

شبیه‌سازی رفتار آویزش پارچه با استفاده از مدل جرم و فنر

Simulation of Fabric Drape Behavior Using Mass-Spring Model

فرشته رضائی^۱، پدرام پیوندی^{۱*}، سعید ابراهیمی^۲

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

۱- دانشکده مهندسی نساجی، ۲- دانشکده مهندسی مکانیک

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۴/۲۹ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۰۲

چکیده

شبیه‌سازی رفتار آویزش پارچه از موضوعات مورد توجه در بسیاری از رشته‌ها از جمله مهندسی نساجی و رایانه است. روش‌های گوناگونی برای شبیه‌سازی رفتار آویزش پارچه توسط پژوهشگران ارائه شده است که از میان آن‌ها شبیه‌سازی براساس مدل جرم و فنر به دلیل سرعت و انعطاف‌پذیری، کاربرد گسترده‌تری دارد. در این پژوهش، یک مدل جرم و فنر برای شبیه‌سازی رفتار آویزش پارچه تار پودی ارائه شده است. سپس، نتایج شبیه‌سازی حاصل از مدل برای پارچه با بافت تافته و تراکم پودی و ابعاد متفاوت با نتایج تجربی حاصل از اندازه‌گیری آویزش پارچه با استفاده از روش پردازش تصویر مقایسه شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد، شبیه‌سازی برای پارچه با بیشترین تراکم پودی (۲۸ پود در سانتی‌متر) و کمترین ابعاد ($10 \times 10 \text{ cm}^2$) دارای بهترین تطابق با نتایج تجربی به مقدار ۹۱/۴۶٪ است.

مقدمه

نمی‌شود. بنابراین، به حل معادله‌های پیچیده درباره حالت فیزیکی پارچه نیازی نیست. مزیت این روش ساده‌بودن و سرعت زیاد در محاسبات است. البته این روش دارای معایبی نیز از جمله نداشتن قابلیت شبیه‌سازی رفتار پارچه به‌طور واقعی است [۵]. در روش‌های فیزیکی، پارچه به شکل تعداد زیادی اجزا مدل می‌شود و برای شبیه‌سازی رفتار پارچه، نیرو و انرژی مرتبط با هر جزء 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 [۶]. پژوهشگران با در نظر گرفتن مزایا و معایب هر دو روش فیزیکی و هندسی، روش‌های هیبریدی را که

رفتار آویزش پارچه از ویژگی‌های اثرگذار روی زیبایی ظاهری لباس است، بنابراین شبیه‌سازی این رفتار پیش از تولید در صنعت پوشاک مورد توجه قرار گرفته است [۱، ۲]. از ۱۹۸۰ با توسعه فناوری رایانه، شبیه‌سازی پارچه مورد توجه پژوهشگران بسیاری از رشته‌ها قرار گرفت [۳، ۴]. روش‌های توسعه یافته برای شبیه‌سازی پارچه می‌تواند به سه گروه هندسی، فیزیکی و هیبریدی دسته‌بندی شوند. در روش‌های هندسی، تغییر شکل‌های پیچیده پارچه با معادلات هندسی شبیه‌سازی می‌شوند. در این روش برای شبیه‌سازی، خواص فیزیکی پارچه به‌طور مثال جرم یا ضریب کشسانی پارچه در نظر گرفته

کلمات کلیدی

شبیه‌سازی آویزش،
مدل جرم و فنر،
پردازش تصویر

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

جرم در نظر گرفته می‌شود که با اتصالات کشسان (فنر) به یکدیگر متصل می‌شوند که شبکه حاصل مش نامیده می‌شود.

در این شبکه هر نقطه جرم دارای موقعیت، سرعت و شتاب است و نسبت به هر نیروی داخلی و خارجی که به آن اعمال می‌شود، عکس‌العمل نشان می‌دهد. هنگامی که نقطه جرم در مش تحت اعمال نیروی خارجی قرار می‌گیرد، موقعیت آن تغییر می‌کند. با تغییر موقعیت این نقطه جرم موقعیت تمام نقاط تغییر می‌کند. مجموع حرکت تمام نقاط جرم در مدل پارچه، شکل و ظاهر پارچه را معین می‌کند. مزیت مدل‌سازی به روش جرم و فنر نسبت به سایر روش‌های مدل‌سازی فیزیکی مانند اجزای محدود، امکان حل معادلات به شکل بخشی است و با توجه به اینکه معادله‌ها به‌طور هم‌زمان حل نمی‌شود، زمان محاسبات نسبت به سایر روش‌های فیزیکی کمتر است. با توجه به مزایای گفته شده این روش برای شبیه‌سازی اجسام با مش بندی زیاد مناسب است. مراحل شبیه‌سازی پارچه با استفاده از جرم و فنر به‌طور کلی به ترتیب زیر است:

- مش بندی،

- بررسی نیرو در نقاط جرم،

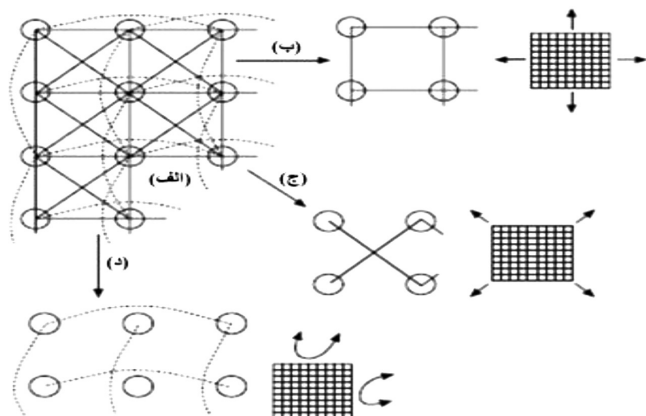
- حل معادلات دیفرانسیل حاصل به روش انتگرال گیری و

- بررسی برخورد.

پس از اجرای مراحل بیان شده موقعیت، سرعت و شتاب نقاط جرم معین و به مرحله دوم بازگشت داده می‌شود و مراحل تکرار می‌شود تا به حالت تعادل برسد [۱۵].

مرحله اول: مش بندی

مش مستطیلی رایج‌ترین نوع مش استفاده شده در سامانه‌های جرم و فنر است که اولین بار Provot ارائه کرد. در این نوع مش بندی، مدل پارچه شامل یک شبکه چهارگوش از نقاط جرم با دو جهت اصلی مطابق با جهت تار و پود است. هر نقطه جرم با همسایه آن به وسیله یک فنر اتصال دارد که این فنرها برحسب نوع اتصال به سه گروه فنرهای ساختاری، برشی و خمشی دسته‌بندی می‌شوند. ساختار مش مستطیلی در شکل ۱- الف نشان داده شده است [۱۰].



