نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی
(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون
پردیس کشاورزی و منابع‌طبیعی دانشگاه تهران
۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹٤ – کرج

تعیین خواص مهندسی هل سبز و سفید

علی نجات لرستانی[1*]

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

* ایمیل مکاتبه کننده: ali.lorestani@gmail.com

چکیده

در عملیات برداشت و فراوری میوه هل، اولین گام به دست آوردن اطلاعات جامع وکامل از خواص فیزیکی و مکانیکی این محصول جهت طراحی ماشین‌ها و دستگاه‌های پس از برداشت می باشد. در این پژوهش برخی خواص فیزیکی و مکانیکی دو نوع هل(سبز و سفید) شامل ابعاد، قطر متوسط هندسی، سطح رویه، جرم، حجم، مدول الاستیسیته، نیروی ماکزیمم و کار ماکزیمم برای شکست محصول مورد بررسی قرار گرفت. میانگین برخی از مقادیر، نظیر ابعاد c،b،a به ترتیب برای هل سبز برابر ۱۷/۰٦، ٦/٦۱، ٦/۱ میلیمتر و همچنین برای هل سفید به ترتیب برابر ۱٤/۳۷، ۷/٦۲، ۷/۳۱ میلیمتر به دست آمد. مقادیرمتوسط سطوح تصویر P_a،P_b،P_c برای هل سبز به ترتیب برابر ۳۳/۷٤۳، ۷٦/۹۳٥ ، ۸۱/۱٦۹ میلیمترمربع و همچنین برای هل سفید به ترتیب برابر ٥٥/٤۰٤، ۸۹/٤٥۱ ، ۹٥/٦٥ میلیمترمربع اندازه گیری شدند. مدول الاستیسیته برای هل سبز در سرعت $\frac{mm}{min}$ ۱۰، ۰/۲۱۸ GPa و برای هل سفید ۰/۱۷٥ GPa به دست آمد. همچنین نیروی ماکزیمم به دست آمده در هل سبز ۳٥/٥۳ N و کار انجام شده در اثر اعمال این نیرو ۳۸/۷ N.mm می باشد که در مقایسه با مقادیر هل سفید که در آن نیروی ماکزیمم ۲۰/٤ N و کار انجام شده در اثر اعمال نیرو ۱٥/۰۲ N.mm به دست آمد، مقادیر بیشتری را نشان می دهد. این نشان می‌دهد که سختی دانه های هل سبز بیشتر بوده و در نتیجه نیاز به اعمال نیروی بیشتری برای شکست دارند.

واژه‌های کلیدی: خواص فیزیکی و مکانیکی، هل سبز، هل سفید

مقدمه

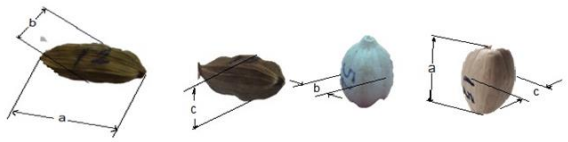
در طبقه بندی گیاه شناسی، هل گیاهی است به نام *Elatteria Cardamomum* و متعلق به خانواده *Zingiberacaea* می‌باشد. این گیاه یک گیاه سایه دوست ویژه مناطق گرمسیری است که می تواند تا عرض جغرافیایی۲۰ درجه شمالی و جنوبی تولید شود. هل در ارتفاع ۱۲۰۰– ٦۰۰ متر بالای سطح دریا رشد می کند که نیازمند شرایط محیطی ٤۰۰۰–۱٥۰۰ میلیمتر بارش سالیانه و ۳٥–۱۰ درجه سانتیگراد دمای محیط می باشد و یک گیاه سازگار با محیط زیست می باشد. در اصل یک

گیاه بومی از ناحیه Ghats غربی هند می باشد. البته یکی از گسترده ترین ادویه جات مورد استفاده در خوراک مراکشی نیز می باشد (Anonymous, 2015).

