

مروری بر شبیه‌سازی پارچه با مدل جرم - فنر

Fabric Simulation Using Mass-Spring Model (Review)

وحیده مظفری، پدram پیوندی*

یزد، دانشگاه یزد، مجتمع فنی و مهندسی، دانشکده مهندسی نساجی، صندوق پستی ۷۴۱-۸۹۱۹۵

چکیده

شبیه‌سازی سه‌بعدی پارچه از موضوعات مورد توجه در مهندسی نساجی است. از مهم‌ترین کاربردهای شبیه‌سازی پارچه در نرم‌افزارهای طراحی پارچه است. در این نرم‌افزارها به کاربر اجازه داده می‌شود، شکل و افتایش پارچه روی بدن یا هر سطح خارجی را مشاهده کند. همچنین، اثر تغییر پارامترهای پارچه روی ظاهر افتایش پارچه را نیز مشاهده کند. این امکان مشاهده نحوه افتایش لباس پیش از پوشش توسط مصرف‌کننده، باعث کاهش هزینه‌ها و افزایش رضایت‌مندی مصرف‌کنندگان می‌شود. همچنین به تولیدکنندگان پوشاک در تأمین نیاز مصرف‌کنندگان کمک قابل توجهی می‌کند. بنابراین در طول سه دهه گذشته، برای شبیه‌سازی پارچه روش‌های متنوعی توسط پژوهشگران ارائه شده است. امروزه به‌طور کلی می‌توان این روش‌ها را به سه گروه هندسی، فیزیکی و ترکیبی دسته‌بندی کرد. از میان این روش‌ها، شبیه‌سازی براساس مدل فیزیکی جرم و فنر بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. این روش، سریع و انعطاف‌پذیر است و کارایی زیادی دارد. در این مقاله، پژوهش‌های انجام شده در زمینه مدل‌سازی پارچه با سامانه جرم و فنر مرور شده است. همچنین، انواع مش‌بندی‌های ارائه شده در این روش مدل‌سازی، نیروهای وارد بر مدل، اثر ابرکشسانی و روش‌های آن، روش‌های انتگرال‌گیری عددی برای حل معادلات، مسئله آشکارسازی و پاسخ برخورد تحلیل شده است. در نهایت، نمونه‌هایی از مثال‌های تجربی ارائه شده توسط پژوهشگران در زمینه شبیه‌سازی پارچه بیان شده است.

مقدمه

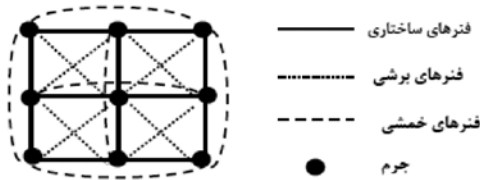
که نمی‌تواند رفتار پارچه را به‌طور واقعی شبیه‌سازی کند [۱، ۲]. در روش‌های فیزیکی، پارچه با تعداد زیادی اجزای کوچک در نظر گرفته می‌شود. برای شبیه‌سازی رفتار پارچه، نیرو و انرژی مرتبط با هر عنصر محاسبه می‌شود. روش فیزیکی نسبت به روش هندسی بهتر می‌تواند رفتار پارچه را شبیه‌سازی کند. بنابراین، برای شبیه‌سازی پارچه با تغییر شکل‌های زیاد روش مناسبی است [۳-۶]. پژوهشگران با در نظر گرفتن مزایا و معایب هر دو روش فیزیکی و هندسی، روش‌های هیبریدی را مورد توجه قرار دادند که ترکیبی از این دو روش است [۷-۹]. روش‌های مدل‌سازی فیزیکی شامل مدل اجزای محدود [۱۰-۱۳]، مدل جزء حجم [۴]، مدل‌هایی برپایه

در طول سه دهه گذشته، برای شبیه‌سازی پارچه روش‌های متنوعی توسط پژوهشگران ارائه شده است. امروزه به‌طور کلی می‌توان این روش‌ها را به سه گروه هندسی، فیزیکی و ترکیبی دسته‌بندی کرد. در روش‌های هندسی، تغییر شکل‌های پیچیده پارچه با معادله‌های هندسی شبیه‌سازی می‌شود. در این روش، برای شبیه‌سازی، خواص فیزیکی پارچه به‌طور مثال جرم یا ضریب کشسانی پارچه در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین، به محاسبه معادلات پیچیده درباره حالت فیزیکی پارچه نیازی نیست. مزیت این روش ساده‌بودن و سرعت سریع در محاسبات است. عیب روش مزبور این است

کلمات کلیدی

شبیه‌سازی،
پارچه،
مدل جرم و فنر،
مدل فیزیکی،
مدل سه‌بعدی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار: peivandi@yazd.ac.ir



شکل ۱- مش مستطیلی برای مدل‌سازی رفتار پارچه.

فتر است که اولین بار Provot در ۱۹۹۵ ارائه داد. در این نوع مش‌بندی، مدل پارچه شامل یک شبکه چهارگوش از ذرات با دو جهت اصلی مطابق با جهت تار و پود است. هر ذره با همسایه خود به‌وسیله یک فتر اتصال دارد که این فترها برحسب نوع اتصال به سه گروه ساختاری، برشی و خمشی دسته‌بندی می‌شوند. ساختار مش مستطیلی در شکل ۱ نشان داده شده است [۲۰].

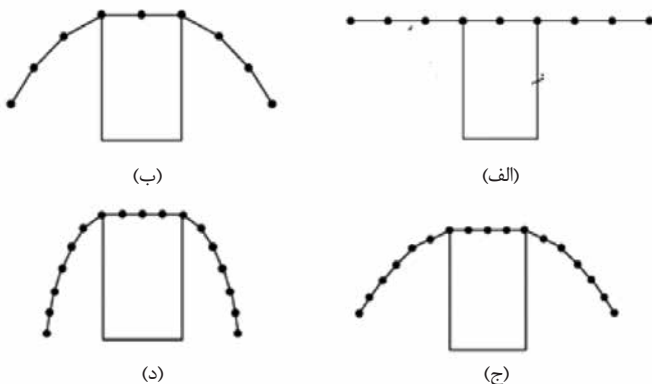
فترهای ساختاری: این فترها، هر ذره را با نزدیک‌ترین ذره در جهت افقی و عمودی اتصال می‌دهند. نقش فترهای ساختاری مدل‌سازی رفتار کششی و فشردگی پارچه است.

فترهای برشی: این فترها، هر ذره را با ذره مجاور خود در جهت مورب به هم اتصال می‌دهند. نقش فترهای برشی مدل‌سازی رفتار برشی پارچه است.

فترهای خمشی: این فترها، هر دو ذره را یک در میان در جهت افقی و عمودی اتصال می‌دهد. نقش فترهای خمشی مدل‌سازی رفتار خمش پارچه است.

مش چندلایه

Zang و همکاران در ۲۰۰۱، مش چندلایه را ارائه دادند. در این نوع مش‌بندی، فرایند شبیه‌سازی پارچه به چند بخش تقسیم می‌شود. ابتدا پارچه با یک مش ضخیم مدل‌سازی می‌شود. در بخش‌های بعدی، مش ظریف جایگزین مش ضخیم می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است. ابتدا پارچه در موقعیت اولیه است و با یک مش ضخیم مدل شده است (۲-الف). وقتی پارچه به موقعیت نشان داده شده در



شکل ۲- مش چندلایه برای مدل‌سازی رفتار پارچه: (الف) موقعیت اولیه با مش ابعاد بزرگ، (ب) موقعیت نهایی بخش اول، (ج) جایگزینی مش با ابعاد بزرگ با مش ابعاد کوچک‌تر و (د) موقعیت نهایی بخش دوم [۵۹].

کشسانی [۱۴، ۱۵] مدل‌های سامانه ذره‌ای [۱۶-۱۸] و مدل جرم و فتر است. از میان این مدل‌ها، مدل جرم و فتر روش ساده و قدرتمند برای شبیه‌سازی پارچه است. ایده کلی این مدل شامل یک مش از جرم‌های نقطه‌ای است که با اتصالات کشسان به یکدیگر متصل شده‌اند. مزیت مدل‌سازی جرم و فتر نسبت به سایر روش‌های مدل‌سازی فیزیکی مانند اجزای محدود، امکان حل معادلات به صورت بخشی است و نیاز نیست، تمام معادلات مدل به‌طور هم‌زمان با یکدیگر حل شوند [۱۹].

در این مقاله، پژوهش‌های انجام شده در زمینه استفاده از مدل جرم و فتر برای شبیه‌سازی پارچه مرور شده است. در بخش اول، مقدمه‌ای درباره روش‌های شبیه‌سازی پارچه بیان شده است. در بخش دوم، انواع مش‌های ارائه شده برای شبیه‌سازی پارچه برپایه مدل جرم و فتر بررسی شده است. در بخش سوم، نیروهای وارد بر هر ذره در مدل معرفی شده و روش‌های اندازه‌گیری این نیروها توضیح داده شده است. در بخش بعدی، مسئله ابرکشسانی و روش‌های ارائه شده توسط پژوهشگران برای حل این موضوع شرح داده شده است. در بخش پنجم، روش‌های مختلف انتگرال‌گیری برای حل معادله‌های حرکت ذره در مدل جرم و فتر ارائه شده است. در بخش ششم، آشکارسازی برخورد، بهینه‌سازی آشکارسازی برخورد و راه‌های پاسخ به آن بررسی شده است. در بخش انتهایی، نمونه‌هایی از مثال‌های تجربی ارائه شده توسط پژوهشگران در زمینه شبیه‌سازی پارچه بیان شده است.

مش‌بندی

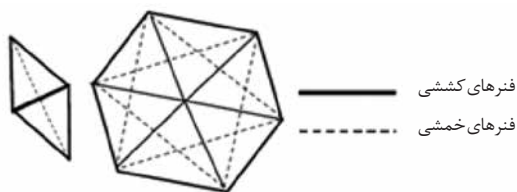
ایده کلی مدل جرم و فتر، شامل شبکه‌ای از نقاط جرم است که با اتصالات کشسان (فتر) به یکدیگر متصل شده‌اند. در این مدل، هر نقطه جرم دارای موقعیت، سرعت و شتاب است و به هر نیروی داخلی و خارجی که به آن اعمال می‌شود، عکس‌العمل نشان می‌دهد. با توجه به نحوه اتصالات این ذرات و فترها، انواع مختلف از مش‌بندی توسط پژوهشگران ارائه شده که در جدول ۱ آمده است.

مش مستطیلی

مش مستطیلی رایج‌ترین نوع مش استفاده شده در سامانه‌های جرم و

جدول ۱- انواع روش‌های مش‌بندی ارائه شده توسط پژوهشگران.

ردیف	نوع مش‌بندی	مراجع
۱	مستطیلی	[۷، ۲۰-۲۴، ۶۷، ۷۹، ۸۲، ۸۵، ۹۲، ۹۷-۹۹]
۲	چندلایه	[۵۹]
۳	واکنشی	[۶۰-۶۴]
۴	تطبیقی	[۵۶، ۵۷]
۵	مثلی	[۴۵، ۵۲، ۱۰۲]
۶	ساده شده	[۵۸، ۱۰۱]
۷	مش با فترهای نگاه‌دارنده	[۵۴، ۵۵]
۸	قوسی	[۵۳]



شکل ۵- مش مثلثی برای مدل‌سازی رفتار پارچه [۴۵]

این مش با توجه به شکل هندسی سطح برخورد، انطباق می‌یابد. نحوه انطباق مش بر این اساس است که اگر انحنا یک ناحیه از یک حد آستانه بیشتر شود، مش ظریف جایگزین مش ضخیم می‌شود. یک نمونه از این انطباق که در سه مرحله شکل گرفته است، در شکل ۴ نشان داده شده است [۵۶].

مش مثلثی

مش مثلثی توسط شل در ۲۰۰۹ معرفی شد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، اتصالات بین نقاط جرم از دو روش است:

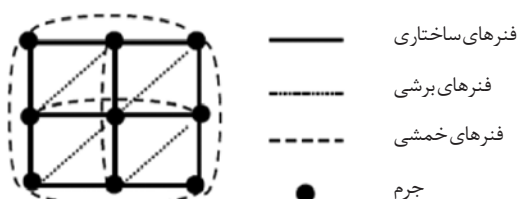
۱- فهرهای کششی: این فهرها در لبه‌های مش استفاده می‌شود و هر جرم را با همسایه خود اتصال می‌دهد. نقش این فهرها مدل‌سازی رفتار کششی و فشردگی پارچه است.

۲- فهرهای خمشی: این فهرها دو جرم مقابل از دو مثلث مجاور را که در یک ضلع مشترک هستند، به هم متصل می‌کند. نقش فهرهای خمشی مدل‌سازی رفتار خمش پارچه است.

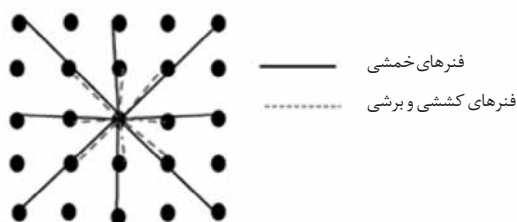
ساختار مش مثلثی به گونه‌ای است که می‌تواند رفتار برشی پارچه را مدل‌سازی کند. بنابراین، در این نوع مش‌بندی برای مدل‌سازی رفتار برشی پارچه به اتصالات با فنر نیاز نیست. مقایسه دو مش مثلثی و مستطیلی نشان می‌دهد، در ساختار مش مثلثی تعداد فهرهای متصل به هر جرم نسبت به مش مستطیلی کمتر است، بنابراین مش مثلثی به محاسبات کمتری نیاز دارد [۴۵].

مش ساده شده

Huang و همکاران در ۲۰۱۰، برای کم‌کردن حجم محاسبات، مش مستطیلی را ساده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد، وجود یک فنر برشی یا دو فنر برشی در یک جزء چهار گوش تفاوت معناداری در نتایج ندارد. بنابراین در مش ساده شده، یکی از فهرهای برشی در مش مستطیلی حذف شده است. ساختار مش ساده شده در شکل ۶ نشان داده شده است [۱۰۱].



شکل ۶- مش ساده شده برای مدل‌سازی رفتار پارچه [۱۰۱].



شکل ۳- مش واکنشی برای مدل‌سازی رفتار پارچه [۶۲].

شکل (۲-ب) می‌رسد، مش ظریف جایگزین مش ضخیم می‌شود (۲-ج) فرایند شبیه‌سازی ادامه پیدا می‌کند تا زمانی که پارچه به موقعیت نهایی برسد (۲-د).

از آنجا که مقدار محاسبات برای مش ضخیم کمتر از مش ظریف است، بنابراین استفاده از مش ضخیم در شروع شبیه‌سازی باعث افزایش سرعت شبیه‌سازی می‌شود [۵۹].

مش واکنشی

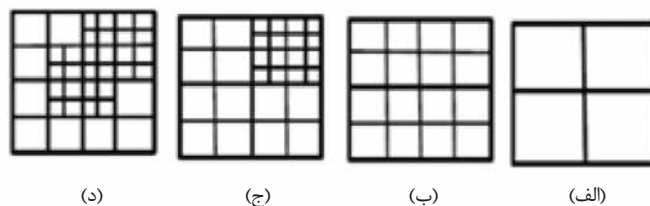
Choi و همکاران در ۲۰۰۲، مش واکنشی را ارائه دادند که بسیار شبیه مش مستطیلی است. اختلاف این مش‌بندی با مش مستطیلی در نحوه اتصالات جرم و فهرهاست. در این ساختار دو نوع اتصالات وجود دارد که در شکل ۳ نشان داده شده است.

۱- اتصالات بین تمام ذرات همسایه: این نوع اتصال مطابق با فهرهای کششی و برشی در مش مستطیلی است. نقش این فهرها مدل‌سازی رفتار کششی و برشی پارچه است.

