



دینامیک ماشین

مکانیزم شش میله وات

محقق

محمد جواد محمدی

۸۱۰۶۰۰۱۲۹

استاد

دکتر راستگو

تاریخ تحویل

۱۴۰۳/۲/۱۵

دانشکده مهندسی مکانیک

پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

نیم‌سال دوم سال تحصیلی ۱۴۰۲-۰۳



چکیده

مکانیزم شش میله وات یکی از اجزای مهم در سیستم تعلیق خودروها است که به بهبود پایداری و کنترل خودرو کمک می‌کند. این مکانیزم با استفاده از شش میله متصل به چرخ‌ها، امکان حرکت مستقل هر چرخ را فراهم می‌آورد و این امر موجب می‌شود که ارتعاشات ناشی از ناهمواری‌های جاده به طور موثری جذب شوند و کمتر به بدنه خودرو و سرنشینان منتقل گردد. در سیستم تعلیق چند-میله‌ای (Multi-Link)، که یکی از انواع سیستم تعلیق مستقل است، از سه یا چند بازوی جانبی و یک یا چند بازوی طولی استفاده می‌شود. طول این بازوها و زاویه قرارگیری آن‌ها نسبت به هم متفاوت است، که این تفاوت‌ها به تنظیم دقیق حرکت چرخ‌ها و بهبود عملکرد فرمان‌پذیری و ترمزگیری کمک می‌کند¹. هر بازو دارای مفصل کروی یا بوشی شکل است که به سیستم تعلیق اجازه می‌دهد تا بارهای کششی و فشاری را تحمل کند.



فهرست مطالب

1	تحلیل سینماتیکی مکانیزم	3
1-1	صحت سنجی ابعاد	3
1-2	سینماتیک	3
1-2-1	متلب	5
1-2-2	شبیه سازی حرکت با متلب	8
1-2-3	صحت سنجی با نرم افزار تجاری	8
2	تحلیل دینامیکی مکانیزم	11
2-1	تئوری	11
2-2	نتایج متلب	13
2-2-1	نتایج نرم افزار تجاری	17
2-2-2	بحث و بررسی	17



تحلیل سینماتیکی مکانیزم

در این قسمت سینماتیک سیستم مورد بحث قرار میگیرد. در ابتدا طول ها و زوایای اولیه منطقی برای مکانیزم در نظر گرفته و صحت سنجی میشوند. در ادامه به بررسی موقعیت، سرعت و شتاب اجزا پرداخته شده است و نمودار های آن ها رسم شده اند.

1-1 صحت سنجی ابعاد

مقادیر زیر برای اندازه اجزا در نظر گرفته شده است.

$$AB = 40mm$$

$$AE = 95mm$$

$$AF = 280mm$$

$$BC = 100mm$$

$$CE = 95mm$$

$$CH = 65mm$$

$$DF = 145mm$$

$$DH = 120mm$$

$$EH = 95mm$$

$$\theta_{20} = 135^\circ$$

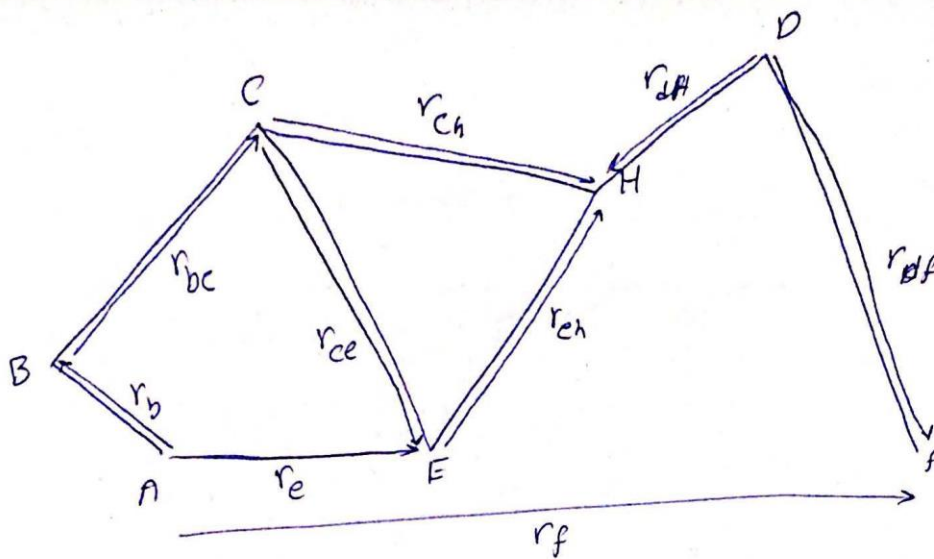
برای صحت سنجی این مقادیر و بررسی اینکه مکانیزم میتواند ازادانه 360° درجه حرکت کند از سایت Geogebra استفاده

شده است. (فایل geogebra-export.ggb و انیمیشن آن VID01.mp4)

1-2 سینماتیک

در این بخش به دو روش، یکی با استفاده از متلب و دیگری با استفاده از نرم افزار تجاری آدامز به بررسی موقعیت، سرعت و

شتاب اجزا پرداخته شده است. تمامی نمودار های این پروژه برای ۲ سیکل کامل رسم شده اند.



از در حلقه استفاده می کنیم:

$$\begin{cases} r_b + r_{bc} + r_{ce} = r_e \\ r_{ch} + r_{dh} + r_{df} = r_f - r_e \end{cases}$$

از روابط ۱۱ مقادیر θ_b ، θ_c ، θ_d و θ_f به حساب داشتن θ_e می آیند.
نامتناهی رقیق از مدارها خارج می باشد:

$$\begin{cases} \omega_b \frac{d}{d\theta_b} (r_b) + \omega_c \frac{d}{d\theta_c} (r_{bc}) + \omega_e \frac{d}{d\theta_e} (r_{ce}) = 0 \\ \omega_e \frac{d}{d\theta_e} (r_{ch}) + \omega_d \frac{d}{d\theta_d} (r_{dh}) + \omega_f \frac{d}{d\theta_f} (r_{df}) = 0 \end{cases}$$

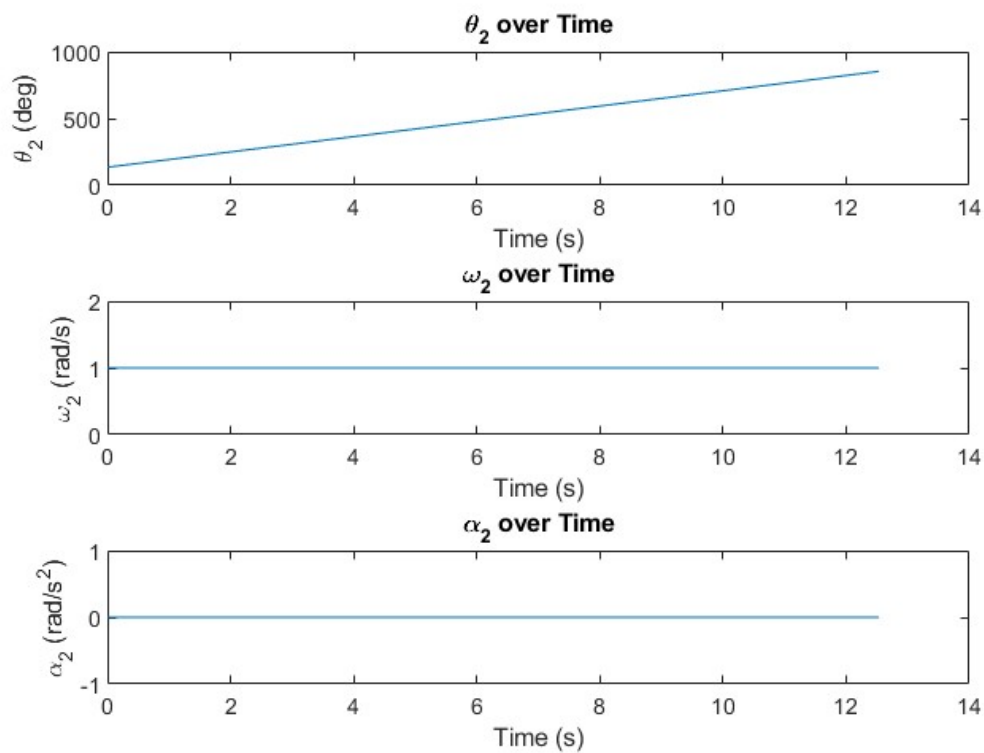
از این دانش برای از روابط ۱۱ به ω_b ، ω_c ، ω_d و ω_f به دست می آیند.
تایید بار مشتق رقیق دیگر:

$$\begin{cases} \alpha_b r_b' + \omega_b^2 r_b'' + \alpha_c r_{bc}' + \omega_c^2 r_{bc}'' + \alpha_e r_{ce}' + \omega_e^2 r_{ce}'' = 0 \\ \omega_e r_{ch}' + \omega_e^2 r_{ch}'' + \alpha_d r_{dh}' - \omega_d^2 r_{dh}'' + \alpha_f r_{df}' + \omega_f^2 r_{df}'' = 0 \end{cases}$$

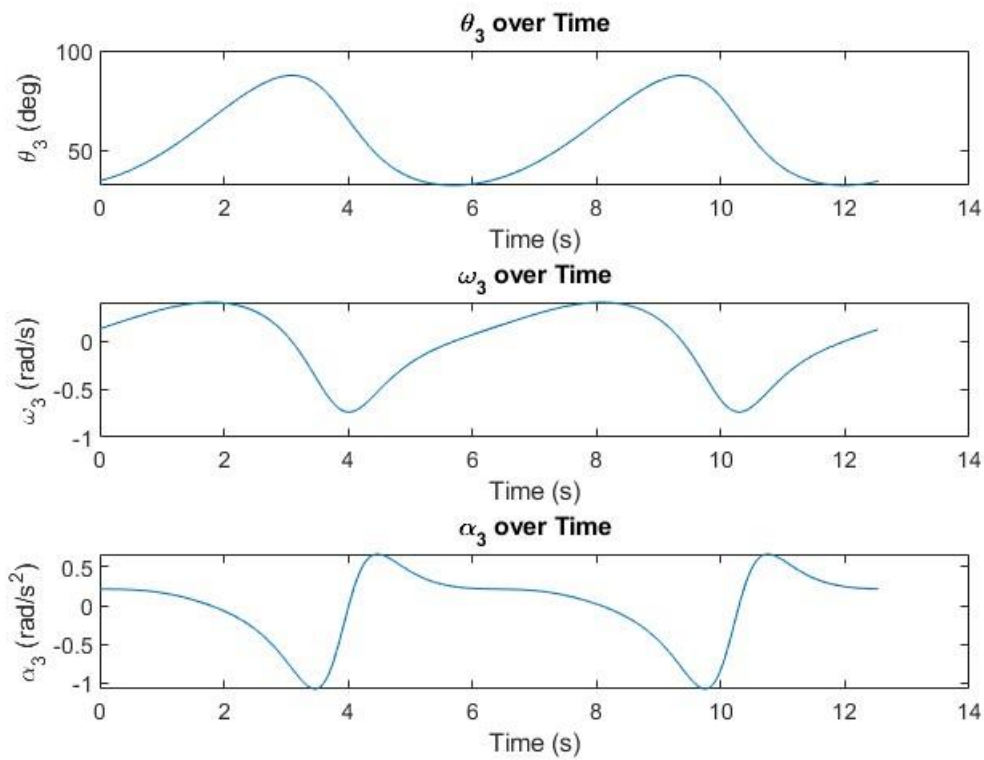
با فرض داشتن α_e از روابط ۱۱ به α_b ، α_c ، α_d و α_f می آیند و در ادامه می آید.

1-2-1 متلب

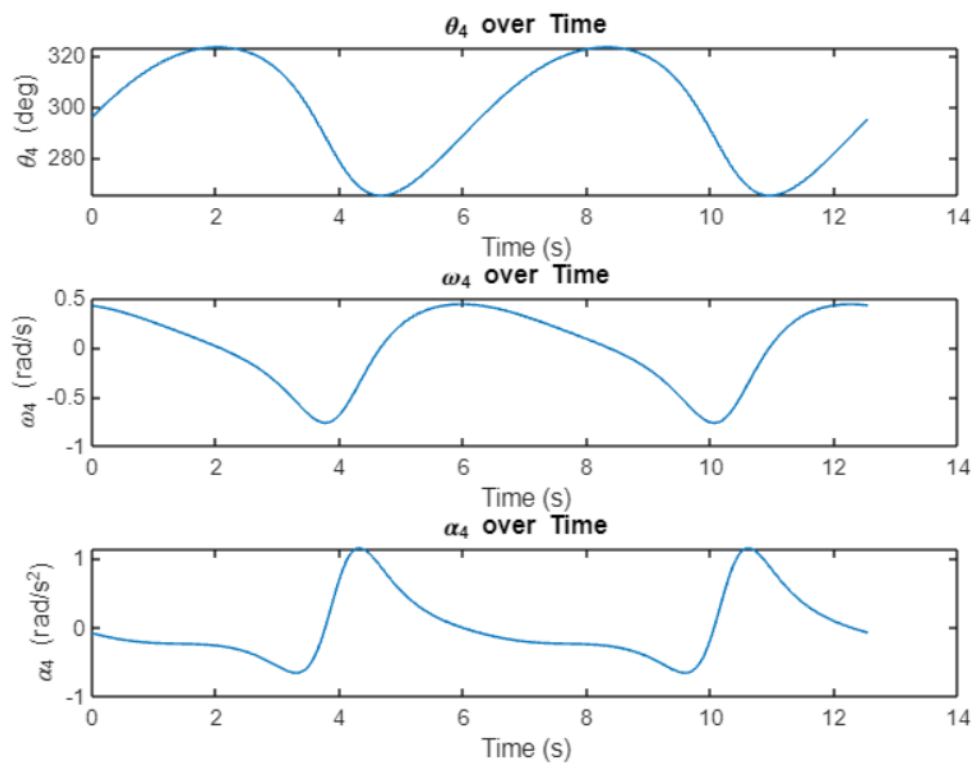
طبق صورت پروژه سرعت زاویه ای لینک ۲ ثابت و برابر $1 \frac{rad}{s}$ فرض شده است. سایر شتاب ها و سرعت ها به صورت حل عددی (کد پیوست شماره ۱) به صورت زیر می باشد:



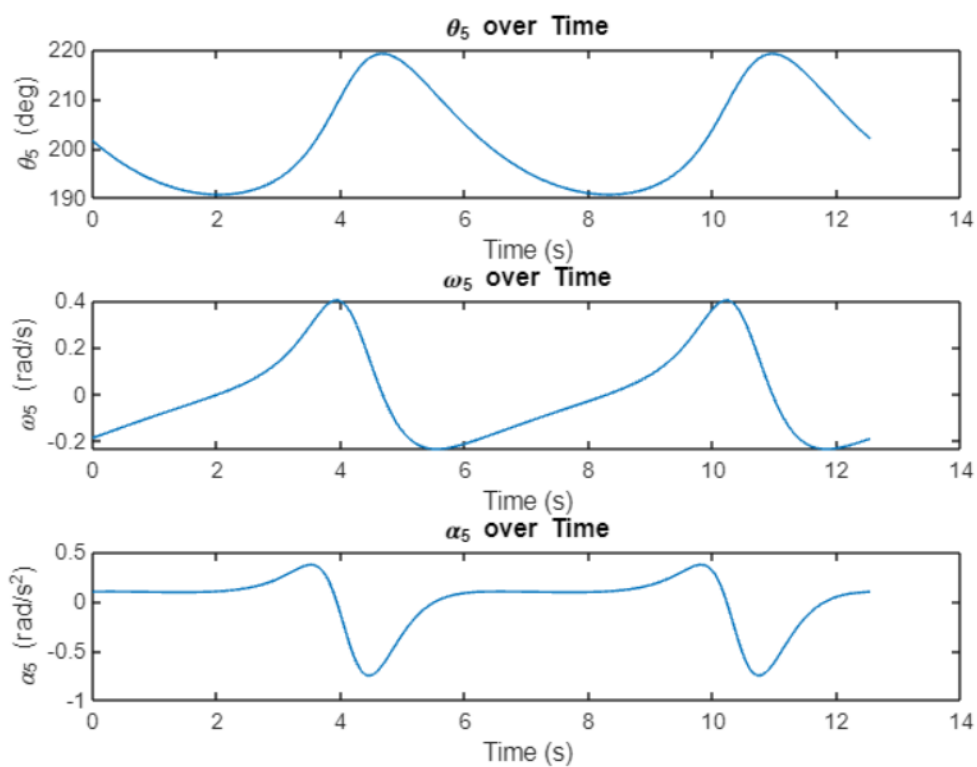
نمودار موقعیت، سرعت و شتاب لینک ۲



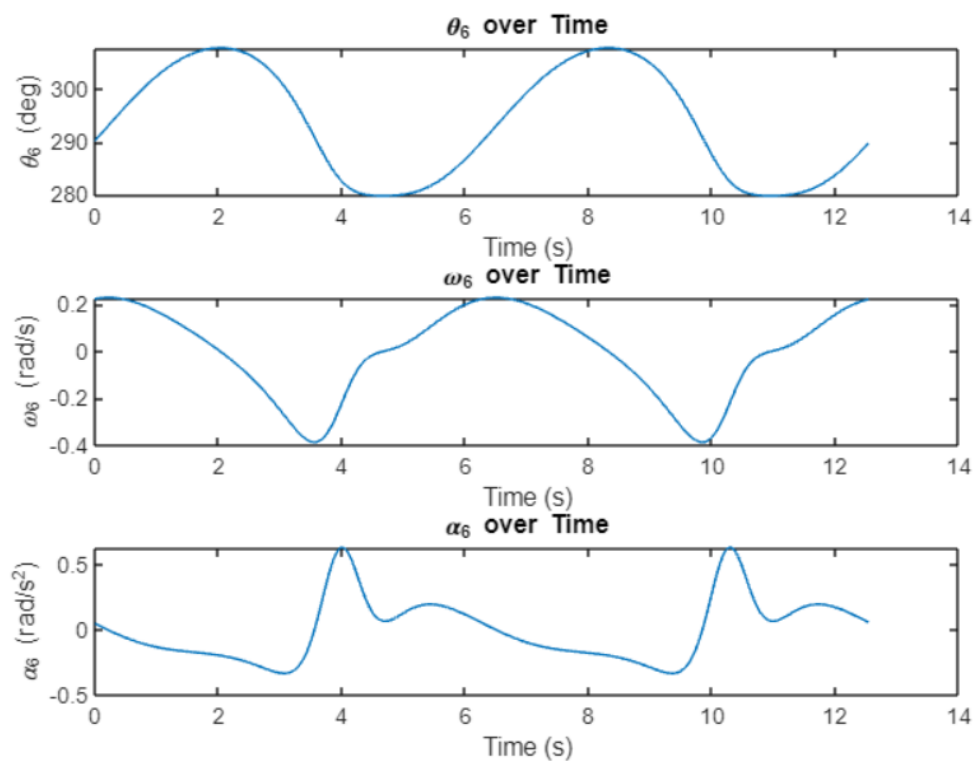
موقعیت، سرعت و شتاب لینک ۳



موقعیت، سرعت و شتاب لینک ۴



موقعیت، سرعت و شتاب لینک ۵



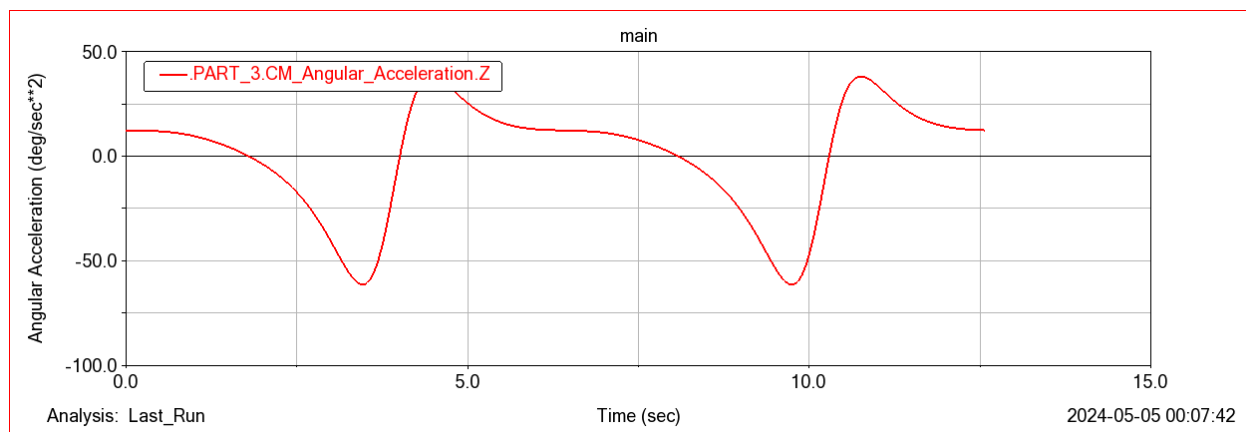
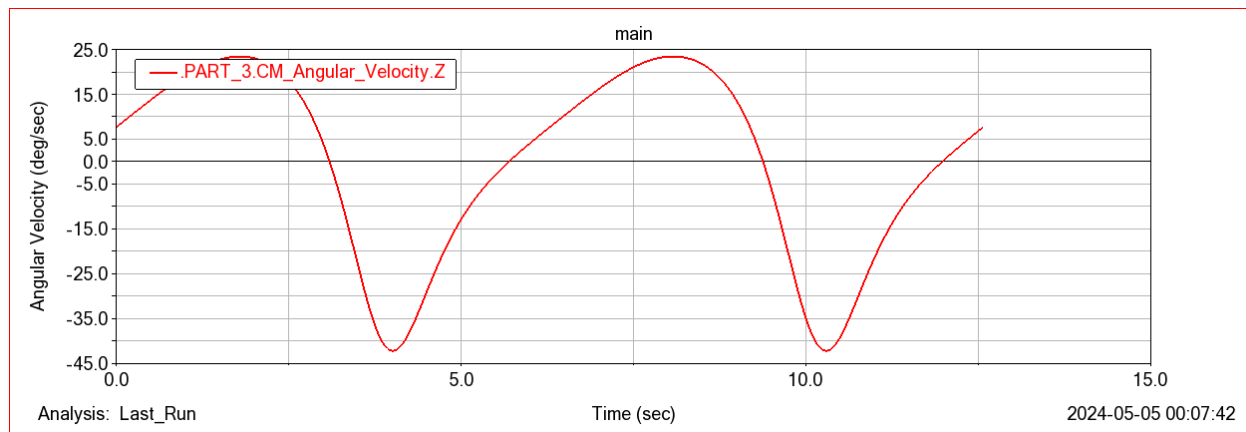
موقعیت، سرعت و شتاب لینک ۶