در واقع می توان گفت تا چند سال اخیر هند یکی از اصلی ترین تولید کننده و صادر کننده هل بوده است، اما اخیراً کشور گواتمالا به عنوان رقیب اصلی، خود را به جهان معرفی کرده است. تانزانیا، سریلانکا، السالوادور، ویتنام، لائوس و کامبوج دیگر کشورهای در حال رشد در (تولیدو صادرات) هل هستند. در کشور هند این محصول در ایالات جنوبی کرالا، کارناتکا و تامیل نادو کشت می شود که کرالا ٦٠٪ ،کارناتکا ۳۰٪ و تامیل نادو۱۰٪ تولید و کشت را در کشور هند به خود اختصاص داده اند. از خواص دارویی که برای هل گزارش شده است، ضد نفخ، اشتها آور، ادرار آور، از تهوع و استفراغ جلوگیری می کند. در اشخاصی که استرس دارند به عنوان یک دارو محرک برای غلبه بر استرس می تواند مورد استفاده قرار گیرد. همچنین می تواند در جلوگیری از بوی بد دهان ،سوء هاضمه، ترشح بیش از حد دهان، موثر باشد (ISIRI, 1996; Anonymous, 2015).

مواد و روش‌ها

برای انجام این تحقیق ۲۰۰ عدد هل سبز و سفید(از هر کدام ۱۰۰ عدد) از بازار ادویه فروشی کرمانشاه خریداری شد. برای اندازه گیری ابعاد از کولیس بادقت ۰/۰۱ میلیمتر استفاده شد و ابعاد به صورتی که در شکل (۱) مشخص شده اندازه‌گیری شدند.



شکل ۱: نحوه اندازه گیری ابعاد هل سبز و سفید

برای اندازه گیری وزن از ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ گرم استفاده شد. برای محاسبه حجم به علت سبک بودن دانه های هل از حجم معادل استفاده شد به این صورت که دسته‌های پنج تایی از هل‌ها را جدا کرده و آنها را در یک تور قرار داده و سپس با استفاده از روش جابجایی آب و مشخص شدن حجم معادل هر نمونه به دست آمد که میانگین آنها برای هل (سبز و سفید) ثبت شد(شکل ۲).

برای محاسبه حجم توده، کل نمونه ها را داخل یک استوانه مدرج می ریزیم حجم نشان داده شده همان حجم توده می‌باشد. برای به دست آوردن قطر متوسط حسابی(D_a) از رابطه (۱) استفاده شد(Lorestani et al., 2012; Mohsenin, 1986):

$$D_a = \frac{(a+b+c)}{3} \qquad (۱)$$

که در آن a، b و c به ترتیب بزرگترین قطر، قطر میانی و کوچکترین قطر نمونه‌ها هستند. قطر متوسط هندسی(D_g) نیز از رابطه (۲) به دست آمد (Lorestani et al., 2012; Mohsenin, 1986):

$$D_g = (abc)^{1/3} \qquad (۲)$$

شکل ۲: نحوه اندازه گیری حجم

به منظور محاسبه جرم هزار دانه، میانگین وزن کل نمونه را در عدد ۱۰ ضرب نمودیم. برای به دست آوردن چگالی واقعی از رابطه (۳) استفاده شد، با این تفاوت که در محا سبه حجم همان طور که گفته شد به دلیل سبک بودن دانه‌ها، از نمونه‌های دیگری استفاده شد(یعنی همان دسته های پنج تایی جدا شده) که با توجه به آنها چگالی هریک از نمونه‌ها با استفاده از رابطه(۳) به دست آمد و میانگین آن به عنوان چگالی حقیقی(ρ_t) در نظر گرفته شد (Lorestani et al., 2012; Mohsenin, 1986).

$$\rho_t = \frac{M}{V} \quad (۳)$$

که در آن، M جرم نمونه و V نیز حجم نمونه ها می باشد. برای محاسبه چگالی توده(ρ_b) از رابطه (٤) استفاده شد (Lorestani et al., 2012; Mohsenin, 1986):

$$\rho_b = \frac{\sum w}{V_t} \quad (٤)$$

که در آن ∑w جرم توده و V_t نیز حجم توده می باشد. با استفاده از رابطه (٥) درصد تخلخل(P) برای هر نمونه به صورت زیر محاسبه شد (Lorestani et al., 2012; Mohsenin, 1986):

