

## تعیین برخی خواص مکانیکی پیله کرم ابریشم در بارگذاری شبه استاتیکی

حسین احمدی چناربن<sup>1\*</sup>، سیده معصومه هاشمی نیا<sup>2</sup>

1- استادیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، واحد ورامین- پیشوا، دانشگاه آزاد اسلامی، ورامین، ایران.

2- استادیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران.

### چکیده

اکثر محصولات کشاورزی ویسکوالاستیک بوده بنابراین رفتار پیچیده‌ای طی عملیات انتقال، درجه‌بندی و جداسازی از خود نشان می‌دهند. لذا تعیین خواص مکانیکی این مواد به منظور تحلیل رفتار آن‌ها به منظور به حداقل رساندن ضایعات ضروری به نظر می‌رسد. در این راستا در پژوهش حاضر تاثیر نوع هیبرید (154×153، 31×32 و 154×151)، سرعت بارگذاری (10mm/min و 20) و جهت بارگذاری (افقی و عمودی) بر برخی خواص مکانیکی پیله کرم ابریشم مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها، از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی استفاده گردید و مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح احتمال 5% =  $\alpha$  انجام پذیرفت. طبق نتایج، تاثیر نوع هیبرید، جهت، سرعت بارگذاری و اثر متقابل آن‌ها بر تمام ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌ها معنی‌دار بود. همچنین در تمام هیبریدها با افزایش سرعت بارگذاری از 10mm/min به 20 مقادیر تمام ویژگی‌های مکانیکی کاهش یافت از سوی دیگر مقادیر نیروی شکست، انرژی شکست، چگرمگی و تغییر شکل در نقطه شکست نمونه‌ها هنگام بارگذاری در جهت افقی بیشتر از مقادیر آن‌ها هنگام بارگذاری در جهت عمودی بودند. طبق نتایج، بیشترین مقدار نیروی شکست (10/05N) در هیبرید 154×153 اما بیشترین مقادیر انرژی شکست (2/78J)، جابه‌جایی در نقطه شکست (610mm) و چگرمگی ( $3/6 \times 10^{-4} \text{J/mm}^3$ ) در هیبرید 31×32 و هنگام بارگذاری در جهت افقی و در سرعت بارگذاری 10mm/min اندازه‌گیری شدند. همچنین کمترین مقادیر نیروی شکست (3/83N)، انرژی شکست (0/27J)، جابه‌جایی در نقطه شکست (160mm) و چگرمگی ( $0/34 \times 10^{-4} \text{J/mm}^3$ ) در هیبرید 154×151 و هنگام بارگذاری در جهت عمودی و در سرعت بارگذاری 20mm/min تعیین گردیدند.

واژه‌های کلیدی: پیله ابریشم، انرژی شکست، چگرمگی، خواص مکانیکی

\* نویسنده رابط، پست الکترونیکی: h.ahmadi@iauvaramin.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: 1400/9/9 - تاریخ پذیرش مقاله: 1400/11/20