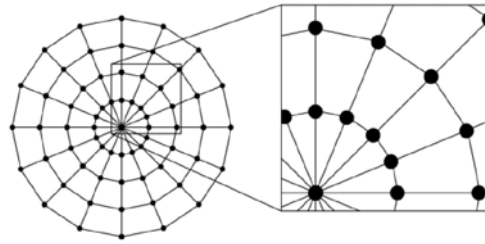
۲- اتصالات هر ذره با ذره بعدی: این نوع اتصال شبیه با فهرهای خمشی در مش مستطیلی است. تفاوت این اتصالات با فهرهای خمشی در مش مستطیلی این است که در مش واکنشی اتصالات یک در میان، افزون بر جهت افقی و عمودی، در جهت مورب نیز وجود دارد. نقش این فهرها مدل‌سازی رفتار خمشی پارچه است [۶۲].

مش تطبیقی

Borouchaki و Villard در ۲۰۰۵، روش جدید مش‌بندی با نام مش تطبیقی ارائه دادند. در این نوع مش‌بندی، نسبت به مش مستطیلی تعداد اجزای مش کاهش یافته که به کاهش در زمان محاسبات منجر می‌شود. در این روش، سطح پارچه ابتدا با مش ضخیم مدل‌سازی می‌شود. زمانی که پارچه روی سطحی (مثل بدن انسان) قرار می‌گیرد،



شکل ۴- مش تطبیقی برای مدل‌سازی رفتار پارچه: (الف) مش با ابعاد بزرگ، (ب) تقسیم هر جزء از مش به چهار جزء کوچک، (ج) تقسیم یک جزء به چهار جزء کوچک‌تر و (د) تقسیم یک جزء دیگر به جزء کوچک‌تر [۵۶].



شکل ۷- مش قوسی برای مدل‌سازی رفتار پارچه [۵۳].

ارائه کرده‌اند. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، این مش از دایره‌های هم‌مرکز تشکیل شده است که هر دایره دارای تعداد مساوی نقاط جرم است. به دلیل اینکه این نوع مش‌بندی از شکل افتابش پارچه پیروی می‌کند، دارای دقت بیشتری برای مدل‌سازی رفتار آویزش پارچه است. آن‌ها رفتار افتابش یک نمونه پارچه را با سه نوع مش مستطیلی، مثلثی و مش قوسی شبیه‌سازی کرده و نتیجه گرفتند، ضریب افتابش برای مش قوسی به واقعیت نزدیک‌تر است، همچنین زمان محاسبات برای شبیه‌سازی پارچه با این مش کمتر است [۵۳].

مش با فنرهای نگاه‌دارنده

Shuyuan و Zhengdong در ۲۰۱۱، نوعی مش‌بندی جدید معرفی کردند. در این مش‌بندی، از دو نوع فنر کششی و نگاه‌دارنده استفاده شده است. تمام رئوس سطح با فنرهای کششی با هم اتصال دارند که این فنرها بخش کشسان جسم را مدل می‌کنند. هر رأس با مرکز به‌وسیله فنرهای نگاه‌دارنده اتصال دارد که این فنرها محتوای جسم سه‌بعدی را مدل می‌کنند. پاسخ فنرهای نگاه‌دارنده در برابر اعمال نیرو به حالت کل سامانه بستگی دارد و وظیفه آن‌ها حفظ حجم جسم است [۵۴].

بررسی نیروها

در مدل جرم و فنر، حرکت هر ذره به مجموع نیروهای داخلی و خارجی اعمال شده بر آن ذره بستگی دارد. مجموع حرکت تمام ذرات جرم در مدل پارچه، شکل و ظاهر پارچه را تعیین می‌کند. با استفاده از قانون دوم نیوتن می‌توان موقعیت این ذرات را تعیین کرد. این قانون به شکل معادله (۱) بیان می‌شود:

$$F_i = m_i a_i \quad (1)$$

مش قوسی

Rusinko و Swan در ۲۰۱۲، مش‌بندی جدیدی با عنوان مش قوسی در این معادله، m_i جرم ذره m_i ، a_i شتاب وارد بر ذره a_i و F_i نیروی وارد

جدول ۲- انواع نیروهای داخلی استفاده شده توسط پژوهشگران برای مدل‌سازی پارچه با سامانه جرم و فنر.

ردیف	نوع مش‌بندی	مراجع
کشش	استفاده از قانون هوک	[۷،۲۰-۲۵،۲۸،۲۹،۳۲،۳۷،۴۱،۴۳،۴۶،۵۰،۵۱،۵۳،۵۸،۵۹،۷۳،۸۲،۹۲،۹۷،۹۸،۱۰۱،۱۰۲]
	استفاده از نتایج آزمون کاواباتا	[۲۲،۳۰،۳۱،۳۳،۶۵-۶۷،۷۷]
	استفاده از نظریه صفحه	[۴۹]
	استفاده از اختلاف سطح و حجم مدل	[۵۴،۵۵]
برش	استفاده از الگوریتم ژنتیک برای محاسبه ضریب سختی فنر	[۴۲،۲۱]
	استفاده از قانون هوک	[۷،۲۰-۲۵،۲۸،۲۹،۳۲،۳۷،۴۱،۴۳،۴۶،۵۰،۵۱،۵۳،۵۸،۵۹،۷۳،۸۲،۹۲،۹۷،۹۸،۱۰۱،۱۰۲]
	استفاده از نتایج آزمون کاواباتا	[۲۲،۳۰،۳۱،۳۳،۶۵-۶۷،۷۷]
	استفاده از نظریه صفحه	[۴۹]
	استفاده از فنر پیچشی	[۱۶]
	استفاده از اختلاف سطح و حجم مدل	[۵۴،۵۵]
استفاده از الگوریتم ژنتیک برای محاسبه ضریب سختی فنر	[۲۱،۴۲]	
خمش	استفاده از قانون هوک	[۷،۲۰-۲۵،۲۸،۲۹،۳۲،۳۷،۴۱،۴۳،۴۶،۵۰،۵۱،۵۳،۵۸،۵۹،۷۳،۸۲،۹۲،۹۷،۹۸،۱۰۱،۱۰۲]
	استفاده از نتایج آزمون کاواباتا	[۲۲،۳۰،۳۱،۳۳،۶۵-۶۷،۷۷]
	استفاده از نظریه صفحه	[۴۹]
	استفاده از اختلاف سطح و حجم مدل	[۵۴،۵۵]
	استفاده از فنر غیرخطی	[۶۳]
	استفاده از رفتار مکانیکی تیر	[۵۶]
	استفاده از مدل براساس زاویه انحراف و مقدار تغییرات زاویه	[۴۳،۶۸،۶۹]
استفاده از الگوریتم ژنتیک برای محاسبه ضریب سختی فنر	[۲۱،۴۲]	

آزمون کاواباتا، معادلات تجربی خمش و برش را به‌دست آورده‌اند [۲۲].

Ji در ۲۰۰۶، برای محاسبه نیروی کششی از آزمون کاواباتا فرض کرده است که نیروی کششی اعمال شده به پارچه به‌طور یکنواخت بین فنرهای ساختاری توزیع می‌شود. همچنین، وی برای محاسبه نیروی برشی از آزمون کاواباتا در جهت ۴۵ درجه تار استفاده کرده است [۳۱].

Zhang و همکاران در ۲۰۱۲، برای محاسبه نیروی خمشی پارچه، از نتایج آزمون خمشی کاواباتا استفاده کرده‌اند که به صورت ممان خمشی و انحناست. بدین صورت که نیرو با توجه به ممان به‌دست آمده به کمک آزمون کاواباتا و جابه‌جایی با استفاده از مقدار انحنا اندازه‌گیری شده به کمک آزمون کاواباتا، محاسبه شده است [۶۷].

استفاده از مدل براساس زاویه انحراف و مقدار تغییرات زاویه: Bridson و همکاران در ۲۰۰۳ برای مدل‌سازی رفتار خمشی پارچه در سامانه جرم و فنر، مدل جدیدی ارائه دادند. در این مدل، نیروی خمشی براساس زاویه انحنای بین دو مثلث مجاور که در یک ضلع مشترک هستند و مقدار تغییرات آن محاسبه می‌شود [۶۸].

استفاده از رفتار تیر یک سر گیردار: Villard و Borouchaki در ۲۰۰۵، از رفتار مکانیکی تیر یک سر گیردار برای محاسبه پارامترهای فنر خمشی استفاده کرده‌اند. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است. نیروی وارد بر انتهای آزاد تیر مطابق با معادله (۴) محاسبه می‌شود [۵۶]:

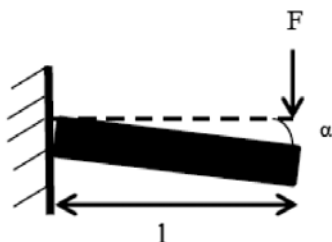
$$F = \frac{E.I.\alpha}{l^2} \quad (4)$$

در این معادله، E مدول یانگ، I ممان اینرسی، l طول میله و α زاویه انحراف از سطح است. در این روش، برای محاسبه پارامترهای فنرهای خمشی عبارت EI را به عنوان ضریب سختی فنر و عبارت $\frac{\alpha}{l^2}$ معادل با جابه‌جایی فنر در نظر گرفته شده است.

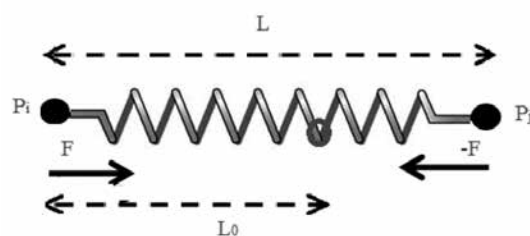
استفاده از فنر غیر خطی: Asmaa و همکاران در ۲۰۱۱، برای مدل کردن نیروی کششی و برشی پارچه، از قانون هوک استفاده کردند، اما نیروهای خمشی پارچه را با استفاده از فنرهای غیر خطی مدل‌سازی کرده‌اند [۶۳].

نیروهای خارجی

نیروهای خارجی مطابق با نوع محیطی که برای شبیه‌سازی پارچه در نظر گرفته می‌شود، متفاوت است. انواع رایج نیروهای خارجی که



شکل ۹- مدل‌سازی رفتار خمشی پارچه با مدل تیر یک سر گیردار [۵۶].



شکل ۸- نیروی فنر بین دو نقطه جرم.

بر ذره Δm است. نیروی F_i شامل دو بخش نیروهای داخلی و نیروهای خارجی است. انواع نیروهای داخلی استفاده شده توسط پژوهشگران برای مدل‌سازی پارچه با مدل جرم و فنر، در جدول ۲ آمده است.

نیروهای داخلی

نیروهای داخلی تعیین‌کننده خواص مکانیکی پارچه هستند. این نیرو به‌طور عمده شامل نیروهای کشش، خمش و برش است. تعدادی از پژوهشگران برای محاسبه نیروهای داخلی از قانون هوک استفاده کردند. نیروهای داخلی در هر نقطه جرم، مجموع نیروی فنرهای متصل به این نقطه است. مطابق با شکل ۸ نیروی داخلی در نقطه P_i به شکل معادله (۲) بیان می‌شود:

$$F(P_i) = -K(L - L_0) \quad (2)$$

در این معادله، L طول فنر، L_0 طول طبیعی فنر، F نیروی وارد بر نقطه P_i و K سختی فنر بین دو نقطه i و j است [۲۰].

Móngus و همکاران در ۲۰۱۲، از الگوریتم ژنتیک به منظور تعیین بهترین مقادیر برای ضریب سختی فنرها استفاده کردند. در این روش از طریق کمینه‌کردن خطا بین نتایج نظری با نتایج حاصل از افتایش واقعی، مقدار پارامترهای ضریب سختی فنر تعیین می‌شود [۴۲]. برخی از پژوهشگران برای شبیه‌سازی واقعی‌تر پارچه، روش‌های دیگری را برای محاسبه نیروهای داخلی ارائه دادند که در ادامه شرح داده شده است. استفاده از اختلاف سطح و حجم مدل: در مدل ارائه شده توسط Zhengdong که از فنرهای نگه‌دارنده استفاده شده است. نیروی اعمالی بر نقطه P_i ناشی از Δm فنر نگه‌دارنده به شکل معادله (۳) محاسبه شده است:

$$F(P_i) = -K(\Delta L_{tot}(t) + C\Delta L_i(t))u_i \quad (3)$$

در این معادله، K ضریب سختی فنر، u_i بردار واحد، C مرکز جرم (ضریبی بین صفر و یک)، ΔL_{tot} اختلاف حجم جسم بر واحد سطح و ΔL_i تغییرات طول فنر است [۵۴].

استفاده از آزمون کاواباتا: یک روش برای به‌دست آوردن نیروهای داخلی، استفاده از داده‌های تجربی حاصل از روش کاواباتا است که اخیراً مورد توجه قرار گرفته است.

Wang و Zhong در ۱۹۹۸، با تقریب چندجمله‌ای منحنی خمش و برش

جدول ۳- انواع نیروهای خارجی استفاده شده توسط پژوهشگران برای مدل‌سازی پارچه با سامانه جرم و فنر.

ردیف	نوع مش‌بندی	مراجع
۱	گرانش	[۷.۲۰-۲۶.۲۹-۳۳.۳۶-۳۸.۴۰-۴۲.۴۴.۴۵.۴۸-۵۶.۵۸.۵۹.۶۳.۶۵-۶۷.۷۰.۷۱، ۷۳.۷۹.۸۰.۸۲.۸۴.۸۵.۹۲.۹۷.۹۸.۱۰۰-۱۰۲]
۲	مقاومت هوا	[۲۲.۲۵.۳۰-۳۲.۳۸.۴۰-۵۶.۶۳.۶۷.۷۰.۷۱.۷۳.۸۰.۹۲.۹۷.۱۰۰]
۳	میرایی	[۷.۲۰.۲۱.۲۳.۲۴.۲۹.۳۲.۳۳.۳۷.۴۱.۵۰.۵۱.۵۴.۵۵.۵۸.۵۹.۶۵.۹۸.۱۰۱.۱۰۲]
۴	باد	[۷.۲۰.۲۱.۲۵.۲۶.۳۰-۳۲.۳۶.۳۸.۴۱.۴۲.۴۴.۵۴.۵۸.۵۹.۷۰.۷۳.۱۰۰-۱۰۲]
۵	نیروی دوخت	[۳۵.۳۹]
۶	آب	[۴۰.۶۵]

توسط پژوهشگران در مدل‌سازی جرم و فنر استفاده شده است، در جدول ۳ آمده است.

گرانش: رایج‌ترین نیروی خارجی استفاده شده توسط پژوهشگران در شبیه‌سازی پارچه با مدل جرم و فنر، نیروی گرانش است. نیروی گرانش وارد بر هر نقطه جرم مطابق با معادله (۵) تعریف می‌شود:

$$F_{\text{gravity}} = mg \quad (5)$$

در این معادله، m جرم ذره، g شتاب گرانش و F_{gravity} نیروی گرانش است. مقاومت هوا: برخی از پژوهشگران برای واقعی‌تر شدن رفتار دینامیکی پارچه در شبیه‌سازی با مدل جرم و فنر، نیروی مقاومت هوا را به‌عنوان نیروی خارجی در نظر گرفته‌اند. زمانی که سطح پارچه بزرگ باشد، نمی‌توان از این نیرو صرف‌نظر کرد. نیروی مقاومت هوا روی همه نقاط جرم اعمال می‌شود و اتلاف انرژی جنبشی مدل را نشان می‌دهد. این نیرو می‌تواند با استفاده از معادله (۶) محاسبه شود:

$$F_{\text{air}} = -C_{\text{air}} V \quad (6)$$

در این معادله، F_{air} نیروی مقاومت هوا، C_{air} ضریب مقاومت هوا و V سرعت ذره است.