شکل ۱- مش مستطیلی برای مدل‌سازی رفتار پارچه: (الف) ساختار کلی، (ب) فنرهای ساختاری، (ج) فنرهای برشی و (د) فنرهای خمشی [۱۶].

ترکیبی از این دو روش است، مورد توجه قرار دادند [۷].

Weil [۵] روش هندسی را برای شبیه‌سازی تعداد چین‌ها در یک پارچه مربعی آویزش یافته در حالت ایستا ارائه کرد. Haumann و Parent [۸] یک مدل جرم و فنر را برای شبیه‌سازی پارچه‌های تار پودی ارائه دادند. مدل آن‌ها قابلیت شبیه‌سازی دقیق رفتار پارچه‌های تار و پودی را نداشت و فقط برای شبیه‌سازی بعضی از انواع تغییر شکل‌های ظاهری مناسب بود. برای افزایش دقت شبیه‌سازی رفتار پارچه، Breen و همکاران [۹] از مدل سامانه نقطه جرمی و روش حداقل انرژی برای شبیه‌سازی رفتار آویزش پارچه تار پودی استفاده کردند. Provot [۱۰] یک سامانه جرم و فنر ساده را برای شبیه‌سازی رفتار پرچم در باد که از دو گوشه ثابت بود، ارائه داد. در این مدل، رفتار فنرها به شکل خطی در نظر گرفته شدند و برای حل معادلات دیفرانسیل حاصل از شبیه‌سازی از روش اویلر استفاده شد. روش Provot به علت نوع روش حل معادلات دیفرانسیل دقت کمی داشت.

Zhang و همکاران [۱۱] برای شبیه‌سازی رفتار پارچه با استفاده از مدل جرم و فنر از مش بندی چندلایه استفاده کردند. این نوع مش بندی دارای سرعت زیادی است، اما برای شبیه‌سازی رفتار دینامیکی پارچه روشی مناسب نیست. Ko و Choi [۱۲] برای مدل کردن رفتار کپ کردن پارچه تار پودی از مدل جرم و فنر استفاده کردند. در این روش، برای حل معادله‌های دیفرانسیل حاصل از شبیه‌سازی از روش انتگرال گیری نیمه‌ضمنی استفاده شد که این روش نسبت به روش اویلر دقت بیشتری داشت.

Ji و همکاران [۱۳] رفتار آویزش پارچه تار پودی را با مدل جرم و فنر شبیه‌سازی و ارائه کردند. آن‌ها برای تعیین پارامترهای مدل (سختی فنر) از نتایج سامانه کاواباتا استفاده کردند. Selle و همکاران [۱۴] پارچه را به شکل شبکه جرم و فنر با وضوح زیاد که شامل بیش از دو میلیون مثلث است، شبیه‌سازی کردند. همچنین، آن‌ها یک مدل دقیق را برای اصطکاک بین پارچه و جسم پیشنهاد کردند.

با توجه به مراجع مرور شده مشاهده می‌شود، استفاده از مدل جرم و فنر در مدل‌سازی رفتار آویزش پارچه به‌طور کلی توسط برخی پژوهشگران انجام شده است. اما در پژوهش پیش رو براساس مدل جرم و فنر، مدلی ارائه شده که دارای مش بندی متفاوتی است و با استفاده از آن مدل‌سازی رفتار آویزش پارچه با بافت ساده و تراکم پودی و ابعاد متفاوت انجام شد و تمام معادله‌های حاکم در نرم‌افزار Matlab کدنویسی شده است. بدین منظور، برنامه نوشته شده قابلیت محاسبه اندازه جرم ذرات و سختی فنرها را براساس تراکم مدنظر دارد. افزون بر این مورد، برای بررسی دقت مدل ارائه شده، نتایج حاصل از شبیه‌سازی به روش پردازش تصویر مقایسه شده و اثر تراکم و ابعاد روی دقت شبیه‌سازی تجزیه و تحلیل شد.

شبیه‌سازی پارچه با جرم و فنر

شبیه‌سازی با جرم و فنر روشی فیزیکی است که به‌طور گسترده و مؤثر برای مدل‌سازی اجسام انعطاف پذیر استفاده می‌شود. بنابراین، برای شبیه‌سازی رفتار ایستا و دینامیکی پارچه استفاده از این روش بسیار مورد توجه است. این روش به دلیل سادگی، انعطاف پذیری و سهولت در اجرا مورد توجه پژوهشگران واقع شده است. در این مدل جسم به شکل شبکه‌ای از نقاط

مرحله سوم: انتگرال‌گیری عددی

برای حل معادلات دیفرانسیل حاصل از مدل‌سازی فیزیکی با جرم و فنر 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 زمان محاسبات برای انتگرال‌گیری در یک بازه زمانی، بازه زمانی، دقت و ثبات بستگی دارد. انواع رایج روش‌های انتگرال‌گیری به کار گرفته شده توسط پژوهشگران برای شبیه‌سازی پارچه با مدل جرم و فنر به‌طور عمده به دو گروه صریح (explicit) و ضمنی (implicit) دسته‌بندی می‌شوند.

در روش صریح موقعیت نقطه جرم در زمان بعدی با برون‌یابی مستقیم از موقعیت قبلی نقطه محاسبه می‌شود. این روش، روشی سریع و آسان است، اما برای حفظ دقت و ثبات سامانه، باید بازه زمانی کم انتخاب شود. انواع رایج این روش عبارت از روش اویلر، نقطه میانی، رانگ کوتا و ورلت [۲، ۱۷] است.

در روش ضمنی، موقعیت زمانی بعدی به‌طور مستقیم با درون‌یابی از موقعیت بعدی معین می‌شود. این روش برخلاف روش صریح در بازه زمانی بزرگ نیز پایدار بوده اما نسبت به روش صریح دارای حجم محاسبات بیشتری است.

مرحله چهارم: بررسی برخورد

زمانی که یک جسم در محیط در حال حرکت است، احتمال برخورد آن با سطوح اطراف وجود دارد که اگر به این موضوع در شبیه‌سازی توجه نشود، جسم داخل سطح نفوذ کرده و از آن عبور می‌کند. در موضوع 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 به دو موضوع آشکارسازی برخورد و پاسخ برخورد پرداخته می‌شود.

