

شبیه سازی حرکت نخ پود در ماشین بافندگی جت هوای تک نازل

هوشنگ نصرتی*، منصور کبگانیان* و علی اصغر اصغریان جدی**

دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت مقاله: ۷۷/۱۰/۷ - دریافت نسخه نهایی: ۷۹/۵/۱۵)

چکیده - روش بافندگی جت هوا یک تکنیک پیشرفته با کارایی بالاست که در سطح جهان با بیشترین اقبال مواجه شده است. در این روش، حرکت نخ پود ناشی از نیروی اصطکاک بین جریان هوای خارج شده از جت هوا و نخ پود است. نخ پود پس از رها شدن از گیره نگهدارنده و قرار گرفتن در معرض جریان هوا دارای حرکت تحت کنترل نیست. در نتیجه حرکت آن بسیار پیچیده بوده و از فاکتورهای متعددی که مربوط به خواص ساختمانی نخ و جریان هواست متأثر می شود. محققان بسیاری تلاش کرده اند که با به دست آوردن معادله های حرکت نخ و شبیه سازی فرایند پودگذاری جت هوا، تجزیه و تحلیل نسبتاً روشنی از این فرایند به دست آورند تا در بهینه سازی شرایط پودگذاری و طراحی ماشین از آن بهره ببرند.

در کار حاضر یک ماشین بافندگی جت هوای تک نازل با به دست آوردن معادله دینامیکی حرکت نخ پود شبیه سازی شده است. از حل معادله دیفرانسیل حاصل به روش عددی نمودارهای موقعیت، سرعت و کشش نخ پود نسبت به زمان به دست آورده شده اند که ضمن شناسایی بهتر سیستم، اطلاعات مفیدی برای کنترل کشش نخ پود در ماشین بافندگی جت هوا فراهم می کند.

Simulation Model for Weft Yarn Motion in a Single-Nozzle Air-Jet Loom

H. Nosraty, M. Kabganian and Ali A. A. Jeddi

Department of Textile Engineering, Amirkabir University of Technology

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology

ABSTRACT- *Air-jet weaving is an advanced weaving method with high efficiency and productivity. It is one of the most widely used methods of weaving in the world. In air-jet filling insertion, the motion of weft yarn is caused by friction between weft yarn and air blown through nozzle. After declamping and subjecting the yarn*

*** - استاد

** - استادیار

to air stream, its motion is not active but very complicated and influenced by structural properties of yarn and air stream factors. Researchers have tried to obtain the yarn motion equations in order to analyze and simulate the air-jet weft insertion system. The results could then be used in the optimization of weaving operation and machine design. In the present work, a single-nozzle loom was simulated by obtaining the weft yarn motion equation. The position, the velocity and the weft yarn tension graphs were obtained by numerical solution of weft yarn motion equation. This analysis provided useful information for controlling the weft yarn tension in air-jet loom.

۱- مقدمه

در مقاله ارائه شده توسط داکسبری و همکارانش [۳] نیروی پیشبرنده نخ پود با استفاده از روابط دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته و ارتباط بین این نیرو و سرعت نخ پود بیان شده است.

سالاما و همکارانش [۴] سیستم راهنمای نخ در ماشین جت هوا را شبیه‌سازی و با توجه به آن حرکت نخ را به هنگام پودگذاری تشریح کرده‌اند. در کار انجام شده توسط آدانور و محمد [۵] یک دستگاه مشابه ماشین بافندگی (سیمولاتور) ساخته شده است که با استفاده از گردآوری داده‌ها و پردازش آنها توسط رایانه می‌تواند زمان پودگذاری، سرعت هوا، سرعت نخ و فشار هوا را اندازه‌گیری کند. محمد و آدانور [۲] تجزیه و تحلیل دینامیکی پودگذاری جت هوا را به دو روش نظری و تجربی انجام داده و برای دو سیستم ذخیره نخ پود استوانه‌ای و حلقوی دو مدل نظری جداگانه ارائه کرده‌اند. محمد و آدانور [۶] جریان هوا را در سیستم پودگذاری جت هوا به صورت کیفی تجزیه و تحلیل کرده‌اند و توزیع سرعت هوا به هنگام پودگذاری را به دست آورده‌اند.

