بسم اللــه

الرحمن الرحيم

دانشگاه یزد

مجتمع فنی‌مهندسی

دانشکده مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

با موضوع:

تحلیل عددی میله الاستیک- پلاستیک تحت اثر بار دینامیکی به روش MLPG

استاد راهنما: دکتر علی‌رضا شفیعی

استاد مشاور: دکتر سهیل محمدی

پژوهش و تدوین: حمیدرضا میرزاخانلو

تیر ۱۳۸۵

تقدیم به

بی‌بی **فاطمه زهراء** سلام‌الله علیها

و

مادر مهربانم

که صبر و امیدش درس جاودانه زندگی برای من است.

و

پدر عزیزم

که تلاش و کوشش همیشگی در زندگی درس گرانبهای او برای من است.

قدردانی

خداوند مهربان را سپاس‌گزارم که همیشه و در همه حال بهترین یار و یاور بنده‌ی خویش است و هر تلاش و کوششی در سایه‌ی لطف و عنایت او به سرانجام نیک خواهد رسید. امیدوارم تلاش چندساله‌ام در تحصیل دانش مورد رضای درگاهش و اولیای پاکش قرار گرفته باشد.

از پدر و مادر مهربانم که همیشه من را مورد محبت خود قرار داده‌اند و در تمام مدت تحصیل با صبر و بردباری مثال‌زدنی خویش زحمت من را به جان خریدند، ممنون و سپاسگزارم.

از جناب آقای دکتر علی‌رضا شفیعی که قبول زحمت کردند و استاد راهنمای بنده در این پایان‌نامه بودند، بسیار متشکر هستم. خوش‌رویی و صبر و دقت نظر ایشان در انجام و تدوین این پایان‌نامه برای همیشه در یاد من خواهد ماند.

همچنین از جناب آقای دکتر سهیل محمدی که به عنوان استاد مشاور برای من بسیار زحمت کشیدند و راهنمایی‌های ارزنده‌ای چه در انجام پایان‌نامه و چه در تدوین آن ارایه نمودند، تشکر فراوان می‌نمایم.

از تمام دوستانی که در مدت حضورم در این دانشگاه با آنان همراه بودم و من را در انجام این پایان‌نامه یاری کردند، به‌خصوص آقای مهندس شهاب‌الدین معتمدی موسوی که از کمک‌های ایشان بهره فراوان بردم و همچنین آقایان مسعود مسیح‌تهرانی، مهدی جزینی، مهدی فلسفیون، سیدحسین موسوی، محمدمهدی ذوالفقاری و سیدمهدی حسینی سپاس‌گزارم.

یاد همه‌ی این عزیزان در ذهن من جاودانه خواهد بود. برای ایشان از خدای متعال طول عمر با عزت و موفقیت در همه‌ی عرصه‌های زندگی در پناه لطف لایزالش آرزومندم.

حسبنا الله و نعم الوکیل

بسمه تعالی

دانشگاه یزد

مدیریت تحصیلات تکمیلی

صورتجلسه دفاعیه پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

جلسه دفاعیه پایان نامه تحصیلی آقای حمیدرضا میرزاخانلو

دانشجوی کارشناسی ارشد مجتمع فنی و مهندسی دانشگاه یزد، در رشته/ گرایش مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی

تحت عنوان: « تحلیل عددی میله الاستیک- پلاستیک تحت اثر بار دینامیکی به روش MLPG »

و تعداد واحد: ۶ درتاریخ ۱۳ / ۴ / ۱۳۸۵

با حضور اعضای هیات داوران متشکل از :

	نام و نام خانوادگی	امضاء
۱-استاد راهنما	آقای دکتر علیرضا شفیعی	
۲- استاد مشاور	آقای دکتر سهیل محمدی	
۳-داور خارج از گروه	آقای دکتر حسینعلی رحیمی	
۴-داور داخل گروه	آقای دکتر منصور رفیعیان	

تشکیل گردید و پس از ارزیابی پایان نامه توسط هیات داوران، با درجه عالی و نمره به عدد ۱۷٫۹ به حروف هفده و نه دهم مورد تصویب قرار گرفت.

نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه (ناظر)

نام ونام خانوادگی: آقای دکتر سیدسعید مهینی

امضاء:

فهرست

فصل سوم: حل مساله در حالت الاستودینامیک

فصل چهارم: حل مساله در حالت پلاستیک

فصل پنجم: نتایج و پیشنهادات

چکیده

روش MLPG از جمله روش‌های فاقد مش می‌باشد که با استفاده از فرم محلی پتروف-گالرکین و با بهره‌گیری از تقریب MLS برای تخمین تابع میدان، به حل مسایل مهندسی[اعم از مکانیک جامدات، مکانیک سیالات و سازه‌ها] می‌پردازد. روش‌های فاقد مش برای به‌دست آوردن یک سیستم معادلات جبری برای کل دامنه‌ی مساله بدون استفاده از مش به‌کار می‌روند. این روش‌ها دامنه‌ی مساله و مرزهای آن را با استفاده از یک مجموعه‌ی گره که روی دامنه‌ی مساله توزیع شده‌اند، مشخص می‌سازند. این گره‌ها به‌وجودآورنده‌ی مش نیستند و این به معنی این است که احتیاجی به اطلاعات راجع به رابطه‌ی مستقیم بین گره‌ها نیست.

این پژوهش به منظور بررسی رفتار میله‌ی الاستیک-کاملا پلاستیک تحت اثر بار دینامیکی به روش MLPG انجام گرفته‌است. در این راستا ابتدا به بررسی اجمالی روش‌های فاقد مش و تاریخچه‌ی آن‌ها پرداخته شده‌است. سپس الگوریتم کلی روش‌های فاقد مش همراه با اصول لازم برای تحلیل مسایل به کمک روش MLPG از قبیل فرم ضعیف، تابع وزن و تابع شکل بیان شده‌است. در ادامه ایده و فرمول‌بندی روش MLPG همراه با نحوه‌ی اعمال شرایط مرزی و حل استاتیکی چند مساله ارایه شده‌است. پس از آن فرمول‌بندی دینامیکی MLPG و حل دینامیکی میله و تیر الاستیک انجام گرفته‌است. در پایان نیز میله‌ی الاستیک-کاملا پلاستیک تحت اثر بار دینامیکی مورد تحلیل قرار گرفته‌است..

با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از روش MLPG در تحلیل مسایل الاستیک و الاستیک-کاملا پلاستیک دینامیکی و مقایسه‌ی آن‌ها با نتایج حاصل از روش‌های اجزای محدود و EFG و همچنین نتایج تحلیلی مشخص شد که روش MLPG دقت قابل قبولی در تحلیل مسایل مکانیک جامدات دارد و می‌تواند به عنوان یک جایگزین مناسب برای روش اجزای محدود و بدون داشتن مشکلات استفاده از مش به‌کار رود.

فصل اول:

مقدمه

۱-۱ روش‌های فاقد مش[1]

طراحی سیستم‌های مهندسی پیشرفته احتیاج به ابزارهای طراحی کامپیوتری[2] دارد. در بیشتر این ابزارها تکنیک‌های شبیه سازی کامپیوتری برای مدل‌کردن و مشخص‌کردن مشخصات فیزیکی یک سیستم مهندسی به‌کار می‌رود. این شبیه‌سازی احتیاج به حل معادلات دیفرانسیل معمولی یا پاره‌ای پیچیده‌ای دارد که خصوصیات این سیستم را تولید می‌کند. به طور معمول این معادلات پیچیده به کمک روش‌های عددی مانند روش اجزای محدود[3] و روش تفاضل محدود[4] حل می‌شوند. در این روش‌ها و همچنین روش احجام محدود[5] با تقسیم جسم به اجزایی به نام مش و اعمال اصول مناسب، معادلات به‌صورت یک مجموعه معادلات جبری برای مش‌ها تقریب زده می‌شوند. سیستم معادلات جبری برای کل دامنه، به‌وسیله‌ی برهم‌نهی مجموعه‌ی معادلات جبری برای همه‌ی مش‌ها به‌دست می‌آید.