میرایی (damping): وجود نیروی میرایی برای حفظ تعادل سامانه جرم و فنر لازم بوده و نقش آن تقریب‌زدن مقدار اتلاف انرژی در مدل است. نیروی میرایی اغلب به‌عنوان نیروی خارجی محسوب می‌شود، اما می‌تواند به‌عنوان نیروی داخلی نیز در نظر گرفته شود. نیروی میرایی با استفاده از معادله (۷) محاسبه می‌شود:

$$F_{\text{damping}} = -C_{\text{damping}} V \quad (7)$$

در این معادله، F_{damping} نیروی میرایی، C_{damping} ضریب میرایی و V

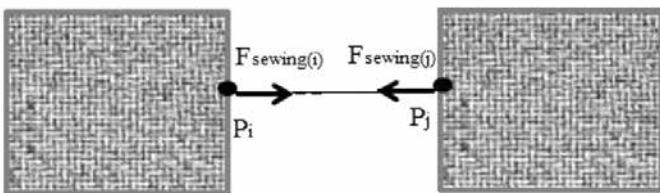
سرعت ذره است. باد: در فرایند شبیه‌سازی در محیط‌هایی که پارچه در معرض جریان باد قرار دارد، برای واقعی‌تر شدن شبیه‌سازی رفتار پارچه باید نیروی باد به‌عنوان نیروی خارجی در نظر گرفته شود. حرکت جریان باد با سرعت یکنواخت روی سطح پارچه نیروی باد را ایجاد می‌کند. اگر تغییرات باد هنگام برخورد باد با پارچه نادیده گرفته شود، نیروی باد را می‌توان به شکل معادله (۸) معرفی کرد:

$$F_{\text{wind}} = -C_{\text{wind}} [n \cdot (V_{\text{wind}} - V)] n \quad (8)$$

در این معادله، F_{wind} نیروی باد، C_{wind} ضریب باد، n بردار نرمال سطح پارچه و V سرعت ذره است.

نیروی دوخت: Xu و Zhong در ۲۰۰۹، نیروی دوخت بین دو بخش از پارچه در لباس را به‌عنوان نیروی خارجی در مدل‌سازی با جرم و فنر در نظر گرفتند. مطابق با شکل ۱۰ نیروی دوخت روی ذراتی که روی خط دوخت دو صفحه پارچه قرار دارند، اعمال می‌شود. جهت نیروی دوخت با توجه جهت بردار بین دو ذره P_i و P_j تعیین می‌شود. نیروی دوخت مطابق با معادله (۹) محاسبه می‌شود [۳۹].

$$F_{\text{sewing}(i)} = \begin{cases} \varepsilon X_{ij} - C_{\text{air}} V_i + \Delta A_{\alpha} & |X_{ij}| > \delta \\ c \frac{X_{ij}}{|X_{ij}|} & |X_{ij}| \leq \delta \end{cases} \quad (9)$$



شکل ۱۰- نیروی دوخت بین دو ذره P_i و P_j

یا فشردگی غیرطبیعی پارچه می‌شود که واقعی نیست. این پدیده اثر ابرکشسانی نام دارد [۷۱].

نمونه‌ای از اثر ابرکشسانی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. شکل ۱۱-الف موقعیت اولیه یک پارچه را که از دو گوشه ثابت شده است، نشان می‌دهد و شکل ۱۱-ب موقعیت پارچه پس از گذشت زمان را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، دو گوشه پارچه در معرض تغییرشکل زیاد قرار دارد و با دورشدن از گوشه‌ها، مقدار تغییرشکل کاهش می‌یابد [۲۰].

در پارچه‌های واقعی این نوع تغییرشکل‌های زیاد هیچگاه رخ نمی‌دهد، چون پارچه فاقد خصوصیت ابرکشسانی می‌شود. در واقع نحوه تغییرشکل پارچه در برابر نیرو به شکل غیرخطی است و با افزایش مقدار تغییرشکل، مقدار سختی آن‌ها به سرعت افزایش می‌یابد. بنابراین مقدار تغییرشکل اجزای پارچه بسیار کم است و زمانی که تنش زیاد به پارچه اعمال می‌شود، پیش از هر گونه تغییرشکل زیاد پارچه پاره می‌شود. اکثر پژوهشگران حداکثر مقدار تغییرشکل برای پارچه‌های تار و پودی را ۱۰٪ در نظر گرفتند. اما، برای بعضی از پارچه‌ها نظیر کتان و چلوار حد آستانه کمتری در نظر گرفته می‌شود. روش‌های گوناگونی برای رفع مسئله ابرکشسانی توسط پژوهشگران ارائه شده که در جدول ۴ آمده است.

تنظیم موقعیت

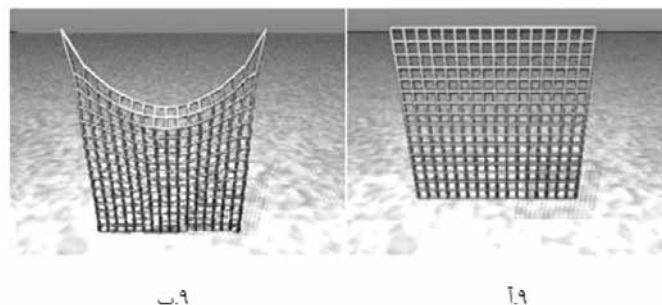
Provot در ۱۹۹۵، از تنظیم موقعیت فنرها برای حل مسئله ابرکشسانی استفاده کرده است. در این روش در هر بازه زمانی مقدار تغییرشکل فنرها محاسبه می‌شود. هرگاه ازدیاد طول یا فشردگی فنر بیشتر از حد آستانه شود، دو نقطه انتهایی فنر در طول محور خود به سمت یکدیگر حرکت می‌کنند تا زمانی که طول فنر به طول حد آستانه برسد. در بعضی از موارد ممکن است، فقط یک انتهای فنر آزاد باشد. در این صورت فقط همان انتهای آزاد فنر حرکت می‌کند. این روش در شکل ۱۲ نشان داده شده است [۲۰].

با تنظیم طول یک فنر، طول بقیه فنرها نیز تغییر می‌کند و باید تنظیم شود. عیب روش تنظیم موقعیت این است که در این روش هیچ اولویت‌بندی برای تنظیم نقاط انتهایی فنرها ارائه نشده است. بنابراین، روش تنظیم موقعیت فقط برای زمانی مناسب است که تعداد کمی از فنرها در معرض پدیده ابرکشسانی قرار بگیرند.

اگرچه روش تنظیم موقعیت می‌تواند از ازدیاد طول و فشردگی بیش از اندازه فنرها جلوگیری کند. اما این روش به افزایش برخورد پارچه-پارچه در شبیه‌سازی پارچه منجر می‌شود. مشکل دیگر این روش این است که ابتدا به فنر اجازه داده می‌شود بیش از حد کشیده یا فشرده شود و سپس با تنظیم موقعیت، طول آن اصلاح می‌شود.

تنظیم موقعیت با اولویت‌بندی

Kang و همکاران در ۲۰۰۰، با اولویت‌بندی تنظیم طول فنر، روش تنظیم موقعیت را اصلاح کردند. در این روش از الگوریتم مرتب‌سازی



شکل ۱۱- اثر ابرکشسانی: (الف) موقعیت اولیه پارچه و (ب) موقعیت پارچه پس از گذشت زمان [۲۰].

در این معادله، $F_{sewing(i)}$ نیروی دوخت در نقطه P_i ، X_{ij} فاصله بین دو ذره P_j و P_i ، C_{air} ضریب مقاومت هوا، V_i سرعت ذره P_i ، $\Delta A \alpha$ ضریب اصلاح شتاب، ϵ و c ضرایب اصلاح جابه‌جایی و δ حد رواداری (tolerance) جابه‌جایی است.

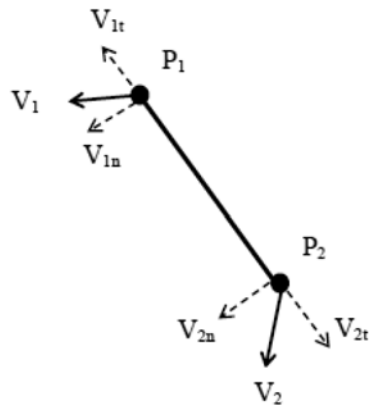
نیروی آب: Chen و همکاران در ۲۰۱۲، رفتار پارچه خیس را شبیه‌سازی کردند. در این روش برای مدل کردن نیروی آب اعمال شده به پارچه جرم ذرات متغیر با زمان در نظر گرفته شده است [۶۵]. نیروی اصطکاک و پاسخ به برخورد نیز جزء نیروهای خارجی در نظر گرفته می‌شود. به دلیل اهمیت زیاد این دو نیرو، در بخش‌های بعدی به‌طور مبسوط نیروی برخورد و اصطکاک توضیح داده شده است.

اثر ابرکشسانی

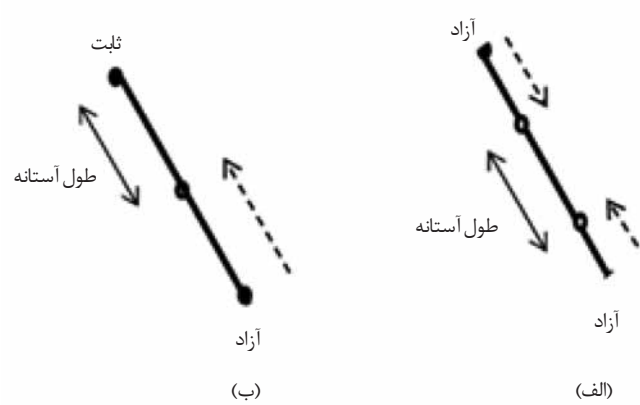
در شبیه‌سازی پارچه با مدل جرم و فنر، رفتار نیرو-ازدیاد طول فنر خطی فرض می‌شود. با فرض خطی بودن رفتار فنر، زمانی که یک جزء در مدل پارچه در معرض نیروی متمرکز بزرگ قرار می‌گیرد، به تغییر طول زیاد در فنرها منجر می‌شود. این تغییر طول زیاد فنر باعث کشش

جدول ۴- انواع روش‌های ارائه شده توسط پژوهشگران برای حل مسئله ابرکشسانی.

ردیف	نوع روش	مراجع
۱	تنظیم موقعیت	[۲۰، ۲۱، ۵۳، ۷۰، ۷۲]
۲	تنظیم موقعیت و اولویت‌بندی	[۷۳]
۳	تنظیم سرعت	[۷، ۲۳، ۲۴، ۲۷، ۷۴]
۴	تنظیم موقعیت و سرعت	[۳۹، ۴۳، ۴۵]
۵	تنظیم موقعیت و سرعت با اولویت‌بندی	[۲۹، ۷۱]
۶	استفاده از منحنی غیرخطی برای رفتار فنر	[۳۲]
	استفاده از فنر ساختاری اصلاح شده	[۷۵]
۷	استفاده از فنر دوفازی	[۷۶]
	تنظیم ضریب فنر	[۲۵، ۲۶]



شکل ۱۳- روش تنظیم سرعت برای حل مسئله ابرکشسانی.



شکل ۱۲- روش تنظیم موقعیت برای حل مسئله ابرکشسانی: (الف) فنر با دو انتهای آزاد و (ب) فنر با یک انتهای آزاد.

تنظیم موقعیت و سرعت

Zhong و Xu در ۲۰۰۹، از روش تنظیم موقعیت و سرعت برای جلوگیری از اثر ابرکشسانی استفاده کردند. در این روش زمانی که ازدیاد طول یا فشردگی فنر بیش از حد آستانه شود، موقعیت دو انتهای فنر تغییر می‌کند تا به محدوده آستانه برسد. بعد با توجه به موقعیت‌های جدید، برای هر نقطه سرعت‌های جدید نیز تنظیم می‌شود. عیب این روش نسبت به روش تنظیم موقعیت این است که زمان‌بر و دارای محاسبات زیاد است [۳۹].

تنظیم موقعیت و سرعت با اولویت‌بندی

Zhenfang و همکاران در ۲۰۱۲، از روش تنظیم موقعیت و سرعت با اولویت‌بندی برای حل مسئله ابرکشسانی استفاده کردند. این روش نسبت به روش تنظیم موقعیت و سرعت، به محاسبات کمتری نیاز دارد. در این روش، برای هر فنر سطوح اولویت تعریف شده است. زمانی که طول یک فنر یک بار تنظیم می‌شود، سطح اولویت آن فنر یک درجه پایین می‌آید. روش Zhenfang در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

در شکل ۱۴- الف دو فنر P_0P_1 و P_0P_2 در حالت اولیه هستند. در شکل ۱۴- ب حالت ابرکشسانی برای هر دو فنر رخ می‌دهد. برای حل مسئله ابرکشسانی ابتدا طول فنر P_0P_1 تنظیم می‌شود. بدین منظور، چون نقطه P_0 ثابت است، موقعیت نقطه P_1 اصلاح می‌شود و سطح اولویت نقطه P_1 یک درجه پایین می‌آید (شکل ۱۴- ج).

در مرحله بعد، چون سطح اولویت نقطه P_1 پایین‌تر است، سرعت و موقعیت نقطه P_2 اصلاح می‌شود (شکل ۱۴- د). همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، بعد از این مرحله، برای هیچ یک از دو فنر پدیده ابرکشسانی مشاهده نمی‌شود [۷۱].

تنظیم ضریب فنر

Bayraktar و همکاران در ۲۰۰۱، برای حل مسئله ابرکشسانی از روش تنظیم ضریب فنر استفاده کردند. در این روش برای تنظیم ضریب فنر از معادله (۱۰) استفاده می‌شود [۲۵]:

سطلی برای تعیین اولویت تنظیم فنرها استفاده می‌شود. در این الگوریتم، مرتب‌سازی طی دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول بیشینه و کمینه ازدیاد طول فنرهایی که خارج از محدوده طول مجاز فنر هستند، تعیین می‌شود. پس از تعیین بیشینه و کمینه ازدیاد طول فنرها، فاصله بین بیشینه و کمینه به m زیربازه با اندازه یکسان تقسیم می‌شود. هر کدام از این زیربازه‌ها یک سطح نامیده می‌شود. در مرحله بعد فنرها براساس مقدار ازدیاد طول آن‌ها به سطوحی مدنظر تخصیص داده می‌شود. پس از اینکه فنرها داخل سطوح توزیع شدند، موقعیت هر فنر طبق اولویت آن تنظیم می‌شود. اولویت به گونه‌ای است که فنی که بیشترین ازدیاد طول خارج از حد مجاز را دارد، در اولویت تنظیم قرار می‌گیرد [۷۳].

تنظیم سرعت

Vassilev و Spanlang در ۲۰۰۰، از روش تنظیم سرعت برای حذف تغییرشکل‌های زیاد استفاده کردند. در این روش هرگاه ازدیاد طول یا فشردگی فنر خارج از حد مجاز باشد، سرعت‌های نقاط انتهای فنرها اصلاح می‌شود تا هیچ گونه ازدیاد طول یا فشردگی اضافی رخ ندهد. فرض کنید، مطابق با شکل ۱۳، P_1 و P_2 موقعیت ذرات انتهای دو فنر و V_1 و V_2 سرعت ذرات دو انتهای فنر است. سرعت V_1 و V_2 در جهت خط اتصال دو ذره و (ب) جز عمودی سرعت $(V_{1n}$ و $V_{2n})$ در جهت عمود بر خط اتصال. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، جزء مماسی سرعت باعث کشش می‌شود. بنابراین در الگوریتم ارائه شده توسط Vassilev، پس از تشخیص ازدیاد طول یا فشردگی بیشتر از حد آستانه، جزء مماسی سرعت صفر می‌شود. بنابراین از ازدیاد طول یا فشردگی اضافی جلوگیری می‌شود [۲۳].