بختیاروف و آدانور [۱] کانال هوای عبور نخ را به صورت نیمه باز شکافدار در نظر گرفته و به صورت تحلیلی نیروی پیشبرنده نخ و ضریب اصطکاک بین نخ و هوا را مورد مطالعه قرار داده‌اند. برخی از محققان نیز روی طراحی نازل هوا و بهینه کردن ابعاد و پارامترهای مختلف آن تحقیق و بررسی کرده‌اند [۷-۹]. وانگلو [۱۰] با استفاده از روش شبکه عصبی، ارتباط بین رفتار پودگذاری و زمان مورد نیاز برای پودگذاری نخ ۵۰/۵۰ پلی‌استر - پنبه را مورد بررسی قرار داده و نتایج حاصله را با تجربیات انجام شده مقایسه کرده است. سلیک [۱۱] با استفاده از شبیه‌سازی رایانه‌ای، بهینه‌سازی پارامترهای مختلف ماشین بافندگی مانند مقدار مصرف هوای فشرده و فشار هوای اعمال شده به جت اصلی و جتهای کمکی در یک ماشین جت هوا با مکانیزم جت کمکی را مورد بررسی قرار داده است. در کار انجام شده توسط گرجیان [۱۲] برای بهبود شرایط پودگذاری در ماشین بافندگی جت هوای تک نازل تغییراتی روی نازل ماشین

روش بافندگی جت هوا یک روش پیشرفته با بازده بالا و بهره‌وری زیاد است و پودگذاری جت هوا در سطح جهان هم‌اکنون با بیشترین اقبال مواجه شده است. در حقیقت روش پودگذاری جت هوا از پیشرفتهای مهم صنعت نساجی در ربع قرن اخیر بوده است. این تکنیک دارای چندین مزیت است که شامل توان پودگذاری بالا، وارد شدن تنش کمتر به نخ، عملیات بافندگی ساده، کاهش تعداد قطعات ماشین بافندگی، کاهش فضای مورد نیاز، سطح پایین صدای تولیدی و ارتعاش و کاهش هزینه قطعات یدکی است [۱].

در روش پودگذاری جت هوا حرکت نخ ناشی از نیروی پیشبرنده جریان هوای اعمال شده از نازل اصلی به نخ پود است که به سرعت نسبی بین هوا و نخ بستگی دارد و در واقع ناشی از اصطکاک بین نخ و جریان هواست. در نتیجه خواص فیزیکی و مکانیکی نخ مانند خواص سطحی، قطر، میزان تاب، یک لا یا چندلا بودن، عملیات تکمیلی و روش تولید و همچنین خصوصیات سیال هوا که محیط حرکت نخ است مانند آشفته و ناپایدار بودن جریان هوا و همچنین تراکم پذیری آن در برخی موارد بر حرکت نخ مؤثر بوده و موجب می‌شوند که نخ در داخل سیال هوا دارای حرکت بسیار پیچیده‌ای باشد. با توجه به این موضوع، تجزیه و تحلیل کامل و دقیق حرکت نخ کار ساده‌ای نخواهد بود [۲].

به هر حال محققان تلاش کرده‌اند با استفاده از قوانین مکانیک و تجربیات انجام شده حرکت نخ پود را در فرایند پودگذاری جت هوا شبیه‌سازی کرده و با استفاده از مدل به دست آمده حتی الامکان روش پودگذاری جت هوا را از تجزیه و تحلیل کنند. اطلاعات حاصل از این تجزیه و تحلیل می‌تواند در طراحی بخشهای مختلف مکانیزم پودگذاری ماشین بافندگی مانند جت هوا و کانال هدایت هوا و نخ مورد استفاده واقع شود. همچنین با استفاده از این نتایج می‌توان انرژی مصرفی مربوط به تأمین هوای فشرده مورد نیاز برای پرتاب نخ پود را به حداقل ممکن رسانید.

$$\Sigma F = F_1 - F_2 \quad (2)$$

F_1 : نیروی اصطکاک وارده به نخ از سوی هوا

F_2 : کشش وارده به نخ در راهنمای نخ

۲-۳- نیروی اصطکاک وارده به نخ پود

با توجه به نظریه حرکت اجسام شناور در سیالات، مقدار اصطکاک که در جریان سیال به وجود می‌آید در سرعت‌های مورد نظر به مربع سرعت نسبی، چگالی سیال و نایکنواختی سطح جسم غوطه‌ور و ابعاد آن بستگی دارد [۱۳]. بر این اساس، نیروی اصطکاک وارده به نخ از سوی هوا، F_1 ، توسط معادله زیر بیان می‌شود [۲].

$$F_1 = 0.5\pi D\rho C_f (U_0 - V)^2 (L_4 + L_5 + L_6) +$$

$$0.5\pi D\rho \int_0^x C_f (U-V)^2 dx - 0.5\pi D\rho C_f V^2 L_2 \quad (3)$$

که پارامترهای معادله بالا عبارت‌اند از:

D : قطر نخ (m)

ρ : چگالی هوا (kg/m^3)