استفاده از المان به عنوان زیربنای روش اجزای محدود محدودیت‌های زیر را دارد[۱]:

- تولید مش مناسب فرآیندی نسبتا زمان‌بر می‌باشد.
- در مسایل غیرخطی مانند تغییر شکل‌های بزرگ به‌دلیل اعوجاج مش‌ها دقت حل کاهش می‌یابد.

---

[1] Mesh Free Methods(Meshless Methods) روش‌های بدون المان، روش‌های فاقد المان‌بندی، روش‌های فاقد مش
[2] Computer-Aided Design (CAD)
[3] Finite Element Method
[4] Finite Difference Method
[5] Finite Volume Method

- در محاسبه‌ی مشتقات پاسخ سیستم (مانند تنش‌ها در مسایل مکانیک جامدات) مقادیر به‌دست آمده از روش اجزای محدود عمدتا دارای ناپیوستگی و دقت کمتری می‌باشند.

- شبیه‌سازی آغاز و رشد ترک در راستای غیرمشخص، تکه‌تکه شدن[6] و شکست به دلیل از بین رفتن المان‌ها بسیار دشوار است. هر چند راه‌کارهای مناسبی برای بازآرایی شبکه‌ی المان‌ها[7] در این‌گونه مسایل گسترش یافته، با این حال این روش‌ها زمان‌بر و بسیار دشوار و پیچیده هستند و بیشتر برای مسایل دوبعدی مناسب می‌باشند.

- روندهای تحلیل وفقی[8] عمدتا نیازمند فرآیند نگاشت متغیرهای محدوده‌ی مساله، میان مش قدیم به مش جدید برای تحلیل در گام زمانی کنونی می‌باشند که این امر در عین افزایش زمان محاسبات، از دقت پاسخ می‌کاهد.

