

طراحی یک میکرو شتاب‌سنج خازنی برای اندازه‌گیری شتاب روی صندلی تراکتور (۶۳)

مجید علیدوست^۱، قادر رضازاده^۲، محمد علی حداد درفشی^۳

چکیده

برای اینکه سلامتی راننده تراکتور در انجام کارهای کشاورزی مورد تهدید قرار نگیرد باید از آسیب‌های ناشی از ارتعاشات که از طریق صندلی منتقل می‌شود مصون بماند. از روش‌های معمول برای کاهش دادن میزان ارتعاشات وارده به صندلی تراکتور استفاده از سیستم‌های تعلیق فعال است. این سیستم‌ها نیاز به یک واحد شتاب‌سنج به عنوان حس‌کننده لحظه‌ای شتاب دارند تا در هر لحظه شتاب وارد شده به صندلی راننده را اندازه گرفته و به واحد خنثی‌کننده ارسال کنند. در این مقاله رفتار مکانیکی یک میکروشتاب‌سنج خازنی برای اندازه‌گیری محدوده شتاب‌های وارده به صندلی تراکتور شبیه‌سازی شده است.

کلیدواژه: میکروالکترومکانیک، شتاب‌سنج خازنی، صندلی تراکتور

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه ارومیه، پست الکترونیک: majidalidoost@yahoo.com

۲- دانشیار گروه مکانیک دانشگاه ارومیه

۳- استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه ارومیه

۱- مقده

تراکتور از پرکاربردترین ماشین های استفاده شده در کشاورزی می باشد بطوریکه با مکانیزه شدن سیستم های کشاورزی استفاده از تراکتور برای پیاده کردن طرح های کشاورزی بیشتر شده است. با چنین استفاده گسترده ای از تراکتور رفع عیب بسیاری از قسمتهای آن و بهینه کردن اجزای مختلف آن در دستور کار هر محقق در این رشته می باشد تا با کمترین مشکلات جانبی کارها به نحو بهتر و با رانندگی بیشتری به نتیجه برسد. از مهمترین رکنهای استفاده بهینه از تراکتور داشتن یک راننده با تجربه و سالم می باشد به نحوی که بتواند تراکتور را در بهترین شرایط حرکت دهد. در طراحی تراکتورهای امروزه ملاحظاتی وجود دارد که به عوامل انسانی مربوط می شود و باید در طراحیها مدنظر قرار بگیرند تا راننده وظایف خود را با رانندگی بیشتر و خستگی کمتری انجام دهد. عوامل انسانی مسائلی چون راحتی در حین رانندگی، وسعت دید، سهولت استفاده از کنترلرها، سیستم تهویه مناسب و بازدارنده های سروصدای زیاد می باشد. اثر مخربی که تراکتور و محیط کاری آن منجر به آن می شود ارتعاشات است بطوریکه باعث اثرهای مکانیکی، فیزیولوژیکی و روانی می شود. شدت ارتعاشات ناشی از رانندگی، با سرعت رابطه مستقیمی دارد یعنی با افزایش سرعت بر شدت ارتعاشات افزوده می شود [1].

ارتعاشات در کل بدن مضر می باشد چونکه باعث تحریک فرکانسهای طبیعی بدن می شود. فرکانسهای طبیعی که روی بدن انسان مضر می باشند تعیین شده اند. بدن انسان دارای فرکانس طبیعی 4-5 Hz می باشد. در جدول 1 تعدادی از قسمتهای حیاتی بدن انسان و فرکانس طبیعی آن داده شده است. بیشتر ارگانهای حیاتی مانند معده، ستون فقرات و قلب دارای رنج فرکانسی 4-5 Hz می باشند [2].

ارتعاشات کل بدن اثرات مخربی را روی راننده تراکتور بخصوص در قسمت ستون فقرات وارد می سازد بطوریکه این آسیبها می تواند دائمی باشد [2,3,4]. شدت و سختی شرایط کار کردن در ارتعاشات محدود به فرکانسهای طبیعی بدن منجر به وضع یکسری از قوانین توسط ارگانهای مربوطه گردیده است. مثلاً بر طبق استاندارد ISO2631 رانندگانی که در معرض ارتعاشات در محدوده 4-8 Hz ماکزیم ساعت کار آنها 8 ساعت است [5]. اما در بعضی از کارهای سنگین مثل شخم زدن ماکزیم ساعت کار آنها به 2/5 ساعت می رسد چونکه شدت ارتعاشات در این شرایط بیشتر می باشد [3].