C_f : ضریب اصطکاک نخ - هوا

U_0 : سرعت هوا در مرکز جت هوا (m/sec)

U : سرعت هوا در داخل کانال راهنمای نخ (m/sec)

V : سرعت نخ (m/sec)

L_2 : طول نخ بین جت و راهنمای نخ (m)

L_4 : طول لوله هوای جت (m)

L_5 : فاصله بین خروجی جت و قیچها (m)

L_6 : فاصله بین قیچها و لوله راهنما (m)

X : فاصله نوک نخ از ورودی شانه راهنما (m)

عبارت اول دست راست در معادله (۳) نشان دهنده نیروی

اعمال شده به نخ توسط جت هوا است، عبارت دوم نشان دهنده

نیروی اصطکاک وارده به نخ از سوی هوا در طول X از نخ است که

توسط جریان هوا در داخل شانه راهنما ایجاد می‌شود. عبارت سوم

که علامت آن منفی است نشان دهنده مقاومت هوا در مقابل نخ در

طول L_2 است.

کشش نخ به علت باز شدن از استوانه ذخیره کننده نخ پود با در

نظر گرفتن تأثیر دورانی بر راهنمای نخ توسط معادله زیر داده

ایجاد شده و تأثیر آن بر خواص فیزیکی پارچه بافته شده و کشش وارده به نخ پود مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مدل کردن ماشین بافندگی

ماشین بافندگی مورد استفاده در کار حاضر ماشین بافندگی جت هوای تک نازل اینوستا^۱ نوع 155-25-8M2 ساخت سال ۱۹۷۹ است که در کارگاه بافندگی دانشکده نساجی دانشگاه صنعتی امیرکبیر نصب شده و نمای شماتیک آن در شکل (۱) نشان داده شده است. شروع حرکت نخ از ابتدای شانه راهنما^۲ در نظر گرفته شده و مسیر حرکت آن در داخل کانال هوا در جهت محور X اختیار شده است. تجزیه و تحلیل حاضر تمام طول نخ پود را که از استوانه ذخیره کننده نخ پود تا کانال پودگذاری در حرکت است مدنظر قرار می‌دهد.

۲-۱- فرضیات مدل

با توجه به مطالعات انجام شده توسط محمد [۲] فرض می‌شود که نخ در داخل راهنمای شانه بافندگی در یک خط مستقیم منطبق بر محور مرکزی شانه راهنما حرکت می‌کند. به عبارت دیگر انحراف حرکت نخ به علت جریان اغتشاشی و ناپایداری هوا در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین از کمانش نخ پود صرف نظر می‌شود. همچنین فرض می‌شود که خواص نخ یکنواخت است مثلاً قطر و وزن خطی آن ثابت بوده و غیرقابل کشیده شدن^۳ فرض می‌شود. از تأثیر نیروی ثقل بر حرکت نخ نیز به علت بسیار کوچک بودن آن صرف نظر می‌شود.

۲-۲- معادله حرکت نخ

برای نوشتن معادله حرکت نخ با استفاده از قانون دوم نیوتن

می‌توان نوشت:

$$d(MV)/dt = \Sigma F \quad (1)$$

که عوامل این معادله عبارت‌اند از:

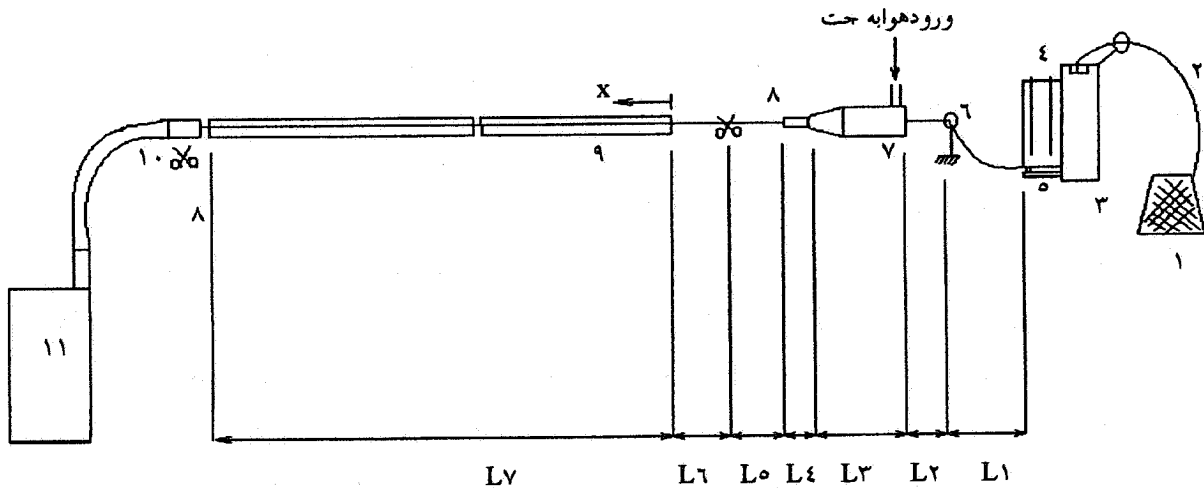
M : جرم کل نخ در حال حرکت (kg)

