

مقایسه عملکرد تکاننده‌های مکانیکی در فرآیند برداشت میوه، با بکارگیری

نیروهای ثابت و نیروهای متناسب با فرکانس تحریک

محمد همائی^۱، بهزاد محمدی السنتی^{۲*}

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بناب

۲ استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بناب

*behzad.alasti@gmail.com

دریافت: ۹۱/۰۶/۲۵ پذیرش: ۹۲/۱۰/۰۵

چکیده

هدف این تحقیق، مقایسه عملکرد تکاننده‌ی مکانیکی در بکارگیری دو نیروی هارمونیک با دامنه‌ی ثابت و نیروی هارمونیک با دامنه‌ی متناسب با فرکانس تحریک، هنگام فرآیند برداشت میوه‌ی درختان است. تست‌های کشش استاتیکی و کشش-رها سازی بر روی درخت نمونه (Sample Tree)، زیتون انجام شده و خصوصیات الاستیک و ویسکوالاستیک آن بدست آورده شده است. سپس درخت در یک مدل‌سازی ریاضی توسط جرم و فنر، به شکل سیستمی با چند درجه آزادی مدل شده و درجه‌ی آزادی آن بسته به سن درخت، در نظر گرفته شده است. درخت زیتون میوه خود را در شاخه سال قبل تولید می‌کند لذا در این تحقیق درجات آزادی درخت مدل شده، یک واحد بیشتر از سن درخت در نظر گرفته شده است. معادلات دیفرانسیل حاکم بر این مدل‌سازی، از قانون دوم نیوتن بدست آورده شده و برای حل آن‌ها، از روش عددی توسط نرم‌افزار مطلب استفاده شده است. نمودارهای ارائه شده نشان می‌دهد که هنگام ارتعاش درخت زیتون با تکاننده‌ی مجهز به هر دو نیرو، مقدار تنش ایجاد شده در گره‌های اتصال میوه-دم میوه از مقدار تنش ایجاد شده در گره‌های اتصال دم میوه-شاخه‌ها بیشتر است. بنابراین انتظار می‌رود که در صورت یکسان بودن مقاومت هر دو نقطه‌ی اتصال دم میوه، میوه‌ها بدون دم میوه از درخت جدا شوند.

واژگان کلیدی: تکاننده اینرسی، پاسخ فرکانسی، (FPA)، (CFA) و درخت زیتون.

۱- مقدمه

نیست. صفدری و همکاران (۲۰۱۰) بیان کردند هزینه برداشت میوه یکی از عوامل عمده، در تعیین یک فصل موفق از لحاظ اقتصادی برای تولیدکنندگان آن می‌باشد. همچنین هزینه برداشت دستی میوه ۳۰٪ تا ۶۰٪ مجموع هزینه‌های

برداشت دستی میوه کاری طاقت‌فرسا، زمان‌بر و پرهزینه است. موفقیت در برداشت خیلی از آجیلیان و میوه‌ها در مقیاس بزرگ، بدون استفاده از روش‌های مکانیزه، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه

برداشت برای باغداران است (Altisent & Canavate, 1999). لذا امروزه برداشت میوه‌ها به صورت مکانیزه، امری قابل قبول برای تولیدکنندگان میوه است. پارامس واراگومار و گوپتا طی تحقیقات خود بیان نمودند که متداول‌ترین روش‌های مکانیزه مورد استفاده در برداشت میوه، شامل جداسازی تماسی و جداسازی توده‌ای است. جداسازی توده‌ای با لرزش شاخه و لرزش برگ‌ها و یا ترکیبی از هر دو آن‌ها، با استفاده از دمیدن هوا می‌باشد (Parameswarakumar & Gupta, 1991). در برداشت توده‌ای میوه، همه‌ی میوه‌ی درخت یا بخشی از آن برداشت می‌شود و در برداشت تماسی چندین میوه به طور همزمان برداشت می‌شوند اگر چندین جداکننده با هم استفاده شود (Schertz & Brown, 1968). وسایلی که در برداشت میوه با مکانیزم جداسازی توده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل تکاننده‌های تنه‌ای و تکاننده‌های شاخه‌ای (تکاننده‌های اینرسی) است (Brown, 2002). متداول‌ترین نوع ماشین‌های مکانیزه‌ی برداشت میوه، تکاننده‌های اینرسی^۱ هستند که با داشتن مکانیزمی خاص، نیروی اینرسی تولید می‌کنند و با اعمال این نیرو به تنه یا شاخه‌ی درخت، سبب جداسازی میوه می‌شوند. قاعده حاکم در استفاده از این تکاننده‌ها، بحث شتاب هر کدام از میوه‌ها است تا اینکه نیروی اینرسی آن‌ها بیشتر از

نیروی پیوندشان به شاخه‌ی درخت شود (Kepner et al, 1987). آدریان و فریدلی تئوری ارتعاش اصلی و ضوابط و ملاک‌های اساسی تکاننده‌های اینرسی را ارائه کردند و بیان کردند برداشت میوه با تکاننده‌های تنه‌ای و شاخه‌ای بسیار امید بخش و نوید دهنده است (Adrian & Fridley, 1965). همچنین سسیز و اوزجاندر تحقیقات خود تاکید کردند که فرکانس، دامنه، عمل لرزاندن، اندازه میوه و نیروی برداشت میوه (FDF)^۲ از عوامل مهم در برداشت مکانیکی هستند. برای طراحی مناسب این تکاننده‌ها و همچنین برداشت حداکثر میوه از روی درختان، نیاز به داشتن دانش گسترده‌ای در زمینه‌ی آنالیز پاسخ دینامیکی درختان در مقابل نیروهای ارتعاشی تکاننده است. آنالیز ارتعاشی تکاننده‌ها و درختان میوه، می‌تواند نقش مهمی در برداشت بهینه میوه، کاهش آسیب تکاننده به درخت و همچنین کاهش هزینه‌های آزمایش‌های عملی چنین تحقیقاتی شود (Sessiz & Ozcan, 2005). اسپارتز بیان نمود که اولین مدل درخت آنالیز شده، تیر عمودی ساده‌ی گرین‌هیلدر سال ۱۸۸۱ میلادی بود که در اصل برای آنالیز استاتیکی به کار برده شد تا مقدار ارتفاع یک درخت را تحت نیروی وزن آن مشخص نماید (محدودیت ارتفاع درخت را مشخص کند) (Spatz, 2000). پژوهشگران در