جدول 1- فرکانسهای طبیعی در اعضاء بدن انسان

اعضا	فرکانس طبیعی (Hz)
چشم	20-25
قفسه سینه	3
ستون فقرات	3-5
شانه	2-6
سر	30
معده	4-7
قلب	4-5

بر طبق مطالب بیان شده در بالا پر واضح است که ارتعاشات نقش مهمی را در آسیب زدن به سلامتی راننده فراهم می آورد. از این رو تحلیل و بررسی عوامل ایجاد ارتعاشات، اندازه گیری مقدار آن و از بین بردن تاثیرات مخرب آن از اهداف تحقیقات گسترده ای بوده که انجام شده است. علاوه بر این ارتعاشات عامل اصلی در استهلاک و خرابی زودرس نقاط در تماس با هم می باشد. مسئله انتقال ارتعاشات به صندلی تراکتور و راننده آن در طول 40 سال اخیر بطور گسترده ای مورد بررسی قرار گرفته است [6]. از روشهای زیادی برای کاهش انتقال ارتعاشات به صندلی راننده تراکتور استفاده شده است. از جمله این روشها می توان به سیستم تعلیق صندلی، سیستم تعلیق اکسلهای جلو و عقب، سیستم تعلیق کابین راننده و ابزارهای جذب شوک اشاره کرد [7,8]. آقای مارسلی و همکاران در یک تحقیق از یک تراکتور 4WD مجهز به سیستم تعلیق اکسل جلو و سیستم جاذب شوک اتصال سه نقطه استفاده کرد. در نتیجه این تحقیق شتابهای RMS^1 منتقل شده به صندلی در حین شخم زدن و هرس زدن در سرعتهای مختلف و در حالت های روشن و خاموش بودن سیستم تعلیق بدست آمده است. حداکثر شتابهای RMS در یک سوم

1 root-mean-square

پهنای باند و در ۸۰-۱ هرتز مطابق با استاندارد ISO2631-1 اندازه گیری شده اند [5]. میزان شتاب RMS در جهت عمود به صندلی در وضعیت خاموش بودن سیستم تعلیق برای شخم زدن 0.596 m/s^2 در سرعت حرکت $2/13 \text{ m/s}$ و برای هرس زدن 0.829 m/s^2 در سرعت حرکت $2/55 \text{ m/s}$ بدست آمد [9].

جهت از بین بردن لرزشهای موجود در صندلی تراکتور بوسیله سیستمهای هوشمند، اندازه گیری دقیق و لحظه ای شتاب ضرورت تام دارد. در واقع یک شتاب سنج می تواند به عنوان یک ترانسدیوسر اندازه گیری شتاب، با ارسال سیگنال تغییرات ارتعاشات در صندلی تراکتور را در شرایط مختلف کاری آشکار سازد. شتابسنجها عمدتاً از یک جرم حساس و یک عضو الاستیک که جرم را به بدنه وصل می کند تشکیل شده اند بطوریکه میرایی سیستم نیز اصطکاک مانع در برابر حرکت آن می باشد که باعث تلفات انرژی و در نهایت توقف در حرکت می شود.

اندازه گیری دقیق شتاب با استفاده از تکنولوژی شتابسنجهای میکرو سیستمهای الکترومکانیکال و نانو سیستمهای الکترومکانیکال MEMS/NEMS¹ امکانپذیر می باشد.

این تکنولوژی چند دهه ای است که بوجود آمده و به سرعت در حال پیشرفت است و هر روز قابلیت ها و کارایی های این صنعت بیشتر به چشم می خورد. علت اولیه در روی آوردن به این صنعت کوچک سازی دستگاهها و سیستمها بوده است. چون ساخت سیستمهای در ابعاد بزرگ نیازمند صرف هزینه و وقت بیشتری بوده و دارای معایبی مثل وزن، ابعاد و استهلاک می باشد [10]. دو موضوع مورد توجه بسیاری از محققان MEMS/NEMS هزینه و زمان می باشد که با مدل سازی در ابعاد میکرو و نانو قابل دستیابی است. این صنعت کارایی و کاربردهای فراوانی مثل کاربرد در هوافضا، روباتیک، بیوتکنولوژی و پزشکی دارد [11]. وسایل MEMS/NEMS تبدیل به عنصر مهمی در ساخت شتابسنجها، میکروپمپها، سوئیچهای نوری، ترانسدیوسرها و سنسورهای دارویی شده اند [12]. بنابراین تحلیل و آنالیز ارتعاشات و دینامیک ساختارهای انعطاف پذیر در ابعاد میکرو از اهمیت زیادی برخوردار است.

