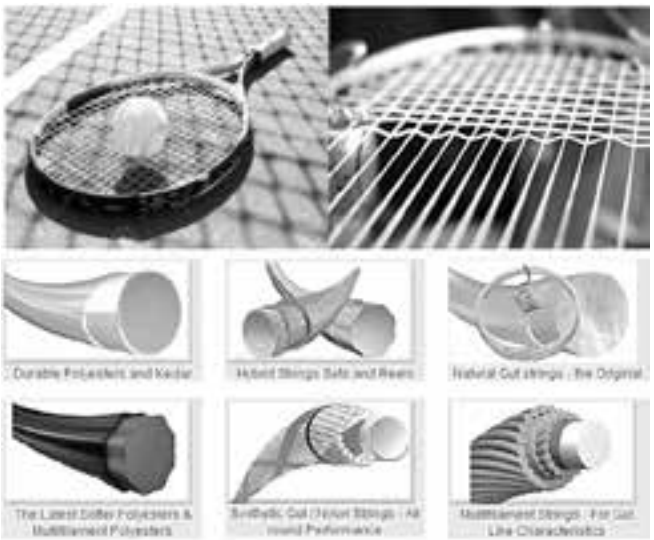
منسوجات ورزشی

بررسی استاندارد زه راکت تنیس

تهیه و تنظیم: دکتر فرناز نایب‌مراد



بررسی استاندارد در زه

هیچ تســت و تعریف استاندارد یا قانون مشخصی مربوط به خواص زه راکت تنیس و جود ندارد. زه از نظر ITF می‌تواند نازک یا کلفت، نرم و ســخت و یا کشســان باشد. به همین علت صدها نوع زه مختلف در بازار موجود است و هیچ روش اثبات شــده‌ای برای مقایســه آنها با هم وجود ندارد. تنها راه برای شناخت خواص زه‌ها بــه جز گزارش‌های مربوط به مجلات معروف و نتایج آزمایشــاتی که اخیرا انجام شده، رده‌بندی‌هایی است که توسط تولیدکنندگان تهیه می‌شود. جای هیچ تعجبی نیست که تقریباً همه‌ی زه‌ها امتیاز ۱۰ از ۱۰ برای قابلیت بازی و توانایی اجرا را به خود اختصاص دهند. از دید علمی و مهندســی، از آنجایی که روش انجام تست‌ها توضیح داده نشده و نتایج، توانایی توضیح در واحد SI را ندارد، این رتبه‌بندی‌ها اساساً بی‌ارزش هستند. در اینجا تعدادی روش انجام تست و نتایج توضیح داده شده است و نتایج آزمایش ۹۰ زه مختلف آورده شده است.

خواص آزمایش شده زه‌ها شامل نکات زیر است:

۱. توانایی کشیده شدن به عنوان تابعی از تنش زه

۲. سختی دینامیکی

۳. از دست دادن تنش به عنوان تابعی از زمان و ضربات مکرر

۴. از دست دادن انرژی در زمان ضربه

۵. ضریب اصطکاک بین زه‌های راکت و سطح توپ

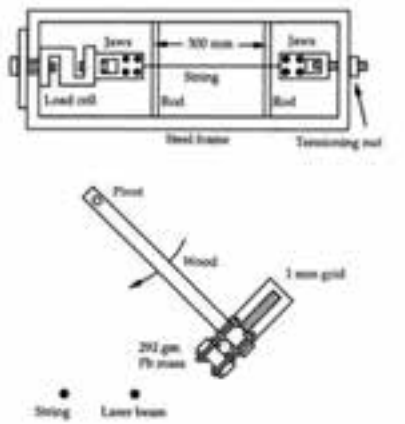
همه زه‌های مورد آزمایش دارای ابعاد اســمی مشخص بوده‌اند، (۱/۲۹ mm، اندازه ۱۶) ولی ابعاد واقعی آنها از ۱/۲۵ mm تا ۱/۴۰ mm متغیر بوده اســت. تغییر ابعاد زه‌ها نیز به صورت معمول ۰/۰۱ mm± بوده است. یک خواصیت معمول که در این مطالعه اندازه‌گیری نشده است، پایداری و دوام زه است.

