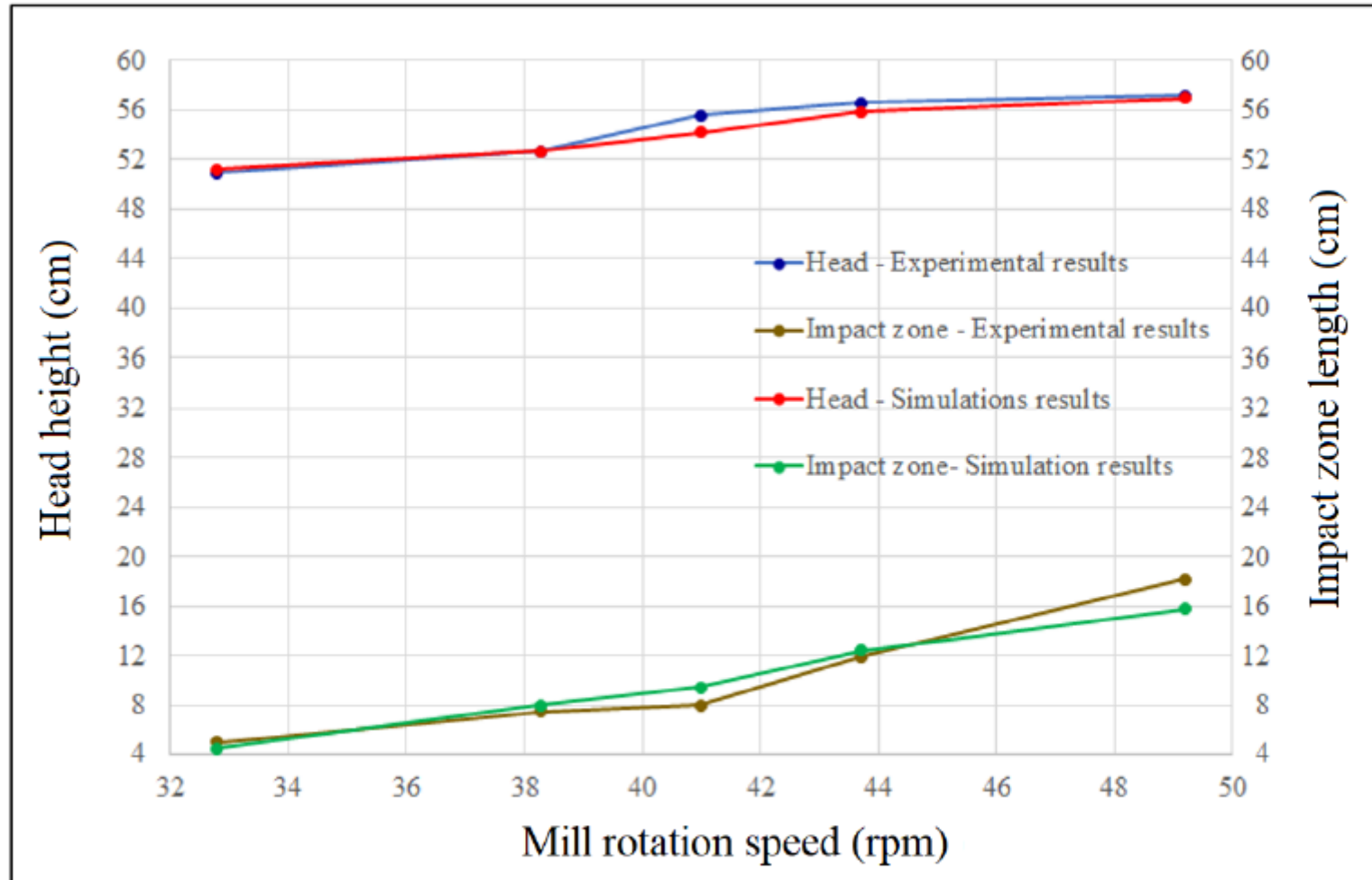


Figure 10. Validation of simulation results of the laboratory-scale SAG mill by comparison with experimental results at the same operating conditions at different mill rotation speeds (rpm).



فصل دوم: دینامیک سیالات محاسباتی

Computational Fluid Dynamics

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

□ دینامیک سیالات محاسباتی یا (CFD) (Computational fluid dynamics)

یکی از شاخه‌های مکانیک سیالات است که با استفاده از آنالیز عددی و الگوریتم‌های عددی، مسائل مربوط به سیالات (مایعات و گازها) را تجزیه و تحلیل می‌کند.

□ از ابرکامپیوترها برای شبیه‌سازی برهم‌کنش مایعات و گازها با سطوح شرایط مرزی استفاده می‌شود.

□ این شاخه از مکانیک سیالات، مکانیک قدیم را به علوم رایانه و توانمندی‌های نوین محاسباتی آن در نیمه دوم قرن بیستم و در قرن جدید میلادی وصل می‌کند.

□ در این روش با تبدیل معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر سیالات به معادلات جبری امکان حل عددی این معادلات فراهم می‌شود.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

□ با تقسیم ناحیه موردنظر برای تحلیل به المان‌های کوچک‌تر و اعمال شرایط مرزی برای

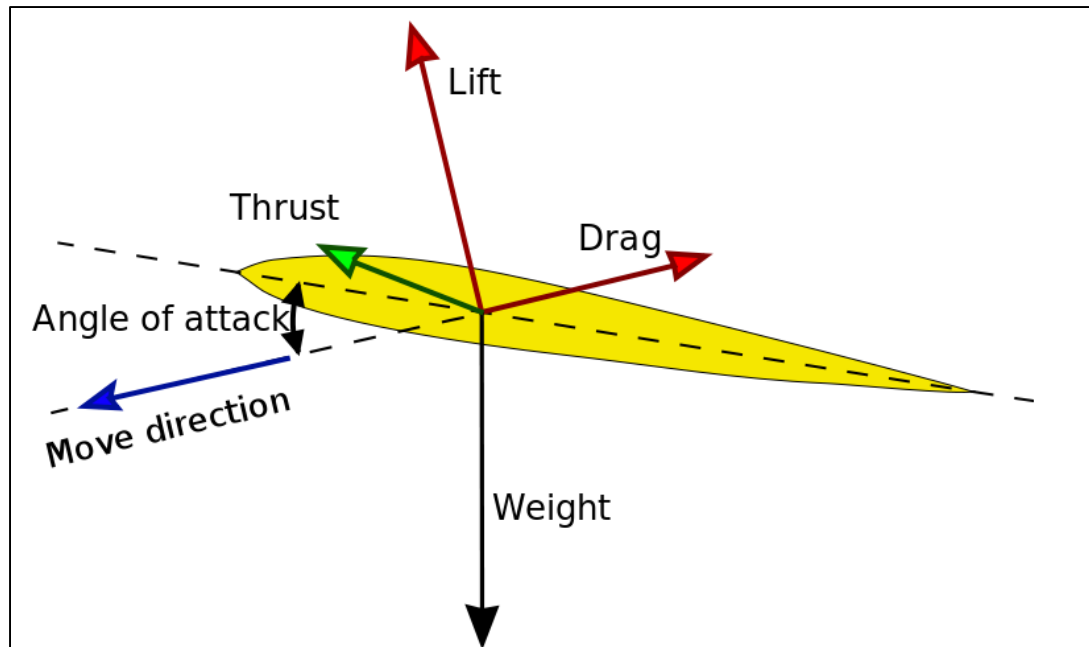
گره‌های مرزی، با اعمال تقریب‌هایی یک دستگاه معادلات خطی بدست می‌آید که با حل

این دستگاه معادلات جبری، مقدار سرعت، فشار و دما در ناحیه موردنظر بدست می‌آید.

□ با استفاده از نتایج بدست‌آمده از حل معادلات می‌توان برآیند نیروهای وارد بر سطوح، ضرایب

برا (نیروی بالابر) (lift) و پسا (نیروی بازدارنده) (drag) و ضریب انتقال حرارت را محاسبه

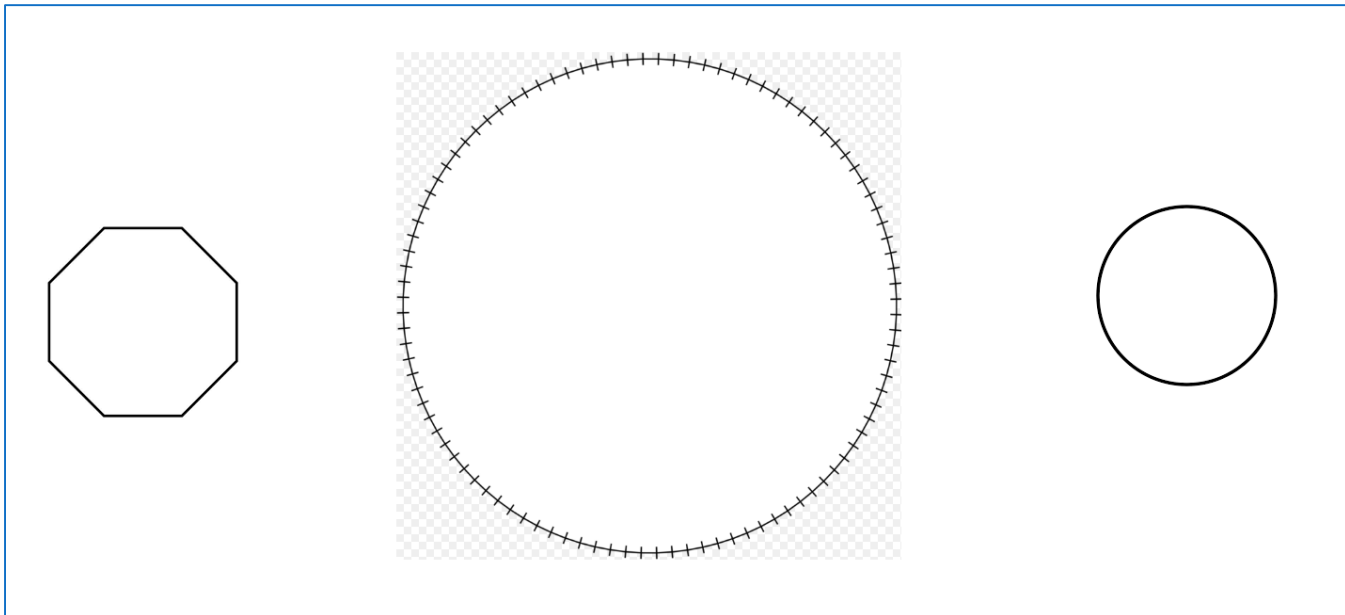
نمود.



دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

❑ در دینامیک سیالات محاسباتی از روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی جهت رسیدن به جواب بهره می‌برند، اما در تمامی موارد، دامنه مسئله را به تعداد زیادی اجزاء کوچک تقسیم می‌کنند و برای هر یک از این اجزاء مسئله را حل می‌کنند.

❑ پس از رسم یک ۱۰۰ ضلعی (hectagon) منتظم مشاهده خواهیم نمود که شکل حاصل مشابه دایره است. با افزایش تعداد اضلاع این شباهت بیشتر خواهد شد. در حقیقت این پدیده در مبحث CFD نیز مفهوم خواهد داشت.



دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

❑ روش‌های عددی مورد استفاده در دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

❑ روش‌های گسسته‌سازی (discretization) معادلات دیفرانسیل:

▪ روش اجزاء محدود (Finite Element Method)

▪ روش حجم محدود (Finite Volume Method)

▪ روش تفاضل محدود (Finite Difference Method)

▪ روش‌های طیفی (Spectral Methods)

❑ در میان این روش‌ها، روش حجم محدود کاربرد بیشتری به خصوص در مدل‌سازی جریان‌های تراکم‌ناپذیر دارد.

❑ بیشتر نرم‌افزارهای تجاری در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی نیز بر مبنای این روش بسط و توسعه یافته‌اند.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

□ روش‌های عددی مورد استفاده در دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

□ مدل‌های آشفتگی:

■ شبیه‌سازی به روش میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس (RANS)

(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) (ناویر-استوکس با رینولدز

میانگین‌گیری شده)

■ شبیه‌سازی عددی مستقیم ((DNS) (Direct Numerical Simulation)

■ شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ ((LES) (Large Eddy Simulation)

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

□ کاربردها:

- اکنون روش دینامیک سیالات محاسباتی جای خود را در میان روش‌های آزمایشگاهی و تحلیلی برای تحلیل مسائل سیالات و انتقال حرارت باز کرده است و استفاده از این روش برای انجام تحلیل‌های مهندسی امری عادی شده است.
- دینامیک سیالات محاسباتی به صورت گسترده در زمینه‌های مختلف صنعتی مرتبط با سیالات، انتقال حرارت و انتقال مواد به کمک سیال بکار گرفته می‌شود.
- از جمله این موارد می‌توان به صنایع خودروسازی، صنایع هوافضا، **توربوماشین‌ها** (توربین‌ها، پمپ‌ها، دمنده‌ها و کمپرسورها)، صنایع هسته‌ای، صنایع نظامی، **صنایع نفت و گاز و انرژی** و بسیاری موارد گسترده صنعتی دیگر اشاره نمود که دانش دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان گره‌گشای مسائل صنعتی مرتبط تبدیل شده است.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

□ روش اجزاء محدود یا روش المان محدود (FEM) (Finite Element Method)

روشی عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و نیز حل معادله‌های انتگرالی است.

□ کاربرد عملی اجزای محدود معمولاً با نام تحلیل اجزا محدود (FEA) (Finite Element

Analysis) خوانده می‌شود.

□ اساس کار این روش حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده‌سازی آن‌ها به معادلات

دیفرانسیل معمولی، که با روش‌های عددی مانند اویلر حل می‌شوند، می‌باشد.

□ در حل معادلات دیفرانسیل جزئی مسئله مهم این است که به معادله ساده‌ای که از نظر

عددی پایدار است، برسیم (به این معنا که خطا در داده‌های اولیه و در حین حل به حدی

نباشد که به نتایج نامفهوم منتهی شود).

□ روش‌هایی با مزایا و معایب مختلف برای این امر وجود دارد، که روش اجزاء محدود یکی از

بهترین آن‌هاست.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

□ روش اجزاء محدود یا روش المان محدود (FEM):

□ این روش در حل معادلات دیفرانسیل جزئی روی دامنه‌های پیچیده (مانند وسایل نقلیه و

لوله‌های انتقال نفت)، یا هنگامی که دامنه متغیر است، یا وقتی که دقت بالا در همه جای

دامنه الزامی نیست یا اگر نتایج همبستگی و یکنواختی کافی را ندارند، بسیار مفید

می‌باشد.

□ به عنوان مثال، در شبیه‌سازی یک تصادف در قسمت جلوی خودرو، نیازی به دقت بالای نتایج

در عقب خودرو نیست. همچنین در شبیه‌سازی و پیش‌بینی هوا روی کره زمین، هوای روی

خشکی اهمیت بیشتری نسبت به هوای روی دریا دارد.

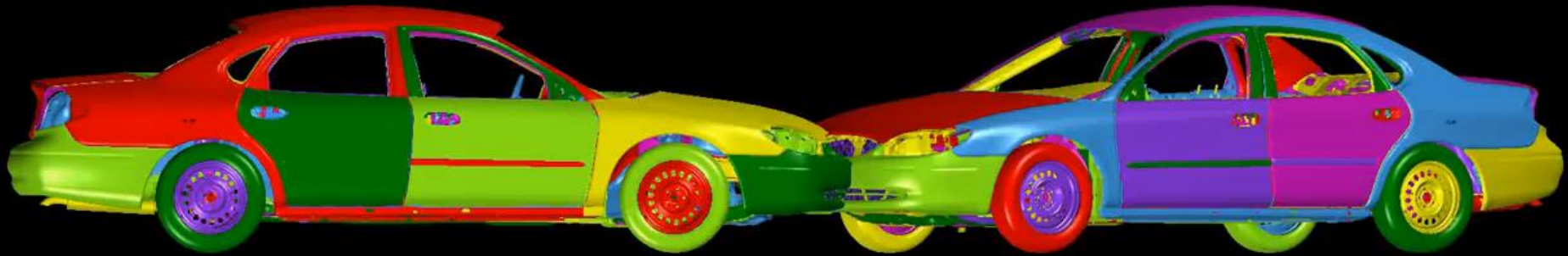
□ تقسیم ناحیه به نواحی کوچک‌تر دارای مزایای زیادی است از جمله: نمایش دقیق هندسه

پیچیده، گنجایش ویژگی‌های متفاوت جسم، درک ویژگی‌های موضعی جسم.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

□ روش اجزاء محدود یا روش المان محدود (FEM):

TWO-VEHICLE IMPACT (NCAC V01)
STEP 1 TIME: 0.000000



ETA/POST

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

□ روش حجم محدود (FVM) (Finite Volume Method) یکی از روش‌های عددی

برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل است.

□ روش حجم محدود در واقع نوعی از روش اجزاء محدود است که در آن روش تقریب این

انتگرال‌ها با روش اجزاء محدود متفاوت است. این روش بیشتر برای حل مسائل دینامیک

سیالات محاسباتی و انتقال حرارت مناسب است. نرم‌افزار فلوئنت از این روش پیروی می‌کند.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

□ روش تفاضل محدود (FDM) (Finite Difference Method) یکی از روش‌های عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل است. در این روش مشتق توابع با تفاضلات معادل آن‌ها تقریب زده می‌شود.

□ اساس این روش برای حل معادلات استفاده از تقریب تابع با روش تیلور است.

برای تقریب تابع f در نقطه x_0+h با استفاده از بسط تیلور داریم:

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}h + \frac{f^{(2)}(x_0)}{2!}h^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}h^n + R_n(x)$$

سپس برای $x_0=a$ و تقسیم طرفین بر h خواهیم داشت:

$$\frac{f(a+h)}{h} = \frac{f(a)}{h} + f'(a) + \frac{R_1(x)}{h}$$

در نتیجه داریم:

$$f'(a) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a+h) - f(a)}{h}$$

که در روش تفاضل محدود یک تقریب مناسب برای این تابع بصورت زیر خواهد بود:

$$f'(a) \approx \frac{f(a+h) - f(a)}{h}$$

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

□ روش‌های طیفی (Spectral Methods) کلاسی از تکنیک‌هایی هستند که در ریاضیات

کاربردی و محاسبات علمی برای حل معادلات دیفرانسیل که به طور بالقوه درگیر استفاده از

تبدیل سریع فوریه (Fast Fourier Transform) هستند، استفاده می‌شوند.

□ ایده این کار، نوشتن راه حلی از معادلات متفاوت به عنوان مجموع «توابع پایه» و سپس

انتخاب ضریب در مجموع برای ارضای معادلات متفاوت تا حد ممکن است. این روش از

جمله پردقت‌ترین شیوه‌های عددی برای حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی می‌باشد.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

□ روش میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر استوکس (RANS)

(Reynolds-Averaged Navier-Stokes)

□ در این روش معادلات ناویه-استوکس که متوسط‌گیری زمانی شده‌اند حل می‌شوند.

□ در این روش تنش‌های رینولدز که به صورت مجهول در معادلات هستند، با استفاده از یک

مدل آشفتگی مدل‌سازی می‌شوند.

□ دستگاه غیرخطی معادلات ناویه-استوکس مدل ریاضی حاکم بر حرکات، جریانات، و

دینامیک سیالات (اعم از مایعات یا گازها) را تشکیل می‌دهد.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

□ فرم معادله ناویه-استوکس

□ در دستگاه مرجع لخت (inertial reference frame) معادله ناویه-استوکس در کلی ترین

حالت به شکل زیر است:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbb{T} + \mathbf{f}$$

□ دستگاه مرجع لخت یا چارچوب مرجع لخت دستگاهی است که در آن قانون اول و دوم نیوتون

معتبر هستند، یعنی دستگاه مختصاتی که دارای شتاب نیست. اگر دستگاه در حال چرخش

حتی با سرعت ثابت باشد، شتابدار محسوب می شود.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

Claude-Louis Navier



Sir George Stokes

Bt PRS



Born

George Gabriel Stokes
13 August 1819

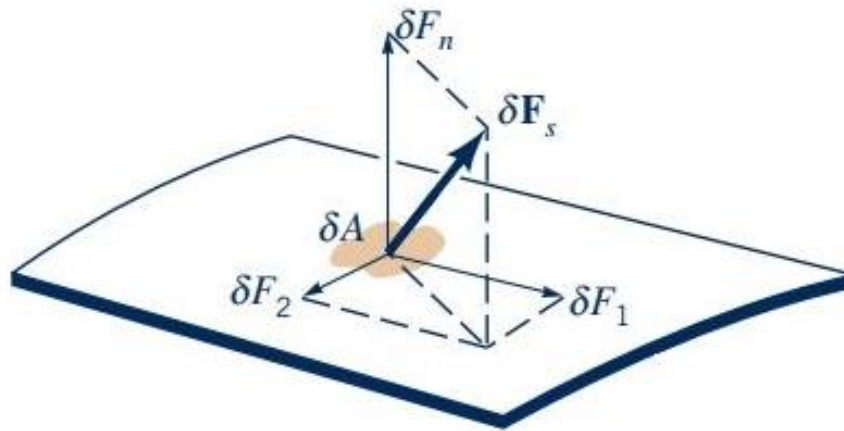
Known for

Stokes' theorem
Navier–Stokes equations
Stokes' law
Stokes shift
Stokes number
Stokes problem
Stokes relations
Stokes phenomenon
Stokes parameters

معادلات ناویر-استوکس

<https://blog.faradars.org/navier-stokes-equations/>

نیروی سطحی وارد بر یک المان سیال با مساحت سطح δA که در مکان دلخواهی از سیال قرار دارد، با علامت δF_s و مطابق با شکل زیر نشان داده می‌شود.



همانطور که در شکل بالا نشان داده شده، δF_s از سه قسمت تشکیل می‌شود. قسمت اول δF_n است که به صورت عمود بر سطح δA وارد می‌شود. قسمت دوم و سوم یعنی δF_1 و δF_2 اجزایی از این نیرو هستند که به صورت موازی با سطح δA قرار دارند و بر یکدیگر عمودند.

معادلات ناویر-استوکس

بنابراین می‌توان «تنش عمودی» (Normal Stress) که بر این سطح وارد می‌شود را با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد.

$$\sigma_n = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta F_n}{\delta A}$$

همچنین مشابه رابطه بالا می‌توان «تنش‌های برشی» (Shear Stresses) که در نتیجه اعمال نیروهای δF_1 و δF_2 بر سطح، تولید می‌شوند را به فرم زیر بیان کرد.

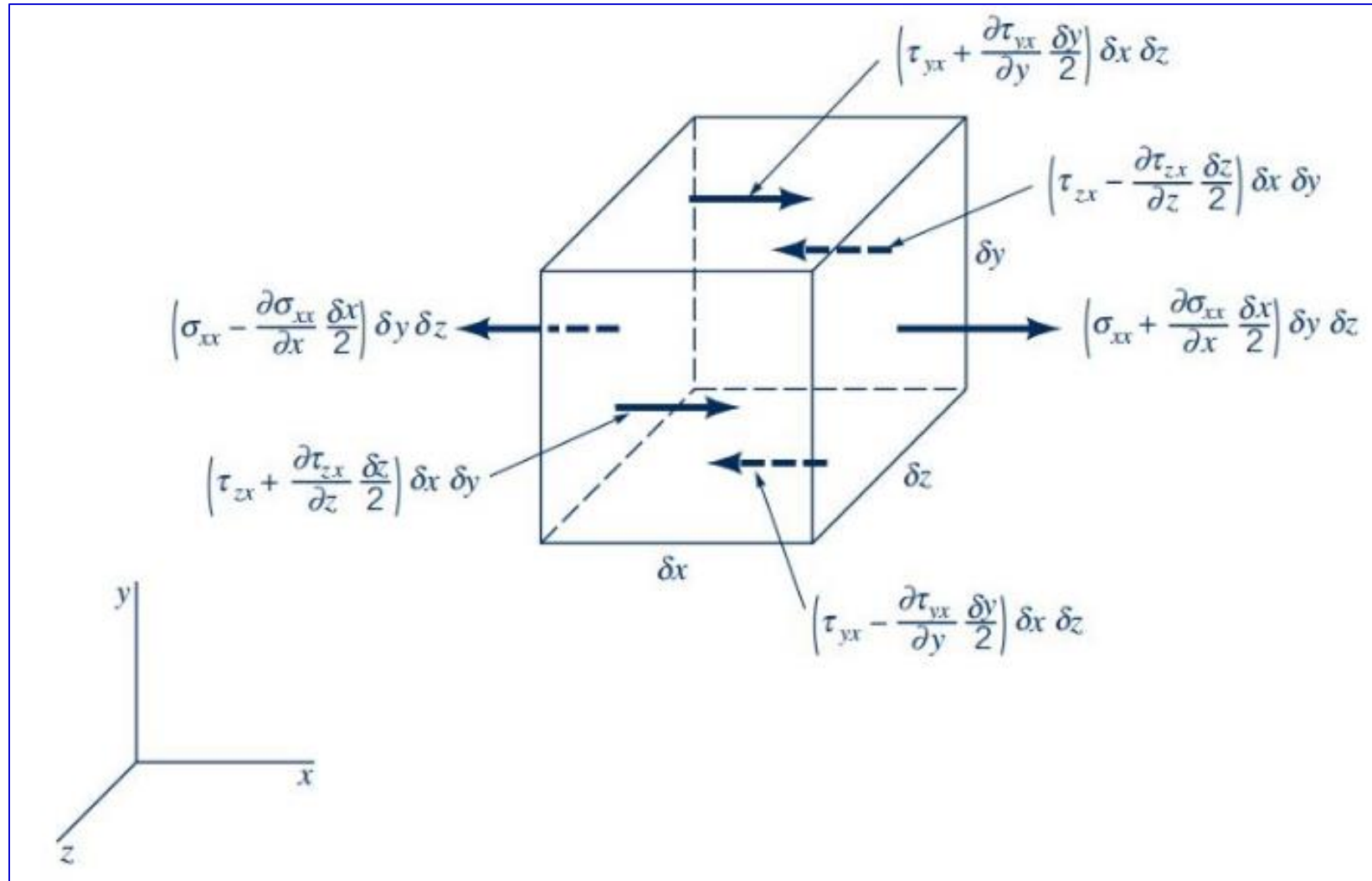
$$\tau_1 = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta F_1}{\delta A}$$

$$\tau_2 = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta F_2}{\delta A}$$

همانطور که در روابط بالا مشاهده می‌شود، عبارت σ و τ به ترتیب برای نمایش تنش نرمال و تنش برشی استفاده شده‌اند. بنابراین در صورتی که مساحت و جهت یک جز سیستم مشخص باشد می‌توان نیرو بر واحد سطح را در این جز سیستم با استفاده از ترم‌های تنش برشی و تنش عمودی مشخص کرد. برای مثال یک سیستم مختصات را مشابه شکل زیر در نظر بگیرید.

معادلات ناویر-استوکس

□ در ادامه به بررسی نیروهای سطحی می‌پردازیم که بر یک المان مکعبی از سیال وارد می‌شوند. این نیروها برحسب تنش‌های وارد شده بر دیواره‌های المان، مطابق روابط موجود در شکل زیر قابل بیان هستند.



معادلات ناویر-استوکس

در نهایت با جایگذاری رابطه جرم و نیروها در قانون دوم نیوتن، فرم کلی معادله دیفرانسیلی حرکت در سیالات به شکل زیر در می‌آید.

$$\rho g_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\rho g_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\rho g_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

جریان لزج و معادلات ناویر استوکس

□ با بررسی دقیق معادله‌های دیفرانسیلی حرکت که در قسمت قبل بیان شد، به این نتیجه می‌رسیم که تعداد مجهولات موجود در این معادلات بیشتر از تعداد خود معادلات هستند. بنابراین به کمک این سه معادله نمی‌توان مجهولات مسئله را محاسبه کرد و برای برطرف کردن این موضوع باید رابطه‌ای بین سرعت سیال و تنش وارد بر آن نوشته شود.

رابطه بین تنش و سرعت

□ برای سیالات نیوتنی و غیرقابل تراکم، تنش را می‌توان به صورت خطی برحسب مشتق سرعت نوشت. رابطه بین تنش عمودی و مشتق‌های سرعت در مختصات کارتزین به شکل زیر نمایش داده می‌شود.

معادلات ناویر-استوکس

$$\sigma_{xx} = -p + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\sigma_{yy} = -p + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\sigma_{zz} = -p + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}$$

μ = ضریب لزجت (ویسکوزیته) (Pa.s)

همچنین رابطه بین تنش‌های برشی و مشتق‌های سرعت در مختصات کارتزین به صورت زیر است.

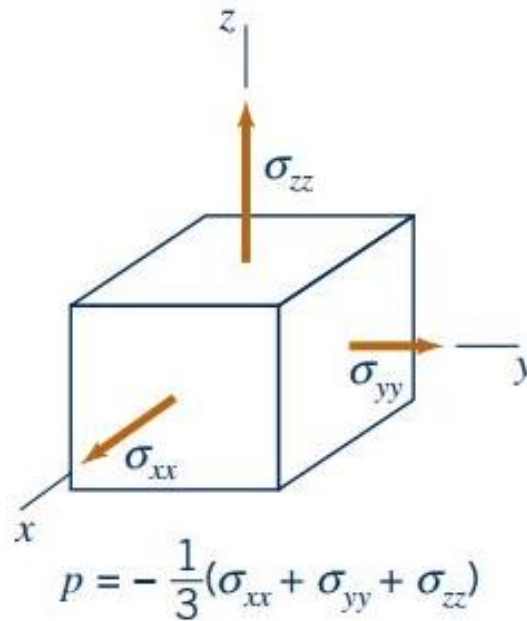
$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

معادلات ناویر-استوکس

در این رابطه P فشار است که می‌توان آن را با استفاده از رابطه موجود در شکل زیر تعریف کرد.



برای سیالات لزج، تنش عمودی در سه راستای x ، y و z ضرورتاً یکسان نیستند؛ بنابراین نیاز هست که فشار را به صورت میانگین تنش عمودی در سه راستای مختلف به شکل بالا بیان کنیم. برای سیالات غیر لزج تنش عمودی در سه راستا با یکدیگر برابر هستند که روابط آن در بخش **استاتیک سیالات** بیان شد.

معادلات ناویر-استوکس

معادلات ناویر-استوکس

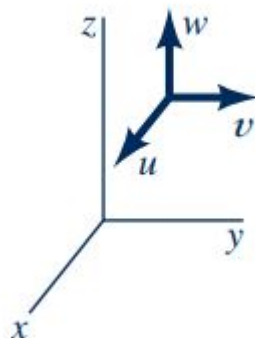
رابطه بین تنش‌های مختلف و مشتق‌های سرعت در بخش قبلی بیان شد. در ادامه این رابطه را در معادله کلی حرکت بیان شده در قسمت قبل، جایگذاری می‌کنیم. فرم نهایی این معادلات به ترتیب در سه راستای x ، y و z به شکل زیر نشان داده می‌شود.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

در این روابط u ، v و w به ترتیب سرعت در راستای x ، y و z را مطابق شکل زیر نشان می‌دهند.



معادلات ناویر-استوکس

□ معادلات بالا به گونه‌ای نوشته شده‌اند که شتاب در سمت چپ و نیروهای وارده در سمت راست معادله موجود باشند. این معادلات تحت عنوان معادلات «ناویر-استوکس» شناخته می‌شوند.

□ در صورتی که این سه معادله با معادله بقای جرم ترکیب شوند، توصیف کاملی از ویژگی‌های مختلف میدان جریان یک سیال نیوتنی و غیرقابل تراکم را می‌توانند در اختیار ما قرار دهند. در واقع در اینجا ما ۴ معادله (۳ رابطه ناویر-استوکس و ۱ رابطه بقای جرم) و ۴ مجهول (سرعت در راستای x ، y ، و z و فشار P) داریم؛ بنابراین به این مسئله اصطلاحاً «خوش‌وضع» ($well$ -posed) گفته می‌شود. در مسائل خوش‌وضع تعداد معادلات و مجهولات با یکدیگر برابر هستند.

□ این معادلات با توجه به حضور ترم‌های غیرخطی در آن، به غیر از چند حالت خاص دارای حل ریاضی دقیق نیستند و برای حل آن‌ها از روش‌های عددی موجود در علم دینامیک سیالات محاسباتی مانند روش تفاضل محدود و روش حجم محدود استفاده می‌شود.

□ نتایج این معادلات در حالات مختلف با نتایج آزمایش‌های تجربی مقایسه شده‌اند و تطابق خوبی بین نتایج آزمایش‌های تجربی و معادلات ناویر-استوکس نشان داده شده است. بنابراین معادلات ناویر-استوکس به شکل بالا را می‌توان به عنوان معادلات دیفرانسیلی حاکم بر سیال‌های نیوتنی غیرقابل تراکم بیان کرد.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

□ شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS) (Direct Numerical Simulation) یک

روش شبیه‌سازی در دینامیک سیالات محاسباتی است که در آن معادلات ناویه-استوکس به صورت عددی و بدون هیچ‌گونه مدل‌سازی جریان آشسته حل می‌شوند.

□ تا دهه هفتاد میلادی شبیه‌سازی با استفاده از این روش به دلیل عدم وجود کامپیوترهای پرسرعت غیرممکن بود.

□ هزینه انجام این شبیه‌سازی با توان سوم عدد رینولدز رابطه مستقیم دارد. به همین دلیل هزینه این روش حتی در عددهای رینولدز پایین، بسیار بالا است و در عددهای رینولدز بالا امکان‌پذیر نیست.

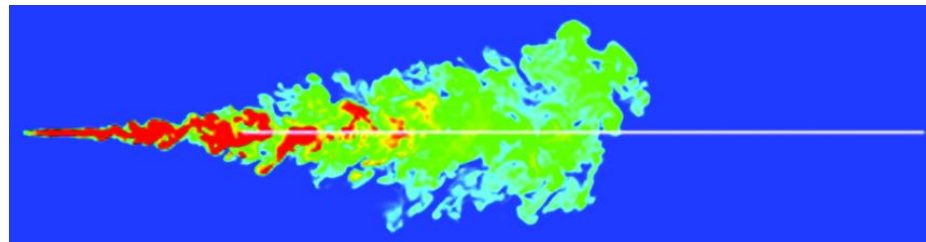
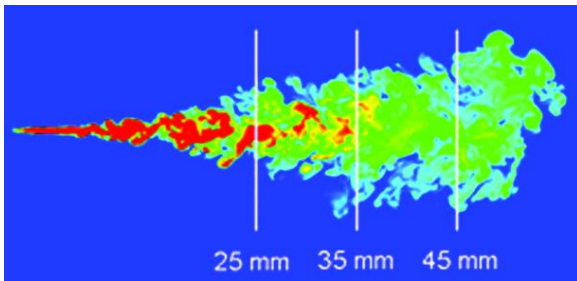
دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

□ شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) (Large Eddy Simulation) یک روش شبیه‌سازی در دینامیک سیالات محاسباتی است. در این روش معادلات ناویه-استوکس برای مقیاس‌های بزرگ که حاوی انرژی هستند حل می‌شوند و اثر مقیاس‌های کوچک بر مقیاس‌های بزرگ مدل‌سازی می‌شود.

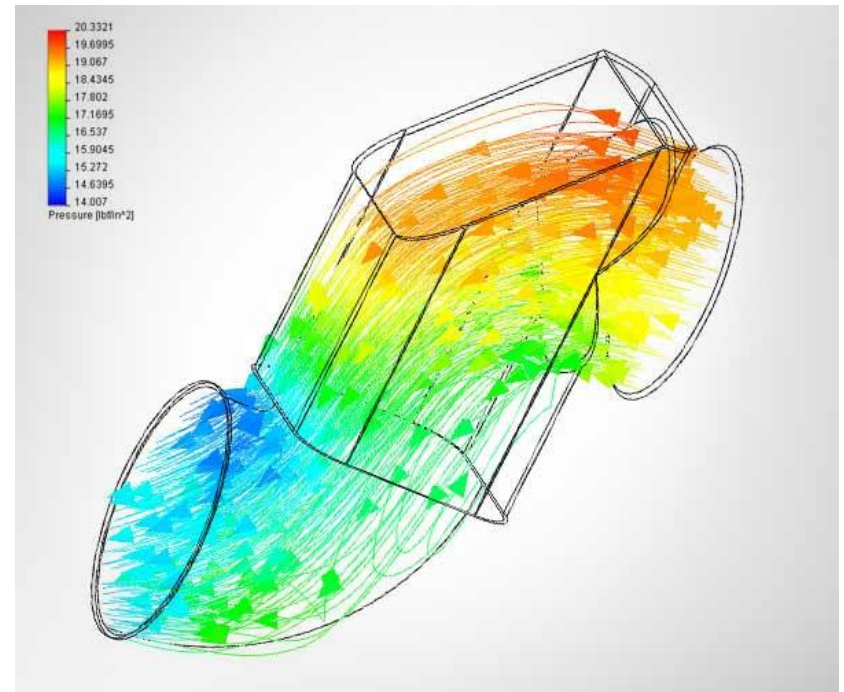
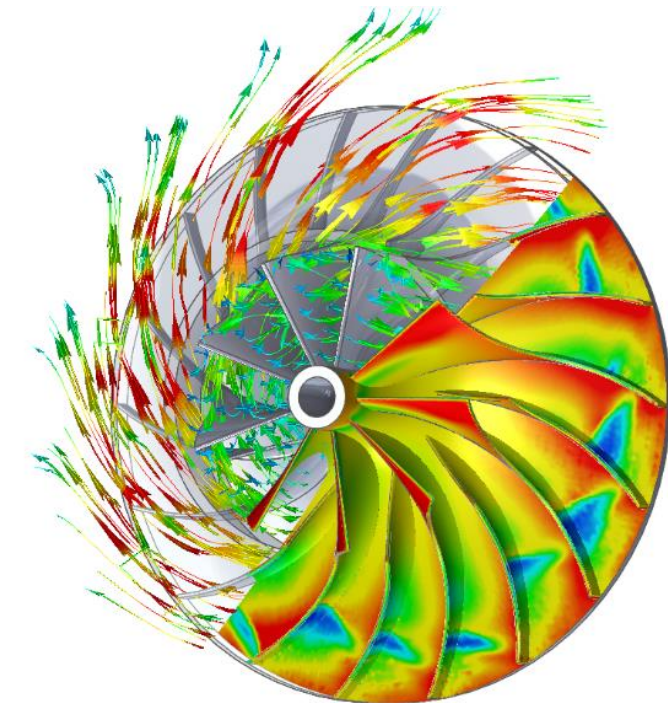
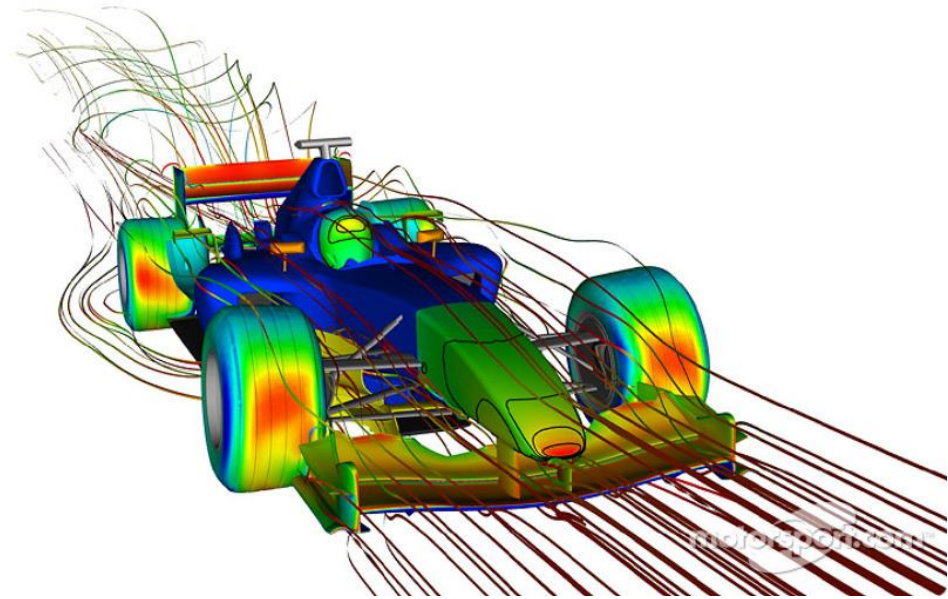
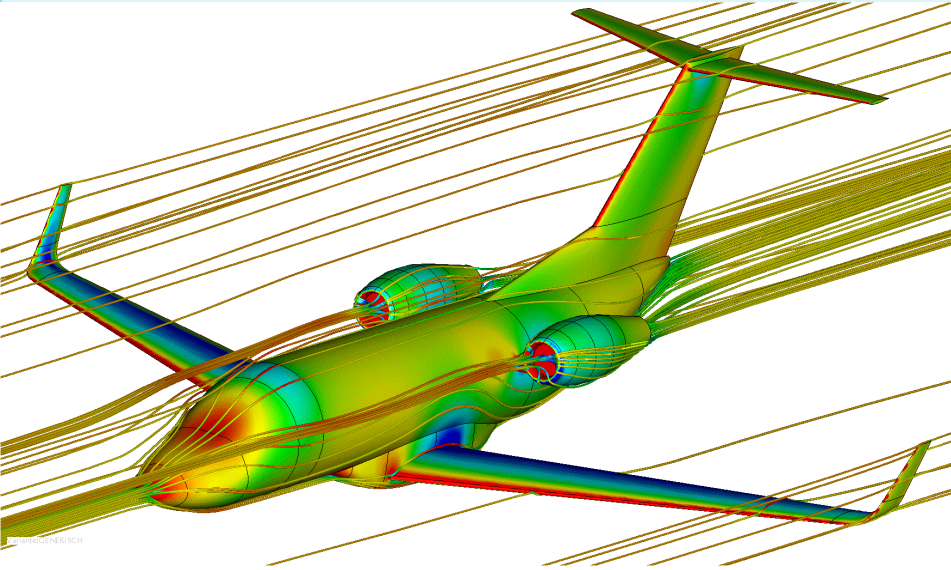
□ از نظر هزینه این روش بین روش شبیه‌سازی عددی مستقیم و شبیه‌سازی به روش میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس قرار دارد.