از لحاظ اقتصادی بازار وسایل MEMS، از ۵-۲ میلیارد دلار در سال ۲۰۰۰ به ۱۵-۸ میلیارد دلار تا سال ۲۰۰۴ رسیده است [13]. طبق پیش بینی های انجام شده سهم تکنولوژی MEMS و NEMS در سال ۲۰۱۵ به یک تریلیون دلار می رسد. هدف از این تحقیق، طراحی یک شتابسنج از نوع خازنی می باشد که بتواند توسط آن ارتعاشات وارده بر صندلی راننده یک تراکتور را به طور لحظه ای اندازه گیری نماید و از این طریق امکان مطالعه تغییرات این ارتعاشات را در شرایط متفاوت کاری در یک مزرعه فراهم کند.

۲- مواد و روشها

۲-۱- توصیف مدل پیشنهادی

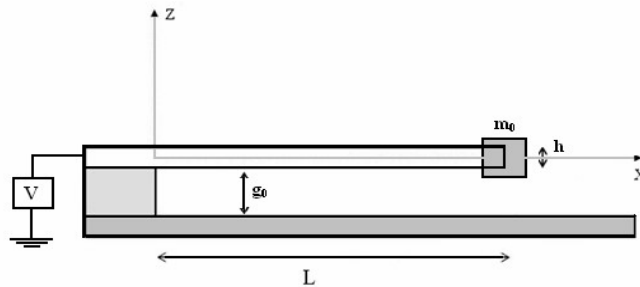
شتابسنج در نظر گرفته شده در اینجا یک خازن است که تشکیل شده از یک تیر یکسرگردار و یک صفحه ثابت، بطوریکه با تغییر مکان تیر در اثر شتابهای اعمالی ظرفیت خازنی آن تغییر می کند. علت استفاده از نوع خازنی این است که حسگر خازنی در شتابسنجها دارای حساسیت بالا، ساختار ساده و واکنش کم به تغییرات دمایی می باشد.

میکروبییم^۲ در نظر گرفته شده دارای طول l ، عرض b و ضخامت h می باشد که در شکل ۱ نشان داده شده است. صفحه پایینی خازن صلب بوده و به بدنه سنسور متصل شده است، بطوریکه فاصله بین زیرلایه و میکروبییم (گپ)^۳ g_0 می باشد و محدوده بین میکروبییم و زیرلایه توسط خلا جدا می شود. در انتهای طول تیر یک جرم متمرکز قرار گرفته است. همچنین در دو سر میکروبییم و زیرلایه اختلاف پتانسیل V برقرار شده است.

1 micro/nano-electro-mechanical systems

2 microbeam

3 gap



شکل ۱- تصویر میکروبیوم در نمای جلو

۲-۲- معادلات حاکم بر مدل

از تئوی حاکم بر تیرهای بلند (اویلر-برنولی) برای بررسی رفتار مدل تیر یکسرگیردار استفاده می‌شود. تئوری اویلر-برنولی زمانی استفاده می‌شود که نسبت ضخامت به طول صفحات کم و از کرنشهای برشی صرفنظر می‌گردد. اعمال نیرو بر روی تیر باعث جابجایی آن می‌شود بطوریکه بیشترین خیز تیر در نقطه آخر آن می‌باشد. مرکز محورهای مختصات طبق شکل ۱ در قسمت گیردار آن فرض شده است.

۲-۲-۱- معادله غیر خطی استاتیکی تیر یکسرگیردار

$$EI \frac{d^4 w_s(x)}{dx^4} = F_e(w_s, V) \quad (1)$$

$$F_e(w_s, V) = \frac{\varepsilon_0 b V^2}{2(g_0 - w_s(x))^2} \quad (2)$$

که در رابطه ۱، w انحراف تیر در جهت z ، E مدول الاستیسیته، I ممان اینرسی نسبت به محور y ، V اختلاف پتانسیل دو سر هدایت کننده‌ها، F_e نیروی الکترواستاتیکی در واحد طول، ε_0 ضریب گذرایی خلأ و x مختصات محوری می‌باشد [14]. بطوریکه شرایط مرزی آن به شرح زیر برقرار می‌باشد:

$$w_s(0) = 0, \quad \left. \frac{dw_s}{dx} \right|_{x=l} = 0, \quad (3)$$

شرایط مرزی حاکم بر تیر در انتهای آزاد آن:

$$\left. \frac{d^2 w_s}{dx^2} \right|_{x=l} = 0, \quad \left. \frac{d^3 w_s}{dx^3} \right|_{x=l} = 0. \quad (4)$$

۲-۲-۲- معادله دیفرانسیل غیر خطی کلی حاکم بر رفتار دینامیکی تیر یکسر گیردار

$$EI \frac{\partial^4 w_T(x,t)}{\partial x^4} + (\rho A + m_0 \delta(x-l)) \left(\frac{\partial^2 w_T(x,t)}{\partial t^2} + a \right) + c \frac{\partial w_T(x,t)}{\partial t} = \frac{\varepsilon_0 b V^2}{2(g_0 - w_T(x,t))^2} \quad (5)$$