## مقدمه

انواع مختلف کرم ابریشم اهلی از خانواده *Bombycidae* و گونه *Bombyx mori* بوده که با تغییرات ژنتیکی انجام شده بر روی آن‌ها نژادهای مختلفی حاصل شده است. در حال حاضر نژادهای مختلفی از همین گونه نظیر خراسانی (سبزواری)، مالاوان، هراتی، کرمانشاهی، ژاپنی و فرانسوی در نواحی مختلف ایران پرورش داده می‌شوند. کرم ابریشم بومی چین بوده و دو سوم پیله تولید شده در دنیا در کشورهای چین و ژاپن پرورش داده می‌شوند. در ایران، استان گیلان با 57 درصد از کل تولید کشور یکی از مهم‌ترین استان‌های تولید کننده پیله تر است و پس از آن استان‌های مازندران و گلستان بیشترین سهم تولید پیله ابریشم را دارا می‌باشند (Barzali et al., 2015). لاروهای کرم ابریشم پس از خوردن مداوم برگ توت به مدت 4 تا 6 هفته، شروع به ساخت پیله‌های محافظ برای شفیره‌های خود می‌کنند. کرم ابریشم با حرکت مداوم سر خود به شکل 8 یا S و با خم کردن و کشش بدن خود، پیله‌ای سبک و فشرده را به دور خود می‌تند. پیله از شفیره در برابر انواع میکروب‌ها و خشک‌شدن طی دگرذیسی و همچنین در برابر شکارچیان احتمالی محافظت می‌کند. پیله بیضی شکل، در دو سر خود کمترین ضخامت را دارد به طوری که پروانه حاصل از دگرذیسی شفیره می‌تواند به راحتی آن را پاره کند. همچنین دارای چین و چروک‌های زیادی در سطح بیرونی خود بوده که به دلیل انقباض غیریکنواخت در هنگام خشک‌شدن ایجاد می‌شود. پیله تولیدشده توسط کرم ابریشم نوعی کامپوزیت پلیمری طبیعی است که از یک رشته ابریشم پیوسته با طول بین 1000 تا 1500 متر ساخته شده و توسط سربسین به هم چسبیده است (Zhang et al., 2002; Zhao et al., 2005; Zhao et al., 2007). ابریشم خام از دو پروتئین سربسین و فیبروئین تشکیل شده است که فقط سربسین در آب داغ محلول است. الیاف ابریشم از خواص فیزیکی و شیمیایی خاصی برخوردار است. مقاومت زیاد، خاصیت ارتجاعی مطلوب، رنگ‌پذیری زیاد، هدایت الکتریکی کم، مقاومت حرارتی بالا از جمله خواص هستند که سبب کاربرد گسترده این محصول در صنایع مختلف شده‌اند (Barzali et al., 2015). تنوع خواص ابریشم در سه سطح بین‌گونه‌ای، درون‌گونه‌ای و درون‌فردی بروز می‌کند. در سطح بین‌گونه‌ای، کرم‌های ابریشم متمایز، ابریشم‌هایی با ترکیب، ریزساختار و خواص متفاوت تولید می‌کنند. از سوی دیگر تنوع درون‌گونه‌ای به تنوع خواص ابریشم تولیدشده توسط افراد مختلف از یک گونه اشاره می‌کند که به عوامل مختلفی نظیر دما و رطوبت محیط در هنگام چرخش، غذا و وضعیت سلامت کرم‌ها وابسته است. همچنین یکی از مهم‌ترین دلایل تنوع درون‌فردی، متفاوت بودن نسبت سربسین و فیبروئین در ابریشم می‌باشد. بررسی تنوع درون‌فردی به منظور درک بهتر رابطه بین خواص ابریشم و فرآیند ریسندگی آن و همچنین ارزیابی کاربردهای مختلف آن حائز اهمیت است (Zhao et al., 2007). آسیب‌های مکانیکی حین مراحل بارگیری و حمل و نقل انواع محصولات کشاورزی و دامپروری، بخش عمده‌ای از ضایعات کمی و کیفی این محصولات را تشکیل می‌دهند. در این راستا این گونه به نظر می‌رسد که تلاش برای کاهش این ضایعات از تلاش برای افزایش تولید آنها مهم‌تر و کم‌هزینه‌تر است. نخستین گام برای رویارویی و کنترل ضایعات، شناخت ابعاد مختلف آن بوده که عبارت از عوامل تأثیرگذار بر ضایعات، محل، و نحوه بروز آن، نوع و طبیعت ضایعات، و میزان آنهاست. لذا می‌بایست با بهره‌گیری از اطلاعات صحیح و دقیق، نسبت به شناخت آن‌ها اقدام و برای کنترل آنها برنامه‌ریزی کرد (Jahanbakhshi et al., 2019; Khorshidpour et al., 2020; Ahmadi Chenarbon and Hashemini, 2005). همان‌گونه که بیان شد، آسیب‌های مکانیکی وارد شده به انواع محصولات و فراورده‌های کشاورزی سبب افزایش ضایعات شده که یکی از چالش‌های جدی در اکثر کشورها، به ویژه کشورهای در حال توسعه محسوب می‌شود. محصولات کشاورزی اغلب به

وسيله نیروهای ساکن یا متحرک خارجی و خیلی کمتر به وسیله نیروهای داخلی آسیب می‌بینند. آسیب‌های مکانیکی که در اثر نیروهای داخلی بوجود می‌آیند بستگی به تغییرات فیزیکی داخلی مانند دما، مقدار رطوبت، تغییرات شیمیایی و بیولوژیکی دارد. نکته قابل توجه این‌که چگونگی ایجاد آسیب‌های مکانیکی در محصولات کشاورزی کاملاً شناخته شده نیست اما گسیختگی و پارگی مجموعه سلولها و بافت محصول طی دوره آسیب دیدگی قطعاً پیچیده است (Rozbahani *et al.*, 2019; Mirzaei *et al.*, 2020). آغاز گسیختگی در مجموعه سلولهای محصولات بیولوژیکی با تعیین نقطه تسلیم بیولوژیکی مشخص می‌شود. بنابراین وقتی بار وارد شده به محصول از حد تسلیم تجاوز کند، آسیب شروع می‌شود. در این راستا برای تعیین میزان بار مجاز به منظور طراحی و ساخت انواع ماشین‌های مورد نیاز به منظور حمل و نقل، بسته بندی، فرآوری، جداسازی، ذخیره‌سازی و درجه بندی هر یک از محصولات کشاورزی، شناخت خواص مکانیکی محصولات در تنشهای ساده (بارهای کششی، فشاری و برشی ساکن یا متحرک) به منظور تحلیل رفتارهای این مواد بیولوژیکی ضروری به نظر می‌رسد. به عبارت دیگر با شناخت خواص مکانیکی نظیر رفتار نیرو-تغییر شکل محصولات کشاورزی که تحت تاثیر بارهای شبه استاتیکی قرار گرفته‌اند همچنین انرژی مورد نیاز برای شکست محصول که معیار مناسبی برای تحلیل مقاومت به شکست می‌باشد، می‌توان حالت‌های بارگذاری پیچیده‌تری را که در عمل اتفاق می‌افتند، ارزیابی کرد و به طور تقریبی وقوع و عدم وقوع آسیب را پیش بینی نمود (Akbarnejad *et al.*, 2017; Jahanbakhshi *et al.*, 2018). به این جهت در مطالعات مختلف، خواص مکانیکی انواع محصولات کشاورزی به صورت تابعی از رطوبت، سرعت بارگذاری، جهت وارد شدن نیرو و نوع واریته مورد بررسی قرار گرفته است. در دهه‌های گذشته تحقیقات متنوعی در مورد خواص مکانیکی ابریشم حاصل از کرم ابریشم و ارتباط آنها با ریزساختارها انجام شده است (Mortimer *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2016; Zhao *et al.*, 2016; Guan *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2017; Ye *et al.*, 2019; Mazumder *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2020). اما پژوهشی در مورد خواص مکانیکی پيله ابریشم *B. mori* به‌عنوان عاملی مهم برای توصیف خواص و ارزیابی کاربردهای مهندسی آن در دسترس نیست. لذا در پژوهش حاضر تاثیر نوع هیبرید، سرعت و جهت بارگذاری بر خواص مکانیکی پيله ابریشم نظیر نیروی شکست، انرژی شکست، چغرمگی و تغییر شکل در نقطه شکست مورد بررسی قرار گرفت. به نظر می‌رسد که شناخت این ویژگی‌ها گامی موثر در حفظ ویژگی‌های کیفی و تکنولوژیکی پيله ابریشم باشد.