تحت نیروی ثابت استاتیکی، طول زه با گذشت زمان زیاد می‌شود. این پدیده خزش نام دارد. میزان خزش با گذشت زمان کم می‌شود. اما طول دائماً در حال افزایش است. به این نوع مواد ویسکوالاستیک گفته می‌شود. به این معنا که این مواد هم ویسکوز و هم الاستیک هستند. بنابراین نمودار تنش–کرنش به میزان و نحوه استفاده تنش یا کرنش وابسته است. برای مثال یک زه ممکن است با نیروی ۳۰۰ N با میزان mm/min ۱۰۰، ۱۰٪ کشــیده شود و با همان نیرو با میزان mm/min ۲۰۰، ۸٪ کشیده شــود. در شرایط واقعی بازی، زمانی که توپ با زه‌ها برخورد می‌کند در مدتی حدود ۵ ms میزان کشش معمولاً ۴۰۰۰۰ mm/min است. برای یک همچین ضربه کوتاه مدتی میزان خزش نســبتاً کم است و کشش بستگی چندانی به مدت زمان ضربه ندارد. به هر حال میزان کمی خزش حتی در یک ضربه کوتاه‌مدت هم اتفاق می‌افتد. مخصوصاً در زهی که قبلاً کشیده نشده باشد. در نتیجه زه‌ها بعد از هر ضربه، تنش از دست می‌دهند، مخصوصاً در ضربات اولیه در راکتی که تازه زه‌کشی شده باشد.

در این آزمایش کشیدگی طول زه برای زه‌هایی که قبلاً کشیده نشده‌اند، در شرایط دینامیکی برای ضربه در مدت ۳۰ ms محاســبه شده. همه زه‌ها در شرایط یکسان آزمایش شــده‌اند. اتفاقی مشابه خزش که هنگام زه‌کشی راکت در دستگاهی که با آن راکت را زه می‌کنیم، رخ می‌دهد این است که، اگر زه کشیده شده باشد و با طول افزایش یافته درون گیره دستگاه قرار بگیرد، تنش به سرعت کاهش می‌یابد که ناشی از شکسته شدن تدریجی پیوندهای بین مولکول‌های بلند است. این اثر با عنوان تنش اســتراحت شناخته می‌شود. میزان از دست دادن تنش توسط زه با گذشت زمان کم می‌شود ولی تنش دائماً در حال کم شدن است. میزان این اثر بیشتر از چیزی است که انتظار می‌رود. برای مثال اگر راکتی با تنش ۲۸kg زه‌کشی شده باشد معمولاً در ۲۰ دقیقه اول تنش آن تا ۲۴kg افت می‌کند، که تقریباً معادل زمانی است که طول می‌کشد تا یک راکت زه‌کشی شود. بعد از ۲۴ ساعت تنش معمولاً به ۲۰kg می‌رسد. بعد از یک یا دو ست استفاده از راکت تنش بیشتر از یک یا دو کیلوگرم در اکثر زه‌ها کم می‌شود که ناشی از کشیده شدن زه‌ها به دفعات در هنگام زدن ضربه با تنشی بیشتر از ۲۸kg است. تنش زه‌ها ممکن است تحت تاثیر تغییر شکل راکت در زمان زه‌کشی نیز قرار گیرد و تنش در همه زه‌ها ممکن است شبیه به هم نباشد که این امر به علت اصطکاک بین زه‌ها و سوراخ‌های راکت است.

روش انجام آزمایش

افزایش طول، اتلاف تنش و تســت ضربه توســط دستگاهی که در شکل نشان۱ داده شده است اندازه‌گیری شده. این دستگاه برای نشان دادن تغییر در تنش زه‌ها با گذشــت زمان و تکرار ضربات طراحی شده است، زمانی که گیره رها می‌شود طول زه ثابت شده است.



شکل ۱: دستگاه طراحی شده برای محاسبه تنش و جابه‌جایی زه در زمان ضربه چکش

زه‌ها در فک‌های فلزی، با فاصله ۳۲۰ mm قبل از کشیده شدن، محکم نگه داشته شده‌اند و بعد تا تنش ۲۰kg (۱۹۶ N) برای چند ثانیه، برای اندازه‌گیری افزایش طول، کشیده شده‌اند. تنش با پیچاندن یک مهره به وسیله آچار، به‌صورت دستی، تنظیم می‌شود. افزایش طول زه به وسیله علامت‌گذاری به‌وسیله خودکار و اندازه‌گیری با خط‌کش ســنجیده می‌شود. این اندازه‌گیری خیلی دقیق نیست، به این علت که به میزان کشیده شدن زه بستگی دارد. اما امکان مقایسه بین زه‌های مختلف را فراهم می‌کند. تنش به وســیله یک load cell و یک شاخص الکترونیکی که تا ۱۰۰kg مدرج شــده با دقت ۰/۰۱kg، با تنظیم اتوماتیک صفر اندازه‌گیری می‌شود . علاوه بر بازخوانی دیجیتالی، شاخص دارای یک خروجی آنالوگ ۰-۱۰V است که به یک اسیلوسکوپ و یک سیستم فراگیر اطلاعات متصل است.