1-2-2 شبیه سازی حرکت با متلب

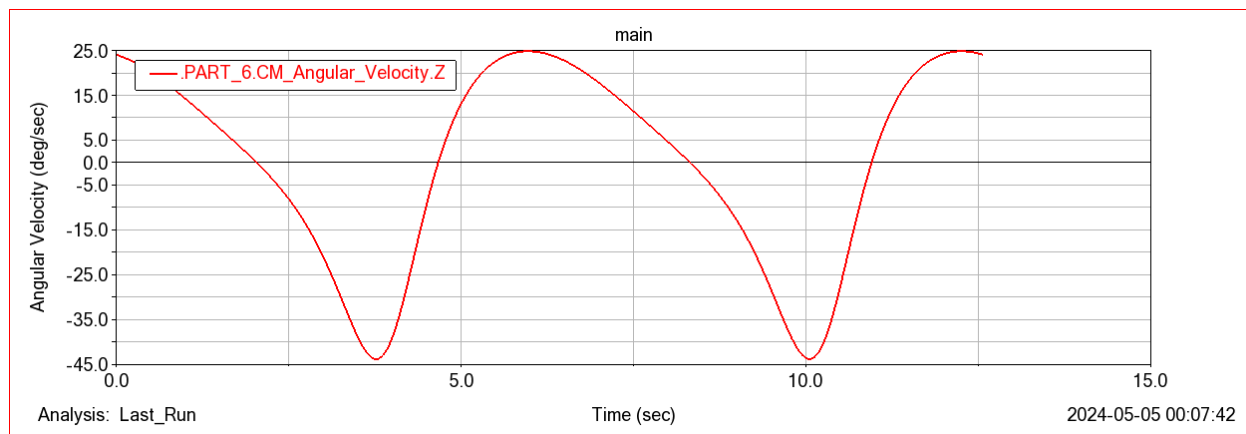
با تعریف کردن هر بردار و حرکت آن میتوان انیمیشنی از حرکت مکانیزم در نمودار متلب ساخت که ویدیو آن VID02.mp4 است.

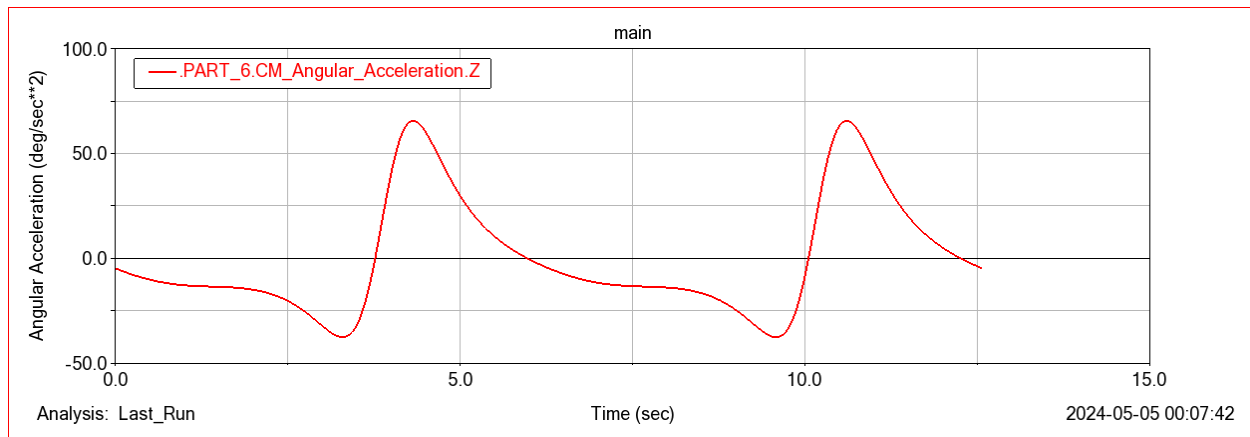
1-2-3 صحت سنجی با نرم افزار تجاری

با استفاده از نرم افزار آدامز نمودارهای زیر به دست آمده است که نتایج حاصل از کد متلب را تایید میکند.

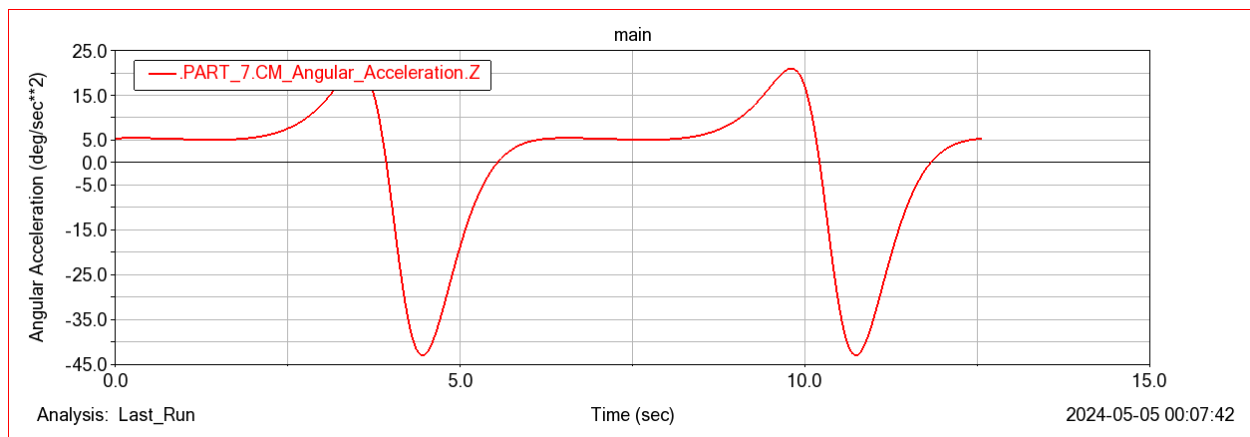
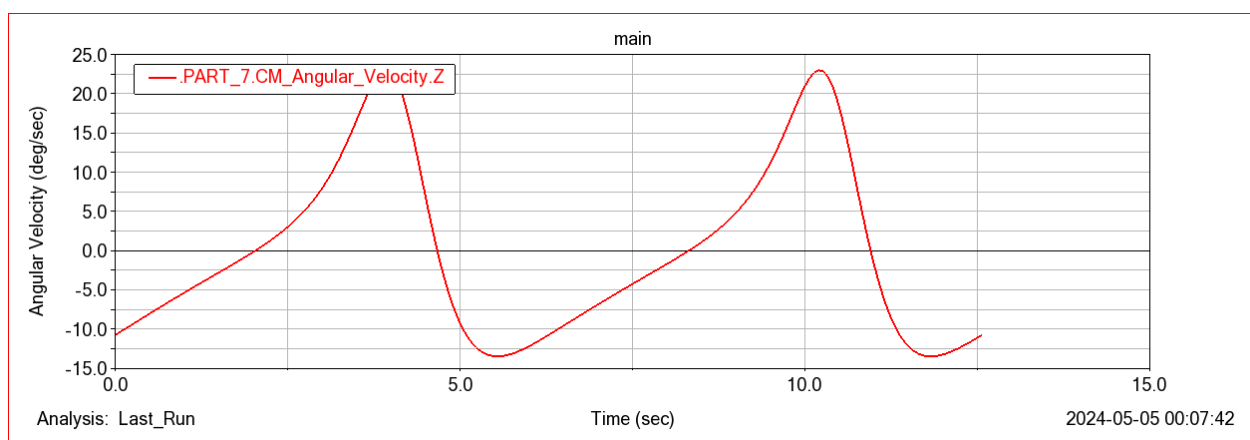