## مواد و روش‌ها

### تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های پيله ابریشم مورد استفاده در تحقیق شامل سه هیبرید (H1) 154×153، (H2) 31×32 و (H3) 154×151، مرداد ماه 1399 از مرکز تحقیقات ابریشم رشت تهیه شدند. برای انجام آزمایش، 50 عدد پيله سالم از هر هیبرید (فاقد صدمات مکانیکی) مطابق روش کوکران انتخاب و داخل کیسه‌های پلی اتیلنی ریخته و تا شروع آزمایش در یخچالی با دمای  $4 \pm 1^\circ\text{C}$  و رطوبت نسبی 80٪ نگهداری شدند. دو ساعت قبل از انجام آزمایش، نمونه‌ها جهت رسیدن به دمای محیط از یخچال خارج و در محیط آزمایشگاه قرار داده می‌شدند. کلیه آزمون‌ها در آزمایشگاه خواص فیزیکی مواد غذایی دانشگاه تربیت مدرس و در دمای  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  و رطوبت نسبی 57٪ انجام پذیرفت.

### تعیین رطوبت نمونه‌ها

برای اندازه‌گیری رطوبت اولیه، نمونه‌ها در آونی با دمای  $105 \pm 1^\circ\text{C}$  به مدت 24 ساعت قرار داده شدند. وزن نمونه‌ها قبل و بعد از قرار دادن در آون با استفاده از یک ترازوی دیجیتال ( Sartorius, model PT210, Germany) و با دقت  $\pm 0.01\text{g}$  اندازه‌گیری شد. در ادامه با استفاده از رابطه 1 مقدار رطوبت هیبریدهای H1، H2 و H3 به ترتیب 4/97، 5/41 و 4/64 (بر پایه خشک) محاسبه گردید (Jahanbakhshi et al., 2018).

$$MC = \frac{M_w - M_d}{M_d} \times 100 \quad (1)$$

که در آن:  $MC$  - محتوای رطوبت نمونه‌ها (%،  $M_w$  - جرم اولیه نمونه‌ها (g) و  $M_d$  - جرم نمونه‌های خشک شده (g).

### اندازه‌گیری خواص مکانیکی

خواص مکانیکی نمونه‌های پیله ابریشم، با استفاده از دستگاه اینستران Hounsfield مدل H50K-S که دارای نیروسنجی به ظرفیت 500 نیوتن بود، تعیین گردید. برای انجام آزمایش، نمونه‌ها در دو وضعیت قائم و افقی بین دو صفحه موازی و مسطح به مساحت  $25\text{cm}^2$  و در سرعت‌های 10 و 20 mm/min تحت یک بار پیوسته قرار داده می‌شدند. دستگاه آزمایش به یک رایانه متصل بود و از طریق نرم‌افزار مربوطه تنظیمات آزمایش اعمال می‌گردید و هم‌زمان و در حین بارگذاری نمودار (نیرو - تغییر شکل) تا لحظه تغییر شکل ظاهری پیله (شکل 1) رسم می‌شد.



شکل 1. تست مربوط به بارگذاری فشاری نمونه‌های پیله کرم ابریشم

Fig1. Pressure test of silkworm cocoons samples

### نیروی شکست

در تمام آزمون‌های بارگذاری و با توجه به نمودار (نیرو - تغییر شکل)، نیروی ثبت شده در لحظه تغییر شکل ناگهانی این نمودار، به عنوان نیروی شکست در نظر گرفته شد.

### انرژی شکست

مقدار انرژی شکست با محاسبه سطح زیر منحنی (نیرو - تغییر شکل) و از نقطه شروع بارگذاری تا نقطه تغییر شکل ظاهری پیله‌ها تعیین گردید (Mirzaei et al., 2020).

### چگرمگی

برای تعیین چگرمگی پیله‌ها از رابطه 2 و برای تعیین حجم آن‌ها از رابطه 3 استفاده شد (Mohsenin, 1986).

$$T_n = \frac{E_b}{V} \quad (2)$$

$$V = \frac{\pi}{6} abc \quad (3)$$

که در آن‌ها:  $E_b$  - انرژی گسیختگی (J)،  $T_n$  - چگرمگی پيله ( $J \cdot mm^{-3}$ )،  $V$  - حجم ( $mm^3$ )،  $a$  - طول پيله (mm)،  $b$  - عرض (mm) و  $c$  - ضخامت پيله (mm).

در ادامه با استفاده از رابطه 3 مقدار حجم هیبریدهای H1، H2 و H3 به ترتیب 6443/28، 7745/3 و 7846/8 میلی‌متر مکعب محاسبه گردید

#### تغییر شکل در نقطه شکست

تغییر شکل در نقطه شکست، نقطه‌ای متناظر نیروی شکست در منحنی (نیرو- تغییر شکل) و بر روی محور تغییر شکل می‌باشد و از رابطه 4 قابل محاسبه است (Mohsenin, 1986).

$$E_a = \frac{F \times D}{2} \quad (4)$$

که در آن:  $E_a$  - انرژی شکست (J)،  $F$  - نیروی شکست (N) و  $D$  - تغییر شکل در نقطه شکست (mm).

#### تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

به منظور تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از آزمون‌ها، از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار استفاده گردید و مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن و در سطح احتمال  $\alpha = 5\%$  و با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه 16 انجام پذیرفت.

#### نتایج و بحث

در جدول‌های 1 و 2 به ترتیب نتایج تجزیه واریانس و مقایسه میانگین داده‌های حاصل از تاثیر نوع هیبرید، جهت بارگذاری، سرعت بارگذاری و اثر متقابل آن‌ها بر ویژگی‌های مکانیکی پيله‌های کرم ابریشم نظیر نیروی شکست، تغییر شکل در نقطه شکست، انرژی شکست و چگرمگی نشان داده شده است.

جدول 1. تجزیه واریانس ویژگی‌های مختلف مکانیکی پيله‌های کرم ابریشم

Table1. Variance analysis (ANOVA) of different mechanical properties of silkworm cocoons

S.O.V منبع تغییرات	df درجه آزادی	میانگین مربعات Mean square			
		Rupture force (N) نیروی شکست (N)	Deformation at rupture point (mm) تغییر شکل در نقطه شکست (mm)	Rupture energy (J) انرژی شکست (J)	Toughness ( $J/mm^3$ ) چگرمگی ( $J/mm^3$ )
Hybrid types (H) نوع هیبرید (H)	2	12.45*	16.20*	17.25*	15.27*
Loading direction (D) جهت بارگذاری (D)	1	13.18*	13.15*	11.35*	12.13*
Loading speed (S) سرعت بارگذاری (S)	1	10.58*	11.67*	10.44*	10.14*
H×D	2	9.78*	12.35*	10.11*	13.51*
H×S	2	8.41*	9.27*	8.18*	10.33*
D×S	1	10.20*	11.16*	9.10*	8.18*
H×D×S	2	8.79*	10.52*	9.15*	10.01*
Error خطا	24	-	-	-	-

\* اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال 5 درصد. \*\* عدم وجود اختلاف معنی‌دار.

\*Significant difference at  $\alpha = 5\%$  probability level; \*\* No significant

جدول 2. مقایسه میانگین اثرات متقابل (نوع هیبرید × سرعت بارگذاری × جهت بارگذاری) بر ویژگی‌های مکانیکی پیله کرم ابریشم  
Table2. Mean comparison of interaction between (hybrid types × loading speed × loading direction) on different mechanical properties of silkworm cocoons

Hybrid types نوع هیبرید	Loading direction جهت بارگذاری	Loading speed mm/min (mm/min) سرعت بارگذاری	Mean comparison مقایسه میانگین			
			Rupture force (N) نیروی شکست (N)	Deformation at rupture point (mm) تغییر شکل در نقطه شکست (mm)	Rupture energy (J) انرژی شکست (J)	Toughness $\times 10^{-4} (J/mm^3)$ چگرمگی ( $J/mm^3$ )
H1	Horizontal افقی	10	10.05±0.3 <sup>a</sup>	460±30 <sup>b</sup>	2.28±0.04 <sup>b</sup>	3.5±0.2 <sup>a</sup>
	Horizontal افقی	20	9.80±0.3 <sup>a</sup>	370±25 <sup>d</sup>	1.71±0.02 <sup>c</sup>	2.6±0.2 <sup>b</sup>
	Vertical عمودی	10	6.67±0.4 <sup>c</sup>	180±20 <sup>f</sup>	0.58±0.03 <sup>f</sup>	0.90±0.3 <sup>d</sup>
	Vertical عمودی	20	5.06±0.3 <sup>ef</sup>	160±20 <sup>f</sup>	0.38±0.03 <sup>g</sup>	0.59±0.3 <sup>e</sup>
H2	Horizontal افقی	10	9.75±0.3 <sup>ab</sup>	610±30 <sup>a</sup>	2.78±0.04 <sup>a</sup>	3.6±0.2 <sup>a</sup>
	Horizontal افقی	20	9.70±0.3 <sup>ab</sup>	600±25 <sup>a</sup>	2.71±0.03 <sup>a</sup>	3.5±0.2 <sup>a</sup>
	Vertical عمودی	10	5.96±0.2 <sup>d</sup>	425±20 <sup>bc</sup>	1.24±0.04 <sup>d</sup>	1.6±0.2 <sup>c</sup>
	Vertical عمودی	20	5.58±0.2 <sup>de</sup>	410±25 <sup>cd</sup>	1.11±0.04 <sup>e</sup>	1.4±0.2 <sup>c</sup>
H3	Horizontal افقی	10	9.07±0.4 <sup>b</sup>	390±20 <sup>cd</sup>	1.72±0.03 <sup>c</sup>	2.2±0.3 <sup>b</sup>
	Horizontal افقی	20	7.37±0.4 <sup>c</sup>	280±25 <sup>e</sup>	1.03±0.04 <sup>e</sup>	1.3±0.2 <sup>c</sup>
	Vertical عمودی	10	5.00±0.3 <sup>f</sup>	180±20 <sup>f</sup>	0.40±0.03 <sup>g</sup>	0.50±0.3 <sup>e</sup>
	Vertical عمودی	20	3.83±0.5 <sup>g</sup>	160±20 <sup>f</sup>	0.27±0.03 <sup>h</sup>	0.34±0.3 <sup>e</sup>