V : سرعت نخ (m/sec)

ΣF : مجموع نیروهای اعمال شده بر نخ (N)

t : زمان (sec)

نیروی کل اعمال شده بر نخ عبارت است از:



شکل ۱- نمای شماتیک مکانیزم پودگذاری در ماشین بافندگی جت هوا

- | | | |
|-------------------------|----------------------------|------------------------------|
| ۱- بسته نخ پود | ۵- گیرنده نگهدارنده نخ پود | ۹- راهنمای نخ پود (کانفیوزر) |
| ۲- نخ پود | ۶- راهنمای نخ | روی شانه ماشین بافندگی |
| ۳- تغذیه کننده نخ پود | ۷- جت هوا | ۱۰- لوله مکش |
| ۴- استوانه ذخیره نخ پود | ۸- تیچی | ۱۱- مخزن متصل به مکش |

می شود [۱۴]،

و با توجه به معادله (۱) خواهیم داشت:

$$d(Mv)/dt = \left(\frac{dM}{dt}\right)v + M\left(\frac{dv}{dt}\right) \quad (9)$$

$$F_2 = 0.5mV^2 e^{\mu\alpha} \quad (4)$$

که پارامترهای معادله بالا عبارت اند از:

m : دانسیته خطی نخ (kg/m)

μ : ضریب اصطکاک بین نخ و راهنما

α : زاویه تماس نخ با راهنما

که مقدار μ برای نخهای ریسیده شده از الیاف کوتاه برابر ۰/۲۷ در نظر گرفته شده است [۱۴]. برای ساده نویسی، معادله های زیر را در نظر می گیریم.

$$A = 0.5\pi D\rho \quad (5)$$

$$K_1 = L_1 + L_2 + L_3 + K_2 \quad (6)$$

$$K_2 = L_4 + L_5 + L_6 \quad (7)$$

که L_1 فاصله از استوانه ذخیره کننده تا راهنمای نخ و L_4 طول لوله هوای متصل به جت اند.

و با توجه به معادله های (۲) تا (۴) خواهیم داشت:

$$d(Mv)/dt = AC_f(U_0 - v)^2 K_2 +$$

$$A \int_0^x C_f(U-v)^2 dx - AC_f v^2 L_2 - 0.5mv^2 e^{\mu\alpha} \quad (11)$$

با مساوی قرار دادن معادله های (۱۰) و (۱۱) داریم:

$$M = m(x + K_1) \quad (8)$$

۲-۴- به دست آوردن معادله حرکت نخ پود

جرم کل نخ در حال حرکت عبارت خواهد بود از:

نقطه آغاز حرکت در نظر گرفته می شود. سیکل پودگذاری وقتی آغاز می شود که قیچی نخ بود را می برد. قبل از اینکه نخ از گیره رها شود شیر هوا باز شده و در این لحظه طول نخ تحت تأثیر جت هوا که ساکن است L_4+L_5 است. با استفاده از معادله (۱) که برای این وضعیت نیز معتبر است می توان نیروی کل وارد بر نخ را از معادله زیر به دست آورد.

$$\sum F = 0.5\pi D\rho C_f U_0^2 (L_4 + L_5) \quad (15)$$

جرم نخ در لحظه باز شدن گیره و قبل از حرکت عبارت خواهد بود از

$$M = m(L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5) \quad (16)$$

و تغییر اندازه حرکت از معادله زیر حاصل می شود:

$$d(Mv)/dt = m(L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5)(dv/dt) \quad (17)$$

در معادله (۱۷) شتاب $\frac{dv}{dt}$ صفر نخواهد بود هر چند که $v=0$ باشد زیرا به نخ نیرو وارد می شود. با جایگذاری معادله های (۱۵) و (۱۷) در معادله (۱) شتاب نخ به دست می آید.

$$a = \frac{dv}{dt} = \left\{ \frac{0.5\pi D\rho C_f U_0^2 (L_4 + L_5)}{m (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5)} \right\} / \quad (18)$$

با توجه به کوچک بودن فاصله L_6 (فاصله بین قیچی و کانال راهنمای روی شانه) و ثابت بودن سرعت هوا در طول L_5+L_6 می توان شتاب را در فاصله L_6 ثابت در نظر گرفت. در نتیجه سرعت نخ در انتهای فاصله L_6 به صورت زیر نوشته می شود.

$$v_0 = \sqrt{2aL_6} \quad (19)$$

که سرعت نخ در $X=0$ و $t=0$ است (شرایط اولیه).