$$P = \frac{\rho_t - \rho_b}{\rho_t} * 100 \quad (٥)$$

برای محاسبه درصد کرویت(φ) از رابطه (٦) استفاده شد (Lorestani et al., 2012; Mohsenin, 1986):

$$\varphi = \frac{D_g}{a} * 100 \quad (٦)$$

برای به دست آوردن درصد کرویت(φ) از رابطه (۷) استفاده شد (Lorestani et al., 2012; Mohsenin, 1986):

$$R_a = \frac{b}{a} * 100 \quad (۷)$$

برای محاسبه سطح رویه(S) از رابطه(۸) استفاده شد:

$$S = \pi D_g^2 \quad (۸)$$

برای اندازه‌گیری سطح تصویر از دستگاه سطح برگ سنج استفاده شد، که سه سطح تصویر عمود بر سه راستای ابعاد اندازه‌گیری شده به دست آمد. سطح معیارکه همان میانگین حسابی سطوح تصویر می باشد(CPA)، از رابطه(۹) به دست آمد (Lorestani et al., 2012; Mohsenin, 1986):

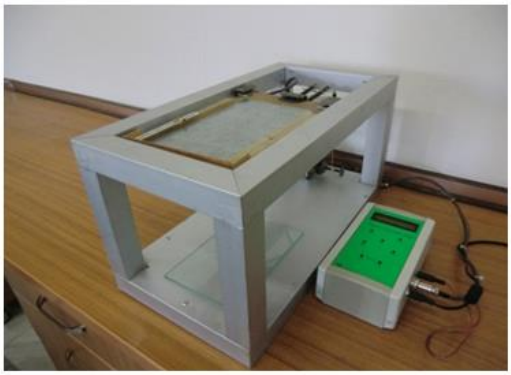
$$CPA = \frac{(P_a + P_b + P_c)}{3} \quad (۹)$$

برای محاسبه درصد رطوبت در این آزمایش از هر کدام از هل ها(سبز و سفید) سه نمونه به صورت تصادفی انتخاب و وزن شد که هر کدام از آنها را بعد از قرار دادن در ظرف مخصوص به مدت ۲٤ ساعت درون دستگاه آون در دمای ۱۰٤ درجه سانتیگراد قرار دادیم تا نمونه ها به طور کامل خشک شوند. بعد از به دست آمدن وزن خشک نمونه ها، با استفاده از رابطه (۱۰) مقدار درصد رطوبت برای هریک از نمونه ها محاسبه شد (Lorestani et al., 2012; Mohsenin, 1986):

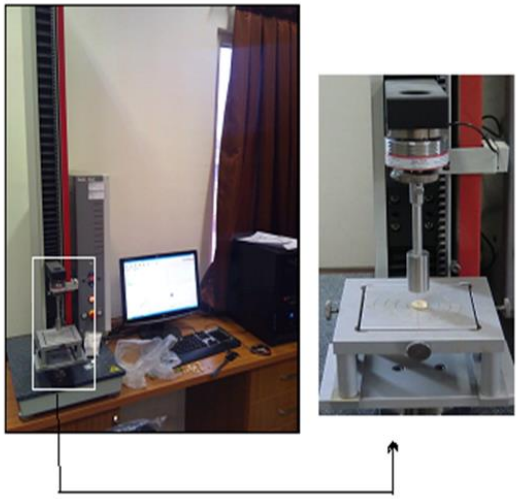
$$mc_{w.b.} = \frac{M - M_o}{M} * 100 \quad (۱۰)$$

که در آن M، جرم نمونه مرطوب، M_o، جرم نمونه خشک شده و $mc_{w.b.}$ نیز در صد رطوبت بر پایه تر می‌باشد. برای به دست آوردن ضریب اصطکاک ایستایی و زاویه اصطکاک از دستگاه زیر(شکل ۳) و بر روی سه سطح(چوب، فلز و شیشه) استفاده شد (Lorestani et al., 2013). با توجه به نمونه های اندازه گیری شده مقادیر میانگین آنها ثبت گردید (در این آزمایش ۱۵ نمونه تصادفی از هل ها در نظر گرفته شد).