بعد از ضبط کردن میزان افزایش طول در ۲۰kg، تنش تا ۲۸kg زیاد شــده و برای ۱۰s با تنظیم دســتی نگه داشته می‌شود. این شبیه‌سازی روشی است که زمان زه کردن راکت معمول است، وقتی که زه‌ها برای ۱۰s، قبل از اینکه توسط گیره در جای خود قرار گیرند، تحت تنش قرار می‌گیرند. برای زه‌هایی که به آرامی تنش از دست می‌دهند، افزایش طول به آرامی اتفاق می‌افتد تا تنش ثابتی را حفظ کنند. بعضی زه‌ها به سرعت تنش از دست می‌دهند، در این صورت باید زه‌ها سریع‌تر کشیده شوند تا تنش را در ۲۸kg حفظ کنند. بعد از این فاصله زمانی ۱۰ ثانیه‌ای، هیچ تنظیم دیگری توسط پیچ تنظیم‌کننده تنش انجام نمی‌شود و اجازه داده می‌شود تنش برای ۱۰۰۰s (۱۶/۷ دقیقه) کاهش یابد. در این مدت افزایش طول ۲۸kg اندازه‌گیری می‌شود تا با افزایش طول در ۲۰kg و با تنش ثبت شده در سیستم فراگیر در بازه‌های زمانی ۱ ثانیه مقایسه شود. در تست‌های قبلی روی چند زه مشاهده شد، تغییر تنش نسبت به لگاریتم زمان بعد از ۱۰۰s اول، حتی بعد از چند روز، به صورت خطی است. اگرچه در این از آزمایش مدت آزمایش تا ۱۰۰۰s برای ۹۰ زه کاهش یافته است.

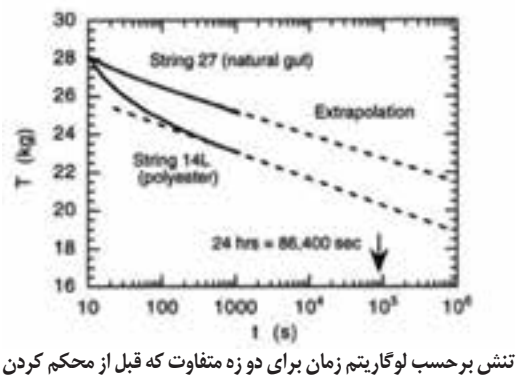
در تست‌هایی که قبلاً انجام شده فک‌ها دو سر زه را نگه داشته بودند. برای به حداقل رساندن آسیب در محل فک های فلزی ، هر سر زه به وسیله یک لایه پلاستیکی محافظت می‌شود. اما مشــخص شد که در خود پلاستیک‌ها مقداری خزش اتفاق می‌افتد. بنابراین این روش ممنون شد. گیره‌های زه‌های تجاری نیز امتحان شد ولی به اندازه کافی نمی‌توانست زه‌ها را محکم نگه دارد. گیره‌های زه هیچ اثری روی زه به جا نمی‌گذارد و برای استفاده به صورت نرمال (برای زه‌کشی نرمال) مناسب‌اند ولی زه بین گیره‌ها حدود ۱ mm در تنش ۲۸kg در نقطه ی ورود کشیده شده (ولی نه در نقطه‌ی خروج) و ۱ mm هم در تســت ضربه کشیده شده است. گیره‌های مورد استفاده در این مقاله از سوهان نرم ساخته شده است. با طول ۳۸ mm بریده شده و محکم زه‌ها را با یک پیچ در هر گوشه نگه می‌دارد. بعد از جدا کردن زه‌ها از گیره‌ها زه کمی له شــده و به وسیله دندانه‌های گیره برجسته شده. اگر چه آسیب وارد شده به زه تاثیری روی نتایج نداشت. محکم کردن گیره‌ها به اندازه کافی مشخص کرد، نتایج افزایش طول و اتلاف تنش قابل برگشت هستند و مستقل از نیروی نگه دارنده زه توسط گیره‌ها می‌باشند. به علاوه نتاج به دست آمده مشابه اندازه‌های راکت کامل زه شده بود. در نمونه اخیر، تنش زه در دو زه افقی توسط گذراندن زه از یک آداپتور خارجی متصل شده به قاب (فریم) راکت و load cell اندازه‌گیری شده. بعد از اینکه به زه‌ها ۱۰۰۰ s اجازه اســتراحت داده شد، در معرض ۱۰ ضربه در مرکز زه توسط یک چکش با سرعت $۲/۶۳ m.s^{-1}$ و زاویه ۹۰° قرار گرفت. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، دو میله استوانه‌ای شکل دو طرف هر فک، برای محدود کردن حــرکات عرضی زه تا ۳۰۰mm بین میله‌ها، قرار گرفته اســت. با این کار اطمینان حاصل می‌شــود که تنش وارد شده به load cell در این محور قرار می‌گیرد و این عمل همچنین امکان آسیب به زه‌ها در نقطه ورود به فک را به حداقل می‌رساند.