Bridson و همکاران در ۲۰۰۲، نیز از روش تنظیم سرعت برای حل مسئله ابرکشسانی استفاده کرده‌اند. تفاوت روش Bridson با Vassilev این است که Bridson از قانون حفظ مقدار اندازه حرکت برای تنظیم سرعت استفاده کرد تا اینکه از یاد طول یا فشردگی فنرها در هر بازه زمانی بیشتر از حد مجاز نشود [۲۷].

به انتگرال‌گیری نیاز است. انتگرال‌گیری فرایندی در شبیه‌سازی پارچه برای محاسبه سرعت و موقعیت نقاط جرم در مدل پارچه با توجه به نیروی اعمال شده بر آن نقاط است. روش‌های مختلفی از انتگرال‌گیری برای حل معادلات در سامانه جرم و فنر وجود دارد. کارایی روش‌های انتگرال‌گیری به چهار عامل بستگی دارد: (۱) زمان محاسبات برای انتگرال‌گیری در یک بازه زمانی، (۲) بازه زمانی، (۳) دقت و (۴) ثبات. انواع رایج روش‌های انتگرال‌گیری استفاده شده توسط پژوهشگران برای شبیه‌سازی پارچه با مدل جرم و فنر در جدول ۵ آمده است.

روش صریح

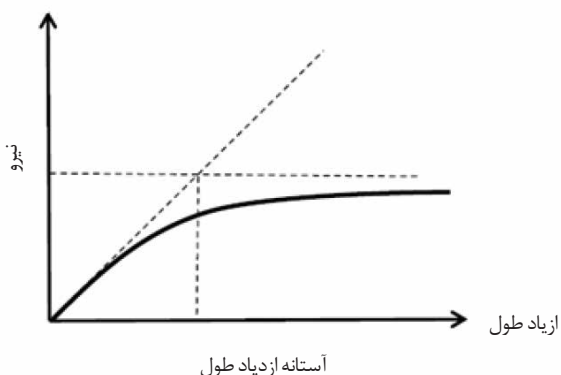
در روش صریح، موقعیت نقطه جرم در زمانی بعدی با برون‌یابی مستقیم از موقعیت قبلی نقطه محاسبه می‌شود. این روش سریع و آسان است، اما برای حفظ دقت و ثبات سامانه، باید بازه زمانی کوچک انتخاب شود. بنابراین، با استفاده از این روش نمی‌توان پارچه را در زمان واقعی شبیه‌سازی کرد. انواع رایج این روش عبارت از روش اویلر، نقطه میانی، Rung-Kutta و Verlet است [۷۸].

اویلر صریح

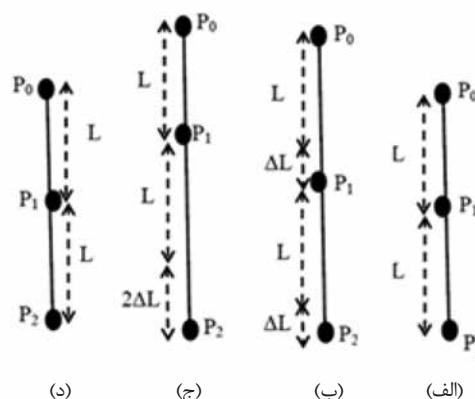
در این روش، موقعیت انتهایی بازه زمانی با استفاده از شیب (مشتق اول) در موقعیت ابتدای بازه زمانی محاسبه می‌شود. از مزایای این روش ساده بودن آن است، اما همگرایی این روش کم است. مقدار دقت این روش به بازه زمانی بستگی دارد و با بزرگ شدن بازه زمانی، خطا افزایش می‌یابد [۷۸].

روش نقطه میانی

روش نقطه میانی، روش اصلاح شده اویلر است. در این روش ابتدا با استفاده از روش اویلر، موقعیت در نقطه میانی بازه زمانی محاسبه می‌شود. سپس، با استفاده از موقعیت در نقطه میانی، شیب در این نقطه محاسبه می‌شود. در مرحله بعد با توجه به شیب در نقطه میانی، موقعیت نقطه انتهایی بازه زمانی محاسبه می‌شود. دقت این روش بیشتر از روش اویلر است [۹۳].



شکل ۱۵- استفاده از فنر غیرخطی برای حل مسئله ابرکشسانی.



شکل ۱۴- روش تنظیم موقعیت و سرعت با اولویت‌بندی برای حل مسئله ابرکشسانی: (الف) حالت اولیه، (ب) ابرکشسانی، (ج) اولین اصلاح و (د) دومین اصلاح.

$$K_{new} = \begin{cases} k_{original} \times \frac{L}{L_0} & \text{if } L \geq l_{allowed} \\ k_{original} & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

در این معادله، K_{new} ضریب سختی جدید، $k_{original}$ ضریب سختی اصلی، L طول فنر، L_0 طول طبیعی فنر و $l_{allowed}$ بیشینه ازدیاد طولی است که فنر می‌تواند داشته باشد.

استفاده از فنر غیرخطی

Zhibin و همکاران در ۲۰۰۶، برای حل مسئله ابرکشسانی از منحنی غیرخطی برای رفتار فنر استفاده کردند. منحنی ارائه شده برای رفتار فنر در شکل ۱۵ نشان داده شده است [۳۲]. معادله منحنی نشان داده شده در شکل ۱۵ به شکل معادله (۱۱) است:

$$F = \frac{0.2 \times L_0}{\pi} \times \arctan\left(\frac{5\pi \times \Delta L}{L_0}\right) \quad (11)$$

در این معادله، F نیرو، ΔL مقدار ازدیاد طول فنر و L_0 طول طبیعی فنر است. Han و همکاران در ۲۰۰۹، برای حل مسئله ابرکشسانی از فنر ساختاری اصلاح شده استفاده کردند. در این نوع فنر از تابع غیرخطی برای توصیف رفتار نیرو-ازدیاد طول استفاده می‌شود. بدین صورت که در این روش، در فنرهایی که ازدیاد طول یا فشردگی اضافی دارند، جزء مماسی سرعت کاهش می‌یابد تا به تدریج طول فنر به حد آستانه ازدیاد طول برسند [۷۵]. کاوان در سال ۲۰۱۲ فنر دوفازی را معرفی کرد. سختی یک فنر دوفازی در تغییر شکل‌های کم ثابت است، اما زمانی که بیش از حد کشیده یا فشرده می‌شود، مقدار سختی آن افزایش می‌یابد [۷۶].

روش‌های انتگرال‌گیری عددی

برای حل معادلات دیفرانسیل حاصل از مدل‌سازی فیزیکی با جرم و فنر

جدول ۵- انواع روش‌های انتگرال‌گیری ارائه شده توسط پژوهشگران برای شبیه‌سازی پارچه با مدل جرم و فنر .

ردیف	روش انتگرال‌گیری	مراجع
۱	اویلر نقطه میانی Rung-Kutta مرتبه ۴ Rung-Kutta تطبیقی Verlet	[۷,۲۰-۲۱,۲۹,۳۰,۳۲,۳۷,۴۰-۴۱,۴۶,۵۱,۵۴,۵۶,۶۶,۶۷,۷۹,۸۰,۹۷,۹۸] [۷۳] [۷,۲۳,۲۴,۲۷,۷۴] [۳۹,۴۳,۴۵] [۲۹,۷۱]
۲	اویلر ضمنی	[۳۲]
۳	شبه‌ضمنی	[۷۵]
۴	ترکیب Rung-Kutta و روش ضمنی	[۷۶]

پارچه استفاده کردند. با بسط معادله Verlet، معادله بهینه شده آن حاصل می‌شود [۴۲].

روش ضمنی

در روش ضمنی، موقعیت زمانی بعدی به‌طور مستقیم با یک درون‌یابی از موقعیت بعدی تعیین می‌شود. این روش برخلاف روش صریح در بازه زمانی بزرگ نیز پایدار است، اما نسبت به روش صریح دارای حجم محاسبات بیشتری است. نوع رایج این روش، روش اویلر ضمنی است. در روش اویلر ضمنی، شتاب در نقطه انتهایی بازه با استفاده از نیرو در انتهای بازه محاسبه می‌شود. دقت و ثبات این روش بیشتر از روش اویلر صریح است.

روش شبه‌ضمنی

روش شبه‌ضمنی را که اولین بار Baraff در ۱۹۹۸، برای شبیه‌سازی پارچه ارائه کرد، دارای همگرایی بیشتر و حجم محاسبات کمتری نسبت به روش صریح است [۸]. تفاوت روش شبه‌ضمنی با روش ضمنی در نحوه محاسبه سرعت و تقریب‌زدن نیرو در مرحله زمانی بعدی است.

برخورد

زمانی که یک جسم در محیط در حال حرکت است، احتمال برخورد (collision) آن جسم با سطوح اطراف آن وجود دارد. اگر به این موضوع در شبیه‌سازی توجه نشود، جسم داخل سطح نفوذ و از آن عبور می‌کند. در مورد شبیه‌سازی پارچه نه تنها برخورد بین پارچه و سطح باید مورد توجه قرار گیرد، بلکه به دلیل ماهیت پارچه (آسان‌پذیری تغییرشکل) برخورد بین بخش‌های مختلف پارچه نیز باید در نظر گرفته شود. در مسئله برخورد دو آشکارسازی برخورد و پاسخ برخورد بحث می‌شود.

آشکارسازی برخورد

از ساده‌ترین وضعیت‌هایی که می‌توان برای برخورد در نظر گرفت، این

Rung-Kutta مرتبه ۴

Rung-Kutta مرتبه ۴ رایج‌ترین نوع الگوریتم Rung-Kutta است. در این روش در هر مرحله از انتگرال‌گیری چهار شیب محاسبه می‌شود. k_1 شیب در نقطه اولیه، k_2 شیب در نقطه میانی، k_3 اصلاح شیب در نقطه میانی و k_4 شیب در نقطه آخر [۱۳] است. روش Rung-Kutta مرتبه ۴ نسبت به روش اویلر دارای دقت و همگرایی زیادی بوده، اما حجم محاسبات در این روش بیشتر است [۹۳].

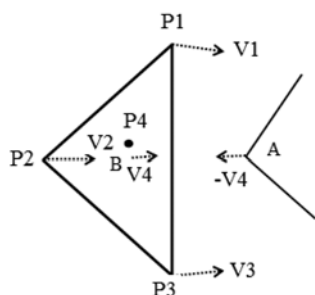
Rung-Kutta تطبیقی

Wang و همکاران در ۲۰۰۹، روش جدیدی را با نام Rung-Kutta تطبیقی برای حل معادلات دیفرانسیل در مدل‌سازی پارچه با سامانه جرم و فنر ارائه کردند. تفاوت این روش با سه روش قبلی (اویلر، نقطه میانی و Rung-Kutta مرتبه ۴) این است که این سه روش فقط در بازه زمانی ویژه ثبات دارند. یعنی اگر بازه زمانی خیلی بزرگ انتخاب شود، باعث واگرایی سامانه می‌شوند و اگر بازه زمانی کوچک باشد، حجم محاسبات افزایش می‌یابد. اما در روش Rung-Kutta تطبیقی می‌توان به‌طور خودکار بازه زمانی را با در نظر گرفتن موقعیت شبیه‌سازی تغییر داد.

Wang در پژوهش خود این روش را با سه روش اویلر، Rung-Kutta مرتبه ۴ و نقطه میانی مقایسه و ادعا کرده است که روش Rung-Kutta تطبیقی دقت بیشتری دارد [۳۸].

روش Verlet

در این روش انتگرال‌گیری، برای محاسبه موقعیت نقطه جرم در انتهای بازه زمانی، به محاسبه سرعت و شتاب نیاز نیست و موقعیت بعدی با استفاده از اختلاف موقعیت اخیر و قبلی محاسبه می‌شود. دقت و ثبات روش Verlet بیشتر از روش اویلر است. سرعت محاسبات در این روش تقریباً با روش اویلر یکسان است [۸۲]. روش Verlet، انرژی از دست رفته به دلیل اصطکاک را در نظر نمی‌گیرد. بنابراین، در این روش حالت تعادل هیچگاه حاصل نمی‌شود. Mongus و همکاران در ۲۰۱۲، از روش بهینه شده Verlet برای حل معادلات دیفرانسیل در مدل‌سازی



شکل ۱۷- برخورد نقطه-مثلث.

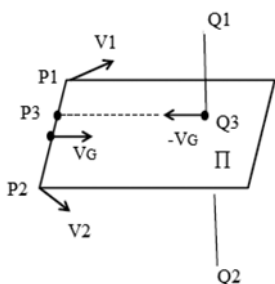
برخورد ضلع-ضلع: برای آشکارسازی برخورد ضلع-ضلع (به‌طور مثال در شکل ۱۸ ضلع P_1P_2 با ضلع Q_1Q_2) ابتدا سرعت لحظه‌ای مرکز ثقل ضلع P_1P_2 (V_G) محاسبه می‌شود. احتمال برخورد بین دو ضلع P_1P_2 و Q_1Q_2 در صفحه Π می‌تواند با استفاده از سرعت لحظه‌ای مرکز ثقل آشکار شود. ابتدا فرض می‌شود، لبه Q_1Q_2 صفحه Π را در نقطه Q_3 قطع می‌کند. سپس، از نقطه Q_3 برداری در جهت مخالف V_G رسم می‌شود. که این بردار لبه P_1P_2 را در نقطه P_3 قطع می‌کند. اگر فاصله میان P_3 و Q_3 کمتر از حد رواداری باشد، برخورد رخ داده است [۳۹].

بهینه‌سازی زمان آشکارسازی برخورد

مسئله برخورد و به‌ویژه آشکارسازی آن یکی از زمان‌برترین مراحل در شبیه‌سازی پارچه است. آشکارسازی برخورد بین یک مدل پارچه با N نقطه جرم و یک جسم با M نقطه به پیچیدگی محاسبات از درجه $O(M \times N)$ منجر می‌شود. بنابراین نیاز است تا حجم محاسبات کاهش یابد. پژوهشگران از الگوریتم‌های بهینه‌سازی متنوعی برای بهینه‌سازی آشکارسازی برخورد در شبیه‌سازی پارچه استفاده کرده‌اند. انواع روش‌های بهینه‌سازی آشکارسازی برخورد در جدول ۶ نشان داده شده است.

روش سلسله جعبه‌های مرزی

این روش را اولین بار Volino در ۱۹۹۴ معرفی کرد [۸۶]. اساس این روش، پوشاندن جسم دارای هندسه پیچیده با جعبه‌های مرزی است. ابتدا کل جسم با یک جعبه پوشانده می‌شود. سپس، هر جعبه به دو جعبه کوچک‌تر تجزیه می‌شود و همان‌طور ادامه پیدا می‌کند تا زمانی که هر جعبه شامل تنها یک واحد هندسی پارچه شود (یک مثلث پارچه). بدین شکل سلسله جعبه‌های مرزی ساخته می‌شود. در این



شکل ۱۸- برخورد ضلع-ضلع [۳۹].