□ از آنجایی که در این روش مقیاس‌های بزرگ جریان به‌طور مستقیم حل می‌شوند، این روش بسیار دقیق‌تر از روش شبیه‌سازی به روش میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر-

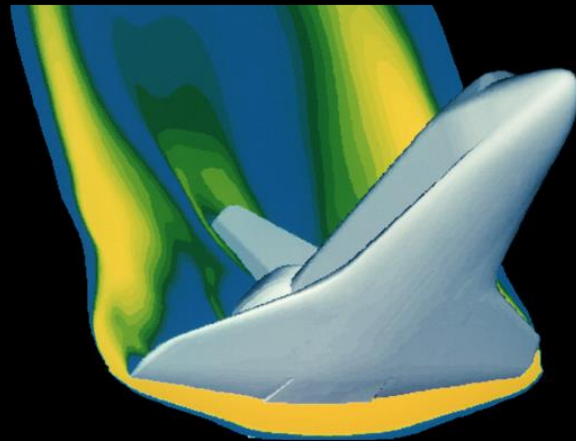
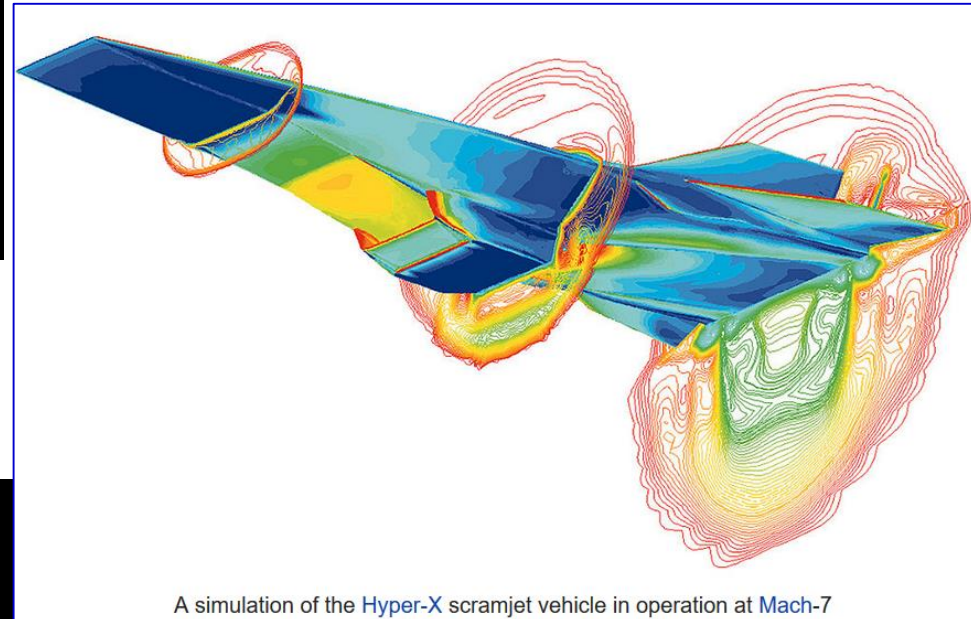
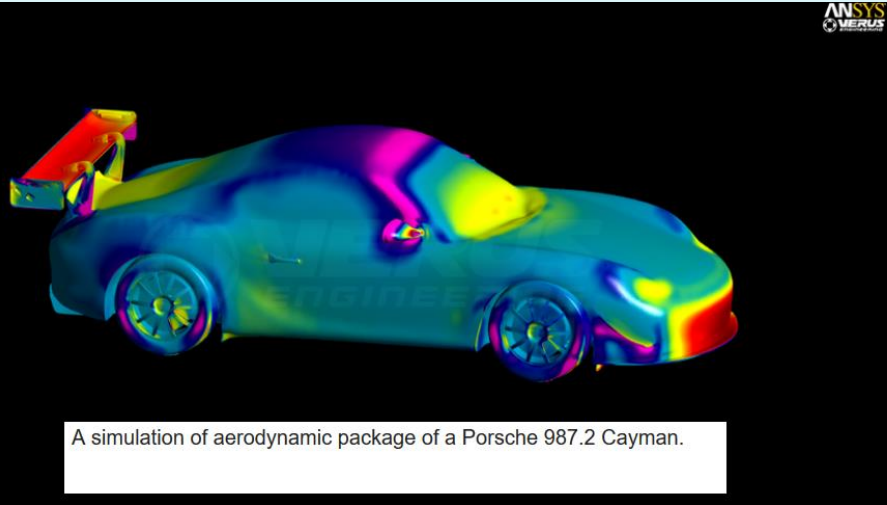
استوکس است.



دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)



دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)



<https://www.ansys.com/products/fluids>

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

<https://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent>

Fluent



ANSYS Fluent:

- ❑ **ANSYS Fluent** software is the most-powerful computational fluid dynamics (CFD) tool available, empowering you to go further and faster as you optimize your product's performance.
- ❑ Fluent includes well-validated physical modeling capabilities to deliver fast, accurate results across the widest range of CFD and multiphysics applications.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

● = Fully Supported ▲ = Limited Capability □= Requires more than 1 product	ANSYS CFD Premium		ANSYS CFD Enterprise				ANSYS Chemkin Enterprise
	ANSYS FLUENT	ANSYS CFX	ANSYS POLYFLOW	ANSYS Forte	ANSYS FENSAP-ICE	ANSYS AIM	
Internal Radiation - Participating Media	●	●	●		●		●
Internal Radiation - Transparent Media	●	●					●
External Radiation	●	●				●	●
Solar Radiation & Load	●	●					
Simplified Heat Exchanger Model	●						
Non-equilibrium Thermal Model	●						
Prorous Media	●						
Particles Flows (Multiphase)							
Coupled Discrete Phase Modeling including Thin Wall Films	●	●		●	●	▲	●
Macroscopic Particle Model	●					▲	
Inert Particle Tracking (With Mass)	●	●				▲	
Liquid Droplet (Incl. Evaporation)	●	●		●	●		●
Combusting Particles	●	●		●			●
Multicomponent Droplets	●	●		●	●		●
Discrete Element Model (DEM)	●						
Break-Up And Coalescence	●	●		●	●		●
Erosion	●	●					

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

- ❑ انسیس (ANSYS) مخفف کلمات (ANalysis SYStems) یک نرم‌افزار مهندسی به کمک رایانه می‌باشد که محصول شرکت ANSYS Inc است و از دسته ابزارهای تحلیلی است که از **روش اجزاء محدود (FEM)** برای مدل‌سازی و تحلیل در آن استفاده می‌شود.
- ❑ نرم‌افزار انسیس، مهندسين و طراحان را قادر می‌سازد تا به راحتی بهینه‌سازی ساختاری، حرارتی، دینامیکی، تعادل وزنی و عملکردی و همچنین شبیه‌سازی‌های مد ارتعاشی و ضریب اطمینان و ایمنی را در طرح‌هایشان به صورت مرحله‌به‌مرحله اعمال کنند.
- ❑ ابزارهای پیش‌بینی‌شده در انسیس امکان تحلیل انواع مختلف سازه‌ها مانند قاب، مخزن، سد، پل و غیره و نیز اجزای سازه‌ای مانند اتصالات فولادی، اعضای فولادی یا بتنی، ایزولاتورها (Isolators)، و غیره را به روش‌های مختلف فراهم ساخته است.
- ❑ از آن جمله می‌توان به تحلیل‌های استاتیکی، بارگذاری رفت‌وبرگشتی، مودال، تاریخچه زمانی، طیفی و غیره اشاره کرد.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

- ❑ ANSYS نرم افزار قدرتمند و شبیه ساز ساده ای می باشد که قدرت توانایی یک طراحی معتبر و استاندارد را به طراحان و مهندسين می دهد تا ایده هایشان را بر روی صفحه کامپیوترهایشان پیاده کنند.
- ❑ در این نرم افزار از سیستم کارآمد و آسان اتوماسیون پایگاه داده ها استفاده می گردد و باعث کاربری بسیار آسان این نرم افزار گردیده که به گفته سازنده نرم افزار می تواند به قدری قدرتمند باشد که برای ۳۰ سال آینده جهت حل مشکلات طراحی مؤثر، مفید و قابل اعتماد واقع گردد.
- ❑ با به کار بردن این نرم افزار مهندسين قادر به طراحی و تولید محصولاتی با کیفیت بهتر در زمانی کمتر خواهند بود.
- ❑ این نرم افزار مهندسين و طراحان را قادر می سازد تا به راحتی بهینه سازی ساختاری، حرارتی، دینامیکی، تعادل وزنی و عملکردی و همچنین شبیه سازی های مد ارتعاشی و ضریب اطمینان و ایمنی را در طرح هایشان به صورت مرحله به مرحله اعمال کنند.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

- ❑ نرم افزار Design Space ANSYS کاملاً بر آخرین ورژن نرم افزارهای اصلی CAD سه بعدی که شامل پرو/اینجینیر (Pro/Engineer) (PTC Creo Elements Pro)، سالدورکس (SOLIDWORKS)، اینونتور (Autodesk Inventor)، مکانیکال دسکتاپ (Autodesk Mechanical Desktop)، یونیگرافیکس (زیمنس ان ایکس) (unigraphics) (Siemens NX)، و سالد اج (Solid Edge) می شود منطبق است.
- ❑ این نرم افزار می تواند از اطلاعات خروجی نرم افزار کتیا (Catia) استفاده نموده و از فرمت های رایج هندسی و برداری مانند SAT و Para solid پشتیبانی نماید.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

<https://www.ptc.com/en/products/cad/pro-engineer>



WHY PTC

PRODUCTS & SOLUTIONS

EDUCATION & SUPPORT

TRY & BUY



English ▼

Pro/Engineer is Now Creo

Pro/ENGINEER is now PTC Creo, but it's not just a name change it's so much more! Creo is a suite of solutions offering integrated 3D CAD/CAM/CAE software.

TRY TODAY



دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

<https://www.solidworks.com/>



Products & Solutions ▼

Choosing SOLIDWORKS ▼

Community ▼

Support ▼

How to Buy ▼

Try now

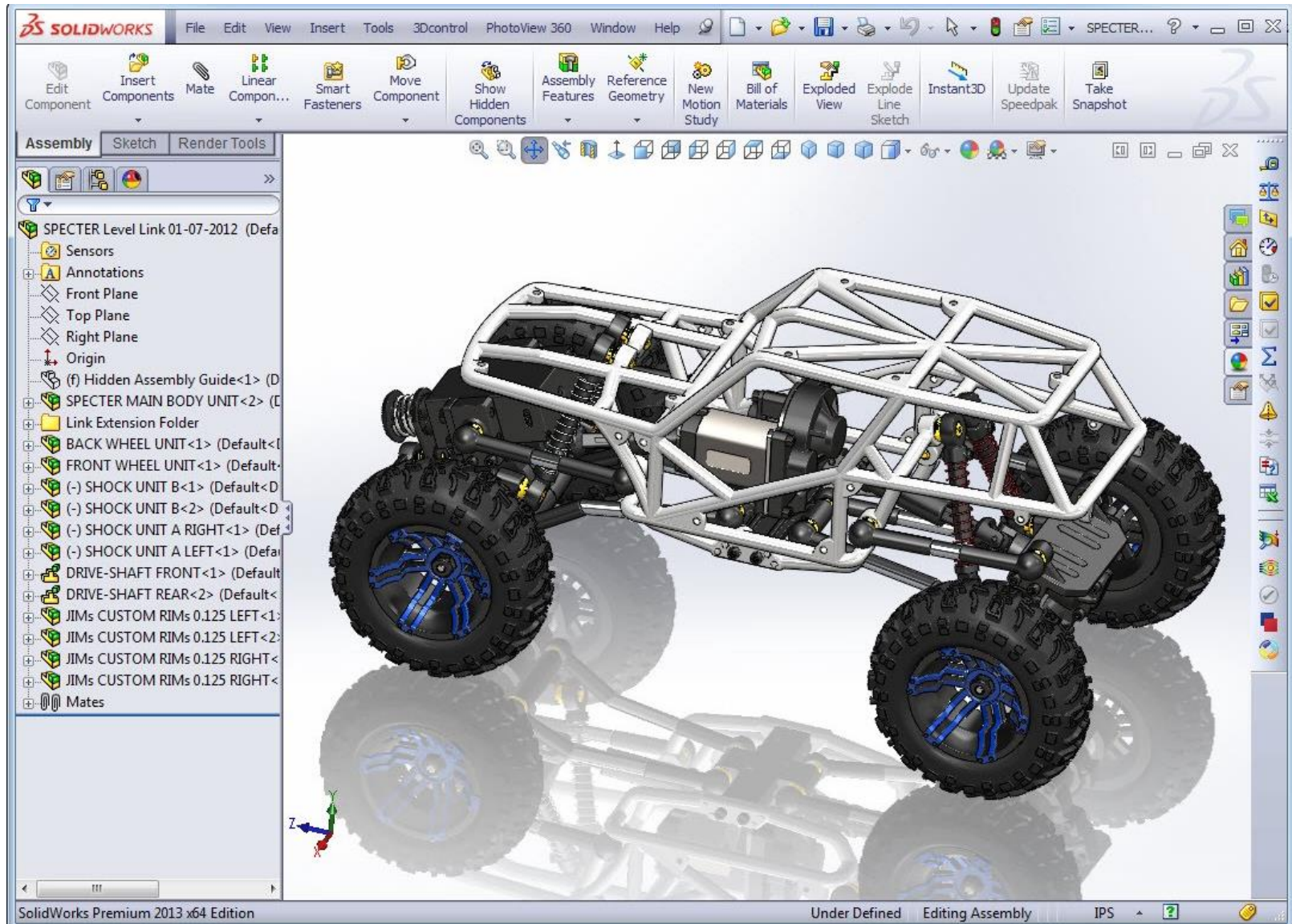
[Licensing Issues? How to use SOLIDWORKS from home during COVID-19](#)

SOLIDWORKS 2020 | Empowering Design Innovation

SOLIDWORKS 2020 adds new capabilities and enhancements to the SOLIDWORKS® portfolio of solutions to help you maximize the productivity of your design and manufacturing resources, while empowering you to deliver innovative products faster.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

<https://www.solidworks.com/>



دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

<https://www.autodesk.com/products/inventor/>



SEARCH



SIGN IN



UNITED STATES



MENU

Inventor

CONTACT SALES

DOWNLOAD FREE TRIAL

BUY

INVENTOR

See what's new in Inventor

Watch the video, download a trial, or talk to an expert.

CONTACT US



PLAY VIDEO (1:32 MIN.)

GET FREE TRIAL



TALK TO A SALES REP: 1-844-691-9198



Image courtesy of Feige FILLING



FEEDBACK

Autodesk®

Mechanical Desktop® 2009



Autodesk®

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

<https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/nx/>

SIEMENS



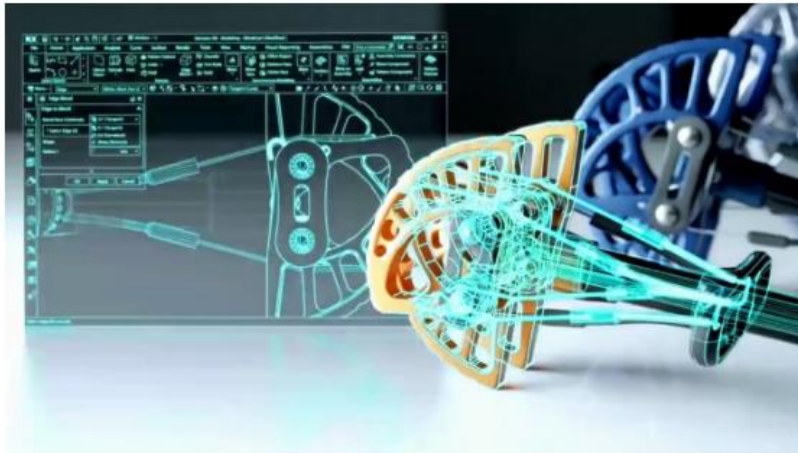
Search for...



Siemens Digital Industries Software » Products » NX

NX Cloud Connected Products offer the next generation of flexibility for product design

Buy Now



NX

Siemens NX software is a flexible and powerful integrated solution that helps you deliver better products faster and more efficiently. NX delivers the next generation of design, simulation, and manufacturing solutions that enable companies to realize the value of the digital twin.

Supporting every aspect of product development, from concept design through engineering and manufacturing, NX gives you an integrated toolset that coordinates disciplines, preserves data integrity and design intent, and streamlines the entire process

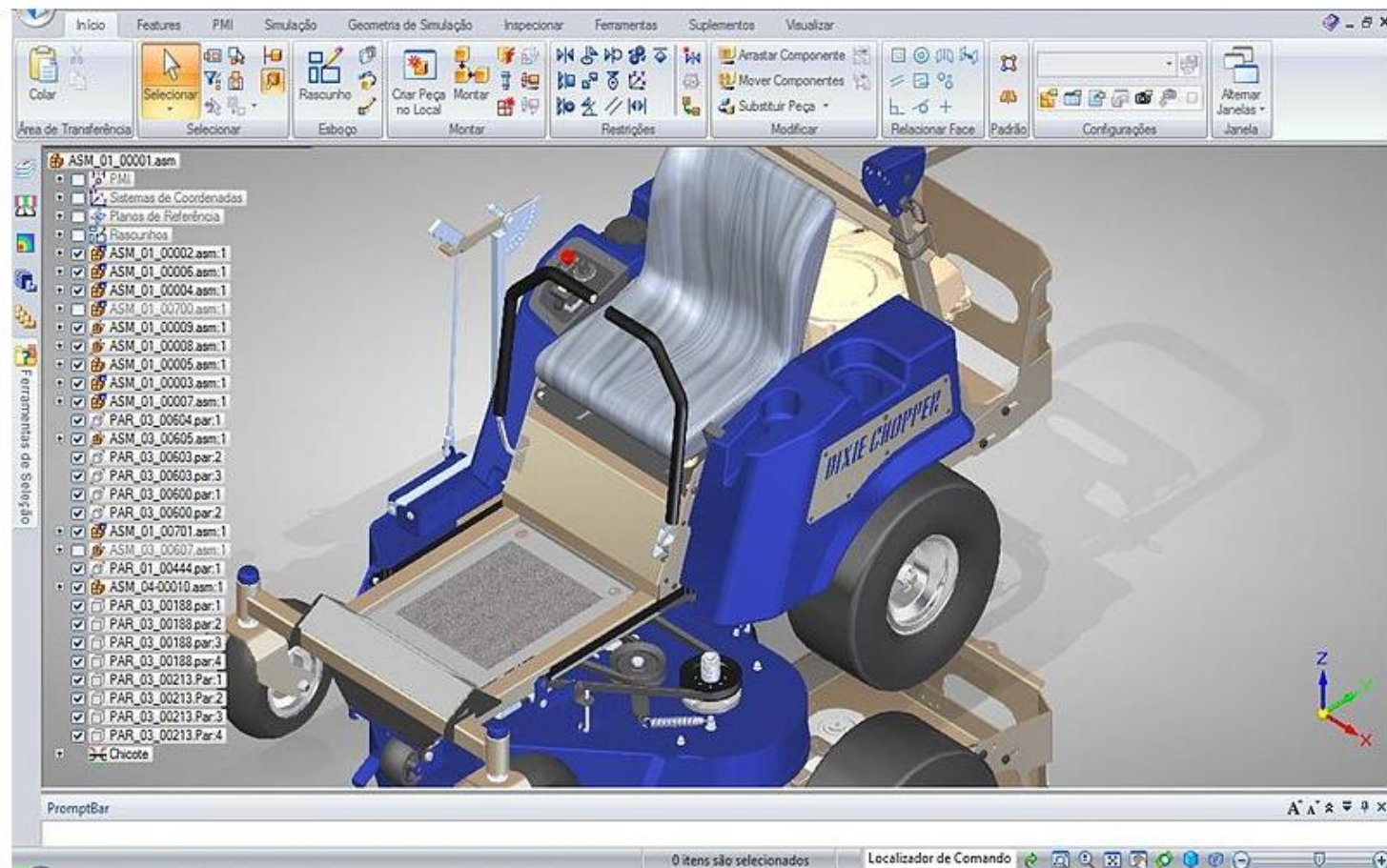
Start Free Trial

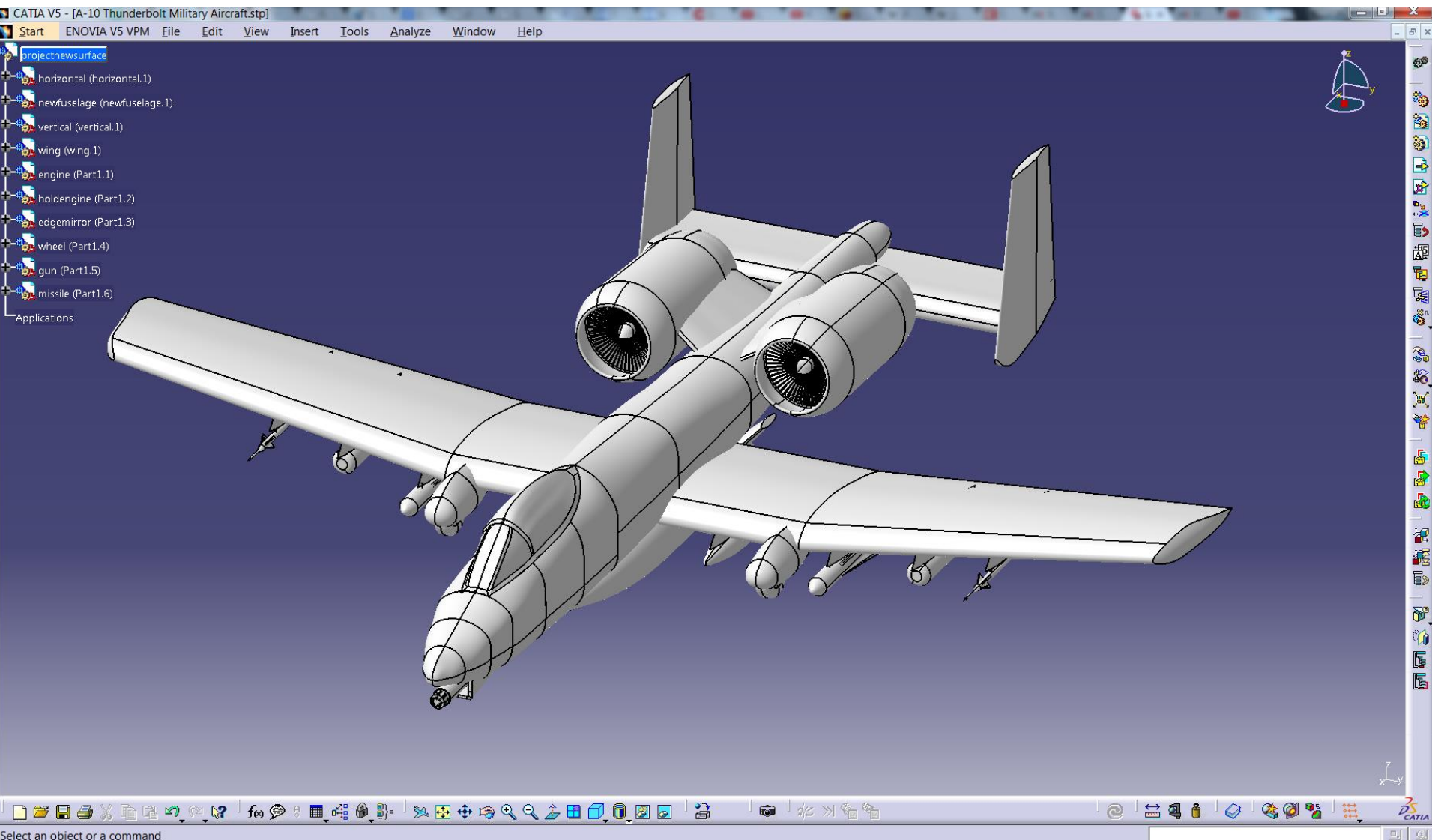


ديناميک سيالات محاسباتي (CFD)



SOLID EDGE





دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

- ❑ نرم افزار Design Space ANSYS از اجزای تک واحدی تا مجموعه های بزرگ و پیچیده و حتی سیستم های کامل را با کلیه نماهای سه بعدی CAD به یک محصول یا سیستم مجازی کامل و قابل توسعه تبدیل می سازد.
- ❑ سیستم شبیه سازی این نرم افزار از چهار تابع مختلف با قابلیت های کاربردی مختلف تبعیت می نماید که از مدل های اضافی، پلاگین های CAD و اتصالات متحرک می باشند و طوری طراحی شده اند تا کلیه نیازهای کاربران خاص را نیز برآورده سازند.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

❑ معرفی نرم افزار انسیس فلوئنت:

- ❑ نرم افزار فلوئنت یکی از نرم افزارهای صنعتی شناخته شده و محصول شرکت انسیس می باشد که به زبان برنامه نویسی C نوشته شده است.
- ❑ نرم افزار فلوئنت از روش حجم محدود برای تحلیل و شبیه سازی جریان سیال و انتقال حرارت در شبکه های بی سازمان و با سازمان (شبکه هایی با سلول های مثلثی چهارضلعی در حالت دوبعدی و چهاروجهی، شش وجهی، هرمی و گوه ای در حالت سه بعدی) برای هندسه های پیچیده استفاده می کند.
- ❑ این نرم افزار دارای توانایی های فراوانی می باشد. با این حال به کمک قابلیت توابع تعریف شده توسط کاربر می توان قابلیت های آن را در تشریح شرایط مرزی، تعریف خواص فیزیکی و تولید شبکه های فیزیکی بهتر، افزایش داد.

معرفی نرم افزار انسیس فلوئنت

- ❑ فلوئنت به کاربر اجازه تطبیق و بهبود شبکه (مثل ریز کردن یا درشت کردن شبکه در مرزها و مکان های لازم در هندسه) را می دهد.
- ❑ این بهینه سازی برای حل شبکه باعث می شود که نتایج در نواحی مانند لایه مرزی که دارای تغییرات بزرگ هستند، دقیق تر شوند.
- ❑ توانایی های نرم افزار انسیس فلوئنت به شرح زیر می باشند:
 - تحلیل جریان های دوبعدی (به صورت متقارن و نامتقارن) و جریان های سه بعدی
 - توانایی به کارگیری انواع شبکه ها با سلول های مختلف و ترکیب آنها
 - تحلیل جریان های دائم یا غیردائم
 - تحلیل جریان های لزج، غیرلزج، آرام و آشسته
 - تحلیل جریان های سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی

معرفی نرم افزار انسیس فلوئنت

- تحلیل جریان‌های قابل تراکم یا غیرقابل تراکم در تمام حالت‌های مادون صوت، نزدیک صوت و مافوق صوت
- تحلیل انتقال حرارت
- تحلیل واکنش‌ها و ترکیبات شیمیایی
- تحلیل جریان دانه‌ای و محاسبه فازهای مجزا ذرات جامد، قطرات و حباب‌ها، تفکیک و انعقاد آن‌ها
- دارای مدل برخورد اجزای گسسته (DEM)
- تحلیل جریان‌های چندفازی پراکنده و سطح آزاد در حالت‌های گاز-مایع، گاز-جامد و مایع-جامد
- شبیه‌سازی جریان در حفره‌ها و محیط‌های متخلخل
- شبیه‌سازی تغییر فاز برای فرآیندهای ذوب و یا انجماد

معرفی نرم افزار انسیس فلوئنت

- توانایی شبیه سازی کردن هندسه های متحرک با کمک ویژگی شبکه دینامیک و قاب مرجع متحرک
- توانایی شبیه سازی کردن انواع آلاینده ها
- توانایی بهینه سازی هندسه و شکل از طریق آنالیز حساسیت
- دارای تنوع گسترده از شرایط مرزی ورودی و خروجی و شرایط مرزی وابسته به زمان
- دارای کتابخانه وسیع و قابل سفارشی کردن از مواد
- امکان پردازش موازی در رایانه های محلی یا شبکه شده
- پشتیبانی از پردازش توسط واحد پردازنده مرکزی و پردازنده گرافیکی به صورت همزمان

معرفی نرم افزار انسیس فلونت

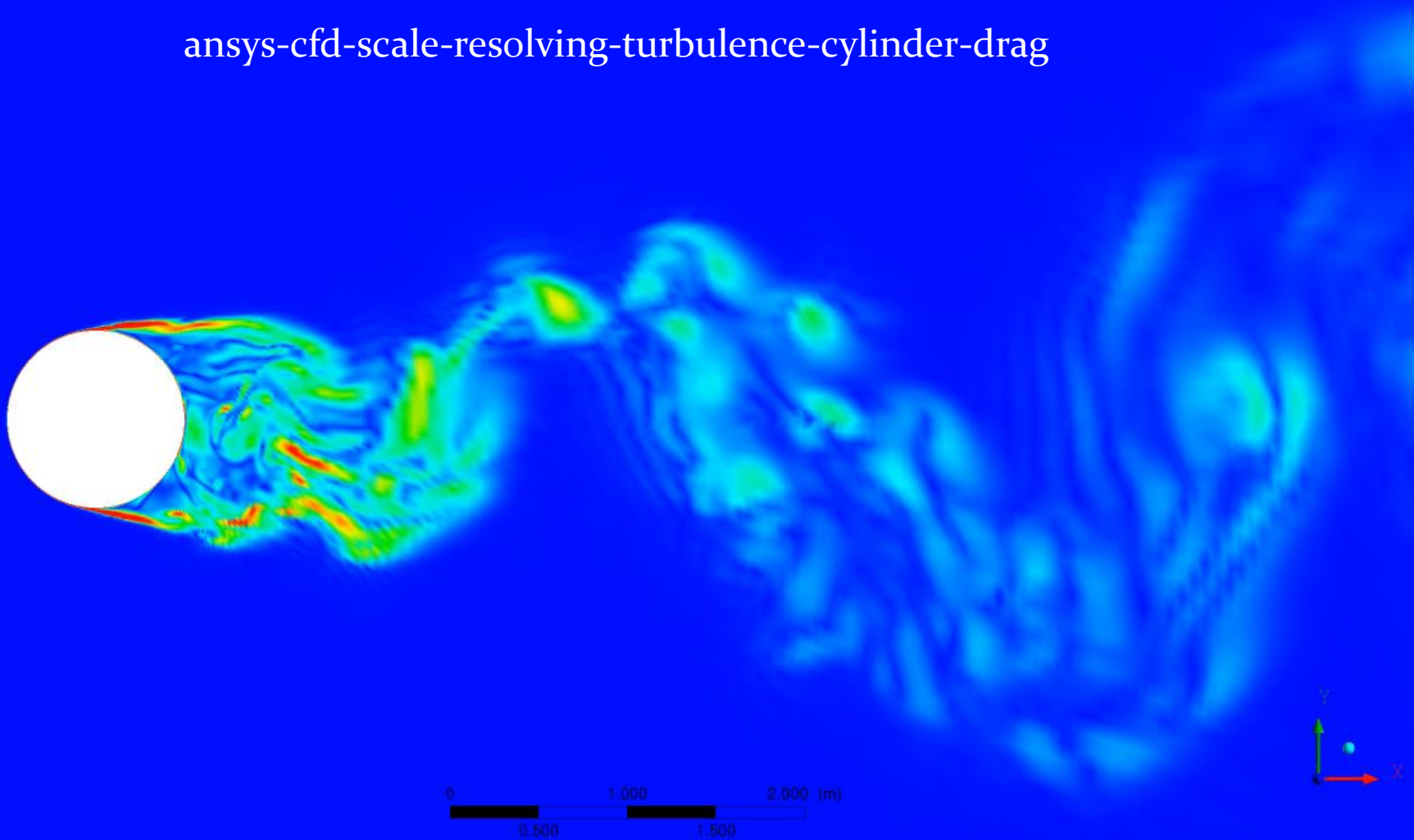
□ مدل فاز گسسته از جمله مدل های چندفازی در نرم افزار انسیس فلونت است که از رویکرد اوایلر - لاگرانژ پیروی می کند.

□ این مدل علاوه بر حل معادلات انتقال برای فاز پیوسته، به شبیه سازی فاز دوم گسسته با این دیدگاه می پردازد.

□ فاز دوم شامل ذرات کروی از جامدات، قطرات یا حباب ها می باشد که در فاز پیوسته سیال پراکنده شده اند. در شبیه سازی ها با فعال کردن اندرکنش میان مدل فاز گسسته و فاز پیوسته، شبیه سازی ها در حالت تلفیقی قرار می گیرند.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

ansys-cfd-scale-resolving-turbulence-cylinder-drag



دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

❑ ANSYS Fluent

Power | Emmission
Standards

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

□ CFB = Circulating Fluidized Bed

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

<https://www.openfoam.com/>

OpenFOAM

The open source CFD toolbox



[Home](#)

[Products](#)

[Services](#)

[Download](#)

[Code](#)

[Documentation](#)

[Community](#)

[News](#)

[About us](#) [Contact](#) [Jobs](#) [Legal](#)

FOLLOW US ON [twitter](#)

Get OpenFOAM

OpenFOAM v1712 Released

[Download OpenFOAM](#)

Our Services

[OpenFOAM Training](#)

[OpenFOAM Support](#)

[OpenFOAM Development](#)

[Engineering Services](#)

More information

[OpenFOAM History](#)

[Official Documentation](#)

[OpenFOAM Community](#)

[Tutorial Wiki](#)

[Report a Bug](#)



6th OpenFOAM Conference 2018

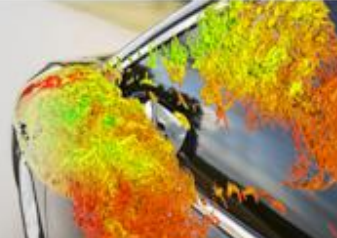
Germany
23-25 October

ESI

OpenFOAM courses

19-22 March - Milan, Italy
16-19 April - Madrid, Spain
14-18 May - Frankfurt, DE

REGISTER NOW



Main News

6th ESI OpenFOAM User Conference 2018
October 23-25 2018: Registration is now open. Venue: Radisson Blu Hamburg Airport Hotel, Germany
[Mar 16th 2018](#)

ESI OpenCFD releases OpenFOAM-v1712
ESI-OpenCFD is pleased to announce the release of OpenFOAM v1712 of the OpenFOAM open source CFD toolbox
[Dec 31st 2017](#)

ESI OpenCFD releases OpenFOAM-v1706
ESI-OpenCFD is pleased to announce the release of OpenFOAM v1706 of the OpenFOAM open source CFD toolbox
[Jun 30th 2017](#)

[Main News Archive...](#)

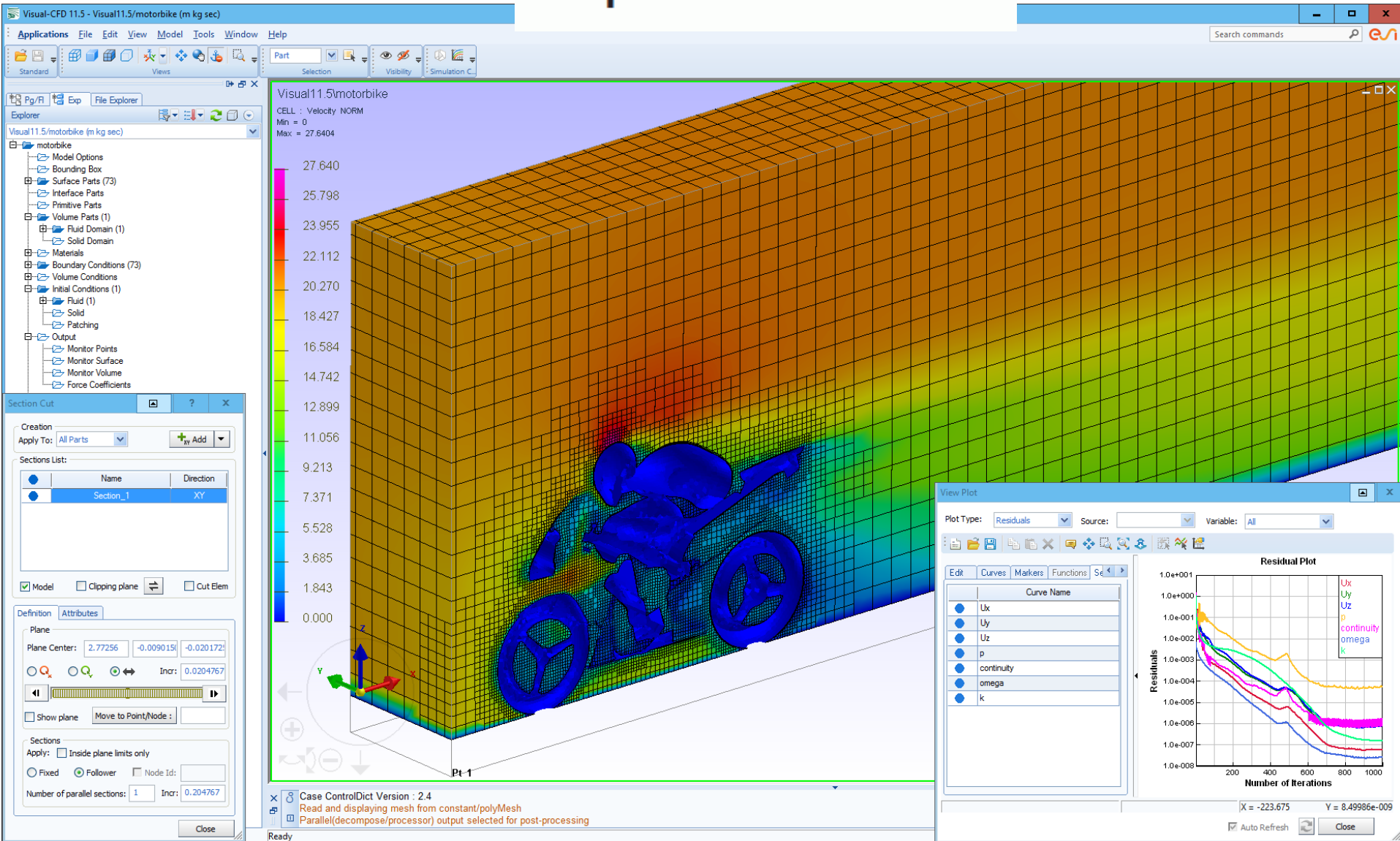
- ❑ **About OpenFOAM**
- ❑ **OpenFOAM** is the free, open source CFD software released and developed primarily by OpenCFD Ltd since 2004. It has a large user base across most areas of engineering and science, from both commercial and academic organizations.
- ❑ **OpenFOAM** has an extensive range of features to solve anything from complex fluid flows involving chemical reactions, turbulence and heat transfer, to acoustics, solid mechanics and electromagnetics.
- ❑ **OpenFOAM** is professionally released every six months to include customer sponsored developments and contributions from the community. It is independently tested by ESI-OpenCFD's Application Specialists, Development Partners and selected customers, and supported by ESI's worldwide infrastructure, values and commitment.



- ❑ **About OpenFOAM**
- ❑ Quality assurance is based on rigorous testing. The process of code evaluation, verification and validation includes several hundred daily unit tests, a medium-sized test battery run on a weekly basis, and large industry-based test battery run prior to new version releases. Tests are designed to assess regression behavior, memory usage, code performance and scalability.
- ❑ **OpenFOAM** releases are scheduled every six months in June and December.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

OpenFOAM



دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

❑ معرفی نرم افزار اوپن فوم:

❑ اوپن فوم اولین و معروف ترین کتابخانه نرم افزاری متن باز در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است که به زبان C++ نوشته شده است.

❑ اولین گامها در این زمینه از سال ۱۹۹۱ آغاز شد و این پروژه بین سال های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۰ در دستور کار گروه تحقیقاتی گوسمن (Gosman) و بخش ترموسیالاتی دانشگاه امپریال کالج لندن قرار گرفت.

❑ اولین کلاسهای این نرم افزار در سال ۱۹۹۳ در پایان نامه دکتری چارلی- هیل (Charli Hill) ارائه شد و در همان سال اولین کارهای عددی توسط هنری و لروژاساک (Henri and Lerozhask) شروع شد.

❑ حل گره های موجود در این نرم افزار توانایی شبیه سازی جریان های تراکم پذیر و تراکم ناپذیر، احتراق، جریان های چندفازی و انواع جریان ها با فیزیک پیچیده را دارند.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

❑ معرفی نرم افزار اوپن فوم:

❑ قابلیت متن باز این نرم افزار به پژوهشگران و محققین به ویژه به دانشجویان دکتری و کارشناسی ارشد این امکان را می دهد که ضمن بهره گیری از قابلیت های فراوان این نرم افزار بتوانند تغییرات مورد نظر خود را در کد اعمال کنند و فیزیک مورد نظر خود را شبیه سازی نمایند.

❑ امکان کوپل اوپن فوم و لایتز وجود دارد. این دو نرم افزار به خوبی با هم کوپل می شوند و امکان شبیه سازی فاز سیال و جامد را به طور همزمان فراهم می سازند.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

<https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx>



HOME / PRODUCTS / FLUIDS / ANSYS CFX

ANSYS CFX:

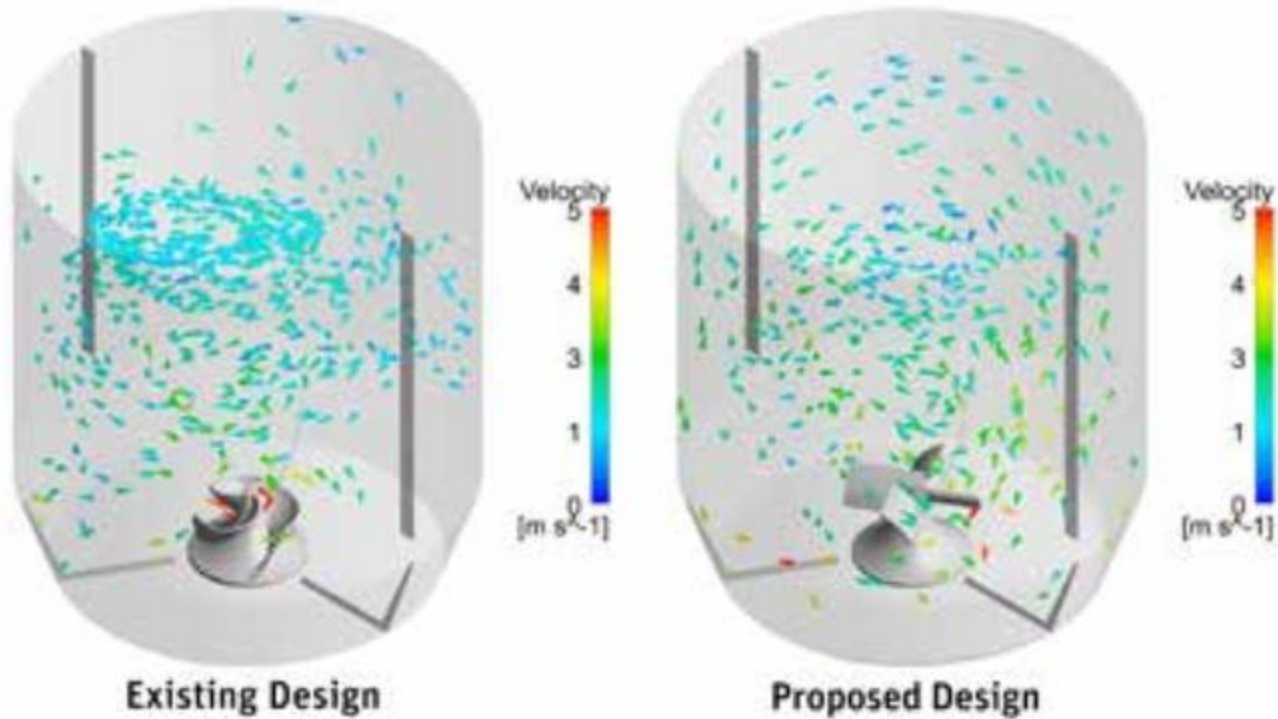
ANSYS CFX is a high-performance computational fluid dynamics (CFD) software tool that delivers reliable and accurate solutions quickly and robustly across a wide range of CFD and multi-physics applications. CFX is recognized for its outstanding accuracy, robustness and speed with rotating machinery such as pumps, fans, compressors, and gas and hydraulic turbines.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

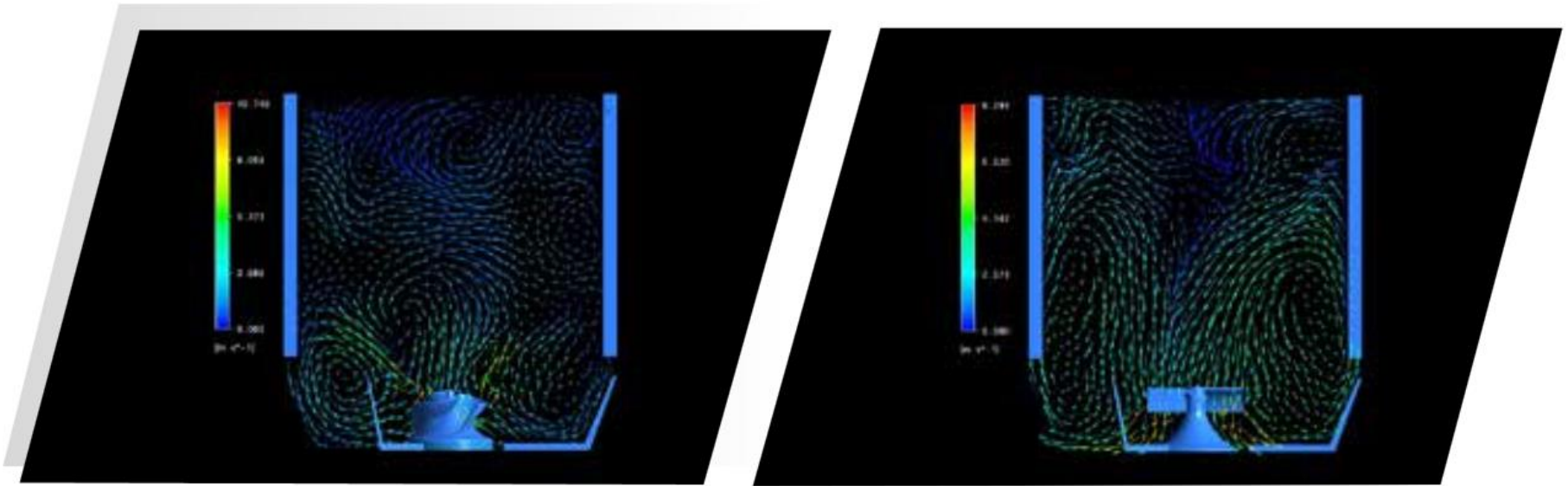
ANSYS

CFX

SIMULATION OF EXISTING MIXER



Mixing was improved with a reduction in power consumption.