^۲Fruit Detachment Force

^۱Inertia Shakers

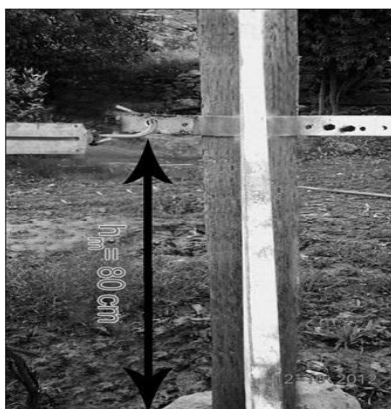
می‌باشد. همچنین ناحیه مناسب فرکانس تکاننده در هر دو مورد نیرو بررسی می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

جهت بدست آوردن پاسخ دینامیکی درخت در فرآیند برداشت میوه، خصوصیات الاستیک و ویسکو الاستیک آن بدست آورده می‌شود. تست‌های کشش استاتیکی و کشش-رها سازی به منظور تعیین این خصوصیات، روی تنه‌ی درخت زیتون انجام می‌شود. سپس این دیتاها در یک مدل ریاضی، برای آنالیز رفتار دینامیکی درخت زیتون به کار برده می‌شود.

۲-۱- آنالیز استاتیکی (تست کشش درخت)

شکل (۱) تست کشش استاتیکی را روی درخت زیتون نشان می‌دهد.



شکل ۱: تست کشش استاتیکی روی درخت زیتون

Figure 1: Static pull test on olive tree

نیروسنج در ارتفاع هشتاد سانتی‌متری سطح زمین (ارتفاع بستن تکاننده اینرسی روی درخت) به

تحقیقات اخیر خود در دینامیک درختان، مدل‌هایی را توسعه دادند که اهمیت نحوه اتصال شاخه‌ها به همدیگر در یک درخت را نشان می‌دهد (Sellier, & Fourcaud, 2009).

در حالت کلی مدل ریاضی که برای تشریح نحوه اتصال شاخه‌های درخت به همدیگر، مورد استفاده قرار گرفت بر اساس نظریه فرکتال بیان شده است (Fleurant et al., 2004).

بر اساس این نظریه، درخت را می‌توان به عنوان سیستمی با چند درجه آزادی (MDOF) مدل کرد که این امر منجر به وارد نمودن فاکتورهای میرایی شاخه‌ها در آنالیز سیستم شود و آنالیز درخت به واقعیت نزدیک‌تر خواهد شود. هزینه بالای آزمایشات عملی یکی از مشکلات اساسی برای بهینه‌سازی تکاننده‌ها است. از اینرو در این مقاله با استفاده از آنالیز ارتعاشی درخت نمونه‌ی زیتون، میوه و شاخه‌های آن به صورت یک سیستم گسسته ارتعاشی (سیستم جرم و فنر بصورت چند درجه آزادی) که تحت تحریک هارمونیک قرار گرفته است، مدل شده و پاسخ فرکانسی میوه و شاخه‌های درخت زیتون به منظور یافتن فرکانس تحریک مناسب تکاننده محاسبه شده است. هدف این کار مقایسه و ارزیابی اثر به‌کارگیری نیروی متناسب با فرکانس تحریک (FPA) و نیروی تحریک ثابت (CFA) در تکاننده اینرسی، روی دامنه جابجایی میوه و تنه درخت زیتون در فرآیند برداشت

تنه درخت بسته شده و تنه‌ی درخت با سه نیروی مکان استاتیکی آن نسبت به نیروهای اعمالی، در افقی (۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۴۰ نیوتن) کشیده می‌شود. مقدار جابجایی تنه (Δx) نسبت به شاخص در هر نیرو ثبت می‌شود (جدول ۱).

در این تست تنه به عنوان یک فنر الاستیک تابع قانون هوک در نظر گرفته می‌شود و تغییر

جدول ۱: نتایج تست کشش استاتیکی درختان زیتون با سن‌های مختلف

Table 1: Results of static pull test

سن درخت	نیرو (N)	تغییر شکل تنه درخت (m)	ضریب سفتی تنه درخت (N/m)
برای درخت ۵ ساله	100	0.016	6250
	120	0.019	6315.789
	140	0.022	6363.636
برای درخت ۶ ساله	100	0.015	6666.667
	120	0.018	6666.667
	140	0.021	6666.667
برای درخت ۷ ساله	100	0.015	6666.667
	120	0.017	7058.824
	140	0.02	7000

به منظور تعیین ارتباط میان ضریب سفتی و مدول الاستیسیته‌ی تنه و شاخه‌های درخت (E)، تنه و شاخه‌ها به عنوان تیر یکسر درگیر در نظر گرفته می‌شوند که در انتهای آزاد آن‌ها نیروی متمرکزی قرار داده می‌شود. مقدار جابجایی این تیر (δ) در اثر اعمال نیروی متمرکز (P) به صورت $\delta = PL^3/3EI$ نوشته می‌شود. ممان اینرسی تنه و شاخه‌ها با سطح مقطع دایره، از رابطه‌ی

$$k_{eq} = \frac{3\pi ED^4}{64L^3} \quad (1)$$

خصوصیت دینامیکی نامرئی درخت، از راه آزمایش و تجربی اقدام می‌شود (Chopra, 1995). در این مطالعه، برای تعیین میرایی درخت، از روش آنالیز ارتعاشات آزاد که با نام تست کشش-رها سازی شناخته شده است استفاده می‌شود. برای انجام این تست، تنه‌ی درخت توسط یک نیروسنج به یک سمت کشیده شده (مقدار نیروی معین) و در این وضعیت نگهداری و سپس تنه به طور ناگهانی رها شد.