است که یک ذره با سرعتی ثابت به صفحه‌ای ساکن برسد (شکل ۱۶). برای شناسایی برخورد ذره با صفحه، ابتدا معادله صفحه باید تعیین شود (معادله ۱۲):

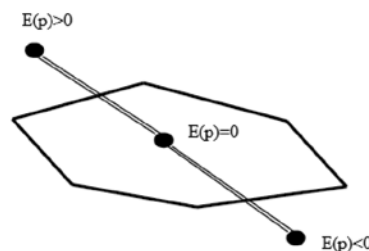
$$E(P) = aP_x + bP_y + cP_z + d = 0 \quad (12)$$

در این معادله، $E(P)$ معادله صفحه، a, b, c, d ضرایب معادله صفحه و P موقعیت ذره در فضا است. معادله صفحه برای نقاط بالای صفحه برابر با $E(P)=0$ است، معادله صفحه برای نقاط بالای صفحه دارای مقادیر مثبت است، یعنی $E(P) > 0$ و معادله صفحه برای نقاط زیر صفحه دارای مقادیر منفی است، یعنی $E(P) < 0$. در طول بازه زمانی موقعیت ذره تعیین می‌شود. بعد از تعیین موقعیت، با توجه به معادله صفحه بررسی می‌شود که آیا ذره هنوز بالای صفحه است یا خیر. تا زمانی که $E(P) > 0$ باشد، یعنی ذره همچنان بالای صفحه است و هیچ برخوردی رخ نداده است. اگر در زمان t_1 ، $E(P(t)) < 0$ نشان‌دهنده این است که برخورد در فاصله $[t_1, t_1]$ رخ داده است [۷۶]. در شکل‌های پیچیده‌تر باید قابلیت برخورد برای تمام نقاط پارچه با تمام اجسام موجود در محیط و نیز احتمال برخورد هر نقطه در پارچه با یکدیگر در هر بازه زمانی بررسی شود. به‌طور کلی دو نوع برخورد، برخورد نقطه-مثلث و برخورد ضلع-ضلع در نظر گرفته می‌شود. در برخورد نقطه-مثلث، یک نقطه از یک مش به یک مثلث از مش دیگر برخورد می‌کند. در برخورد ضلع-ضلع، یک ضلع از یک مثلث در یک مش به ضلع یک مثلث در مش دیگر برخورد می‌کند. برخورد نقطه-مثلث: با توجه به شکل ۱۷، ذره P_4 در زمان t_0 ، در نقطه A است و با سرعت V_4 در زمان t_1 به نقطه B می‌رسد. برای آشکارسازی برخورد نقطه P_4 با مثلث $P_1P_2P_3$ ، ابتدا فرض می‌شود که برخورد رخ داده است. سپس، با این فرض و با استفاده از معادله (۱۳) زمان برخورد t محاسبه می‌شود. اگر t به‌دست آمده از معادله (۱۳) کوچک‌تر از $t_1 - t_0$ باشد، برخورد رخ داده است، در این غیر صورت فرض رخ‌دادن برخورد اشتباه است [۷۶]:

$$(P_{21} + tV_{21}) \times (P_{31} + tV_{31}) \cdot (P_{41} + tV_{41}) = 0 \quad (13)$$

که در معادله (۱۳):

$$\begin{aligned} P_{ij} &= P_j - P_i \\ P_{ij} &= V_j - V_i \end{aligned} \quad (14)$$



شکل ۱۶- برخورد نقطه-صفحه [۷۶].

جدول ۶ - انواع روش‌های بهینه‌سازی زمان آشکارسازی برخورد.

ردیف	روش انتگرال‌گیری	مراجع
۱	سلسله جعبه‌های مرزی	[۲۵، ۲۴، ۲۷، ۳۲، ۳۵، ۳۹، ۴۳، ۴۶، ۵۸، ۶۱، ۶۹، ۷۱، ۷۸، ۸۷، ۱۰۱]
	پلی‌لوله‌های آرایش یافته	[۸۸، ۹۲]
۲	فضای تصویر	[۷، ۲۳]
۳	مش یکنواخت	[۴۴]
۴	حداقل احاطه کردن	[۳۰، ۳۱]
۵	وکسل	[۴۸، ۵۱، ۵۹، ۶۲، ۷۰]
۶	انحنای سطح	[۳۲]

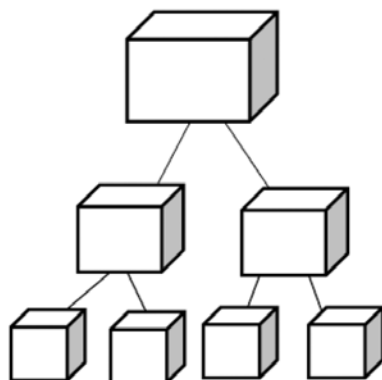
بازگشت، کوچک‌ترین AABB از مجموعه اولیه ساخته می‌شود. این فرایند تا زمانی که هر زیر مجموعه شامل تنها یک عنصر در مدل پارچه باشد، ادامه پیدا می‌کند [۵۸].

روش الگوریتم پلی‌لوله‌های آرایش یافته (K-dop)

تفاوت اصلی روش K-dop با روش AABB این است که در این روش به‌جای استفاده از جعبه‌های مرزی که موازی با محور جسم است، از تعداد ثابتی از چندضلعی محدب (پلی‌لوله) برای پوشاندن جسم استفاده می‌شود. تعداد اضلاع این پلی‌لوله‌ها متفاوت است. انواع رایج پلی‌لوله‌ها در شکل ۲۱ نشان داده شده است [۸۸]. Mezger بیان کرده است که پلی‌لوله چهارده ضلعی، دارای بیشترین کارایی در شبیه‌سازی پارچه است [۸۹].

روش فضای تصویر

در روش فضای تصویر، از بافر عمق و بافر نرمال برای بهینه‌سازی آشکارسازی برخورد استفاده می‌شود. برای آزمون برخورد پارچه با بدن، بدن با رنگی متناسب با بردارهای نرمال سطح بدن، رنگ می‌شود. این موضوع با تنظیم رنگ هر رأس (R,G,B) به سطوح نرمال رئوس

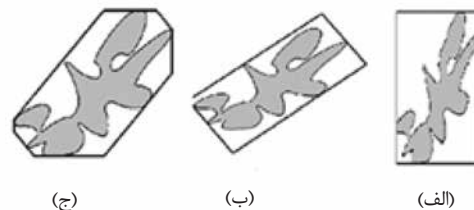


شکل ۲۰ - بهینه‌سازی آشکارسازی برخورد (روش AABB).

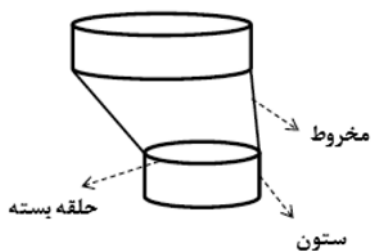
روش، آزمون آشکارسازی برخورد از بزرگ‌ترین جعبه شروع می‌شود و با تجزیه آن، آزمون ادامه پیدا می‌کند. در هر تجزیه، برخورد بین دو جعبه مجاور بررسی می‌شود. اگر دو جعبه با هم برخورد نداشته باشند، آزمون آشکارسازی برخورد برای آن دو جعبه حذف می‌شود. تنها زمانی که دو جعبه با هم تقاطع داشته باشند، محاسبات هندسی اجسام داخل آن انجام می‌شود. همان‌طور که واضح است، آزمون برخورد بین عناصری که متعلق به دو ناحیه‌ای هستند که جعبه‌های آن با هم برخورد ندارند، انجام نمی‌شود. بنابراین مقدار محاسبات در الگوریتم شناسایی برخورد کاهش می‌یابد [۹۰]. انواع مختلف از الگوریتم‌های جعبه‌های مرزی وجود دارد که رایج‌ترین آن‌ها عبارت از (۱) الگوریتم جعبه‌های مرزی موازی با محور، (۲) الگوریتم جعبه‌های مرزی آرایش یافته و (۳) الگوریتم پلی‌لوله‌های آرایش یافته است. تفاوت این روش‌ها در نحوه پوشاندن جسم به وسیله جعبه‌هاست. شکل ۱۹ اختلاف در نحوه پوشاندن جسم با این سه روش را نشان می‌دهد.

روش الگوریتم جعبه‌های مرزی موازی با محور (AABB)

رایج‌ترین الگوریتم بهینه‌سازی زمان آشکارسازی برخورد که توسط پژوهشگران در شبیه‌سازی پارچه استفاده شده، روش AABB است. چون محاسبات آزمون آشکارسازی برخورد در این روش پس از هر تغییر شکل آسان است. یک درخت AABB از بالا به پایین با تقسیم‌بندی بازگشتی ساخته شده است (شکل ۲۰). در هر مرحله از



شکل ۱۹ - پوشاندن جسم با الگوریتم‌های بهینه‌سازی آشکارسازی برخورد: (الف) الگوریتم جعبه‌های مرزی موازی با محور، (ب) الگوریتم جعبه‌های مرزی آرایش یافته و (ج) الگوریتم پلی‌لوله‌های آرایش یافته [۹۴].



شکل ۲۴- بهینه‌سازی آشکارسازی برخورد (روش حداقل احاطه کردن) [۳۱].

مورد را برای بهینه‌سازی آشکارسازی در نظر گرفته است: (۱) تعدادی از بخش‌های پارچه ناممکن است که با یکدیگر تماس داشته باشند، بنابراین فرایند آشکارسازی برخورد برای آن‌ها نادیده گرفته می‌شود. (۲) مثلث‌های همسایه در ساختار پارچه، یک تقاطع و تماس اولیه با یکدیگر دارند. بنابراین، این موضوع هم باید در فرایند آشکارسازی برخورد نادیده گرفته شود [۳۱].

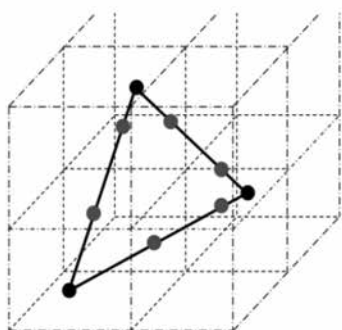
روش مش یکنواخت

Shou و همکاران در ۲۰۱۳، برای بهینه‌سازی آشکارسازی برخورد پارچه با بدن، روشی جدید براساس مش یکنواخت ارائه داده‌اند که توانست به‌طور قابل توجهی زمان محاسبات را کاهش دهد. این روش شامل سه مرحله است:

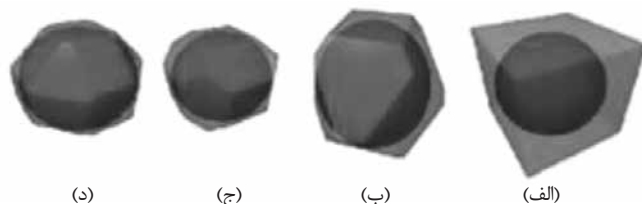
(۱) ساختن مش یکنواخت سه‌بعدی برای مدل بدن، که طول هر لبه مش برابر با میانگین طول تمام لبه‌های مثلث در مدل بدن است. همان‌طور که در شکل ۲۵ نشان داده شده است، برای هر سطح مثلث از مدل می‌توان مشی که این مثلث را احاطه کرده است، محاسبه و آن را به‌عنوان مش مرجع ذخیره کرد.

(۲) برای هر ضلع مثلث مدل پارچه در هر بازه زمانی، مشی که ضلع مثلث پارچه از آن عبور می‌کند، شناسایی می‌شود. سپس، با توجه به مش مرجع، تمام مثلث‌هایی که داخل این مش احاطه شدند، تعیین می‌شود و بررسی می‌شود که آیا مثلث‌ها با ضلع مثلث پارچه تقاطع دارد یا خیر.

(۳) از میان مثلث‌های داخل مش مدنظر که با ضلع مثلث پارچه تقاطع دارد، نزدیک‌ترین مثلث به ضلع مثلث پارچه به‌عنوان مثلثی که با پارچه برخورد دارد، شناخته می‌شود [۴۴].



شکل ۲۵- مش یکنواخت سه‌بعدی برای مدل بدن [۴۴].



شکل ۲۱- انواع رایج پلی‌لوله (الف) شش‌ضلعی، (ب) چهارده‌ضلعی، (ج) هیجده‌ضلعی و (د) بیست‌وشش‌ضلعی [۸۹].

انجام می‌شود. این فرایند، دو بافر عمق و دو بافر نرمال برای جلو و پشت بدن ایجاد می‌کند (شکل‌های ۲۲ و ۲۳). برای بررسی یک برخورد، مختصات رئوس مثلث‌های پارچه به یک شاخص در بافر نرمال و عمق تبدیل می‌شود. آزمون برخورد با مقایسه سطح V مختصات رئوس با سطح متناظر در بافر عمق انجام می‌شود [۲۳].

Vassilev و همکاران در ۲۰۰۰، دو روش فضای تصویر و سلسله جعبه‌های مرزی را با یکدیگر مقایسه کرده و نتیجه گرفته‌اند که سرعت روش فضای تصویر بیشتر است، چون نه تنها زمان مصرف شده در هر تکرار کوتاه‌تر است، بلکه تعداد تکرار کمتری نیاز دارند [۲۳].

روش حداقل احاطه کردن

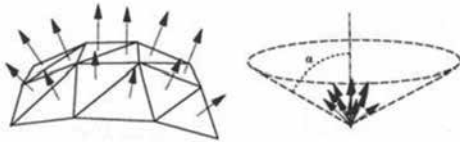
Ji و همکاران در ۲۰۰۶، روش حداقل احاطه کردن را برای بهینه‌سازی آشکارسازی برخورد پارچه-پارچه و پارچه-بدن ارائه دادند. در این روش برای آشکارسازی برخورد پارچه با بدن، ابتدا بدن به شکل گروهی از I حلقه بسته که هر حلقه از n نقطه تشکیل شده است، در نظر گرفته می‌شود. سپس، هر حلقه با یک ستون احاطه شده و هر دو ستون مجاور با یک مخروط ناقص به هم وصل می‌شود (شکل ۲۴). بنابراین، $I \times n$ نقطه بدن با I ستون و $I-1$ مخروط جایگزین می‌شود. پیش از این بهینه‌سازی، آزمون آشکارسازی برخورد هر نقطه در پارچه در برابر $I \times n \times 2$ مثلث بدن انجام می‌شود. در حالی که پس از بهینه‌سازی، آزمون آشکارسازی برخورد هر نقطه در پارچه تنها در برابر $I-1$ مثلث بدن انجام می‌شود. Ji برای آشکارسازی برخورد پارچه-پارچه، دو



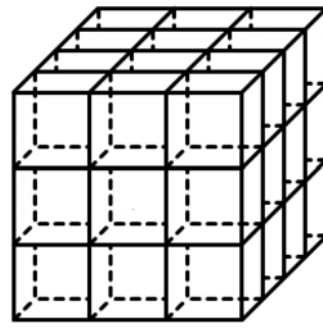
شکل ۲۲- بافر عمق [۲۳].



شکل ۲۳- بافر نرمال [۲۳].



شکل ۲۷- مخروط شامل مثلث‌های یک ناحیه از سطح پارچه [۹۰].



شکل ۲۶- بهینه‌سازی آشکارسازی برخورد (روش وکسل).

این روش‌ها را می‌توان به‌طور کلی به دو دسته هندسی و فیزیکی تقسیم کرد. در روش‌های فیزیکی، پاسخ برخورد به شکل نیروی دافعه بین اجسام اعمال می‌شود. در روش‌های هندسی برای پاسخ به برخورد، سرعت و موقعیت جسم برخوردکننده اصلاح می‌شود [۶۹]. بعضی از پژوهشگران افزون بر پاسخ به برخورد با استفاده از روش هندسی یا فیزیکی، نیروی اصطکاک را نیز به‌عنوان پاسخ برخورد در نظر می‌گیرند. در جدول ۷ انواع پاسخ‌های برخورد ارائه شده توسط پژوهشگران در شبیه‌سازی پارچه با مدل جرم و فنر نشان داده شده است.