۳- حل معادله به روش عددی

برای حل عددی معادله (۱۴) با توجه به شرایط اولیه داده شده در معادله (۱۹) از روش رانگ کوتای مرتبه چهار استفاده شده است که با استفاده از تغییر متغیر معادله دیفرانسیل غیرخطی مرتبه دوم را به دو معادله دیفرانسیل غیرخطی مرتبه اول تبدیل می کند که این دو معادله به طور همزمان حل می شوند. برنامه رایانه ای نوشته شده در محیط Matlab پس از وارد کردن پارامترهای ماشین بافندگی و

$$AC_f k_2 \left(U_0 - \frac{dx}{dt} \right)^2 + AC_f \left(U - \frac{dx}{dt} \right)^2 x(t) - AC_f L_2 \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 - 0.5me^{\mu\alpha} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 = m \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + m(x+k_1) \frac{d^2x}{dt^2} \quad (12)$$

از معادله یونو [۱۵] که برای C_f به کار می رود و به صورت زیر است، استفاده می کنیم

$$C_f = \frac{k}{U-v} = \frac{k}{U - \frac{dx}{dt}} \quad (13)$$

که در آن K عدد ثابت از جنس سرعت بوده و برای نخهای ریسیده شده از الیاف کوتاه مقدار آن $7/73$ است [۱۵]. با انجام عملیات جبری و داشتن معادله های زیر:

$$V_{rel} = U - \frac{dx}{dt} \quad \text{سرعت نسبی بین نخ و هوا}$$

سرعت نسبی بین نخ و جریان هوای خروجی از جت

$$V_{rel_0} = U_0 - \frac{dx}{dt}$$

$$U = \frac{BU_0}{100x(t) + \theta} \quad B = \frac{13}{3}, \theta = \frac{1}{3} \quad \text{سرعت هوا [۱۶]}$$

که B و θ ثابتهای مربوط به جت هوای مورد استفاده در ماشینهای بافندگی جت هوای تک نازل [۱۶] هستند. نهایتاً معادله دیفرانسیل زیر حاصل می شود.

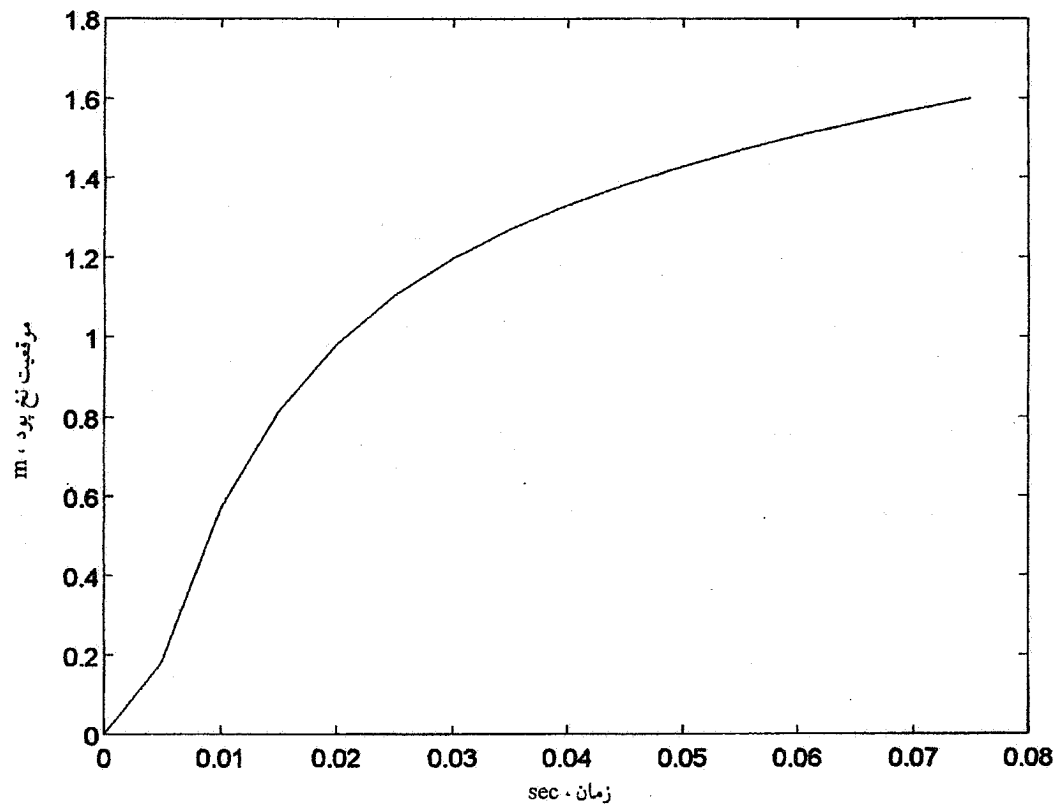
$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{AKK_2}{m(x(t)+k_1)} \frac{1}{V_{rel}} V_{rel_0}^2 + \frac{AK}{m(x(t)+k_1)} V_{rel} x(t) -$$