سرعت و شتاب لینک ۳

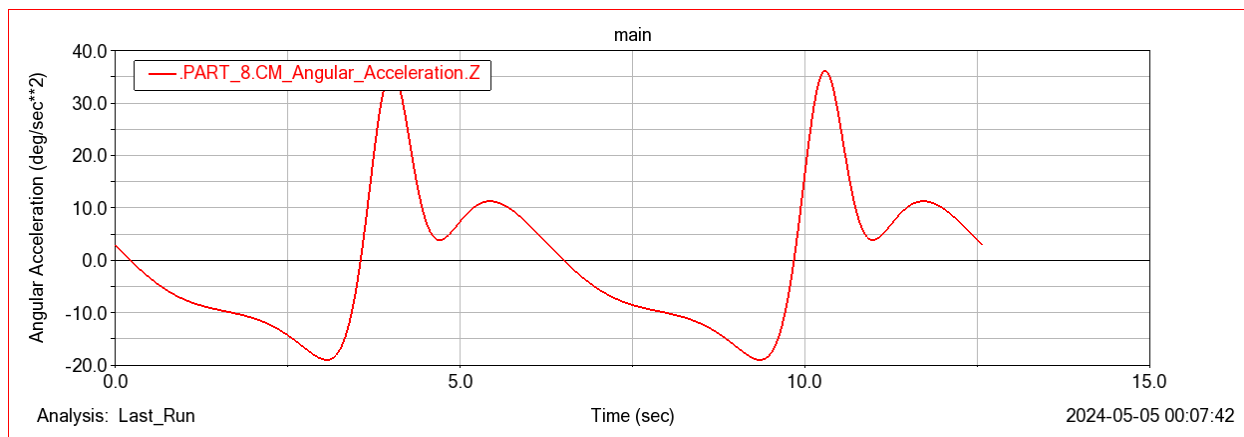
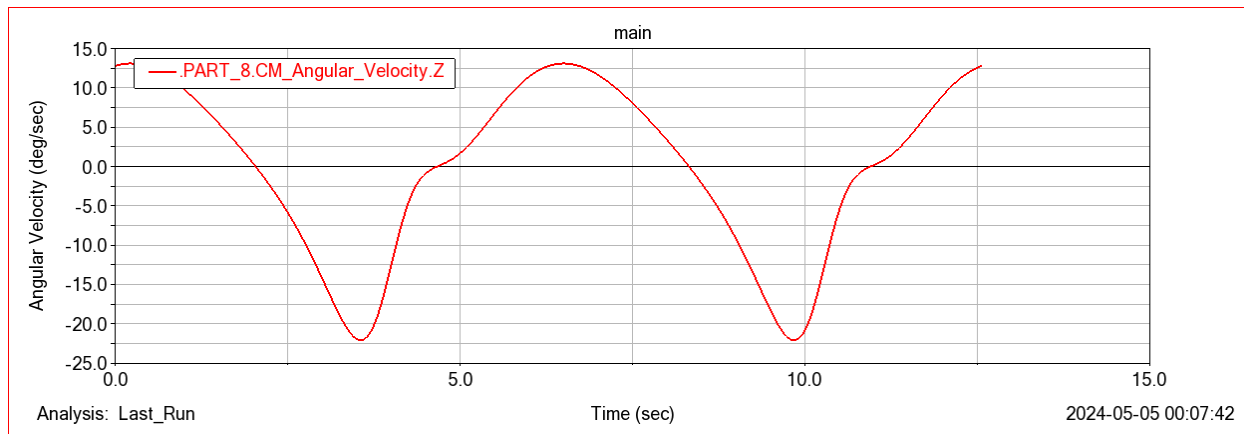




سرعت و شتاب لنیک ۴



سرعت و شتاب لینک ۵



سرعت و شتاب لینک ۶

همانطور که دیده میشود، نتایج با نتایج به دست آمده از متلب یکی است.

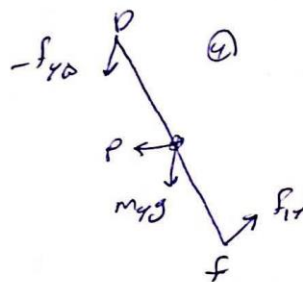
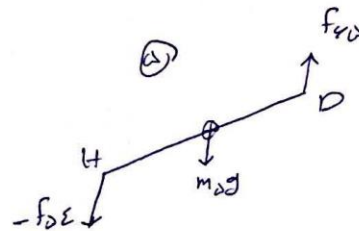
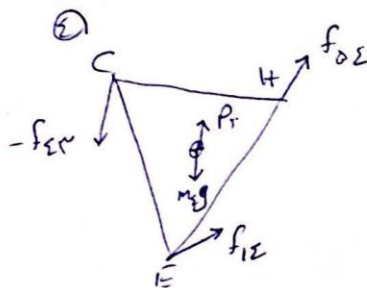
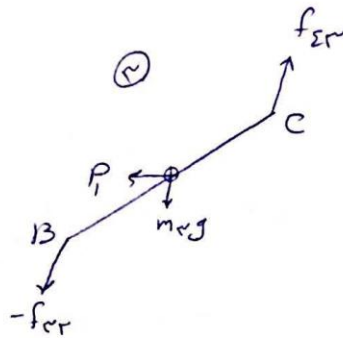
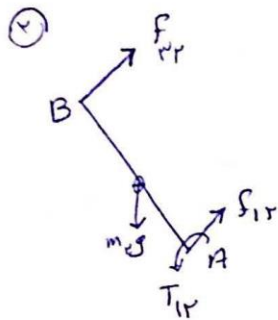


تحلیل دینامیکی مکانیزم

در این قسمت با تحلیل تئوری سپس نتایج متلب و نتایج نرم افزار تجاری مقایسه میشود و درباره علل خطا بحث میشود

2-1 تئوری

با استفاده از دیاگرام آزاد تعادل نیرویی را مینویسیم:



معادلات:

$$\begin{cases} F_{1r} + F_{2r} + m_1 g = m_1 a_{G1} \\ -\frac{\vec{r}_{B1}}{r} \times F_{1r} + \frac{\vec{r}_{C1}}{r} \times F_{2r} + T_{1r} = I_{1r} \alpha_{1r} \end{cases}$$

$$\begin{cases} F_{1E} + P_r + m_3 g - F_{2r} = m_3 a_{G3} \\ -\frac{\vec{r}_{BC}}{r} \times -F_{2r} + \frac{\vec{r}_{EC}}{r} \times F_{1E} = I_{3r} \alpha_{3r} \end{cases}$$

$$F_{3E} + F_{1E} - F_{2r} + m_3 g + P_r = m_3 a_{G3}$$

$$(r_C - r_{G3}) \times F_{2r} + (r_H - r_{G3}) \times F_{3E} + (r_E - r_{G3}) \times F_{1E} = I_{3r} \alpha_{3r}$$

معادلات برای $m_i a_{G_i}$ و $I_i \alpha_i$ در این مرحله به دست می آید.

با حل این معادلات می توانیم

$$\begin{cases} F_{4D} - F_{3E} + m_4 g = m_4 a_{G4} \\ -\frac{\vec{r}_{DH}}{r} \times F_{4D} + \frac{\vec{r}_{EH}}{r} \times -F_{3E} = I_{4r} \alpha_{4r} \end{cases}$$

$$\begin{cases} -F_{4D} + F_{1r} + P + m_5 g = m_5 a_{G5} \\ -\frac{\vec{r}_{DF}}{r} \times -F_{4D} + \frac{\vec{r}_{EF}}{r} \times F_{1r} = I_{5r} \alpha_{5r} \end{cases}$$



2-2 نتایج متلب

ماتریس ضرایب به صورت زیر می باشد:

A =

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 20 \sin(\theta_2) & -20 \cos(\theta_2) & -20 \sin(\theta_2) & 20 \cos(\theta_2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 50 \cos(\theta_3) & \sigma_9 & 50 \cos(\theta_3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_2 - \frac{65 \sigma_8}{3} + \sigma_1 & \frac{65 \sigma_8}{3} - \sigma_4 - \sigma_5 + \frac{95}{3} & \frac{65 \sigma_8}{3} + \frac{80 \sin(\theta_2)}{3} + \frac{200 \sin(\theta_1)}{3} & \frac{190}{3} - \frac{200 \cos(\theta_3)}{3} & \frac{65 \sigma_8}{3} - \frac{80 \cos(\theta_2)}{3} & \frac{130 \sigma_8}{3} - \sigma_2 - \sigma_1 & \sigma_3 + \sigma_4 + \frac{130 \sigma_8}{3} & \frac{95}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 60 \sin(\theta_3) & \sigma_{10} & 60 \sin(\theta_3) & \sigma_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_7 & \sigma_3 & \sigma_7 & \sigma_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

where

$$\sigma_1 = \frac{100 \sin(\theta_1)}{3}$$

$$\sigma_2 = \frac{40 \sin(\theta_2)}{3}$$

$$\sigma_3 = \frac{145 \cos(\theta_6)}{2}$$

$$\sigma_4 = \frac{100 \cos(\theta_3)}{3}$$

$$\sigma_5 = \frac{40 \cos(\theta_2)}{3}$$

$$\sigma_6 = \sin\left(\theta_4 + \frac{687722120450551}{562949953421312}\right)$$

$$\sigma_7 = -\frac{145 \sin(\theta_6)}{2}$$

$$\sigma_8 = \cos\left(\theta_4 + \frac{687722120450551}{562949953421312}\right)$$

$$\sigma_9 = -50 \sin(\theta_3)$$

$$\sigma_{10} = -60 \cos(\theta_3)$$

ماتریس معلومات به شرح زیر است:

Y =

$$\left(\begin{array}{c} -\frac{4 \cos(\theta_2) \omega_2^2}{5} - \frac{4 \alpha_2 \sin(\theta_2)}{5} \\ -\frac{4 \sin(\theta_2) \omega_2^2}{5} + \frac{4 \alpha_2 \cos(\theta_2)}{5} + \frac{7066436045720459}{18014398509481984} \\ \frac{3148244321913097 \alpha_2}{590295810358705651712} \\ 200 - \frac{\omega_3^2 \sigma_6}{10} - \frac{\alpha_3 \sigma_5}{10} \\ \frac{\alpha_3 \sigma_6}{10} - \frac{\omega_3^2 \sigma_5}{10} + \frac{8833045057150575}{9007199254740992} \\ \frac{\alpha_3}{12000} \\ -\frac{3344861978606579 \alpha_4 \sigma_2}{1152921504606846976} - \frac{3344861978606579 \omega_4^2 \sigma_1}{1152921504606846976} \\ \frac{3344861978606579 \alpha_4 \sigma_1}{1152921504606846976} - \frac{3344861978606579 \omega_4^2 \sigma_2}{1152921504606846976} - \frac{57637874757661723249}{288230376151711744} \\ \alpha_4 \left(\frac{6859 \sqrt{\sigma_8}}{288000} + \frac{19 \sigma_8^{3/2}}{7200000} + \frac{19 \sigma_{10}^2 \sqrt{\sigma_8}}{7200000 \sigma_9} - \frac{361 \sigma_{10} \sqrt{\sigma_8}}{1440000 \sqrt{\sigma_9}} \right) \\ -\frac{3 \alpha_5 \sigma_4}{25} - \frac{3 \omega_5^2 \sigma_3}{25} \\ \frac{3 \alpha_5 \sigma_3}{25} - \frac{3 \omega_5^2 \sigma_4}{25} + \frac{5299827034290345}{4503599627370496} \\ \frac{9 \alpha_5}{62500} \\ \frac{841 \alpha_6 \sin(\theta_6)}{80} + \frac{29 \omega_6^2 \sigma_7}{200} + 200 \\ \frac{841 \sin(\theta_6) \omega_6^2}{80} - \frac{29 \alpha_6 \sigma_7}{200} + \frac{6403957666434167}{4503599627370496} \\ \frac{2343216881321365 \alpha_6}{9223372036854775808} - 20 \end{array} \right)$$

where

$$\sigma_1 = \frac{80 \cos(\theta_2)}{3} + \frac{200 \cos(\theta_3)}{3} + \frac{65 \cos\left(\theta_4 + \frac{687722120450551}{562949953421312}\right)}{3} + \frac{95}{3}$$

$$\sigma_2 = \frac{65 \sin\left(\theta_4 + \frac{687722120450551}{562949953421312}\right)}{3} + \frac{80 \sin(\theta_2)}{3} + \frac{200 \sin(\theta_3)}{3}$$