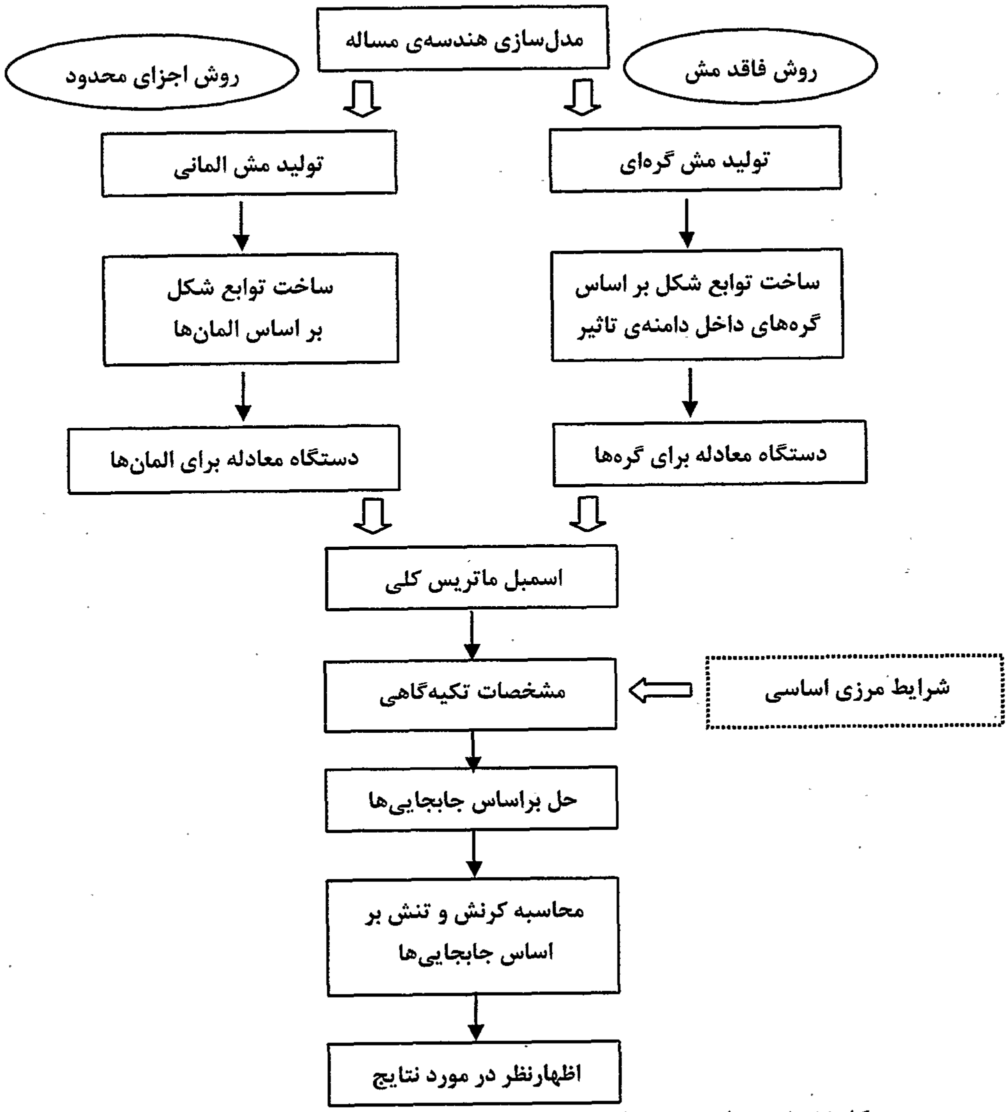
روش‌های فاقد مش برای به‌دست آوردن یک سیستم معادلات جبری برای کل دامنه‌ی مساله بدون استفاده از مش به‌کار می‌روند. این روش‌ها دامنه‌ی مساله و مرزهای آن را با استفاده از یک مجموعه‌ی گره که روی دامنه‌ی مساله توزیع شده‌اند، مشخص می‌سازند. این گره‌ها به‌وجود آورنده‌ی مش نیستند و این به معنی این است که احتیاجی به اطلاعات راجع به رابطه‌ی مستقیم بین گره‌ها نیست که این مساله در افزایش یا کاهش تعداد گره‌ها در زمان و مکان دلخواه و لازم، انعطاف به‌وجود می‌آورد. برای مثال در مسایل تمرکز تنش و رشد ترک می‌توان با افزایش تعداد گره‌ها حول محل تمرکز تنش یا ترک نتایج بهتری به‌دست آورد.

حداقل نیاز یک روش فاقد مش این است که به یک مش از پیش تعیین شده، دست کم برای درون‌یابی متغیر میدان، احتیاج نداشته باشد و حالت ایده‌آل آن این است که در هیچ مرحله‌ای از حل مساله با هندسه‌ی دلخواه و تحت هر شرایط مرزی احتیاج به مش نداشته باشد. ?

مراحل اصلی یک روش فاقد مش و روش اجزای محدود در شکل(۱-۱) نشان داده شده‌است.

---

[6] Fragmentation
[7] Remeshing
[8] Adaptive analysis



شکل(۱-۱) : مراحل روش اجزای محدود و روش‌های فاقد مش(مبتنی بر فرم ضعیف)

همان‌طور که مشاهده می‌شود، این روش‌ها در مرحله‌ی تولید مش از هم متفاوت می‌شوند و تفاوت اساسی در ساخت توابع شکل[۹] می‌باشد. در روش اجزای محدود ساخت توابع شکل با استفاده از المان‌ها صورت می‌گیرد که در مختصات طبیعی این توابع شکل برای تمام المان‌های یکسان، مشابه می‌باشند. در حالی که توابع شکل در روش‌های فاقد مش بر پایه‌ی گره‌ها و در حین حل مساله و نه قبل از آن ساخته می‌شوند و بر اساس مکان آن‌ها، توابع شکل تغییر می‌کنند. در جدول(۱-۱) روش‌های فاقد مش با روش اجزای محدود مقایسه شده‌است[۱].