$$\left[\frac{1}{x(t)+k_1} \left(\frac{AKL_2}{m} \frac{1}{V_{rel}} + 0.5e^{\mu\alpha} + 1 \right) \right] \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \quad (14)$$

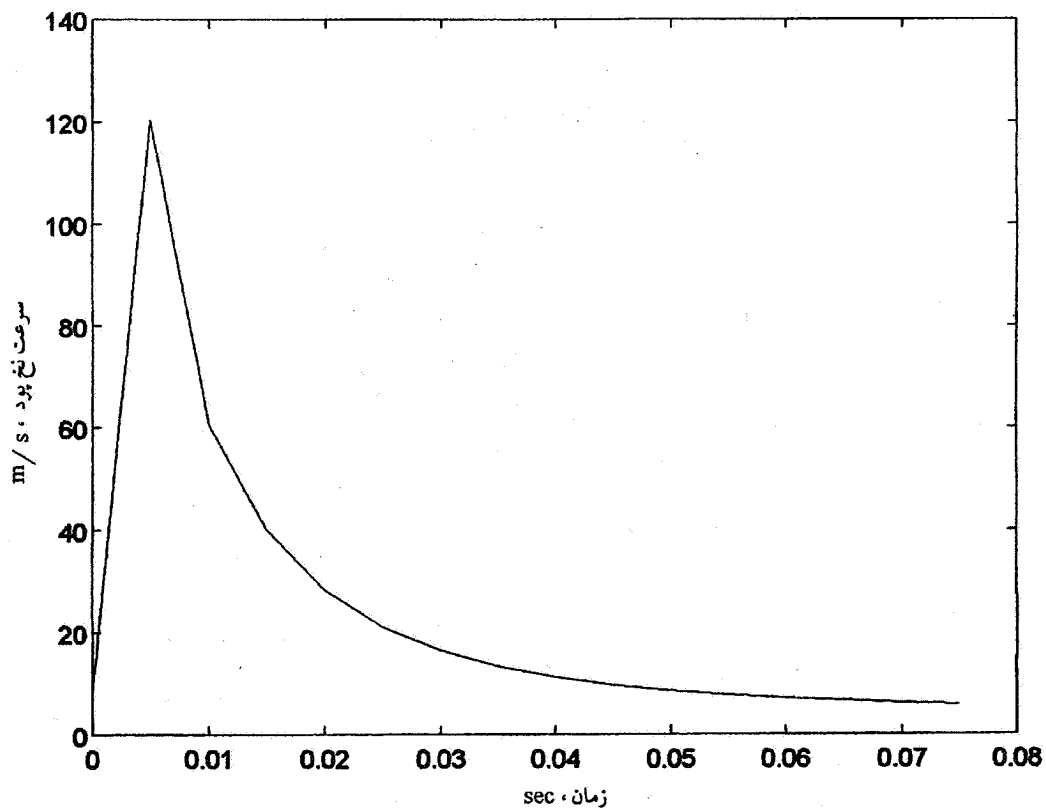
که معادله بالا یک معادله غیرخطی مرتبه دوم با شرایط اولیه است که می بایست به روش عددی حل شود.