که A سطح بیوم، ρ چگالی تیر، a شتابی که باید سنجیده شود، c ضریب میرایی بر واحد طول، m_0 جرم قرار گرفته در فاصله l روی تیر، $\delta(x-l)$ تابع ضربه و w_T جابجایی تیر می‌باشد [15]. می‌دانیم که جابجایی کل برابر است با مجموع جابجایی استاتیکی و دینامیکی:

$$w_T(x,t) = w_s(x) + \varepsilon(x,t) \quad (6)$$

که $\varepsilon(x,t)$ ارتعاشات کوچک حول نقطه تعادل استاتیکی می باشد. در نتیجه معادله ۵ بصورت زیر تبدیل می شود:

$$EI \frac{\partial^4 (w_s(x) + \varepsilon(x,t))}{\partial x^4} + (\rho A + m_0 \delta(x-l)) \left(\frac{\partial^2 (w_s(x) + \varepsilon(x,t))}{\partial t^2} + a \right) + c \left(\frac{\partial (w_s(x) + \varepsilon(x,t))}{\partial t} \right) = \frac{\varepsilon_0 b V^2}{2(g_0 - (w_s(x) + \varepsilon(x,t)))^2} \quad (7)$$

و با نوشتن بسط تیلور حول نقطه $\varepsilon = 0$ برای طرف دوم معادله ۷ داریم:

$$\Rightarrow EI \frac{d^4 w_s(x)}{dx^4} + EI \frac{\partial^4 \varepsilon(x,t)}{\partial x^4} + (\rho A + m_0 \delta(x-l)) \left(\frac{\partial^2 \varepsilon(x,t)}{\partial t^2} + a \right) + c \left(\frac{\partial \varepsilon(x,t)}{\partial t} \right) = \frac{\varepsilon_0 b V_b^2}{2(g_0 - w_s(x))^2} + \frac{\varepsilon_0 b V_b^2}{(g_0 - w_s(x))^3} \varepsilon(x,t) \quad (8)$$

با حذف معادله استاتیکی ظاهر شده ، معادله ارتعاشات کوچک حول نقطه تعادل استاتیکی مدل به ترتیب زیر حاصل می شود:

$$L(\varepsilon(x,t)) = EI \frac{\partial^4 \varepsilon(x,t)}{\partial x^4} + (\rho A + m_0 \delta(x-l)) \left(\frac{\partial^2 \varepsilon(x,t)}{\partial t^2} + a \right) + c \left(\frac{\partial \varepsilon(x,t)}{\partial t} \right) - \frac{\varepsilon_0 b V_b^2}{(g_0 - w_s(x))^3} \varepsilon(x,t) = 0 \quad (9)$$

بطوریکه $L(\varepsilon(x,t))$ اپراتور دیفرانسیلی خطی می باشد و ε شرایط مرزی مشابه با شرایط مرزی ۳ و ۴ را ارضا می کند.

۲-۲-۳- ظرفیت خازنی شتابسنج

برای اندازه گیری ظرفیت خازنی با توجه به مدل مورد نظر و شکل جابجاییهای آن، از رابطه زیر برای اندازه گیری تغییرات ظرفیت کل خازن در طول زمان استفاده می کنیم.

$$C(t) = \int_0^l \frac{\varepsilon_0 b}{(g_0 - w_T(x,t))} dx \quad (10)$$

۲-۳- حل معادلات

۲-۳-۱- معادله استاتیکی

حل کردن معادله غیر خطی ۱ مشکل است و زمان زیادی را صرف می‌کند. پس برای حل معادله ابتدا آنرا بصورت خطی تبدیل می‌کنیم و سپس آنرا حل می‌کنیم. در اینجا برای خطی کردن معادله از روش $SSLM^1$ استفاده شده است [16].

اگر w^k جابجایی شتاب‌سنج در اثر ولتاژ V^k باشد داریم:

$$w^{k+1} = w^k + \delta w = w^k + \psi(x) \quad (11)$$

$$V^{k+1} = V^k + \delta V \quad (12)$$

پس می‌توان نوشت:

$$EI \frac{d^4(w^{k+1})}{dx^4} = F_e(w^{k+1}, V^{k+1}) \quad (13)$$

$$EI \frac{d^4(w^k)}{dx^4} = F_e(w^k, V^k) \quad (14)$$

(15)

$$F_e(w^{k+1}, V^{k+1}) = F_e(w^k, V^k) + \left. \frac{\partial F_e}{\partial w} \right|_{(w^k, V^k)} \delta w + \left. \frac{\partial F_e}{\partial V} \right|_{(w^k, V^k)} \delta V$$

با تفاضل ۱۴ از ۱۳ و استفاده از رابطه ۱۵ داریم:

(16)

$$EI \frac{d^4 \psi(x)}{dx^4} = F_e(w^{k+1}, V^{k+1}) - F_e(w^k, V^k) = \frac{\varepsilon_0 b (V^k)^2}{(g_0 - w^k)^3} \delta w + \frac{\varepsilon_0 b V^k}{(g_0 - w^k)^2} \delta V$$

$$\Rightarrow EI \frac{d^4 \psi(x)}{dx^4} - \frac{\varepsilon_0 b (V^k)^2}{(g_0 - w^k)^3} \psi(x) = \frac{\varepsilon_0 b V^k}{(g_0 - w^k)^2} \delta V$$

معادله دیفرانسیل معمولی خطی حاصل را می‌توان با روشهای تفاضل محدود و یا روشهای انتگرالی مانند گالرکین^۲ حل کرد.

۲-۳-۲- حل عددی معادله دینامیکی

در حل معادله دینامیکی از روش کاهش مرتبه^۳ بر اساس بکارگیری روش گالرکین-باینوف^۴ استفاده شده است. این روش می‌تواند با مساوی صفر قرار دادن وزنی خطاها یک پاسخ مطلوب را فراهم کند. پس میتوان نوشت:

$$\varepsilon_N(x, t) = \sum_{n=1}^N u_n(t) \varphi_n(x) \quad (17)$$

که $\varphi_n(x)$ و $u_n(t)$ به ترتیب توابعی بر حسب زمان و شکل است. توابع شکل طوری انتخاب می‌شوند که شرایط مرزی را ارضا کنند. در نتیجه با جایگذاری در معادله ارتعاشات کوچک تابع خطای زیر حاصل می‌شود:

$$L(\varepsilon_N(x, t)) = EI \sum_{n=1}^N \varphi_n^{IV}(x) u_n(t) + (\rho A + (m_0 \delta(x-l))) \left[\sum_{n=1}^N \varphi_n(x) \ddot{u}_n(t) + a \right] + c \sum_{n=1}^N \varphi_n(x) \dot{u}_n(t) \quad (18)$$

$$- \frac{\varepsilon_0 b V_b^2}{(g_0 - w(x))^3} \sum_{n=1}^N \varphi_n(x) u_n(t) = E_r(x, t)$$

1 Step-by-Step Linearization Method

2 Galerkin

3 Reduced Order Model

4 Galerkin-Bubnov procedure

که $E_r(x, t)$ مقدار باقیمانده یا خطا می باشد. یک حل تقریبی $\varepsilon(x, l)$ می تواند به شکل زیر باشد که با مساوی صفر قرار دادن وزنی خطاها در طول تیر، بطوریکه مطابق با روش گالرکین - بابنوف تابع وزنی $\varphi_j(x)$ همان تابع شکل باشد داریم:

$$\int_0^l \varphi_j(x) L(\varepsilon_N(x, l)) dx = 0 \quad j = 1 \dots N$$

که با حل آن دستگاه معادلات دیفرانسیل معمولی زیر حاصل می شود:

$$\sum_{n=1}^N M_{jn} \ddot{u}_n(t) + \sum_{n=1}^N C_{jn} \dot{u}_n(t) + \sum_{n=1}^N k_{jn} u_n(t) = F_j$$

بطوریکه که M_{jn} ماتریس جرم :

$$M_{jn} = m_0 \varphi_j(l) \varphi_n(l) + \rho A \int_0^l \varphi_j(x) \varphi_n(x) dx$$

C_{jn} ماتریس میرایی:

$$C_{jn} = c \int_0^l \varphi_j(x) \varphi_n(x) dx$$

K_{jn} ماتریس سختی است که برابر با تفاضل سختی مکانیکی و الکتریکی است:

$$K_{jn} = K^m_{jn} - K^e_{jn} = EI \int_0^l \varphi_j(x) \varphi_n^{IV}(x) dx - \int_0^l \frac{\varepsilon_0 b V_b^2}{(g_0 - w(x))^3} \varphi_j(x) \varphi_n(x) dx$$

و F_{jn} بردار نیرو است :

$$F_{jn} = m_0 a \varphi_j(l) + \rho A a \int_0^l \varphi_j(x) dx$$

در جدول ۲ ویژگیهای هندسی و پارامترهای فیزیکی شتاب سنج خازنی مورد مطالعه در این کار داده شده است.