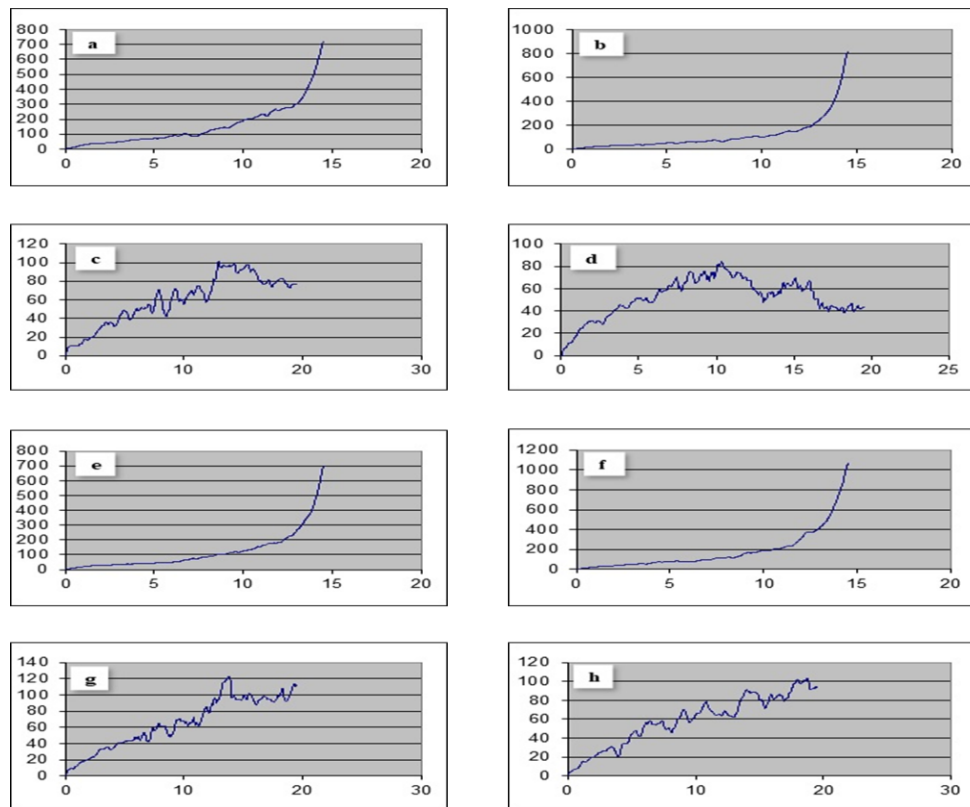
هر یک از داده‌ها میانگین سه تکرار ± انحراف استاندارد هستند. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در سطح احتمال 5 درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

Values are means of three replicates ± SD; Means with same letter are not significant different ( $P>0.05$ )

### نیروی شکست

با توجه به جدول 1، نوع هیبرید، جهت بارگذاری، سرعت بارگذاری و اثر متقابل آن‌ها از تأثیری معنی‌دار بر مقدار نیروی شکست نمونه‌ها برخوردار بودند ( $P\leq 0.05$ ). طبق نتایج بیشترین مقدار نیروی شکست (10/05N) در نمونه‌های H1، در حالت بارگذاری افقی و در سرعت 10 میلی‌متر بر دقیقه و کمترین مقدار آن (3/83N) در نمونه‌های H3، در حالت بارگذاری عمودی و در سرعت 20 میلی‌متر بر دقیقه مشاهده گردید. مطابق جدول 2، در تمام هیبریدها با افزایش سرعت بارگذاری مقدار نیروی شکست به‌طور معنی‌دار کاهش یافت ( $P\leq 0.05$ ). به‌گونه‌ای که با افزایش سرعت بارگذاری از 10 به 20 میلی‌متر بر دقیقه، مقدار نیروی شکست هنگام بارگذاری در جهت‌های افقی و

عمودی در نمونه‌های H1 به ترتیب 2/48 و 24/14 درصد و در نمونه‌های H2 به ترتیب 0/51 و 6/37 درصد و همچنین در نمونه‌های H3 به ترتیب 18/74 و 23/40 درصد کاهش یافتند که علت این رفتار را می‌توان به کم بودن زمان واکنش نمونه‌ها به ضربه‌های وارد شده در سرعت‌های بارگذاری بالا نسبت داد (Kilickan and Guner, 2008). همچنین نمونه‌ها در حالت بارگذاری افقی از مقدار نیروی شکست بیشتری نسبت به حالت بارگذاری عمودی برخوردار بودند ( $P \leq 0.05$ ). به طوری‌که در نمونه‌های H1، H2 و H3 با تغییر وضعیت بارگذاری از حالت افقی به عمودی مقدار متوسط نیروی شکست به ترتیب 40، 43 و 46 درصد کاهش یافتند. این گونه به نظر می‌رسد که در حالت عمودی بیشترین تنش خمشی در پیله‌ها ایجاد می‌گردد زیرا پیله بیضی شکل در دو سر خود از کمترین ضخامت برخوردار است تا پروانه حاصل از دگردیسی شفیره بتواند آن را به راحتی پاره کرده و خارج شود (Zhao et al., 2017; Guan et al., 2016; Yang et al., 2016; Zhao et al., 2016; al., 2007). قابل توجه این‌که شکل 2، منحنی‌های نیرو - تغییر شکل) انواع هیبریدها را در سرعت‌ها و جهت‌های مختلف بارگذاری نشان می‌دهد.