- ▲ Velocity vectors for initial (left) and final design showing improved mixing performance. In the improved design, the curved cone and the impeller rotate as a single body, achieving better mixing. The proposed impeller generates stronger downflow than the existing design.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

<https://www.flow3d.com/>

FLOW  **Science®**

Search Flow Science

Products

FlowSight

Industries

Sales

Support

Resources

Academic Program

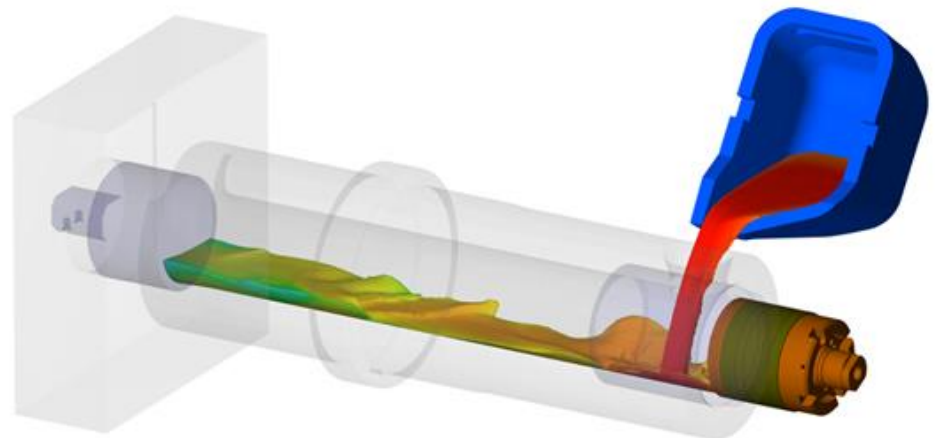
Workshops

FLOW-3D
CAST

ALL NEW
v5 RELEASED

Learn More

The Next Generation of
Casting Simulation Software



دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

FLOW-3D:

- ❑ Optimize product designs and reduce time to market with **FLOW-3D**, a highly-accurate CFD software that specializes in solving transient, free-surface problems. **FLOW-3D**'s complete multiphysics suite includes our state-of-the-art postprocessor, FlowSight.
- ❑ **FLOW-3D** provides a complete and versatile CFD simulation platform for engineers investigating the dynamic behavior of liquids and gas in a wide range of industrial applications and physical processes. **FLOW-3D** focuses on free surface and multi-phase applications, serving a broad range of industries including microfluidics, bio-medical devices, water civil infrastructure, aerospace, consumer products, additive manufacturing, inkjet printing, laser welding, automotive, offshore, energy and automotive.
- ❑ A uniquely powerful, multiphysics tool, **FLOW-3D** provides the functionality, ease-of-use and power that helps engineers advance their modeling objectives. Built for the highest level of performance, **FLOW-3D** seamlessly scales from standard workstation solutions to hundreds of CPU core solutions on high performance computing cluster solutions.
- ❑ High Performance Computing: In-House and on the Cloud
- ❑ Need the highest performance? Faced with massive simulations? Overcoming runtime challenges? **FLOW-3D** seamlessly transitions from desktop workstation solutions to high performance on-demand cloud computing and cluster solutions to cater to the industry's most demanding simulations.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

□ شبیه‌سازی به روش دینامیک سیالات محاسباتی:

□ امروزه استفاده از روش‌های عددی در محاسبات رایانه‌ای اهمیت زیادی پیدا کرده است و به عنوان ابزاری کارآمد در طراحی تجهیزات مهندسی به کار می‌رود.

□ دانش دینامیک سیالات محاسباتی به صورت یک ابزار توانا برای تحلیل سیال و انتقال حرارت در سیستم‌هایی با هندسه ناموزون و معادلات حاکم پیچیده برای محققان و مهندسان درآمده و در دهه گذشته پیشرفت چشمگیری داشته است.

□ در اغلب موارد نخستین کار با اهمیت در این رشته را به ریچاردسون نسبت می‌دهند، که در سال ۱۹۱۱ میلادی محاسبات مربوط به نحوه توزیع تنش در یک سد ساخته‌شده از مصالح بنایی را به انجام رسانید.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

- ❑ در این کار ریچاردسون از روشی تازه موسوم به رهاسازی برای حل معادله لاپلاس استفاده نمود. او در این شیوه حل عددی داده‌های فراهم‌آمده از مرحله پیشین تکرار را برای تازه‌سازی تمامی مقادیر مجهول در گام جدید به کار می‌گرفت.
- ❑ از دهه ۱۹۸۱ حل مسائل جریان توسط روش CFD موضوع حوزه تحقیق بسیاری از محققان فوق دکتری، دانشجویان دکتری و یا متخصصان شبیه‌سازی که به طور اصولی آموزش دیده‌اند درآمده است.
- ❑ نرم‌افزارهایی که در حال حاضر در بازار موجود است، ممکن است متنوع باشند، اما استفاده از آن‌ها نیازمند مهارت و درک بسیار بالا از سوی کاربر می‌باشد تا نتایج قابل قبولی در حالت‌های پیچیده به دست آید.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

- دینامیک سیالات محاسباتی یا CFD عبارت است از تحلیل سیستم‌هایی شامل جریان سیال، انتقال حرارت و پدیده‌های همراه نظیر واکنش‌های شیمیایی بر اساس شبیه‌سازی رایانه‌ای و روشی است بسیار توانا که کاربردهای صنعتی و غیرصنعتی را در بر می‌گیرد.
- کدهای CFD معادلات پیوستگی جرم، انرژی و اندازه حرکت را روی یک دامنه که توسط کاربر مشخص می‌شود، حل می‌نماید.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

□ اساس برنامه‌های CFD مبتنی بر روش‌های عددی است و به طور کلی سه روش مجزا برای آن وجود دارد: روش اجزاء محدود، روش تفاضل محدود، روش اجزاء مرزی (BEM) (Boundary Element Method).

□ در این روش‌ها مراحل زیر صورت می‌گیرند:

۱- تقریب متغیرهای مجهول جریان با استفاده از توابع ساده

۲- گسسته‌سازی با استفاده از جاگذاری تقریب‌ها در معادلات حاکم بر جریان و سپس انجام تغییرات ریاضی

۳- حل معادلات جبری.

□ کدهای CFD از سه قسمت اصلی تشکیل می‌شوند:

۱- پیش تحلیل گر ۲- حل گر ۳- تحلیل گر نهایی.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

□ امروزه بسته‌های نرم‌افزاری دینامیک سیالات محاسباتی به امکانات پیشرفته پردازش مجهز شده‌اند. این امکانات عبارتند از:

❖ نمایش دامنه شکل و ابعاد مسأله و گره

❖ منحنی‌های نمودار برشی به صورت خطی و سایه‌دار

❖ منحنی‌های برداری

❖ منحنی‌های دوبعدی و سه‌بعدی سطوح

❖ دنبال کردن ذرات

❖ تنظیم دیدار (جابه‌جا کردن، چرخاندن، بزرگ و کوچک کردن شکل و غیره)

❖ خروجی‌های متمایز شده به وسیله رنگ

□ و اخیراً امکاناتی شامل پویانمایی نتایج و نیز خروجی داده‌ها برای استفاده در نرم افزارهای دیگر تهیه شده است.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

□ در دینامیک سیالات محاسباتی دو دیدگاه اصلی جهت تعیین سرعت ذرات سیال حاکم است. **دیدگاه اول اویلری** است. در این دیدگاه نقطه ثابتی از فضا را در نظر گرفته و سرعت دسته‌ای از ذرات سیال را که از این نقطه گذر می‌کند تعیین می‌شود. **دیدگاه دوم لاگرانژی** است که حرکت یک ذره منفرد را بررسی می‌کند.

□ پایه و اساس مربوط به حرکت سیال براساس معادلات پیوستگی (۱)، ناویر-استوکس (ممنتوم) (۲)، و انرژی (۳ و ۴) تشریح می‌شود:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho_f \varepsilon u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \varepsilon u u) = -\nabla p - F_{p-f} + \nabla \cdot (\varepsilon \tau) + \rho_f \varepsilon g \quad (2)$$

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{V^2}{2} \right) = \rho q \cdot - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} + \rho_f \cdot V \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) V \right] \\ = \rho q \cdot - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} + \rho_f \cdot V \end{aligned} \quad (4)$$

□ که در آنها

$$V \quad \dot{q} \quad e \quad g \quad \tau \quad F_{p-f} \quad \rho_f \quad w \quad v \quad u \quad t \quad \varepsilon$$

به ترتیب از راست به چپ: کسر حجمی اشغال شده توسط سیال، زمان، سرعت سیال در سه جهت اصلی، چگالی سیال، نیروی اندرکنش ذره سیال، تانسور تنش گرانیوی سیال، شتاب جاذبه، انرژی ورودی در واحد جرم، انتقال حجمی حرارت به ازاء واحد جرم، سرعت المان سیال متحرک می‌باشند.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

$$\frac{\partial(\rho_f \epsilon u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \epsilon u u) = -\nabla P - F_{p-f} + \nabla \cdot (\epsilon \tau) + \rho_f \epsilon g \quad (۲)$$

□ در معادله ناویر استوکس سمت چپ معادله بیانگر شتاب سیال و سمت راست آن نیروهای وارد

بر واحد حجم سیال می باشد (مانند نیروی جاذبه، فشاری و گرانی).

□ معادلات فوق را هم برای جریان های پایا و هم جریان های غیرپایا می توان به کار برد.

□ این نوع از معادلات از نوع دیفرانسیل غیرخطی با مشتقات جزئی هستند. غیرخطی

بودن آنها باعث شده است که حل تحلیلی آنها در بسیاری از حالات مانند مسائل چندفازی

و آشفته غیرممکن باشد.

□ لذا برای حل این معادلات از روش های عددی استفاده می شود.

کوپل DEM و CFD

❑ راهبردهای مختلف تلفیق در جریان‌های چندفازی:

❑ تلفیق فازی یک مفهوم پایه در توصیف جریان‌های چندفازی می‌باشد که از طریق تبادل ممنتوم (نیروهای اندرکنش بین فازی، افزایش یا کاهش آن به دلیل انتقال جرم)، انرژی و جرم (تبخیر یا انجماد) بین فازها اتفاق می‌افتد.

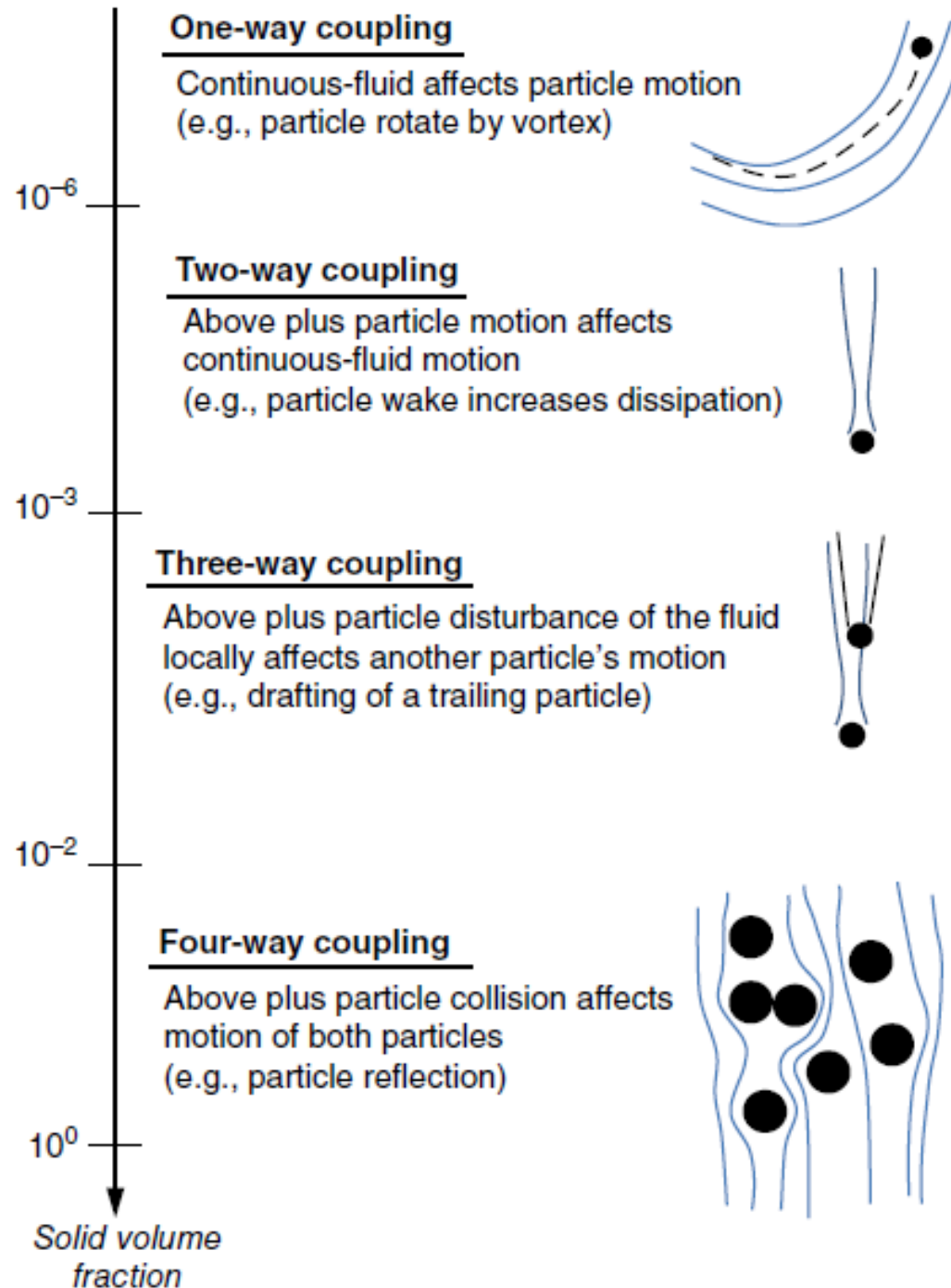
❑ قبل از انتخاب یا توسعه یک مدل برای یک جریان چندفازی، می‌بایست براساس مشخصات جریان مانند درصد وزنی ذرات جامد یک راهبرد صحیح تلفیق انتخاب شود.

❑ راه حل اصلی برای انتخاب تلفیق میان دینامیک سیالات محاسباتی و روش اجزاء گسسته، در نظر گرفتن صحیح نیروهای اندرکنش سیال- ذره می‌باشد.

❑ در یک جریان چندفازی بر اساس اندرکنش‌های بین فازها، چهار دسته‌بندی مختلف برای تلفیق فازی وجود دارد. شکل زیر این دسته‌بندی‌ها را با توضیح هرکدام و ارائه نمونه نشان

می‌دهد.

□ Various coupling strategies



کوپل DEM و CFD

- ❑ در برخی واحدهای عملیاتی در صنعت فرآوری مواد معدنی معمولاً با توجه به درصد وزنی یا کسر حجمی بالای ذرات جامد در پالپ خوراک، مقدار انباشتگی ذره‌ای آن‌ها بالا بوده و تلفیق میان ذرات و سیال به صورت چهارطرفه می‌باشد.
- ❑ در نرم‌افزار انسیس فلوئنت تنها مدل چندفازی اوایلرین و زیرمدل‌های آن قادر به اجرای شبیه‌سازی‌های چهارطرفه هستند و مدل فاز گسسته به تنهایی به دلیل فرض پایین بودن کسر حجمی ذرات در فرمول‌بندی آن، قابل استفاده نمی‌باشد.
- ❑ با به کارگیری زیرمدل فاز گسسته متراکم از مدل اوایلرین و زیرمدل برخورد راگ از مدل فاز گسسته در عمل امکان شبیه‌سازی تلفیقی چهارطرفه فراهم شده است.

فصل سوم: هیدرودینامیک ذرات هموار

Smooth Particle Hydrodynamics

Joseph J. Monaghan



Joseph Monaghan

Emeritus Prof

Emeritus Professor, Sch of Physics & Astronomy

E-mail

Joe.Monaghan@monash.edu

هیدرودینامیک هموار شده ذرات
هیدرودینامیک ذرات صاف
هیدرودینامیک ذرات هموار شده



[my.monash](#)

[Current students](#)

[Staff](#)

[Library](#)

[ABOUT US](#)

[STUDY](#)

[RESEARCH](#)

[ENTERPRISE & PARTNERSHIPS](#)

[INTERNATIONAL](#)

[OUR PEOPLE](#)

[NEWS & EVENTS](#)

[ALUMNI](#)

هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)

□ روش SPH یکی از روش‌های عددی از گروه روش‌های تحلیل بدون المان می‌باشد.

□ در روش‌های تحلیل بدون المان، برخلاف روش اجزاء محدود، نیاز به تعریف یک المان

استاندارد برای تفسیر رفتار فیزیکی نمی‌باشد و در این روش‌ها گروهی از گره‌ها جایگزین شبکه المان‌ها می‌شوند.

□ اساساً علت استقبال از این روش‌ها کاهش زمان زیادی است که صرف تولید شبکه در روش اجزاء محدود، بویژه در تحلیل‌های دینامیکی وفق‌پذیر (adaptive) می‌شود.

□ روش SPH بر پایه بیان مقادیر عددی گره‌ها به صورت میانگین وزنی از مقادیر عددی گره‌های مجاور می‌باشد.

□ برتری این روش نسبت به روش تفاضل‌های محدود، قابلیت مدل‌سازی و به‌کارگیری آن در برازش محیط‌هایی با هندسه پیچیده و توزیع نامنظم گره‌ها می‌باشد.

هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)

- ❑ روش SPH برای اولین بار در سال ۱۹۷۷ برای حل مسائل ستاره‌شناسی در فضای سه‌بعدی، مورد استفاده قرار گرفت.
- ❑ از آغاز ابداع SPH تاکنون این روش در حل بسیاری از مسائل فیزیکی که ماهیت دینامیکی دارند مورد استفاده قرار گرفته است.
- ❑ این روش در دهه نود میلادی در زمینه‌های پاسخ دینامیکی مصالح، مدل‌سازی ترک‌خوردگی، مدل‌سازی برخورد، مصالح تردشکن، شکل‌دهی فلزات، دینامیک سیالات، پدیده انفجار و انفجار در زیر آب مورد استفاده قرار گرفته است.
- ❑ از جمله دلائلی که موجب توجه به این روش شده است، این است که روابط در دستگاه مختصات ثابت نوشته می‌شوند و حرکت آزادانه گره‌هایی که مصالح در آنها به صورت متمرکز در نظر گرفته می‌شوند، ممکن می‌باشد.
- ❑ اهمیت این خاصیت SPH بویژه در مسائل تغییرشکل‌های بزرگ بسیار آشکار است.

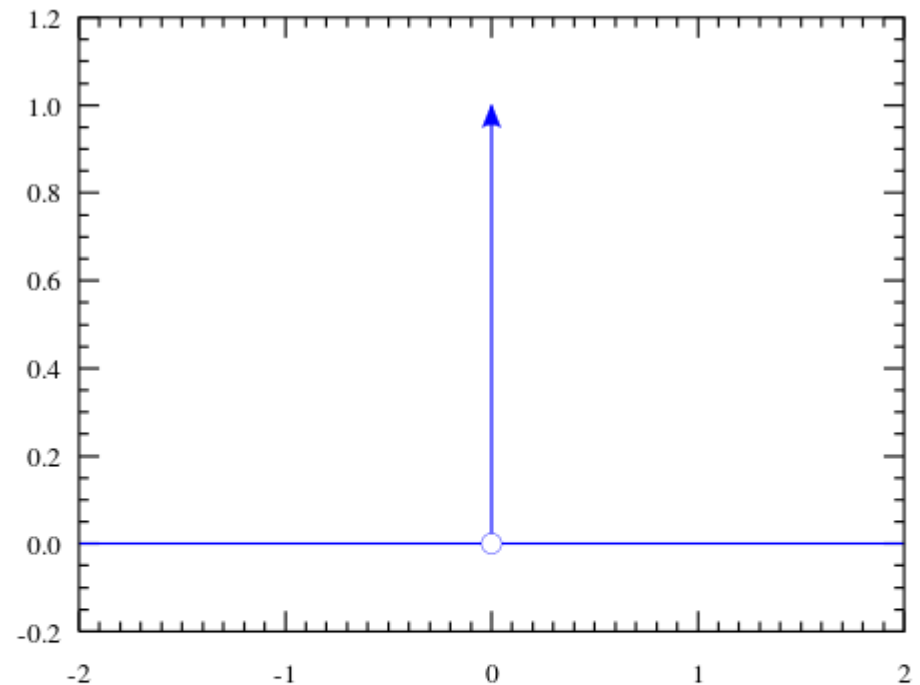
تابع دلتای دیراک

the Dirac delta function (δ function)

Paul Dirac /di'ræk/
OM FRS



Paul Adrien Maurice Dirac



Schematic representation of the Dirac delta function by a line surmounted by an arrow. The height of the arrow is usually meant to specify the value of any multiplicative constant, which will give the area under the function. The other convention is to write the area next to the arrowhead.

تابع دلتای دیراک

the Dirac delta function (δ function)

- ❑ در ریاضیات و علوم، تابع دلتای دیراک، یا تابع δ ، یک تابع تعمیم‌یافته، یا توزیع، روی محور اعداد حقیقی است که همه جا مقدار صفر دارد به جز در صفر، و روی کل محور حقیقی انتگرالی با مقدار یک دارد.
- ❑ این تابع شکل خاصی از ضربه واحد است که اولین بار توسط فیزیکدان انگلیسی پاول دیراک مطرح شد و به نام او نامگذاری گردید.
- ❑ این تابع که با حرف یونانی δ نمایش داده می‌شود، در نقطه $x=0$ مقداری برابر بی‌نهایت و در دیگر نقاط مقداری برابر با صفر دارد و در نتیجه انتگرال آن نیز روی بازه منفی بی‌نهایت تا مثبت بی‌نهایت برابر یک خواهد بود.
- ❑ باید توجه داشت که تابع دلتا با وجود اینکه با عنوان تابع خوانده می‌شود، در مفهوم، تابع نیست و بیشتر به یک تابع توزیع که در علم آمار کاربرد دارد، شبیه است.
- ❑ پال آدرین موریس دیراک فیزیکدان و ریاضیدان برجسته بریتانیایی و از پایه‌گذاران مکانیک کوانتومی بود و در سال (۱۹۳۳) برنده جایزه نوبل شد.
- ❑ برخی دیراک را از نظر سواد ریاضی و مبانی نظری، تنها رقیب جدی هم‌عصر اینشتین می‌دانند، و برخی، مانند استیون هاوکینگ، دیراک را بزرگترین فیزیکدان نظری از زمان اسحاق نیوتن تاکنون، دانسته‌اند.

تابع دلتای دیراک

the Dirac delta function (δ function)

دلتای دیراک را با اگماض می‌توان چنین تعریف کرد:

$$\delta(x) = \begin{cases} \infty, & x = 0 \\ 0, & x \neq 0 \end{cases} ; \quad \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1$$

از تبعات این تعریف یکی این است که:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) \delta(x) dx = f(0)$$

خواص جبری

حاصل ضرب توزیعی δ با x برابر با صفر است:

$$x\delta(x) = 0$$

و بالعکس اگر $xg(x) = xf(x)$ ، که f و g توزیع هستند، آن گاه:

$$f(x) = g(x) + c\delta(x)$$

به ازای عدد ثابت c ای.

انتقال

انتگرال تابع دیراک تحت تاخیر زمانی را، این رابطه می‌دهد:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \delta(t - T) dt = f(T).$$

که گاهی اوقات به عنوان خاصیت غربال کردن (به انگلیسی: sifting) یا خاصیت نمونه برداری (به انگلیسی: sampling) به آن اشاره می‌شود. گفته می‌شود که تابع دلتا مقدار را در نقطه $t = T$ "غربال" می‌کند.

Letter	Name	Sound	
		Ancient ^[7]	Modern ^[8]
Ξ ξ	xi, ξi	[ks]	

□ بیان تابع $u(x)$ در نقطه x ، به صورت انتگرالی با استفاده از این خاصیت **تابع دلتای دیراک** $\delta(x_1 - \xi)$ که در همه نقاط صفر است جز در نقطه $\xi = x_1$ ، به صورت زیر می‌باشد:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} u(\xi) \delta(x_I - \xi) d\xi = u(x_I) \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x_I - \xi) d\xi = u(x_I) \quad (۱)$$

□ مقدار تابع u در نقطه $\xi = x_1$ می‌باشد.

□ می‌توان توابع وزنی که از نظر عددی قابل بیان هستند را به نحوی که خواصی مشابه خواص تابع دلتای دیراک داشته باشند، معرفی نمود. در این صورت تقریب رابطه (۱) به شرح زیر به دست می‌آید:

$$u^h(x_I) = \int_{\Omega} u(\xi) w(x_I - \xi, h) d\xi \approx u(x_I) \quad (۲)$$

□ که در آن h ، شعاع محدوده تأثیر تابع وزن w است و به آن **طول هموارسازی** نیز می‌گویند.

مبانی روش SPH

□ ویژگی‌های تابع وزن w به شرح زیر است:

□ (۱) تابع وزن در محدوده هموارسازی همواره مثبت است: $w > 0$.

□ (۲) تابع وزن در خارج از محدوده هموارسازی همواره صفر است: $w = 0$.

□ (۳) شرط یک بودن (Unity) $\int_{\Omega} w(x_1 - \xi) d\xi = 1$.

□ (۴) تابع وزن زنگوله‌ای شکل می‌باشد (دارای توزیع نرمال است).



□ (۵) هنگامیکه اندازه دامنه هموارسازی (h) به سمت صفر میل می‌کند، تابع وزن w ، مشابه

دلتای دیراک می‌شود.

مبانی روش SPH

□ با استفاده از تابع وزن W ، می‌توان مقادیر میانی از یک رشته گسسته را توسط رابطه (۲) درونیابی نمود. شکل پیوسته انتگرال رابطه (۲) را می‌توان به صورت گسسته نوشت:

$$u^h(x_I) = \sum_{J=1}^N u_J w(x_I - x_J) \Delta v_J \quad (3)$$

□ که در آن x_I نقطه مرکزی و x_J و u_J به ترتیب مختصات و مقدار تابع موردنظر در نقطه J می‌باشد.

□ به بیان دیگر، رابطه (۳) یک متوسط‌گیری وزنی برحسب مقادیر تابع در نقاط اطراف، جهت ارائه مقدار تابع در نقطه مورد نظر است.

□ Δv_J محدوده اطراف هر گره است. در حالت یک بعدی، Δv_J به Δx_J که برابر با متوسط فاصله از نقاط طرفین است، تبدیل می‌شود. اجتماع این محدوده‌ها یک محیط پیوسته را بوجود می‌آورد.

دقت روش SPH

□ دقت این روش تا حد زیادی به انتخاب مقدار دامنه تأثیر h وابسته است.

□ در صورتی که h کوچک باشد، تعداد نقاط قرار گرفته در دامنه تأثیر تابع وزن کم شده و ممکن

است به صفر برسد در این صورت مقدار برآورد شده در نقاط میانی قابل اعتماد نمی باشد.

□ برعکس در صورتی که h بزرگ باشد، نقاط دور از نقطه موردنظر نیز در برآورد مقدار مؤثر

خواهد بود، به این ترتیب، جواب مناسب بدست نمی آید.

□ به عنوان مثال، اگر تابع دلتای دیراک را، که در آن h به سمت صفر میل می کند، برای برازش

نقاط گسسته استفاده کنیم، شکل تابع برازش هموار نیست و به صورت ضربانی می باشد. در این

صورت جواب تنها در نقاط داده صحیح می باشد و در بقیه نقاط صفر است.

□ عامل دیگری که در دقت این روش مؤثر است، نوع تابع وزن یا تابع شکل می باشد.

دقت روش SPH

□ برای مثال، تابع وزن مورد استفاده در کلیه تحلیل‌های یک مقاله به صورت زیر بوده است:

$$w(s, h) = \alpha_d \begin{cases} 2/3 - s^2 + 1/2s^3 & 0 \leq s < 1 \\ 1/6(2 - s)^3 & 1 \leq s \leq 2 \\ 0 & s > 2 \end{cases} \quad (۴)$$

$$\alpha_d = \begin{cases} 1/h & \text{For 1D} \\ 15/(7\pi h^2) & \text{For 2D} \\ 3/(2\pi h^3) & \text{For 3D} \end{cases}$$

□ در رابطه فوق S نسبت فاصله ذره مرکزی I و ذره J به شعاع h که همان **شعاع دامنه تأثیر** یا

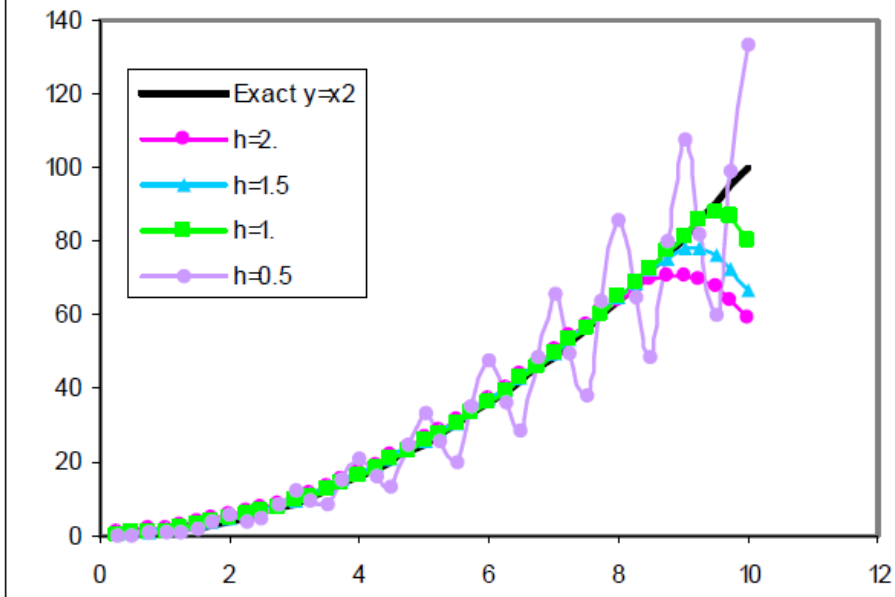
طول هموارسازی است، می‌باشد.

دقت روش SPH

□ با استفاده از تابع وزنی فوق، تابع $y = x^2$ با طول‌های هموارسازی مختلف برازش داده شده است و نتایج آن در شکل ۱ ترسیم شده است، نقاطی که به عنوان ورودی تعریف شده‌اند عبارتند از:

$$X = \{1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10\}$$

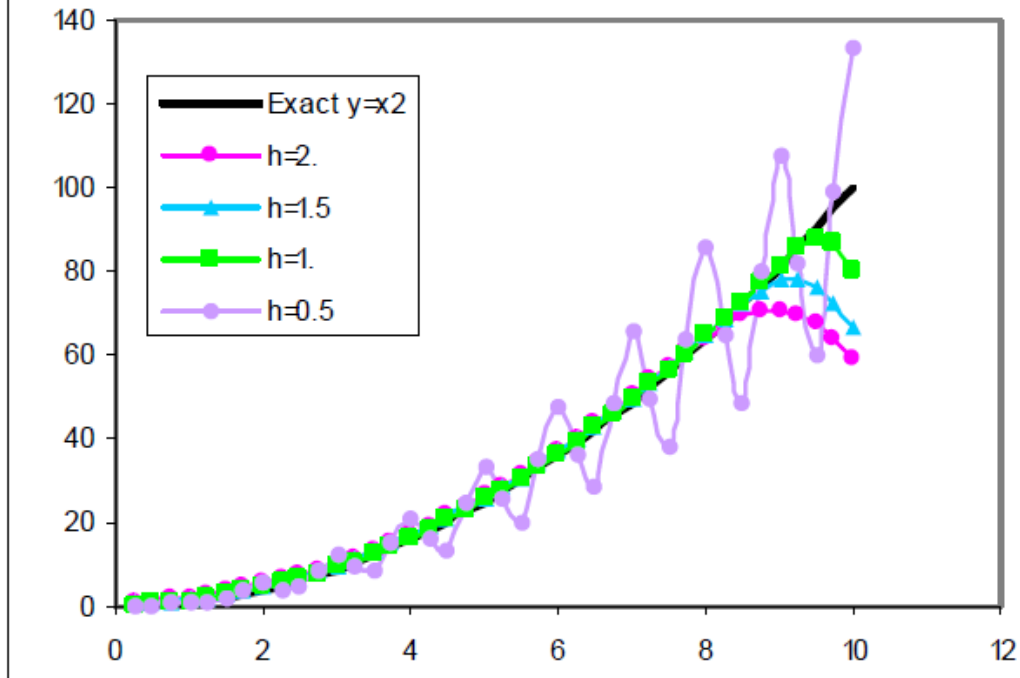
SPH Approximation of $y=x^2$



شکل ۱: برازش تابع $y = x^2$ با طول‌های هموارسازی متفاوت با استفاده از SPH

دقت روش SPH

SPH Approximation of $y=x^2$



شکل ۱: برازش تابع $y = x^2$ با طولهای هموارسازی متفاوت با استفاده از SPH

همانطور که از شکل ۱ برداشت می‌شود، انتخاب h در دقت برآورد نقاط میانی بسیار مؤثر است، در صورتیکه h بزرگ در نظر گرفته شود ($h = 2$)، دقت حل در حوالی مرز کم می‌باشد و در صورتیکه h کوچک باشد ($h = 1$)، نوساناتی در جواب دیده می‌شود.

هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)

- هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) روشی بر مبنای تقسیم سیال به مجموعه‌ای از اجزا (المان‌های) جدا از هم، که **ذرات سیال** نامیده می‌شوند، است.
- این ذرات دارای فاصله‌ای فضایی نسبت به یکدیگر هستند که از این فاصله با نام «**طول هموارسازی**» یاد می‌شود و در معادلات با حرف h ظاهر می‌شود.
- در این فاصله فضایی، خواص سیال توسط **توابع کرنل هموارسازی می‌شوند**؛ به این مفهوم که هرگاه به دنبال یافتن مقدار کمیتی از سیال باشیم، می‌بایست **مجموع خاصیت‌های مرتبط تمامی ذراتی را که درون حوزه کرنل قرار می‌گیرند**، به دست آوریم.
- برای مثال با استفاده از یکی از تکنیک‌های این روش که به نوار باریک مکعبی (Cubic spline) موناگان (Monaghan) مشهور است، محاسبه دما در موقعیت r ، وابسته به دمای همه ذرات موجود در فاصله شعاعی $2h$ بر مبنای شعاع r است.

هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)

- سهم هر ذره در محاسبه یک خاصیت براساس فاصله آن از ذره مدنظر دارای وزنی مشخص است و این سهم با تعریف مفهوم تابع چگالی وارد محاسبات می شود.
- به زبان ریاضی، تابع کرنل (W) و خصوصیات آن نقش اساسی در همه محاسبات و کمیت ها دارند.
- توابع کرنلی که در روش SPH از آن ها بهره برده می شود، شامل توابع گاوسی و اسپلاین ها می شوند.
- مقدار اسپلاین ها برای ذرات موجود در فاصله ای بیش از دو برابر طول هموارسازی، دقیقاً برابر صفر است (بر خلاف توابع گاوسی که حتی در فواصل خیلی دور نیز دارای سهمی هر چند اندک نیز هستند).
- این توابع این امکان را فراهم می کنند تا از خطاهای محاسباتی حاصل از تخمین خواص ذرات همسایه جلوگیری شود.

هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)

□ روش SPH یک روش لاگرانژی بدون شبکه (Meshfree) است.

□ این روش از معادلات بقای جرم و ناویر-استوکس به عنوان معادلات پایه‌ای استفاده می‌کند.

□ SPH برای حل معادلات بر روی ذرات از دو مرحله پیش‌بینی اولیه و اصلاح ثانویه استفاده می‌کند.

□ در مرحله پیش‌بینی اولیه، سرعت موقتی ذرات براساس مجموعه نیروهای وارده و بدون در نظر گرفتن شرط تراکم‌ناپذیری به دست می‌آیند و ذرات براساس این سرعت موقتی به حرکت واداشته می‌شوند.

□ معمولاً در طی مرحله اولیه چگالی ذرات ثابت نمی‌ماند، در نتیجه به مرحله ثانویه‌ای نیاز است که چگالی ذرات را به مقدار ثابت اولیه بازگرداند.

□ در مرحله دوم، معادله بقای جرم به گونه‌ای تعریف می‌شود که بتوان به کمک آن مقدار انحراف از چگالی ثابت اولیه را محاسبه نمود.

هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)

□ سپس به کمک معادله پوآسون فشار، تغییر چگالی ذرات با یک میدان فشاری به گونه‌ای مرتبط می‌شود که در صورت افزایش چگالی، فشار مثبت ایجادشده ذرات را از یکدیگر دور نماید، و در صورت کاهش چگالی موضعی ذرات، با ایجاد یک نیروی فشاری منفی ذرات به طرف یکدیگر حرکت کنند.

هیدرو دینامیک ذرات هموار (SPH)

❑ روش SPH یک روش لاگرانژی برای مدل سازی جریان سیال و انتقال حرارت می باشد.

❑ در این روش، به جای استفاده از شبکه های ثابت اویلری، محیط سیال با ذراتی (particles)

تقریب زده می شود که به راحتی قادر به حرکت می باشند.

❑ در واقع ذرات، صرفاً نقاط میان یابی متحرکی می باشند که خواص فیزیکی سیال نظیر دما،

آنتالپی، چگالی و غیره را با خود حمل می کنند.

❑ این خواص حتی می توانند تنش، کرنش و خواص رئولوژی ذرات باشند.

❑ روش SPH در طول دو دهه گذشته، پس از تدوین اصول اولیه، به طور گسترده برای

شبیه سازی مسائل مربوط به فیزیک اخترشناسی و مدل سازی حرکت اجرام آسمانی نسبت به

یکدیگر استفاده شده است.

❑ پس از انجام اصلاحات لازم، از این روش برای مدل سازی جریان های تراکم ناپذیر در

محفظه های بسته نیز استفاده شد.

هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)

□ مزایای عمده روش SPH برای مدل سازی انتقال حرارت و جرم در کاربردهای صنعتی عبارتند از:

□ ۱- سطح آزاد با اشکال بسیار پیچیده و رفتار سطح مشترک مواد، به طور طبیعی و به راحتی مدل سازی می شوند.

□ ۲- استفاده از چارچوب لاگرانژی به معنی حذف ترم های غیرخطی در معادله مومنوم است،
بنابراین می توان پیش بینی کرد پدیده هایی که در طبقه بندی مسائل مومنوم غالب (momentum dominated) قرار می گیرند به راحتی با این روش قابل حل باشند.

□ فیزیک های پیچیده نظیر مسائل چندفازی، معادله حالت واقعی، تراکم پذیری، انجماد، جریان در محیط متخلخل، میدان های الکترومغناطیسی وابسته به خواص مواد به راحتی مدل سازی می گردد.

هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH)

□ همانطور که گفته شد این روش در سال‌های اخیر برای مدل‌سازی جریان‌ات تراکم‌ناپذیر به‌شدت مورد توجه قرار گرفته است و به همین دلیل هنوز در بسیاری از زمینه‌ها به عنوان یک ابزار محاسباتی مورد استفاده قرار نگرفته است تا نحوه عملکرد و دقت نتایج آن به درستی اثبات گردد.

□ از جمله این زمینه‌ها می‌توان به مدل‌سازی کاویتاسیون و مدل‌سازی واکنش‌های شیمیایی اشاره کرد که تاکنون مقاله‌ای در مورد مدل‌سازی این پدیده‌ها با روش SPH منتشر نشده است. (برای تز دکتری مناسب است.)

اصول روش SPH

□ در ذات روش SPH، یک روش میان‌یابی قرار دارد که به هر تابعی اجازه می‌دهد براساس مقادیر خود در یک مجموعه نامنظم از نقاط تعریف گردد، که این نقاط در روش SPH ذرات (particles) نامیده می‌شوند.

□ میان‌یاب انتگرالی هر تابع به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{A}_h(\mathbf{r}) = \int_V \mathbf{A}(\mathbf{r}') w(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h) d\mathbf{r}'$$

□ که در آن w تابع کرنل میان‌یاب است که دو خاصیت اساسی زیر را دارا می‌باشد:

$$\int_V w(\mathbf{u}, h) d\mathbf{u} = 1$$

$$\lim_{h \rightarrow 0} w(\mathbf{u}, h) = \delta(\mathbf{u})$$

اصول روش SPH

□ در روش‌های عددی میان‌یاب انتگرالی معمولاً با یک مجموع میان‌یاب تقریب زده می‌شود:

$$\mathbf{A}_S(\mathbf{r}) = \sum_j m_j \frac{\mathbf{A}_j}{\rho_j} w(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j, h)$$

□ در رابطه فوق m_j و ρ_j جرم و چگالی ذره j است که عمل جمع بر روی تمامی ذرات واقع در داخل شعاع همسایگی $2h$ از موقعیت مکانی $\mathbf{r}$ تعریف شده است.

□ در این رابطه $w(\mathbf{r}, h)$ تابعی با خصوصیات یک $C^2 - \text{spline}$ می‌باشد که دارای شعاع هموارسازی کرنل $2h$ می‌باشد. گرادیان تابع A با مشتق‌گیری از تابع میان‌یاب فوق به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\nabla \mathbf{A}(\mathbf{r}) = \sum_j m_j \frac{\mathbf{A}_j}{\rho_j} \nabla w(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j, h)$$

تابع کرنل

□ استفاده از کرنل‌های متفاوت در روش SPH همانند به‌کارگیری روش‌های متفاوت گسسته‌سازی در روش تفاضل محدود می‌باشد.