نیروی دافعه

در این روش پس از شناسایی برخورد، یک نیروی لحظه‌ای در جهت نرمال بر حرکت ذره به منظور بازگشت به حالت اولیه استفاده می‌شود. نوع رایج این روش، روش پنالتی است. در روش پنالتی یک فنر با طول استراحت صفر به نقطه‌ای وصل می‌شود که در آن نفوذ رخ داده است (شکل ۲۸). فنر طبق قانون هوک نیرویی را در جهت نرمال سطح به نقطه نفوذ اعمال می‌کند (معادله ۱۵):

$$F_c = -K\delta \quad (15)$$

در این معادله، F_c نیروی برخورد و δ مقدار نفوذ دو ذره داخل یکدیگر است. روش پنالتی با اینکه ساده است، اما ایده‌آل نیست. چون انتخاب مقدار بهینه برای ضریب سختی فنر به آسانی امکان‌پذیر نیست. اگر ضریب سختی کم انتخاب شود، باعث نفوذ زیاد دو جسم داخل یکدیگر می‌شود.

اگر مقدار ضریب سختی فنر زیاد انتخاب شود، نیروی تماسی زیادی به ذرات برخوردکننده اعمال می‌شود که به دور شدن دو جسم از یکدیگر منجر می‌شود [۷۶]. با اعمال روش پنالتی، حرکت ذره برخوردکننده مطابق با شکل ۲۹ است.

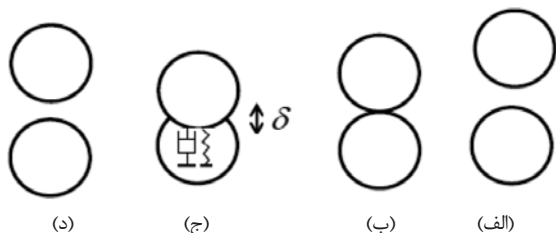
همان‌طور که از شکل ۲۹ مشخص است، روش پنالتی ماهیت کاملاً کشسان دارد و اتلاف انرژی را در نظر نمی‌گیرد. برای جبران ناتوانی

جدول ۷- انواع روش‌های پاسخ به برخورد ارائه شده توسط پژوهشگران در شبیه‌سازی پارچه با مدل جرم و فنر.

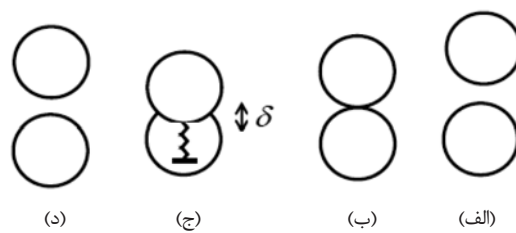
ردیف	پاسخ برخورد	مراجع
۱	نیروی دافعه	[۸۱، ۱۴، ۲۰، ۲۱، ۴۷، ۴۸، ۶۰-۶۲، ۷۲، ۷۶، ۹۱]
۲	تنظیم سرعت و موقعیت	[۷، ۲۲-۲۷، ۳۰، ۳۵، ۳۹، ۴۳، ۴۶، ۴۷، ۶۷، ۶۸، ۷۰، ۷۱، ۷۴، ۸۵]
۳	نیروی اصطکاک	[۸، ۲۲، ۲۴، ۲۵، ۲۷، ۲۹، ۴۴-۴۸، ۵۲، ۵۳، ۶۰، ۶۲، ۶۵، ۷۰، ۷۲، ۷۹، ۸۲، ۸۵]

پاسخ برخورد

بعد از اینکه برخورد بین بخش‌های مختلف پارچه یا بین پارچه و بدن شناسایی شد، به عملی نیاز است که از نفوذ و برخورد بین آن‌ها جلوگیری کند. این عمل پاسخ برخورد نامیده می‌شود. روش‌های گوناگونی برای پاسخ به برخورد در شبیه‌سازی پارچه توسط پژوهشگران ارائه شده است.



شکل ۳۰- اصلاح روش پنالتی برای پاسخ برخورد: (الف) پیش از برخورد، (ب) لحظه برخورد، (ج) نفوذ دو ذره داخل یکدیگر و (د) پس از برخورد.



شکل ۲۸- روش پنالتی برای پاسخ برخورد: (الف) پیش از برخورد، (ب) لحظه برخورد، (ج) نفوذ دو ذره داخل یکدیگر و (د) پس از برخورد.

$$V_i(t+h) = V_i(t) + \frac{(F_i + F_{c_i})\Delta t}{m_i} \quad (19)$$

در معادله (۱۹)، Δt بازه زمانی، F مجموع نیروهای داخلی و خارجی وارد بر ذره و F_c یک نیروی مجهول است و زمانی که این نیرو به نیروی F اضافه می‌شود، باعث می‌شود، سرعت ذره پس از برخورد با سرعت مرکز جرم ذرات پیش از برخورد برابر شود. F_{c_i} با استفاده از معادلات (۱۷) تا (۱۹) به شکل معادله (۴۸) محاسبه می‌شود [۹۱]:

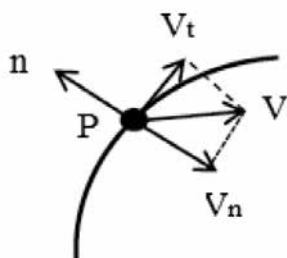
$$F_{c_i} = \frac{m_1 m_2 (V_2(t) - V_1(t))}{(m_1 + m_2)\Delta t} - F_i \quad (20)$$

عیب روش نیروی دافعه این است که پاسخ به برخورد پس از نفوذ اعمال می‌شود. یعنی ابتدا نفوذ رخ می‌دهد و سپس سامانه نسبت به آن عکس‌العمل نشان می‌دهد.

تنظیم سرعت و موقعیت

در این روش، پس از آشکارسازی برخورد، سرعت و موقعیت اجسام برخوردکننده تنظیم می‌شود. در این روش اجازه نفوذ به اجسام داده نمی‌شود. پژوهشگران از روش‌های مختلف برای تنظیم سرعت و موقعیت استفاده کردند. Bridson و همکاران در [۲۷] ۲۰۰۲، Zhong و همکاران در [۳۹] ۲۰۰۹، Ye و همکاران در [۸۵] ۲۰۰۹ و Liu و همکاران در [۴۳] ۲۰۱۲ از قانون حفظ مقدار اندازه حرکت برای تنظیم سرعت ذره پس از برخورد استفاده کردند. روش حفظ مقدار اندازه حرکت برای زمانی مناسب است که دو جسم برخوردکننده متحرک باشند.

Vassilev در ۲۰۰۲، از ضریب اصطکاک و ضریب بازگشت برای تنظیم سرعت پس از برخورد استفاده کرد (شکل ۳۱). در شکل ۲۸، P نقطه برخورد، V سرعت ذره پیش از برخورد و n بردار نرمال سطح



۳۱- روش تنظیم سرعت برای پاسخ برخورد.

روش پنالتی در محاسبه مقدار انرژی هدر رفته، از یک میراگر موازی با فنر استفاده می‌شود (شکل ۳۰). در این حالت نیروی تماس با استفاده از معادله (۱۶) محاسبه می‌شود [۹۷]:

$$F_c = -K\delta - DV_{\delta} \quad (16)$$

در این معادله، D ضریب میرایی و V_{δ} سرعت نفوذ دو ذره داخل یکدیگر است.

روش دینامیک معکوس روش دیگری است که از نیروی دافعه به منظور پاسخ به برخورد استفاده می‌کند. در این روش برخورد غیرکشسان فرض می‌شود. خاصیت چنین برخوردی این است که سرعت هر ذره برخوردکننده پس از برخورد برابر با سرعت مرکز جرم ذرات پیش از برخورد است (معادله ۱۷):

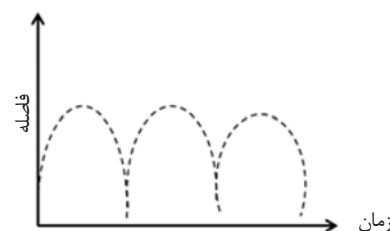
$$V_i(t+h) = V_c \quad (17)$$

در این معادله، V_c سرعت مرکز جرم دو ذره پیش از برخورد و $V_i(t+h)$ سرعت ذره پس از برخورد است. که زیروند i مطابق با ذره برخوردکننده است و می‌تواند صفر یا یک باشد. V_c مطابق با معادله (۱۸) محاسبه می‌شود:

$$V_c = \frac{m_1 V_1(t) + m_2 V_2(t)}{m_1 + m_2} \quad (18)$$

در معادله (۱۸)، m_1 و m_2 جرم دو ذره برخوردکننده، V_1 و V_2 سرعت دو ذره پیش از برخورد است.

با فرض اینکه نیروهای وارد بر ذره در طول بازه زمانی ثابت است، سرعت ذره پس از برخورد با استفاده از معادله (۱۹) محاسبه می‌شود:



شکل ۲۹- حرکت ذره برخوردکننده در روش پنالتی.

جدول ۸- پارامترهای شبیه‌سازی استفاده شده توسط Provat.

مش‌بندی		نیروها			مسئله ابرکشسانی	انتگرال‌گیری	برخورد
مستطیلی	کشش	برش	خمش	خارجی	-	-	پاسخ برخورد
				داخلی			آشکارسازی برخورد
	استفاده از قانون هوک			گرانش-میرایی-باد	تنظیم موقعیت	اویلر صریح	دینامیک معکوس

برخورد است. سرعت پس از برخورد با استفاده از معادله (۲۱) محاسبه می‌شود:

$$V(t+h) = C_{\text{refl}} V_t(t) - C_{\text{fric}} V_n(t) \quad (21)$$

در معادله (۲۱)، $V_t(t)$ جزء مماسی سرعت پیش از برخورد، $V_n(t)$ جزء عمودی سرعت پیش از برخورد، C_{refl} ضریب بازگشت، C_{fric} ضریب اصطکاک و $V(t+h)$ سرعت پس از برخورد است. دو ضریب اصطکاک و بازگشت به جنس ماده‌ای بستگی دارد که برخورد با آن صورت می‌گیرد [۲۴]. این روش برای زمانی مناسب است که یک جزء در پارچه با سطح ساکن برخورد می‌کند.

Durupinar در ۲۰۰۷، معادله ارائه شده توسط Vassilev را اصلاح کرد (معادله ۲۲). این روش نسبت به روش Vassilev دقت بیشتری دارد:

$$V(t+h) = C_{\text{fric}} V_t - C_{\text{refl}} V_n + V_{\text{human}} \quad (22)$$

در این معادله، V_{human} سرعت بدن است.

در روش Durupinar، موقعیت جدید ذرات برخوردکننده با استفاده از معادله (۲۳) تنظیم می‌شود:

$$P = \Pi + N \quad (23)$$

در معادله (۲۳)، P موقعیت نهایی ذره، Π تصویر ذره روی مثلث بدن و N بردار نرمال صفحه برخورد است [۳۵].

Fuhrmann و همکاران در ۲۰۰۳، از روش تنظیم موقعیت برای پاسخ به برخورد استفاده کردند. در این روش پس از اینکه مشخص شد، فاصله یک ذره از سطح کمتر از حد رواداری است، ذره در جهت نرمال سطح برخورد به موقعیت اولیه خود بر می‌گردد. موقعیت ذره پس از برخورد با استفاده از معادله (۲۴) محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} P(t+h) &= P_n(t) + P_t(t) \\ P_n(t) &= n \cdot (\xi - d) \\ P_t(t) &= -C_{\text{fric}} d_t \\ d_t &= d - n \cdot (d \cdot N) \end{aligned} \quad (24)$$

در این معادله، $P(t+h)$ موقعیت ذره پس از برخورد $P_n(t)$ جزء نرمال

اصطکاک زمانی که یک جزء در مدل پارچه با جزء دیگری در پارچه یا اجسام اطراف آن (مانند بدن) برخورد می‌کند. نیروی اصطکاک در خلاف جهت حرکت جزء به آن وارد می‌شود. این نیرو متناسب با سرعت نسبی بین دو جزء برخوردکننده است و به جنس آن‌ها بستگی دارد. نیروی اصطکاک مطابق با معادله (۲۵) محاسبه می‌شود:

$$F_s = \mu_s V_N \quad (25)$$

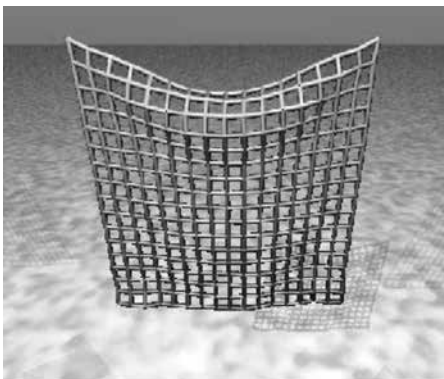
در این معادله، F_s نیروی اصطکاک، μ_s ضریب اصطکاک و V_N جزء نرمال سرعت است.

مثال‌های تجربی شبیه‌سازی پارچه و لباس

در این بخش، مثال‌های تجربی که توسط پژوهشگران در شبیه‌سازی لباس و پارچه انجام شده، شرح داده شده است. البته به دلیل تعداد زیاد مراجع، در این بخش فقط تعداد محدودی از مقالات بررسی شده است.

Provot در ۱۹۹۵، رفتار افتایش پارچه‌ای را شبیه‌سازی کرد که از دو گوشه ثابت بود (شکل ۳۲). پارامترهای شبیه‌سازی استفاده شده توسط وی در جدول ۸ نشان داده شده است [۲۰].

Villard و Borouchaki در ۲۰۰۵، فرایند افتایش پارچه‌ای را



شکل ۳۲- شبیه‌سازی رفتار افتایش پارچه از دو گوشه ثابت [۲۰].

جدول ۹- پارامترهای شبیه‌سازی استفاده شده توسط Villard و Borouchaki.

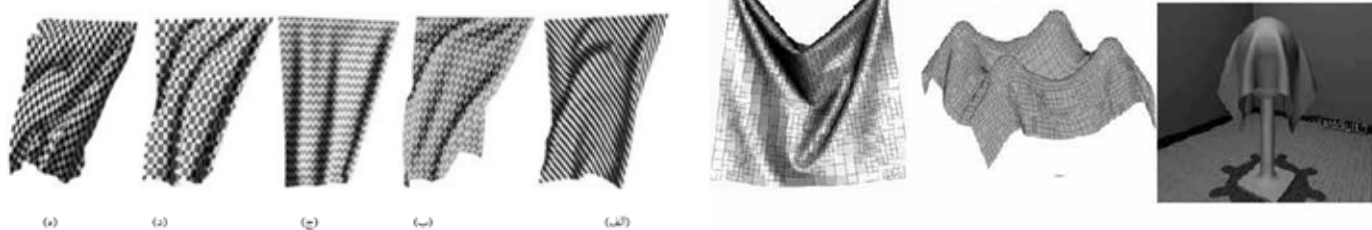
نوع مش‌بندی		انواع نیروها			نحوه حل مسئله ابركشسانی	انتگرال‌گیری	برخورد	
تطبیقی	کشش برش خمش	داخلی	خارجی	گرانش-مقاومت‌هوا	تنظیم‌موقعیت	اویلر صریح	-	آشکارسازی برخورد
							-	پاسخ برخورد
							-	دینامیک معکوس
		استفاده از قانون هوک						

تغییر شکل‌های داخلی دینامیکی پارچه دو نوع کرنش را معرفی کرد: کرنش سطحی دینامیکی و کرنش یک‌بعدی. کرنش سطحی دینامیکی با اندازه‌گیری مقدار افزایش مجموع مساحت همه مثلث‌های پارچه به‌عنوان تابعی از زمان و کرنش یک‌بعدی با اندازه‌گیری میانگین کرنش همه فنرهای ساختاری، تعیین شد. پارامترهای شبیه‌سازی استفاده شده توسط Ji در جدول ۱۰ نشان داده شده است [۳۰].