مهم‌ترین و سخت‌ترین مسئله در شبیه‌سازی پارچه، آشکارسازی برخورد و پاسخ به آن است [۱۶]. آشکارسازی برخورد، تماس هندسی و نزدیکی بین اجسام را بررسی کرده و بیشترین زمان را در شبیه‌سازی پارچه صرف می‌کند، زیرا تعداد بخش‌های هندسی مانند ذرات، سطوح‌ها و کناره‌ها در یک شبکه زیاد است. حالت کلی آشکارسازی برخورد، تماس پارچه و یک جسم است. برای جلوگیری از نفوذ و برخورد عناصر به جسم به اعمال نیرو و فشار نیاز است که پاسخ برخورد یا واکنش برخورد نامیده می‌شود.

پژوهشگران روش‌های گوناگونی را برای پاسخ به برخورد در شبیه‌سازی پارچه ارائه کرده‌اند که از آن جمله می‌توان به نیروی فشاری (constraint-based)، نیروی پنالتی (penalty-forces)، محرک آنی (impulse-based) و دینامیک اجسام صلب اشاره کرد [۱۸]. این مراحل را پژوهشگران انجام داده و روش استفاده شده در پژوهش حاضر در ادامه بیان می‌شود.

فره‌های ساختاری: همان‌طور که در شکل ۱-ب مشاهده می‌شود، این فنرها هر نقطه جرم را به نزدیک‌ترین نقطه جرم در جهت افقی و عمودی اتصال می‌دهند. نقش فنرهای ساختاری مدل‌سازی رفتار کششی و فشردگی پارچه است

فره‌های برشی: همان‌طور که در شکل ۱-ج مشاهده می‌شود، این فنرها هر نقطه جرم با نقطه جرم مجاور آن را در جهت مورب به هم اتصال می‌دهند. نقش فنرهای برشی مدل‌سازی رفتار برشی پارچه است.

فره‌های خمشی: همان‌طور که در شکل ۱-د مشاهده می‌شود، این فنرها هر دو نقطه جرم را در امتداد کناره‌ها به شکل یک در میان در جهت افقی و عمودی به یکدیگر متصل می‌کنند. نقش فنرهای خمشی مدل‌سازی رفتار خمش پارچه است.

مرحله دوم: بررسی نیروها

در مدل جرم و فنر، حرکت هر نقطه جرم به مجموع نیروهای داخلی و خارجی اعمال شده بر آن نقطه جرم بستگی دارد. پژوهشگران با استفاده از قانون دوم نیوتن موقعیت این نقاط جرم را معین کردند [۱۷-۱۰]. این قانون به شکل معادله (۱) بیان می‌شود:

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

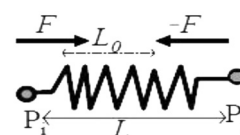
در این معادله، m_i جرم نقطه i ام (kg)، a_i شتاب وارد بر نقطه i ام (m/s^2) و F_i نیروی وارد بر نقطه i ام (N) است. نیروی F_i شامل دو بخش نیروهای داخلی و خارجی است. نیروهای داخلی معین‌کننده خواص مکانیکی پارچه هستند. این نیروها به‌طور عمده شامل نیروهای کشش، خمش و برش هستند. تعدادی از پژوهشگران برای محاسبه نیروهای داخلی از قانون هوک استفاده کردند.

نیروهای داخلی در هر نقطه جرم، مجموع نیروی فنرهای متصل به این نقطه است. مطابق با شکل ۲ نیروی داخلی در نقطه P_i به شکل معادله (۲) بیان می‌شود:

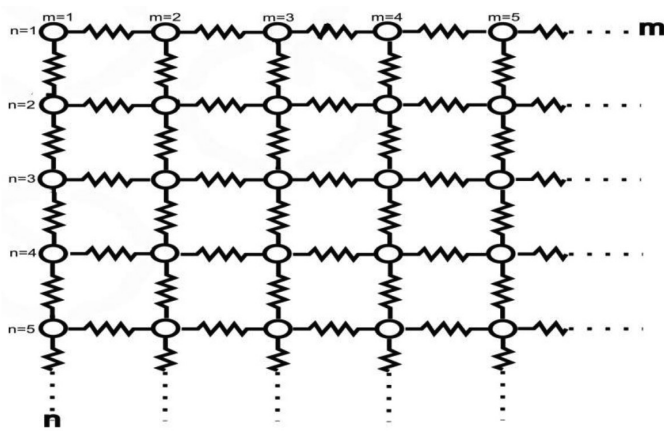
$$F(P_i) = -K(L - L_0) \quad (2)$$

در این معادله، L طول فنر (m)، L_0 طول طبیعی فنر (m)، F نیروی وارد بر نقطه P_i (N) و K سختی فنر بین دو نقطه i و j (N/m) است [۱۰].

نیروهای خارجی مطابق با نوع محیطی که برای شبیه‌سازی پارچه در نظر گرفته می‌شود، متفاوت‌اند. انواع نیروهای خارجی که توسط پژوهشگران در مدل‌سازی جرم و فنر استفاده شده است، شامل نیروی وزن، نیروی مقاومت هوا، باد، میراگر (damping)، نیروی دوخت و آب است که اثر آن‌ها در طول مش پارچه یکسان است.



شکل ۲- نیروی فنر اعمال شده بین دو نقطه جرم.



شکل ۴- استفاده از فنرهای ساختاری در مش‌بندی.

در مرحله دوم به هر نقطه جرم نیروی داخلی و خارجی اعمال می‌شود. نیروی داخلی مورد استفاده با توجه به اینکه در مش‌بندی فقط از فنرهای ساختاری استفاده شده، نیروی کششی است که از قانون هوک پیروی می‌کند. نیروی خارجی اعمال شده در این شبیه‌سازی شامل نیروی گرانش است. نیروی گرانش رایج‌ترین نیروی خارجی استفاده شده توسط پژوهشگران در شبیه‌سازی پارچه با مدل جرم و فنر است. نیروی گرانش وارد بر هر نقطه جرم مطابق با معادله (۳) تعریف می‌شود:

$$F_{gravity} = mg \quad (3)$$

در این معادله، m جرم نقطه (kg)، g شتاب گرانش (m/s^2) و $F_{gravity}$ نیروی گرانش (N) است.