درخت بدون هیچگونه دخالت نیروی خارجی، شروع به حرکت نوسانی به شکل، رفت و برگشتی نمود. مقدار جابجایی تنه و میوه نسبت به شاخص، در هر رفت و برگشت ثبت شد جداول (۲،۳). سپس با استفاده از روش کاهش لگاریتمی که بیانگر لگاریتم طبیعی نسبت دو دامنه متوالی دلخواه است (S.Rao, 2007)

$$= \ln \frac{x_1}{x_2} \times \frac{2\pi\xi}{\sqrt{(1-\xi^2)}} \delta$$

و همچنین با یادآوری رابطه‌ی

$$\xi = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{(2\sqrt{km})}$$

نسبت میرایی ویسکوز آن‌ها از رابطه ۳ محاسبه

شد:

$$\begin{cases} C_{Fruit} = 2\xi_{Fruit}\sqrt{M_{Fruit} \times K_{Fruit}} \\ C_{Trunk} = 2\xi_{Trunk}\sqrt{M_{Trunk} \times K_{Trunk}} \end{cases} \quad (3)$$

K_{eq} ضریب سفتی معادل تنه یا شاخه‌ها، بر حسب نیوتن بر متر (N/m) است، E مدول الاستیسیته تنه یا شاخه‌ها بر حسب نیوتن بر مترمربع (N/m^2) است، D قطر تنه یا شاخه‌ها بر حسب متر (m) است و L طول تنه یا شاخه‌ها بر حسب متر (m) است. از طرفی ارتباط میان ضرایب سفتی شاخه‌های متوالی در یک درخت، از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{K_n}{K_{n+1}} = \left(\frac{E_n}{E_{n+1}}\right)\left(\frac{D_n}{D_{n+1}}\right)^4\left(\frac{L_{n+1}}{L_n}\right)^3 \quad (2)$$

ضریب سفتی تنه و شاخه‌های متوالی در یک درخت، با توان چهارم نسبت قطر و نسبت مدول الاستیسیته آن‌ها رابطه مستقیم و با توان سوم نسبت طول آن‌ها رابطه معکوس دارد.

۲-۲- آنالیز دینامیکی (تست کشش - رها سازی)

هدف اصلی آنالیز دینامیکی پیدا کردن خصوصیات دینامیکی یک درخت است که این خصوصیات شامل فرکانس طبیعی (ω_n or f_n)، میرایی (c) و نسبت میرایی (ξ) است. میرایی در درختان اغلب پیچیده می‌باشد و معمولاً آن به شکل تحلیلی امکان‌پذیر نیست بنابراین برای تعیین این

جدول ۲: نتایج تست کشش و رهاسازی تنه درختان زیتون با سینه‌های مختلف

Table 2: Results of free vibration test for olive trunk

سن درخت	نیرو (N)	x_1 (mm)	x_2 (mm)	$\delta_{Trunk} = \ln x_1/x_2$
برای درخت ۵ ساله	100	3	1	1.098612289
	120	4	2	0.693147181
	140	5	2.2	0.820980552
برای درخت ۶ ساله	100	3	1	1.098612289
	120	4	2	0.693147181
	140	5	2.2	0.820980552
برای درخت ۷ ساله	100	3	1	1.098612289
	120	4	2	0.693147181
	140	5	2.2	0.820980552

جدول ۳: نتایج تست کشش و رهاسازی میوه‌ی درخت زیتون

Table 3: Results of free vibration test for olive fruit

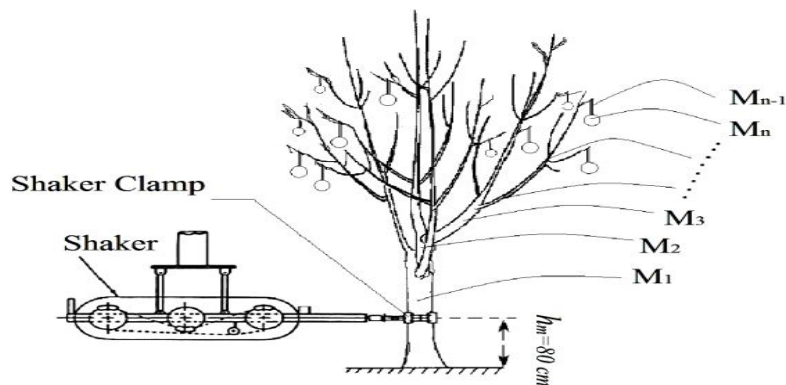
نیرو (N)	x_1 (mm)	x_2 (mm)	$\delta_{Trunk} = \ln x_1/x_2$
100	5.5	5	0.09531018
120	5	4.5	0.10536052
140	6	5	0.18232156

۲-۳-مدل‌سازی ریاضی

مدل‌سازی ریاضی درخت هنگام برداشت، از سیستم جرم و فنر با چند درجه آزادی (MDOF) استفاده می‌شود همانگونه که در شکل (۳) نشان داده شده است. با استفاده از قانون دوم نیوتن معادلات دیفرانسیل خطی حاکم بر سیستم درخت مدل شده، به شکل زیر نوشته می‌شوند:

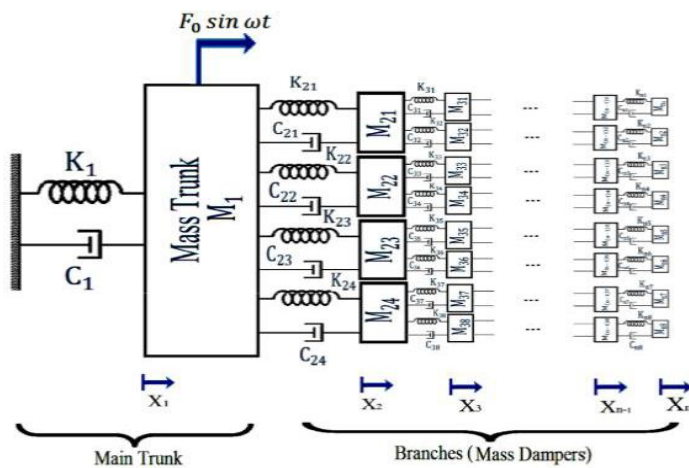
شکل (۲)، درخت میوه‌ای را نشان می‌دهد که یک تکاننده اینرسی با مکانیزم جرم‌های نامتعادل به تنه‌ی آن متصل شده است. تکاننده با نیروی تحریک هارمونیک تنه‌ی درخت را می‌لرزاند. جرم‌های معادل تنه، شاخه و میوه به ترتیب با M_1, M_2, \dots, M_n نشان داده شده‌اند. برای آنالیز و

$$\left\{ \begin{array}{l} M_1 \ddot{x}_1 - k_1 x_1 - Sk_2(x_1 - x_2) - c_1 \dot{x}_1 - \\ \quad Sc_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + F_0 \sin \omega t = 0 \\ SM_2 \ddot{x}_2 + Sk_2(x_1 - x_2) - Zk_3(x_2 - x_3) + \\ \quad Sc_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - Zc_3(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) = 0 \\ \quad \vdots \\ GM_{n-1} \ddot{x}_{n-1} + Gk_{n-1}(x_{n-2} - x_{n-1}) - Gk_n(x_{n-1} - x_n) + \\ \quad Gc_{n-1}(\dot{x}_{n-2} - \dot{x}_{n-1}) - Gc_n(\dot{x}_{n-1} - \dot{x}_n) = 0 \\ GM_n \ddot{x}_n + Gk_n(x_{n-1} - x_n) + Gc_n(\dot{x}_{n-1} - \dot{x}_n) = 0 \end{array} \right. \quad (4)$$



شکل ۲: نمای شماتیک درخت میوه مدل‌سازی شده با تکاننده‌ی اینرسی هنگام برداشت

Figure 2: A schematic view of the fruit tree with trunk shaker



شکل ۳: نمای مدل‌سازی شده‌ی درخت میوه با سیستم جرم و فنر همراه با تکاننده

Figure 3: A schematic view of the mass-spring system for the fruit tree

مناسب‌ترین شیوه برای بیان معادلات دیفرانسیل و تشریح پاسخ فرکانسی یک سیستم با چند درجه آزادی (MDOF)، بکارگیری نمایش ماتریسی عناصر یک سیستم نوسانی است. بنابراین معادلات بالا به صورت ماتریسی، به شکل زیر نوشته می‌شوند:

در رابطه بالا، $[M]$ ، $[c]$ و $[k]$ ، به ترتیب ماتریس اینرسی بر حسب کیلوگرم (kg)، ماتریس میرایی بر حسب نیوتن ثانیه بر متر ($N.s/m$) و ماتریس سفتی بر حسب نیوتن بر متر (N/m) هستند که این ماتریس‌ها به شکل زیر نوشته می‌شوند:

$$[M]\ddot{\vec{x}} + [c]\dot{\vec{x}} + [k]\vec{x} = \vec{F} \quad (5)$$

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & SM_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & ZM_3 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & & & \ddots & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & GM_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & GM_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

که S, Y, Z, \dots و G بترتیب تعداد شاخه‌ها در هر سطح از درخت هستند. از طرفی متغیرهای \vec{x} بردار \vec{F} به ترتیب، بردار تغییر مکان بر حسب متر (m) بردار

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + Sc_2 & -Sc_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -Sc_2 & Sc_2 + Zc_3 & -Zc_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -Zc_3 & Zc_3 + Yc_4 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & & & \ddots & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & Gc_{n-1} + Gc_n & -Gc_n \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -Gc_n & Gc_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

و

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + Sk_2 & -Sk_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -Sk_2 & Sk_2 + Zk_3 & -Zk_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -Zk_3 & Zk_3 + Yk_4 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & & & \ddots & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & Gk_{n-1} + Gk_n & -Gk_n \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -Gk_n & Gk_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

۲-۴- تعیین توان مصرفی تکاننده تنه‌ای

معادله دیفرانسیل حرکت درخت، تحت ارتعاش تکاننده با بکارگیری نیروی FPA ، به صورت زیر نوشته می‌شود:

(۱۱)

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = \frac{mr\omega^2}{M_t} \sin \omega t$$

\dot{x} شتاب سیستم بر حسب متر بر ثانیه (m/s^2) ، است، ξ نسبت میرایی ویسکوز است، ω_n فرکانس طبیعی سیستم بر حسب رادیان بر ثانیه (rad/s) است، \dot{x} سرعت سیستم بر حسب متر بر ثانیه (m/s) است، x جابجایی افقی سیستم بر حسب متر (m) است، M_t مجموع جرم‌های سیستم بر حسب کیلوگرم (kg) است. M_t شامل مجموع جرم بدنه تکاننده (M) ، مجموع جرم‌های آنبالانسی (m) و جرم معادل تنه درخت (M_m) بر حسب کیلوگرم (kg) است:

$$M_t = M + m + M_m \quad (12)$$

حل خصوصی معادله (۱۱)، که ارتعاشات پایدار سیستم را بیان می‌کند به صورت زیر نوشته می‌شود:

(۱۳)

$$x(t) = \frac{mr\omega^2}{M_t} \frac{1}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2\omega_n^2\omega^2}} \sin \omega t$$

سرعت بر حسب متر بر ثانیه (m/s) ، بردار شتاب بر حسب متر بر مجذور ثانیه (m/s^2) و بردار نیرو بر حسب نیوتن (N) هستند:

(۹)

$$\vec{x} = \{x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_n(t)\}^T$$

$$\vec{F}_{FPA} = \{mr\omega^2 \ 0 \ \dots \ 0\}^T \sin \omega t$$

$$\vec{F}_{CFA} = \{f_0 \ 0 \ \dots \ 0\}^T \sin \omega t$$

m مجموع جرم‌های آنبالانسی تکاننده بر حسب کیلوگرم (kg) است، r شعاع خارج از مرکز جرم آنبالانسی بر حسب متر (m) است، ω فرکانس تحریک تکاننده بر حسب رادیان بر ثانیه (rad/s) است، t زمان بر حسب ثانیه (s) می‌باشد و f_0 مقدار نیروی تحریک ثابت بر حسب نیوتن (N) است.

پاسخ فرکانسی سیستم:

پاسخ فرکانسی سیستم درخت با چند درجه آزادی (MDOF)، با استفاده از روش ماتریسی به شکل زیر بدست آورده می‌شود:

(۱۰)

$$[A] = [-\omega^2[m] + i\omega[c] + [k]]^{-1}[F]$$

که ماتریس $[A]$ ، حرکت خطی هر کدام از اعضای سیستم درخت را نشان می‌دهد. در این مطالعه برای حل این معادله، از نرم‌افزار مطلب (حل عددی) استفاده می‌شود.

این رابطه بیان می‌کند که نیروی لازم برای تکاننده‌ای که با نیروی تحریک ثابت *CFA* کار می‌کند تابعی از ضرب سه عامل جرم آنبالانسی، شعاع خارج از مرکز جرم آنبالانسی و مجذور فرکانس نیروهای متناسب با فرکانس تحریک *FPA* در حالت به‌کارگیری این نیرو است.

۳- نتایج و بحث:

جیمز (۲۰۱۰) در تحقیق خود بیان نمود دامنه و سطح زیر نمودار پاسخ فرکانسی، انرژی انتقال یافته در یک نوسان را نشان می‌دهد (James, 2010). بیشترین انرژی در مد اول اتفاق می‌افتد. همچنین خیریه و همکاران (۱۹۹۸) از طرفی با افزایش دامنه نوسان و یا فرکانس نوسان، ریزش میوه افزایش می‌یابد ولی افزایش دامنه نوسان تاثیر بیشتری بر درصد ریزش میوه دارد.

به منظور مقایسه و ارزیابی اثر به‌کارگیری نیروهای *FPA* و *CFA* در تکاننده اینرسی روی دامنه جابجایی تنه و میوه، تنش میوه-دم‌میوه، تنش دم‌میوه-شاخه ماقبل و تعیین فرکانس مطلوب کاری تکاننده، مشخصات تکاننده تنه‌ای مورد استفاده توسط پوراس و همکاران بکار گرفته شده است که مشخصات این تکاننده در جدول (۴) آورده شده است (Porras et al., 1996).

از طرفی معادله دیفرانسیل حرکت درخت، تحت ارتعاش تکاننده با بکارگیری نیروی *CFA*، به صورت زیر نوشته می‌شود:

(۱۴)

$$x(t) =$$

$$\frac{f_0}{M_t} \frac{1}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2 \omega_n^2 \omega^2}} \sin \omega t$$

جهت مقایسه عملکرد تکاننده‌ی مکانیکی در بکارگیری نیروهای ثابت و متناسب با فرکانس تحریک، هنگام فرآیند برداشت میوه، در ابتدا توان مصرفی تکاننده در هر دو نیرو، یکسان در نظر گرفته می‌شود. توان مصرفی تکاننده در هر دو نیرو به صورت زیر نوشته می‌شود (در یک پریود):

$$P = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{T=\frac{2\pi}{\omega}} F \dot{x} dt \quad (15)$$

P توان سیستم بر حسب وات (W) است. با مساوی قرار دادن توان تکاننده‌ها در هر دو نیروی کاربردی و انتگرال گرفتن از طرفین، رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$f_0 = mr\omega^2 \quad (16)$$

جدول ۴: خصوصیات تکاندهی تنه‌ای به کار گرفته شده برای برداشت درخت زیتون (Porras et al., 1996)

Table 4: Properties of trunk shaker for olive harvesting (Porras et al., 1996)