جدول ۲- مشخصات شتاب سنج خازنی

l [cm]	220	E [Gpa]	169
b [cm]	100	ε_0 [F/m]	$8.8541878 \times 10^{-12}$
h [cm]	2	ρ [Kg/m ³]	2330
g_0 [cm]	1	c [Ns/m ²]	1.3035
m_0 [Kg]	3.2×10^{-7}	N	1

۳- نتایج و بحث

با استفاده از کدنویسی در نرم افزار متلب حل استاتیکی و دینامیکی مدل انجام شده و ولتاژ ناپایداری^۱، پاسخ دینامیکی و در نتیجه تغییر در ظرفیت خازنی سیستم در اثر اعمال شتاب پله ای شبیه سازی شده است. ولتاژ ناپایداری یا واگرایی، مقدار ولتاژی می باشد که میکروبیوم به طور ناگهانی به سمت کف کشیده شده و به صفحه پایینی می چسبد. با حل استاتیکی مدل مورد نظر می توان وضعیت پایداری مدل را بررسی کرد. برای طراحی و کنترل کردن ساختارهای میکرو و رسیدن به یک عملکرد موثر، تخمین دقت جابجایی و رفتار دینامیکی مدل ضروری می باشد.

۳-۱- نتایج رفتار استاتیکی مدل

برای مقایسه درستی رفتار استاتیکی، نتایج حاصل از این روش با نتایج موجود در مرجع [17] مقایسه شده است. مشخصات داده شده در مرجع، دارای طول ۱۵۰، عرض ۵۰، ضخامت ۳ و فاصله بین زیرلایه و میکروبیوم ۱ میکرومتر است. مدول الاستیسیته برابر با ۱۶۹ گیگا پاسکال و ضریب گذردهی آن خلا می باشد. مقدار ولتاژ ناپایداری محاسبه شده در این کار برابر با ۱۷ ولت است که در مرجع مورد نظر این ولتاژ برابر با ۱۶/۹ ولت بدست آمده است که دارای اختلافی به میزان ۰/۵۸٪ می باشد.

بهترین حالت برای تغییرات تدریجی ولتاژ و تعداد المان با استفاده از روش FDM^2 و $SSLM$ در تعیین ولتاژ ناپایداری در جداول ۳ و ۴ مشخص شده اند. بر طبق این جداول با تغییرات ولتاژ ۰/۰۶ و تعداد المان ۱۱ تا می توان ولتاژ ناپایداری سیستم را بدست آورد.

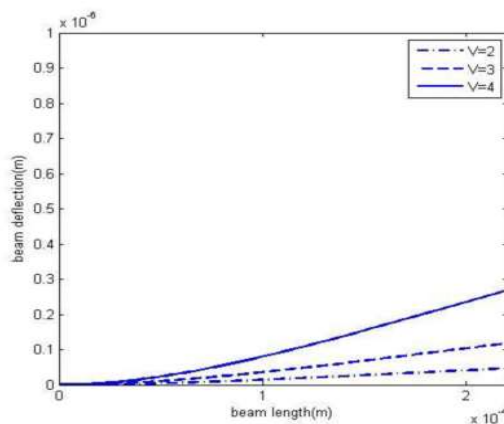
جدول ۳- ولتاژ ناپایداری بدست آمده با ۴۰ گره روی تیر یکسرگیردار با تغییرات ولتاژ بصورت تدریجی

تغییرات ولتاژ (V)	0.06	0.08	0.1	0.5
ولتاژ ناپایداری (V)	4.32	4.32	4.4	4.5

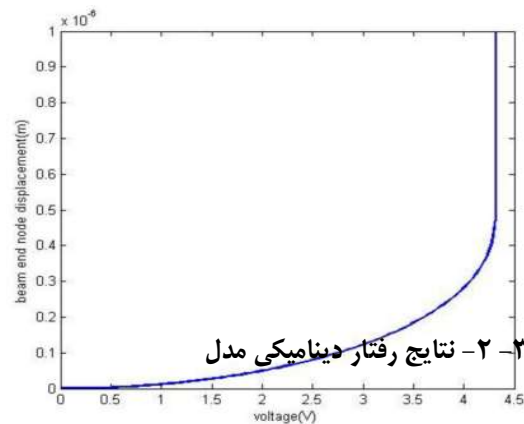
جدول ۴- ولتاژ ناپایداری بدست آمده با تغییر ولتاژ به اندازه ۰/۰۶، در تعداد گره های مختلف روی تیر یکسرگیردار

تغییرات ولتاژ (V)	14	11	8	5
ولتاژ ناپایداری (V)	4.32	4.32	4.26	4.2

در میکروبیوم تغییر شکل نقطه آخر برای تعیین ولتاژ ناپایداری مهم بوده که رفتار این نقطه نسبت به افزایش ولتاژ در شکل ۱ نشان داده شده است. در شکل ۲ اثرات افزایش ولتاژهای کمتر از ولتاژ ناپایداری نشان داده شده است. همانطور که مشخص است با افزایش ولتاژ مقدار انحراف میکروبیوم افزایش می یابد.