برای به دست آوردن دیگر خواص مکانیکی نظیر مدول الاستیسیته، نیروی لازم برای شکست، کار انجام شده برای شکست و غیره از دستگاه تست اینسترون Zwick Roell ساخت کشور آلمان با ظرفیت لود سل ۵۰ کیلوگرمی (شکل ٤) استفاده شد، که برای انجام این آزمایش، ۱۵ نمونه تصادفی از هرکدام از هل‌های مورد آزمایش(سبز و سفید) به صورتی که در شکل(٤) نشان داده شده است، در زیر دستگاه قرار داده شد.



شکل ۳: دستگاه اندازه گیری ضریب اصطکاک ایستایی(Lorestani et al., 2013).



شکل ٤: دستگاه آزمون مکانیکی مواد(تست اینسترون)

تجزیه و تحلیل داده ها و محاسبات آماری با استفاده از نرم افزار Excel 2010 انجام گرفت.

بحث و نتایج

مشخصه های فیزیکی و مکانیکی اندازه گیری شده برای هل سبز و سفید به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است. پارامترهای فیزیکی و مکانیکی محاسبه شده برای هل سبز و سفید نیز به ترتیب در جدول‌های ۳ و ٤ آمده است.

ضریب اصطکاک ایستایی و زاویه اصطکاک روی سطوح مختلف برای هل سبز در جدول ۵ و برای هل سفید در جدول ٦ آمده است. خواص مکانیکی هل سبز شامل مدول الاستیسیته، نیروی شکست، ماکزیمم نیرو، انرژی لازم برای شکست و انرژی مصرفی برای اعمال نیروی ماکزیمم در جدول ۷ و برای هل سفید در جدول ۸ آمده است.

در پایان با مقایسه بین دو نوع هل می توان در مورد خواص فیزیکی و مکانیکی به نتایج زیر دست یافت. میانگین قطر هندسی در هل سفید(۹/۲۳ میلیمتر) بیشتر از هل سبز (۷/۷۹ میلیمتر) می باشد، که این به خاطر شکل خاص هندسی آن می‌باشد. میانگین درصد کرویت در هل سفید (٦٤/۹۲ درصد) بیشتر از هل سبز (۵۱/۵ درصد) به دست آمد در مقایسه دیگر خواص می توان گفت سطح رویه در هل سفید(۲٦۹/۳۹ میلیمتر مربع) نیز بیشتر از هل سبز(۲٤۳/۸۹ میلیمتر مربع) می

باشـد. قطر میانگین حسـابی در هل سـبز(۹/۹۲ میلیمتر) به مقدار بسیار ناچیزی از هل سفید (۹/۷۷ میلیمتر) بیشتر می باشد. سـطح معیار که همان میانگین سـطح تصـویرها می باشد در هل سفید(۸۰/۱۷ میلیمتر مربع) بشتر از هل سبز(٦۳/۹٥ میلیمتر مربع) به دست آمد. همچنین میانگین در صد نسبت ابعاد در هل سفید(٥۳/۸٥) بیشتر از هل سبز(۳۹/۲۲) به دست آمد.

در مقایسـه دیگر خواص فیزیکی مانند چگالی توده با توجه به محاسـبات می توان گفت که در هل سـبز(۰/٤۷۸ گرم بر سـانتیمتر مکعب) بیشـتر از هل سـفید(۰/۲۲٦ گرم بر سانتیمتر مکعب) می باشد که این ناشی از کم بودن حجم توده در هل سـبز و همچنین وزن سـنگین آن می‌باشد. در محاسبه چگالی به دلیل سبک بودن دانه های هل دسته های پنج تایی به عنوان نمونه مورد آزمایش قرار گرفتند که چگالی واقعی به دست آمده در این آزمایش برای هل سبز(۰/۷۸٤ گرم برسانتیمترمکعب) و همچنین برای هل سـفید(۰/٤۰۲ گرم بر سـانتیمترمکعب) به دسـت آمد که با توجه به این دو نوع چگالی و رابطه درصـد تخلخل (٥) به این نتیجه رسیدیم که درصد تخلخل در هل سفید(٤۳/۸٥) بیشتر از هل سبز(۳۸/۹۷) می باشد.

