



## عنوان درس دینامیک ماشین

عنوان گزارش  
پروژه شبیه سازی مکانیزم شش میله

دانشجو  
مهدی عبدالله چالکی

استاد  
دکتر راستگو

تاریخ تحویل  
۱۳۹۹/۳/۲۱

دانشکده مهندسی مکانیک  
پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران  
نیم‌سال دوم سال تحصیلی ۹۹-۱۳۹۸



## چکیده

گزارشی که پیش روی شماست، مربوط به شبیه سازی یک مکانیزم شش میله است که از یک مکانیزم چهار میله ساده به همراه یک مکانیزم لغزنده تشکیل شده است. هدف از انجام این پروژه، محاسبه سرعت و شتاب هر یک از اعضای مکانیزم، محاسبه و رسم نیروهای وارد بر مفصل‌ها، نمایش حرکت مکانیزم به صورت انیمیشن در نرم افزار Matlab و به دست آوردن نمودار سرعت و شتاب تعدادی از نقاط آن بوده است. همچنین به عنوان بخش پایانی پروژه، شبیه سازی مکانیزم توسط نرم افزار تجاری Adams نیز صورت گرفته است و نتایج و نمودارهای بخش قبل، در این مرحله نیز به دست آمده است و نتایج این دو با یکدیگر مقایسه شده است.

**لغات کلیدی:** مکانیزم - شبیه سازی - Matlab - سرعت - شتاب - نیرو - Adams



## فهرست مطالب

۴	.....	مقدمه	۱
۵	.....	تعریف صورت پروژه	۲
۶	.....	تعیین ابعاد و زوایای مکانیزم	۳
۷	.....	محاسبه سرعت و شتاب زاویه ای اعضا	۴
۹	.....	شبیه سازی در متلب	۵
۹	.....	کد متلب	۵-۱
۹	.....	بخش تحلیل استاتیکی	۵-۱-۱
۱۰	.....	بخش تحلیل دینامیکی	۵-۱-۲
۱۳	.....	نمودارهای نهایی متلب	۵-۲
۱۶	.....	شبیه سازی در ADAMS	۶
۶	.....	نمودار سرعت	۶-۱
۱۸	.....	نمودار شتاب	۶-۲
۱۹	.....	نمودار نیروها و گشتاور	۶-۳
۲۱	.....	نتیجه گیری	۷
۲۲	.....	مراجع	۸



## فهرست شکل ها

شکل ۱: مکانیزم ۶ میله .....	۵
شکل ۲: مکانیزم در SAM .....	۶
شکل ۳: حلقه اول .....	۷
شکل ۴: حلقه دوم .....	۷
شکل ۵: حل اهرم ۴ میله با روش مثلثی .....	۹
شکل ۶: میله ۲ .....	Error! Bookmark not defined.
شکل ۷: میله ۳ .....	Error! Bookmark not defined.
شکل ۸: میله ۴ .....	۱۱
شکل ۹: میله ۵ .....	۱۲
شکل ۱۰: میله ۶ .....	۱۲
شکل ۱۱: نمودار سرعت مطلق نقاط .....	Error! Bookmark not defined.
شکل ۱۲: نمودار شتاب مطلق نقاط .....	Error! Bookmark not defined.
شکل ۱۳: نمودار نیروی بخش اول مفاصل .....	۱۵
شکل ۱۴: نمودار نیروی بخش دوم مفاصل .....	۱۵
شکل ۱۵: شبیه سازی مکانیزم در Adams .....	Error! Bookmark not defined.
شکل ۱۶: نمودار سرعت نقاط B,C,F5,F6 .....	۱۷
شکل ۱۷: نمودار شتاب نقاط B,C,F5,F6 .....	۱۸
شکل ۱۸: نمودار نیروهای ۱۲ و ۲۳ و ۳۴ و ۳۵ .....	Error! Bookmark not defined.
شکل ۱۹: نمودار نیروهای ۴۱ و ۵۶ و ۶۱ و گشتاور ۲ .....	۲۰