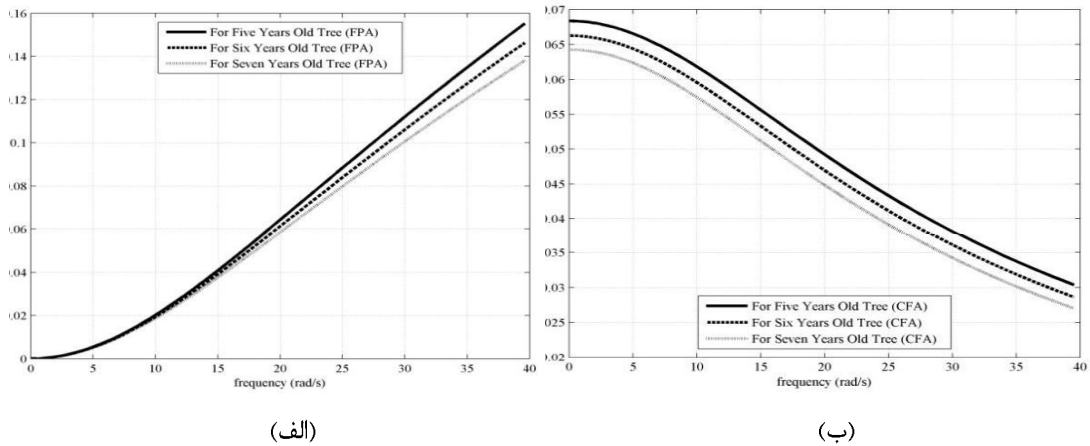
نوع تکاننده	قطر جرم‌های خارج از مرکز (m)	جرم تکاننده (kg)	مجموع جرم‌های (kg)
	نامتعادل		نامتعادل
تکاننده تنه	0.075	270	75

میوه درخت زیتون، روی شاخه سال قبل تولید می‌شود. از طرفی در این مطالعه، میوه زیتون به صورت سیستمی با دو درجه آزادی در نظر گرفته شده است که شامل دم‌میوه و مرکز ثقل میوه است (پاندول ساده). بنابراین درجه آزادی مطرح شده در این مطالعه، یک واحد بیشتر از سن درخت است. شکل (۴) دامنه‌ی جابجایی تنه‌ی درختان زیتونی را نشان می‌دهد که توسط تکاننده با نیروهای *FPA* و *CFA* لرزانده شده‌اند. همانگونه که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، با افزایش فرکانس تحریک، دامنه‌ی جابجایی تنه‌ی درختانی که با نیروی *FPA* لرزانده می‌شود، در حال افزایش و مقدار آن در درختانی که با نیروی *CFA* لرزانده می‌شود در حال کاهش است. شکل (۵)، پاسخ فرکانسی میوه‌ی درختان زیتون با سن‌های مختلف را نشان می‌دهد که توسط تکاننده با نیروی *FPA* و *CFA*، لرزانده شده‌اند. در هر دو نیرو، ماکزیمم دامنه‌ی جابجایی میوه برای درختان پیرتر، دارای مقادیر کمتری است. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود، در ناحیه ماقبل ناحیه تشدید

(*Stiffness Dominated*)، سطح زیر نمودار پاسخ فرکانسی درختانی که با نیروی *CFA* برداشت می‌شود نسبت به درختانی که با نیروی *FPA* برداشت می‌شوند، دارای مقدار بیشتری است. سطح زیر نمودار پاسخ فرکانسی ناحیه‌ی تشدید (*Damping Dominated*) و ناحیه‌ی مابعد آن (*Inertia Dominated*) در درختانی که با نیروی *FPA* برداشت می‌شوند در مقایسه با درختانی که با نیروی *CFA* برداشت می‌شوند، دارای مقدار بیشتری است. شکل (۶) تنش در تنه‌ی درختان زیتون را نشان می‌دهد. همانگونه که شکل‌ها نشان می‌دهند، با افزایش فرکانس تحریک، تنش در تنه‌ی درختانی که با نیروی *FPA* برداشت شده‌اند دارای روند صعودی است در حالیکه تنش تنه‌ی درختانی که با نیروی *CFA* برداشت شده‌اند دارای روند نزولی است. شکل (۷) تنش در نقاط اتصال میوه-دم‌میوه^۱ و دم‌میوه شاخه ماقبل در درختان زیتون را نشان می‌دهد. تنش این نقاط اتصال، در ناحیه ماقبل ناحیه تشدید (*Stiffness Dominated*) برای درختانی که با نیروی *CFA* برداشت می‌شوند

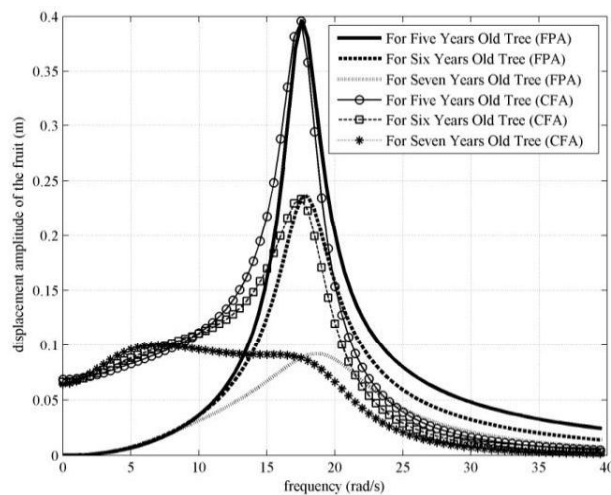
¹Pedicle

نسبت به درختانی که با نیروی FPA برداشت می‌شوند در مقایسه با درختانی که با نیروی CFA برداشت می‌شوند، دارای مقادیر بیشتری است. در ناحیه‌ی تشدید (*Damping Dominated*) و ناحیه‌ی مابعد آن (*Inertia Dominated*) تنش آن‌ها برای درختانی که با نیروی FPA برداشت می‌شوند در مقایسه با درختانی که با نیروی CFA برداشت می‌شوند، دارای مقدار بیشتری است.