در مقایسـه در صـد رطوبت، هرچند این دو نوع هل به صـورت خشک شده خریداری شدند ولی باز هم دارای مقدار کمی رطوبت می باشـند که با آزمایشـها ومحاسبات صورت گرفته مقدار آن برای هل سبز(۷/۳۲) و در هل سفید(۱۲/٦) به دست آمد که نشـان می دهد هل سفید دارای رطوبت بیشتری می باشد. جرم هزار دانه برای دانه های هل سبز ۲۳٤/۱ گرم و برای هل سـفید ۱۳٥/۱ گرم بوده و چگالی توده برای دانه های هل سـفید ۰/۲۲٦ گرم بر سـانتمترمکعب و برای هل سبز ۰/٤۷۸ گرم بر سانتمترمکعب به دست آمد.

اما در خواص مکانیکی مقادیری چون کار لازم برای شـکسـت، نیروی شـکسـت و تغییر مکانی که در اثر اعمال آن نیرو به دسـت می آید را می توان مورد ارزیابی و مقایسه قرار داد. همان طور که گفته شد این خواص در اثر اعمال نیرو در سرعت ۱۰ میلیمتر بر دقیقه توسـط دسـتگاه آزمون مکانیکی مواد اندازه گیری شـدند. نتایج نشـان می دهد که در هل سـبز مدول الاستیسیته ۰/۲۲۰GPa و در هل سفید ۰/۱۷٥ GPa می باشد.

همچنین نیروی ماکزیمم به دسـت آمده در هل سبز ۳٥/٥۳ N و کار انجام شده در اثر اعمال این نیرو ۳۸/۷ N.mm می باشد که در مقایسـه با مقادیر هل سـفید که در آن نیروی ماکزیمم ۲۰/٤N و کار انجام شـده در اثر اعمال نیرو ۱٥/۰۲ N.mm به دسـت آمد، مقادیر بیشـتری را نشـان می دهد. این نشـان میدهد که سختی دانه های هل سبز بیشتر بوده و در نتیجه نیاز به اعمال نیروی بیشتری برای شکست دارند.

همچنین در آزمایشـی که برای مشـخص کردن ضریب اصطکاک نمونه ها روی سه سطح انجام گرفت به این نتیجه رسیدیم که بر روی سـطح چوب مقدار میانگین ضـریب اصطکاک و زاویه اصطکاک به ترتیب در هل سفید (۰/٥۹ ، °۳۰/۸) و برای هل سـبز (۰/٦۸، °۳٤/۲۴) به دسـت آمد و در سـطح فلزی برای هل سفید(۰/٤۹، °۲۷/۰۹) و برای هل سبز(۰/٥۱، °۲۷/۰٥) و همچنین بر روی سطح شیشه ای این مقادیر برای هل سفید(۰/٥۲، °۲۷/۲٤) و برای هل سبز(۰/٦٤، °۳۱/۸٥) به دست آمد.

با مقایسـه نتایج می توان به این نتیجه رسـید که هل سـبز بر روی همه سـطوح اصـطکاک بیشتری دارد که یکی از دلایل آن می‌تواند سنگین تر بودن وزن آن نسبت به هل سفید باشد در نتیجه صفحه باید زاویه بیشتری را طی می کرد تا نمونه سرش پیدا کند.

نتیجه‌گیری

میانگین برخی از مقادیر، نظیر ابعاد a،b،c به ترتیب برای هل سبز برابر ۱۷/۰٦، ٦/٦۱، ٦/۱ میلیمتر و همچنین برای هل سفید به ترتیب برابر ۱٤/۳۷، ۷/٦۲، ۷/۳۱ میلیمتر به دست آمد. از دیگر مقادیر می توان سطح تصویر را نام برد که مقادیر P_a،P_b،P_c برای هل سبز به ترتیب برابر ۳۳/۷٤۳، ۷٦/۹۳۵ ، ۸۱/۱٦۹ میلیمترمربع و همچنین برای هل سفید به ترتیب برابر ۵۵/٤۰٤، ۸۹/٤۵۱ ، ۹۵/٦۵ میلیمترمربع اندازه گیری شدند. مدول الاستیسیته برای هل سبز در سرعت ۱۰ $\frac{mm}{min}$، ۰/۲۱۸ GPa و برای هل سفید ۰/۱۷۵ GPa به دست آمد. همچنین نیروی ماکزیمم به دست آمده در هل سبز ۳۵/۵۳ N و کار انجام شده در اثر اعمال این نیرو ۳۸/۷ N.mm می باشد که در مقایسه با مقادیر هل سفید که در آن نیروی ماکزیمم ۲۰/٤ N و کار انجام شده در اثر اعمال نیرو ۱۵/۰۲ N.mm به دست آمد، مقادیر بیشتری را نشان می دهد. این نشان می‌دهد که سختی دانه های هل سبز بیشتر بوده و در نتیجه نیاز به اعمال نیروی بیشتری برای شکست دارند.