۲-۵- شرایط اولیه

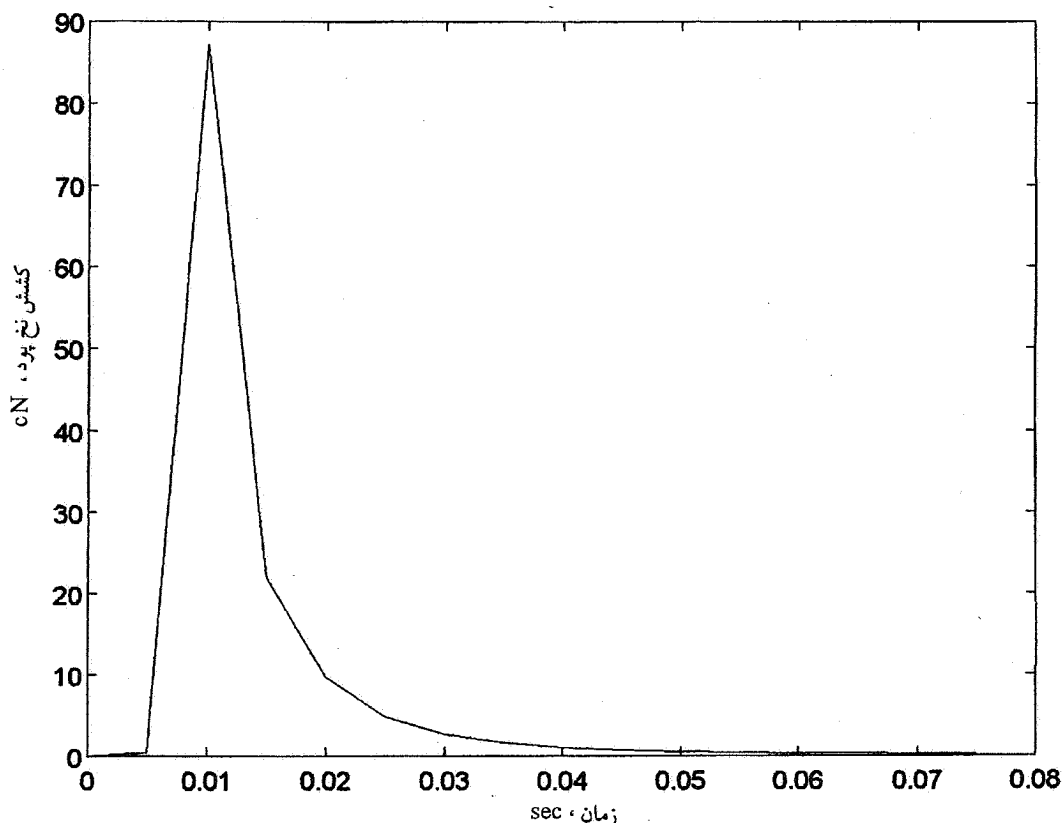
در حل معادله (۱۴) ورودی راهنمای شانه بافندگی به عنوان



شکل ۲- نمودار موقعیت نوک پود برحسب زمان به هنگام پودگذاری



شکل ۳- نمودار سرعت نوک پود برحسب زمان به هنگام پودگذاری



شکل ۴- نمودار کشش نخ پود (سانتی نیوتن) برحسب زمان به هنگام پودگذاری

می‌شود در شروع پرتاب نخ پود دارای مقداری سرعت اولیه است و پس از شتاب اولیه و رسیدن به سرعت حداکثر با حرکت در عرض ماشین بافندگی سرعت آن کاهش می‌یابد که با تجربه نیز مطابقت دارد. نمودار تغییرات کشش نخ پود برحسب زمان به هنگام پرواز در شکل (۴) نشان داده شده است. حداکثر کشش ایجاد شده به علت تغییرات سریع سرعت نخ و ایجاد شتاب ناگهانی حاصل از قرار گرفتن نخ در معرض جت هواست.

۵- نتیجه‌گیری

با استفاده از مدل‌های بیان شده توسط سایر محققان و به کار بردن قانون دوم نیوتن برای حرکت نخ پود در فرایند پودگذاری جت هوا، معادله حرکت نخ پود در ماشین بافندگی تک نازل اینوستا به دست آمد. اطلاعات اولیه برای حل معادله حرکت نخ از ماشین بافندگی، شرایط جوی و جریان هوا اخذ شدند. همان طور که گفته شد، معادله دیفرانسیل غیرخطی مرتبه دوم به دست آمده برای حرکت نخ در محیط Matlab حل شد. از حل معادله حرکت نخ، نمودارهای

جریان هوا در هر مرحله زمانی ضریب مراحل اول، دوم، سوم و چهارم را به دست آورده و معادله مرحله به مرحله حل شده و در جهت زمان پیش می‌رود. نمودارهای موقعیت (X)، سرعت (V) و کشش (F) نخ پود برحسب زمان به دست می‌آیند.