[9] Shape functiom

ردیف	موضوع	روش اجزای محدود	روش فاقد مش
۱	مش المانی	بلی	خیر
۲	تولید مش	به دلیل احتیاج به رابطه‌ی بین المان‌ها سخت می‌باشد.	نسبتا آسان است و احتیاج به رابطه‌ی بین گره‌ها ندارد.
۳	ساخت تابع شکل	بر پایه‌ی المان‌ها	بر پایه‌ی گره‌ها
۴	خصوصیت تابع شکل	شرط دلتای کرونکر را ارضا می‌کند؛ برای همه‌ی المان‌های همسان معتبر است.	بسته به روش به کار برده‌شده ممکن است شرط دلتای کرونکر را ارضا نماید یا ننماید؛ برای هر نقطه متفاوت است.
۵	دستگاه ماتریس سختی گسسته	دارای پهنای باند محدود؛ متقارن	دارای پهنای باند محدود؛ بسته به روش به کار برده‌شده ممکن است متقارن یا نامتقارن باشد.
۶	اعمال شرایط مرزی اساسی	آسان و استاندارد	بسته به روش به کار برده‌شده ممکن است روش‌های ویژه‌ای به کار رود.
۷	سرعت محاسبات	سریع	بسته به روش به کار برده‌شده ۱/۱ تا ۵۰ بار کندتر از روش اجزا محدود می‌باشد.
۸	دقت	در مقایسه با روش فواصل محدود دقیق‌تر است.	در مقایسه با روش اجزای محدود می‌تواند دقت بیش‌تری داشته باشد.
۹	مرحله‌ی توسعه‌یافتگی	بسیار خوب توسعه یافته است.	در مرحله‌ی توسعه و تحقیق است.
۱۰	نرم‌افزارهای اقتصادی در دسترس	زیاد	خیلی کم

جدول(۱-۱) : مقایسه روش‌های فاقد مش و روش اجزای محدود

در واقع هیچ‌کدام از روش‌های فاقد مش واقعا ایده‌آل نیستند و می‌توان آن‌ها را به گروه‌های زیر تقسیم‌بندی کرد[۱] :

۱- روش‌هایی که به سلول‌های پس‌زمینه‌ای برای انتگرال‌گیری دستگاه ماتریس‌های سیستم در دامنه‌ی مساله که از فرم ضعیف[10] به‌دست آمده‌اند، نیاز دارند؛ مانند EFG[11] .

[10] Weak form
[11] Element Free Galerkin Method

۲- روش‌هایی که به سلول‌های پس‌زمینه‌ای برای انتگرال‌گیری از ماتریس‌های سیستم در دامنه‌ی مساله، به صورت محلی نیازمندند؛ مانند MLPG[12] .

۳- روش‌هایی که اصلا به مش احتیاج ندارند اما از دقت و پایداری کمتری برخوردارند؛ مانند روش کولوکیشن[۱۳] و روش تفاضل محدود با شبکه‌ی نامنظم[۱۴].

۴- روش‌های ذره‌ای که به ذره‌های از پیش‌تعیین‌شده برای حجم یا جرمشان نیازمندند؛ مانند SPH[۱۵] .

در جدول زیر تعدادی از روش‌های فاقد مش ارایه شده‌اند[۷-۲].