تشکر و قدردانی

از مدیر محترم گروه زراعت دانشگاه رازی به خاطر همکاری جهت استفاده از دستگاه سطح برگ سنج تشکر و قدردانی می‌گردد.

مراجع

1. Anonymous. 2.15. http://en.wikipedia.org/wiki/Elettaria_cardamomum.
2. ISIRI. 2013. Institute of Standards and Industrial Research of Iran. 1st.edition. 320-2.
3. Lorestani A. N. Rabani, R. H. and Khazaei, Y. 2012. Design and construction of an automatic coefficient of friction measuring device. Agric Eng Int: CIGR Journal, 14(1): 120－124
4. Lorestani, A.N. Jaliliantabar F. and Gholami R. 2012. Physical and mechanical properties of castor seed. QAS Journal. 4(5) e29-e32.
5. Mohsenin, N.N. 1986. Physical properties of Plant and Animal Materials. Second revised. Gordon and Breach Sci. Publ. New York.

Determination of engineering properties of green and white cardamom

Abstract

The first step in processing and harvesting operations of cardamom's fruit, is knowing of physical and mechanical properties of fruit for designing of postharvest machines and equipment. In this study some physical and mechanical properties of cardamom (green and white cultivars) such as dimensions, geometric mean diameter, surface area, mass, volume, Yong modulus, maximum force and maximum work that required for breaking of fruit were considered. The average values of dimensions, a, b, c for green cardamom respectively are equal to 17/06, 6/61, 6.10 mm and for white cardamom respectively are equal to 14/37, 7/62 and 7/31 mm. the average value of projected area, Pa, Pb, Pc, for green cardamom respectively are 33/743, 76/935, 81/169 mm^2 and for white cardamom respectively are 55/404, 89/451 and 95/650 mm^2. Yong modulus for green cardamom in 10 mm/min loading velocity is 0/218 GPa and for white cardamom is 0/175 GPa. Also the achieved maximum force for breaking of green cardamom is 35/53 N and Required work for that is 38/7 N.mm, that in compared with White cardamom the maximum force is 20/4 N and required word for that is 15/02 N.mm, is show higher values. This show that hardness of green cardamom is more than white cardamom and so for breaking of that we need applying higher force rather than white cardamom.

Keywords: physical and mechanical properties, Cardamom (Green, White)

پیوست

جدول ۱- پارامترهای فیزیکی اندازه گیری شده هل سبز

پارامتر	Mean	Min	Max	SD	CV(%)
a (mm) بعد	۱۷/۰۵٦	۱۳/٦۷	۲۱/۷۵	۱/۸۹	۱۱/۱۱
b (mm) بعد	٦/٦۱	٤/٦۲	۸/۱۲	۰/٦۲	۹/۳۸
c (mm) بعد	٦/۱	٤/۹۵	۷/۵٦	۰/۵۸	۹/٤۷
P_a (mm^2) سطح تصویر	۳۳/۷٤	۲۳/٦	٤۹/۳	٤/۹۸	۱٤/۷۵
P_b (mm^2) سطح تصویر	۷٦/۹۳	۵٦/۸	۱۱۵/۸	۱۲/۳۷	۱٦/۰۸
P_c (mm^2) سطح تصویر	۸۱/۱۷	۵۹/۲	۱۲۱/۹	۱۲/۵۷	۱۵/٤۸
وزن(g)	۰/۲۳	۰/۱۱	۰/٤۵	۰/۰٦۳	۲٦/۵۸