در مرحله سوم برای محاسبه سرعت و موقعیت نقاط جرم از انتگرال گیری عددی استفاده می‌شود. در این مقاله برای انجام محاسبات کمتر از روش انتگرال گیری رانگ کوتا مرتبه ۴ که به روش صریح است، استفاده شده است. این روش نسبت به سایر روش‌های صریح مانند اویلر، ورت و نقطه میانی نتایج دقیق‌تر را در بازه زمانی بزرگ‌تر ارائه می‌دهد و دارای دقت و همگرایی زیادی است. محاسبه موقعیت نقاط جرم در این روش در زمان t_0+h با استفاده از معادله (۴) است:

$$\begin{aligned} k_1 &= hf(x_0, t_0) \\ k_2 &= hf\left(x_0 + \frac{k_1}{2}, t_0 + \frac{h}{2}\right) \\ k_3 &= hf\left(x_0 + \frac{k_2}{2}, t_0 + \frac{h}{2}\right) \\ k_4 &= hf(x_0 + k_3, t_0 + h) \\ x(t_0 + h) &= x_0 + \frac{1}{6}k_1 + \frac{1}{3}k_2 + \frac{1}{3}k_3 + \frac{1}{6}k_4 \end{aligned} \quad (4)$$

در این معادله، h بازه زمانی مدنظر است. در هر مرحله رانگ کوتا، ارزیابی

اندازه‌گیری ضریب آویزش با پردازش تصویر

به‌طور مرسوم آویزش با دستگاه کیوسیک اندازه‌گیری می‌شود که روشی کند و زمان‌بر است. در این روش، ضریب آویزش با استفاده از وزن کاغذ محاسبه می‌شود، در حالی که در روش پردازش تصویر ضریب آویزش با محاسبه مساحت سطح به‌دست می‌آید. بررسی‌های انجام شده توسط پژوهشگران پیشین نشان می‌دهد، همبستگی بسیار قوی بین ضریب آویزش در روش کیوسیک و روش پردازش تصویر وجود دارد. این بدین معنی است که روش پردازش تصویر دقت تصویر را برای استخراج اطلاعات ضروری به منظور محاسبه ضریب آویزش، کاهش نمی‌دهد. از مزایای استفاده از این روش حذف حلقه‌های کاغذی، کاهش خطا و ایجاد بانک اطلاعاتی است که تصویر به‌دست آمده از آویزش نمونه‌ها را برای مراجعه در آینده، ذخیره‌سازی می‌کند. با توجه به ویژگی‌های گفته شده این روش جایگزین مناسبی در صنعت است [۱۹-۲۲].

روش پژوهش

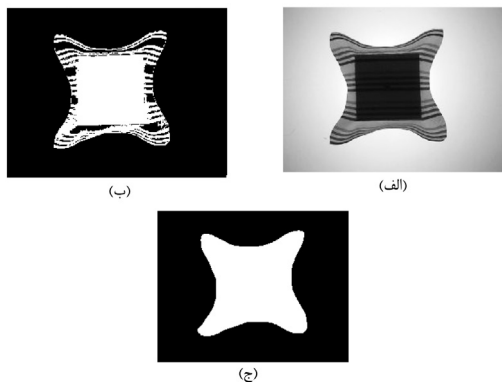
در این بخش، ابتدا مراحل شبیه‌سازی رفتار آویزش پارچه استفاده شده در این مقاله بررسی می‌شود. سپس، به روش پردازش تصویر برای محاسبه ضریب آویزش پرداخته می‌شود.

مرحله اول: شبیه‌سازی رفتار آویزش پارچه با مدل جرم و فنر

به‌طور کلی شبیه‌سازی انجام شده در مقاله طبق نمودار ارائه شده در شکل ۳ است. همان‌طور که در این نمودار نشان داده شده است، در مرحله اول برای اجرای مش‌بندی از مش مستطیلی استفاده می‌شود، اما تفاوت کار ارائه شده در این مقاله با مدل Provot، شبیه‌سازی رفتار آویزش پارچه با استفاده از فنرهای ساختاری در مش‌بندی بوده که در شکل ۴ نشان داده شده است. استفاده از چنین مش‌بندی باعث می‌شود، تعداد فنرها کاهش یابد، محاسبات کمتر و در نتیجه دقت خوبی حاصل شود.



شکل ۳- مراحل شبیه‌سازی رفتار آویزش پارچه.

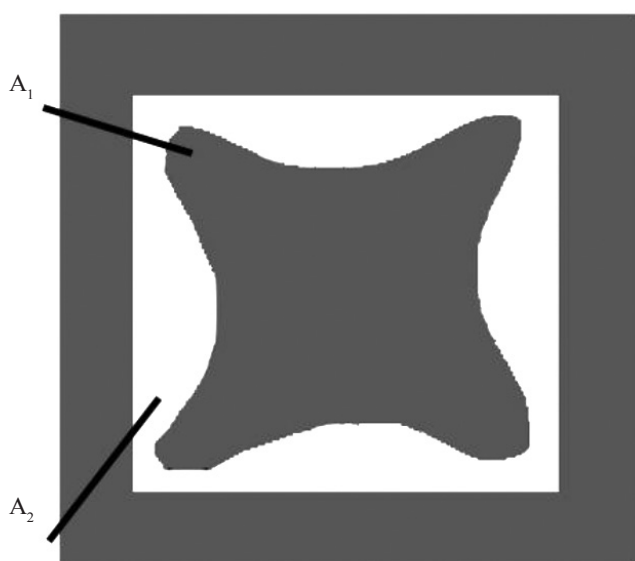


شکل ۷- عملیات پردازش تصویر: (الف) خاکستری کردن تصویر رنگی، (ب) سیاه و سفید کردن تصویر و (ج) یکپارچه‌سازی تصویر.

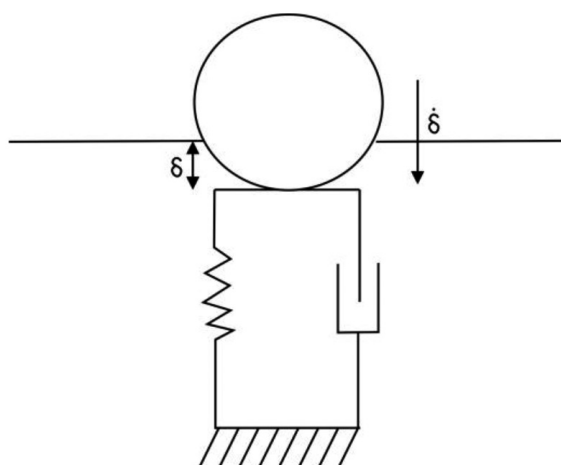
در نظر نمی‌گیرد [۲۳]. برای جبران ناتوانی مدل هرتز در محاسبه مقدار انرژی هدر رفته، از یک میراگر استفاده می‌شود. ساده‌ترین مدل ارائه شده به این روش، مدل گرانبوکشسان خطی (linear viscoelastic model) است که در این مدل فنر و میراگر به‌طور موازی در نقطه تماس در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و به نام مدل کلون-ویت شناخته می‌شود که به شکل معادله (۵) محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$F_c = K\delta + D\dot{\delta} \quad (5)$$

در این معادله، K ضریب سختی فنر (N/m)، δ مقدار نفوذ دو ذره در یکدیگر (m)، D ضریب میرایی (N.s/m) و $\dot{\delta}$ سرعت نفوذ دو جسم در یکدیگر (m/s) است. نیروی پنالته تا زمانی به نقاط جرم وارد می‌شود که آن نقاط با سطح در تماس باشند. شکل ۵ برخورد یک نقطه جرمی را با سطح نشان می‌دهد.