چکش شامل یک بلوک سربی ۲۹۲g نصب شده به انتهای یک میله چوبی سبک اســت. چکش اجازه نوســان به طرف زه، با زاویه ثابت، به صورت یک آونگ را دارد. در شرایط نرمال زه‌های راکت بیشترین نیروی عرضی را در ۱۵۰۰N تجربه می‌کند. این نیرو که توســط توپ ۵۷g در زمان ۵ms وارد می‌شود، امکان تغییر ســرعت از $+۳۰ m.s^{-1}$ بــه $-۳۰ m.s^{-1}$ را فراهم می‌کند. نیرو بین همه زه‌ها توزیع شــده است اما اگر فرض شود ضربه بیشتر بین ۵ زه عمودی و ۵ زه افقی تقسیم شــده است، در این صورت بیشــترین نیروی وارد شده به هر زه ۱۵۰N است. در دستگاه نشان داده شده در شکل ۳-۱ کل تاثیر وزن موثر بلوک سربی ۲۹۲kg، میله چوبی و شبکه نوری اضافه شده، ۰/۴۵kg است. چکش سرعت خودش را در مدت ۳۰ms از $+۲/۶۳ m.s^{-1}$ به $-۲/۶۳ m.s^{-1}$ می‌رساند، بیشینه نیروی بین ۱۲۰N تا ۲۰۰N که به زه‌ها وارد شود، بستگی به سختی آنها دارد.

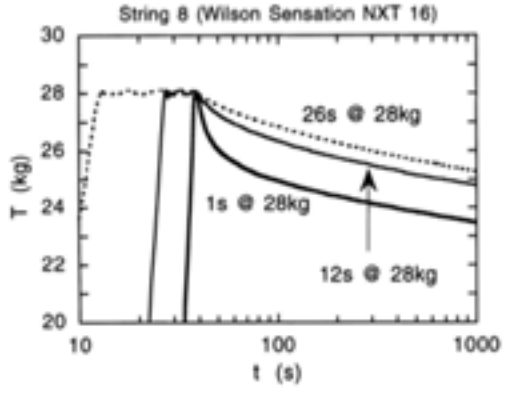
از آنجایی‌که یک زه تکی سختی عرضی کم‌تری نسبت به راکت زه‌کشی شده دارد،

شبیه‌سازی شـــرایط ضربه در حالت نرمال مشکل است. برای رسیدن به بیشترین سرعت و مدت مشابه توپ تنیس، ضربه باید با جرمی بسیار کم‌تر از جرم توپ تنیس و با سرعت بالاتری نسبت به توپ تنیس معمولی ضربه وارد شود. همچنین می‌شود چکش با جرم بیشـــتر از جرم توپ و با سرعت کم‌تر عمل کند. در این مورد، زمان ضربه بیشتر از حد نرمال است. مزیت این کار، شبیه‌سازی اثر تجمعی تعدادی ضربه است که هر کدام 5ms طول می‌کشد. اندازه‌گیری سرعت چکش و جابجایی عرضی به‌وسیله‌ی گذر از پرتو لیزر در شبکه نوری متصل شده به چکش است، همانطورکه در شکل ۱نشان داده شده است. به علت اینکه ابعاد پرتو کمی بیشتر از 1mm است، سیگنال‌های شناسایی شده حاوی حاشیه‌های سینوسی است.

شـــکل ۲ نشان می‌دهد برای زه پلی‌استر و زه طبیعی، که تنش تابعی از کم‌تری از دست می‌دهند. درحالی‌که زه‌های پلی‌استر به سرعت تنش از دست می‌دهند. میزان از دست دادن تنش در زه را می‌توان با نگه داشتن تنش آن بالای 20kg برای مدت 30s و یا اعمال کردن کشش یک بار یا بیشتر روی زه قبل از وارد کردن تنش اصلی، کـــم کرد. البته این کار یک راه‌کار عملی نیســـت و به عنوان یک راه‌حل جایگزین می‌توان تنش اولیه بیشتری به زه وارد کرد تا از دادن تنش بعد از زه‌کشی جبران شود. تاثیر کشیدن زه تا 28kg در بازه‌های زمانی متفاوت قبل از فیکس کردن زه در شکل ۳ نشان داده شده است. تاثیر آن قابل توجه است و همچنین روی از دست دادن تنش در زمان بعد از وارد شدن ضربه موثر است.