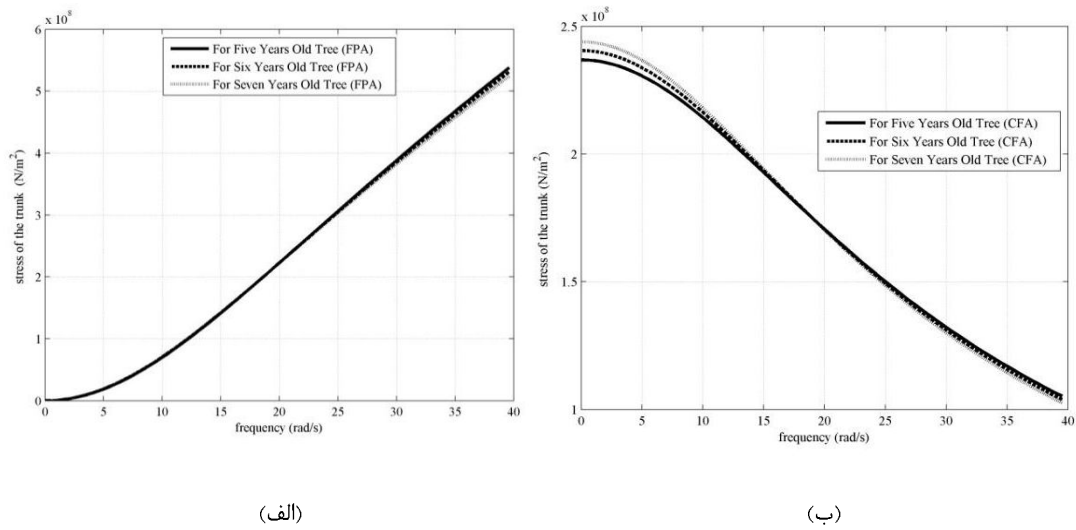
شکل ۴: مقایسه پاسخ فرکانسی تنه‌ی درختان زیتون، (الف) پاسخ فرکانسی تنه با نیروی تحریک (FPA)، (ب) پاسخ فرکانسی با نیروی تحریک (CFA)

Figure 4. Comparison of frequency response of the trunk, (a) frequency response of the trunk with FPA excited force and (b) frequency response of the trunk with CFA excited forces



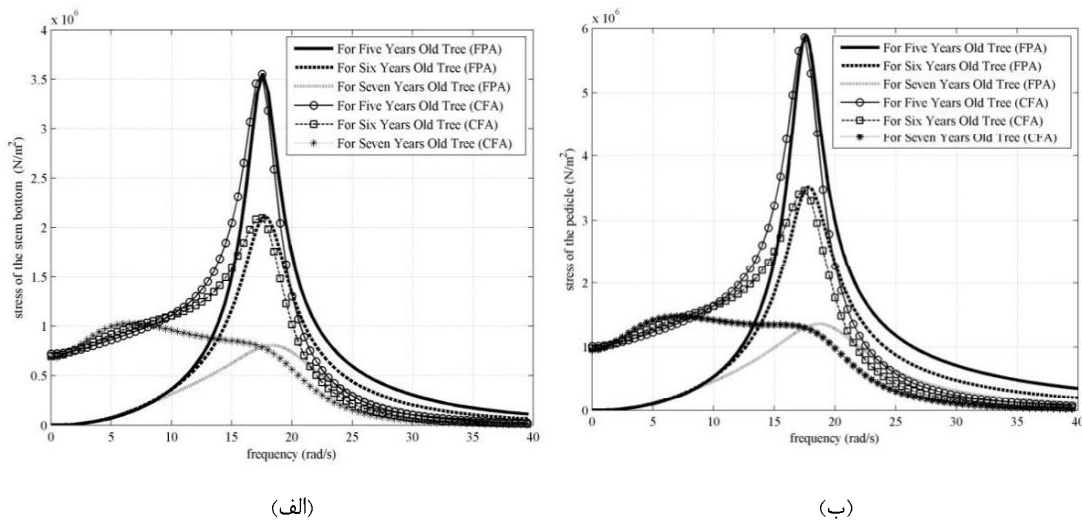
شکل ۵: مقایسه پاسخ فرکانسی میوه با نیروهای تحریک (FPA) و (CFA)

Figure 5. Comparison of frequency response of the fruit with FPA and CFA excited forces



شکل ۶: (الف) تنش تنه با نیروی تحریک *FPA*، (ب) تنش تنه با نیروی تحریک *CFA*

Figure 6: (a) Stress of the trunk with FPA excited force; (b) Stress of the trunk with CFA excited force



شکل ۷: (الف) تنش دم میوه-شاخه مقابل با دو نیروی تحریک *FPA* و *CFA* و (ب) تنش میوه-دم میوه با دو نیروی تحریک *FPA* و *CFA*

Figure 7: (a) Stress of stem bottom with CFA and FPA excited forces and (b) Stress of pedicle with CFA and FPA excited forces

۴- نتیجه گیری

میوهی درختان زیتون را برداشت می‌کند، در ناحیه مقابل ناحیه تشدید، موجب بیشترین دامنه جابجایی میوهی درختان می‌شود که به تبع آن تنش‌های نقاط اتصال میوه-دم میوه و دم میوه-شاخه

آنالیز رفتار دینامیکی درخت زیتون هنگام برداشت توسط تکاننده اینرسی، با دو نیروی *FPA* و *CFA* نشان داد، تکاننده‌ای که با نیروی *CFA*