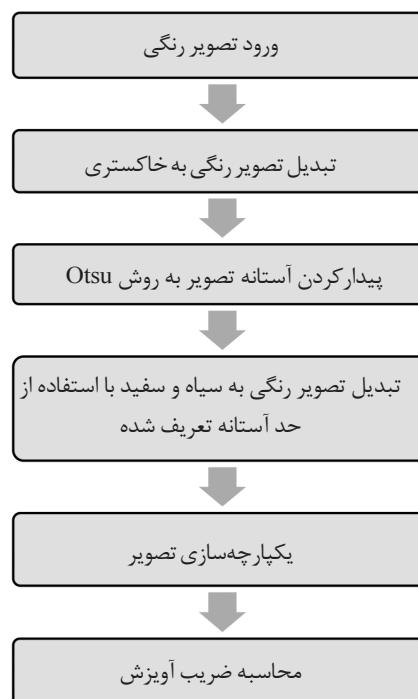


شکل ۸- A_1 مساحت پارچه آویزان شده و A_2 مساحت پارچه.



شکل ۵- برخورد یک نقطه جرمی با سطح.

چهار تابع را انجام می‌دهد. 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 را می‌دهد. در مرحله چهارم موضوع برخورد بررسی می‌شود که در این پژوهش از نیروی پنالته برای محاسبه نیرو هنگام تماس (برخورد) استفاده شده است. این روش در مقایسه با سایر روش‌های گفته شده، ساده‌تر است و به زمان کمتری برای محاسبات نیاز دارد. همچنین، این روش برای نمایش تصویری از نحوه تماس استفاده می‌شود. اولین مدل ارائه شده برای محاسبه تماس با استفاده از نیروی پنالته مدل هرتز بوده که اساس آن بر نظریه کشسانی بنا نهاده شده است، اما از آن در دو مرحله تماس که شامل فشار و انبساط است، نمی‌توان استفاده کرد. این به دلیل ماهیت کاملاً کشسانی مدل هرتز است که هدر رفت انرژی را



شکل ۶- مراحل پردازش تصویر برای محاسبه ضریب آویزش پارچه.

جدول ۱- خواص پارچه هر گروه.

شماره نمونه	تراکم تار (تار در سانتی‌متر)	تراکم پود (پود در سانتی‌متر)	وزن نمونه (g/m ²)
۱	۴۰	۱۶	۹۲/۷
۲	۴۰	۲۰	۱۰۰/۸
۳	۴۰	۲۴	۱۱۰/۸
۴	۴۰	۲۸	۱۲۴/۶

جدول ۳- تعداد نقاط جرم برای هر نمونه.

شماره نمونه	تعداد نخ تار (m)	تعداد نخ پود (n)
۱	۴۱	۱۷
۲	۴۱	۲۵
۳	۴۱	۲۱
۴	۴۱	۲۹

برای یافتن ضریب آویزش با استفاده از تصویر، ابتدا تصویر رنگی پارچه آویزان شده به سیاه و سفید تبدیل و سپس یکپارچه‌سازی تصویر سیاه و سفید برای سفیدشدن تمام مساحت داخل پارچه انجام می‌شود. از مجموع تمام نقاط سفید که با عدد ۱ نشان داده می‌شوند، مساحت داخل پارچه را محاسبه می‌کنند. از این روش برای محاسبه مساحت صفحه مربعی و نیز مساحت پارچه پیش از آویزش استفاده می‌شود. شکل ۸ مساحت پارچه آویزان شده و مساحت پارچه پیش از آویزش را نشان می‌دهد.

مرحله دوم: انجام عملیات پردازش تصویر

در پژوهش حاضر از روش پردازش تصویر برای تسریع در مقایسه ضریب آویزش نمونه واقعی و شبه‌سازی استفاده شده است. عملیات پردازش تصویر با به کار بردن الگوریتم محاسبه ضریب آویزش در نمودار ارائه شده در شکل ۶ نشان داده شده است.

همان‌طور که در نمودار شکل ۶ مشخص است، استفاده از روش آستانه‌گیری برای تبدیل تصاویر با مقیاس خاکستری به تصاویر سیاه و سفید (دودویی) انجام می‌شود. برای پیدا کردن آستانه تصویر از روش Ostu استفاده می‌شود که روشی مؤثر و مناسب در انتخاب خودکار آستانه بهینه، با بیشینه‌کردن واریانس بین‌گروهی و کمینه‌کردن واریانس داخل گروهی پیکسل‌هاست [۲۵]. در مرحله بعد عملیات یکپارچه‌سازی تصویر انجام می‌شود. عملیات یکپارچه‌سازی تصویر در واقع همان عملیات بستن تصویر است که منجر به بستن جزئیات تاریک کوچک‌تر از ساختار اصلی در تصاویر سیاه و سفید می‌شود. این روش نویز را حذف می‌کند و تصویر پارچه آویزش داده شده را از تصویر پس‌زمینه مجزا می‌کند. شکل ۷ عملیات پردازش تصویر اعمال شده روی نمونه‌ها را با استفاده از الگوریتم بیان شده در شکل ۶ نشان می‌دهد.

برای محاسبه ضریب آویزش از معادله (۶) استفاده می‌شود:

$$DC = \frac{(A_2 - A_1)}{(A_0 - A_1)} \quad (6)$$

در این معادله، A_0 ، A_1 و A_2 به ترتیب نشان‌دهنده نواحی آویزان نشده، صفحه مربعی و نواحی آویزان شده نمونه است. این معادله نشان می‌دهد، فاکتور آویزش با مساحت سطح در ارتباط و مجزا از شکل ظاهری است.

جدول ۲- نتایج ضریب آویزش با استفاده از روش پردازش تصویر.