شکل ۲: تنش برحسب لوگاریتم زمان برای دو زه متفاوت که قبل از محکم کردن آنها در گیره، با تنش 28kg به مدت 10s کشیده شده‌اند.

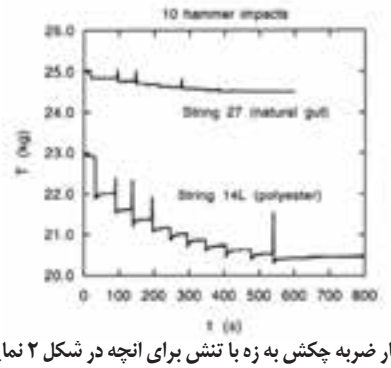


شکل ۳: تنش برحسب لوگاریتم زمان. کشیده شدن زه تا تنش 28kg با فاصله زمانی‌های متفاوت قبل از محکم کردن آنها در گیره.

تاثیرات ۱۰ بار چکش زدن در شـــکل ۴ آمده است. تنش در زمان هر ضربه زیادتر می‌شود که به میزان الاستیسیته زه وابسته است. تنش برای زه طبیعی 9kg، برای نایلون 18kg، برای پلی‌استر 22kg و برای کولار 45kg افزایش یافته است. تاثیر آن مشابه افزایش تنش به صورت استاتیکی بوده است، که در آن تنش سریعاً بعد از زیاد شدن شروع به کاهش می‌کند. در نتیجه تنش بعد از ضربه کم‌تر از تنش قبل از ضربه است، مخصوصاً بعد از اولین ضربه. ضربات متوالی باعث می‌شود دائماً مقدار کمتری از تنش کاهش یابد. بنابر این کم شدن تنش بعد از هر ضربه به آنچه قبلاً برای زه اتفاق افتاده است و همچنین میزان ضربه، وابسته است. اگر با چکش سبک‌تر یا با سرعت کمتر ضربه زده شده بود، در آن صورت کم شدن تنش بعد از ۱۰ ضربه کمتر خواهد بود. برعکس کاهش تنش با چکش سنگین‌تر، بیشتر است.

اتفاق جالبی که در بین ضربات رخ می‌دهد این است که در بیشتر زه‌ها ترمیم تنش آهســـته‌ای رخ می‌دهد. (در بین ضربات مقداری از تنش از دست رفته جبران شده و افزایش می‌یابد.) این تاثیر را در شـــکل ۴می‌توان دید. کاهش تنش را می‌توان به وسیله شکسته شدن پیوندهای مولکولی توضیح داد. افزایش تنش احتمالاً ناشی از تشکیل پیوندهای جدید است.

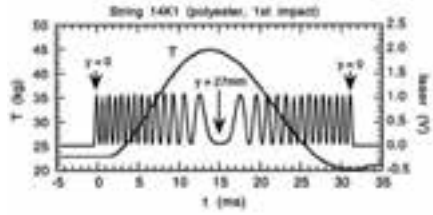
به زبان دیگر می‌توان گفت زه دارای حافظه اســـت. اگر تنش در 28kg برای چند دقیقه نگه داشته شده باشد و بعد به سرعت به 15 kg کاهش یابد و سپس فیکس شود، مشاهده می‌شود که تنش شروع به زیاد شدن می‌کند. وقتی که میزان پیوندهای جدید با پیوندهای قدیمی شکســـته شده بالانس شـــد، تنش در یک مقداری ثابت می‌شود، حدود 18kg.



شکل ٤: تاثیر ۱۰ بار ضربه چکش به زه با تنش برای انچه در شکل ۲ نمایش داده شد. شکل ٤ ادامه شکل ۲ است. اولین ضربه در t=1020 شروع شد (که در اینجا به عنوان t=0 معرفی شده است)

میزان افزایش تنش در زمان ضربه و ســـیگنال لیزر متناظر با آن، میزان جابجایی زه را نشـــان می‌دهد، در شکل ۵ نشـــان داده شده است. هر حاشیه جدید متناظر اســـت با 2mm جابه‌جایی در جهت y. جابه‌جایی در جهت y می‌تواند با شمارش حاشیه‌های کوچک ۰/۱ میلیمتری اندازه‌گیری شود. تنش تا زمانی که زه‌ها حداقل ۳ تا ۴ میلیمتر منحرف نشوند، افزایش نمی‌یابد.