شکل 2. منحنی‌های نیرو-تغییر شکل حاصل از داده‌های آزمایشگاهی (محور Y-جابجایی (mm) و محور X-نیرو (N))

Fig2. Experimental curves of force-displacement (Y-axis: Displacement (mm) and X-axis: Force (N))  
 a-H1, Horizontal, 10 mm/min; b-H1, Horizontal, 20mm/min; c-H1, Vertical, 10mm/min; d-H1, Vertical, 20mm/min; e-H3, Horizontal, 10mm/min; f-H3, Horizontal, 20mm/min; g-H3, Vertical, 10mm/min; h-H3, Vertical, 20mm/min; i-H2, Horizontal, 10mm/min; j-H2, Horizontal, 20mm/min; k-H2, Vertical, 10mm/min; l-H2, Vertical, 20mm/min

### تغییر شکل در نقطه شکست

با توجه به جدول 1، نوع هیبرید، جهت بارگذاری، سرعت بارگذاری و اثر متقابل آن‌ها از تاثیری معنی‌دار بر مقدار تغییر شکل در نقطه شکست نمونه‌ها برخوردار بودند ( $P \leq 0.05$ ). طبق نتایج بیشترین مقدار تغییر شکل در نقطه

شکست (610mm) در نمونه‌های H2، در حالت بارگذاری افقی و در سرعت 10 میلی‌متر بر دقیقه و کمترین مقدار آن (160mm) در نمونه‌های H3، در حالت بارگذاری عمودی و در سرعت 20 میلی‌متر بر دقیقه اندازه‌گیری گردید. مطابق جدول 2، در تمام هیبریدها با افزایش سرعت بارگذاری مقدار تغییر شکل در نقطه شکست نمونه‌ها به‌طور معنی‌دار کاهش یافت ( $P \leq 0.05$ ). به‌گونه‌ای که با افزایش سرعت بارگذاری از 10 به 20 میلی‌متر بر دقیقه، مقدار تغییر شکل در نقطه شکست نمونه‌ها هنگام بارگذاری در جهت‌های افقی و عمودی در نمونه‌های H1 به ترتیب 24/30 و 12/5 درصد و در نمونه‌های H2 به ترتیب 1/66 و 3/66 درصد و همچنین در نمونه‌های H3 به ترتیب 39/28 و 12/50 درصد کاهش یافتند. علت نتیجه حاصل آن است که در سرعت‌های بارگذاری بالا، ضربه و مقدار اندازه حرکت اعمال شده به نمونه‌ها به دلیل حرکت سریع فک متحرک دستگاه افزایش یافته لذا تغییر شکل در نقطه شکست کاهش می‌یابد (Altuntas and Yildiz, 2007). از سوی دیگر همانطور که نتایج نشان می‌دهند، هنگام بارگذاری در جهت عمودی، نمونه‌ها از مقادیر جابجایی در نقطه شکست کمتری نسبت به حالت بارگذاری در جهت افقی برخوردار بودند ( $P \leq 0.05$ ) به‌گونه‌ای که با تغییر وضعیت قرارگیری نمونه‌ها از حالت افقی به حالت عمودی مقدار تغییر شکل در نقطه شکست نمونه‌های H1، H2 و H3 به ترتیب 59، 64 و 47 درصد کاهش یافتند. علت نتیجه حاصل را می‌توان به نرم‌تر بودن بافت پیله در دو سر آن نسبت داد (Yang et al., 2016; Guan et al., 2017).

### انرژی شکست

با توجه به جدول 1، نوع هیبرید، جهت بارگذاری، سرعت بارگذاری و اثر متقابل آن‌ها از تأثیری معنی‌دار بر مقدار انرژی شکست نمونه‌ها برخوردار بودند ( $P \leq 0.05$ ). همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهند بیشترین مقدار انرژی شکست (2/78J) در نمونه‌های H2، در حالت بارگذاری افقی و در سرعت 10 میلی‌متر بر دقیقه و کمترین مقدار آن (0/27J) در نمونه‌های H3، در حالت بارگذاری عمودی و در سرعت 20 میلی‌متر بر دقیقه تعیین گردید. مطابق جدول 2، در تمام هیبریدها با افزایش سرعت بارگذاری مقدار انرژی شکست به‌طور معنی‌دار کاهش یافت ( $P \leq 0.05$ ). به‌گونه‌ای که با افزایش سرعت بارگذاری از 10 به 20 میلی‌متر بر دقیقه، مقدار انرژی شکست هنگام بارگذاری در جهت‌های افقی و عمودی در نمونه‌های H1 به ترتیب 25 و 34 درصد و در نمونه‌های H2 به ترتیب 2/51 و 10/50 درصد و همچنین در نمونه‌های H3 به ترتیب 40 و 32/50 درصد کاهش یافتند. انرژی لازم برای شکست معادل سطح زیر منحنی نیرو - تغییر شکل تا نقطه گسیختگی است لذا تغییرات آن به نوعی تابعی از نیروی شکست و جابجایی در نقطه شکست خواهد بود (Kilickan and Guner, 2008). همچنین نمونه‌ها در حالت بارگذاری افقی از مقدار انرژی شکست بیشتری نسبت به حالت بارگذاری عمودی برخوردار بودند ( $P \leq 0.05$ ). در همین راستا با تغییر وضعیت قرارگیری نمونه‌ها از حالت افقی به حالت عمودی مقدار انرژی شکست نمونه‌های H1، H2 و H3 به ترتیب 75، 57 و 76 درصد کاهش یافتند.