Mean: میانگین داده ها، Min: کمینه داده ها، Max: بیشینه داده ها، SD: انحراف معیار، CV: ضریب تغییرات

جدول ۲- پارامترهای فیزیکی اندازه گیری شده هل سفید

پارامتر	Mean	Min	Max	SD	CV(%)
a (mm) بعد	۱٤/۳۷	۹/٤۳	۱۹/۳۸	۱/۷۸	۱۲/۳٦
b (mm) بعد	۷/٦۲	۵	۹/۵۵	۰/۸٤	۱۱/۰۷
c (mm) بعد	۷/۳۱	٤/۸۵	۱۰/۷	۰/۹۷	۱۳
Pa (mm2) سطح تصویر	۵۵/٤	۳۱	۹۵/٤	۱۱/٦۱	۲۰/۹٦
Pb (mm2) سطح تصویر	۸۹/٤۵	۵۹/۳	۱۲۷/۷	۱۵/۰٤	۱٦/۸۲
Pc (mm2) سطح تصویر	۹۵/٦۵	٦۰/۸	۱۳۱	۱٤/۳۲	۱٤/۹۸
وزن (g)	۰/۱۳۵	۰/۰۵	۰/۲٦	۰/۰۵۱	۳۷/۵٤

جدول ۳- پارامترهای فیزیکی محاسبه شده و روابط آنها برای هل سبز

پارامتر	رابطه	Mean	Min	Max	SD	CV(%)
Dg (mm) قطر میانگین هندسی	Dg = (abc)1/3	۷/۷۹	۷/٤۷	۱۰/۵۵	۰/٦۳	۷/۱٤
φکرویت (%)	$\varphi = \frac{D_g}{a} \times 100$	۵۱/۹	٤۰/۰٦	٦۲/۷۵	٤/٤۹	۸/٦۵
S (mm^2) سطح رویه	$S = \pi D_g^2$	۲٤۳/۸۹	۱۷۵/۲۹	۳٤۹/۵	۳۵/۲٦	۱٤/٤٦
Da (mm) قطر میانگین حسابی	$Da = \frac{(a+b+c)}{3}$	۹/۹۲	۸/٤۱	۱۲/۱۳	۰/۷٦	۷/۷۱
CPA (mm^2) سطح معیار	$CPA = \frac{(P_a+P_b+P_c)}{3}$	٦۳/۹۵	٤۷/۸۷	۹۲/۸۷	۹/۳۵	۱٤/٦۲
R_a(%)نسبت ابعاد	$R_a = \frac{b}{a} \times 100$	۳۹/۲۲	۲٤/۸۹	۵٤/۲۱	۵/۳۳	۱٤/۱۱

جدول ٤- پارامترهای فیزیکی محاسبه شده و روابط آنها برای هل سفید

پارامتر	رابطه	Mean	Min	Max	SD	CV(%)
D_g (mm) قطر میانگین هندسی	$D_g = (abc)^{1/3}$	۹/۲۳	۷/۵٦	۱۱/۲٤	۰/۷۷	۸/۳۷
φکرویت (%)	$\varphi = \frac{D_g}{a} \times 100$	٦٤/۹۲	٤۸/٦۸	۸۳/۳	۷/۵۸	۱۱/٦۷
S (mm^2) سطح رویه	$S = \pi D_g^2$	۲٦۹/۳۹	۱۷۹/۵۳	۳۹٦/٦۵	٤۵/۳	۱٦/۸۲
D_a (mm) قطر میانگین حسابی	$D_a = \frac{(a+b+c)}{3}$	۹/۷۷	۷/۹٤	۱۱/۹۱	۰/۷۹	۸/۰۵
CPA (mm^2) سطح معیار	$CPA = \frac{(P_a+P_b+P_c)}{3}$	۸۰/۱۷	۵٦/۲	۱۱۱/۹	۱۲/۲٦	۱۵/۲۹
R_a(%)نسبت ابعاد	$R_a = \frac{b}{a} \times 100$	۵۳/۸۵	۳۲/۷۸	۷۵/٤۸	۸/۹۳	۱٦/۵۸