شماره نمونه	ابعاد (cm ²)		
	۳۰×۳۰	۲۰×۲۰	۱۰×۱۰
۱	۰/۱۵۹۴	۰/۳۶۴۲	۰/۷۷۵۳
۲	۰/۱۸۷۴	۰/۴۲۴۸	۰/۷۸۹۸
۳	۰/۱۹۵	۰/۴۵۱۵	۰/۸۰۴۸
۴	۰/۱۹۷	۰/۵۱۱۱	۰/۸۵۱۵

تجربی

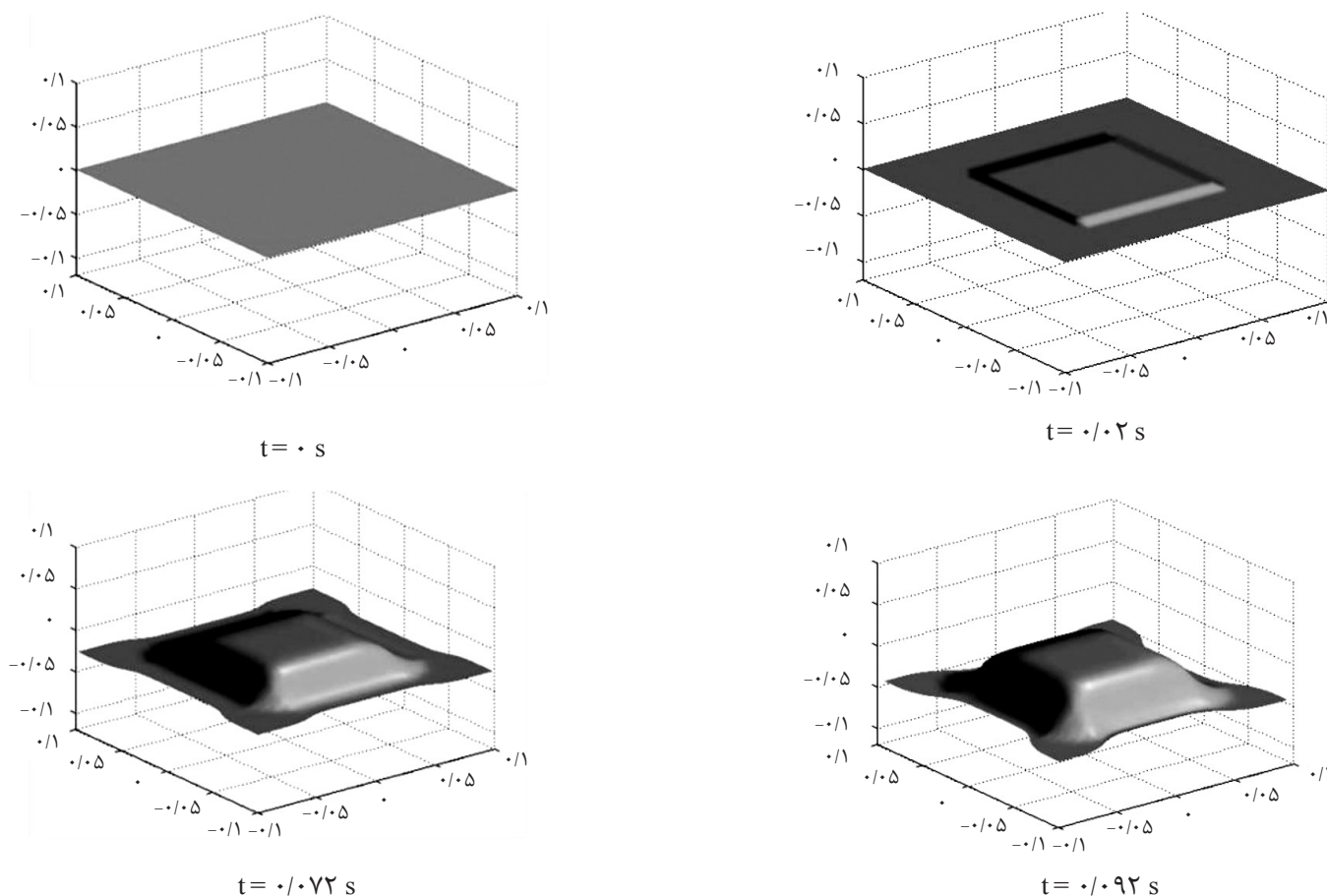
برای انجام آزمون رفتار آویزش پارچه‌های تار پودی، چهار نمونه پارچه از یک جنس با طرح تافته و دارای تراکم‌های پودی متفاوت انتخاب شد.

جنس نخ تار پارچه‌های رشته‌ای پلی‌استر با نمره نخ ۵۳ انگلیسی و جنس نخ پود پارچه‌های پنبه-پلی‌استر (۳۵٪ پنبه و ۶۵٪ پلی‌استر) با نمره نخ ۳۰ انگلیسی است. جدول ۱ خواص پارچه هر گروه را نشان می‌دهد.

برای انجام آزمون آویزش از هر پارچه، سه نمونه مربعی شکل با ابعاد ۱۰×۱۰، ۲۰×۲۰ و ۳۰×۳۰ cm² تهیه شد. سپس، هر یک از نمونه‌ها به ترتیب روی صفحه‌ای با ابعاد ۵×۵، ۱۰×۱۰ و ۱۵×۱۵ cm² قرار داده شد. برای گرفتن تصویر، دوربین CCD با وضوح ۶۴۰×۴۸۰ (VGA) به کار گرفته شد. پس از تهیه تصویر از نمونه‌ها، مقادیر ضریب آویزش هر یک نمونه‌ها با استفاده از روش پردازش تصویر محاسبه شد که این مقادیر در جدول ۲ آمده است.

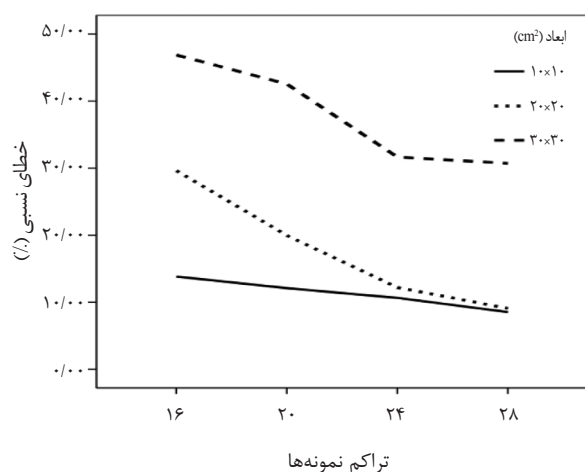
جدول ۴- ورودی‌ها و خروجی‌های الگوریتم شبه‌سازی.