مقابل آن نیز، دارای مقدار ماکزیمم نسبت به نیروی کاربردی *FPA* برای تکاننده در این ناحیه باشد. بنابراین احتمال ریزش میوه در این ناحیه، توسط تکاننده‌ای با نیروی تحریک *CFA* در مقایسه با نیروی تحریک *FPA* بیشتر است. از سوی دیگر تکاننده با نیروی *FPA* در ناحیه تشدید و ناحیه مابعد آن، دارای عملکرد بهتری نسبت به نیروی *CFA* در موارد ذکر شده است. با افزایش فرکانس تحریک، دامنه جابجایی تنه‌ی درختان زیتونی که با نیروی *CFA* لرزانده شد، کاهش یافت که این امر می‌تواند درخت را در برابر آسیب شکستگی محافظت نماید. از طرفی با افزایش فرکانس تحریک، دامنه‌ی جابجایی تنه‌ی درختان زیتونی که با نیروی *FPA* لرزانده شدند افزایش یافت که این امر می‌تواند موجب آسیب جدی به درخت شود. همچنین در برداشت درخت زیتون با دو نیروی *FPA* و *CFA*، مقدار تنش ایجاد شده در گره اتصال میوه-دم‌میوه از مقدار تنش ایجاد شده در گره اتصال دم‌میوه-شاخه ماقبل بیشتر بود. بنابراین انتظار می‌رود که در صورت یکسان بودن مقاومت هر دو نقطه‌ی اتصال، میوه‌ها بدون دم‌میوه از درخت جدا شوند.

۵- فهرست منابع

1. Aderian, PA. and Fridley, RB. 1965. Dynamics and Design Criteria of Inertia-Type Tree Shaker. **Trans. of the ASAE**, 8(1): 12-14.
2. Altisent, M.R. and Canavate, J.O. 1999. Fruits and Vegetables in CIGR **Handbook of Agricultural Engineering. Vol III: Plant**
3. Brown, G.K. 2002. Mechanical Harvesting Systems for the Florida Citrus Juice Industry. **ASAE Paper No. 02 – 1108, ASAE, St. Joseph, MI 49052**
4. Chopra, A.K. 1995. Dynamics of structures. **Prentice Hall**.
5. Fleurant, C., Duchesne, J. and Raimbault, P. 2004. An allometric model for trees. **Journal of Theoretical Biology**, 227: 137-147.
6. James, K.R. 2010. A dynamic structural analysis of trees subject to wind loading. **Australia, Melbourne. Melbourne School of Land and Environments. The University of Melbourne**.
7. Kepner, RA., Bainer, R. and Barger, EL. 1987. Farm Machinery, CBS Publisher and Distributors, **Daya Basti, Delhi**.
8. Khirieh, M.o., Maharlouei, Mo.M. and Kamgar, S. 1998. Design, construction and evaluation of a limb shaker tractor propelled floating arm for harvesting apple tree. **Fifth Congress of Agricultural Machinery Engineering. Firdausi University, Mashhad. Article code (192)**.

9. Parameswarakumar, M. and Gupta, CP. 1991. Design parameters for vibratory mango harvesting system. **Tran. ASAE**, 34(1): 14-20.
10. Porras, P. A., Barasona, M. G., Abenza, C. J., Porras, S. A. And Barasona, V. M. L. 1996. Advances about the development of a new multi directional vibrator for olive trees. **International Conference on Ag. Eng. Madrid. Production Engineering, American Society of Agricultural Engineers**. pp409.
11. S.Rao, S., 2007. Vibration of continuous systems. **Department of Mechanical and Aerospace Engineering University of Miami Coral Gables, Florida**.
12. Safdari, A., Ghassemzadeh, H.R., Abdollahpour, SH. A. and Ghafari, H. 2010. Design construction and evaluation of a portable limb shaker for almond tree. **AJAE** 1(5):179-183.
13. Schertz, CE. and Brown, GK. 1968. Basic Considerations in Mechanizing Citrus Harvest. **Tran. ASAE**, 11: 343-346.
14. Sellier, D. and Fourcaud, T. 2009. Crown structure and wood properties: Influence on tree sway and response to high winds. **American Journal of Botany**, 96(5): 885-896.
15. Sessiz, A. and Ozcan, M.T. 2005. Olive removal with pneumatic branch shaker and abscission chemical. **Journal of Food Engineering** 76 (2006) 148–153.
16. Spatz, H.-C.H. 2000. Greenhill's Formula for the Critical Euler Buckling Length revisited. In: H.-C.H. Spatz and T. Speck (Editors), **3rd Plant Biomechanics Conf. Plant Biomechanics 2000. Georg Thieme Verlag, Freiburg**, pp. 30-37.

Comparison of Mechanical Shakers Performance in Fruit Harvesting Process with Constant and Frequency Proportional Forces

M. Homaei¹ , B. Mohammadi-Alasti^{2*}

¹ MSc Student, Department of Agricultural Machinery Engineering, Bonab Branch, Islamic Azad University, Bonab, Iran.

^{2*} Assistant Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Bonab Branch, Islamic Azad University, Bonab, Iran. behzad.alasti@gmail.com.

Received: 2012-09-15 Accepted: 2013-12-26

Abstract

The objective of this study is comparison of mechanical shakers performance in fruit harvesting process with constant and frequency proportional forces. Experimentally static loadings and dynamic free vibration are carried out on the trunk and branches of the sample tree (Olive tree) to obtain their important elastic and viscoelastic properties. Then the olive tree is modeled with an equivalent mass-spring multi degree freedom model depending on the tree age. In this paper the fruit is modeled with two degree equivalent of mass-spring freedom model that it includes stem and fruit center of gravity and taking to account that olive tree produces fruits in last year's branches, the considered DOF in this study is one number more than tree's age. The governing equations of motion are derived using Newton's Second Law and solved numerically by MATLAB software. Displacement amplitude of the fruit and trunk are obtained in the different frequencies. Also the effects of the tree age and kind of applied force on the optimum range of shaking frequency are discussed. In addition the value of the mechanical stresses in the stem bottom and pedicle of fruits are calculated. It has been observed from results in harvesting process by F.P.A and C.F.A excited forces, the quantity of pedicle stress was more than stem stress Therefore If the both nodes have equivalent resistance, olive fruits will be removed without stem.

Key words: Inertia shaker, Response frequency, FPA, CFA and Olive tree.