روش تخمین تابع	فرم دستگاه معادلات	مرجع	روش
Integral representation	Strong form	2	Smooth particle hydrodynamics
Integral representation (RKPM)	Strong form or Weak form	3	Reproducing kernel particle method
MLS approximation, Galerkin method	Weak form	4	Diffuse element method
MLS approximation, Galerkin method	Weak form	5	Element free Galerkin (EFG) method
MLS approximation, Galerkin method	Local weak form	6	Meshless local Petrov-Galerkin (MLPG) method
Finite differential representation (Taylor series), MLS approximation	Strong form	7	Finite point method

جدول(۱-۲) : روش‌های مختلف فاقد مش

۱-۲ تاریخچه

سرمنشا روش‌های فاقد مش به حدود سه دهه قبل برمی‌گردد. با این‌حال کار انجام‌شده روی آن‌ها تا قبل از چند سال اخیر چندان قابل توجه نبوده‌است. در سال‌های اخیر با طرح مسایل

[12] Meshless Local Petrov Galerkin Method — روش فاقد مش محلی پتروف-گالرکین
[13] Collocation Method
[14] FDM using irregular grids
[15] Smoothed Particle Hydrodynamics Method

جدید در عرصه‌ی مهندسی، روش‌های عددی کارآمدتر خصوصا روش‌های فاقد مش در مرکز توجه محققان قرار گرفته‌است و تلاش‌های گسترده‌ای جهت توسعه و بهبود این روش‌ها در حال انجام است.

قدیمی‌ترین روش فاقد مش روش SPH است که اولین بار در سال ۱۹۷۷ توسط لوسی[16][۲] معرفی شد. وی از این روش در مدل‌سازی مسایل نجومی با دامنه‌ی نامحدود از قبیل ستارگان درحال انفجار و ابرهای گرد و غبار استفاده نمود.

در سال ۱۹۹۳ وینگ کم لیو[17] و همکارانش[۳] با کار بر روی روش SPH و افزودن جمله‌ای به تابع کرنل جهت تصحیح عملکرد آن روی مرز، روش RKPM[18] را معرفی کردند که نسبت به روش SPH بسیار دقیق‌تر بود.

به موازات توسعه روش SPH و چندین سال پس از آن، مسیر دیگری در توسعه تقریب‌های فاقد مش گشوده شد که اساس آن بر استفاده از تقریب MLS[19] بود. در سال ۱۹۹۲ نیرولز[20] و همکارانش[۴] برای اولین بار از تقریب MLS در روش گالرکین استفاده کردند و روش حاصل را DEM[21] نامیدند. سپس بلیچکو[22] و همکارانش[۵] در سال ۱۹۹۴ با بررسی این ایده نوین و افزودن برخی جملات به فرمولاسیون روش DEM روشی بسیار دقیق‌تر به‌دست آورده، آن را EFG نامیدند. این دسته از روش‌ها از پیوستگی و پایداری مناسبی برخوردار هستند ولی از نظر محاسباتی نسبت به روش SPH پرهزینه‌تر می‌باشند.

روش MLPG از جمله روش‌های فاقد مش می‌باشد که با استفاده از فرم محلی پتروف-گالرکین و با بهره‌گیری از تخمین MLS برای تخمین تابع میدان به حل مسایل مهندسی

---

[16] Lucy
[17] Wing Kam Liu
[18] Reproducing Kernel Particle Method
[19] Moving Least Square Method
[20] Nayroles
[21] Diffuse Element Method
[22] Belytschko

[مکانیک] می‌پردازد. این روش در سال ۱۹۹۸ توسط اتلوری[23] و ژو[24][۶] پایه‌گذاری شد. ایشان در سال ۲۰۰۰ این روش را برای حل مسایل الاستواستاتیک به کار بردند[۷].

در سال ۲۰۰۱، MLPG توسط جی آر لیو[25] و وای تی گو[26][۸] برای حل مسائل ارتعاش آزاد و اجباری به کار برده شد.

در سال ۲۰۰۵، چینگ[27] و ین[28][۹] اثرات بارهای مکانیکی و گرمایی روی جامدات الاستیک دوبعدی را به کمک این روش بررسی کردند.