□ یکی از متداول‌ترین کرنل‌هایی که در روش SPH استفاده می‌شود براساس تابع اسپلاین تعریف شده است:

$$w(r, h) = \frac{\sigma}{h^v} \times \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}s^2 + \frac{3}{4}s^3 & 0 \leq s < 1 \\ \frac{1}{4}(2-s)^3 & 1 \leq s < 2 \\ 0 & 2 \leq s \end{cases} \quad s = \frac{|\mathbf{r}|}{h}$$

□ در معادله فوق v تعداد ابعاد مسئله و σ یک ثابت نرمال شده با مقادیر $2/3$ و $10/7\pi$ و $1/\pi$ به ترتیب برای یک، دو و سه بعد می‌باشد.

تابع کرنل

❑ مشتق دوم این کرنل پیوسته است و ترم خطای حاکم در میان یاب انتگرال $O(h^2)$ می باشد.

❑ شعاع هموارسازی این کرنل $2h$ می باشد به این معنی که ذرات در فاصله دورتر از $2h$ هیچ

برهم کنشی با یکدیگر ندارند.

معادله پیوستگی

□ معادله پیوستگی به شکل زیر نوشته می شود:

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_j m_j (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) \cdot \nabla w_{ij}$$

□ در معادله فوق ρ_i چگالی ذره i با سرعت $\mathbf{v}_i$ بوده و m_j جرم ذره j می باشد.

□ بردار موقعیت از ذره j تا ذره i به صورت $\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j$ نشان داده می شود و $w_{ij} = w(\mathbf{r}_{ij}, h)$ می باشد.

□ وقتی که دو ذره به یکدیگر نزدیک می شوند، سرعت نسبی آنها منفی بوده و به علت منفی

بودن گرادیان تابع کرنل، $d\rho_i/dt$ که حاصل ضرب این دو مقدار است، مثبت خواهد شد.

□ به عبارت دیگر ρ_i افزایش خواهد یافت. این عامل باعث ایجاد یک فشار مثبت شده که در

نهایت ذرات را از یکدیگر دور خواهد کرد.

معادله پیوستگی

- به طریق مشابه اگر دو ذره از یکدیگر فاصله بگیرند، چگالی آن‌ها کاهش خواهد یافت و فشار منفی ایجاد شده دو ذره را به سمت یکدیگر می‌کشاند.
- این رفتار متقابل چگالی و فشار بر حسب سرعت نسبی ذرات سبب می‌شود که بتوان رفتار سیال را تراکم‌ناپذیر فرض کرد چرا که با انجام دو مرحله پیشگویی اولیه (پیش‌بینی اولیه) و تصحیح ثانویه (اصلاح ثانویه) در هر گام زمانی، فاصله ذرات نسبت به یکدیگر در کل پروسه حل ثابت می‌ماند.

Smoothed Particle Hydrodynamics

Quick review

- **Note: SPH particles are not actual particles!**
 - They are really **fluid samples of constant mass**
- **Particles** are placed inside a **container** to represent a fluid
- Every particle is then assigned a set of **initial properties**
- After **every time step** (a few milliseconds), **update** the **properties** of all particles
- Use **interpolation methods** to solve the **Navier-Stokes equation** to find **force contributions**, then integrate to find new **velocity** and **position**

SPH

Particle Properties

- Support Radius (constant)
 - **Minimum interaction distance** between particles
- Mass (constant; **ensures Conservation of Mass explicitly**)
- Position (varying)
- Surface normal (varying)
- Velocity (varying)
- Acceleration (varying)
- Sum of external forces (varying)
- Density (varying due to **constant mass** and **varying volume**)
- Pressure (varying)
- Viscosity (constant)

Smoothed Particle Hydrodynamics

Solver pseudocode

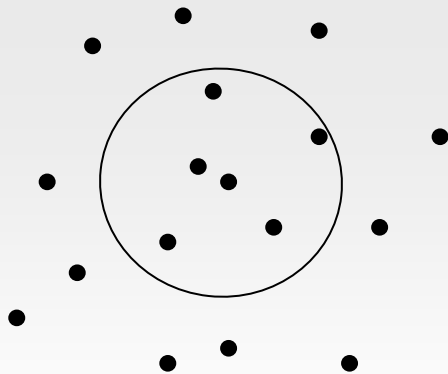
```
1  while animating do  
2    for all  $i$  do  
3      find neighborhoods  $N_i(t)$   
4    for all  $i$  do  
5      compute density  $\rho_i(t)$   
6      compute pressure  $p_i(t)$   
7    for all  $i$  do  
8      compute forces  $\mathbf{F}^{p,v,g,ext}(t)$   
9    for all  $i$  do  
10     compute new velocity  $\mathbf{v}_i(t + 1)$   
11     compute new position  $\mathbf{x}_i(t + 1)$ 
```


Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

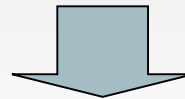
Some particle properties are determined by taking an average over neighboring particles

The fluid is represented by a particle system

Fluid dynamics



1. Only neighbors contribute to the average
2. Close particles should contribute more than distant particles



In the average: Use a weight function

Before we consider the details...

How do we describe our particle system?

Each particle is specified by a state list:

mass, velocity, position, force,
density, pressure, color

Particle $i \longrightarrow (m_i, \mathbf{v}_i, r_i, \mathbf{F}_i, \rho_i, p_i, C_i)$

The Goal

The acceleration of a particle is

$$\frac{dv_i}{dt} = a_i^{pressure} + a_i^{viscosity} + a_i^{interactive} + a_i^{gravity}$$

Let us now learn how to set up the particle list...

Particle mass

In our simulation we choose to have the same mass for all particles, $m_i = m$

The mass m is calculated by

$$m = \frac{(\text{Density of fluid}) \cdot (\text{Total volume})}{\text{Total number of particles}}$$

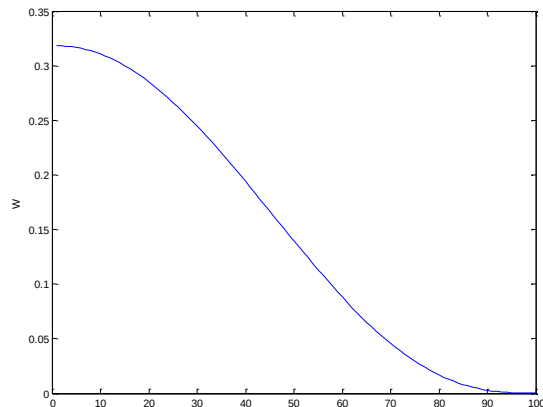
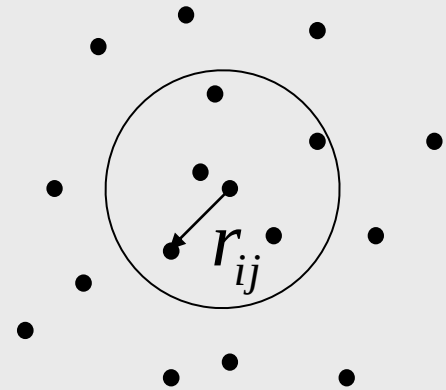
Note! Do not change the mass during the simulation

Let us now go back to the weighted averages...

How do we determine the density of a particle?

$$\rho_i = \sum_j m_j W(r_{ij})$$

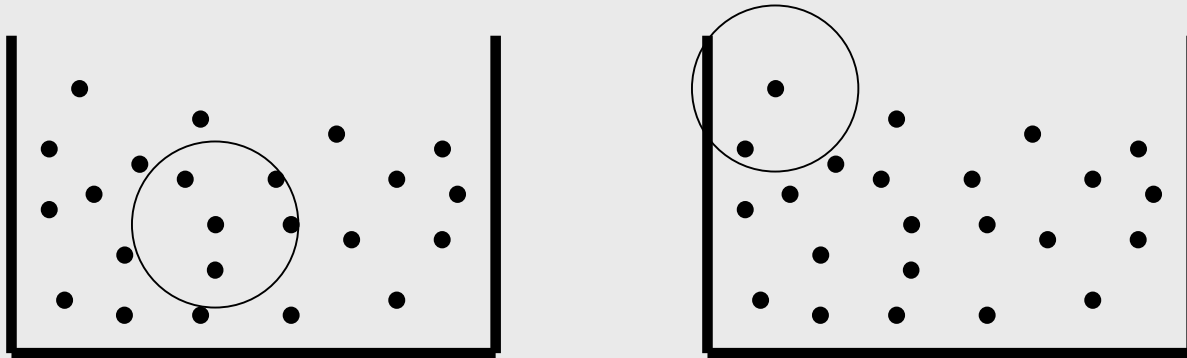
Weight function or
Kernel function



- The density calculation is done every time step
- The neighbor list must be updated every time step

Surface tracking

It is not trivial to know where the surface should be...



- We can find the surface by monitoring the density
- If the density at a particle deviates too much compared to expected density we tag it as a surface particle

Pressure

We get the pressure from the relation:

$$p_i = c_s^2 (\rho_i - \rho_0)$$

where c_s is the speed of sound and ρ_0 is the fluid reference density

Let us take a look on the particle property list again

$$(\boxed{m_i}, \mathbf{v}_i, r_i, \mathbf{F}_i, \boxed{\rho_i}, \boxed{p_i}, C_i)$$

- The next property we focus on is the force
- Velocities and positions are calculated from the forces in a way similar to an ordinary particle system
- But before we go into that we need to learn more about taking averages...

In SPH we formally define averages in the following way:

$$\langle A(r) \rangle = \int_V A(r') W(r - r') dr'$$

In practice we use a discrete version of this:

$$\langle A \rangle_i \approx \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} A_j W(r_{ij})$$

$$\langle \nabla A \rangle_i \approx \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} A_j \nabla W(r_{ij})$$

$$\langle \nabla^2 A \rangle_i \approx \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} A_j \nabla^2 W(r_{ij})$$



Example

$$\begin{aligned} \langle \rho \rangle_i &\approx \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \rho_j W(r_{ij}) \\ &\approx \sum_j m_j W(r_{ij}) \end{aligned}$$

Meshless method!!

∇ = (Del Operator)

Velocities and Forces

Motion equation in elasticity: $\frac{dv}{dt} = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \sigma + \frac{1}{\rho} F_{ext}$

We also had: $\sigma = C\varepsilon$

Now we instead use: $\sigma = -p\mathbf{I} + \mu\dot{\varepsilon}$

All this together produces the following fluid equation called Navier-Stokes equation

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla \cdot \nabla \mathbf{v} + \frac{1}{\rho} F_{ext} + \mathbf{g}$$

هیدرو دینامیک ذرات هموار (SPH)

- Our task is now to convert each term on the RHS (Right Hand Side) in Navier-Stokes to SPH-averages
- First term (pressure) becomes:

$$\left\langle -\frac{1}{\rho} \nabla p \right\rangle_i \approx \sum_j P_{ij} \nabla W(r_{ij})$$

where

$$P_{ij} = -\frac{m_j}{\rho_j} \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right)$$

- The second term (viscosity):

$$\left\langle -\frac{\mu}{\rho} \nabla \cdot \nabla \mathbf{v} \right\rangle_i \approx \sum_j \mathbf{v}_{ij} \nabla^2 W(r_{ij})$$

where

$$\mathbf{v}_{ij} = -\mu \frac{m_j}{\rho_j} \left(\frac{\mathbf{v}_i}{\rho_i^2} + \frac{\mathbf{v}_j}{\rho_j^2} \right)$$

Summary

The acceleration of a particle can now be written:

$$\frac{dv_i}{dt} = a_i^{pressure} + a_i^{viscosity} + a_i^{interactive} + a_i^{gravity}$$

$$a_i^{pressure} \approx \sum_j P_{ij} \nabla W(r_{ij})$$

$$a_i^{viscosity} \approx \sum_j V_{ij} \nabla W(r_{ij})$$

$$a_i^{interactive} \approx \frac{1}{\rho_i} F_i^{interactive}$$

$$a_i^{gravity} \approx (0, 0, -g)$$

هیدرو دینامیک ذرات هموار (SPH)

For each time step:

- Find neighbors to each particle and store in a list
- Calculate density for each particle
- Calculate pressure for each particle
- Calculate all type of accelerations for each particle, and sum it up
- Find new velocities and positions by using the same integration method as before...

The color property?

What is the use of this property?

- We can use it to detect the **position of the surface** of our fluid
- We can also use it to find the **normal vectors** at the surface (important for rendering!)
- The normal vectors allow us to implement surface tension
- By adding several color fields we can for example implement a simple model of **flame propagation**



The color field

- The color parameter is a quantity that is zero everywhere except at the particle where it has a finite value
- Similar to how we calculated density we now calculate the average color at particle i as

$$\langle C \rangle_i \approx \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} C_j W(r_{ij})$$

- Deviations of the color field show us where the surface is, and this case we choose to study the derivative of color field

- The gradient of a color field is

$$\langle \nabla C \rangle_i \approx \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} C_j \nabla W(r_{ij})$$

- When the magnitude of the gradient is larger than a certain value, we tag the particle as a surface particle

Surface tension

The force that tends to make surfaces smooth (like a drop of liquid) can be modeled in the following way:

$$a_i^{tension} = -\sigma_s \left\langle \nabla^2 C \right\rangle_i \frac{\mathbf{n}_i}{|\mathbf{n}_i|}$$

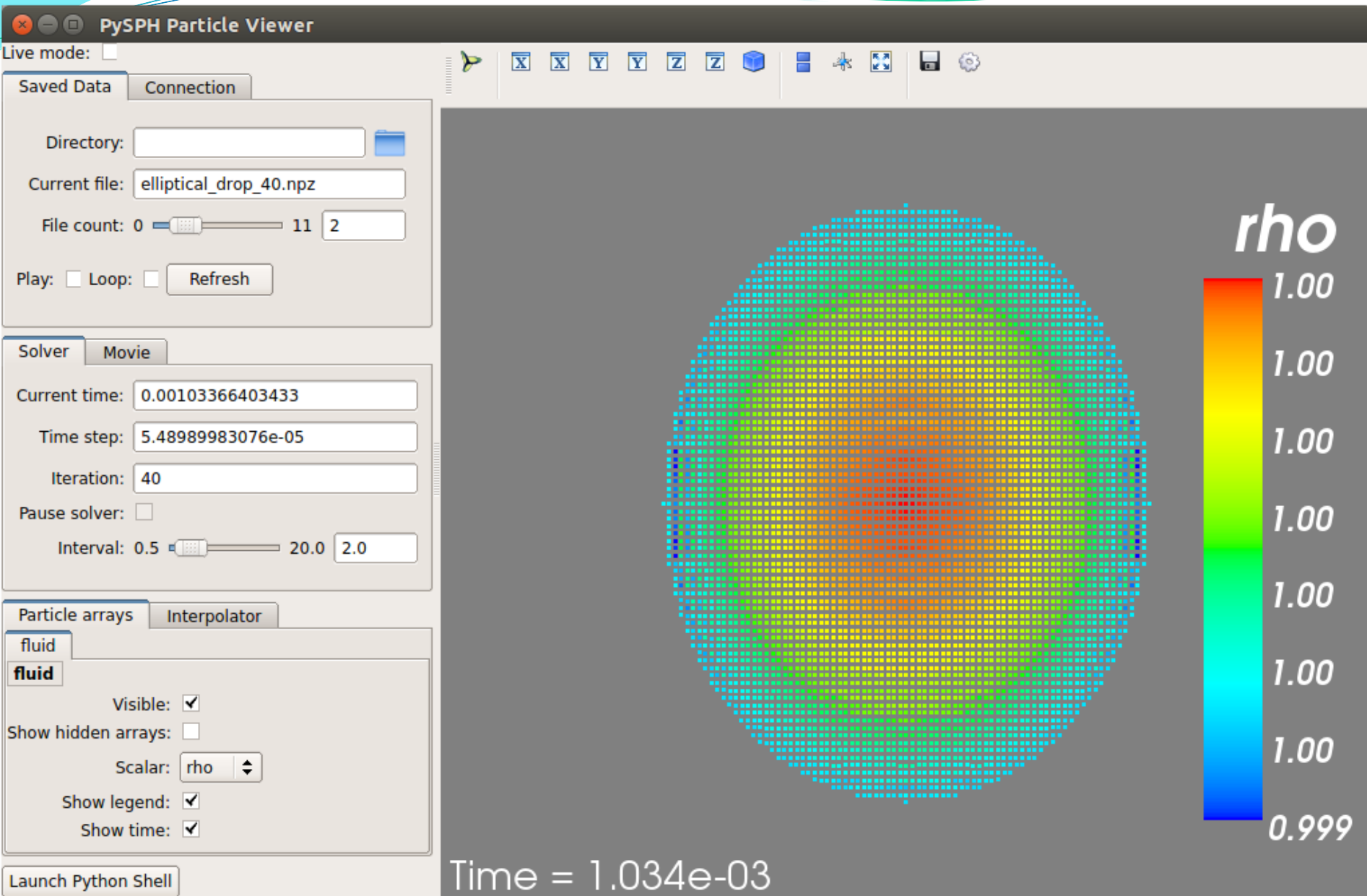
where $\mathbf{n}_i = \left\langle \nabla C \right\rangle_i$ and $\left\langle \nabla^2 C \right\rangle_i \approx \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} C_j \nabla^2 W(r_{ij})$

Note: If the magnitude of $\mathbf{n}_i$ is small we can get numerical problem in the division above. To avoid this we only calculate $\mathbf{n}_i / |\mathbf{n}_i|$ if the magnitude of $\mathbf{n}_i$ exceeds a certain threshold.

نرم افزارهای موجود در زمینه SPH

- [Algodoo](#) is a 2D simulation framework for education using SPH
- [pysph](#) Open Source Framework for Smoothed Particle Hydrodynamics in Python (New BSD License)
- [DualSPHysics](#) is an open source SPH code based on SPHysics and using GPU computing
- [Fluidix](#) is a GPU-based particle simulation API available from OneZero Software
- [FLUIDS v.1](#) is a simple, open source (Zlib), real-time 3D SPH implementation in C++ for liquids for CPU and GPU.
- [GADGET \[1\]](#) is a freely available (GPL) code for cosmological N-body/SPH simulations
- [GPUSPH](#) SPH simulator with viscosity (GPLv3)
- [SimPARTIX](#) is a commercial simulation package for SPH and DEM simulations from Fraunhofer IWM
- [SPLASH](#) is an open source (GPL) visualisation tool for SPH simulations
- [SPH-flow](#)
- [SPHysics](#) is an open source SPH implementation in Fortran
- [SYMPLER](#): A freeware SYMBOLic ParticLE simulator from the University of Freiburg.
- [Physics Abstraction Layer](#) is an open source abstraction system that supports real time physics engines with SPH support
- [Pasimodo](#) is a program package for particle-based simulation methods, e.g. SPH
- [Punto](#) is a freely available visualisation tool for particle simulations
- [AQUAgpusph](#) is the free (GPLv3) SPH of the researchers, by the researchers, for the researchers

نرم افزارهای موجود در زمینه SPH



نرم افزارهای موجود در زمینه SPH



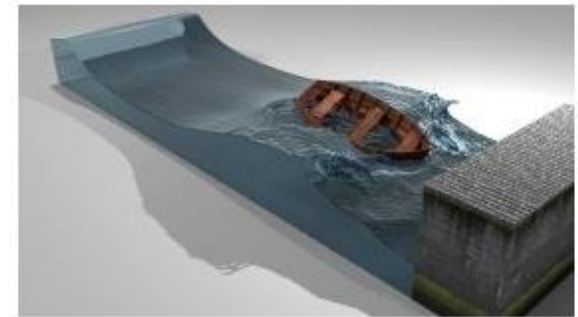
<http://www.dual.sphysics.org/>

Universidade de Vigo



The University of Manchester

DualSPHysics is based on the Smoothed Particle Hydrodynamics model named SPHysics (www.sphysics.org).



- ❑ The code is developed to study free-surface flow phenomena where Eulerian methods can be difficult to apply, such as waves or impact of dam-breaks on off-shore structures. DualSPHysics is a set of C++, CUDA and Java codes designed to deal with real-life engineering problems.

نرم افزارهای موجود در زمینه SPH

https://wiki.manchester.ac.uk/sphysics/index.php/Main_Page

SPHysicsLog in / create account

SPHysicsAbout »Downloads »Visualization »Help »

Multiple Formulations
& Choices

$$\frac{d\mathbf{v}_a}{dt} = -\sum_b m_b \left(\frac{P_a}{\rho_a^2} + \frac{P_b}{\rho_b^2} \right) \nabla_a W_{ab}$$
$$\frac{d}{dt} (\omega_i \rho_i \mathbf{v}_i) + \omega_i \sum_{j \in P} \omega_j 2 [p_a + \rho_a \mathbf{v}_{a,ij} \otimes (\mathbf{v}_{a,ij}^0 - \mathbf{v}^0(x_{ij}, t))] \nabla_i W_{ij} = \omega_i S_i$$

SPHYSICS Home Page

(Redirected from [Main Page](#))

SPHysics - SPH Free-surface Flow Solver

Open-Source Smoothed Particle Hydrodynamics code

نرم افزارهای موجود در زمینه SPH

❑ The SPHysics Code:

- ❑ SPHysics is a platform of Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) codes inspired by the formulation of Monaghan (1992) developed jointly by researchers at the Johns Hopkins University (U.S.A.), the University of Vigo (Spain), the University of Manchester (U.K.) and the University of Rome La Sapienza (Italy).
- ❑ Developed over a number of years primarily to study free-surface flow phenomena where Eulerian methods can be difficult to apply, such as waves, impact of dam-breaks on off-shore structures.
- ❑ We are excited to announce that there are 3 codes available: Code Features, while future versions can be found under (Future Developments & Releases).

نرم افزارهای موجود در زمینه SPH

<https://www.fluidix.ca/>



Fluidix

by OneZero Software

Fluidix

Harness the power of the GPU
for general particle simulations

LEARN MORE

What is Fluidix?

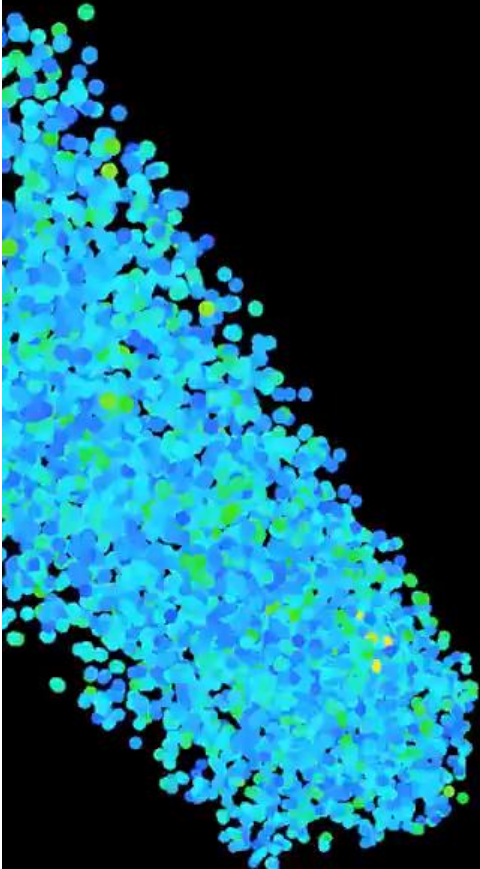
- Fluidix is a flexible CUDA-based parallel particle simulation library which can be used to create practically ANY particle-based model in high performance using the GPU.
- A development environment combines ease of compiling, running, and learning to allow you to build both large and small-scale simulations quickly, with only a working knowledge of C programming required.

نرم افزارهای موجود در زمینه SPH



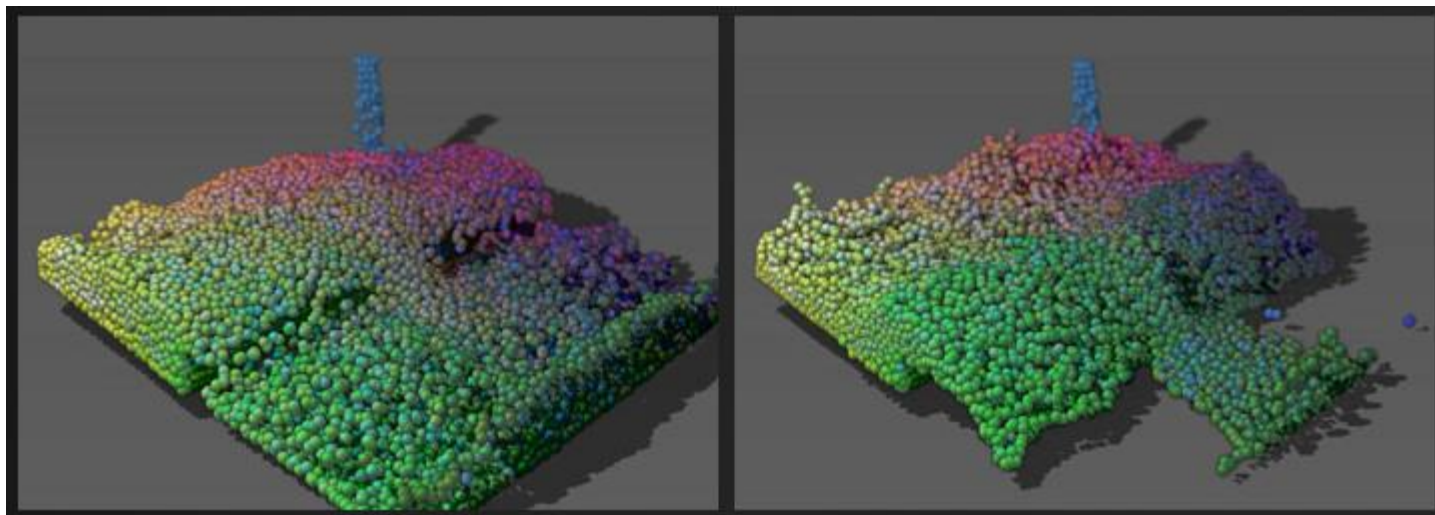
Fluidix

by OneZero Software



نرم افزارهای موجود در زمینه SPH

- ❑ Fluids v.2 - A Fast, Open Source, Fluid Simulator (2009)
- ❑ Fluids v.2 is a simple, easy-to-understand, efficient implementation of Smoothed Particle Hydrodynamics on the CPU. Fluids simulates breaking waves, vortices, turbulence, and flows. Designed to allow developers to easily explore and understand SPH methods.



نرم افزارهای موجود در زمینه SPH



v4.1 released



<http://www.gpusph.org/>

About

Features

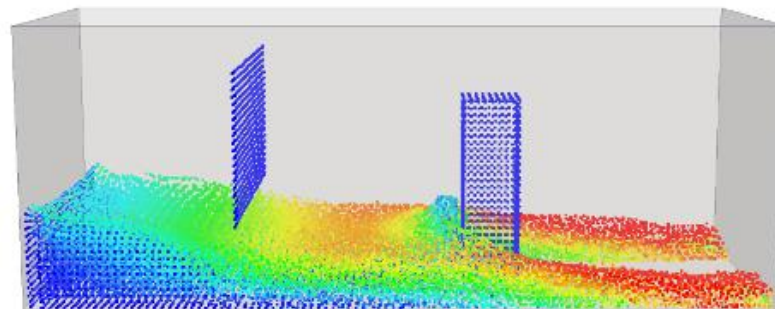
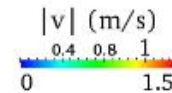
Downloads

Documentation

Gallery

References

Contact



The Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method is a Lagrangian method for fluid flow simulation. In SPH the continuous medium is discretised into a set of particles that interact with each other and move at the fluid's velocity.

- ❑ GPUSPH was the first implementation of Weakly-Compressible Smoothed Particle Hydrodynamics (WCSPH) to run entirely on GPU with CUDA.
- ❑ The initial version was developed by Alexis Hérault (INGV, CNAM), Giuseppe Bilotta (DMI, INGV) and Robert A. Dalrymple (JHU).

Aquaplaning simulation with SPH

نرم افزارهای موجود در زمینه SPH

<http://www.nextflow-software.com/>



نرم افزارهای موجود در زمینه SPH



NEXTFLOW Software

Pushing the limits of fluid flow simulation

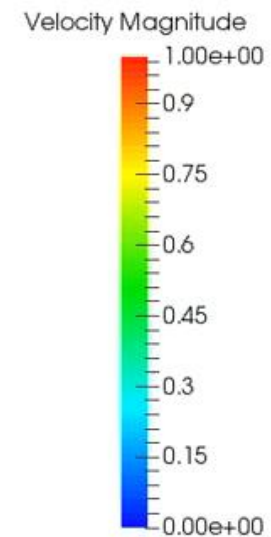
We provide Computer Aided Engineering (CAE) solutions and services to help companies design, develop, validate and operate better products faster.



We are breaking the barriers of traditional Computational Fluid Dynamics (CFD): for the past 9 years our research engineers have been partnering with Centrale Nantes Engineering School Fluid Dynamics Laboratory to develop new algorithms to solve advanced physics while ensuring ease of use and easy access to simulation for any user profile. As a result our solutions can be used from concept phase shape optimization to final design validation and operation simulation independently from the complexity of the physics to be simulated.

On top of state-of-the-art fluid flow simulation tools using finite volume or finite element approach we are able to address highly non linear behavior of fluids with advanced methods like Smooth Particles Hydrodynamics (SPH). SPH pushes the limits of CFD by providing fast and accurate results on very complex and highly dynamics flows like in tire aquaplaning or gear box oiling, spraying, or in any environment with free surface, liquid film, droplets, particles, bubbles that interact with static or moving solids.





نرم افزارهای موجود در زمینه SPH

<http://sympler.org/#SYMbolicParticLEsimulatorR>

SYMPLER

SYMbolic ParticLE simulatorR

Download .zip



Download .tar.gz

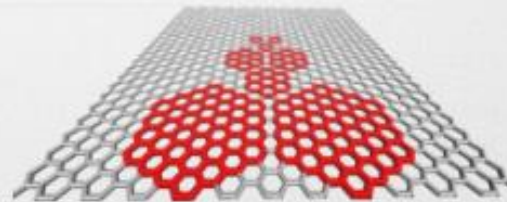
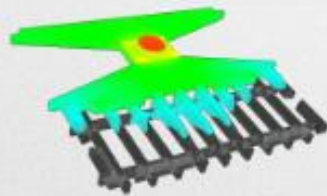
View on GitHub

Data privacy statement (Datenschutzerklärung)



FRIAS

FREIBURG INSTITUTE FOR ADVANCED STUDIES
ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT FREIBURG

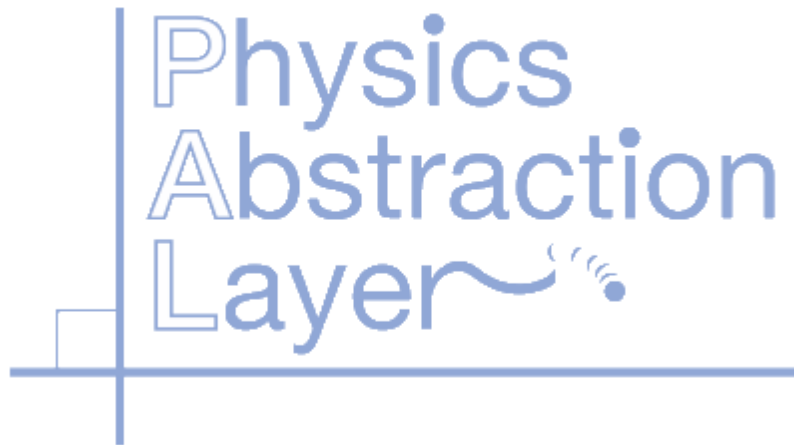


نرم افزارهای موجود در زمینه SPH

- ❑ Why a **SYM**bolic **P**artic**LE** simulato**R** (SYMPLE)?
- ❑ Because you are in need for a unified flexible and modular simulation tool allowing for the investigation of structural, thermodynamic, and dynamical properties of fluids and solids from microscopic over mesoscopic up to macroscopic time and length scales with suitable particle based simulation methods such as molecular dynamics, dissipative particle dynamics or smoothed particle hydrodynamics. The user should be enabled to define her/his own physical models without the need for recoding or code extensions.

نرم افزارهای موجود در زمینه SPH

Introduction



<http://www.adrianboeing.com/pal/index.html>

The Physics Abstraction Layer (**PAL**) provides a unified interface to a number of different physics engines. This enables the use of multiple physics engines within one application. It is not just a simple physics wrapper, but provides an extensible plug-in architecture for the physics system, as well as extended functionality for common simulation components.



PAL provides a number of benefits to game and simulation developers. First of all **PAL** is very *easy to use*, so you can easily integrate physics into your application. Secondly, it does not restrict you to one particular physics engine. This gives you more *flexibility*, allowing you to easily upgrade your physics system if you decide to pursue a commercial engine, select different engines for alternative platforms, or swap to another engine if the physics engine developers stop development and support for their engine. This flexibility allows you to choose the engine that gives you the best *performance* for your application. Finally, **PAL** has an extensive set of *common features* such as simulating different devices or loading physics configurations from XML, COLLADA and Scythe files.

نرم افزارهای موجود در زمینه SPH

<http://canal.etsin.upm.es/aquagpusph/>



HOME

NEWS

DOWNLOAD

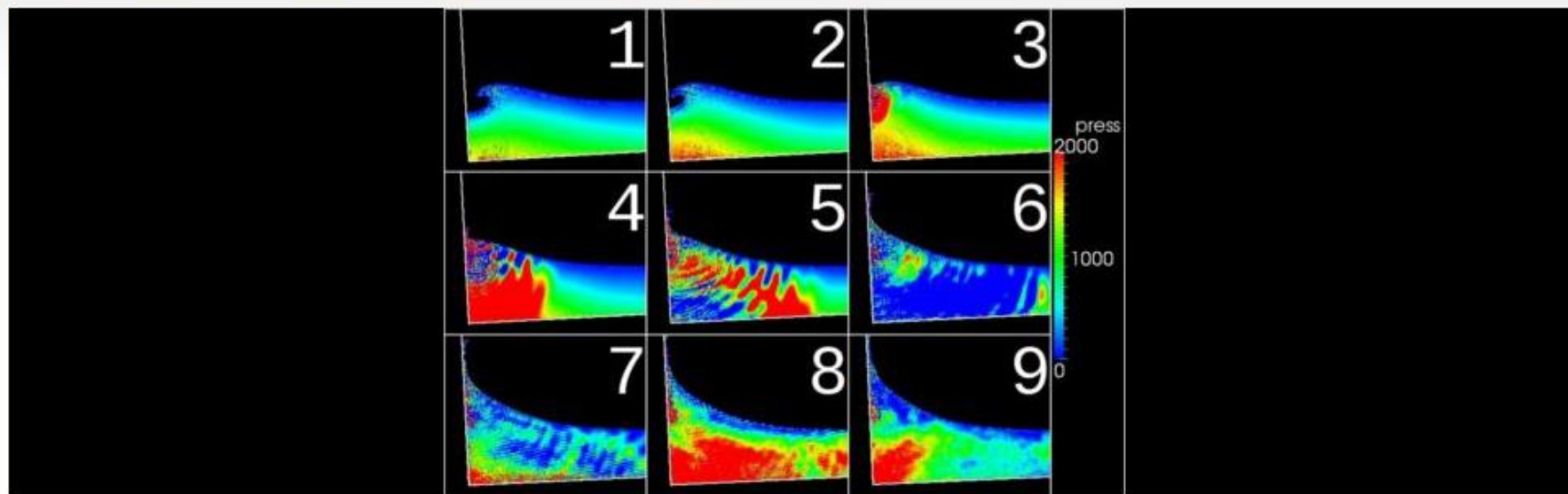
GALLERY

VALIDATIONS

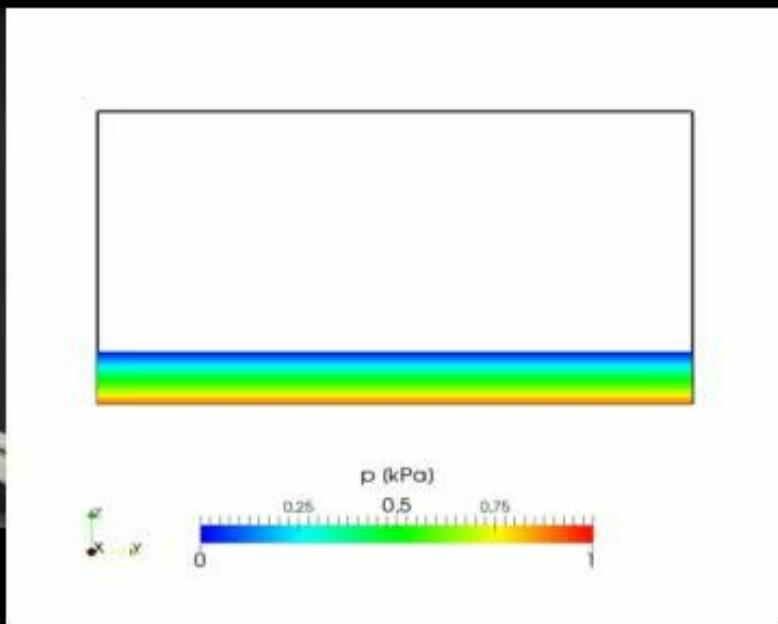
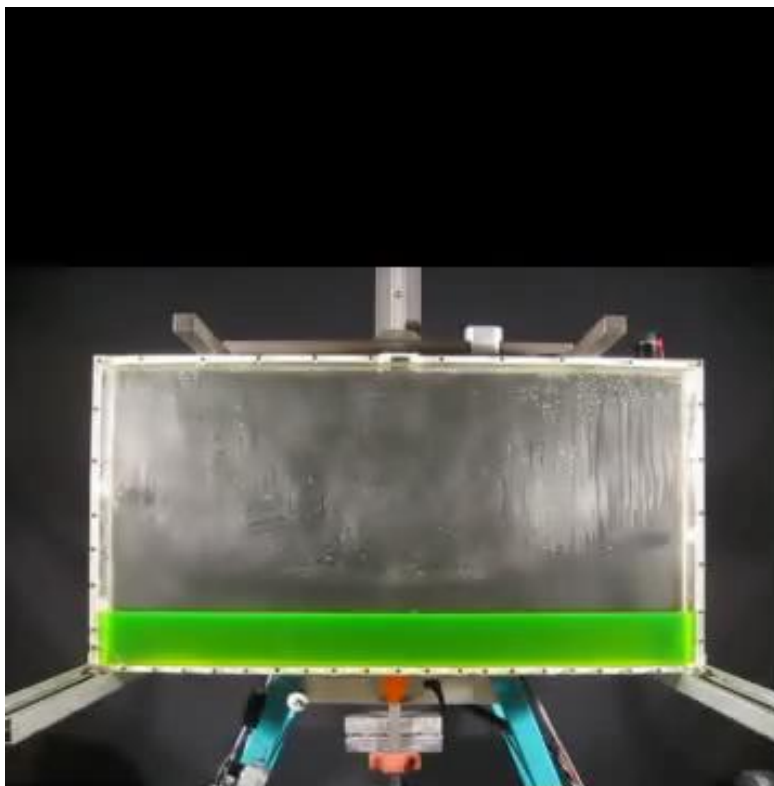
WIKI

DOXYGEN

PUBLICATIONS



نرم افزارهای موجود در زمینه SPH



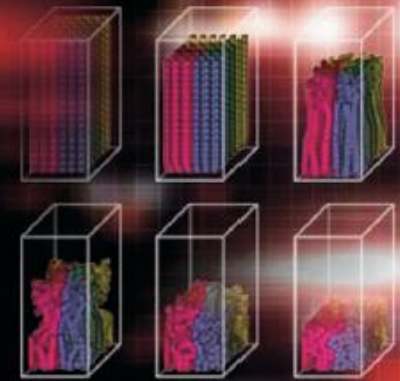
نرم افزارهای موجود در زمینه SPH



فصل چهارم: روش اجزای محدود Finite Element Method

Antonio Munjiza

THE COMBINED
finite-discrete
ELEMENT METHOD



WILEY

Dr .Antonio A.Munjiza

Google Scholar



Antonio Munjiza

Professor of Computational Mechanics, University of London
Verified email at qmul.ac.uk

FOLLOW

Computational solids Computational fluids Artificial Intelligence Robotics Biomechanics

روش اجزای محدود (FEM)

- ❑ روش عددی که در اغلب مسائل مکانیک جامدات مورد استفاده قرار می گیرد، روش اجزای محدود است که در قالب نرم افزارهایی مانند Ansys، Abaqus، Nastran و غیره قابل استفاده است.
- ❑ معمولاً مهندسان و فیزیکدانان یک پدیده فیزیکی را به وسیله دستگاهی از معادلات دیفرانسیل معمولی و یا جزئی (partial) که در محدوده (region) خاصی صادق است و شرایط مرزی و آغازین مناسبی را تأمین می کند، توصیف می کنند.
- ❑ در واقع یک معادله دیفرانسیل با شرایط مرزی و اولیه موردنیاز خود یک مدل ریاضی کامل از یک پدیده است.
- ❑ برای یافتن توزیع متغیرهای موردنظر که ارتباط آن ها در فرم دیفرانسیلی توسط معادله حاکم بیان می گردد، می بایست معادله مذکور حل گردد تا بتوان مقادیر عددی هر کمیت مرتبط را در نقاط دلخواه به دست آورد.

روش اجزای محدود (FEM)

- اما با توجه به اینکه تنها می‌توان اشکال بسیار ساده این معادلات را آن هم در ناحیه‌های هندسی بسیار ساده با روش‌های تحلیلی حل نمود، در حل اغلب معادلات حاکم به روش تحلیلی با مشکل بزرگی مواجه هستیم.
- برای مقابله با چنین مشکلاتی و نیز جهت استفاده از قدرتمندترین وسیله موجود در قرن حاضر یعنی کامپیوتر، ضروری است که مسأله موردنظر در یک قالب کاملاً جبری ریخته شود تا حل آن تنها نیازمند عملیات جبری باشد.
- برای دستیابی به چنین هدفی می‌توان از انواع مختلف روش‌های گسسته‌سازی (discretization) یک مسأله پیوسته تعریف‌شده به وسیله معادلات دیفرانسیل استفاده نمود.
- در این روش‌ها، تابع و یا توابع مجهول که می‌توان آن‌ها را با مجموعه‌ای نامتناهی از اعداد نشان داد، بوسیله تعداد متناهی از پارامترهای مجهول جایگزین می‌گردند که طبیعتاً در حالت کلی نوعی تقریب را در بر دارد.

روش اجزای محدود (FEM)

□ سه روش عمده در حل عددی یک معادله دیفرانسیل به شرح زیرند:

□ ۱- روش تفاضل محدود (Finite Difference Method)

□ ۲- روش تغییر (تغییرات) (حساب تغییرات) (Variational Method)

□ ۳- روش‌های باقیمانده وزنی (Weighted Residual Methods)

روش اجزای محدود (FEM)

❑ ۱- روش تفاضل محدود:

❑ این روش مبتنی بر مشتقات تابع مجهول است.

❑ در این روش، ناحیه موردنظر به تعدادی زیرناحیه کوچک تقسیم می‌شود. سپس، بسط سری تیلور تابع مجهول حول نقاط مرکزی نواحی کوچک نوشته می‌شود.