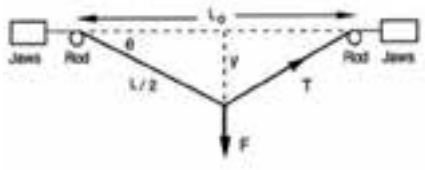
چند میلی ثانیه قبل از اینکه زه به حداکثر میزان جابه‌جایی خود برســـد، تنش به حداکثر میزان خود می‌رســـد. چون میزانی که تنش در آن افت می‌کند ناشـــی از شکستن پیوند مولکول‌هاست، زمانی‌که تنش افزایش می‌یابد ناشی از کشیده شدن بیش از حد زه است. این اتفاق قابل توجه است مخصوصاً در چند ضربه اول و در زه پلی‌استر که پیوندها به‌آسانی می‌شکنند.



شکل ۵: تنش بر حسب زمان برای زه پلی‌استر در ۱۰ ضربه اول. سیگنال لیزر برای اندازه‌گیری سرعت چکش و میزان جابه‌جایی زه‌ها نیز نشان داده شده است.

آنالیز ضربات انتخاب شده

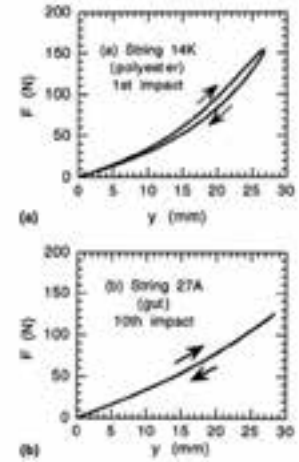
آنالیز داده‌ها در شـــکل ۳–۵ مقدار کمی انحراف از رفتار ایده‌آل را نشـــان می‌دهد. (منظور از رفتار ایده‌آل، رفتار زهی اســـت که اصلاً تنش از دســـت نمی‌دهد). مثال نشـــان داده شده در شکل ۵، از دست دادن تنش نسبتاً زیاد در زمان ضربه تا حدی غیرمعمول است.



شکل ٦: زه خمیده شده به اندازه y در مرکز

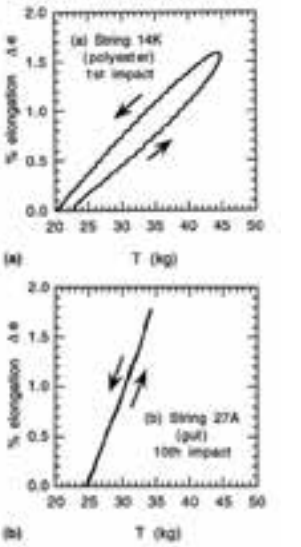
در نتیجه، مقدار از دســـت دادن انرژی در زمان ضربه قابل اندازه‌گیری اســـت، که می‌توان از طرح F بر اســـاس y که در شـــکل ۷ نشـــان داده شده تخمین زد. موج F از مقدار T آزمایش شـــده در شـــکل ۶ و موج y از معادله $2T\sin\Theta=4Ty/L$ $F=$ استخراج شده است. انتگرال $\int fdy$ از $y=0$ تا ماکزیمم مقدار y نشان‌دهنده کار انجام شده روی چکش تا به استراحت در آمدن آن است و بنابراین مساوی است با معادله $MV_1^2/2$. مقدار این انتگرال برای همه ضربه‌ها ۱/۶۳±۰/۰۰۲ J و ســـرعت چکش برای همه ضربه‌ها ۱/۶۳ m/s بود که نشان می‌دهد جرم موثر چکش «M» ۰/۴۵ kg بوده است. مقدار انتگرال $\int fdy$ در مدت زمان برگشت معرف مقدار انرژی برگشـــتی $MV_2^2/2$ است. انتگرال در بقیه مدت زمان ضربه معرف قسمت محصور شده به وسیله حلقه پسماند است و مساوی است با مقدار انرژی تلف شده در زه. در شـــکل ۷ ناحیه حلقه ۰/۱۸۳ J است و V_2/V_1 باید ۰/۹۴ باشد، اگر انرژی از طریق دیگری تلف نشده باشـــد. در واقع مقدار ۰/۹۴ نشاندهنده این است که مقداری از انرژی به علت لرزش چکش و ساختار محافظ آن تلف شده است. این مقدار همچنین متناظر است وارد کردن ۱۰ ضربه برای زه طبیعی، ۷(b).