شکل ۲- انحراف تیر در ولتاژهای ۲ و ۳ و ۴

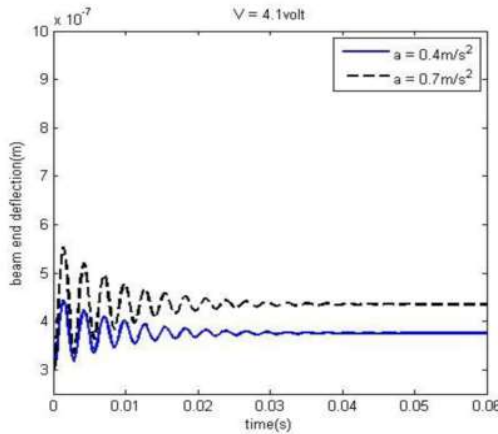


شکل ۱- تغییر شکل نقطه انتهای تیر با ولتاژ افزایش

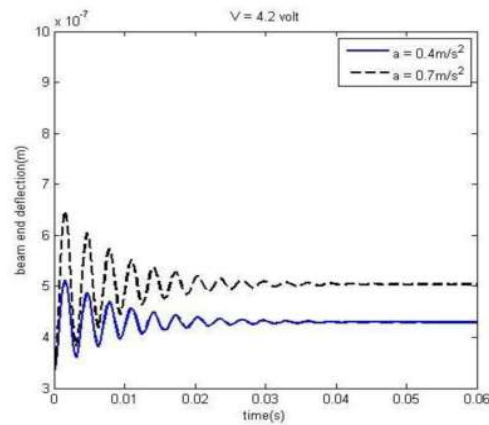
² Finite Difference Method

برای بررسی رفتار میکروشتاب سنج خازنی شتاب پله ای در لحظه صفر بر روی سیستم اعمال می شود. میزان شتاب وارده در محدوده شتابهای کوچک وارده بر صندلی تراکتور مطابق با مرجع [9] می باشد. $w_s(x)$ که تغییر شکل استاتیکی تیر نسبت به ولتاژ پایه می باشد به عنوان تابع شکل در نظر گرفته شده است. سیستم در اثر اعمال شتاب در طول زمان نوسان کرده و بدلیل وجود میرایی نوسانات آن به مرور زمان کاهش می یابد. تعداد المانها و استپ زمانی در نظر گرفته شده به ترتیب 150 و 10^{-4} msec می باشد.

شکل ۳ و ۴ مقدار ارتعاشات میکروبیوم نسبت به زمان را در اثر اعمال دو شتاب مختلف نشان می دهد:

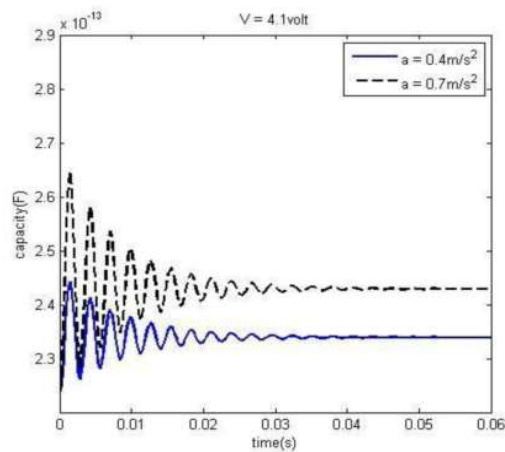


شکل ۴ - جابجاییهای انتهای میکروبیوم در اثر اعمال شتاب 0.7 m/s^2 و 0.4 m/s^2 در ولتاژ $4/1$ ولت

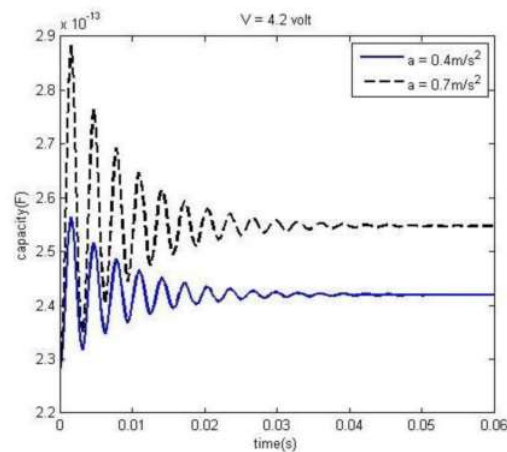


شکل ۳ - جابجاییهای انتهای میکروبیوم در اثر اعمال شتاب 0.7 m/s^2 و 0.4 m/s^2

و در شکل ۵ و ۶ تغییرات ظرفیت خازنی میکروبیوم نسبت به زمان در اثر اعمال همان شتابها به سیستم نشان داده شده است.