جدول ٥- ضریب و زاویه اصطکاک هل سبز روی سطوح مختلف

سطوح	سطح شیشه		سطح فلز		سطح چوب	
	ضریب اصطکاک	زاویه اصطکاک	ضریب اصطکاک	زاویه اصطکاک	ضریب اصطکاک	زاویه اصطکاک
Max	۱/۱۸	٤۹/٦	۰/٦۱	۳۱/٤۱	۰/۹	٤۲/۲
Min	۰/۳۳	۱۸/۷۳	۰/۳۸	۲۱/۲۸	۰/٥٤	۲۸/۸
Mean	۰/٦٤	۳۱/۸٥	۰/٥۱	۲۷/۰٥	۰/٦۸	۳٤/۲۱
SD	۰/۲٦	۹/۹۱	۰/۰۷٦	۳/٤٤	۰/۰۹۹	۳/۷۱
CV	٤۱/۲۲	۳۱/۱۱	۱٥/۰٤	۱۲/۷۱	۱٤/٤٥	۱۰/۸٤

جدول ٦- ضریب و زاویه اصطکاک هل سفید روی سطوح مختلف

سطوح	سطح شیشه		سطح فلز		سطح چوب	
	ضریب اصطکاک	زاویه اصطکاک	ضریب اصطکاک	زاویه اصطکاک	ضریب اصطکاک	زاویه اصطکاک
Max	۰/۷۹	۳۸/٥٤	۰/۷٦	۳۷/۳۱	۰/٦۸	۳٤/۳٦
Min	۰/۳۱	۱۷/۳۸	۰/۳٦	۲۰/۲۳	۰/٥۱	۲۷/۳٥
Mean	۰/٥۲	۲۷/۲٤	۰/٤۹	۲۷/۰۹	۰/٥۹	۳۰/۸
SD	۰/۱٤	٦/۳	۰/۱	٥/۰۳٥	۰/۰٤٤	۱/۹۱
CV%	۲۷/۷٤	۲۳/۱٤	۲۰/۳٤	۱۸/٥۸	۷/٥٥	٦/۲۱

جدول ۷- خواص مکانیکی هل سبز

آماره	h_(o) (mm)	E (Gpa)	F_{max} (N)	F break (N)	W to F_{max} (Nmm)	W to break (Nmm)
Max	۷/٤٦	۰/۳۷	۸۱/۵	۸۰/۵	۱٦٤/۹٤	۷۸/۹۵
Min	۵/۷۸	۰/۰۹۷	۱۰/۷	۱۳/٤	٤/۰۲	٤/۱۵
Mean	٦/٤۷	۰/۲۲	۳۵/۵۳	۳۵/۳۲	۳۸/۷	۲۳/۲٦
SD	۰/٤٦	۰/۱۱	۱۹/۱۱	۱۸/٦۹	٤۷/۲	۲۲/۲۸
CV%	۷/۱۵	۵۰/۵٤	۵۳/۷۸	۵۲/۹۳	۱۲۱/۹۷	۹۵/۷۷

E: مدول الاستیسیته، Fmax: نیروی بیشینه، Fbreak: نیروی شکست، W to Fmax: کار تا نیروی ماکزیمم و W to break: کار تا شکست

جدول ۸- خواص مکانیکی هل سفید

	آماره	h_(o) (mm)	E (Gpa)	F_{max} (N)	F break (N)	W to F_{max} (Nmm)	W to break (Nmm)
Max		۹/٤۵	۰/۲٤	۲۸/۷	۲۱/۷	۷۳/۷٤	۳۱/٦۷
Min		۵/٦۷	۰/۰٦۵	۱۰/۳	۸/۱۲	۱/۸۵	۱/۹۷
Mean		۷/۵٦	۰/۱۷۵	۲۰/٤	۱٦/٤۸	۱۵/۰۲	۱۰/۷۲
SD		۱/۰۳۸	۰/۰۵٤	٦/۰۵	٤/۳۱	۱۸/٦	۸/۱۸
CV%		۱۳/۷۳	۳۰/۷۷	۲۹/٦۷	۲٦/۱۵	۱۲۳/۸۲	۷٦/۳۵