در زه واقعی درصد کشـــیدگی نشان‌دهنده‌ی مقدار پسماند هم هست، مثل شکل ۸ در نتیجه ثابت فنر (k) هم نشان‌دهنده پسماند است. این اثر تنها در چند ضربه اول مهم اســـت، وقتی که از دست دادن تنش نسبتاً زیاد است. در بقیه ضربه‌ها و حتی ضربات اولیه، میانگین k می‌تواند به وسیله بیشترین تنش و بیشترین کشیدگی طول یا بیشـــترین مقدار جابجایی y از معادله $T=T_0+k(L-L_0)$ تعریف شود. به روش دیگر اگر کسی از روش تقریبی معادله $k\perp\sim(4/L_0)(T_0+2ky^2/L_0)$ استفاده کند، $k=L0DT/2y0^2$ که DT مقدار ماکزیمم افزایش تنش در زمان ضربه و y_0 مقدار حداکثر جابه‌جایی y است.



شکل ۷: F بر حسب y برای (a) ضربه نشان داده شده در شکل ۵ و (b) زه طبیعی

تغییر مقدار k از اولین تا دهمین ضربه معمولاً کم‌تر از ٪۳ بود. نتیجتاً مقدار دینامیکی k که در زیر داده شده، مقدار میانگین آن در ۱۰ ضربه است. همین‌طور حداکثر نیرو (f_0) در زمان هر ضربه با تقریب خوبی به وسیله $f_0=4(T_0+DT)y_0/L_0$ داده شده است. مقدار حداکثر نیرو هم کم‌تر از ٪۳ در ۱۰ ضربه تغییر کرده که مقدار میانگین آن داده شده است.

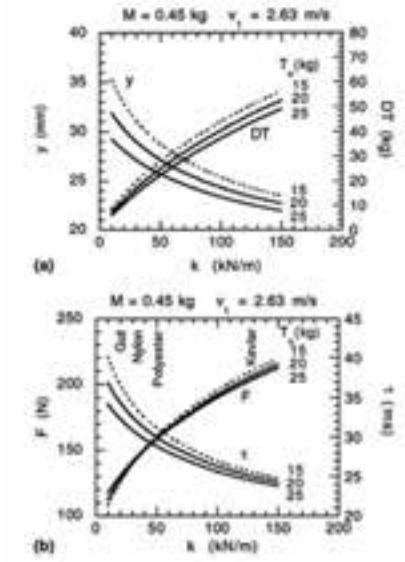


شکل ۸: افزایش درصد طول Δe، بر T برای ضربه نشان داده شده در شکل ۵

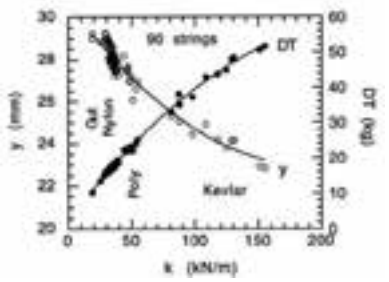
شکل ۱۰و ۱۱ می‌توانند با محاسبات تئوری در شکل ۹ مقایسه شوند. پراکندگی در خلاصه داده‌ها می‌تواند ناشی از این باشد که تنش اولیه T_0 برای همه زه‌ها یا ضربه‌ها یکسان نبوده است. علت دیگر این پراکندگی استفاده از مقدار میانگین DT، y، k در ۱۰ ضربه بوده است.

میزان قابل توجه همپوشـــانی در داده‌های با $k=40-30kN/m$ به این علت است که بیشتر حجم زه‌های آزمایش شـــده نایلون بوده است که مقدار k در آنها مشابه اســـت. فقط دو زه طبیعی آزمایش شده که در هر دو $k\sim20kN/m$ است. در بیشتر پلی‌استرها $k\sim40-60kN/m$ و در زه‌های کولار $k\sim140-90kN/m$ است. افزایش طول زه‌های طبیعی و نایلون با تنش ۲۸ kg تقریباً ٪۷–۱۵، پلی‌اســـتر ٪۴ و زه‌های

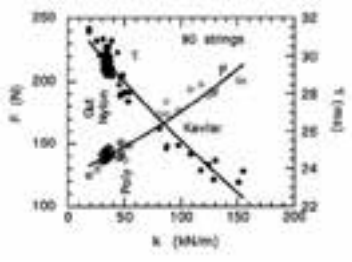
کولار تنها ٪۱-۲ است. مقدار افزایش طول با نتایج k دینامیکی، ثابت کیفی است، اما مقایسه مستقیم بی‌معنی خواهد بود. چون نمودار افزایش طول نسبت به هر دو تابع زمان (به علت خزش) و تنش زه غیرخطی است. به علت پدیده خزش، تخمین‌های شبه استاتیکی k در هر تنشی، حداقل در زه تازه که قبلاً کشیده نشده است، فاکتوری بین ۱/۵ تا ۲ بار کمتر از اندازه دینامیکی k است.