❑ سپس، از جملات مرتبه دوم به بالا صرف‌نظر می‌شود (تقریب) و بدین وسیله تغییرات پیوسته تابع بر حسب مکان یا زمان تبدیل به نوعی تغییرات گسسته می‌شود.

❑ پس از نوشتن بسط تیلور $\frac{d}{dx}$ تبدیل به $\frac{\Delta}{\Delta x}$ می‌شود و با نوشتن بسط مذکور برای همه نقاط زیربازه‌ها، مجموعه‌ای از معادلات جبری حاصل می‌شود که از طریق روش‌های عددی و توسط کامپیوتر قابل حل می‌باشند.

❑ در گذشته، این روش جهت حل مسائل انتقال حرارت و مکانیک سیالات استفاده می‌شده است.

روش اجزای محدود (FEM)

۲- روش تغییر (تغییرات) (حساب تغییرات) (Variational Method):

این روش مبتنی بر یک انتگرال خاص از تابع مجهول است که یک عدد تولید می کند.

در این انتگرال می توان توابع مختلفی را به عنوان تقریب قرار داد و هر بار یک عدد تولید می شود.

تابعی که کوچکترین عدد را تولید کند، می تواند تقریب مناسبی برای یک معادله دیفرانسیل خاص باشد.

انتگرال زیر را در نظر بگیرید:

$$\Pi = \int_0^H \left[\frac{D}{2} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 - Qy \right] dx$$

مقدار عددی Π را می توان هر بار با تعیین تابعی مانند $y = f(x)$ به دست آورد.

روش اجزای محدود (FEM)

□ حساب تغییرات نشان می‌دهد تابعی مانند $y = g(x)$ که کمترین عدد Π را تولید کند، جواب معادله دیفرانسیل زیر با شرایط مرزی $y(o) = y_o$ و $y(H) = y_H$ است:

$$D \frac{d^2 y}{dx^2} + Q = 0$$

□ در واقع، در عملیات فوق از روی انتگرال به معادله دیفرانسیل مربوطه پی برده می‌شود.

□ فرآیند می‌تواند بالعکس باشد. یعنی معادله دیفرانسیل داده شود و از روی آن یک انتگرال

تعریف شود. آنگاه توابع مختلف در انتگرال قرار داده می‌شوند و هنگامی که می‌نیمم Π حاصل شد، آن تابع بهترین تقریب برای معادله دیفرانسیل خواهد بود.

□ **روش تغییر**، مبنای بسیاری از فرمول‌بندی‌های روش اجزای محدود می‌باشد اما یک ایراد

اساسی دارد و آن این است که قابل اعمال در خصوص معادلات دیفرانسیل دارای مشتق مرتبه

اول نمی‌باشد.

روش اجزای محدود (FEM)

□ ۳- روش‌های باقیمانده وزنی (Weighted Residual Methods):

□ روش‌های باقیمانده وزنی نیز شامل یک انتگرال می‌باشند.

□ در این روش‌ها، ابتدا یک تخمین برای جواب زده می‌شود و در معادله دیفرانسیل مربوطه قرار می‌گیرد.

□ از آنجایی که تقریب اولیه در معادله صدق نمی‌کند، باقیمانده یا خطایی مانند R حاصل می‌شود.

□ فرض کنید تابعی مانند $y = h(x)$ در ابتدا به عنوان تقریب برای معادله دیفرانسیل زیر به کار رود:

$$D \frac{d^2 y}{dx^2} + Q = 0$$

□ با قرار دادن تابع در معادله خواهیم داشت:

روش اجزای محدود (FEM)

$$D \frac{d^2 h(x)}{dx^2} + Q = R(x) \neq 0$$

□ در روش‌های باقیمانده وزنی می‌بایست رابطه زیر برقرار باشد:

$$\int_0^H W_i(x) R(x) dx = 0$$

□ باقیمانده معادله در یک **تابع وزنی** ضرب شده است و انتگرال حاصل ضرب می‌بایست برابر صفر

باشد.

□ تعداد توابع وزنی موردنیاز برابر است با تعداد ضرایب مجهول در حل تقریبی.

□ توابع وزنی مختلفی را می توان برای حل انتخاب نمود که در زیر به چند نوع مشهورتر آن اشاره می شود:

□ ۱- روش ترتیب (همجوار) (همنشینی) (هم آیندی) (Collocation Method)

□ ۲- روش تبعی (زیردامنه) (Subdomain Method)

□ ۳- روش گالرکین (Galerkin's Method)

□ ۴- روش حداقل مربعات (Least Squares Method)

روش اجزای محدود (FEM)

□ ۱- روش ترتیب (همجواری) (همنشینی) (هم‌آیندی) (Collocation Method):

□ در این روش، توابع ضربه (دلتای دیراک) $W_i(x) = \delta(x - X_i)$ به عنوان توابع وزنی

انتخاب می‌شوند. این نوع انتخاب بیانگر این است که می‌بایست در نقاط خاصی مقدار باقیمانده

صفر باشد.

□ تعداد این نقاط برابر تعداد ضرایب مجهول در حل تقریبی است.

روش اجزای محدود (FEM)

۲- روش تبعی (زیردامنه) (Subdomain Method):

□ هر تابع وزنی برابر واحد، $\underline{W_i}(x) = 1$ ، در یک ناحیه خاص انتخاب می‌شود.

□ این نوع انتخاب بیانگر این است که می‌بایست در طول فاصله‌ای از یک ناحیه، مجموع (انتگرال)

باقیمانده‌ها برابر صفر گردد.

□ تعداد فواصل انتگرال‌گیری برابر تعداد ضرایب نامعین در حل تقریبی است.

روش اجزای محدود (FEM)

□ ۳- روش گالرکین (Galerkin's Method):

□ در روش گالرکین، همان تابعی که به عنوان حل تقریبی استفاده می‌شود، به عنوان تابع وزنی

نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

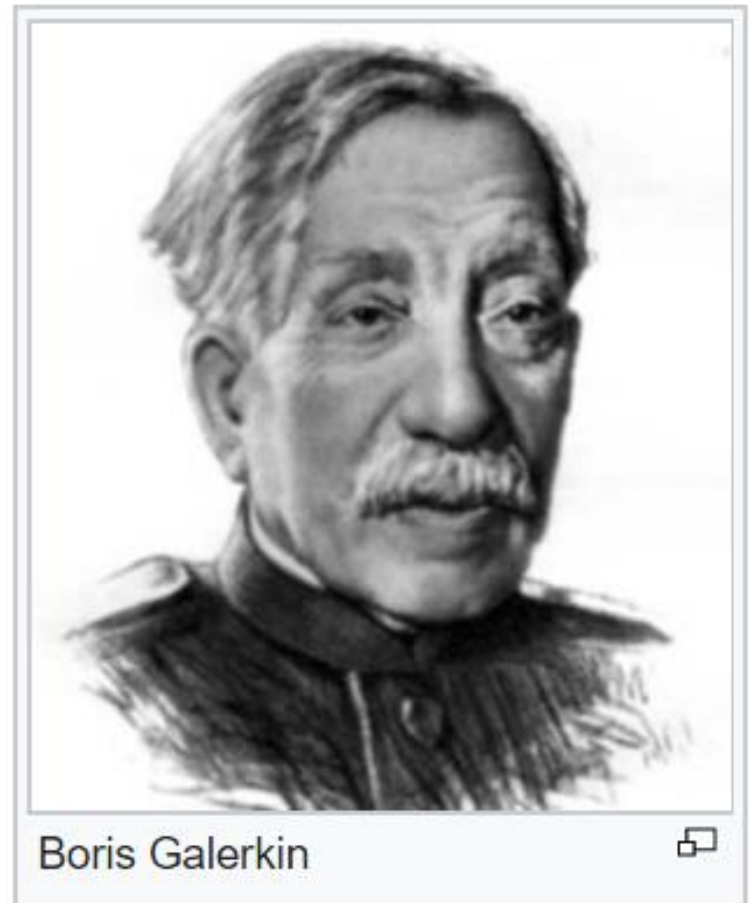
□ این رویکرد، مبنای روش اجزای محدود برای مسائل دارای مشتق مرتبه اول و بسیاری مسائل

دیگر است.

□ ۳- روش گالرکین (Galerkin's Method):

Boris Grigoryevich Galerkin

Galerkin was born on
March 4 1871
in Polotsk, Vitebsk
Governorate, Russian
Empire, now part
of Belarus.



روش اجزای محدود (FEM)

❑ ۴- روش حداقل مربعات (Least Squares Method):

❑ در این روش، مقدار خطای R به عنوان تابع وزنی استفاده می شود. بنابراین، انتگرال زیر حاصل می شود:

$$Er = \int_0^H [R(x)]^2 dx$$

❑ این میزان خطا نسبت به ضرایب نامعلوم موجود در حل تقریبی، می نیمم می شود.

❑ از روش حداقل مربعات نیز جهت فرموله کردن حل اجزای محدود استفاده می شود اما این

روش به اندازه روش تغییر و روش گالرکین مورد استفاده قرار نمی گیرد.

روش اجزای محدود (FEM)

□ روش اجزای محدود یک دستورالعمل عددی جهت حل مسائل فیزیکی می باشد که توسط معادله دیفرانسیل توصیف می شوند.

□ این روش دارای دو ویژگی است که آن را از سایر روش های عددی متمایز می سازد:

□ ۱- در این روش، از یک فرمول بندی انتگرالی جهت ایجاد یک دستگاه معادلات جبری استفاده می شود.

□ ۲- در این روش، از توابع هموار به طور قطعه ای پیوسته جهت تقریب کمیت های مجهول استفاده می شود.

□ مشخصه دوم، روش اجزای محدود را از سایر روش های عددی که فرمول بندی انتگرالی دارند، متمایز می کند.

روش اجزای محدود (FEM)

□ روش اجزای محدود را می توان به پنج مرحله اصلی تقسیم کرد:

□ ۱- تقسیم ناحیه مورد بحث به تعداد زیادی زیرناحیه کوچک موسوم به المان (Element).

نقاط اتصال المان ها به یکدیگر گره (Node) نامیده می شود.

□ ۲- تعیین تقریب اولیه برای حل به صورت یک تابع با ضرایب ثابت مجهول که همواره یا خطی

(Linear) است و یا مرتبه دوم (درجه دوم) (Quadratic). پس از تعیین شدن مرتبه تقریب

اولیه، معادله حاکم در هر گره نوشته می شود.

روش اجزای محدود (FEM)

□ ۳- استخراج دستگاه معادلات جبری. در صورت استفاده از روش گالرکین، تابع وزنی برای هر

گره مشخص می‌شود و سپس انتگرال باقیمانده وزنی تشکیل می‌گردد. با انتگرال‌گیری، برای

هر گره یک معادله جبری ایجاد می‌گردد که پس از استخراج معادلات همه گره‌ها، دستگاه

معادلات به وجود می‌آید.

□ ۴- حل دستگاه معادلات ایجادشده.

□ ۵- محاسبه سایر کمیت‌ها از روی مقادیر گرهی.

روش اجزای محدود (FEM)

- در مرحله اول همانگونه که اشاره گردید، هندسه مسئله به نواحی کوچکی موسوم به المان تقسیم می گردد.
- نقاط اشتراک المان ها، **گره ها** می باشند. به مجموعه یک المان با گره های یک **مش** (Mesh) گفته می شود.
- المان ها می توانند یک، دو و یا سه بعدی باشند. همچنین بسته به بعد المان، اشکال مختلف برای یک المان قابل تصور است.
- یک المان دوبعدی می تواند به شکل **مثلث**، مربع و یا هر شکل دلخواه دیگری باشد.
- از طرفی، یک المان سه بعدی نیز می تواند اشکالی مانند چهاروجهی، هرم، منشور و یا مکعب داشته باشد.
- **مش بندی** هندسه مسئله از مراحل مهم مدل سازی می باشد که مستلزم دقت و مهارت مناسب می باشد.

روش اجزای محدود (FEM)

□ در مرحله دوم، در واقع تقریب اولیه برای جواب مسئله به صورت یک تابع با ضرایب ثابت مجهول در نظر گرفته می شود.

□ این تقریب در محدوده یک المان زده می شود و برای کل شکل مسئله انجام نمی گیرد. به عنوان مثال، $u = C_1X + C_2$ یک تقریب خطی برای توزیع جابجایی در یک المان یک بعدی است.

□ در خصوص مسائلی که توسط نرم افزار حل می شوند، از آنجایی که می توان ابعاد المان ها را بسیار

ریز انتخاب کرد، هیچ گاه تقریبی با درجه بیشتر از دو زده نمی شود. به عبارت دیگر، تقریب

اولیه برای جواب همواره در نرم افزارها یا خطی است و یا سهموی.

روش اجزای محدود (FEM)

- در مرحله بعد (مرحله سوم)، معادله حاکم برای تک تک گره‌ها نوشته می‌شود و پس از انتگرال گیری‌های لازم، به فرم یک معادله جبری تبدیل می‌گردد.
- برای روشن تر شدن موضوع، به معرفی مفهوم تابع شکلی (شکل) (Shape Function) می‌پردازیم.
- همانگونه که ذکر شد، در یک تحلیل اجزای محدود ابتدا مقادیر گرهی کمیت موردنظر محاسبه می‌گردند. سپس با میان‌یابی در هر نقطه دلخواه می‌توان مقدار کمیت مجهول را به دست آورد.
- بنابراین، می‌بایست مرتبه میان‌یابی معلوم باشد که همانگونه که در مرحله قبل اشاره گردید، یا خطی و یا مرتبه دو است.
- المان خطی یک‌بعدی را در نظر می‌گیریم. اگر φ کمیت مجهول باشد که معادله حاکم بر حسب آن است، در این المان حل تقریبی و یا همان تابع میان‌یابی عبارت است از:

روش اجزای محدود (FEM)

$$\varphi = a_1 + a_2 X$$

□ که در آن a_1 و a_2 مجهول می‌باشند. در صورتی که این المان بین دو گره i و j با موقعیت‌های X_i و X_j واقع شده باشد و مقادیر گرهی φ_i و φ_j باشند، دو ضریب مجهول a_1 و a_2 قابل محاسبه‌اند.

$$\varphi_i = a_1 + a_2 X_i$$

$$\varphi_j = a_1 + a_2 X_j$$

□ که در نتیجه خواهیم داشت:

$$a_1 = \frac{\varphi_i X_j - \varphi_j X_i}{X_j - X_i}$$

$$a_2 = \frac{\varphi_j - \varphi_i}{X_j - X_i}$$

روش اجزای محدود (FEM)

□ حال اگر مقادیر a_1 و a_2 را در رابطه اولیه قرار دهیم، خواهیم داشت:

$$\varphi = \left(\frac{X_j - x}{L} \right) \varphi_i + \left(\frac{X_i - x}{L} \right) \varphi_j$$

□ که در آن L طول المان است.

□ رابطه به دست آمده فوق، رابطه‌ای استاندارد برای میان‌یابی است زیرا ترکیب خطی مقادیر گرهی است که ضرایب آن‌ها نیز توابع خطی از x می‌باشند.

□ این توابع خطی را با حرف N نمایش می‌دهند و آن‌ها را **توابع شکلی** می‌نامند.

□ در واقع، هر گره تابع شکلی مخصوص به خود را دارد که بیانگر سهم مقدار گرهی آن گره در میان‌یابی می‌باشد.

□ بنابراین توابع شکلی به صورت زیر می‌باشند:

روش اجزای محدود (FEM)

$$N_i = \frac{X_j - x}{L}$$

$$N_j = \frac{X_i - x}{L}$$

□ و رابطه میان‌یابی را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

$$\varphi = N_i \varphi_i + N_j \varphi_j$$

□ چند نکته در خصوص توابع شکلی قابل ذکر است:

□ هر تابع شکلی در محل گره خود دارای مقدار یک و در محل گره دیگر دارای مقدار صفر است.

□ مجموع توابع شکلی در یک نقطه همواره برابر یک است.

□ همواره مرتبه توابع شکلی و میان‌یابی یکسان است.

□ به عنوان مثال، اگر حل تقریبی یا همان میان‌یابی تابعی خطی باشد، توابع شکلی گره‌ها نیز

توابعی خطی خواهند بود.

روش اجزای محدود (FEM)

□ از دیگر ویژگی‌های توابع شکلی این است که مجموع مشتقات آن‌ها نسبت به یک متغیر (مانند x) برابر صفر است.

□ حال بهتر می‌توان روش گالرکین را مورد بررسی قرار داد. همانگونه که گفته شد، ابتدا یک تخمین (به طور مثال $u = C_1X + C_2$ در خصوص توزیع تغییر مکان در المان یک‌بعدی) برای معادله حاکم زده می‌شود.

□ سپس، با انتخاب تابع وزنی مناسب و به تعداد مجهولات موجود در تخمین اولیه، انتگرال حاصل ضرب تابع وزنی و باقیمانده محاسبه می‌گردد که عبارتی بر حسب ضرایب نامعلوم تابع تقریب خواهد بود.

□ در روش گالرکین، توابع وزنی همان توابع شکلی می‌باشند.

□ به طور مثال، در یک المان خطی انتگرال حاصل ضرب هر یک از توابع شکلی در باقیمانده محاسبه می‌گردد و در نهایت دو معادله با مجهولات φ_i و φ_j به دست می‌آید.

روش اجزای محدود (FEM)

□ قبلاً اشاره گردید که ضرایب a_1 و a_2 برحسب مقادیر گرهی نوشته می‌شوند.

□ به عبارت دیگر، به ازای هر گره یک معادله به دست می‌آید. به دلیل آنکه هر معادله شامل

بیش از یک مجهول است، به تنهایی قابل حل نخواهد بود و می‌بایست ابتدا به تعداد گره‌ها،

معادله استخراج شود تا آنگاه تمامی معادلات به صورت یکجا حل گردند.

□ پس از استخراج معادلات نوبت به حل آن‌ها می‌رسد (مرحله چهارم) که روش‌های متنوعی

برای حل موجود است. سپس، در مرحله بعد و پس از مشخص شدن مقادیر گرهی، با توجه به

ابعاد اولیه و خواص هندسی ماده تعریف‌شده، سایر کمیت‌ها نظیر کرنش، تنش، نیرو و گشتاور

محاسبه می‌گردند (مرحله پنجم).

روش اجزای محدود (FEM)

□ روش‌های کلاسیک حل مسائل مقدار مرزی:

□ مطلوب‌ترین روش حل برای مسائل **مقدار مرزی**، روش حل تحلیلی است اما در بسیاری از

کاربردها مسئله بسیار پیچیده می‌باشد و امکان حل تحلیلی آن وجود ندارد. از این‌رو، برای حل

این مسئله می‌توان از روش‌های حل تقریبی استفاده نمود. در بین این روش‌ها، دو روش **ریتز** و

گالرکین بیشتر از سایر روش‌ها مورد توجه قرار دارند.

□ دو روش کلاسیک حل مسائل **مقدار مرزی** عبارتند از روش **تغییراتی ریتز** و روش **گالرکین** که

این دو روش در واقع مبنای روش اجزای محدود مدرن هستند. روش **گالرکین** قبلاً معرفی شد.

در اینجا به معرفی روش **تغییراتی ریتز** می‌پردازیم.

روش اجزای محدود (FEM)

روش ریتز □

Walther Heinrich Wilhelm Ritz

(22 February 1878 – 7 July 1909) was a Swiss theoretical physicist.

Alma mater University of Göttingen

Known for Ritz method
Ritz ballistic theory
Ritz-Galerkin method
Rydberg–Ritz combination principle
Rayleigh–Ritz method

Awards Leconte Prize (1909)

Scientific career

Fields Physics

Walther Ritz



Born 22 February 1878
Sion, Switzerland

Died 7 July 1909 (aged 31)
Göttingen

روش اجزای محدود (FEM)

□ روش ریتز:

□ روش ریتز که به نام **روش رایلی-ریتز** (Rayleigh-Ritz) نیز شناخته می‌شود، یک روش

تغییراتی است که در آن مسئله مقدار مرزی را به فرم یک عبارت تغییراتی که **functional**

نامیده می‌شود، فرمول‌بندی می‌کند.

□ جواب مسئله تحت شرایط مرزی تعیین شده، در واقع می‌نیمم مقدار این **functional** است.

□ بنابراین، حل تقریبی از طریق می‌نیمم کردن **functional** نسبت به متغیرهایی که یک

تقریب خاص از جواب را نشان می‌دهند حاصل می‌شود.

روش اجزای محدود (FEM)

- ❑ پیچیدگی هندسی، رفتار پیچیده ماده و شرایط مرزی موجود در مسائل واقعی، رسیدن به حل دقیق را با دشواری روبرو ساخته است.
- ❑ استفاده از حل‌های تقریبی قابل قبول که در زمان محدود به دست می‌آیند اجتناب‌ناپذیر است؛
روش اجزای محدود یکی از این انتخاب‌ها است.
- ❑ روش اجزای محدود یک روش عددی برای رسیدن به حل تقریبی در بسیاری از مسائل فیزیکی و مهندسی است که رفتار حاکم بر آن‌ها توسط **یک معادله دیفرانسیل** و یا **یک دستگاه معادله دیفرانسیل** بیان می‌شود.
- ❑ در این روش از **توابع پیوسته چندتکه‌ای و هموار** برای تقریب کمیت مجهول موردنظر سود برده می‌شود.

روش اجزای محدود (FEM)

□ هدف اصلی در روش اجزای محدود، یافتن حل یک مسئله پیچیده از طریق جایگزینی آن با

یک مدل ساده‌تر است.

□ در روش اجزای محدود، ناحیه حل به صورت مجموعه‌ای از زیرناحیه‌های کوچک متصل به هم،

به نام **المان و یا اجزای محدود** در نظر گرفته می‌شود.

□ در ادامه برای هر قطعه یا المان یک حل تقریبی مناسب فرض می‌شود. با سوار نمودن

(Assembling) این اجزا و غیره شرایط تعادل کلی سیستم (مانند سازه) استخراج می‌شود.

□ با ارضای این شرایط جواب تقریبی برای کمیت موردنظر (تغییر مکان‌ها) به دست می‌آید.

روش اجزای محدود (FEM)

□ روش‌های گسسته‌سازی جهت شبیه‌سازی عددی:

□ روش اجزای محدود (FEM) Finite Element Method

□ روش تفاضل محدود (FDM) Finite Difference Method

□ روش اجزای مرزی (BEM) Boundary Element Method

□ روش حجم محدود (FVM) Finite Volume Method

□ روش بدون المان Mesh Free Method

□ روش طیفی Spectral Method

روش اجزای محدود (FEM)

□ توصیف عمومی روش اجزای محدود:

□ مرحله ۱: گسسته سازی یا مجزاسازی سازه

□ در این مرحله سازه مکانیکی یا ناحیه حل موردنظر به بخش‌های کوچک‌تر (المان) تقسیم

می‌شود. نقاط مشترک در مرز المان به نام گره شناخته می‌شوند. در مورد نوع، تعداد و ترتیب

المان باید تصمیم‌گیری نمود.

□ مرحله ۲: ارائه رفتار فیزیکی حاکم بر المان به صورت کمی

□ در این مرحله لازم است رفتار فیزیکی حاکم بر المان‌های سازه مکانیکی به صورت یک (و یا

چند) معادله بیان شود.

روش اجزای محدود (FEM)

□ توصیف عمومی روش اجزای محدود:

□ مرحله ۳: انتخاب یک مدل درونیاب یا مدل جابجایی مناسب

□ از آنجایی که تغییرات واقعی متغیر میدان (مانند جابجایی، تنش، دما، فشار یا سرعت) در داخل

این محیط پیوسته مجهول است، تغییرات متغیر میدان در داخل یک المان محدود به وسیله

یک تابع ساده تقریب زده می‌شوند و برحسب مقادیر متغیرهای میدان در گره‌ها بیان

می‌شوند.

□ معمولاً مدل درونیاب (تابع تقریب، توابع شکل) را به شکل چند جمله‌ای در نظر می‌گیرند.

روش اجزای محدود (FEM)

□ توصیف عمومی روش اجزای محدود:

□ مرحله ۴: به دست آوردن ماتریس سختی و بردارهای نیروی المان

□ هنگامی که معادلات میدان (مانند معادلات تعادل) برای یک المان نوشته شدند، مجهولات مسئله، متغیر میدان در گره‌ها خواهند بود. در این مرحله ماتریس سختی و بردار نیروی المان محاسبه می‌شود.

□ مرحله ۵: سوار (جمع) کردن معادلات المان‌ها برای به دست آوردن معادلات کلی

تعادل

□ از آنجایی که سازه از چندین المان تشکیل شده است، ماتریس سختی و بردارهای نیروی المان‌های منفرد با یک روش مناسب با یکدیگر جمع می‌شوند.

روش اجزای محدود (FEM)

□ توصیف عمومی روش اجزای محدود:

□ مرحله ۶: به دست آوردن متغیرهای میدان (جابجایی‌ها) در گره‌ها

□ معادلات کلی میدان (مانند معادلات تعادل) باید برای شرایط مرزی اصلاح شوند و پس از آن با استفاده از یک روش عددی مناسب مقادیر متغیرهای میدان استخراج شوند.

□ مرحله ۷: محاسبه متغیرهای وابسته (نظیر تنش‌ها و کرنش‌های المان)

□ در صورت نیاز با استفاده از متغیرهای میدان (نظیر جابجایی‌ها) می‌توان متغیرهای وابسته (نظیر تنش‌ها و کرنش‌های المان) را با استفاده از معادلات موردلزم حاکم بر مسئله (نظیر معادلات مکانیک جامدات) محاسبه نمود.

روش اجزای محدود (FEM)

❑ پیاده‌سازی روش اجزای محدود:

❑ مرحله ۱: پیش‌پردازش

❑ در این مرحله مدل هندسی و مدل شبکه‌بندی شده (مش‌بندی شده) مسئله ساخته می‌شود.

سپس بارگذاری و شرایط مرزی به مدل اعمال می‌گردد.

❑ مرحله ۲: حل مدل اجزای محدود

❑ سوار کردن معادلات سیستم و حل معادلات کلی در این مرحله انجام می‌پذیرد.

❑ مرحله ۳: پس‌پردازش

❑ آماده نمودن و نمایش نتایج

روش اجزای محدود (FEM)

□ کاربرد روش اجزای محدود:

❖ Static analysis

- Deflection خمش
- Stresses
- Strains
- Forces
- Energies

❖ Heat transfer analysis

- Temperature
- Heat fluxes
- Thermal gradients
- Heat flow from Convection faces

همرفت

❖ Dynamic analysis

- Frequencies
- Deflection (mode shape)
- Stresses
- Strains
- Forces
- Energies

❖ Fluid analysis

- Pressures
- Gas temperatures
- Convection coefficients
- Velocities

روش اجزای محدود (FEM)

□ کاربرد روش اجزای محدود:

❖ Automotive industry

- Static analyses
- Modal analyses
- Transient dynamics
- Heat transfer
- Mechanisms
- Fracture mechanics
- Metal forming
- Crashworthiness

قابلیت ضربه‌پذیری خودرو در محافظت از سرنشینان خود

❖ Architectural

- Soil mechanics
- Rock mechanics
- Hydraulics
- Fracture mechanics

❖ Aerospace industry

- Static analyses
- Modal analyses
- Aerodynamics
- Transient dynamics
- Heat transfer
- Fracture mechanics
- Creep and plasticity analyses
- Composite materials
- Aeroelasticity
- Metal forming
- Crashworthiness

خزش: creep

روش اجزای محدود (FEM)

<https://www.comsol.com/>



COMSOL

REQUEST A LIVE DEMO

CONTACT

NORTH AMERICA

LOG IN



PRODUCTS

VIDEO GALLERY

WEBINARS

BLOG

SUPPORT

Now available: COMSOL Multiphysics® and
COMSOL Server™ Version 5.3a

View the 5.3a Release Highlights

COMSOL NEWS
2018



BLOG: How to Solve a Classic CFD Benchmark: The
Lid-Driven Cavity Problem

روش اجزای محدود (FEM)

<https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>



abacus /'æbəkəs/



روش اجزای محدود (FEM)

<https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>



What's New in Abaqus 2018

Product simulation is often performed today by engineering groups using niche simulation tools from different vendors to simulate various design attributes. The use of multiple vendor software products creates inefficiencies and increases costs. SIMULIA delivers a scalable suite of unified analysis products that allow all users, regardless of their simulation expertise or domain focus, to collaborate and seamlessly share simulation data and approved methods without loss of information fidelity.

The Abaqus Unified FEA product suite offers powerful and complete solutions for both routine and sophisticated engineering problems covering a vast spectrum of industrial applications. For example, in the automotive industry engineering work groups can consider full vehicle loads, dynamic vibration, multibody systems, impact/crash, nonlinear static, thermal coupling, and acoustic-structural coupling using a common model data structure and integrated solver technology. Best-in-class companies are taking advantage of Abaqus Unified FEA to consolidate their processes and tools, reduce costs and inefficiencies, and gain a competitive advantage.

روش اجزای محدود (FEM)

□ ABAQUS یک مجموعه از برنامه‌های مدل‌سازی بسیار توانمند مبتنی بر روش اجزای محدود می‌باشد که قابلیت حل مسائل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده‌ترین مدل‌سازی‌های غیرخطی را دارا می‌باشد.

□ این نرم‌افزار دارای مجموعه المان‌های (Element Library) بسیار گسترده‌ای می‌باشد که هر نوع هندسه‌ای را می‌توان به صورت مجازی توسط این المان‌ها مدل کرد.

□ همچنین، دارای مدل‌های مواد مهندسی بسیار زیادی است که در مدل‌سازی انواع مواد با خواص و رفتار گوناگون نظیر فلزات، لاستیک‌ها، پلیمرها، کامپوزیت‌ها، بتن تقویت‌شده، فوم‌های فوری و نیز شکننده و همچنین مواد موجود در زمین نظیر خاک و سنگ، قابلیت بالایی را ممکن می‌سازد.



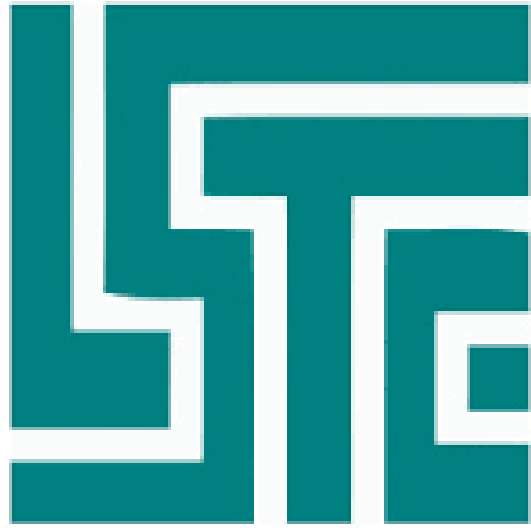
روش اجزای محدود (FEM)

- نظر به اینکه ABAQUS یک ابزار عمومی و گسترده می باشد، استفاده از آن تنها محدود به تحلیل های مکانیک جامدات و سازه (تنش-تغییر مکان) نمی شود.
- با استفاده از این نرم افزار می توان مسائل مختلفی نظیر انتقال حرارت، نفوذ جرم، تحلیل حرارتی اجزای الکتریکی، اکوستیک، مکانیک خاک و پیزوالکتریک (Piezoelectric) را مورد مطالعه قرار داد.
- استفاده از نرم افزار ABAQUS با وجود اینکه مجموعه قابلیت های بسیار گسترده ای را در اختیار کاربر قرار می دهد، کار نسبتاً ساده ای می باشد.
- پیچیده ترین مسائل را می توان به آسانی مدل کرد. به عنوان مثال، مسائل شامل بیش از یک جزء را می توان با ایجاد مدل هندسی هر جزء و سپس نسبت دادن رفتار ماده مربوطه به هر جزء و سپس مونتاژ اجزای مختلف مدل کرد.

روش اجزای محدود (FEM)

□ در اغلب مدل‌سازی‌ها، حتی مدل‌های با درجه غیرخطی بالا، کاربر می‌بایست تنها داده‌های مهندسی نظیر هندسه مسئله، رفتار ماده مربوط به آن، شرایط مرزی و بارگذاری آن مسئله را تعیین کند.

□ در یک تحلیل غیرخطی، ABAQUS به‌طور اتوماتیک میزان نمو بار (Load Increment) و تیرانس‌های همگرایی را انتخاب و همچنین در طول تحلیل مقادیر آن‌ها را جهت دستیابی به یک جواب صحیح تعدیل می‌کند. در نتیجه کاربر به ندرت می‌بایست مقادیر پارامترهای کنترلی حل عددی مسئله را تعیین کند.



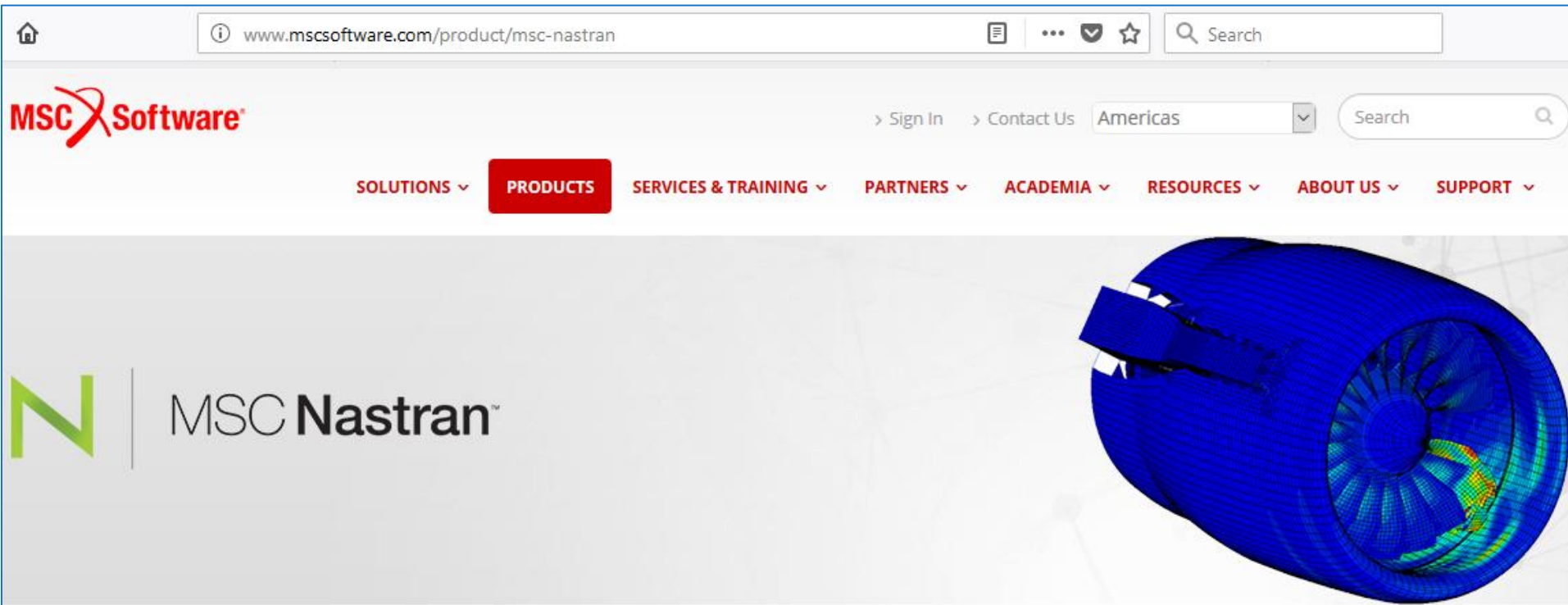
LS Dyna

<http://www.lstc.com/products/ls-dyna>

LS-DYNA is a general-purpose finite element program capable of simulating complex real world problems. It is used by the automobile, aerospace, construction, military, manufacturing, and bioengineering industries. LS-DYNA is optimized for shared and distributed memory **Unix, Linux, and Windows based, platforms**, and it is fully QA'd by LSTC. The code's origins lie in highly nonlinear, transient dynamic finite element analysis using explicit time integration.

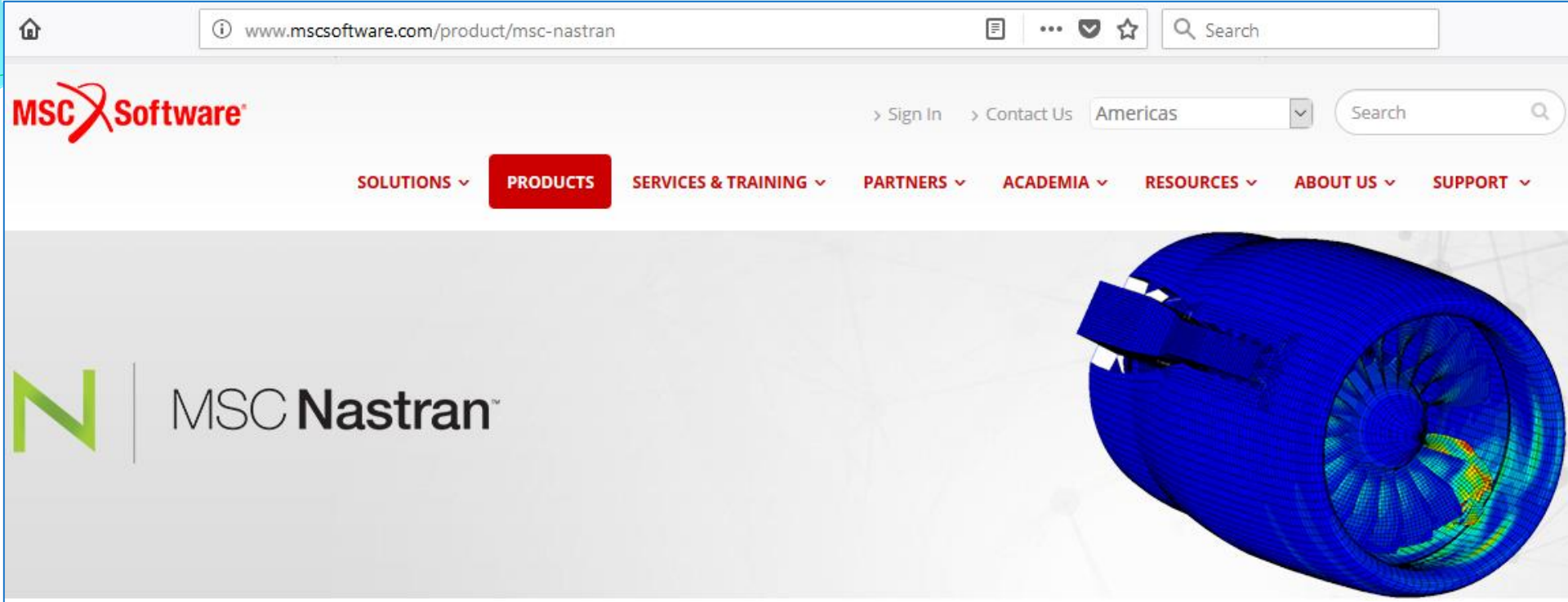
روش اجزای محدود (FEM)

<http://www.mscsoftware.com/product/msc-nastran>



❑ **NASTRAN** is a finite element analysis (FEA) program that was originally developed for NASA in the late 1960s under United States government funding for the aerospace industry.

روش اجزای محدود (FEM)



- ❑ The eventual formal name approved by NASA for the program, NASTRAN, is an acronym formed from NASA STRucture ANalysis. The NASTRAN system was released to NASA in 1968.

روش اجزای محدود (FEM)

<https://caeai.com/ansys-software-support/ansys-software/mechanical-simulation-software>



Careers Academic Customer Portal Resource Library



Follow 5.8k

Products

Solutions

Services

Support

About ANSYS

search

Structural analysis for every application
and experience level

WATCH VIDEO



CONTACT

The goal of this book is to provide students with a theoretical and practical knowledge of the **finite element method** and the skills required to analyze engineering problems with **ANSYS®**, a commercially available FEA program.

روش اجزای محدود (FEM)



[Careers](#) [Academic](#) [Customer Portal](#) [Resource Library](#)



[G+](#) [Follow](#) 5.8k

[Products](#)

[Solutions](#)

[Services](#)

[Support](#)

[About ANSYS](#)

Structural analysis for every application
and experience level

[WATCH VIDEO](#)



CONTACT

ANSYS structural analysis software enables you to solve complex structural engineering problems and make better, faster design decisions. With **the finite element analysis (FEA)** tools available in the suite, you can customize and automate solutions for your structural mechanics problems and parameterize them to analyze multiple design scenarios. You can connect easily to other physics analysis tools for even greater fidelity. ANSYS structural analysis software is used throughout the industry to **enable engineers to optimize their product designs and reduce the costs of physical testing.**

روش اجزای محدود (FEM)

<https://www.ansys.com/en-gb/products/electronics/ansys-maxwell>



[Careers](#) [Academic](#) [Customer Portal](#) [Resource Library](#)



[Follow](#) 5.8k

[Products](#)

[Solutions](#)

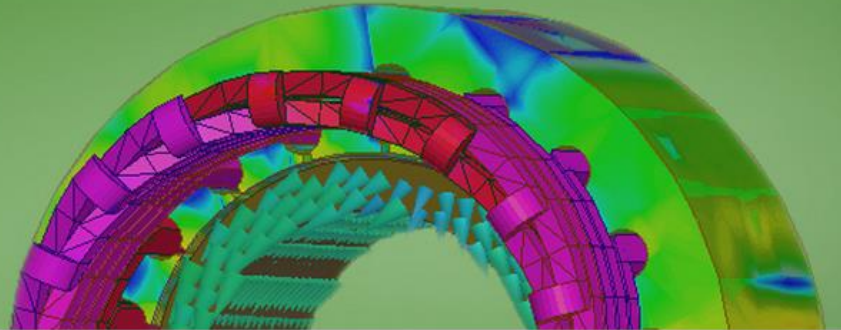
[Services](#)

[Support](#)

[About ANSYS](#)

search

Maxwell



CONTACT

[HOME](#) / [PRODUCTS](#) / [ELECTROMAGNETICS](#) / [ANSYS MAXWELL](#)

ANSYS Maxwell

[ARTICLES](#)

روش اجزای محدود (FEM)

<https://www.plaxis.com/>

PLAXIS

INDUSTRIES

SOFTWARE

SERVICES

COMPANY

SUPPORT

CONTACT

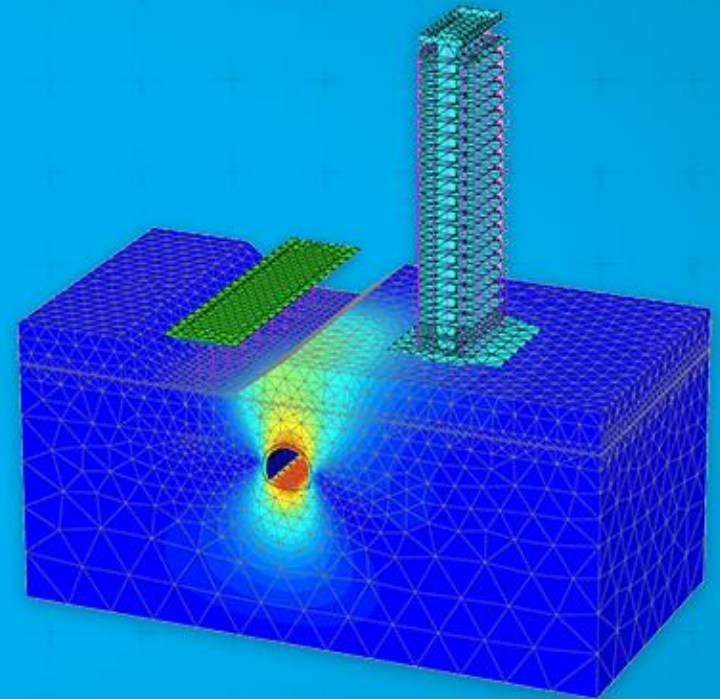


Modelling complex geo-engineering projects made easy

Enhance your workflow with PLAXIS

LEARN MORE ▾

TRY DEMO →



روش اجزای محدود (FEM)

<http://wildeanalysis.co.uk/software/design-simulation/plaxis/>

□ **PLAXIS** is the leading geotechnical finite element software developed specifically for deformation analysis of soils and rock. Renowned for ease of use and accuracy, it will help you optimize your designs more effectively than applying traditional conservative calculation methods.