Horiba و همکاران در ۲۰۰۷، رفتار پارچه‌ای را که در معرض جریان باد قرار داشت، شبیه‌سازی کردند. آن‌ها توانستند رفتار پارچه معلق و جریان هوا را در زمان واقعی شبیه‌سازی کند (شکل ۳۵). پارامترهای

شبیه‌سازی کردند که از دو گوشه ثابت بود. همچنین، آن‌ها افتادن پارچه روی چهار گوی و افتادن روی توپ را نیز شبیه‌سازی کردند (شکل ۳۳). در مقاله آن‌ها روش جدید برپایه مش تطبیقی ارائه شده است. با این نوع مش‌بندی تعداد اجزای مش کاهش می‌یابد که این موضوع به کاهش در زمان محاسبات منجر می‌شود. پارامترهای شبیه‌سازی استفاده شده توسط Villard در جدول ۹ آمده است [۵۶].

Ji و همکاران در ۲۰۰۶، فرایند افتایش پارچه تاری و پودی و حلقوی از جنس پنبه و پلی‌استر، از دو گوشه ثابت و در معرض باد ملایم را شبیه‌سازی کردند (شکل ۳۴). Ji در مقاله خود، به منظور توصیف



شکل ۳۴- شبیه‌سازی رفتار افتایش پارچه آویخته شده در باد: (الف) پارچه حلقوی با بافت تریکو، (ب) پارچه حلقوی پودی با بافت فنسی، (ج) پارچه تاری و پودی با بافت سرزه، (د) پارچه حلقوی اینترلاک و (ه) پارچه تاری و پودی با بافت ساده [۳۰].

شکل ۳۳- شبیه‌سازی رفتار افتایش پارچه: (الف) افتادن روی توپ، (ب) افتادن روی چهار گوی و (ج) از دو گوشه ثابت [۵۶]

جدول ۱۰- پارامترهای شبیه‌سازی استفاده شده توسط Ji و همکاران.

نوع مش‌بندی		انواع نیروها			نحوه حل مسئله ابركشسانی	انتگرال‌گیری	برخورد	
مستطیلی	کشش برش خمش	داخلی	خارجی	گرانش-مقاومت‌هوا-باد	تنظیم‌موقعیت	اویلر صریح	-	آشکارسازی برخورد
							-	پاسخ برخورد
							-	
		استفاده از نتایج آزمون کلاوباتا						

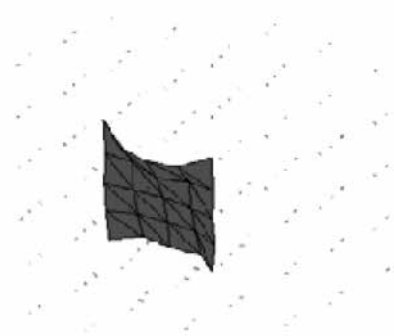
جدول ۱۱- پارامترهای شبیه‌سازی استفاده شده توسط Horiba و همکاران.

نوع مش‌بندی		انواع نیروها			نحوه حل مسئله ابركشسانی	انتگرال‌گیری	برخورد	
مستطیلی	کشش برش خمش	داخلی	خارجی	گرانش-مقاومت‌هوا-باد	-	اویلر صریح	-	آشکارسازی برخورد
							-	پاسخ برخورد
							-	
		استفاده از قانون هوک						

(شکل ۳۷). در مقاله Liu برای مدل‌سازی رفتار خمشی پارچه در سامانه جرم و فنر، مدل جدیدی ارائه شده است. این مدل براساس زاویه انحنای بین دو مثلث مجاور (که در یک ضلع مشترک هستند) و مقدار تغییرات زاویه است. پارامترهای شبیه‌سازی استفاده شده توسط Liu در جدول ۱۳ آمده است [۶۹].

Zhang و همکاران در ۲۰۱۲، رفتار افتایش سه نوع پارچه تاری و پودی با بافت ساده را با انداختن پارچه روی میزی گرد شبیه‌سازی کردند (شکل ۳۸). آن‌ها رفتار افتایش دامن را نیز شبیه‌سازی کردند (شکل ۳۹). همچنین با توجه به شکل افتایش دامن، مصارف نهایی آن را پیش‌بینی کردند. پارامترهای شبیه‌سازی استفاده شده توسط Zhang و همکاران در جدول ۱۴ آمده است [۶۷].

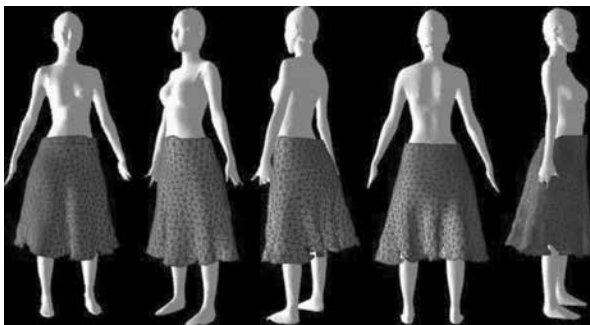
Chen و همکاران در ۲۰۱۲، شبیه‌سازی لباس برای انسان مجازی در باران را انجام دادند (شکل ۴۰) و همچنین شبیه‌سازی پارچه خیس را روی گوی متحرک انجام دادند (پارچه ابتدا خشک بود و به تدریج آب به آن اضافه شد) (شکل ۴۱). آن‌ها جرم ذرات در مدل پارچه را به شکل متغیر با زمان در نظر



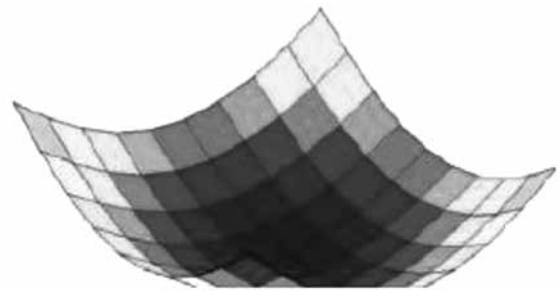
شکل ۳۵- شبیه‌سازی رفتار پارچه در برابر جریان باد [۳۶].

شبیه‌سازی استفاده شده توسط آن‌ها در جدول ۱۱ نشان داده شده است [۳۶].

Haiyan و Zhaofeng در ۲۰۰۸ رفتار افتایش پارچه‌ای را شبیه‌سازی کردند که از چهار گوشه ثابت است (شکل ۳۶). پارامترهای شبیه‌سازی استفاده شده توسط آن‌ها در جدول ۱۲ نشان داده شده است [۳۷]. Liu و همکاران در ۲۰۱۰، رفتار افتایش دامن را شبیه‌سازی کردند



شکل ۳۷- شبیه‌سازی رفتار افتایش دامن [۶۹].



شکل ۳۶- شبیه‌سازی افتایش پارچه از چهار گوشه ثابت [۳۷].

جدول ۱۲- پارامترهای شبیه‌سازی استفاده شده توسط Haiyan و Zhaofeng.

نوع مش‌بندی		انواع نیروها			نحوه حل مسئله ابركشسانی	انتگرال‌گیری	برخورد
مستطیلی	داخلي	خارجی	کشش	برش	خمش	-	آشکارسازی برخورد
						گرايش-ميرايي	پاسخ برخورد
						استفاده از قانون هوک	-
						اويلر صريح	-

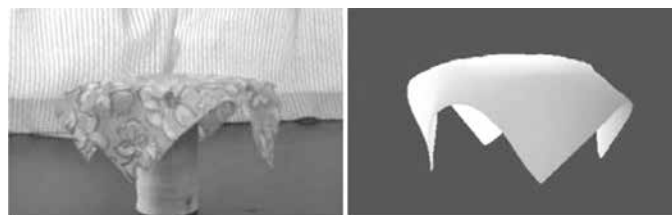
جدول ۱۳- پارامترهای شبیه‌سازی استفاده شده توسط Liu و همکاران.

نوع مش‌بندی		انواع نیروها			نحوه حل مسئله ابركشسانی	انتگرال‌گیری	برخورد
مستطیلی	داخلي	خارجی	کشش	برش	خمش	-	آشکارسازی برخورد
						گرايش-ميرايي	پاسخ برخورد
						استفاده از قانون هوک	-
						اويلر ضمنی	AABB



(الف) (ب)

شکل ۳۹- شبیه‌سازی رفتار افتایش دامن: (الف) از دید بالا و (ب) از دید کنار [۶۷].



(الف) (ب)

شکل ۳۸- شبیه‌سازی افتایش ایستا پارچه روی میز گرد: (الف) پارچه شبیه‌سازی شده و (ب) پارچه واقعی [۶۷].

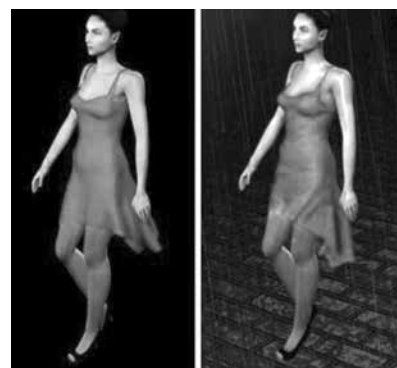
اینکه که وجود یک فنر برشی یا دو فنر برشی در یک جزء چهارگوش شده است [۶۵].
 Huang و همکاران در ۲۰۱۳، رفتار افتایش پارچه تحت وزن خود و برخورد پارچه با توپ را شبیه‌سازی کردند (شکل ۴۲).
 آن‌ها برای مدل‌سازی پارچه، مش مستطیلی را ساده کردند. با بیان

گرفتند. پارامترهای شبیه‌سازی استفاده شده در جدول ۱۵ نشان داده شده است [۶۵].
 Huang و همکاران در ۲۰۱۳، رفتار افتایش پارچه تحت وزن خود و برخورد پارچه با توپ را شبیه‌سازی کردند (شکل ۴۲).
 آن‌ها برای مدل‌سازی پارچه، مش مستطیلی را ساده کردند. با بیان



(الف) (ب)

شکل ۴۱- شبیه‌سازی رفتار پارچه خیس روی گوی متحرک: (الف) رفتار شبیه‌سازی پارچه و (ب) رفتار واقعی پارچه [۶۵].



(الف) (ب)

شکل ۴۰- شبیه‌سازی رفتار لباس: (الف) مرطوب و (ب) خشک [۶۵].

جدول ۱۴- پارامترهای شبیه‌سازی استفاده شده توسط Zhang و همکاران.

نوع مش بندی		انواع نیروها			نحوه حل مسئله ابركشسانی	انتگرال گیری	برخورد
مستطیلی	کشش برش خمش	استفاده از نتایج آزمون کلاوباتا	گرانش-مقاومت هوا	-	-	-	پاسخ برخورد
							اشکار سازی برخورد
							تنظیم سرعت و موقعیت

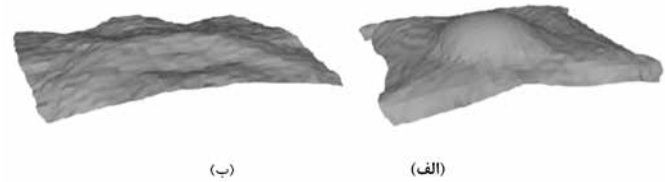
جدول ۱۵- پارامترهای شبیه‌سازی استفاده شده توسط Chen و همکاران.

نوع مش بندی		انواع نیروها			نحوه حل مسئله ابركشسانی	انتگرال گیری	برخورد
مستطیلی	کشش برش خمش	استفاده از نتایج آزمون کلاوباتا	گرانش-میرایی-آب	-	-	-	پاسخ برخورد
							اشکار سازی برخورد
							اصطکاک

جدول ۱۶- پارامترهای شبیه‌سازی استفاده شده توسط Huang و همکاران.

نوع مش بندی		انواع نیروها			نحوه حل مسئله ابركشسانی	انتگرال گیری	برخورد
ساده شده	کشش	برش	خمش	خارجی	-	-	آشكارسازی برخورد
				گراش- میرایی- آب	-	-	AABB

اجرای آن ملزوم به داشتن دانش در رشته‌های متفاوت مانند مهندسی نساجی، رایانه و مکانیک است. روش‌های گوناگونی توسط پژوهشگران برای مدل‌سازی پارچه ارائه شده است. که از میان آن‌ها مدل‌سازی جرم و فنر که جزء مدل‌های فیزیکی است، کاربرد بیشتری دارد. این روش سریع است و قابلیت زیادی در شبیه‌سازی رفتار واقعی پارچه در شرایط محیطی مختلف دارد. مدل‌سازی با جرم و فنر نسبت به روش‌های هندسی دقت بیشتر و نیز نسبت به سایر روش‌های فیزیکی سرعت بیشتری در شبیه‌سازی پارچه دارد. در این مقاله، مروری بر مقالات ارائه شده در زمینه مدل‌سازی پارچه با مدل جرم و فنر انجام شده است. انواع مدل‌های ارائه شده، انواع نیروها، مسئله ابرکشسانی روش‌های حل معادلات و مسئله برخورد بررسی شده است.



شکل ۴۲- شبیه‌سازی رفتار پارچه: (الف) برخورد با توپ و (ب) افتایش تحت وزن پارچه [۵۸].

نتیجه‌گیری

در عصر دیجیتال، فناوری شبیه‌سازی پارچه مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. شبیه‌سازی سه‌بعدی پارچه فرایند پیچیده‌ای است که

مراجع

- Weil J., The Synthesis of Cloth Objects, *Comput. Graph.*, 20, 359-376, 1986.
- Hinds B.K. and McCartney J., Interactive garment design, *Visual Comput.*, 6, 53-61, 1990.
- Chen B. and Govindaraj M., A physically based model of fabric drape using flexible shell theory, *Text. Res. J.*, 65, 324-330, 1995.
- Hu J. and Chen S., Numerical drape behavior of circular fabric sheets over circular pedestals, *Text. Res. J.*, 70, 593-603, 2000.
- Young M.K., Jeong H.C., Hwan G.C., and Do H.L., An efficient animation of wrinkled cloth with approximate implicit integration, *Visual Comput.*, 17, 147-157, 2001.
- Ng H.N. and Grimsdale, R.L., Computer graphics techniques for modeling cloth, *IEEE Comput Graph.*, 16, 28-41, 1996.
- Vassilev T., Efficient cloth model and collision detection for dressing virtual people, *Proceedings ACM/EG Games Technology Conference*, 1-10, 2001.
- Baraff D. and Witkin A., Large steps in cloth simulation, *Comput. Graph.*, 98, 43-54, 1998.
- Yang Y. and Thalmann N.M., An improved algorithm for collision detection in cloth animation with human body, *Proceeding of Pacific Graphics, World Scientific*, Singapore, 1, 237-251, 1993.
- Ascough J., Bez H.E., and Bricis A.M., A simple beam element, large displacement model for the finite element simulation of cloth drape, *J. Text. I.*, 87, 152-165, 1996.
- Gan L., Ly N.G., and Steven G.P., A study of fabric deformation using nonlinear finite elements, *Text. Res. J.*, 65, 660-668, 1995.
- Aono M., A wrinkle propagation model for cloth, *Computer Graphics Around the World, Proceedings CG International*, Berlin, 1996.
- Etmuss O., Keckeisen M., and Strasser, W., A fast finite element solution for cloth modeling, *Proceedings of the Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, Alberta, October 8-10, 2003.
- Terzopoulos D., Platt J., Barr A., and Fleischer K., Elastically deformable models, *Comput. Graph.*, 21, 205-214,