ورودی	تعداد نقاط جرم ابعاد پارچه (m) ضریب سختی فنر (N/m) جرم پارچه (g)
خروجی	موقعیت نقاط جرم در هر لحظه (m) سرعت نقاط جرم در هر لحظه (m/s) شکل هندسی



شکل ۹- مراحل شبیه‌سازی بین $t=0$ s تا $t=0.92$ s.

مقدار خطا مقادیر ضریب سختی تصحیح شده و عملیات شبیه‌سازی تکرار و ضریب آویزش محاسبه می‌شود. برای یافتن بهترین مقادیر ضریب سختی مراحل گفته شده تا زمانی تکرار می‌شود که ضریب آویزش حاصل از شبیه‌سازی کمترین مقدار خطا را داشته باشد.



شکل ۱۰- بررسی درصد خطای نمونه‌های شبیه‌سازی شده در تراکم‌ها و ابعاد متفاوت.

شبیه‌سازی رفتار آویزش نمونه‌ها با مدل جرم و فنر

در این بخش رفتار آویزش نمونه‌ها با ابعاد 10×10 ، 20×20 و 30×30 cm^2 شبیه‌سازی شد. بدین منظور، از مش‌بندی با ابعاد 10×10 ، 20×20 و 30×30 cm^2 استفاده شده است. برای هر یک از ابعاد بیان شده، نمونه‌هایی با چهار تراکم پودی مختلف وجود دارد که تعداد نقاط جرم در آن‌ها متفاوت است. در مش‌بندی ارائه شده در این مقاله برای ساده‌سازی فقط از فنرهای ساختاری استفاده شده است. جدول ۳ تعداد نقاط جرم را برای هر نمونه نشان می‌دهد که در هر سه ابعاد ثابت هستند. پارچه شبیه‌سازی در ارتفاعی بیشتر از سطح مربعی رها می‌شود و هنگام برخورد به سطح مربعی 5×5 ، 10×10 و 15×15 cm^2 پاسخ به برخورد پارچه به سطح از نیروی تماسی استفاده شده است که این نیرو از نفوذ پارچه به داخل سطح جلوگیری می‌کند. مقادیر ضریب سختی فنر در شبیه‌سازی با استفاده از روش میان‌یابی حاصل می‌شود، زیرا استفاده از روش‌های تجربی خیلی پیچیده است. ضریب سختی فنر بدین ترتیب محاسبه شد که ابتدا یک مقدار فرضی ضریب سختی به برنامه شبیه‌ساز وارد شده و شکل هندسی حاصل از آن برای محاسبه مقدار ضریب آویزش، تحت عملیات پردازش تصویر قرار می‌گیرد و درصد خطای ضریب آویزش نمونه شبیه‌سازی نسبت به نمونه واقعی محاسبه می‌شود. سپس، با توجه به

جدول ۵- مقادیر ضریب آویزش محاسبه شده برای نمونه‌های شبیه‌سازی شده.

خطای نسبی (%)	ضریب آویزش (DC)	ضریب سختی کششی (N/m) در جهت نخ‌های پود	ضریب سختی کششی (N/m) در جهت نخ‌های تار	شماره نمونه	ابعاد پارچه (cm ²)
۱۳/۸۳	۰/۶۶۷۴	۱۰۰	۵	۱	۱۰×۱۰
۱۲/۱۰	۰/۶۹۴۳	۳۰	۵	۲	
۱۰/۶۴	۰/۷۱۹۲	۹۰	۴۰	۳	
۸/۵۴	۰/۷۷۸۸	۷	۲	۴	
۲۹/۶۲	۰/۴۷۲۱	۸۰۰	۶۰۰	۱	۲۰×۲۰
۱۹/۹۶	۰/۵۰۹۶	۷۰۰	۳۰۰	۲	
۱۲/۲۰	۰/۵۰۶۶	۵۰۰	۱۰۰	۳	
۹/۴۳	۰/۷۷۸۸	۲۰۰	۱۰۰	۴	
۴۶/۸۶	۰/۲۳۴۱	۷۰۰	۴۰۰	۱	۳۰×۳۰
۴۲/۵۳	۰/۲۶۷۱	۸۰۰	۵۰۰	۲	
۳۱/۶۴	۰/۲۵۶۷	۵۰۰	۲۰۰	۳	
۳۰/۷۱	۰/۲۵۷۵	۴۰۰	۱۰۰	۴	

در حالی که هر چه تعداد نقاط جرم کمتر باشد، شکل ظاهری پارچه سفت‌تر و جزئیات کمتری نشان داده می‌شود. همچنین نمودار ارائه شده در شکل ۸ نشان می‌دهد، با تعداد ثابت نقاط جرم، افزایش طول منجر به افزایش خطا در شبیه‌سازی می‌شود. به‌طور کلی، هر چه فاصله بین دو نقطه جرم از یکدیگر کمتر باشد، بدین معنی است که طول فنر کوتاه‌تر و سخت‌تر تغییر شکل می‌دهد و ساختار پارچه را بهتر حفظ می‌کند، در حالی که هر چه فاصله بیشتر باشد، طول فنر بلندتر و به‌راحتی شکل طبیعی خود را از دست می‌دهد و پارچه خیلی نرم‌تر از شکل واقعی به‌نظر می‌رسد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل جرم و فنر برای شبیه‌سازی رفتار آویزش پارچه تار پودی ارائه شد. پس از شبیه‌سازی پارچه با جرم و فنر، صحت دقت مدل با نتایج واقعی با استفاده از روش پردازش تصویر روی نمونه‌ها بررسی شد. شبیه‌سازی روی ابعاد و تراکم‌های مختلف پارچه انجام شد و ضریب آویزش در نمونه‌های واقعی و شبیه‌سازی شده محاسبه و نتایج حاصل از آن‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد، مقدار تطابق در شبیه‌سازی رفتار آویزش نمونه‌ای که دارای تراکم بیشتر و ابعاد کوچک‌تر است، ۹۱/۴۶٪ است. این موضوع نشان می‌دهد، با کاهش ابعاد و افزایش تراکم قابلیت مدل برای شبیه‌سازی افزایش می‌یابد.

مراجع

1. Abbott G.M., Grosberg P., and Leaf G.A.V., The elastic re-

در پژوهش حاضر، تصویر شبیه‌سازی شده پارچه اصلی با استفاده از برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار Matlab [۲۶] تولید شد. ورودی‌ها و خروجی‌های این برنامه در جدول ۴ آمده است. مراحل شبیه‌سازی در شکل ۹ نشان داده شده است. با انجام عملیات پردازش تصویر روی نمونه‌های شبیه‌سازی شده ضریب آویزش هر نمونه محاسبه شد که در جدول ۵ آمده است.