روش اجزای محدود (FEM)

DIANA FEA



Original author(s)	TNO
Developer(s)	DIANA FEA BV
Initial release	1972; 46 years ago
Stable release	10.1
Development status	Actively developed
Operating system	Microsoft Windows Linux
Platform	Windows/x86-64 Linux x86-64
Type	Computer-aided engineering, Finite Element Analysis
License	Proprietary commercial software
Website	dianafea.com

<https://dianafea.com/>



روش اجزای محدود (FEM)

<https://dianafea.com/>

- ❑ **DIANA** (acronym **DI**splacement **ANA**lyser) is a **Finite Element Analysis (FEA)** solver developed and distributed by DIANA FEA BV (previously TNO DIANA BV) and several other resellers worldwide. The software is utilised at both ends of the market, by small consultancies and global engineering consultants, research institutions and is utilised by many highly respected educational institutions worldwide in both **civil and geotechnical engineering courses**. DIANA is equipped with very powerful solvers which enables the analysis of a wide range of structures, large and small - with basic or advanced analyses. A large selection of material models, element libraries and analysis procedures are available within the package which gives DIANA a large degree of flexibility.
- ❑ The main fields of use of DIANA include **design and analysis of dams & dikes; tunnels & underground structures; oil & gas**[1] & historical constructions and large reinforced concrete structures.[2] Some of the specialised analyses available in DIANA for these fields of use include seismic analysis;[3] fire analysis and young hardening concrete.[4]

ASKA (Abkürzung für: **A**utomatic **S**ystem for **K**inematic **A**nalysis)

- ❑ The program system ASKA (abbreviation for: Automatic System for Kinematic Analysis) was one of the first universally applicable computer programs for calculations according to the [finite element method](#).
- ❑ The development of ASKA began at the beginning of the 1960s at the Institute for Statics and Dynamics of Aerospace Constructions (ISD) at the [University of Stuttgart](#) under the direction of John Argyris.
- ❑ The first version, ASKA 105, was developed in assembly language Sleuth on a UNIVAC 1107. After the installation of another CDC 6600 supercomputer in 1968, a new version of ASKA was developed in the [Fortran programming language](#). In the years between 1970 and 1983 ASKA was ported to other computer systems, z. Univac 11/80 IBM 360/370, Amdahl, Cray, Prime and VAX.
- ❑ The first applications with ASKA came from the field of [aerospace engineering](#).
- ❑ A non-linear application was the [calculation of the roof structure of the Olympic Stadium in Munich by Frei Otto](#).

روش اجزای محدود (FEM)

<http://www.adina.com/>



Google Custom Search



Home

Company

Products

Gallery

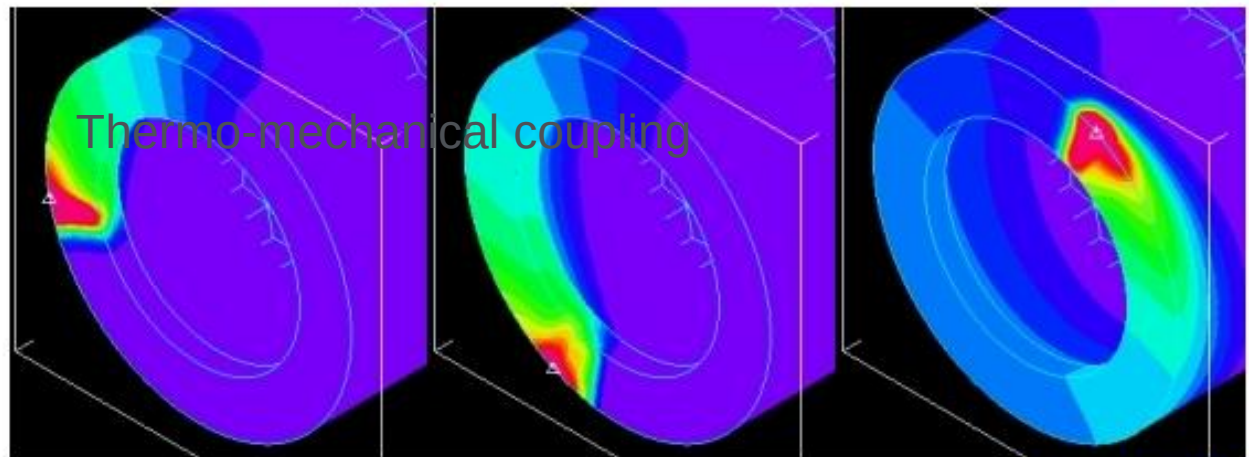
Support

Training

Academic

Contact Us

AUTOMATIC
DYNAMIC
INCREMENTAL
NONLINEAR
ANALYSIS



[back](#) [stop](#) [next](#)

electromagnetic effects (EM) **Over 200 applications here!**

[Fluid Structure Interaction \(FSI\)](#)

[Thermo-mechanical coupling \(TMC\)](#)

**The Comprehensive Finite Element System for
Structures • Thermal • CFD • EM • FSI • TMC • Multiphysics**

روش اجزای محدود (FEM)

<http://www.adina.com/>

ADINA 9.4.0 has been released

ADINA R&D, Inc. was founded in 1986 by Dr. K.J. Bathe, a teacher and researcher, and associates. The exclusive mission of the company is the development of the ADINA System for linear and nonlinear finite element analysis of solids and structures, heat transfer, CFD and electromagnetics (EM). ADINA also offers a comprehensive array of multiphysics capabilities including fluid-structure interaction (FSI) and thermo-mechanical coupling (TMC). Some of the nonlinear structural analysis capabilities of ADINA are offered as Solution 601/701 of NX Nastran by Siemens PLM Software.

ADINA offers a wide range of capabilities based on reliable and efficient finite element procedures. For this reason, ADINA is often selected for applications where reliability is of critical importance, e.g., dynamic analysis of bridges for earthquake, biomedical applications, design of nuclear reactors, studies for safety and many more!

روش اجزای محدود (FEM)

<https://nisasoftware.com/>



HOME

SOFTWARE >

SERVICES >

INDUSTRIES >

COMPANY >

LOGIN >



NISA Software

A trusted FEA tool with flexible purchase options.

Learn More +

Latest News

- PreSys for NISA 2017 R1
- NISA V19 Released
- Geomagic/Alibre
- Integration with VPG

Case Studies

View an array of industry related NISA Case Studies

Case Studies +

NISA Support

Find out more about NISA support or request support.

Support +

روش اجزای محدود (FEM)

<https://nisasoftware.com/>

NISA is one of the most comprehensive engineering analysis suites available to address the Automotive, Aerospace, Energy & Power, Civil, Electronics and Sporting Goods industries. NISA has been an engineer's favorite for more than 35 years.

NISA features a completely integrated pre/post- processing environment within a state-of-the-art GUI, seamless interoperability with leading commercial CAD software, excellent technical support and flexible purchase options.

روش اجزای محدود (FEM)

<http://www.lusas.com/>

Engineering analysis and design software

Any structure. One solution.



NEW SOFTWARE RELEASE

LUSAS Version 16

simplify | collaborate | design

< click to visit the Version 16 microsite >

LUSAS version 16 now released : visit the version 16 microsite at www.lusas16.com

COSMOS/M

- ❑ **COSMOS/M** is a complete, modular, self-contained **finite element system** developed by Structural Research and Analysis Corporation (SRAC) for personal computers and workstations.
- ❑ The program includes modules **to solve linear and nonlinear static and dynamic structural problems**, in addition to problems of heat transfer, fluid mechanics, electromagnetics and optimization. Modules for such special analysis options as **fatigue** are also available.
- ❑ The system is constantly developed and maintained by using state-of-the-art techniques and up-to-date hardware capabilities. This chapter introduces the COSMOS/M product line and outlines the features of its various modules.

روش اجزای محدود (FEM)

<http://www.mscsoftware.com/product/patran>



> Sign In

> Contact Us

Americas

Search



SOLUTIONS ▾

PRODUCTS

SERVICES & TRAINING ▾

PARTNERS ▾

ACADEMIA ▾

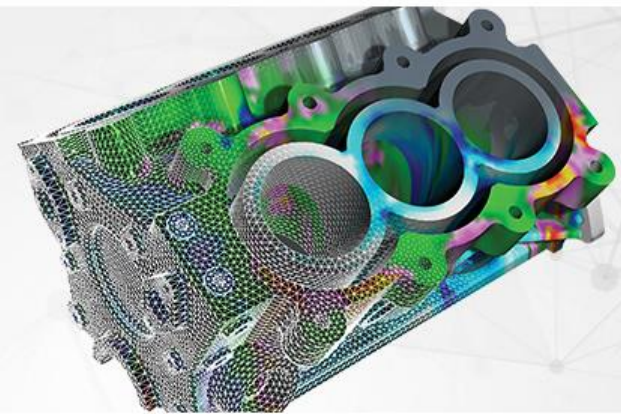
RESOURCES ▾

ABOUT US ▾

SUPPORT ▾



Patran®



Patran

Complete FEA Modeling Solution

Request a Quote

Request More Info

Watch a Webinar

روش اجزای محدود (FEM)

<http://www.mscsoftware.com/product/patran>

Patran Complete FEA Modeling Solution:

- ❑ **Patran** is the world's most widely used **pre/post-processing software** for **Finite Element Analysis (FEA)**, providing solid modeling, meshing, analysis setup and post-processing for multiple solvers including **MSC Nastran**, **Marc**, **Abaqus**, **LS-DYNA**, **ANSYS**, and **Pam-Crash**.
- ❑ Patran provides a rich set of tools that streamline the creation of analysis ready models for linear, nonlinear, explicit dynamics, thermal, and other finite element solutions. From geometry cleanup tools that make it easy for engineers to deal with gaps and slivers in CAD, to solid modeling tools that enable creation of models from scratch, Patran makes it easy for anyone to create FE models. Meshes are easily created on surfaces and solids alike using fully automated meshing routines, manual methods that provide more control, or combinations of both. Finally, loads, boundary conditions, and analysis setup for most popular FE solvers is built in, minimizing the need to edit input decks.
- ❑ Patran's comprehensive and industry tested capabilities ensure that your virtual prototyping efforts provide results fast so that you can evaluate product performance against requirements and optimize your designs.

روش اجزای محدود (FEM)

<https://altairhyperworks.com/product/HyperMesh>

Altair | HyperWorks



US - English | Login

SEARCH

Products

Solutions

Industries

Resources

Support & Training

Academic

About

Altair **HyperMesh**

Overview & Capabilities

New Features



Brochures



Technical Papers



Case Studies



Multimedia



Training Videos



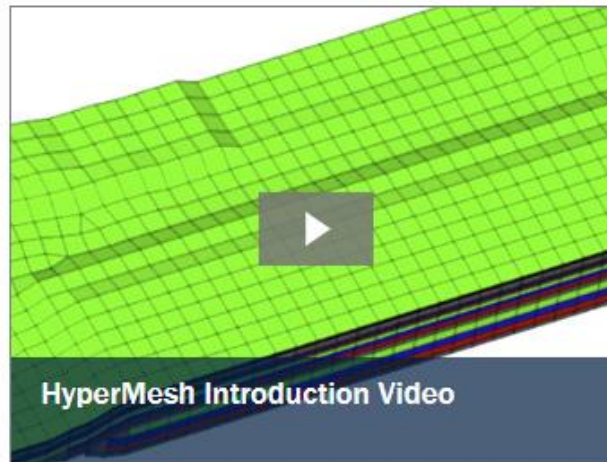
Request A Trial



Contact Us

HyperMesh Overview

HyperMesh is a market-leading, multi-disciplinary finite element pre-processor which manages the generation of the largest, most complex models, starting with the import of a CAD geometry to exporting ready-to-run solver file.



HyperMesh Introduction Video



Haier Redesigns Air Conditioners and Packaging with Altair HyperWorks

روش اجزای محدود (FEM)

- ❑ Over the last 20 years, **HyperMesh** has evolved into the leading premier **pre-processor** for concept and high fidelity modeling. The advanced geometry and meshing capabilities provide an environment for rapid model generation. The ability to generate high quality mesh quickly is one of HyperMesh's core competencies.
- ❑ Industry trends show a migration to modular sub-system design and continued exploration of new materials; HyperMesh has advanced model assembly tools capable of supporting complex sub-system generation and assembly, in addition, modeling of laminate composites is supported by advanced creation, editing and visualization tools. Design change is made possible via mesh morphing and geometry dimensioning. HyperMesh is a solver neutral environment that also has an extensive API which allows for advanced levels customization.
- ❑ HyperMesh is used by thousands of customers worldwide to generate and manage their models, it supports a wide variety of CAD and solver interfaces, making it a perfect solution for a majority of verticals and domains.

روش اجزای محدود (FEM)

ASAS—a general purpose finite element analysis system



Computer-Aided Design

Volume 8, Issue 1, January 1976, Pages 2-8



ASAS—a general purpose finite element analysis system

R.K. Henrywood, J.D. Sheffield

[Show more](#)

[https://doi.org/10.1016/0010-4485\(76\)90002-6](https://doi.org/10.1016/0010-4485(76)90002-6)

[Get rights and content](#)

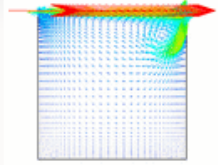
The ASAS finite element system, incorporating statics, dynamics, heat transfer and substructure analysis, is described, paying particular attention to the structure of the data required. The current range of elements is shown and examples from the available pre- and post-processing programs are listed. Details of some recent analyses are given, with computer plots of the idealizations used.

روش اجزای محدود (FEM)

<http://www.oofem.org/>

OOFEM.ORG

Object Oriented Finite Element Solver



- ❑ **OOFEM** is free finite element code with object oriented architecture for solving mechanical, transport and fluid mechanics problems that operates on various platforms.
- ❑ The aim of this project is to develop efficient and robust tool for FEM computations as well as to provide modular and extensible environment for future development. OOFEM is released under GNU Lesser General Public License (LGPL).
- ❑ The current version of OOFEM is **2.5** released Dec, 30, 2017

روش اجزای محدود (FEM)

<https://www.itascacg.com/software/flac>



FLAC[®] VERSION 8.0

Explicit Continuum Modeling of Non-linear Material Behavior in 2D

FLAC, Fast Lagrangian Analysis of Continua, is numerical modeling software for advanced geotechnical analysis of soil, rock, groundwater, and ground support in two dimensions. *FLAC* is used for analysis, testing, and design by geotechnical, civil, and mining engineers. It is designed to accommodate any kind of geotechnical engineering project that requires continuum analysis.



FLAC utilizes an explicit finite difference formulation that can model complex behaviors, such as problems that consist of several stages, large displacements and strains, non-linear material behavior, or unstable systems (even cases of yield/failure over large areas, or total collapse).

FLAC = Fast Lagrangian Analysis of Continua

روش اجزای محدود (FEM)

<https://cuylaerts.net/>

Analysis3D

Analysis3D Finite Element Analysis Software

[Download Free FEA Software for Structural and Civil Engineering and Design.](#)

Powerful Finite Element Analysis software for Structural Engineering of Steel construction of Frame and Truss Design. Small and easy to use FEA analysis, with a user friendly Windows interface to make your life easy. Engineering calculator with large library of commonly used sections included (AISC, British Steel, DIN, Euronorm). Truss calculator where **Structural Steel Design includes**: Plastic Design, Elastic Design and Eurocode 3.

Each cross-section is tested for:

- Plastic Tension or Compression
- Bending moment (major and minor axis)
- Plastic Shear resistance
- Torsion (Saint Venant and Warping torsion)
- Reduced plastic shear resistance for the case of combined Torsion and Shear.
- Reduced moment resistance for the case of combined Bending and Shear
- Reduced plastic moment resistance for the case of combined Bending and Axial force or bi-axial bending
- Compression buckling
- Lateral Torsional buckling
- Combined bending and axial compression (Chen and Atsuta)
- Maximum deflection



[Download Analysis3D v 2.05 \(620 kB\)](#)

The downloaded Zip-file contains several examples and a detailed help file to get you going quickly. After downloading Analysis, please create a new directory (e.g. "Analysis3D"), unzip the downloaded file (Analysis3D.zip) to the new directory and run the executable file (Analysis3D.exe).

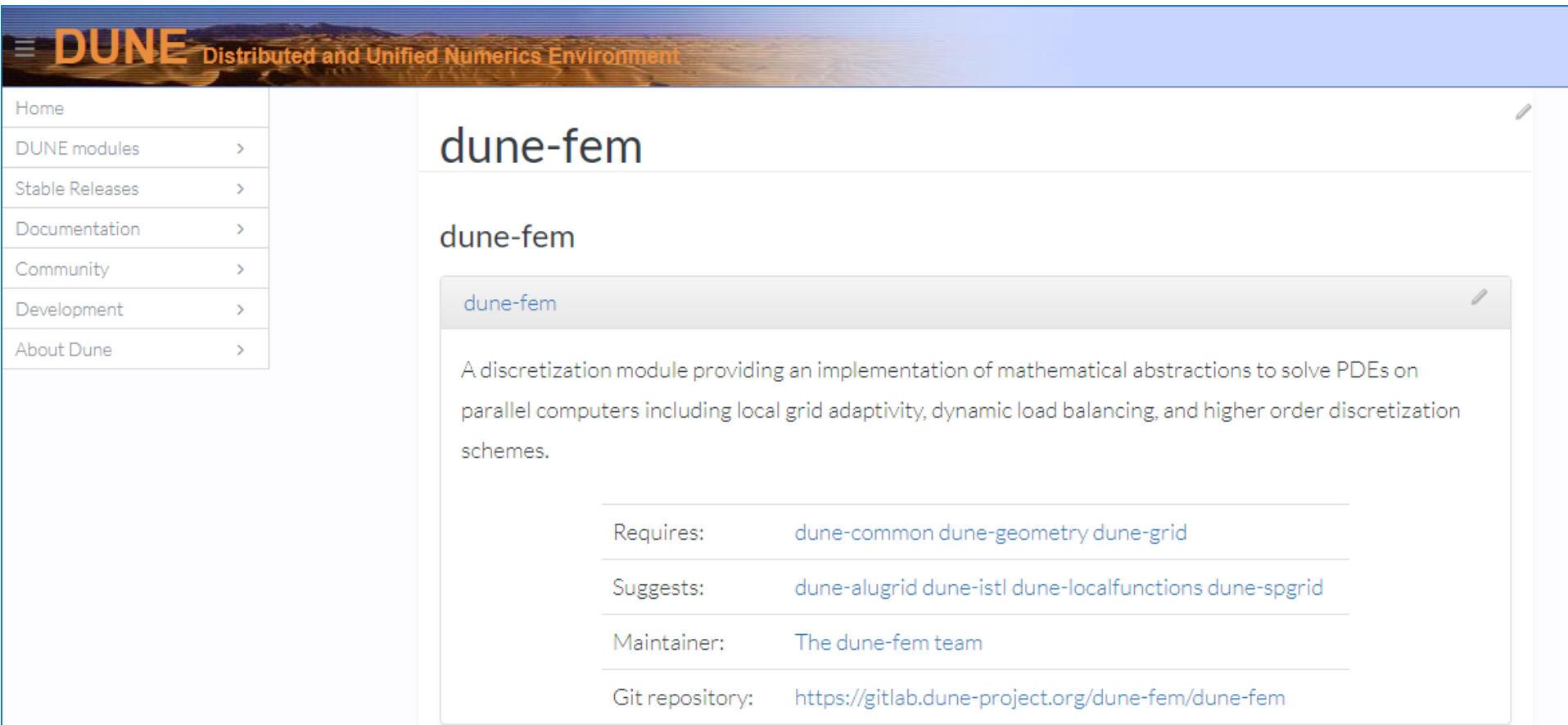


Very powerful but easy to use FEM software for structural engineering of 2D and 3D frames and **trusses**

خرپا

/trʌs/

<https://www.dune-project.org/modules/dune-fem/>



The screenshot shows the DUNE project website. The header features the DUNE logo and the text "Distributed and Unified Numerics Environment". A sidebar on the left contains a navigation menu with links to Home, DUNE modules, Stable Releases, Documentation, Community, Development, and About Dune. The main content area displays the "dune-fem" module page. It includes a description of the module as a discretization tool for solving PDEs, a list of required modules (dune-common, dune-geometry, dune-grid), suggested modules (dune-alugrid, dune-istl, dune-localfunctions, dune-spgrid), the maintainer (The dune-fem team), and the Git repository URL.

DUNE Distributed and Unified Numerics Environment

- Home
- DUNE modules >
- Stable Releases >
- Documentation >
- Community >
- Development >
- About Dune >

dune-fem

dune-fem

dune-fem

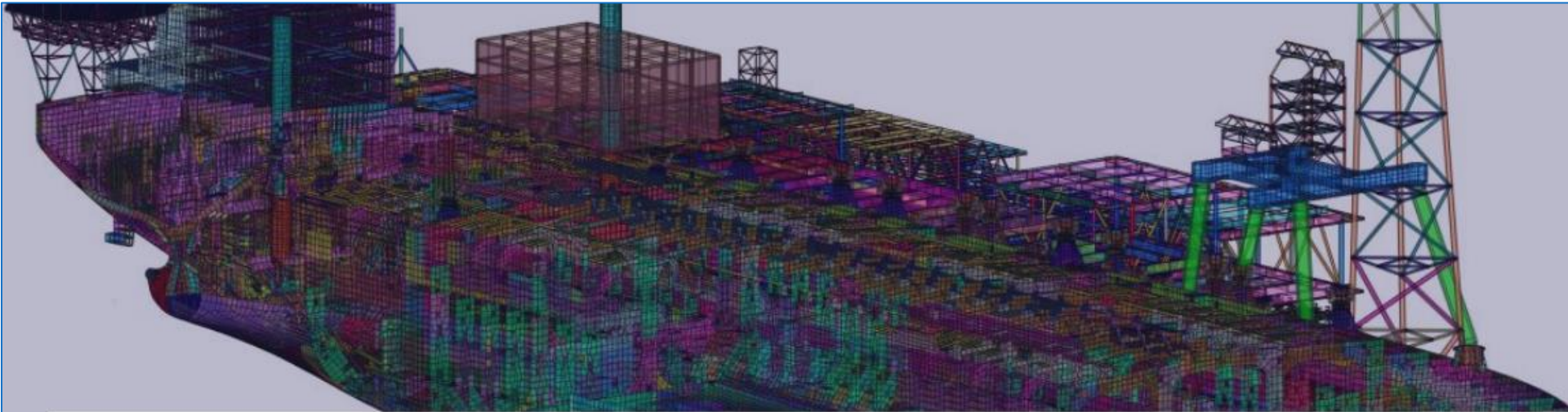
A discretization module providing an implementation of mathematical abstractions to solve PDEs on parallel computers including local grid adaptivity, dynamic load balancing, and higher order discretization schemes.

Requires:	dune-common dune-geometry dune-grid
Suggests:	dune-alugrid dune-istl dune-localfunctions dune-spgrid
Maintainer:	The dune-fem team
Git repository:	https://gitlab.dune-project.org/dune-fem/dune-fem

DUNE (***D**istributed and **U**nified **N**umerics **E**nvironment*) is a modular C++ library for the solution of partial differential equations using grid-based methods.

روش اجزای محدود (FEM)

<https://www.femto.eu/femap/>



Femap

About Femap

Femap, part of Siemens PLM Simcenter product portfolio, is one of the best-known FEA solutions. It's applied in the industry for over 30 years now. With the program you prepare your simulation models (pre-process) and get a comprehensive display of the analysis results (post-process). The software is open to all commercial solvers, including NX Nastran, Ansys, LS-DYNA, and Abaqus and can access geometry data from all major CAD systems. From beginner to advanced users, Femap combines exceptional ease of use, with cost efficiency and has the power to model the toughest problems.

روش اجزای محدود (FEM)

<http://www.hiflow3.org/>



[Home](#) ▾ [Download](#) ▾ [Documentation](#) ▾ [Show cases](#) ▾



HiFlow³ is a multi-purpose finite element software providing powerful tools for efficient and accurate solution of a wide range of problems modeled by partial differential equations (PDEs). Based on object-oriented concepts and the full capabilities of C++ the HiFlow³ project follows a modular and generic approach for building efficient parallel numerical solvers.

روش اجزای محدود (FEM)

<https://en.z88.de/>

Uni Bayreuth · LS CAD · FEM-Helden · BayMP · Elefant Racing



Z88

Info · Software · Download · Help · Forum

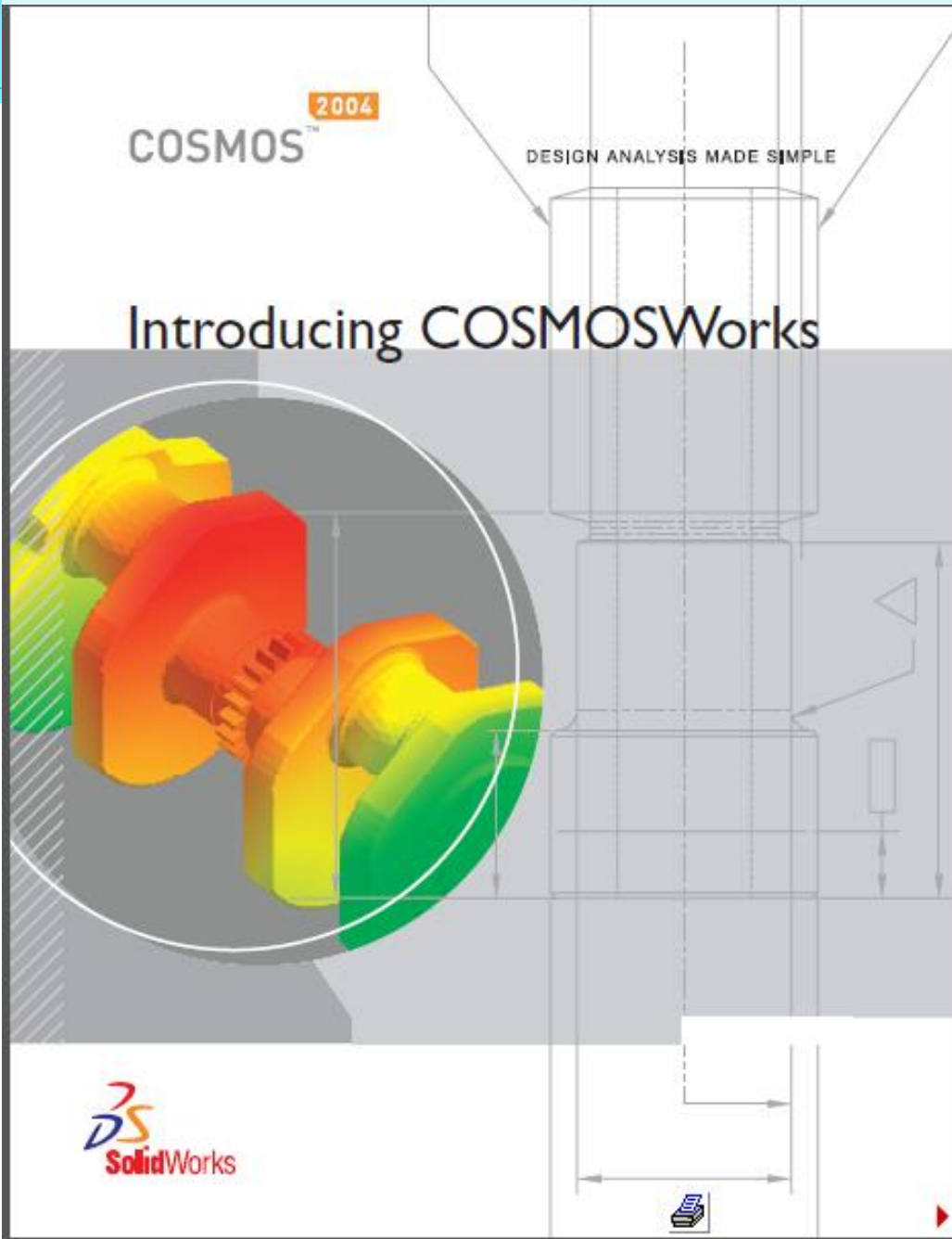
NATURAL FREQUENCY ANALYSIS



روش اجزای محدود (FEM)

Z88 is a software package for the finite element method (FEM) and topology optimization. A team led by Frank Rieg at the University of Bayreuth started development in 1985 and now the software is used by several universities, as well as small and medium-sized enterprises. Z88 is capable of calculating two and three dimensional element types with a linear approach. The software package contains several solvers and two post-processors and is available for Microsoft Windows, Mac OS X and Unix/Linux computers in 32-bit and 64-bit versions. Benchmark tests conducted in 2007 showed a performance on par with commercial software.^[1]

روش اجزای محدود (FEM)

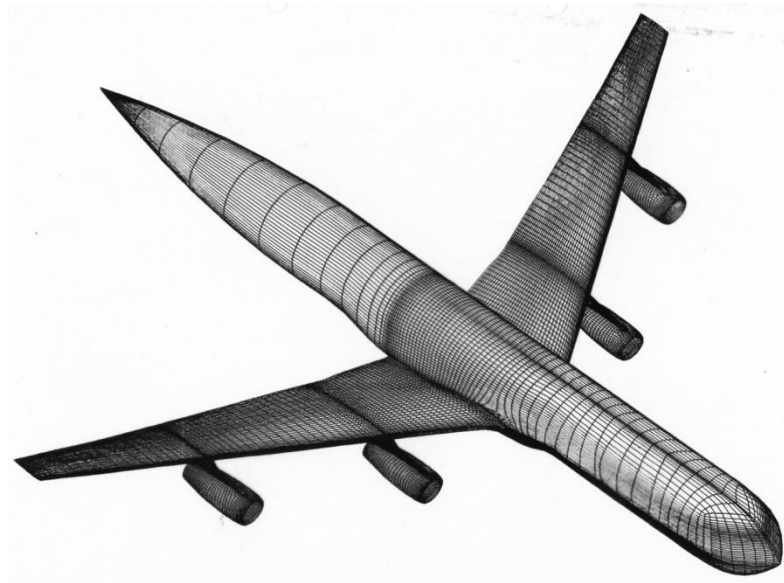


CosmosWorks

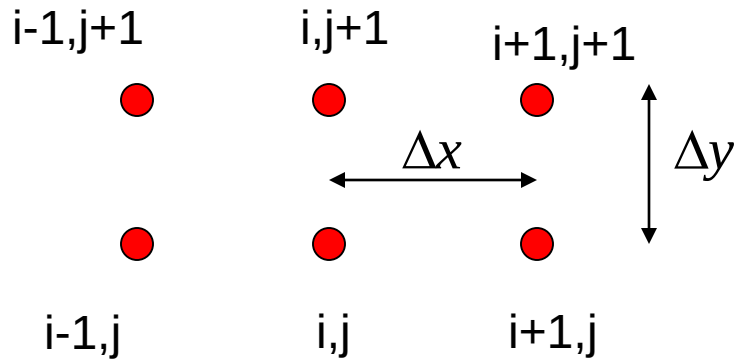
Part of SolidWorks

Traditional Discretisation Methods

- Finite Difference
- Finite Element
- Finite Volume



Finite Difference Method (FDM)



$$\left. \frac{\partial(u\rho)}{\partial x} \right|_{i,j} \approx \frac{((u\rho)_{i+1,j} - (u\rho)_{i-1,j})}{2\Delta x} \quad \boxed{O(\Delta x^2)}$$

central

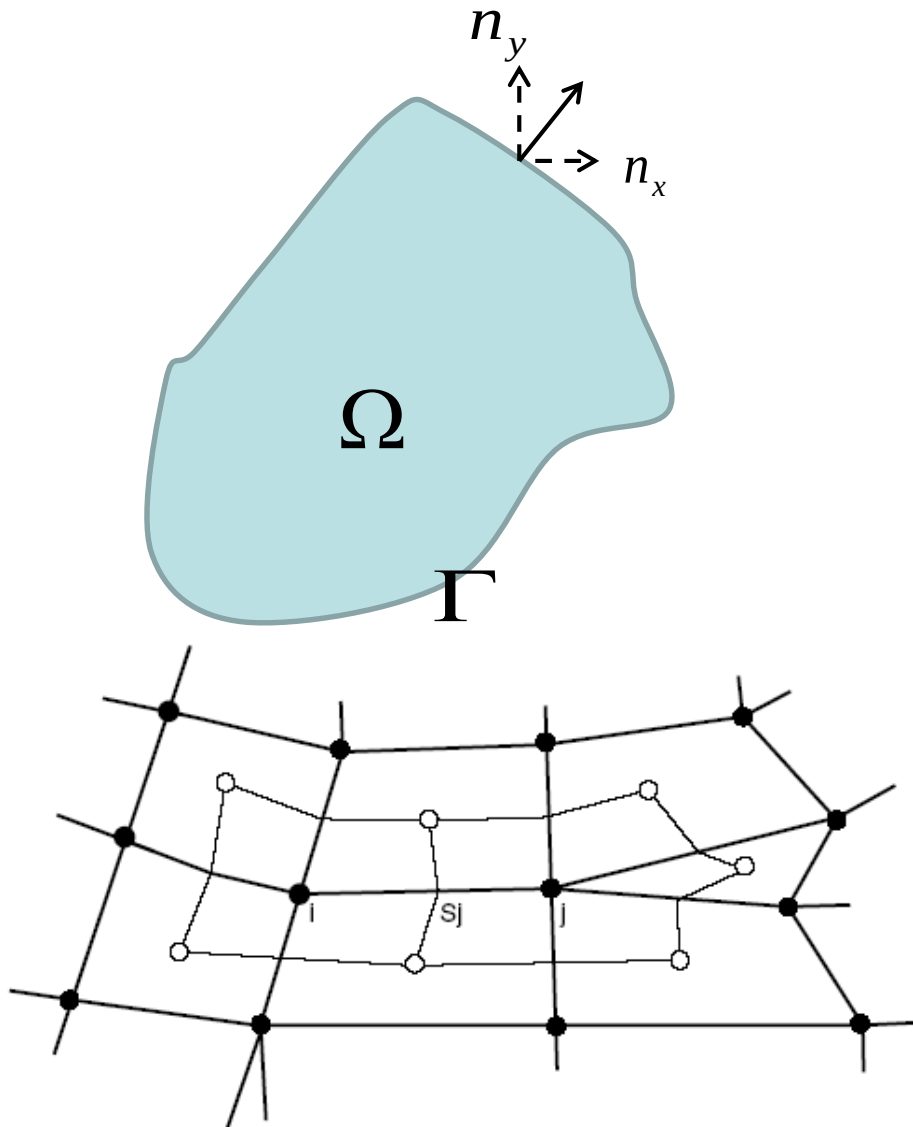
$$\left. \frac{\partial(u\rho)}{\partial x} \right|_{i,j} \approx \frac{((u\rho)_{i+1,j} - (u\rho)_{i,j})}{\Delta x} \quad \boxed{O(\Delta x)}$$

forward

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(u\rho)}{\partial x} + \frac{\partial(v\rho)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{i,j} + \frac{((u\rho)_{i+1,j} - (u\rho)_{i-1,j})}{2\Delta x} + \frac{((v\rho)_{i,j+1} - (v\rho)_{i,j-1})}{2\Delta y} = 0$$

Finite Volume Method (FVM)



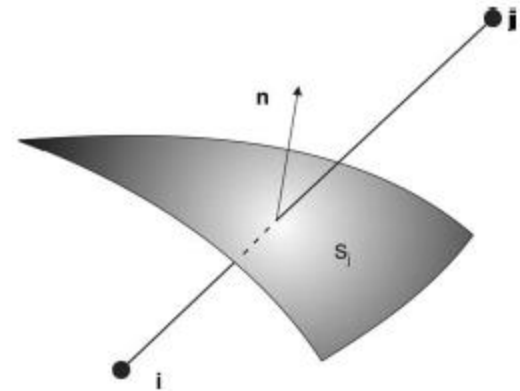
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(u\rho)}{\partial x} + \frac{\partial(v\rho)}{\partial y} = 0$$

$$\int_{\Omega} \frac{\partial \rho}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} \frac{\partial(u\rho)}{\partial x} d\Omega + \int_{\Omega} \frac{\partial(v\rho)}{\partial y} d\Omega = 0$$

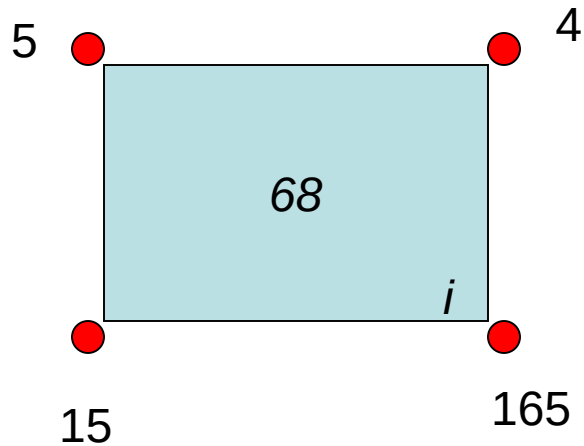
From Gauss Divergence Theorem:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_{\Gamma} (u\rho)n_x d\Gamma + \int_{\Gamma} (v\rho)n_y d\Gamma = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_i V_i + \sum_j \rho_i u_i S_{jx} + \sum_j \rho_i v_i S_{jy} = 0$$



Finite Element Method (FEM)



Element

Nodes

68

15 165 4 5

$$\rho \approx \rho_i N_i =$$

$$\rho_5 N_5 + \rho_4 N_4 + \rho_{165} N_{165} + \rho_{15} N_{15}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(u\rho)}{\partial x} + \frac{\partial(v\rho)}{\partial y} = 0$$

$$\int_{\Omega} \frac{\partial \rho}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} \frac{\partial(u\rho)}{\partial x} d\Omega + \int_{\Omega} \frac{\partial(v\rho)}{\partial y} d\Omega = 0$$

Weighted residual analysis:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho_i N_i W_j d\Omega + \int_{\Omega} \frac{\partial(u\rho)_i N_i}{\partial x} W_j d\Omega + \int_{\Omega} \frac{\partial(v\rho)_i N_i}{\partial y} W_j d\Omega = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{\Omega} N_i W_j d\Omega \right) \rho_i + \left(\int_{\Omega} \frac{\partial(N_i)}{\partial x} W_j d\Omega \right) u \rho_i + \left(\int_{\Omega} \frac{\partial(N_i)}{\partial y} W_j d\Omega \right) v \rho_i = 0$$

Finite Element Method (FEM)

Weighted residual analysis:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{\Omega} N_i W_j d\Omega \right) \rho_i + \left(\int_{\Omega} \frac{\partial(N_i)}{\partial x} W_j d\Omega \right) u \rho_i + \left(\int_{\Omega} \frac{\partial(N_i)}{\partial y} W_j d\Omega \right) v \rho_i = 0$$

If W is chosen to be the same as N the method is called **Galerkin method**.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{\Omega} N_i N_j d\Omega \right) \rho_i + \left(\int_{\Omega} \frac{\partial(N_i)}{\partial x} N_j d\Omega \right) u \rho_i + \left(\int_{\Omega} \frac{\partial(N_i)}{\partial y} N_j d\Omega \right) v \rho_i = 0$$

For easy implementation of boundary conditions this is integrated by parts.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{\Omega} N_i N_j d\Omega \right) \rho_i - \left(\int_{\Omega} N_i \frac{\partial(N_j)}{\partial x} d\Omega \right) u \rho_i - \left(\int_{\Omega} N_i \frac{\partial(N_j)}{\partial y} d\Omega \right) v \rho_i + \left(\int_{\Gamma} N_i N_j n_x d\Gamma \right) u \rho_i + \left(\int_{\Gamma} N_i N_j n_y d\Gamma \right) v \rho_i = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{M}_{elem} \rho_i + \mathbf{B}_{xelem} u \rho_i + \mathbf{B}_{yelem} v \rho_i = 0$$

Finite Element Method (FEM)

1) Divides computational space into elements $\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{M}_{elem} \rho_i + \mathbf{B}_{Xelem} u \rho_i + \mathbf{B}_{Yelem} v \rho_i = 0$

For every element constructs $\mathbf{M}_{elem}, \mathbf{B}_{Xelem}, \mathbf{B}_{Yelem}; \rho_{elem}, \mathbf{u} \rho_{elem}, \mathbf{v} \rho_{elem}$

2) Reconnects elements at nodes

Agglomerates for the whole domain $\mathbf{M} = \sum_e \mathbf{M}_{elem}, \mathbf{B}_X = \sum_e \mathbf{B}_{Xelem}, \mathbf{B}_Y = \sum_e \mathbf{B}_{Yelem}$
 $\rho = \sum_e \rho_{elem}, \mathbf{u} \rho = \sum_e \mathbf{u} \rho_{elem}, \mathbf{v} \rho = \sum_e \mathbf{v} \rho_{elem}$

3) As a result a set of algebraic equations is formed and its solution follows

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{M} \rho + \mathbf{B}_X \mathbf{u} \rho + \mathbf{B}_Y \mathbf{v} \rho = 0$$

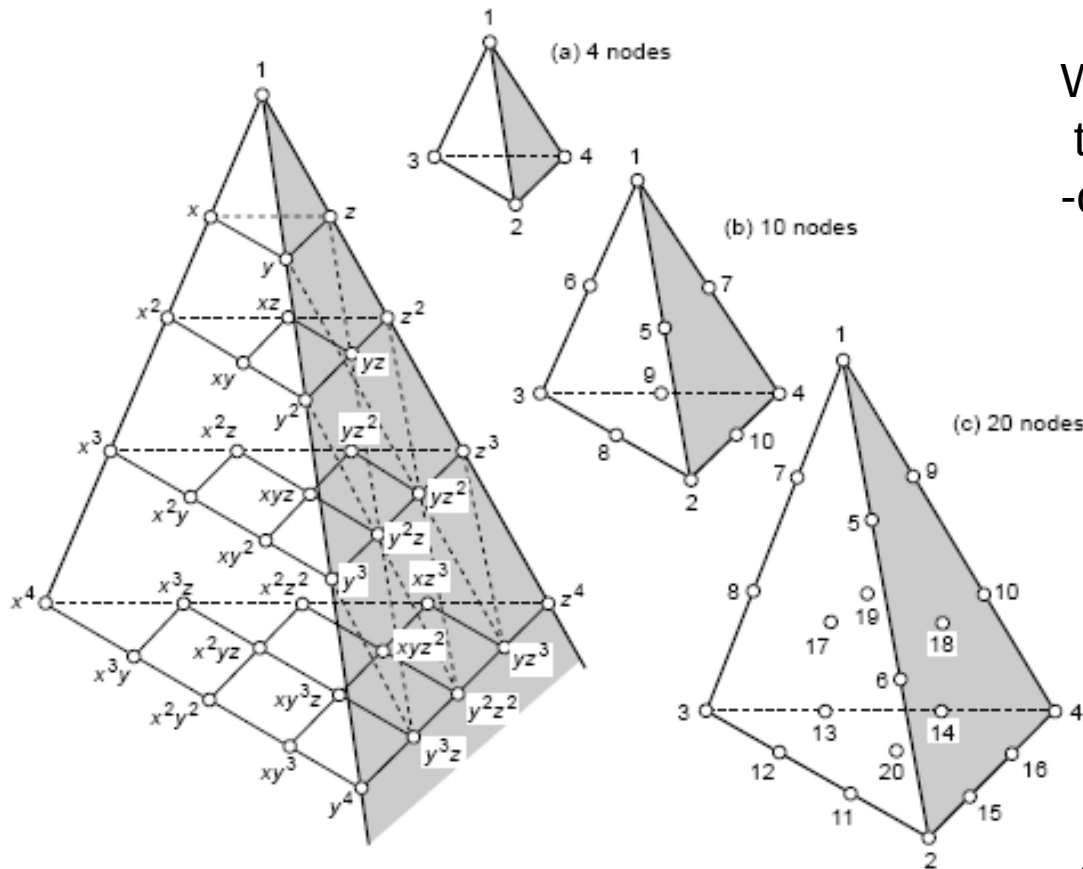
SHAPE FUNCTIONS

$$\rho \approx \sum_i N_i \rho_i$$

And when derivatives are of interest:

$$\frac{d\rho}{dx} \approx \sum_i \frac{dN_i}{dx} \rho_i$$

The tetrahedron family of elements



We know functions N ,
they are frequently polynomials
-obtaining their derivatives is easy.