$$\sigma_3 = 60 \cos(\theta_5) - 145 \cos(\theta_6) + 280$$

$$\sigma_4 = 60 \sin(\theta_5) - 145 \sin(\theta_6)$$

$$\sigma_5 = 40 \sin(\theta_2) + 50 \sin(\theta_3)$$

$$\sigma_6 = 40 \cos(\theta_2) + 50 \cos(\theta_3)$$

$$\sigma_7 = \frac{145 \cos(\theta_6)}{2} - 280$$

$$\sigma_8 = 9025 - \frac{\sigma_{10}^2}{\sigma_9}$$

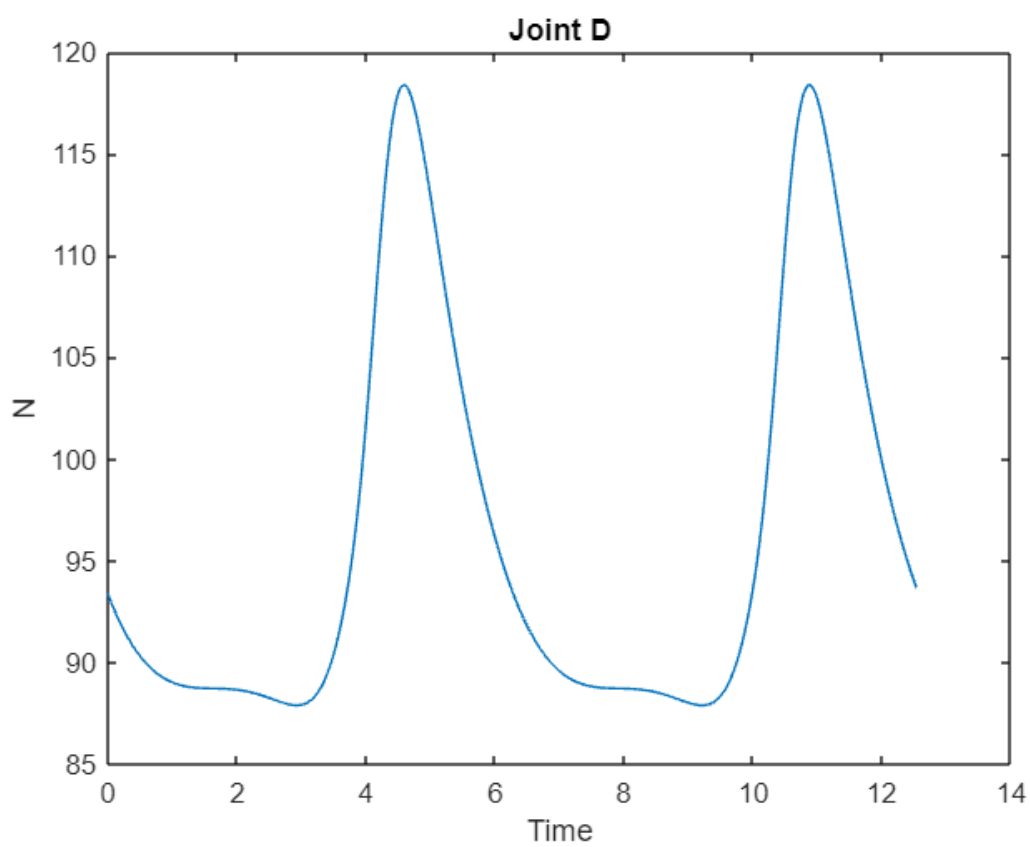
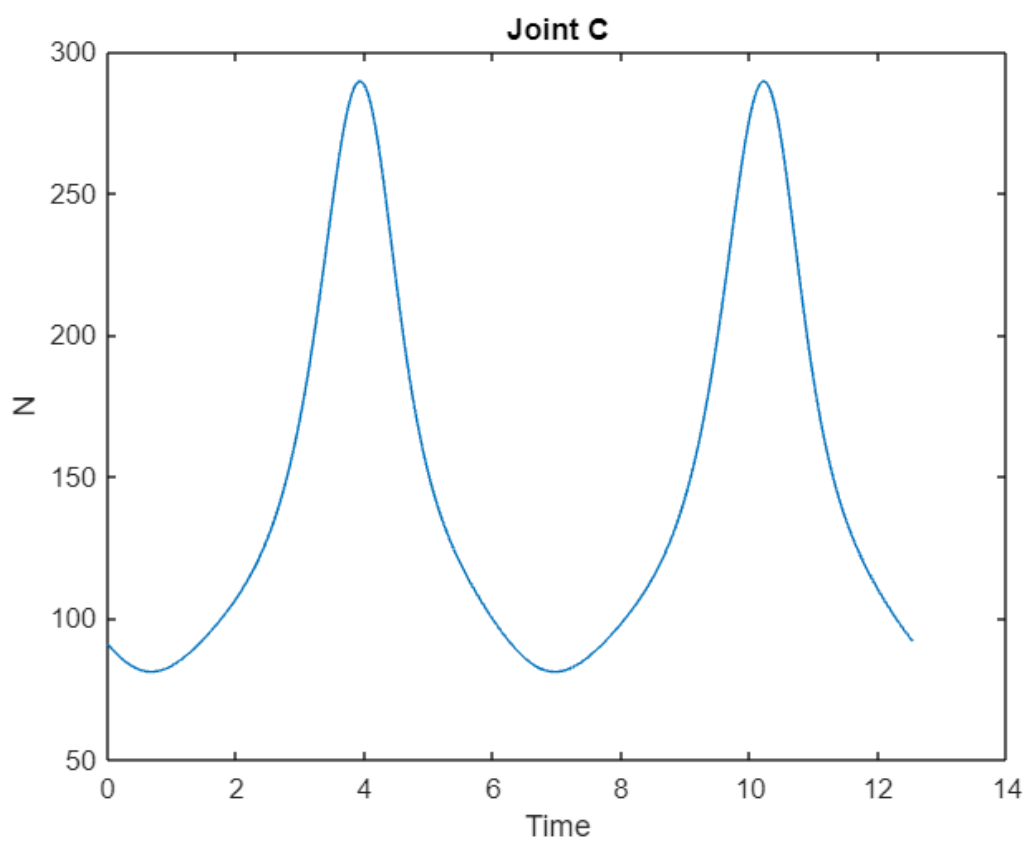
$$\sigma_9 = 9025 |\sigma_{12}|^2 + 9025 |\sigma_{11}|^2$$

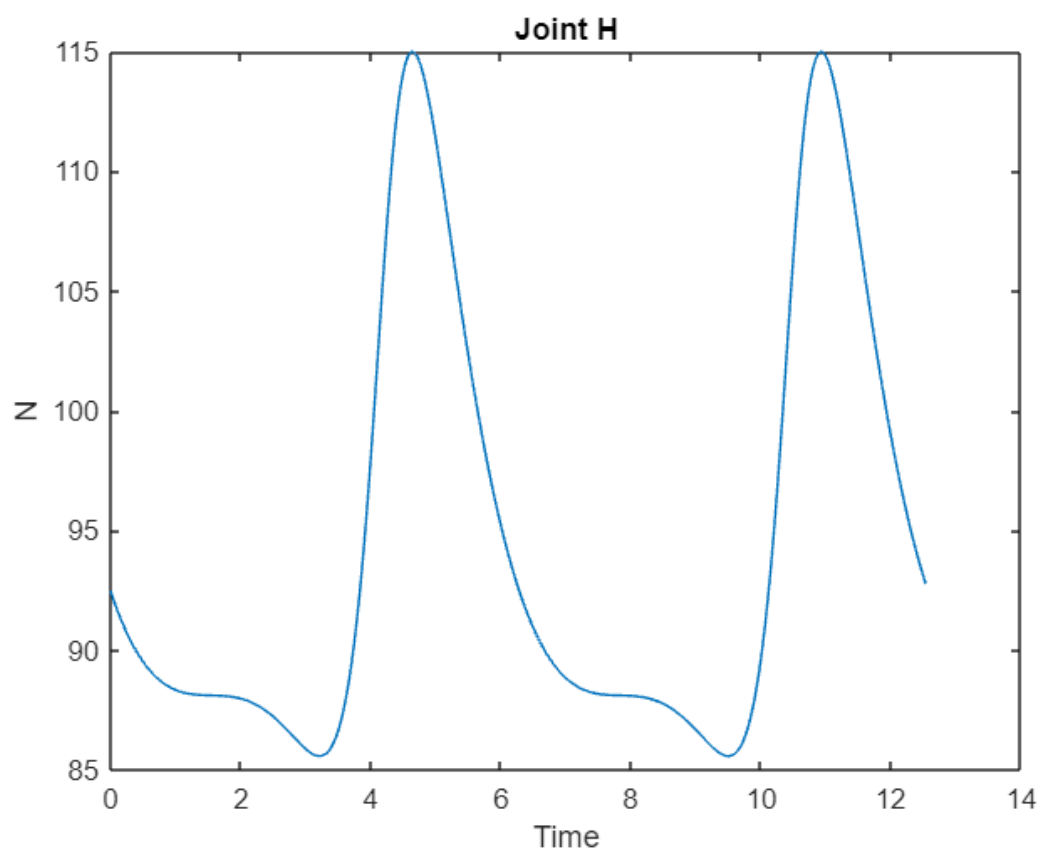
$$\sigma_{10} = 9025 \cos(\theta_4) \sigma_{12} + 9025 \sin(\theta_4) \sigma_{11}$$

$$\sigma_{11} = \sin\left(\theta_4 - \frac{6289843153696131}{9007199254740992}\right)$$

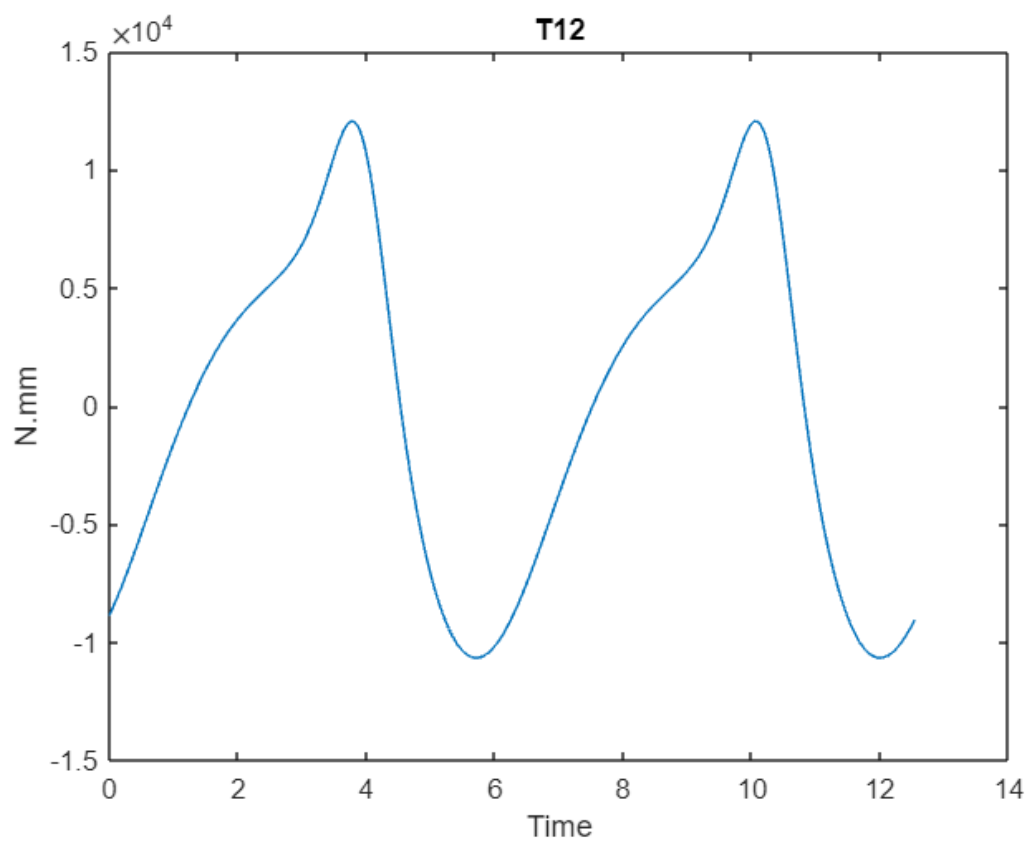
$$\sigma_{12} = \cos\left(\theta_4 - \frac{6289843153696131}{9007199254740992}\right)$$