- 1987.
15. Feynman C.R., Modeling the appearance of cloth, A Thesis for the Degree of Master Science, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Cambridge, 1986.
 16. Dai X., Li Y., and Zhang X., Simulation anisotropic woven fabric deformation with a new particle model, *Text. Res. J.*, 73, 1091-1099, 2003.
 17. Zhong Y.Q. and Wang S.Y., Cloth modeling based on particle system, *J. Dong Hua University (Eng. Ed.)*, 18, 41-44, 2001.
 18. Eberhardt B., Weber A., and Strasser W., A fast, flexible particle-system model for cloth draping, *IEEE Comput. Graph.*, 16, 52-59, 1996.
 19. Breen D., House D., and Wozny M., A Particle-based model for simulating the draping behavior of woven cloth, *Text. Res. J.*, 64, 663-689, 1994.
 20. Provot X., Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior, *Proceeding of Graphics Interface*, Quebec, 147-155, 1995.
 21. Louchet J., Rovot X., and Crochemore D., Evolutionary identification of cloth animation models, *Proceedings of the Eurographics Workshop in Maastricht*, The Netherlands, 44-54, 1995.
 22. Zhong Y.Q. and Wang S.Y., An efficient way of modeling woven fabric draping, *Comput. Graph.*, 21, 205-214, 1998.
 23. Vassilev T.I. and Spanlang B., Efficient cloth model for dressing animated virtual people, *Visual Comput.*, 17, 147-157, 2000.
 24. Vassilev T.I., Dressing virtual people, In *SCI'2000 Conference*, Orlando, July 23-6, 2000.
 25. Bayraktar S., Gudukbay U.O., and Zguc B., Practical and realistic animation of cloth, *3DVT Conference*, Island, May 7-9, 2007.
 26. Bayraktar S., Simulating Cloth Behavior by Using Mass spring network, A Thesis for the Degree of Master Science, 2002.
 27. Bridson R., Fedkiw R.P., and Anderson J., Robust treatment of collisions, contact, and friction for cloth animation, *ACM T Graph*, 21, 594-603, 2002.
 28. Connor C. and Stevens K., Modeling cloth using mass spring systems, *Appl. Soft. Comput.*, 12, 266-273, 2003.
 29. Dochev V. and Vassilev T., Efficient super-elasticity handling in mass-spring systems, *International Conference on Computer Systems and Technologies CompSysTech*, 483-490, 2003.
 30. Ji F., Li R., and Qiu Y., Simulate the dynamic draping behavior of woven and knitted fabrics, *J. Ind. Text.*, 35, 201-215, 2006.
 31. Ji F., Li R., and Qiu Y., Three-dimensional garment simulation based on a mass-spring system, *Text. Res. J.*, 76, 12-17, 2006.
 32. Zhibin L. and Zhanli, L., Dynamic cloth animation in virtual environments, *Tenth International Conference on Information Visualization*, London, England, July 5-7, 2006.
 33. Charfi H., Gagalowicz A., and Brun, A., Measurement of viscosity damping parameters of fabric related to a non-linear textile model, *Text. Res. J.*, 76, 787-798, 2006.
 34. Wenhsiao S. and Chen R.Q., A Method of drawing cloth patterns with fabric behavior, *Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Applied Computer Science*, Hangzhou, China, April 16-18, 2006.
 35. Durupınar F. and Gudukbay U., A virtual garment design and simulation system, *11th International Conference Information Visualization*, Zurich, July 4-6, 2007.
 36. Horiba H., Kitahata S., Inui S., and Hashimoto M., Study on interactive cloth simulation considering airflow, *J. Inf. Comput. Sci.*, 2, 103-110, 2007.
 37. Haiyan Y. and Zhaofeng G., An improved mass-spring model to simulate draping cloth, *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, Hunan, October 20-22, 2008.
 38. Wang J., Hu X., and Zhuang Y., The dynamic cloth simulation performance analysis based on the improved spring-mass model, *International Conference on Wireless Networks and Information Systems*, Shanghai, December 28-29, 2009.
 39. Zhong Y. and Xu B., Three-dimensional garment dressing simulation, *Text. Res. J.*, 79, 792-803, 2009.
 40. Ozgen O., Kallmann M., Ramirez L., and Coimbra C.F., Underwater cloth simulation with fractional derivatives, *ACM T Graph*, 29, 1-9, 2010.
 41. Qing Z., Ying D., and Guang G., A fast predictive-corrective mass spring method in cloth simulation, *International Conference on Computer Application and System Modeling*, Taiyuan, October 22-24, 2010.
 42. Mongus D., Repnik B., Mernik M., and Zalik, B., A hybrid evolutionary algorithm for tuning a cloth-simulation

- model, *Appl. Soft Comput.*, 12, 266-273, 2012.
43. Liu H., Zhong Y., and Wang S., Combination of implicit integration and collision response for cloth simulation, *J. Fiber Bio. Inf.*, 5, 59-65, 2012.
 44. Shou Z., Yu B., Chen G., Cai H., and Liu Q., Key designs in implementing online 3d virtual garment try-on system, *Sixth International Symposium on Computational Intelligence and Design*, Hangzhou, October 28-29, 2013.
 45. Selle A., Su J., Irving, G., and Fedkiw R., Robust high-resolution cloth using parallelism, history-based collisions, and accurate friction, *IEEE T Vis Comput. Graph.*, 15, 339-350, 2009.
 46. Fuhrmann A., Gro C., and Luckas V., Interactive animation of cloth including self-collision detection, *Proceedings of Winter School of Computer Graphics*, 11, 141-148, 2003.
 47. Oh S., Ahn J., and Wohn K., Low damped cloth simulation, *Visual Comput.*, 22, 70-79, 2006.
 48. Oh S., Ahn J., and Wohn K., A new implicit integration method for low damped cloth simulation, *The 5th Korea-Israel Bi-National Conference on Geometric Modeling and Computer Graphics*, 115-121, 2004.
 49. Wang X. and Devarajan V., Improved 2D mass-spring-damper model with unstructured triangular meshes, *Visual Comput.*, 24, 57-75, 2008.
 50. Mesit J., Guha R., and Chaudhry, S., 3D soft body simulation using mass-spring system with internal pressure force and simplified implicit integration, *J. Comput.*, 2, 34-43, 2007.
 51. Cho C.S., Park J.Y., Boeing A., and Hingston, P., An implementation of a garment-fitting simulation system using laser scanned 3D body data, *Comput. Ind.*, 61, 550-558, 2010.
 52. Li Y., Chern L., Kim J.D., and Li, X., Numerical method of fabric dynamics using front tracking and spring model, *Commun. Comput. Phys.*, 5, 1-24, 2013.
 53. Rusinko J. and Swan H., Agent-based fabric modeling using differential equations, *Codee J.*, 25, 1-12, 2012.
 54. Zhengdong L. and Shuyuan S., A mass-spring model for real time cloth deformation, *The Proceedings of the International Conference on Multimedia Technology*, Hangzhou, July 26-28, 2011.
 55. Vassilev T. and Spanlang B., A Mass Spring Model for Real Time Deformable Solids, *Proceedings of East-West Vision*, Graz, Austria, September 12-13, 2014.
 56. Villard J. and Borouchaki H., Adaptive meshing for cloth animation, *Eng. Comput.*, 20, 333-341, 2005.
 57. Hutchinson D., Preston, M., and Hewitt, T., Adaptive refinement for mass spring simulations, *Eurographics Workshop on Animation and Simulation*, Poitiers, France, August 31-35, 1996.
 58. Huang W., Hu J., Yu K., Wang Y., and Jiang M., Cloth simulation based on simplified mass-spring model, *J. Elec. Eng.*, 12, 3811-3817, 2014.
 59. Zhang D. and Yuen, M., Cloth simulation using multilevel meshes, *Comput. Graph.*, 25, 383-389, 2001.
 60. Guimaraes M. and Silva D., Cloth animation with collision detection, *Proceedings of the IFIP WG 5.10 Working Conference Tokyo, Japan, April 8-12, 1991*.
 61. Zhou, C., Zhu, H., Jin, X., and Feng, J., Efficient and simple cloth animation, *Ninth International Conference on Computer Aided Design and Computer Graphics*, December 7-10, 2005.
 62. Choi K.J. and Ko H.S., Stable but responsive cloth, *ACM T Graphic*, 21, 604-611, 2002.
 63. Asmaa A.E. and Elsayed E.H., Speeding up cloth simulation by linearizing the bending function of the physical mass-spring model, *International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission*, Hangzhou, China, May 16-19, 2011.
 64. Aileni, R.M., Ciocoiu, M., and Farimap, D., 3D garesim software application for virtual garment simulation, *The 7th International Scientific Conference learning and Software for Education Bucharest*, April 28-29, 2011.
 65. Chen Y., Thalmann N.m., and Allen B.F., Physical simulation of wet clothing for virtual humans, *Visual Comput.*, 28, 765-774, 2012
 66. Dai X.Q., Furukawa T., Mitsui S., Takatera M., and Shimizu Y., Drape formation based on geometric constraints and its application to skirt modeling, *Int. J. Cloth. Sci. Tech.*, 13, 23-37, 2001.
 67. Zhang R., Wang H., Ma L., and Meng N., Modeling and simulation process for fabric and skirt based on KES testing, *The 7th International Conference on Computer Science and Education, Melbourne, Australia, July 14-17, 2012*.
 68. Bridson R., Marino S., and Fedkiw R., *Simulation of Clothing with Folds and Wrinkles*, *Symposium on Com-*

- puter Animation, New York, 28-36, 2003.
69. Liu H., Zhong Y., and Wang S., Converting to reusable garment model, *Int. J. Cloth. Sci. Tech.*, 24, 308-316, 2012.
 70. Meyer M., DeBunne G., Desbrun M., and Barr A.H., Interactive animation of cloth-like objects for virtual reality, *J. Visual Comp. Animat.*, 12, 1-12, 2001.
 71. Zhenfang C. and Bing H., Research of fast cloth simulation based on mass-spring model, *National Conference on Information Technology and Computer Science*, 323-327, 2012.
 72. Desbrun M., Schroder P., and Barr A., Interactive animation of structured deformable objects, *Proceedings of Graphics Interface*, Kingston, Canada, June 4-7, 1999.
 73. Kang Y.M., Choi J.H., and Cho H.G., Fast and stable animation of cloth with an approximated implicit method, *Proceedings of Computer Graphics International*, Geneva, Switzerland, June 19-24, 2000.
 74. Vassilev T., Spanlang, B., and Chrysanthou, Y., Fast cloth animation on walking avatars, *Comput. Graph. Forum.*, 20, 260-267, 2001.
 75. Han F., Stylios G.K., and Watt H., 3D Modelling, Simulation and Visualization Techniques For Drape Textiles and Garments, Woodhead, 2009.
 76. Chen Y., Zhu Q., and Kaufman A., Physically based animation, *Proceedings of Computer Animation*, Philadelphia, Jun 8-10, 1998.
 77. Breen D.E., House, D. H., and Wozny, M.J., A particle-based model for simulating the draping behavior of woven cloth, *Text. Res. J.*, 64, 663-685, 1994.
 78. Durupnar F., A 3D garment design and simulation system, A Thesis for the Degree of Master of Science, 2004.
 79. Bender J., Bayer, D., and Diziol, R., Dynamic simulation of inextensible cloth, *Int. J. Comput. Sci. Inf. System*, 4, 86-102, 2009.
 80. Oh S.W., Kim H.S., and Wohn K.Y., Collision handling for interactive garment simulation, *Proceedings VSMM*, Kyungju, 239-251, 2002.
 81. Volino P., Courchesne M., and Thalmann, N.M. Versatile and efficient techniques for simulating cloth and other deformable objects, *Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, New York, August 5-8, 1995.
 82. Smith P., Flag in the Wind: Using the Fundamentals of Cloth simulation to Achieve a Flag Effect, Thesis Portfolio, 2011.
 83. Thomaszewski B., Pabst S., and Strasser W., Continuum-based Strain Limiting, *Comput. Graph. Forum*, 28, 569-576, 2009.
 84. Volino. P. and Thalmann, N.M., Avenues of research in dynamic clothing, *Proceedings of the Computer Animation*, Geneva, Jun 19-21, 2002.
 85. Ye J., Webber R.E., and Wang Y., A reduced unconstrained system for the cloth dynamics solver, *Visual Comput.*, 25, 959-971, 2009.
 86. Volino P. and Thalmann N.M., Efficient self-collision detection on smoothly discretized surface animations using geometrical shape regularity, *Comput. Graph. Forum*, 13, 155-166, 1994.
 87. Li F., Chen X., Wang L., and Zhao Q., Canopy frame interactions for umbrella simulation, *Comput. Graph.*, 38, 320-327, 2014.
 88. Hasler N., Rosenhahn B., Asbach M., Ohm J.R., and Seidel H.P., An analysis-by-synthesis approach to tracking of textiles, *Motion and Video Computing*, 1-8, 2007.
 89. Mezger J., Kimmerle S., and Eitzmu O., Progress in collision detection and response techniques for cloth animation, *Proceedings of 10th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, 444-445, 2002.
 90. Provot X., Collision and self-collision handling in cloth model dedicated to design garments, *Proceedings of Computer Animation and Simulation*, 177-189, 1997.
 91. Carignan M., Yang Y., Thalmann N.M., and Thalmann D., Dressing animated synthetic actors with complex deformable clothes, computer graphics, *Proceedings of the 19th annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 26, 99-104, 1992.
 92. Goldenthal A., Implicit treatment of constraints for cloth simulation, Thesis Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy, 2010.
 93. Chapra S. and Canle R., *Numerical Methodes for Engineers*, Mc Graw-Hill, 2010.
 94. Klosowski J., Held M., Mitchell J., Sowizral H., and Zikan K., Efficient collision detection using bounding volume hierarchies of k-dops, *IEEE T Vis Comput. Graph.*, 4, 21-36, 1998.
 95. Zhang D. and Yuen M., Collision detection for clothed human animation, *Proceedings of the Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, Hong Kong, 328-

- 337, 2000.
96. Goldsmith W., *Impact: The Theory and Physical Behavior of Colliding Solids*, Edward Arnold, London, 1960.
97. Yang J. and Shang S., Cloth modeling simulation based on mass spring model, *Appl. Mech Mater.*, 310, 676-683, 2013.
98. Vassilev T. and Rousev R., Algorithm and data structures for implementing a mass-spring deformable model on GPU, *Hayhn Tpyobeha Pycehcehckh Yhbepchtet*, 47, 102-109, 2008.
99. Raymaekers C., Vanacken L., Cuppens E., and Coninx K., A comparison of different techniques for haptic cloth rendering, *Proceedings Haptex Workshop on Haptic and Tactile Perception of Deformable Objects*, 56-63, 2005.
100. Kang Y.M., Choi J.H., Cho H.G., and Lee D.H., Efficient and realistic animation of cloth with approximate implicit method and wrinkle, *Visual Comput.*, 17, 1-12, 2014.
101. Hu J., Huang W., Yu K., Huang M., and Li J., Cloth simulation with a modified implicit method based on a simplified mass-spring model, *Appl. Mech. Mater.*, 373-375, 1920-1926, 2013.
102. Liu Y., 3D garment real-time simulation in character animation, *Adv. Mater. Res.*, 108-111, 753-758, 2010.

Fabric Simulation Using Mass-Spring Model (Review)

Vajiha Mozafary and Pedram Payvandy*

Department of Textile Engineering, Faculty of Engineering, Yazd University, P.O. Box: 89195-741, Yazd, Iran

Abstract

The 3D simulation of fabrics is one of the interesting topics in textile engineering. The fabric simulation is especially important in the cloth design software. This design software can be used to visualize the fabric drape on the body or other surfaces by changing the fabric parameters. Therefore, it saves time and money and increases the customer satisfaction by preventing the production of garments that will not be sold. In the past three decades, many methods have been suggested by researchers for fabric modeling. Nowadays, these methods can be roughly divided into three classes: geometrically-based, physically-based and hybrid methods. Mass spring model, the physically-based method, is one of the methods for fabric simulation which is widely considered by the researchers. This method is a fast and flexible technique with computational efficiency. The aim of this paper is to survey the published results on fabric simulation using mass spring model. The paper reviews the presented mesh types, forces applied on model, super elastic effect and ways to settle the super elasticity problem, numerical integration methods for solving equations, collision detection and its response. Some of the fabric simulation examples presented by the researchers are also presented.

Keywords

simulation,
fabric,
mass-spring model,
physical model,
3D model

(*) Address Correspondence to P. Payvandy, Email: peivandi@yazd.ac.ir