After Zienkiewicz et al FEM 2000



Development of Theory

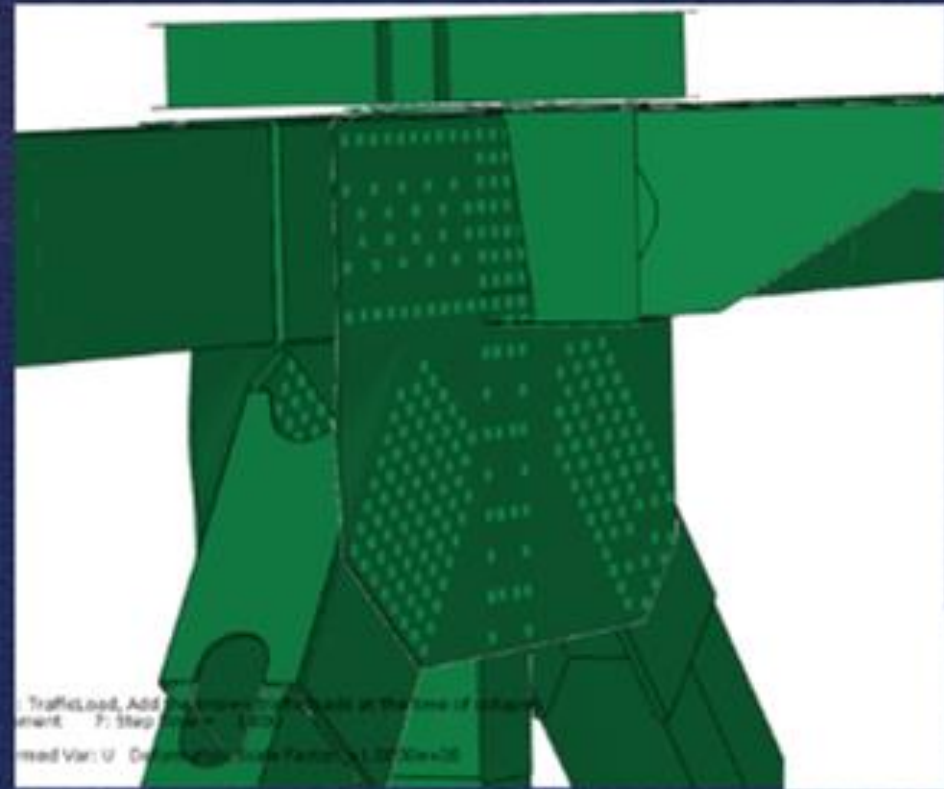
- Rayleigh-Ritz Method
 - Total potential energy equation
- Galerkin's Method

روش اجزای محدود (FEM)

2003 Photo

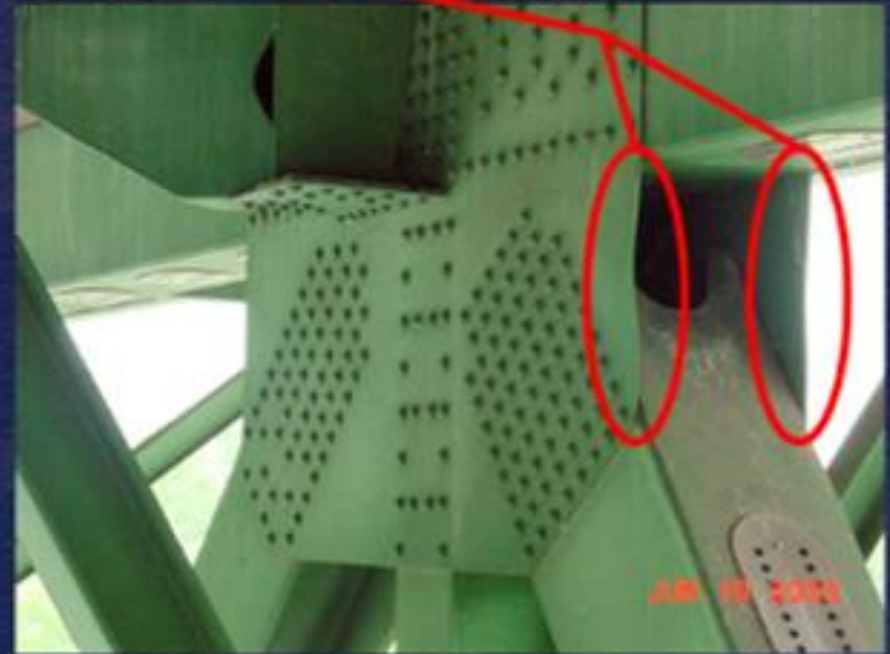
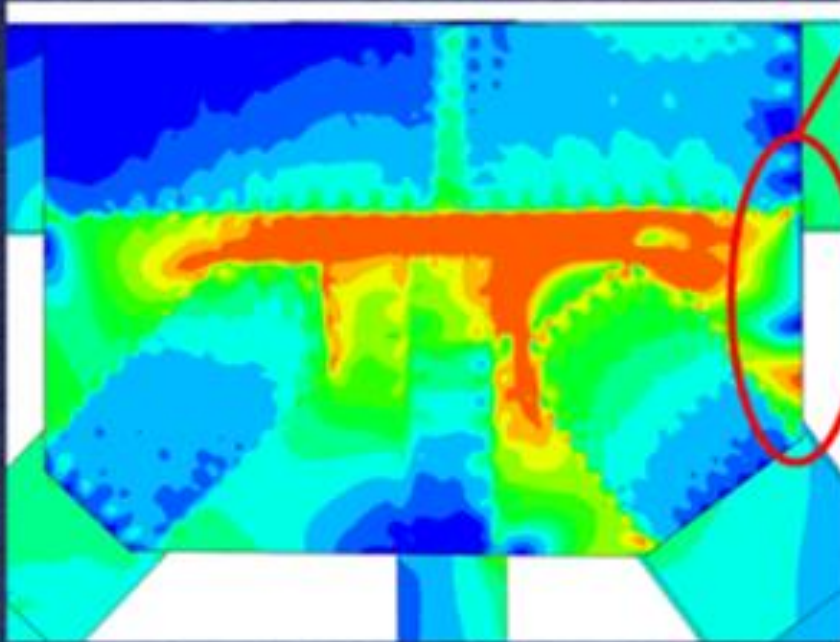


Computer Model



روش اجزای محدود (FEM)

Areas where stiffeners would be installed



Edge stiffeners would not prevent gusset plate yielding

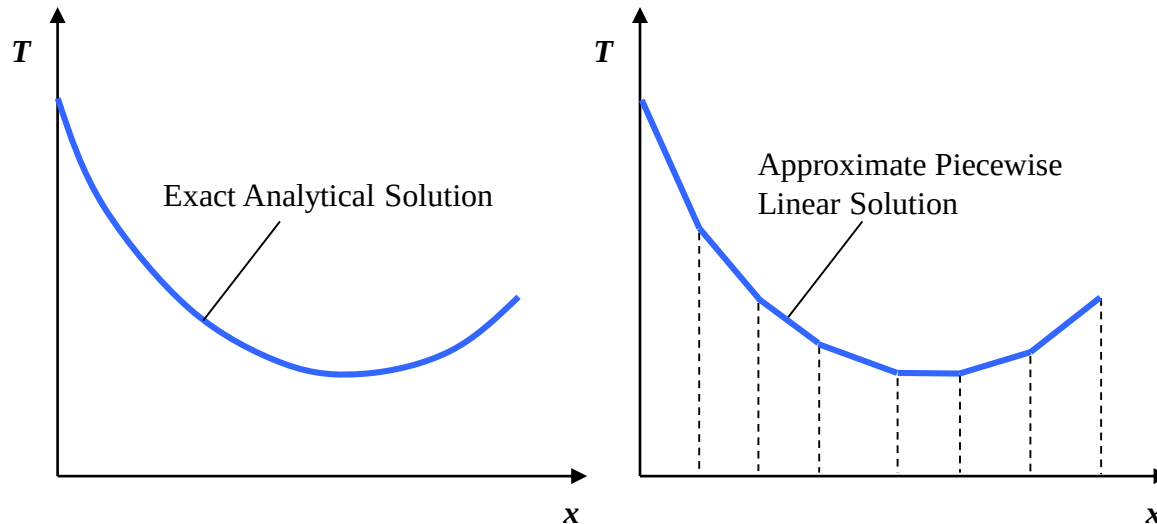
gusset /'gʌsɪt/

(مکانیک) نبشی، مفصل، میل بست، لچکی، صفحه ی فولادی اتصال، ورقه ی گونیایی، عقربک

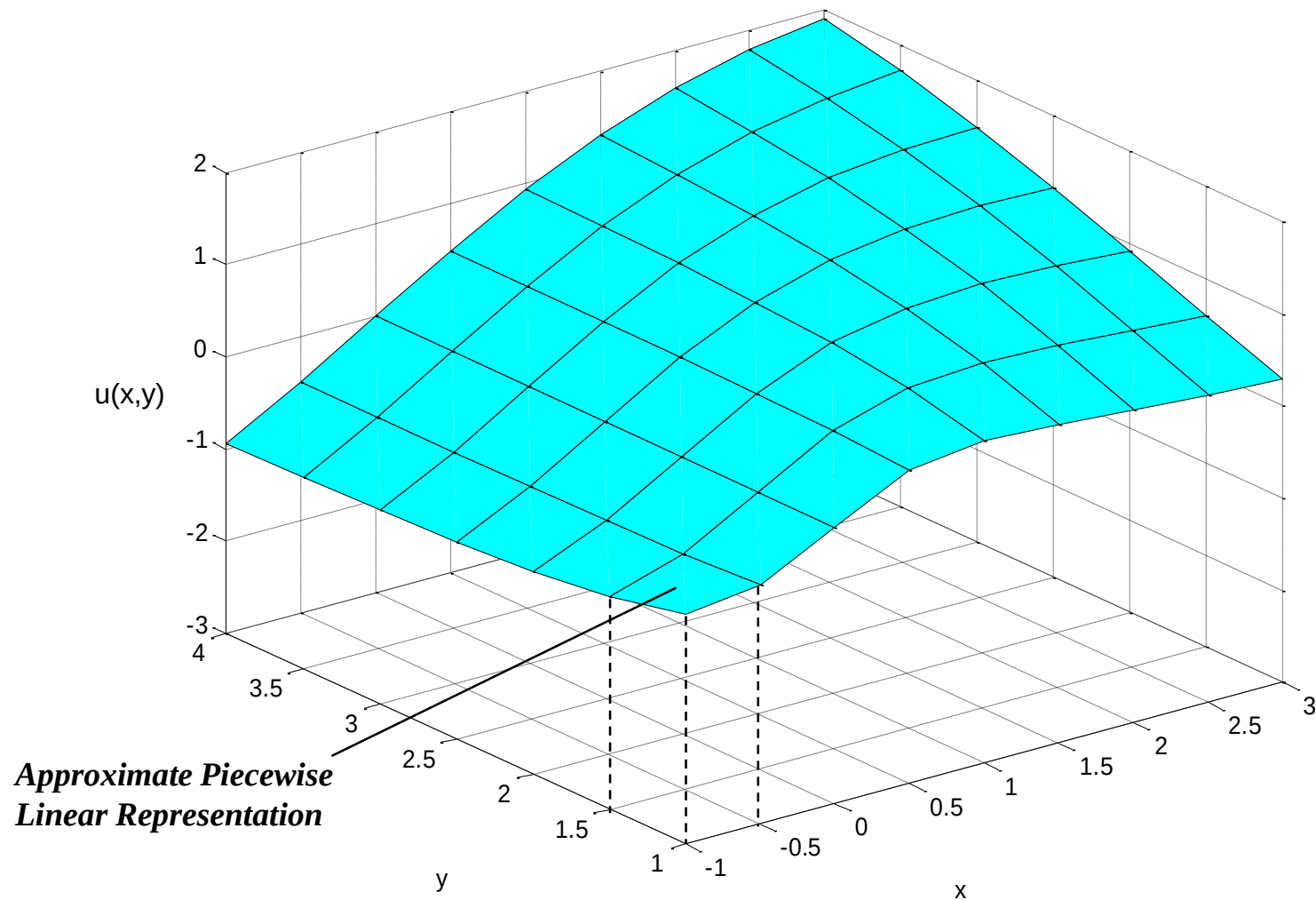
Basic Concept of the Finite Element Method

Any continuous solution field such as stress, displacement, temperature, pressure, etc. can be approximated by a discrete model composed of a set of piecewise continuous functions defined over a finite number of subdomains.

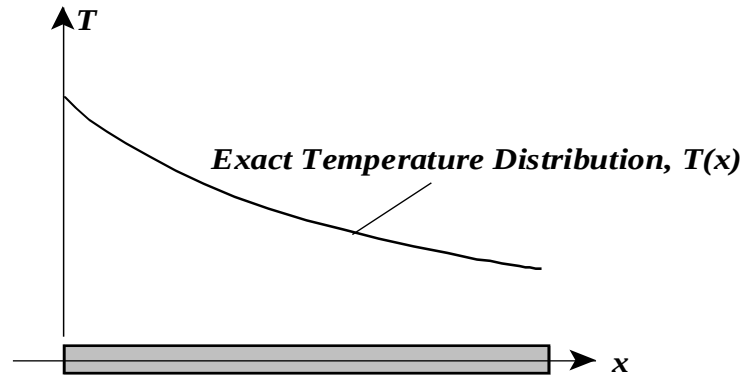
One-Dimensional Temperature Distribution



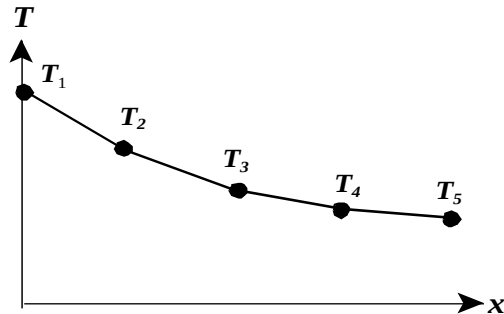
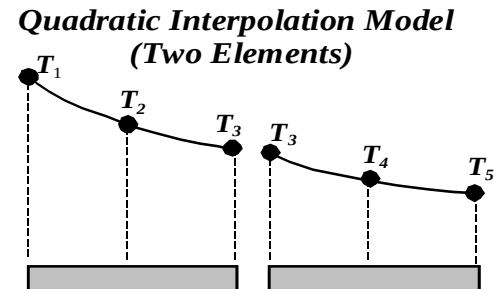
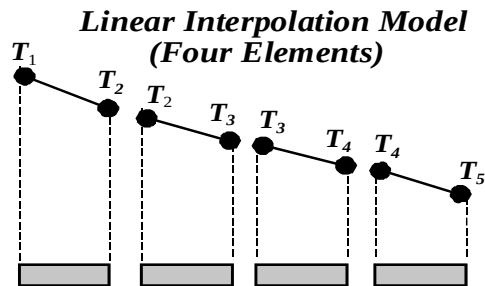
Two-Dimensional Discretization



Discretization Concepts

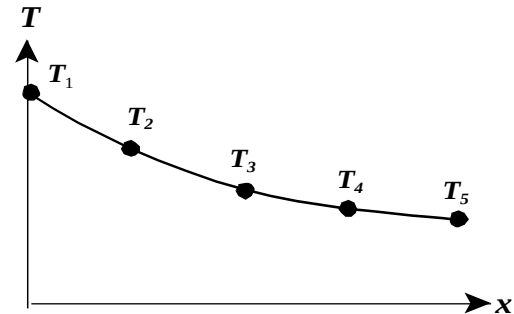


Finite Element Discretization



Piecewise Linear Approximation

Temperature Continuous but with
Discontinuous Temperature Gradients



Piecewise Quadratic Approximation

Temperature and Temperature Gradients
Continuous

Common Types of Elements

One-Dimensional Elements

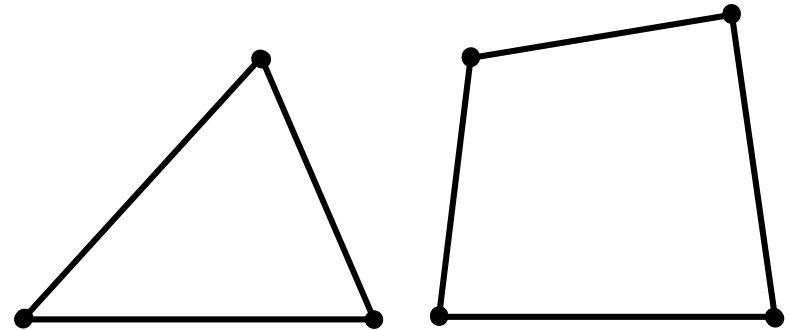
Line

Rods, Beams, Trusses, Frames



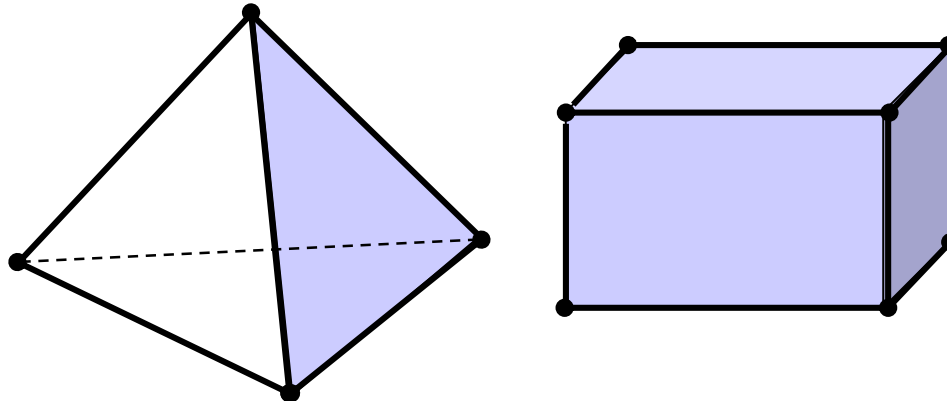
Two-Dimensional Elements

Triangular, Quadrilateral
Plates, Shells, 2-D Continua

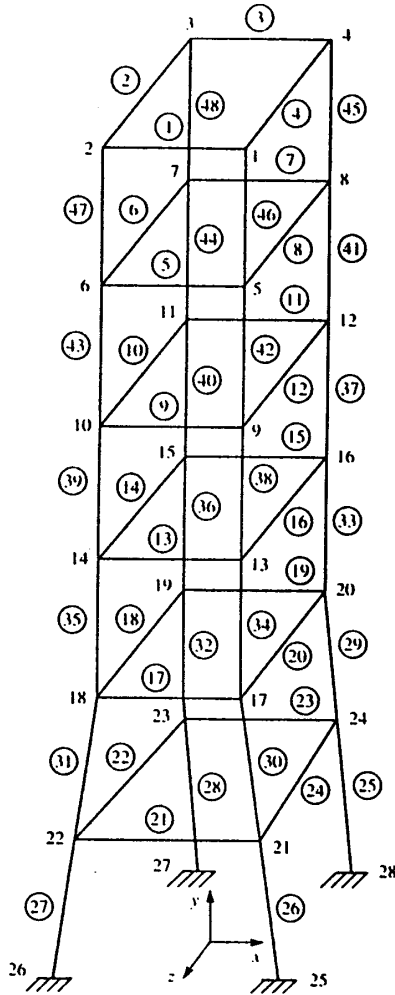


Three-Dimensional Elements

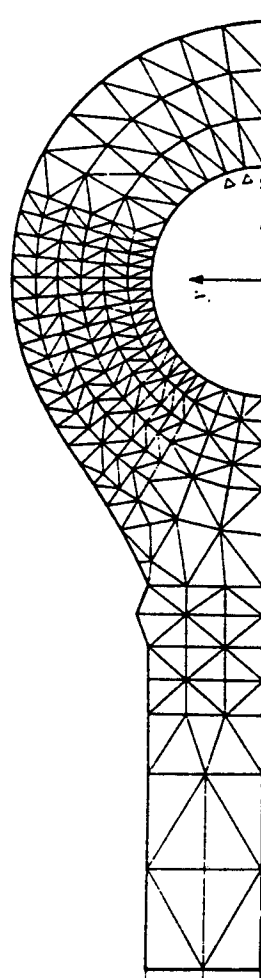
Tetrahedral, Rectangular Prism (Brick)
3-D Continua



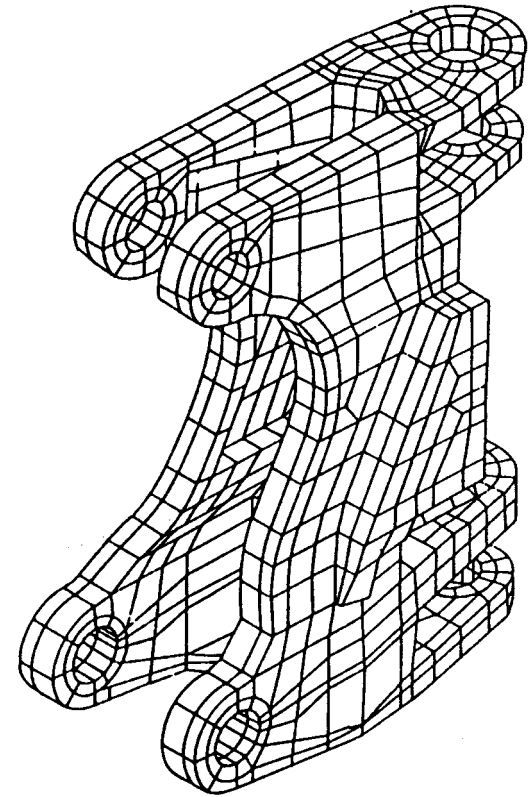
Discretization Examples



**One-Dimensional
Frame Elements**



**Two-Dimensional
Triangular Elements**



**Three-Dimensional
Brick Elements**

Basic Steps in the Finite Element Method

Time Independent Problems

- **Domain Discretization**
- **Select Element Type (Shape and Approximation)**
- **Derive Element Equations (Variational and Energy Methods)**
- **Assemble Element Equations to Form Global System**

$$[K]\{U\} = \{F\}$$

$[K]$ = Stiffness or Property Matrix

$\{U\}$ = Nodal Displacement Vector

$\{F\}$ = Nodal Force Vector

- **Incorporate Boundary and Initial Conditions**
- **Solve Assembled System of Equations for Unknown Nodal Displacements and Secondary Unknowns of Stress and Strain Values**

Common Sources of Error in FEA

- **Domain Approximation**
- **Element Interpolation/Approximation**
- **Numerical Integration Errors**

(Including Spatial and Time Integration)

- **Computer Errors (Round-Off, etc.,)**

Measures of Accuracy in FEA

Accuracy

$$\text{Error} = |(\text{Exact Solution}) - (\text{FEM Solution})|$$

Convergence

همگرایی

Limit of Error as:

Number of Elements (*h-convergence*)

or

Approximation Order (*p-convergence*)

Increases

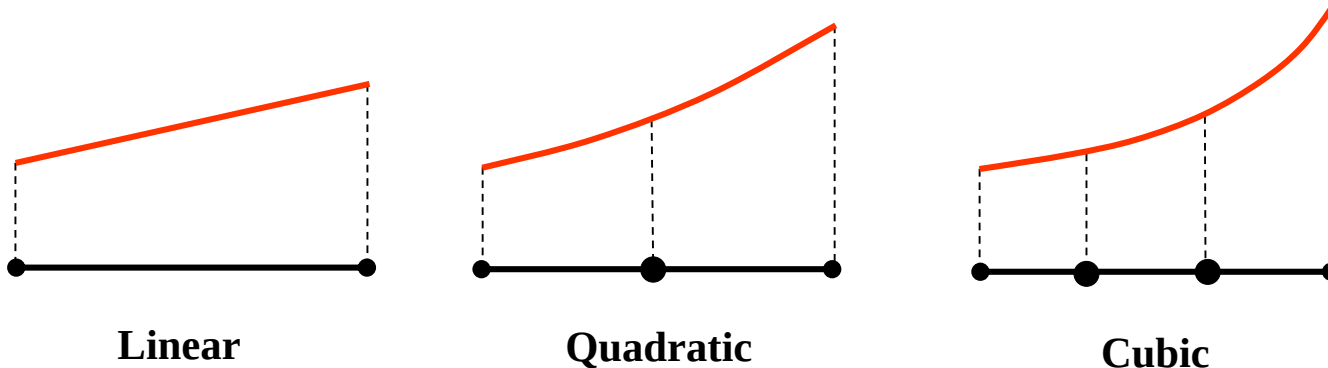
**Ideally, Error $\rightarrow 0$ as Number of Elements or
Approximation Order $\rightarrow \infty$**

Common Approximation Schemes

One-Dimensional Examples

Polynomial Approximation

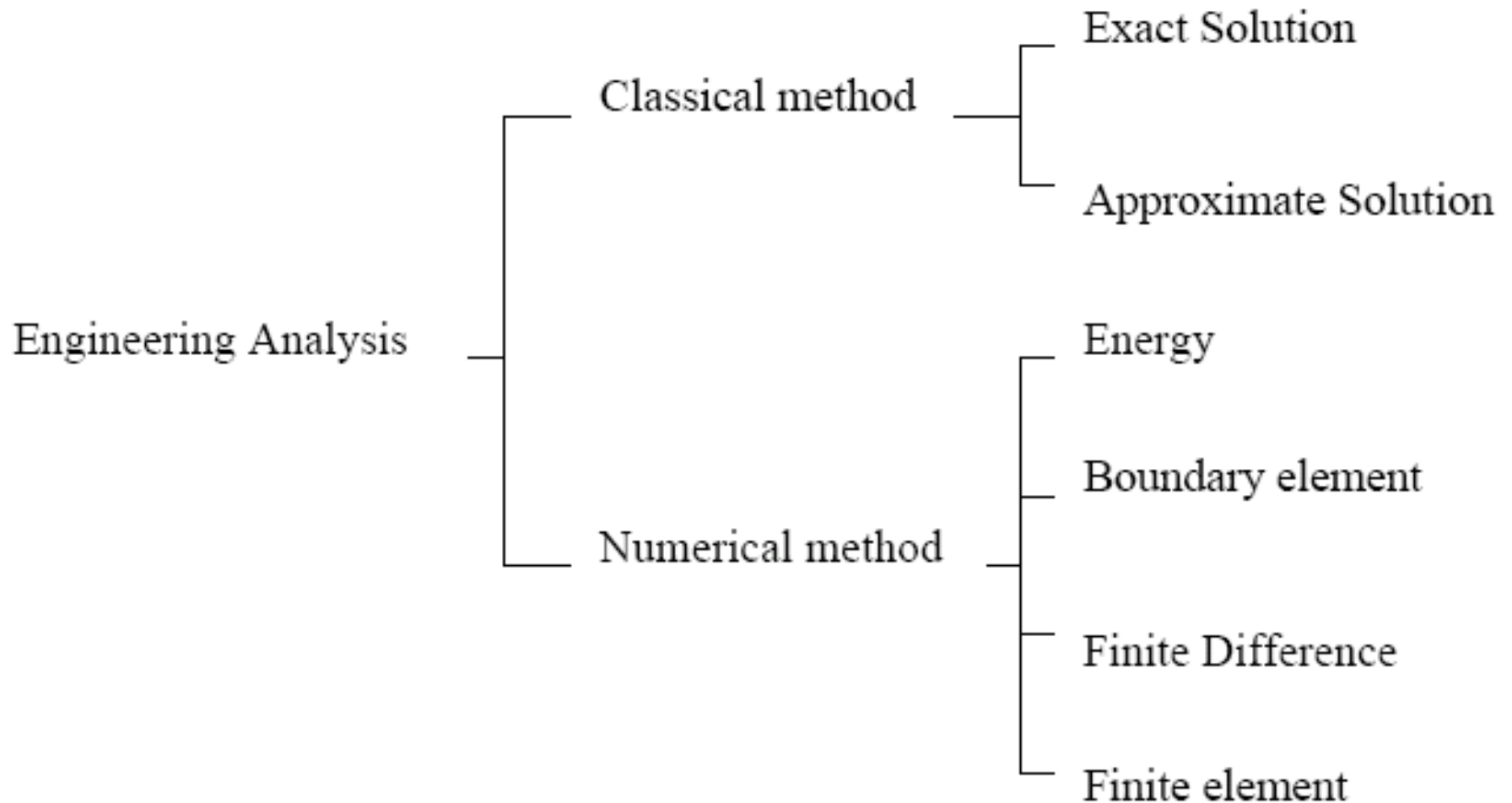
Most often polynomials are used to construct approximation functions for each element. Depending on the order of approximation, different numbers of element parameters are needed to construct the appropriate function.

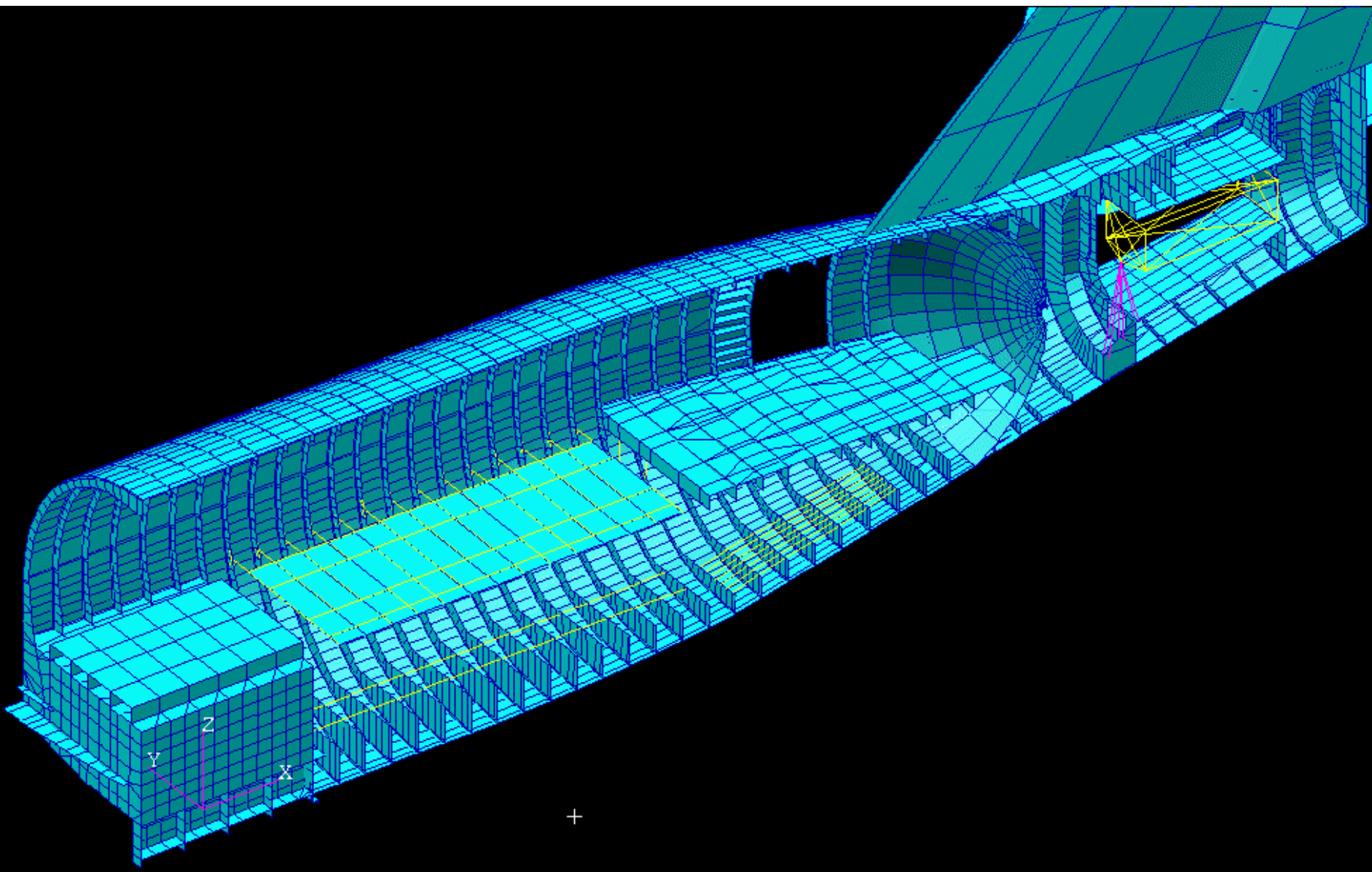


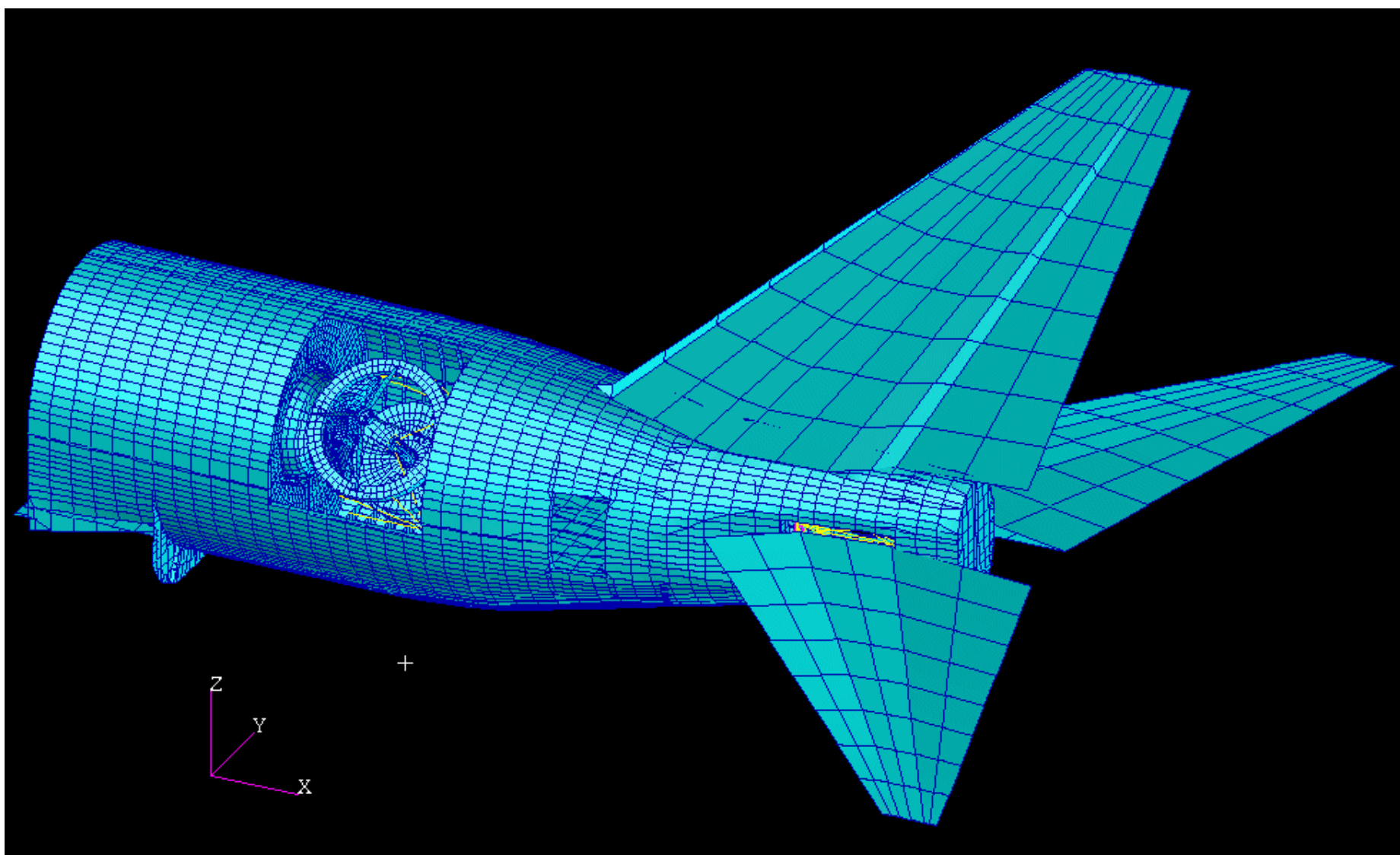
Special Approximation

For some cases (e.g. infinite elements, crack or other singular elements) the approximation function is chosen to have special properties as determined from theoretical considerations

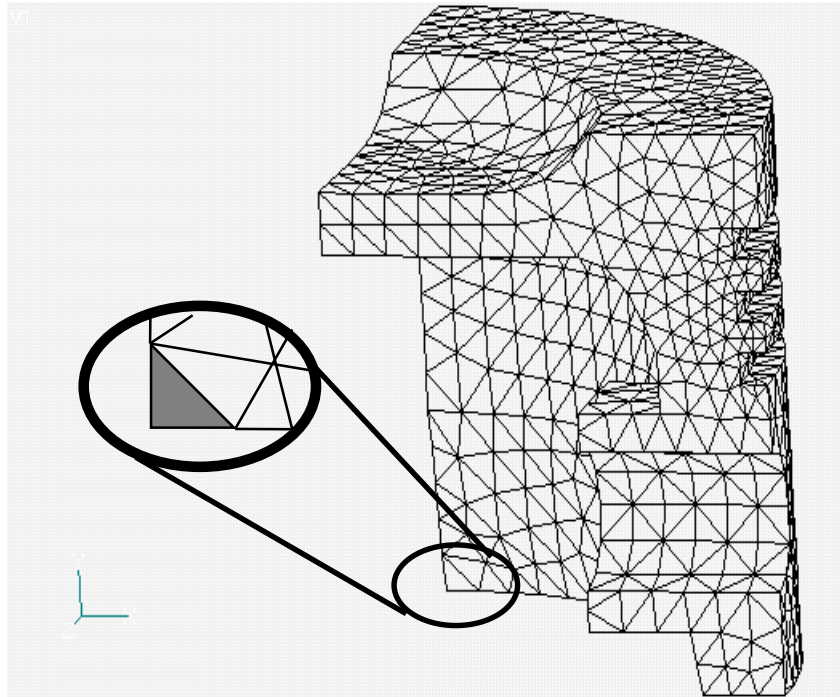
Methods of Solution:







Mathematical Model



Dividing of the geometry into simple elements and assembling all elements

$[K]$ = Stiffness matrix of the part
(Sum of all elements)

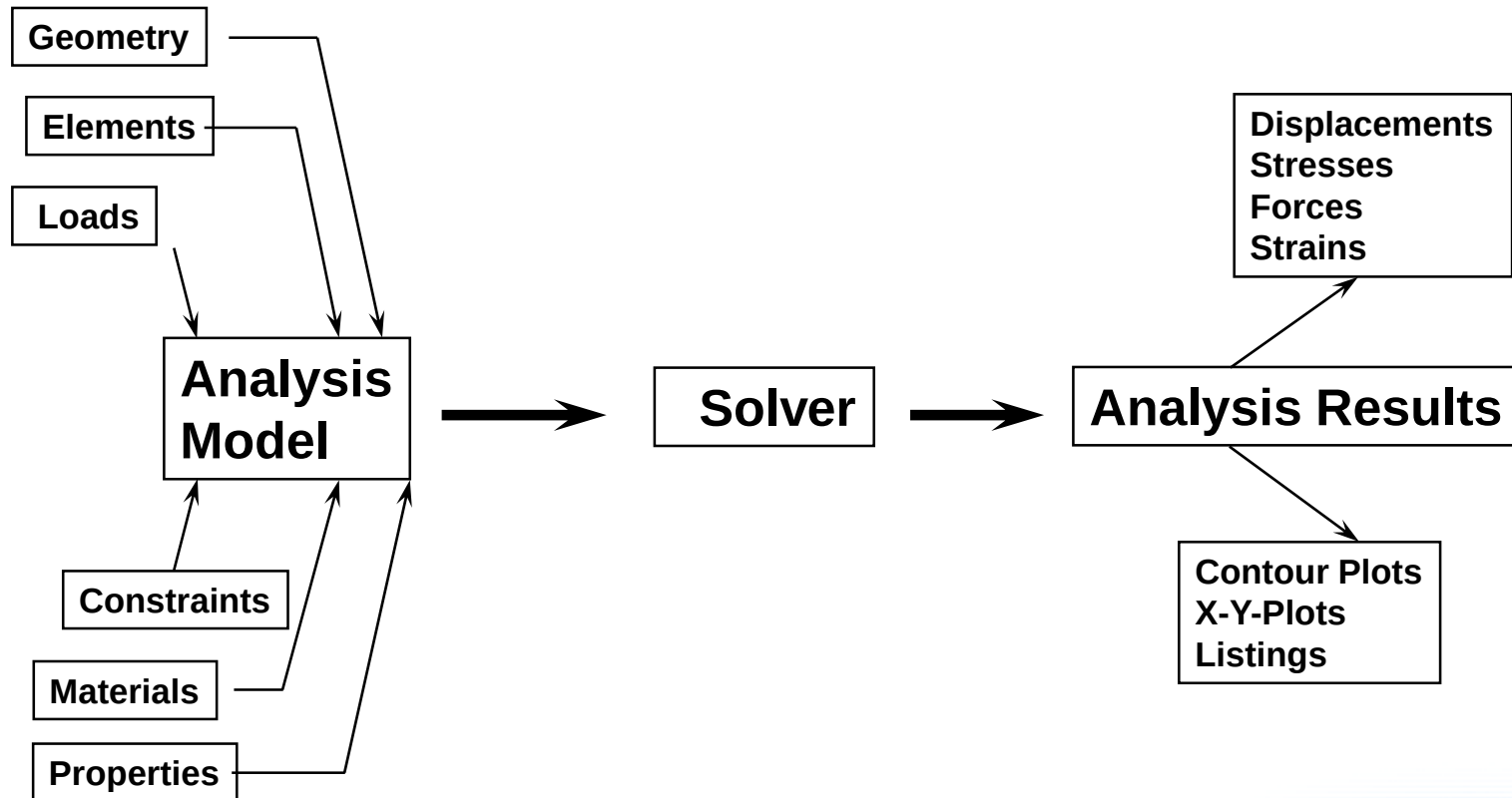
$\{U\}$ = Components of the displacements of the single nodes of the part

$\{F\}$ = Components of the loads of the single nodes of the part

$$[K] * \{U\} = \{F\}$$

Solving the matrix equation with thousands of unknowns

Steps in an FE Analysis



Introduction to FEM

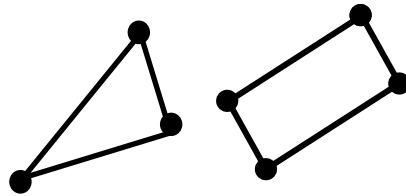
- What an FEA user has to specify:
 - Choose the element type
 - Creation of the Finite Element Mesh
 - Specification of the material properties
 - Specification of the element properties
 - Verification of the Mesh quality
 - Application of the loads and boundary conditions
 - Specification of the options of the desired analysis type
 - Request of the desired results
 - Interpretation of the results

Standard Elements

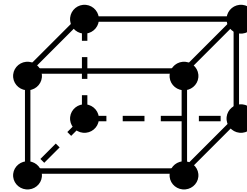
First order



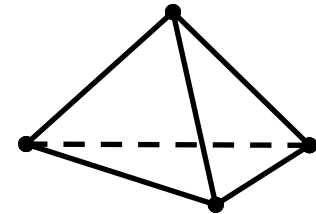
Line



Triangle/Quadrilateral
(tri/quad)



Hexahedral
(hex)



Tetrahedral
(tet)

Second order



Line



Triangle/Quadrilateral



Hexahedral



10-noded Tetrahedral

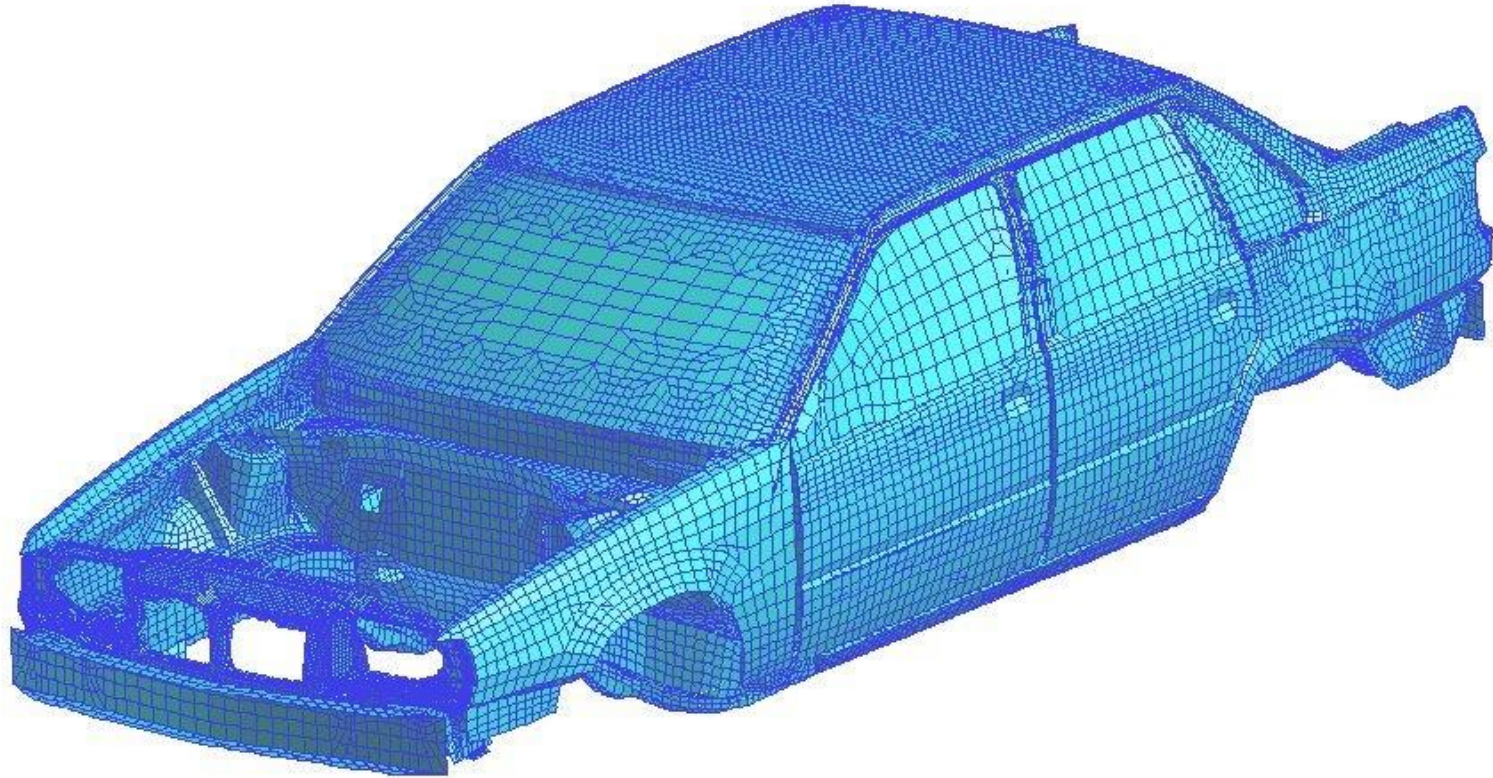
Element selection criteria

Which element type should be used?