شکل ۶ - تغییرات در ظرفیت خازنی میکروبیوم در اثر اعمال شتاب 0.7 m/s^2 و 0.4 m/s^2



شکل ۵ - تغییرات در ظرفیت خازنی میکروبیوم در اثر اعمال شتاب 0.7 m/s^2 و 0.4 m/s^2

۴- نتیجه گیری

رفتار مدل ارائه شده در محدوده شتابهای اعمالی به صندلی تراکتور شبیه سازی شد، بطوریکه برای حل معادله های غیرخطی حاکم بر رفتار استاتیکی و دینامیکی سیستم از روش SSLM و گالرکین استفاده گردید. بر طبق نتایج بدست آمده مشخص است که شتاب سنج در محدوده این شتابهای کوچک تغییرات قابل مقایسه ای را از خود نشان می دهد و این سنجش را می توان برای بکارگیری در سیستم های تعلیق فعال برای کاهش دادن ارتعاشات وارده بر صندلی تراکتور استفاده کرد.

۵- پیشنهادها

با توجه به دقت ساختارهای کوچک در ابعاد میکرو و فضای کوچک اختصاص داده شده به خود بهتر است که برای قسمتهای مختلفی که در تراکتور در معرض آسیب دیدن می باشد این طراحی انجام گیرد. همچنین می توان با طراحی انواع دیگر شتاب-سنجهای در ابعاد میکرو دقت اندازه گیری آنها را در مقایسه با این نوع از شتاب سنج بررسی کرد.

۶- مراجع

- ۱- تقفی، م. ۱۳۶۹، تراکتور و مکانیسم آن (ترجمه)، چاپ اول، مرکز نشر دانشگاهی، تهران.
- [2] Gniady, J. and Bauman, J. 1991. Active seat isolation for construction and mining vehicles in SAE Tech. Paper Series:1-6
- [3] Mehta, C. R. Shyam, M. Singh, P. Verma, R. N. 2000. Ride vibration on tractor-implement system. Applied Ergonomics, v(31): 323-328
- [4] Schwarze, S., Notbohm, G., Dupuis, H., and Hartung, E. 1998. Dose-response relationships between whole-body vibration and lumbar disk disease - a field study of 388 drivers of different vehicles. Journal of Sound and Vibration, v(215): 613- 628
- [5] ISO 2631-1, I. 1997. Mechanical vibration and shock - evaluation of human exposure to whole body vibration. part i: General requirements. tech. rep., International Organization for Standardization.
- [6] Rossegger, R. Rossegger, S. 1960. Health effects of tractor driving. Journal of Agricultural Engineering Research, v(5):241-274
- [7] Marsili, A., Ragni, L., Santoro, G., Servadio, P., Vassalini, G. 2002. Innovative systems to reduce vibrations on agricultural tractors: comparative analysis of acceleration transmitted through the driving seat. Biosystems Engineering, v(81):35-47
- [8] Hansson, P. 2002. Working space requirement for an agricultural tractor axle suspension. Biosystems Engineering, v(81): 51-57
- [9] Marsili, A., Ragni, L., Santoro, G., Servadio, P., Vassalini, G. 2002. Innovative Systems to reduce Vibrations on Agricultural Tractors: Comparative Analysis of Acceleration transmitted Through the Driving. Biosystems Engineering, v(81): 35-47
- [10] Zenger, R., Sandmaier, H. 1996. "Microfluidics", IEEE 7th International Symposium on Micro-machine and Human Science: 13-20
- [11] Moul, N. 2000. An introduction to microelectromechanical system engineering, Artech House Publisher, ISBN:0890065810
- [12] Nabian, A., Rezazadeh, Gh., Haddad-derafshi, M., Tahmasebi, A. 2007. Investigation of Pull-In Phenomenon of Rectangular Micro-Plate Subjected to Nonlinear Electrostatic Pressure. Journal of Microsystem Technology, v(23):810-818
- [13] MEMS Industry Group. 2003. Executive Summary, Industry Report
- [14] Abdel-Rahman, E., Younis, M., Nayfeh, A. 2002. Characterization of the mechanical behavior of an electrically actuated microbeam. Journal of Micromechanics and Micro-engineering, v(12):759-766



- [15] Jodat Kordlar , H . Rezazadeh , Gh .2007 . Modeling Open-Loop MEMS Tunneling Accelerometer Based on Circular Plate. Journal of Microsystem Technologies, v(78):1083-1092.
- [16] Rezazadeh,Gh .Tahmasebi, A .Zubtsov , M.2006. Application of Piezoelectric Layers in Electrostatic MEM Actuators,Controlling of Pull-in Voltage. Journal of Microsystem Technologies v(12):1163- 1170
- [17] Osterberg , p.1995. Electrostatically Actuated Microelectromechanical Test Structuresfor Material Property Measurement . Ph.D thesis, MIT University.