### چگرمگی

چگرمگی، سفت بودن مواد در واحد حجم را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر چگرمگی کار مورد نیاز در واحد حجم برای تخریب مواد می‌باشد (Mohsenin, 1986). در همین راستا بیشترین مقدار چگرمگی ( $3/6J/mm^3$ ) در نمونه‌های H2، در حالت بارگذاری افقی و در سرعت 10 میلی‌متر بر دقیقه و کمترین مقدار آن ( $0/34J/mm^3$ ) در نمونه‌های H3، در حالت بارگذاری عمودی و در سرعت 20 میلی‌متر بر دقیقه تعیین گردید. قابل توجه این‌که تغییرات چگرمگی و انرژی شکست تقریباً مشابه یکدیگر می‌باشند. مطابق جدول تجزیه واریانس 1، تأثیر نوع هیبرید، جهت بارگذاری، سرعت بارگذاری و اثر متقابل آن‌ها بر مقدار چگرمگی نمونه‌ها معنی‌دار بودند ( $P \leq 0.05$ ). همان‌طور که



جدول 2 نشان می‌دهد، در تمام هیبریدها با افزایش سرعت بارگذاری مقدار چغرمگی به‌طور معنی‌دار کاهش یافت ( $P \leq 0.05$ ). به‌گونه‌ای که با افزایش سرعت بارگذاری از 10 به 20 میلی‌متر بر دقیقه، مقدار چغرمگی هنگام بارگذاری در جهت‌های افقی و عمودی در نمونه‌های H1 به ترتیب 25/7 و 34/4 درصد و در نمونه‌های H2 به ترتیب 2/77 و 12/50 درصد و همچنین در نمونه‌های H3 به ترتیب 40/9 و 32/1 درصد کاهش یافتند. دلیل کاهش چغرمگی با افزایش سرعت بارگذاری آن است که با افزایش سرعت بارگذاری، نیروی لازم برای گسیختگی و تغییر شکل در نقطه گسیختگی کاهش می‌یابد. همچنین نمونه‌ها در حالت بارگذاری افقی از مقدار چغرمگی بیشتری نسبت به حالت بارگذاری عمودی برخوردار بودند ( $P \leq 0.05$ ). به طوری که در نمونه‌های H1، H2 و H3 با تغییر وضعیت بارگذاری از حالت افقی به عمودی مقدار چغرمگی به ترتیب 74، 56 و 75 درصد کاهش یافتند.

### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر تاثیر نوع هیبرید، سرعت و جهت بارگذاری بر برخی از ویژگی‌های مکانیکی پيله ابریشم مورد بررسی قرار گرفت. به نظر می‌رسد که از نتایج به دست آمده در این پژوهش می‌توان در طراحی ادوات مربوط به صنعت ابریشم، حمل و نقل، ذخیره‌سازی، درجه بندی و تمیز کردن پيله‌ها استفاده نمود. طبق نتایج، نوع هیبرید، جهت و سرعت بارگذاری و اثرات متقابل آن‌ها از تاثیر معنی‌دار بر برخی از ویژگی‌های مکانیکی پيله ابریشم نظیر نیروی شکست، انرژی شکست، جابجایی در نقطه شکست و چغرمگی برخوردار بودند. قابل توجه این‌که در تمام نمونه‌ها با افزایش سرعت بارگذاری، کلیه ویژگی‌های مکانیکی کاهش یافتند لذا بهتر است عملیات انتقال، حمل و نقل، درجه بندی و تمیز کردن در سرعت‌های بارگذاری کمتر انجام شود.

### References

- Ahmadi Chenarbon, H. and Hasheminia, S. M. 2005.** The study of mechanical properties of soybean kernel under compressive loading. 9<sup>th</sup> International Conference on Agrophysics, Lublin, Poland.
- Akbarnejad, A., Azadbakht, M. and Asghari, A. 2017.** Studies of the selected mechanical properties of Banana (Cavendish var.). International Journal of Fruit Science, 17: 93–101.
- Altuntas, E., and Yildiz, M. 2007.** Effect of moisture content on some physical & mechanical properties of Faba bean grains. Journal of Food Engineering, 78 (1): 174-183. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.09.013
- Barzali, S., Jamalirad, L., Faraji, F. and Hejazi, S. 2015.** Reinforcement of urea formaldehyde adhesive using silk cocoon. 1<sup>st</sup> National Conference on Wood and Lignocellulosic Products. Gonbad Kavous University.
- Guan, J., Zhu, W., Liu, B., Yang, K., Vollrath, F. and Xu, J. 2017.** Comparing the microstructure and mechanical properties of *Bombyx mori* and *Antheraea pernyi* cocoon composites. *Acta Biomaterialia*, 47: 60–70.
- Jahanbakhshi, A., Abbaspour-Gilandeh, Y., Ghamari, B. and Heidarbeigi, K. 2019.** Assessment of physical, mechanical, and hydrodynamic properties in reducing postharvest losses of cantaloupe (*Cucumis melo* var. *Cantaloupensis*). Journal of Food Process Engineering, 42 (5): e13091. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13091>
- Jahanbakhshi, A., Abbaspour-Gilandeh, Y. and Gundoshmian, T. M. 2018.** Determination of physical and mechanical properties of carrot in order to reduce waste during harvesting and post-harvesting. Food Science and Nutrition, 6: 1898–1903.