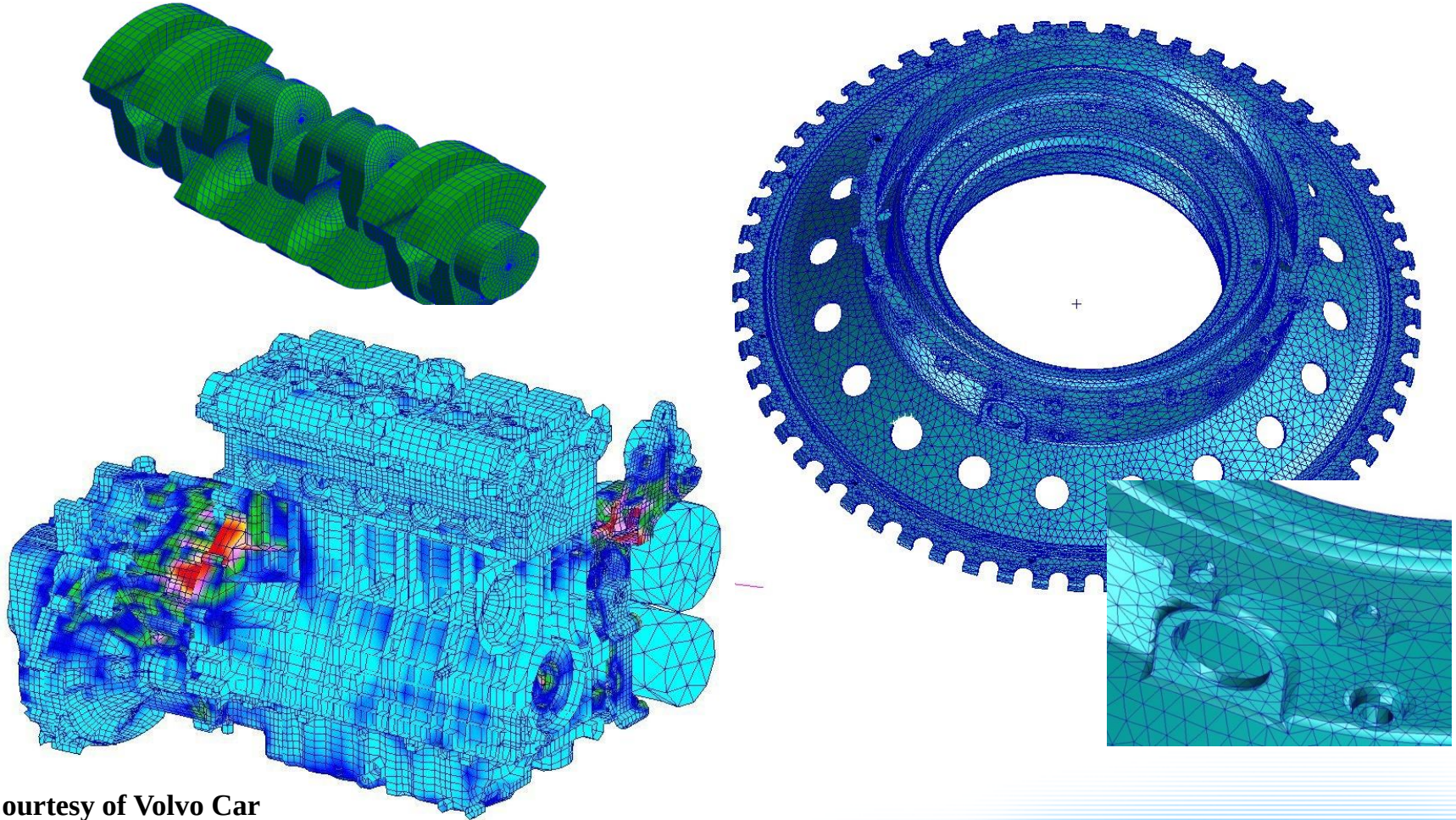
- Beams, plates or solids?
- Quadrilateral or triangle?
- Hexahedral, pentahedral or tetrahedral ?
- Higher or lower order?

The choice of the element type is strongly dependent on the structure to be analyzed

Examples of shell models



Examples of Solid Models



Courtesy of Volvo Car

Element Selection Guidelines

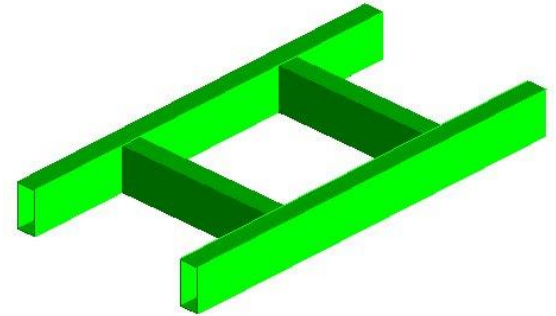
Choose the simplest element type

- if you can make a shell model - do it
- If you can make a beam model - do it

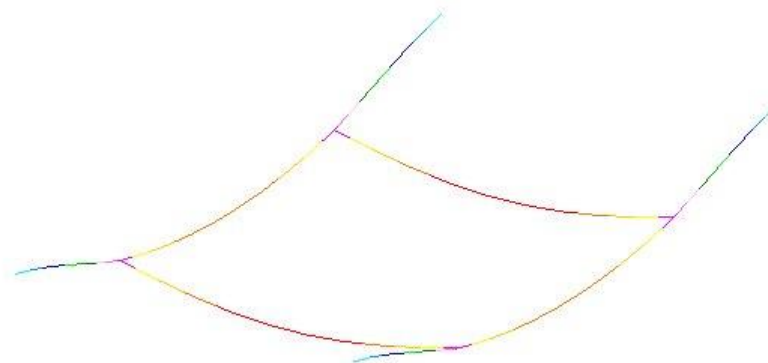
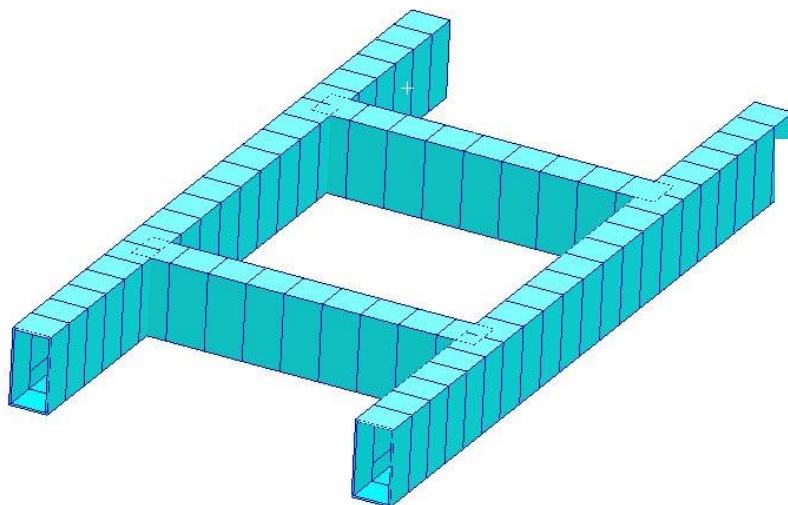
For structural analysis, don't use first order tetra-elements.
(But they are ok for thermal analysis)

The Model

- We have the following model:
It consist of rectangular beams that are 100 mm wide and 200 mm high with thickness 5 mm. The longest beams are 2000 mm and the total width of the model is 1000 mm. The centerline of the crossing bars are located 550 mm from each end.
- The beams are welded together, but the weld fillets are to be neglected due to their small size
- The structure carries a load of 2000 kg evenly distributed over the two cross bars

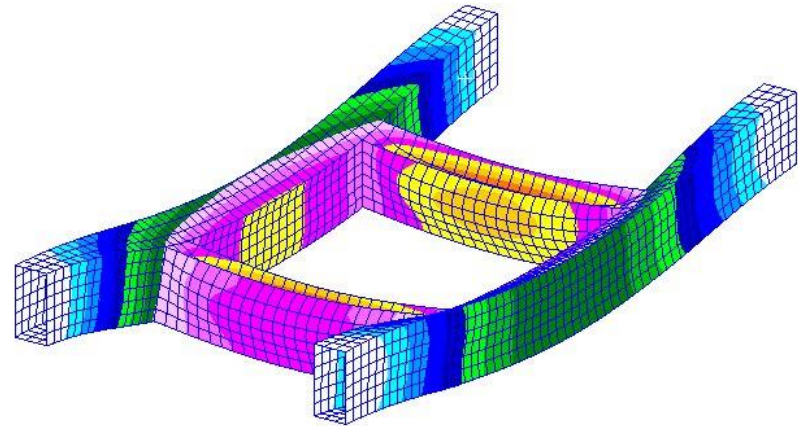
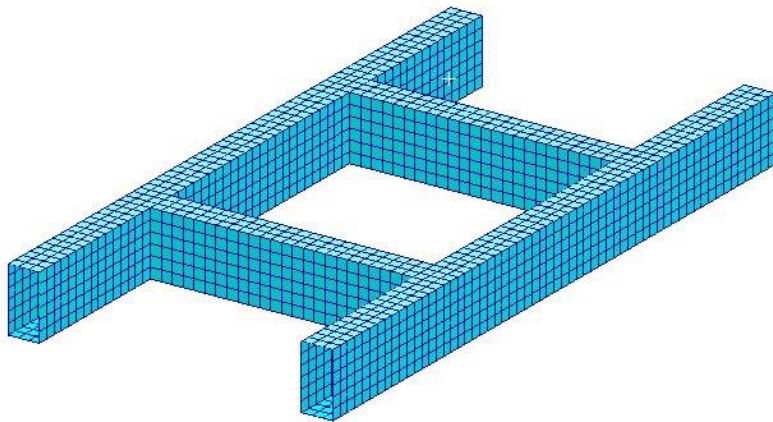


Beam Model



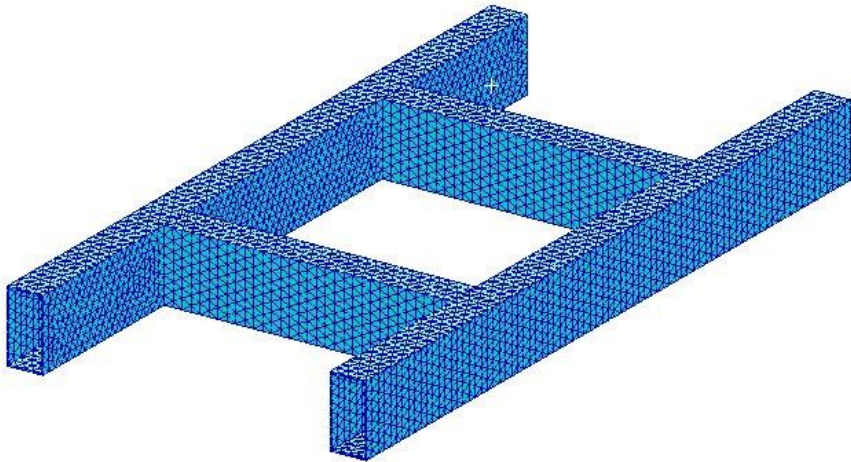
Element size 100 mm

Shell Model

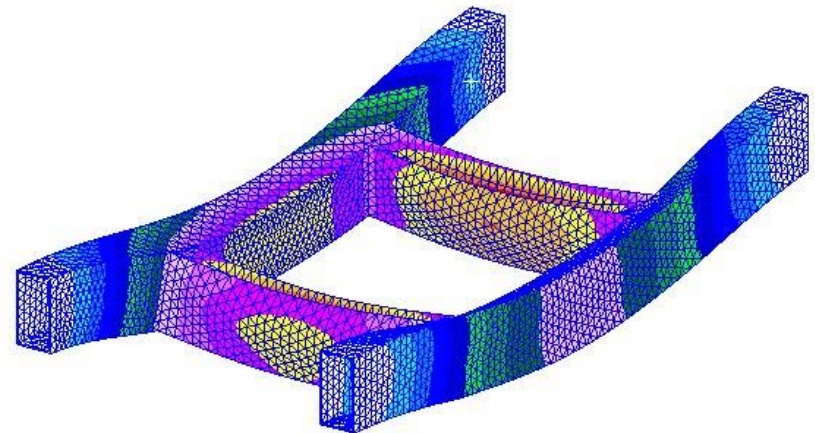


Element size 33 mm

Solid Model



Element size 25 mm



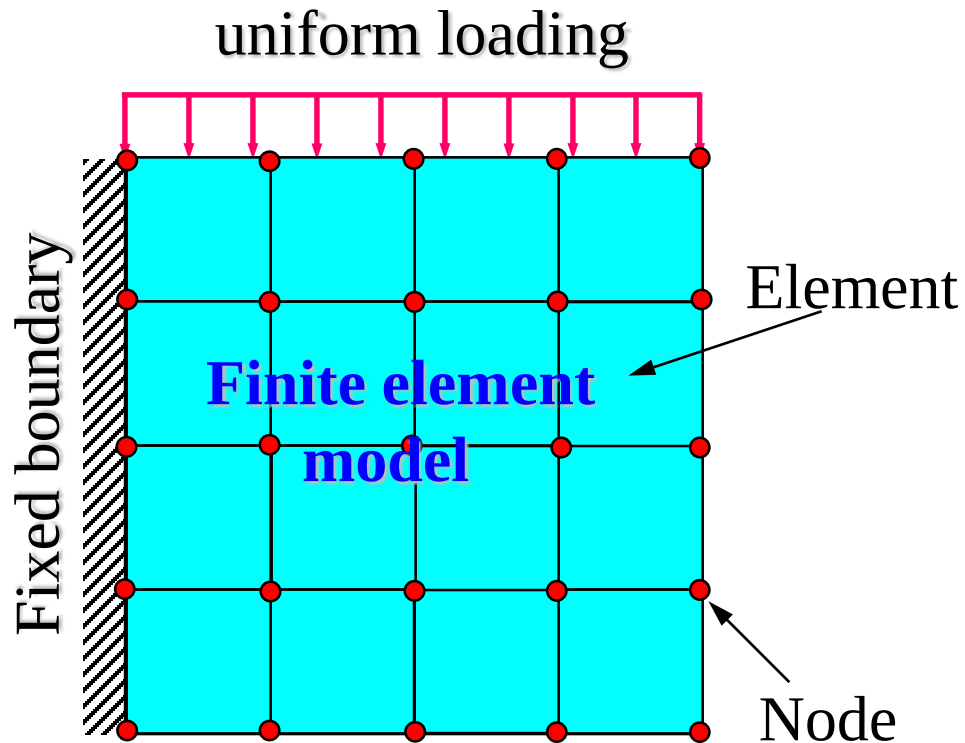
Element Type

Before meshing the user must chose between different element types:

- Beam, Shell or Solid
- First or second order
- Triangle or quadrilateral basis shape

When this is done, meshing of the structure can begin

Finite Element Analysis



- Approximate method
- Geometric model
- Node
- Element
- Mesh
- Discretization

Problem: Obtain the stresses/strains in the plate

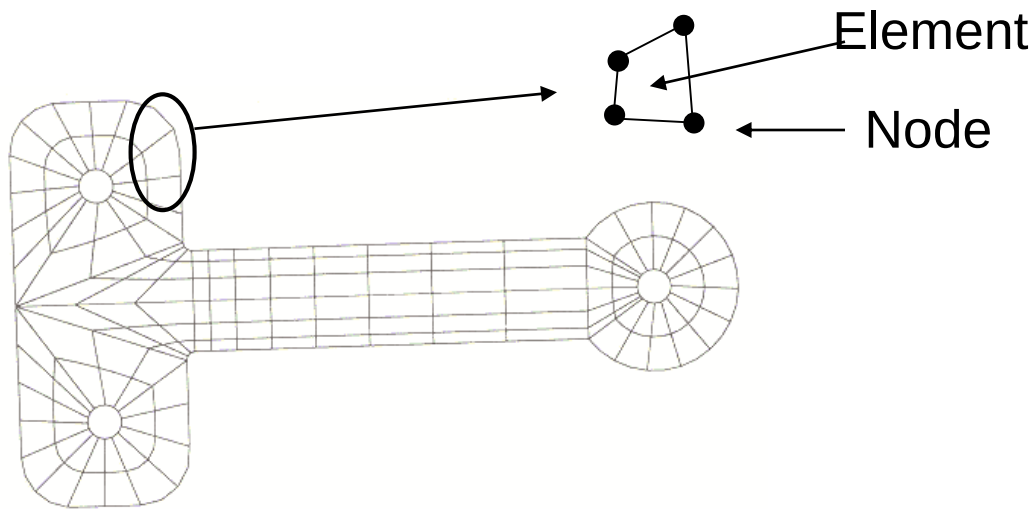
(معماری) قطعه یا طاقی که فقط از یک طرف به دیوار وصل است (مثل طاق بالکن)، بلوک یا طاقک پیش آمده از دیوار (که بالکن یا قرنیز بر آن اتکا دارد)، (تیر یا ستون افقی که فقط از یک طرف به دیوار وصل است) تیر سرآزاد، ستون سرآزاد cantilever

Engineering design

Finite element analysis

FEM analysis scheme

Step 1: Divide the problem domain into non overlapping regions (“**elements**”) connected to each other through special points (“**nodes**”)



Finite element model

Engineering design

Finite element analysis

FEM analysis scheme

Step 2: Describe the behavior of each element

Step 3: Describe the behavior of the entire body by putting together the behavior of each of the elements (this is a process known as “**assembly**”)

2.0 Finite Element Method

- Two interpretations

1. Physical Interpretation:

The continuous physical model is divided into finite pieces called elements and laws of nature are applied on the generic element. The results are then recombined to represent the continuum.

2. Mathematical Interpretation:

The differential equation representing the system is converted into a variational form, which is approximated by the linear combination of a finite set of trial functions.

2.1 FEM Notation

Elements are defined by the following properties:

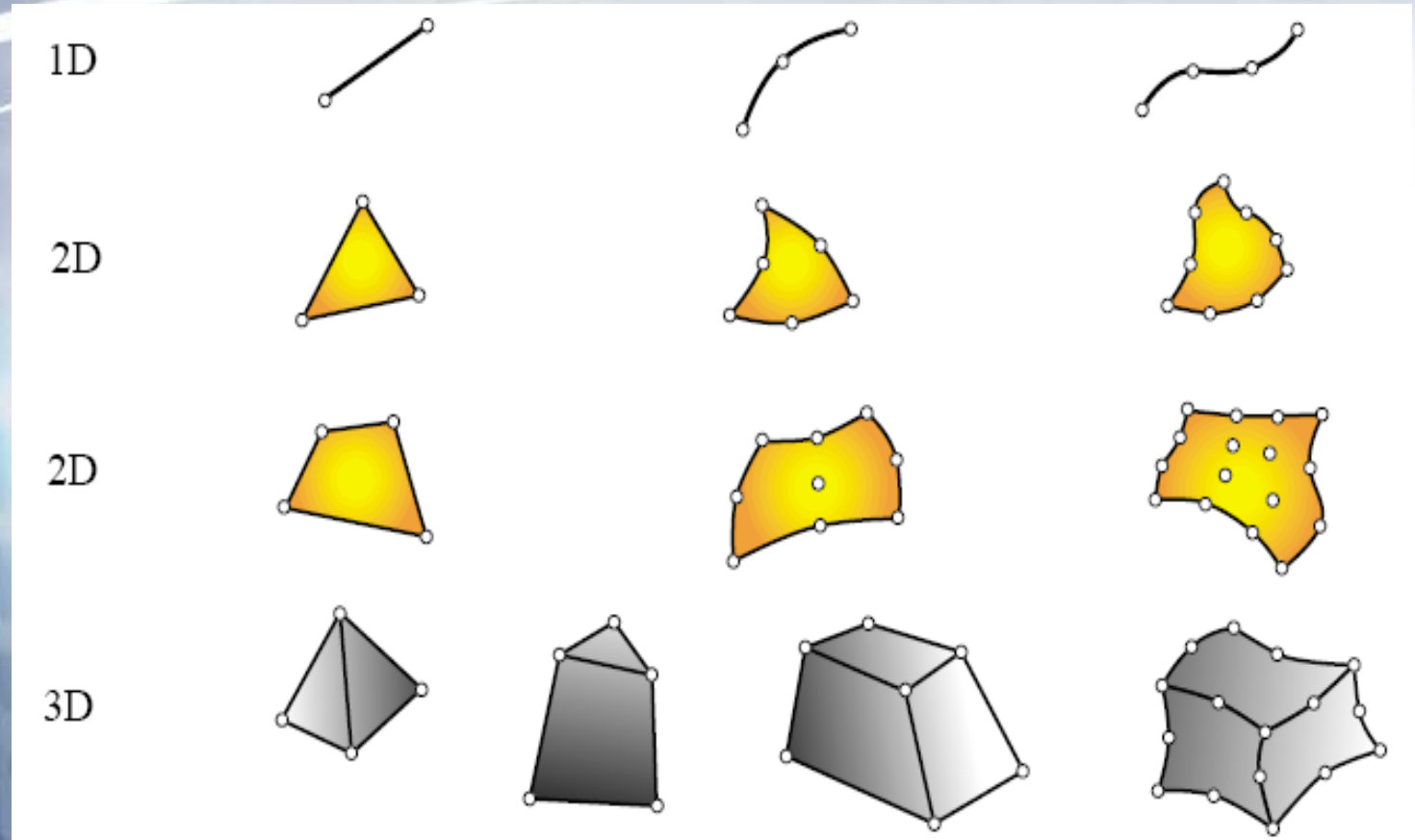
1. Dimensionality
2. Nodal Points
3. Geometry
4. Degrees of Freedom
5. Nodal Forces

(Non homogeneous RHS of the DE)

RHS (Rectangular Hollow Section)

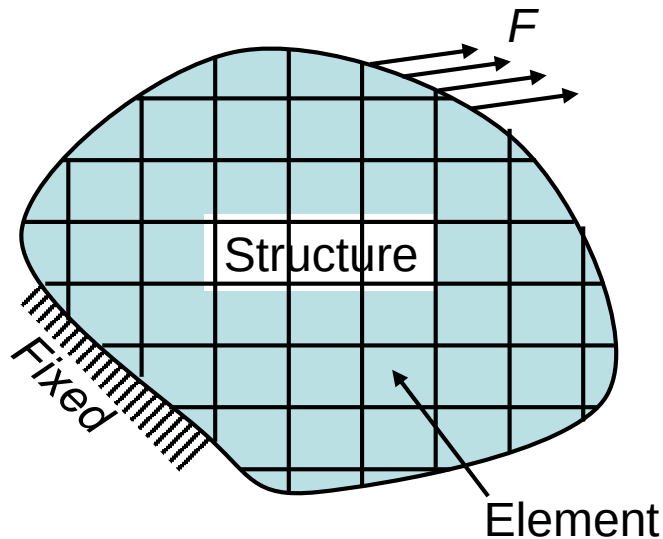
DE (Differential Equations)

2.2 Element Types

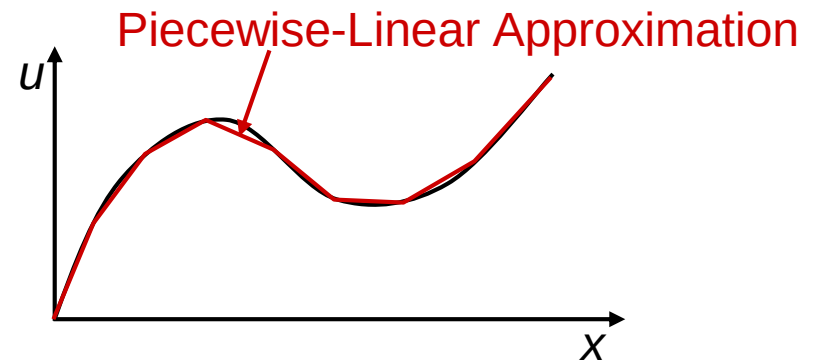


INTRODUCTION TO FINITE ELEMENT METHOD

- What is the finite element method (FEM)?
 - A technique for obtaining approximate solutions to boundary value problems.
 - Partition of the domain into a set of simple shapes (element)
 - Approximate the solution using piecewise polynomials within the element

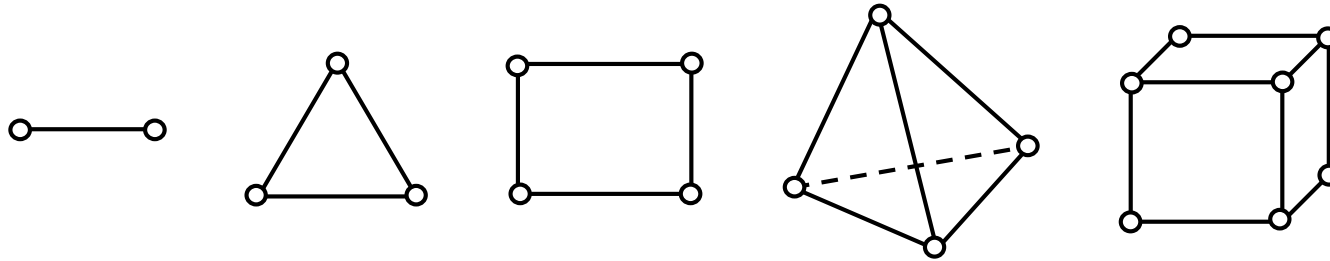


$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + b_x = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + b_y = 0 \end{cases}$$

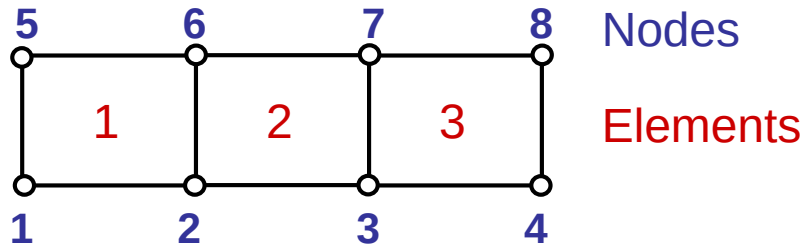


INTRODUCTION TO FEM *cont.*

- How to discretize the domain?
 - Using simple shapes (element)



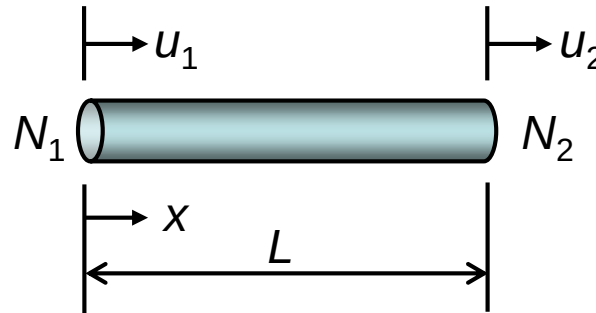
- All elements are connected using “nodes”.



- Solution at Element 1 is described using the values at Nodes 1, 2, 6, and 5 (Interpolation).
 - Elements 1 and 2 share the solution at Nodes 2 and 6.

INTRODUCTION TO FEM *cont.*

- Finite element analysis solves for nodal values.
 - All others can be calculated (or interpolated) from nodal solutions



- Displacement within the element

$$u(x) = a + bx = u_1 + \frac{u_2 - u_1}{L} x = \frac{L - x}{L} u_1 + \frac{x}{L} u_2$$

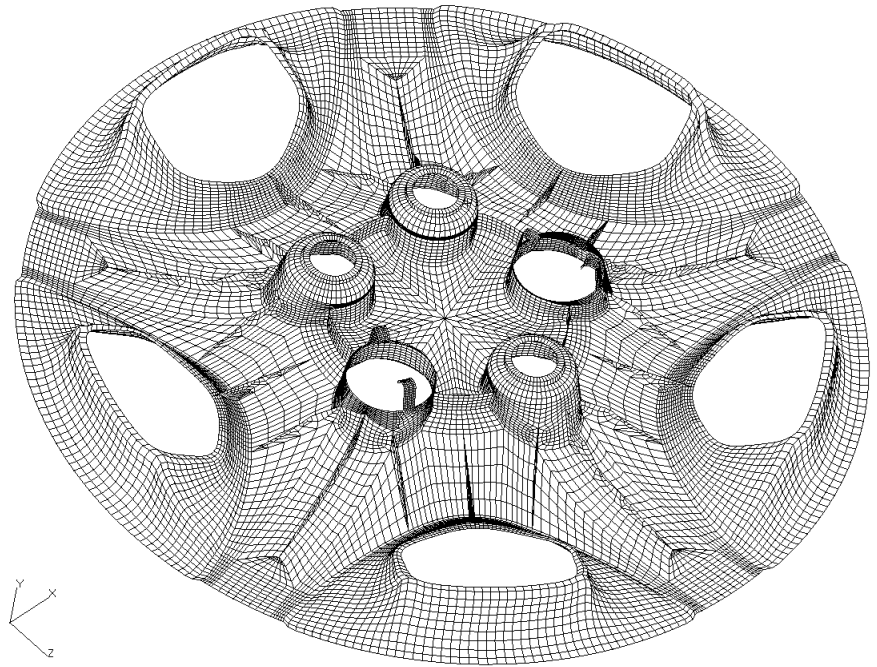
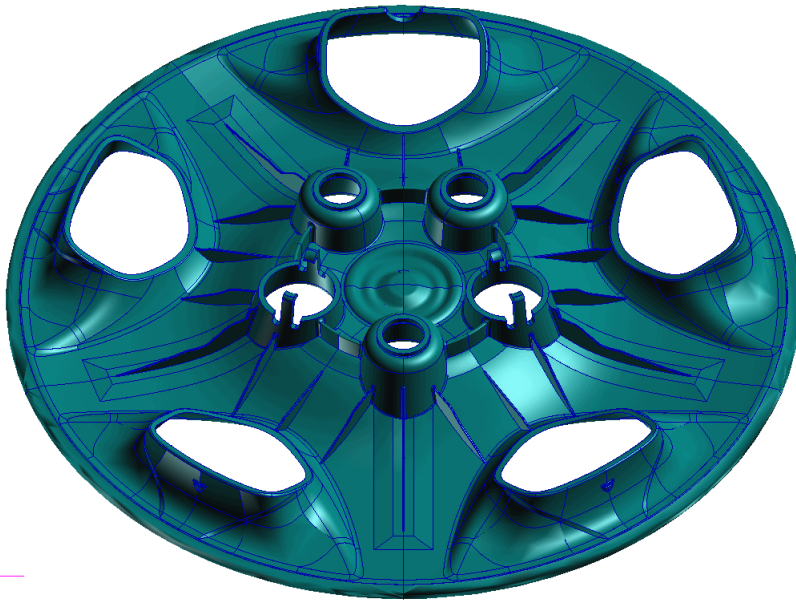
- Strain of the element

$$\varepsilon(x) = \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{L} u_1 + \frac{1}{L} u_2$$

Interpolation (Shape) Function

EXAMPLE: FINITE ELEMENTS

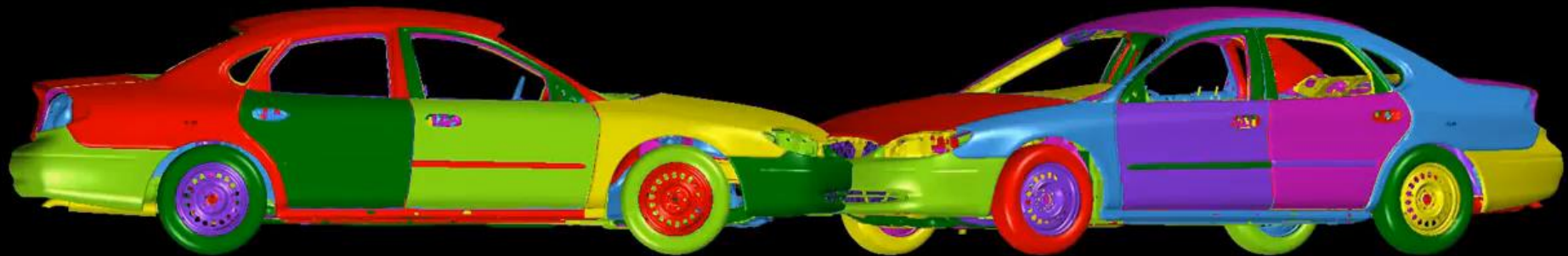
- Plastic Wheel Cover Model
 - 30,595 Nodes, 22,811 Elements
 - Matrix size is larger than $150,000 \times 150,000$.
 - MSC/PATRAN (Graphic user interface)



روش اجزای محدود (FEM)

TWO-VEHICLE IMPACT (NCAC V01)

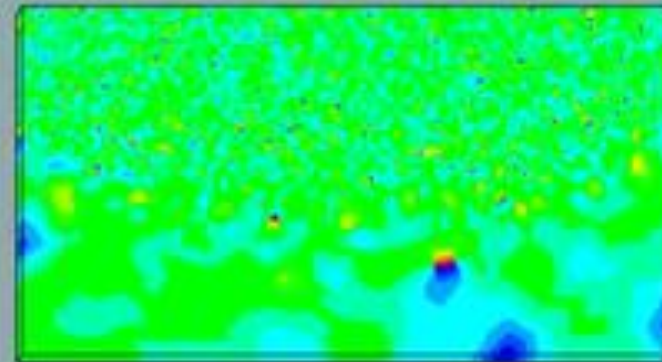
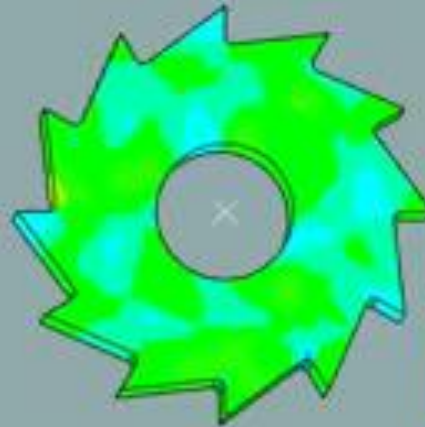
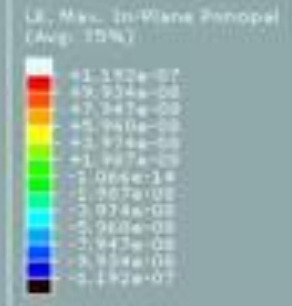
STEP 1 TIME: 0.000000



ETA/POST

روش اجزای محدود (FEM)

Step: Step-1 Frame: 2



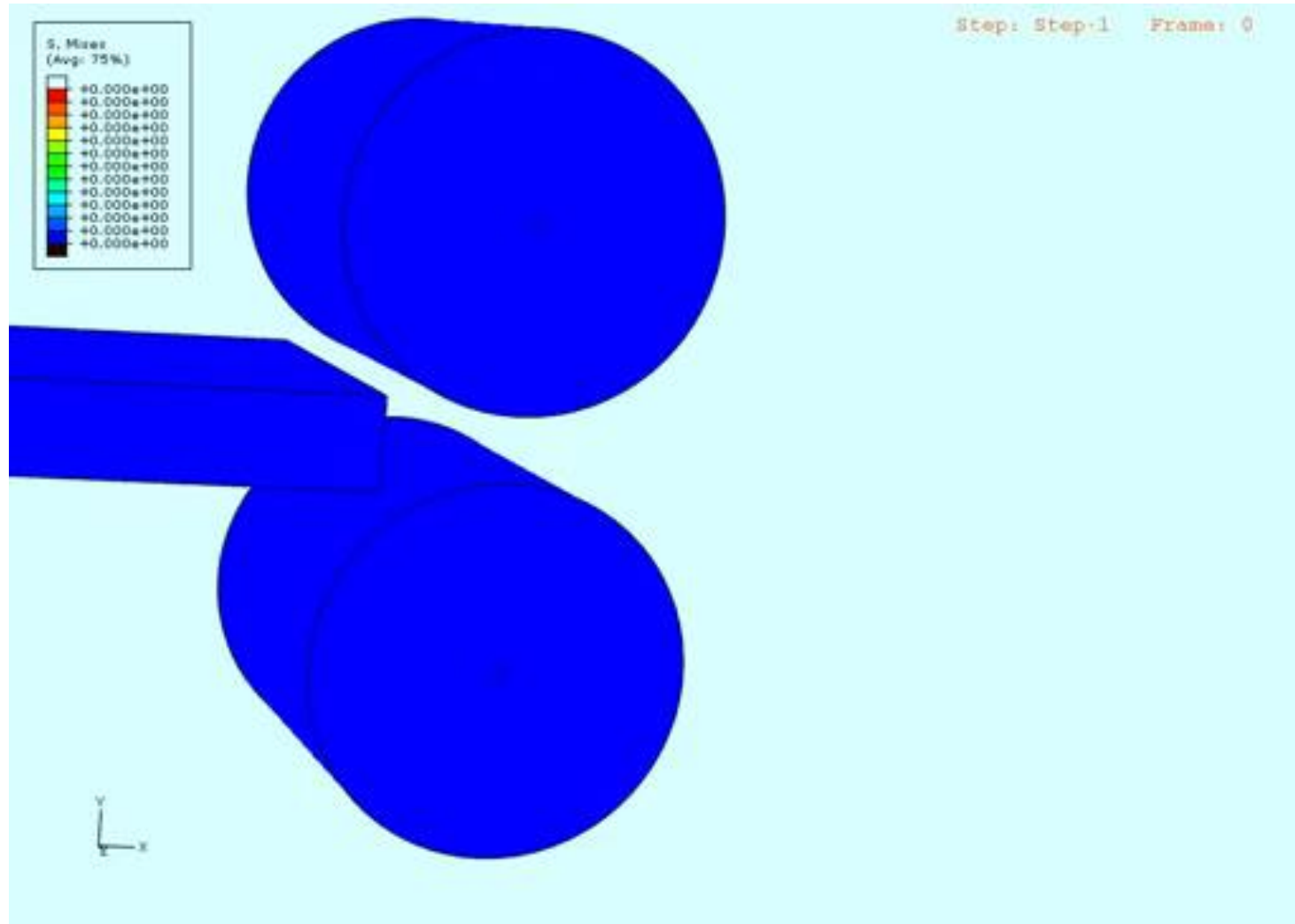
ODB: FEMM015_1.odb - Abaqus/Explicit Version 6.7-1 Sat Aug 21 14:15:24 Central Daylight Time 2009



Step: Step-1
Increment: 0; Step-Time = 0.0
Primary Var: LE, Max. In-Plane Principal
Deformed Var: U; Deformation Scale Factor: 1E+005e+00

روش اجزای محدود (FEM)

ABAQUS: Rolling



روش اجزای محدود (FEM)

FEM simulation of heating disc brake with ABAQUS

THE END



Thank You