## ۱- مقدمه

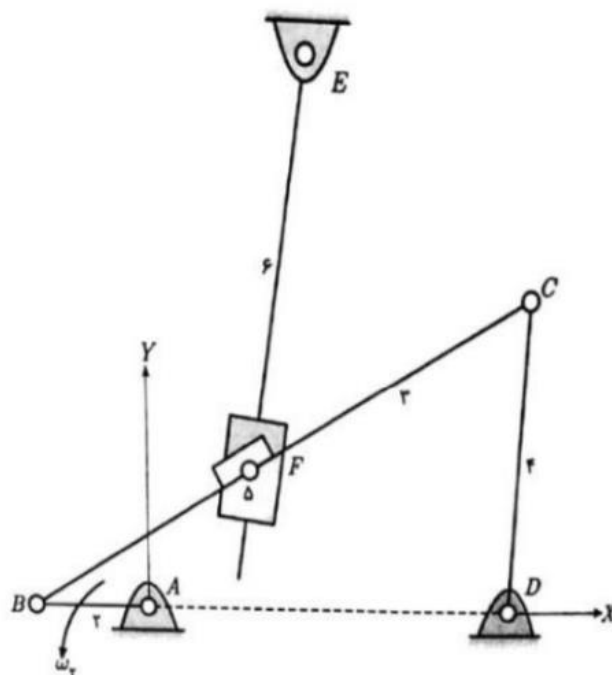
در طول تاریخ و پس از پیشرفت علم مکانیک، بشر توانست با استفاده از مکانیزم‌ها، بسیاری از کارها را راحت تر انجام دهد و بعد ها با اختراع ماشین ها، توانست بسیاری از کارها را به صورت مکانیزه و خودکار انجام دهد. از این رو مکانیزم‌ها در زندگی ما نقش بسیار مهمی دارند.

در این پروژه، قصد داریم یک مکانیزم ۶ میله را در کامپیوتر شبیه سازی کنیم. بدین وسیله، می‌توان بدون نیاز به محاسبات طولانی، سرعت و شتاب و نیروهای موجود در یک مکانیزم را به صورت کامل بدست آورد. برای انجام شبیه سازی، یک بار از **MATLAB** استفاده میکنیم که نیاز به برنامه نویسی دارد و با دقت بالایی نتایج را به ما میدهد. سپس دقت نتایج را با یک نرم افزار شبیه سازی تجاری مانند **ADAMS** نیز ارزیابی میکنیم. مشاهده میشود که دو روش، نتایج تقریباً یکسانی به ما خواهند داد.

## ۲- تعریف صورت پروژه

### شبیه سازی مکانیزم شش میله

مکانیزم مدلسازی شده در این پروژه، به شکل زیر است:



شکل ۱ - مکانیزم ۶ میله

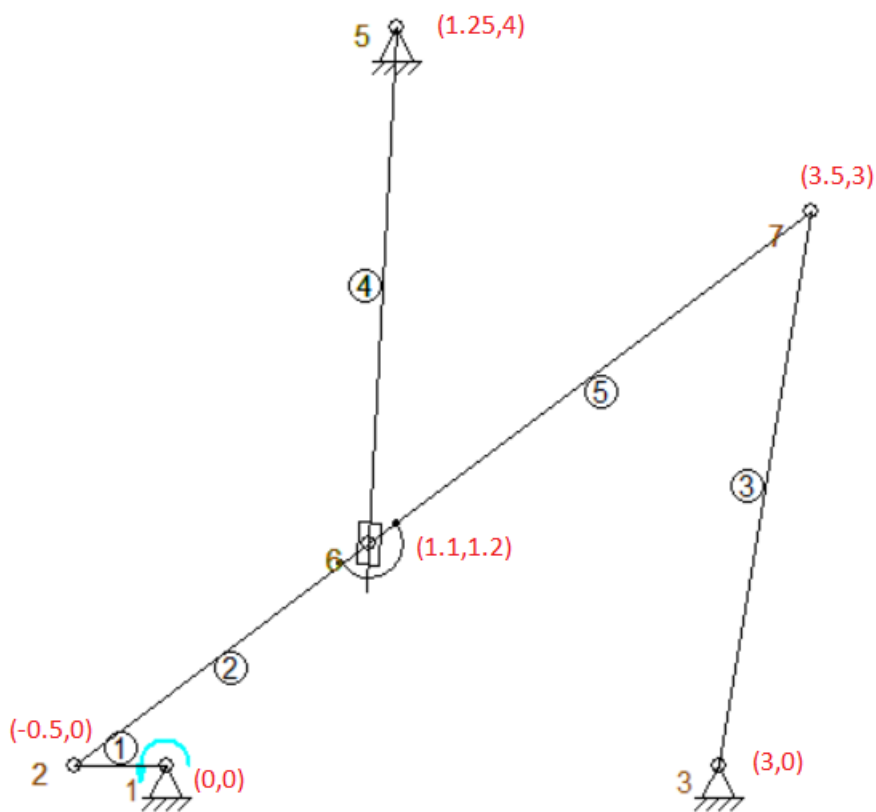
مراحل زیر برای مدلسازی مکانیزم در ادامه طی شده است:

- ۱- ابتدا ابعاد و زوایای مکانیزم به گونه‌ای تعیین شده است که ۴ میله (۱۲۳۴) بصورت لنگ و آونگ به حرکت در بیاید (میله ۲ کامل بچرخد).
  - ۲- با انتخاب حلقه های برداری مناسب، سرعت و شتاب هر یک از عضو های این مکانیزم محاسبه شده است. (سرعت زاویه‌ای عضو ۲ ثابت و برابر ۱ قرار داده شده است).
  - ۳- حرکت این مکانیزم در نرم افزار متلب مدلسازی و به صورت انیمیشن نمایش داده شده است.
  - ۴- نمودار سرعت و شتاب مطلق نقاط C, F, B, F5, F6 به دست آمده و نمایش داده شده است.
  - ۵- نیروهای وارد بر مفاصل محاسبه و رسم شده است.
  - ۶- تمامی مراحل بالا در نرم افزار تجاری Adams مدلسازی و نتایج مقایسه گردیده است.
- \* مدت زمان تحلیل و گام های زمانی برابر ۱۰ و ۰.۵۰ ثانیه قرار داده شده است.
- \* چگالی خطی میله‌ها برابر 1 Kg/m و جرم لغزنده نیز ۱ کیلوگرم در نظر گرفته شده است

### ۳- تعیین ابعاد و زوایای مکانیزم

در مرحله اول از مدل سازی، برای تعیین و حصول اطمینان از اندازه هایی که برای اجزای مکانیزم در نظر گرفته شده است، شبیه سازی اولیه مکانیزم در نرم افزار SAM صورت گرفت تا با جا به جایی اجزای مختلف، مکانیزم به صورت مورد نظر کار کند.

به این ترتیب، نقاط pin در مختصات مناسبی قرار داده شد و اندازه هر یک از اعضا، با روابط ریاضی مناسب به دست آمده است.



شکل ۲ - مکانیزم در SAM

اندازه های زیر برای هر یک از این اعضا به دست آمده است:

$$AB = 0.5 \quad BC = 5 \quad CD = 3.04 \quad AD = 3 \quad BF = 2 \quad CF = 3 \quad EF = 2.8$$

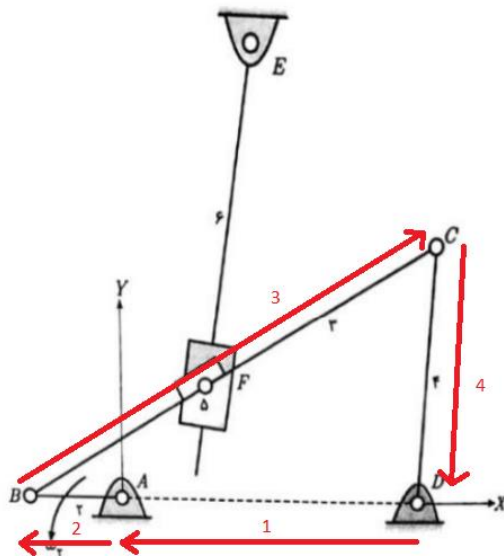
طول کلی میله ۶ نیز ۳.۵ متر در نظر گرفته شده است.

زاویه هر یک از اعضا در بخش نوشتن معادلات با حلقه ها نیز همانند دایره مثلثاتی مرسوم محاسبه می شود.