۱-۳ پژوهش حاضر

در این پژوهش سعی می‌شود تا با روش MLPG یک میله‌ی الاستیک-کاملا پلاستیک تحت اثر بار دینامیکی بررسی شود. جواب تحلیلی این مساله در مرجع[۱۰] ارایه شده‌است. همچنین این مساله با روش اجزای محدود[۱۱] و روش فاقد مش EFG[۱۲] تحلیل شده است و در این نوشتار تحلیل این مساله به روش MLPG ارایه می‌شود و نتایج به‌دست‌آمده با نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی، اجزای محدود و EFG مقایسه خواهد شد.

در فصل اول ابتدا کلیاتی راجع به روش‌های فاقد مش بیان شد. سپس تاریخچه‌ای از این روش‌ها و روش MLPG عنوان شد. در این قسمت هم نمای کلی این پژوهش ارایه می‌شود.

در فصل بعد ابتدا الگوریتم عمومی یک روش فاقد مش همراه با مفاهیم مرتبط با آن بیان می‌شود. سپس اصول فرم‌های ضعیف، روش MLS، نحوه‌ی تشکیل تابع شکل، ایده و فرمول‌بندی

[23] Atluri
[24] Zhu
[25] G.R.Liu
[26] Y.T.Gu
[27] H.K. Ching
[28] S.C.Yen

روش MLPG در حالت الاستواستاتیک و فرمول‌بندی روش MLPG برای تیرهای نازک همراه با مثال عددی ارایه خواهد شد.

در فصل سوم با بیان فرمول‌بندی دینامیکی MLPG و روش نیومارک برای انتگرال‌گیری عددی، مثال‌های الاستودینامیک ارایه خواهد شد.

در فصل چهارم ضمن توضیح الگوریتم حل پلاستیک مساله و روش نیومارک غیرخطی برای حل مسایل پلاستیک، روش MLPG برای تحلیل میله‌ی الاستیک-کاملا پلاستیک تحت اثر بار دینامیکی به‌کار برده می‌شود.

در فصل آخر نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش جمع‌بندی شده و مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از روش MLPG با نتایج روش‌های اجزای محدود و EFG انجام می‌شود و در انتها پیشنهاداتی برای ادامه‌ی کار ارایه خواهد شد.

فصل دوم:

روش MLPG

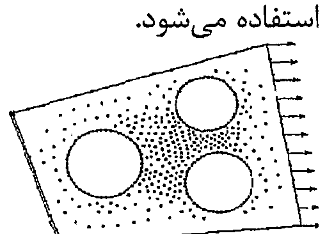
در این فصل ابتدا الگوریتم عمومی روش‌های فاقد مش توضیح داده می‌شود. سپس اصول فرم‌های ضعیف و نحوه‌ی تشکیل تابع شکل به روش MLS بیان خواهد شد. در ادامه ایده و فرمول‌بندی روش MLPG در حالت الاستواستاتیک بیان می‌شود. در بخش بعد روش اعمال شرایط مرزی و نحوه‌ی حل عددی مساله توضیح داده می‌شود. در بخش آخر هم تحلیل عددی چند مساله در حالت استاتیکی به روش MLPG ارایه می‌شود.

۲-۱ الگوریتم عمومی روش‌های فاقد مش

الگوریتم عمومی یک روش فاقد مش به شرح زیر است:

مرحله‌ی اول: تعریف دامنه

ابتدا بدنه‌ی جسم مدل می‌شود و دامنه‌ی مساله و مرزهای آن به‌وسیله‌ی مجموعه گره‌هایی که روی آن‌ها توزیع شده‌اند، نمایش داده می‌شوند. سپس شرایط مرزی و بارها در مدل فاقد مش مشخص می‌گردند(شکل۲-۱). چگالی گره‌ها در دامنه، بسته به دقت مورد نیاز آنالیز و منابع موجود تعیین می‌شود. این چگالی معمولا یکنواخت نیست و توزیع متراکم‌تر، معمولا در جاهایی که گرادیان تغییر شکل بزرگ‌تر است، استفاده می‌شود.



شکل(۲-۱) : مشخص‌کردن دامنه و شرایط مرزی و نیرویی