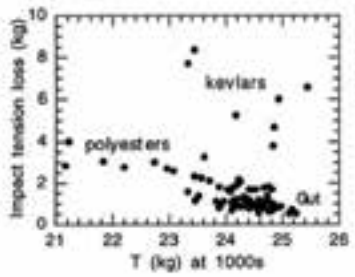
شکل۹ : جواب معادله $d_y^2/d_t^2 = -F/M = -4Ty/(ML)$ به صورت عددی برای $V_i = ۲/۶۳$ m/s ،$L_0=0/3$ ،M=۴۵ ،T_0=۱۵ ،۲۰ ،۲۵kg
(a) ماکزیمم مقدار خم شدن y و افزایش در تنش زه (b) (DT) بیشینه مقدار نیرو (F) و زمان ضربه (τ)



شکل۱۰: نتایج ماکزیمم مقدار خم شدن y و افزایش تنش DT بر حسب سختی دینامیکی، k، برای ۹۰ زه مختلف که ۱۰ بار توسط چکش به آنها ضربه وارد شده است. مقدار میانگین DT، k، y برای ۱۰ آورده شده است.



شکل ۱۱: نتایج اندازه‌گیری شده در مدت زمان ضربه، τ و مقدار نیروی محاسبه شده، F، برای ضربات مشابه در شکل ۳-۱۰. مقدار میانگین τ و F در ۱۰ ضربه آورده شده است. τ برای تمامی عرض نمودار T بر حسب t در شکل ۵ اندازه‌گیری شده است. نمودار کل عرض y بر حسب t به صورت معمول ms ۲ است.



شکل ۱۲ : کاهش کلی تنش در اثر وارد شدن ۱۰ ضربه ، برای تنشی که بعد از s ۱۰۰۰ کاهش یافته است. برای همان ضرباتی که در شکل۱۰ نشان داده شده است. به همه زه‌ها تنش kg ۲۸، ۱۰s ثانیه قبل از محکم شدن، وارد شده است.

شکل ۱۲ میزان از دســت دادن تنش شبکه (زه‌ها) به علت ۱۰ ضربه را به عنوان تابعی از تنش، s ۱۰۰۰ بعد از در گیره قرار گرفتن زه‌ها نشان می‌دهد. این امر منطقی به نظر می‌رسد، که زه با پیوند قوی‌تر، تنش را چه در اثر ضربه و چه در طول زمان آهسته‌تر از دست بدهد. بیشتر زه‌ها شامل این موضوع می‌شوند اما زه کولار استثناء است. زه‌های کولار در زمان به صورت آهسته تنش از دست می‌دهند اما بعد از هر ضربه تنش بیشتری نسبت به بقیه زه‌ها از دست می‌دهند. از دست دادن کم تنش با گذشت زمان، در تنش‌های تا ۲۸kg مشاهده شده است. تلف شدن زیاد تنش ناشی از هر ضربه، به افزایش تنش در مدت هر ضربه (DT) وابسته است، که در این مورد (کولار) بسیار بیشتر از بقیه زه‌ها است.

آزمایش با ســرعت کم‌تر چکش نشان داد، برای هر سرعت چکش، از دست دادن تنش بر اثر ضربه در زه کولار همیشــه بیشتر از بقیه زه‌ها است، که میزان از دست دادن تنش تقریباً متناسب است با سرعت چکش.

منابع

1. R. Cross and R. Bower ,(2006) Measurements of string tension in a tennis racket , University of Sydney, University of Technology
2. P.K.Chidambaram , R.Ramakrishanan , Impact, String Tension and Vibration Analysis of Nanocomposite Based Tennis Racket Frame ,Tamil Nadu Physical Education and Sports University
3. P. K. Chidambaram and R. Ramakrishanan, (2013) Synthesis, Testing of Nylon 6,6/Multi-wall Carbon Nanotube and Modeling, Analysis of Tennis Racket Frame and String, Tamil Nadu Physical Education and Sports University
4. ROB BOWER & ROD CROSS, (2004) String tension effects on tennis ball rebound speed and accuracy during playing conditions , University of Technology Sydney
5. Tanawat Vanasant, Somjarod Mingkhumlert, Weerawat Limroongreungrat, THE EFFECT OF STRING TENSION ON SHUTTLECOCK VELOCITY, Department of Sports Science, Mahidol University, Thailand
6. Yao-dong Gu , Jian-she Li,(2007)Dynamic Simulation of Tennis Racket and String, Ningbo University
7. David Weir, (2012) Finite element modelling of tennis racket impacts to predict spin generation, A Doctoral Thesis. Loughborough University.
8. Ros Cross , Crawford Lindsey , Daniel Andruczyk . Physics Department , University of Sydney , NSW , Australia

ادامه مطالب مربوط به راکت تنیس در شماره بعدی