## ۴- محاسبه سرعت و شتاب زاویه ای اعضا

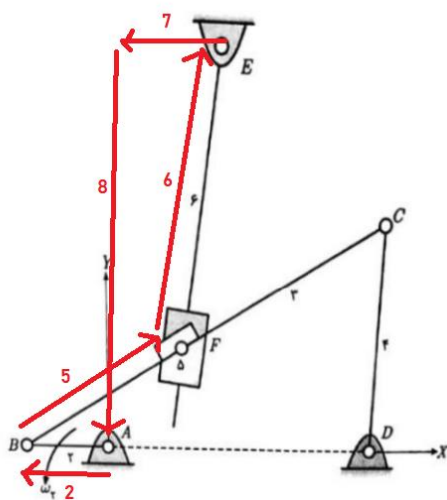
### انتخاب حلقه های برداری مناسب

برای به دست آوردن شتاب و سرعت زاویه ای تمامی اعضا، از حلقه های برداری در سه مرحله استفاده شده است. در مرحله اول، مکانیزم چهار میله (۱۲۳۴) انتخاب شده است. در این مرحله، اندازه زوایا، سرعت زاویه ای و شتاب زاویه ای اعضای ۳ و ۴ به دست می آید:



شکل ۳ - حلقه اول

در مرحله دوم، حلقه مثلثی (۲۵۶۷۸) انتخاب شده است. در این مرحله، اندازه طول و زاویه EF و مشتقات اول و دوم آن به دست می آید:



شکل ۴ - حلقه دوم





حلقه اول:

$$r_1 e^{i\pi} + r_2 e^{i\theta_2} + r_3 e^{i\theta_3} + r_4 e^{i\theta_4} = 0$$

$$r_2 i \dot{\theta}_2 e^{i\theta_2} + r_3 i \dot{\theta}_3 e^{i\theta_3} + r_4 i \dot{\theta}_4 e^{i\theta_4} = 0$$

$$r_2 e^{i\theta_2} (i \ddot{\theta}_2 - \dot{\theta}_2^2) + r_3 e^{i\theta_3} (i \ddot{\theta}_3 - \dot{\theta}_3^2) + r_4 e^{i\theta_4} (i \ddot{\theta}_4 - \dot{\theta}_4^2) = 0$$

از این حلقه، زاویه تتا ۳ و مشتقات اول و دوم آن بدست می آید.

حلقه دوم:

در این حلقه، زاویه تتا ۵، برابر زاویه تتا ۳ است که در مرحله قبل به دست آمد.

همچنین با توجه به تعریف مساله و پارامترهایی که در نظر گرفتیم، اندازه r5، دو پنجم اندازه r3 است.

$$r_2 e^{i\theta_2} + r_5 e^{i\theta_5} + r_6 e^{i\theta_6} + r_7 e^{i\pi} + r_8 e^{\frac{i3\pi}{2}} = 0$$

$$r_2 i \dot{\theta}_2 e^{i\theta_2} + r_5 i \dot{\theta}_5 e^{i\theta_5} + (r_6 + r_6 i \dot{\theta}_6) e^{i\theta_6} = 0$$

$$r_2 e^{i\theta_2} (i \ddot{\theta}_2 - \dot{\theta}_2^2) + r_5 e^{i\theta_5} (i \ddot{\theta}_5 - \dot{\theta}_5^2) + e^{i\theta_6} (i r_6 \ddot{\theta}_6 - r_6 \dot{\theta}_6^2 + \ddot{r}_6 + 2 \dot{r}_6 i \dot{\theta}_6) = 0$$

## ۵- شبیه سازی در Matlab

### ۴-۱- Matlab

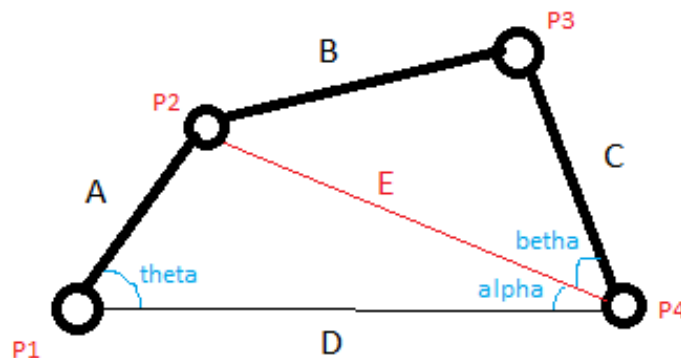
#### ۴-۱-۱- بخش تحلیل استاتیکی

در این بخش به صورت اجمالی به بررسی کد می پردازیم:

در نخستین گام، طول اجزای مکانیزم که قبلاً محاسبه شده بود، برای برنامه تعریف می شود.