- Khorshidpour, B., Honarvar, M. and Ahmadi Chenarbon, H. 2020.** Assessment of several hydrodynamic properties of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Journal of Food Science and Nutrition*, 8(10): 5641-5649.
- Kilickan, A. and Guner, M. 2008.** Physical properties and mechanical behavior of olive fruits (*Olea europaea* L.) under compression loading. *Journal of Food Engineering*, 7(3): 222-228.
- Mohsenin, N. N. 1986.** Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach Science Publishers. LTD. 524.
- Mortimer, B., Gordon, S. D., Holland, C., Siviour, C. R., Vollrath, F. and Windmill, J. F. C. 2014.** The speed of sound in silk: linking material performance to biological function. *Adv. Mater*, 26 (30): 5179–5183.
- Rozbahani, A., Movahhed, S. and Ahmadi Chenarbon, H. 2019.** Mathematical modeling of hydrodynamic properties of lime (Mexican lime). *Journal of Food Process Engineering*, 42(4): e13054. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13054>
- Mazumder, M., Numera, F., Al-Asif, A. and Hasan, M. 2019.** Effect of bentonite clay and polypropylene matrix on the properties of silk and glass fibre-reinforced hybrid composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 34(12): 1654-1665. <https://doi.org/10.1177/0892705719878231>
- Mirzaei, M., Movahhed, S., Asadollahzadeh, M. J. and Ahmadi Chenarbon, H. 2020.** Effect of carboxy methyl cellulose and locust bean gums on some of physicochemical, mechanical and textural properties of extruded rice. *Journal of Texture Studies*, 52(4): 91-100.
- Wang, T., Chen, L., Du, L., Shen, T., Li, F., Huang, L., Li, Z. and Wu, D. 2017.** Structure and properties of silkworm cocoon (*Bombyx mori*) treated by hot pressing. *Materials and Design*, 134: 132–138.
- Yang, K., Ritchie, R. O., Gu, Y., Wu, S. J. and Guan, J. 2016.** High volume-fraction silk fabric reinforcements can improve the key mechanical properties of epoxy resin composites. *Materials and Design*, 108: 470–478.
- Yang, K., Guan, J., Shao, Z. and Ritchie, R. O. 2020.** Mechanical properties and toughening mechanisms of natural silkworm silks and their composites. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 110: 103942. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.103942>
- Ye, C., Ren, J., Wang, Y., Zhang, W., Qian, C., Han, J., Zhang, C., Jin, K., Buehler, M. J., Kaplan, D. L. and Ling, S. 2019.** Design and fabrication of silk templated electronic yarns and applications in multifunctional textiles. *Matter*, 1 (5): 1411–1425.
- Zhao, D., Dong, Y., Xu, J., Yang, Y., Fujiwara, K., Suzuki, E., Furukawa, T., Takai, Y. and Hamada, H. 2016.** Flexural and hydrothermal aging behavior of silk fabric/glass mat reinforced hybrid composites. *Fibers and Polymers*, 17 (12): 2131–2142.
- Zhang, H., Magoshi, J., Becker, M., Chen, J. Y. and Matsunaga, R. 2002.** Thermal properties of *Bombyx mori* silk fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 86 (8): 1817-1820.
- Zhao, Y., Chen, K. and He, S. 2007.** Key principles for breeding spring and autumn silkworm varieties: From our experience of breeding 873×874. *Caspian Journal of Environmental Science*, 5(1): 57-61.
- Zhao, H., Feng, X., Yu, S., Cui, W. and Zou, F. 2005.** Mechanical properties of silkworm cocoons. *Polymer* 46: 9192–9201

## Assessment of mechanical properties of silkworm cocoons under quasi-static loading

*H. Ahmadi Chenarbon<sup>1\*</sup>, S. M. Hasheminia<sup>2</sup>*

1- Department of Agronomy, College of Agriculture, Varamin - Pishva Branch, Islamic Azad University, Varamin, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Agronomy, College of Agriculture, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran.

### Abstract

Most agricultural products are viscoelastic, showing a complex behavior during transport, grading, and separation. Thus, it seems necessary to determine the mechanical properties of these materials to analyze their behavior and minimize losses. Accordingly, this study investigated the effect of hybrid type (154×153, 31×32, and 154×151), loading rate (10 and 20 mm/min), and loading direction (horizontal and vertical) on the mechanical properties of silkworm cocoons. A factorial experiment was used in a completely randomized design to analyze the data, and the means were compared by the multiple range Duncan test at a probability level ( $\alpha$ ) of 5%. The results showed the significant impact of the hybrid type, loading direction and speed, and their interaction on all mechanical properties of specimens. All mechanical properties of hybrids decreased as the loading speed increased from 10 to 20 mm/min. On the other hand, the rupture force, rupture energy, toughness, and deformation at rupture point were higher in horizontal loading than in vertical loading. According to the results, the highest rupture force (10.05 N) was measured for the hybrid 154×153. However, the highest rupture energy (2.78 J), deformation at rupture point (610 mm), and toughness ( $3.6 \times 10^{-4}$  J/mm<sup>3</sup>) were measured for the hybrid 31×32 under horizontal loading at a loading speed of 10 mm/min. The lowest rupture force (3.83 N), rupture energy (0.27 J), deformation at rupture point (160 mm), and toughness ( $0.34 \times 10^{-4}$  J/mm<sup>3</sup>) were obtained for the hybrid 154×151 under vertical loading at a loading speed of 20 mm/min.

**Keywords:** silkworm cocoon, rupture energy, toughness, mechanical properties.

\* Corresponding Author, E-mail: [h.ahmadi@iauvaramin.ac.ir](mailto:h.ahmadi@iauvaramin.ac.ir)

Received: 30. Nov. 2021 – Accepted: 9 Feb. 2022