نتایج و بحث

برای بررسی درستی نتایج حاصل از شبیه‌سازی، مقادیر ضریب آویزش پارچه واقعی با مقادیر شبیه‌سازی مقایسه و درصد خطای نسبی آن‌ها محاسبه شد. نتایج درصد خطای نسبی به‌دست آمده برای نمونه‌ها با ابعاد ۱۰×۱۰، ۲۰×۲۰، ۳۰×۳۰ cm² در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد، با افزایش تراکم نمونه پارچه شبیه‌سازی شده در ابعاد ثابت، درصد خطای نسبی کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد، در نمونه پارچه‌ها با تراکم زیاد، شبیه‌سازی نتایج بهتر و دقیق‌تری را به‌دست می‌دهد، زیرا در طولی ثابت با افزایش تراکم تعداد نقاط جرم افزایش می‌یابد. به‌طور کلی، در طول ثابت هر چه تعداد نقاط جرم بیشتر شود، فاصله دو نقطه جرم از یکدیگر کمتر می‌شود و جزئیات را بهتر نشان می‌دهد، در نتیجه اثر شبیه‌سازی نسبتاً واقع‌بینانه‌تر و شکل ظاهری پارچه نرم‌تر به‌نظر می‌رسد.

istance to bending of plain woven fabrics, *J. Text. Inst.*, 64,

- 346-362, 1973.
2. Kenkare N.S., Three dimensional modeling of garment drape, PhD Thesis, Textile Technology Management, North Carolina State University, 2005.
 3. Durupinar F., A 3D garment design and simulation system, Master's Thesis, Department of Computer Engineering, Bilkent University, 2004.
 4. Hedfi H. and Ghith A., Dynamic fabric modeling and simulation using deformable models, *J. Text. Inst.*, 102, 647-667, 2011.
 5. Weil J., The synthesis of cloth objects, *ACM SIGGRAPH Comput. Graph.*, 20, 49-53, 1986.
 6. Kang Y.M., Choi J.H., Cho H.G., and Lee D.H., An efficient animation of wrinkled cloth with approximate implicit integration, *Int. J. Comput. Graph.*, 17, 147-157, 2001.
 7. Baraff D. and Witkin A., Large steps in cloth simulation, *Comput. Graph. Proc., Annual Conference Series*, 43-54, 1998.
 8. Haumann D. and Parent D., The behavioral test-bed: Obtaining complex behavior from simple rules, *Int. J. Comput. Graph.*, 4, 332-347, 1988.
 9. Breen D., House D., and Getto P., A physical-based particle model of woven Cloth, *Int. J. Comput. Graph.*, 8, 264-277, 1992.
 10. Provot X., Deformation constraints in a mass spring model to describe rigid cloth behavior, Proceedings of Graphics Interface '95, 147-154, 1995.
 11. Zhang D. and Yuen M.F., Cloth simulation using multilevel meshes, *J. Comput. Graph.*, 25, 383-389, 2001.
 12. Choi K. and Ko H., Stable but responsive cloth, Proceedings of the 29th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, ACM, New York, 604-611, 2002.
 13. Ji F., Li R., and Qiu Y., Simulate the dynamic draping behavior of woven and knitted fabrics, *J. Ind. Text.*, 35, 201-215, 2006.
 14. Selle A., Su J., Irving G., and Fedkiw R., Robust high-resolution cloth using parallelism, history-based collisions, and accurate friction, *IEEE. Trans. Visual. Comput. Graph.*, 15, 339-350, 2009.
 15. kumar A., Cloth Simulation, Master's Thesis, Department of Computer Science and Engineering, Bombay University, 2013.
 16. Kieran E., Harrison G., and Openshaw L., Cloth simulation, MSc Computer Animation, NCCA Bournemouth University, 2005.
 17. Bayraktar S., Simulating cloth behavior by using mass-spring networks, Master's Thesis, Department of Computer Engineering, Bilkent University, 2002.
 18. Goldenthal A.R., Implicit treatment of constraints for cloth simulation, PhD Thesis, the Senate of the Hebrew University, 2010.
 19. Payvandy P., Evaluation of fabric *drape* coefficient using image processing and fractal dimension, The 7th Iranian Conference on Machine Vision and Image Processing, Iran University of Science and Technology, Iran, 2011.
 20. Gholipour S., An investigation the effects of fabric weft density and weave tightness on fabric drape behaviour, Master's Thesis, Department of Textile Engineering, Amirkabir University, 2001.
 21. Behera B.K. and Pattanayak A.K., Measurement and modeling of drape using digital image processing, *Indian J. Fiber-Text.*, 33, 230-238, 2008.
 22. Kenkare N. and Plumlee T.M., Fabric drape measurement: A modified method using digital image processing, *J. Text. Apparel Technol. Manage.*, 4, 3, 2005.
 23. Hertz H., On the contact of solids – on the contact of rigid elastic solids and on hardness, Miscellaneous Papers, Jones D.E., and Schott G.A., London, 146-183, 1896.
 24. Goldsmith W., *Impact: The Theory and Physical Behavior of Colliding Solids*, Edward Arnold, London, 1960.
 25. Nobuyuki O., A threshold selection method from gray-level histograms, *IEEE. Trans. Syst. Man. Cybern.*, 9, 62-66, 1979.
 26. MATLAB and Simulink for Technical Computing, www.mathworks.com (last visited 10 March 2010).

Simulation of Fabric Drape Behavior Using Mass-Spring Model

Fereshteh Rezaei¹, Pedram Payvandy^{1*}, and Saeid Ebrahimi²

1. Department of Textile Engineering, 2. Department of Mechanic Engineering; Faculty of Engineering, Yazd University, P.O. Box: 89195-741, Yazd, Iran

Received 20 July 2014; Accepted 21 February 2015

Abstract

Simulation of fabric drape behavior is one of the attractive topics in many fields including textile and computer engineering. Various methods have been proposed by researchers for simulation of fabric drape behavior that among them, the simulation based on mass-spring model has found wider application as a result of higher speed of simulation and flexibility. In this research, a mass-spring model has been proposed for simulation of woven fabric draping behavior. The fabric drape results obtained from simulation for a series of plain woven fabric with different sizes and weft densities were compared with the experimental results obtained from the image processing method. The results of simulation and experiment had the best fit (correlation ~91%) for the fabric with the highest density of weft (28 wefts per centimeter) and smallest dimensions (10×10 cm²).

Keywords

drape simulation,
mass-spring model,
image processing

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