۴- نمودارهای تغییر مکان، سرعت و کشش نخ پود برحسب زمان

این نمودارها که از حل برنامه عددی توسط رایانه حاصل شده‌اند با توجه به شرایط جوی کارگاه، اطلاعات و ابعاد ماشین بافندگی و جریان جت هوای ماشین به دست آمده‌اند. نمودار تغییرات موقعیت نوک نخ پود برحسب زمان در شکل (۲) نشان داده شده است. زمان نهایی با توجه به سرعت ماشین بافندگی و درجاتی از دور ماشین که به پرتاب پود اختصاص دارد محاسبه شده است. عرض ماشین بافندگی از شروع راهنمای نخ پود روی شانه راهنما تا پایان آن ۱۶۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. تغییرات سرعت برحسب زمان نیز در شکل (۳) نشان داده شده و همچنان که مشاهده

از یافته‌های تجربی که از اندازه‌گیری کشش نخ بود به هنگام بافندگی حاصل می‌شود سعی خواهد شد مدل بیان شده برای حرکت نخ بود اصلاح شود به نحوی که با داده‌های تجربی حداکثر تطابق را داشته باشد.

موقعیت - زمان، سرعت - زمان و کشش - زمان برای نخ بود به دست آمدند، شکل‌های (۲) تا (۴). این نمودارها در تجزیه و تحلیل فرایند پودگذاری جت هوا به منظور کنترل کشش نخ بود که هدف اصلی کار حاضر است مفید خواهند بود. در ادامه این کار با استفاده

واژه نامه

1. Investa
2. confuser

3. inextensible

مراجع

1. Adanur, S., and Bakhtiyarov, S., "Analysis of Air Flow in Single Nozzle Air-Jet Filling Insertion: Corrugated Channel Model," *Textile Research Journal*, Vol. 66, pp. 401-406, 1996.
2. Adanur, S., and Mohamed, M. H., "Analysis of Yarn Motion in Single Nozzle Air-Jet Filling Insertion, Part I: Theoretical Model for Yarn Motion," *Journal of Textile Institute*, Vol. 83, pp. 45-55, 1992.
3. Duxbury, V., Lord, P. R., and Vaswani, T. B., "A Study of Some Factors Involved in Penumatic Weft Propulsion," *Journal of Textile Institute*, Vol. 50, pp. 558-573, 1959.
4. Salama, M., Adanur, S., and Mohammed, M. H., "Mechanics of a Single Nozzle Air-Jet Filling Insertion System, part III: Yarn Insertion through Tubes," *Textile Research Journal*, Vol. 57, pp. 44-54, 1987.
5. Adanur, S., and Mohammed, M. H., "Weft Insertion on Air-Jet Looms: Velocity Measurement and Influence of Yarn Structure, Part I: Experimental System and computer Interface," *Journal of Textile Institute*, Vol. 79, pp. 297-315, 1988.
6. Adanur, S., and Mohammed, M. H., "Analysis of Air Flow in Air-Jet Filling Insertion," *Textile Research Journal*, Vol. 61, pp. 253-258, 1991.
7. Mohammed, M. H., and Salama, M., "Mechanics of a Single Nozzle Air-Jet Filling Insertion System, Part: I: Nozzle Design and Performance," *Textile Research Journal*, Vol. 56, pp. 683-690, 1986.
8. Salama, M., and Mohammed, M. H., "Mechanics of a Single Nozzle Air-Jet Filling Insertion System, part II: Velocity Distribution and Design of the Air Guide System," *Textile Research Journal*, Vol. 56, pp. 721-726, 1986.
9. Ishida, M., "Flow Characteristics of the Main Nozzle in an Air-Jet Loom, part I: Measuring Flow in the Main Nozzle," *Textile Research Journal*, Vol. 64, pp. 10-20, 1994.
10. Vangheluwe, L., "Weft Insertion of Polyester/Cotton Blend Yarn on Air-Jet Looms," *Textile Research Journal*, Vol. 67, pp. 809-815, 1997.
11. Celik, N., "Optimisation of Weft Insertion in an Air-Jet Weaving Machine Using Computer Simulation," Ph.D. Thesis, University of Leeds, U.K., 1997.
- ۱۲- گرجیان، ج.، "بررسی امکان اصلاح سیستم پودگذاری ماشین بافندگی جت هوا با تغییر شرایط پودگذاری،" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۷۳.
13. Streeter, V., *Fluid Mechanics*, Fifth ed., P. 272, McGraw-Hill, New york, 1971.
14. Adanur, S., "Dynamic Analysis of Single Nozzle Air-Jet Filling Insetion," Ph.D. Thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC, 1989.
15. Krause, H. W., "The Air-Jet Weaving Machine in Practical Use," *Melliand Textilberichte*, Vol. 61, pp. 384-391, 1980.
16. Uno, M., "A Study on an Air-Jet Loom whit Substreams Added, part I: Deriving the Equation of Motion for Weft," *Journal of Textile Machinery Society of Japan*, Vol. 18, pp. 37-44, 1972.