برای جوینت های خواسته شده نمودار نیرو ها به شرح زیر است:

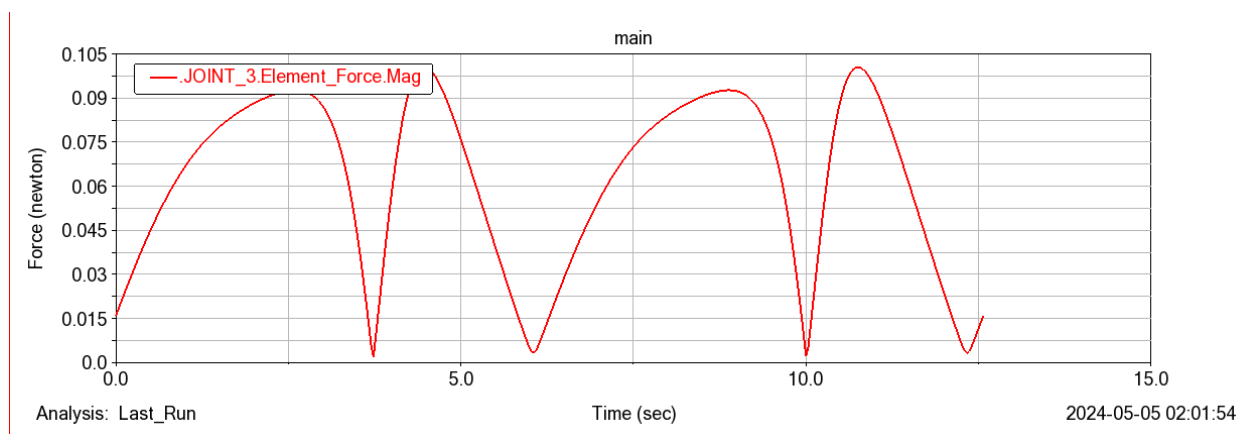




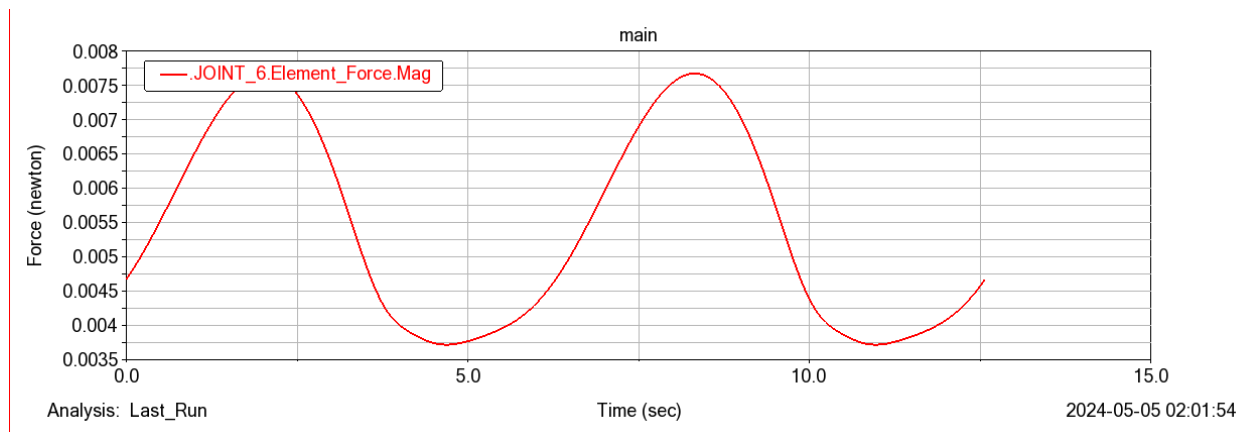
و در نهایت نمودار مربوط به گشتاور ورودی به میله ۲:



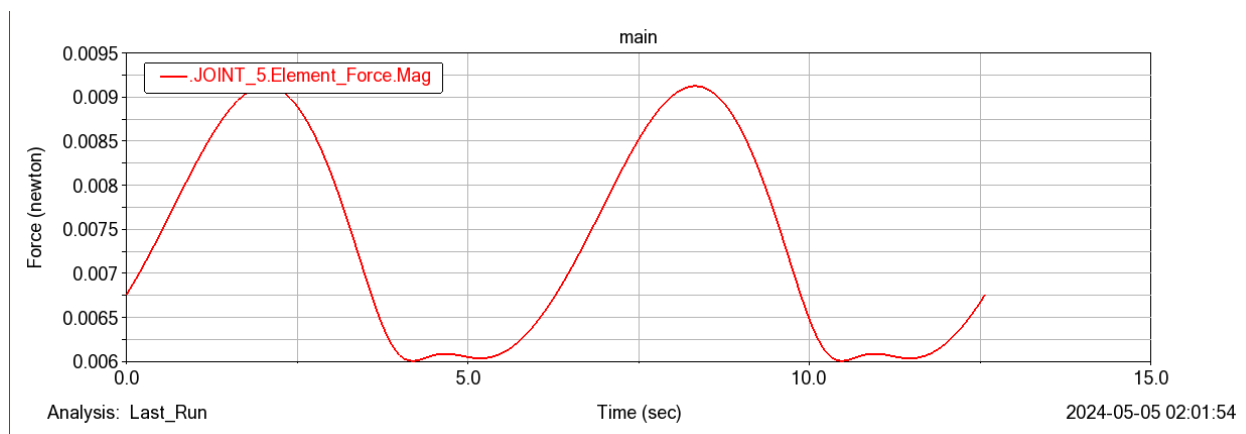
2-2-1 نتایج نرم افزار تجاری



نیرو در جوینت C



نیرو در جوینت D



نیرو در جوینت H

همانطور که مشاهده میشود نتایج نرم افزار تجاری و متلب به یک دیگر نزدیک نیستند

2-2-2 بحث و بررسی

علت اینکه نرم افزار تجاری و متلب در قسمت تحلیل نیروها دچار اختلاف هستند، میتواند ناشی از چند عامل باشد:



- سه بعدی در نظر گرفتن اشکال در آدامز و جرم و ممان متفاوت نسبت به متلب همچنین مرکز جرم متفاوت
- وارد نشدن و عدم لحاظ گشتاور ورودی به سیستم و استفاده سرعت زاویه ای ثابت به جای گشتاور مربوط به آن

منابع

- <https://www.efunda.com/math/areas/triangle.cfm>
- Plecnik, Mark M, McCarthy, J Michael: Vehicle Suspension Design Based on a Six-Bar Linkage