سپس گام های زمانی و سرعت زاویه ای عضو ۲ تعریف می شود. مختصات مکانی پین های ثابت نیز در این بخش وارد شده است.

در بخش بعدی، روابط زوایا و روابط مثلثاتی مورد نیاز باری مشخص کردن مختصات هر نقطه مشخص شده است.



شکل ۵ - حل اهرم ۴ میله با روش مثلثی

```
P2 = A*[cos(theta); sin(theta)];
E = sqrt(A^2 + D^2 - 2*A*D*cos(theta));
alfa = asin(A*sin(theta)./E);
betha = acos((E.^2 + C^2 - B^2)./(2*E*C));
P3 = [D - C*cos(alfa+betha); C*sin(alfa+betha)];
```

نقطه P5 در برنامه نوشته شده مربوط به نقطه F صورت پروژ بر روی میله BC است. نقطه P6، پین E در صورت پروژ است. نقطه P7 نیز نقطه F صورت پروژ بر روی میله ۶ است. مختصات نقاط P5 و P7 به کمک دیگر نقاط در هر لحظه تعیین می شود.

در گام بعدی، مکان، سرعت و شتاب هر یک از نقاط متحرک (۲، ۳، ۵ و ۷) در هر یک از گام های زمانی محاسبه می شود. برای نمایش مکانیزم به صورت انیمیشن، باید در هر گام زمانی (تا قبل از زمان نهایی) مکان نقاط و هر یک از میله ها رسم شده و سپس پاک شوند تا در گام بعدی، مختصات جدید به نمایش دربیاید.

در بخش نهایی نیز کد مربوط به رسم نمودار سرعت و شتاب مطلق هر یک از نقاط خواسته شده در صورت پروژ قرار دارد.

#### ۴-۱-۲- بخش تحلیل دینامیکی

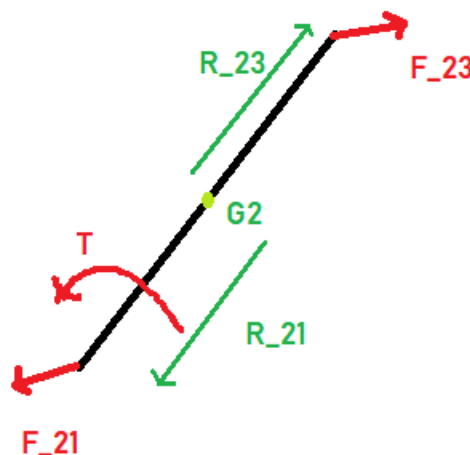
در بخش اول تحلیل دینامیکی، بازوهای گشتاور در دو راستای X و Y محاسبه شده است. این امر با انجام عملیات برداری بر روی بردارهای موقعیت مفاصل که در بخش قبلی بدست آمد، صورت می گیرد.

بخش دوم، مربوط به محاسبه شتاب مرکز جرم هر میله است. این بخش نیز با پیدا کردن مرکز جرم هر میله با عملیات برداری و دو بار مشتق گیری از آن حاصل می شود.

مورد بعدی که باید محاسبه شود، شتاب زاویه ای میله ها است. که در بخش alphas موجود در کد، محاسبه شده است.

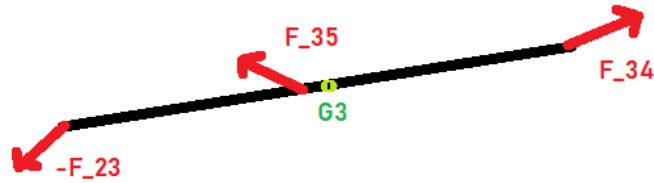
در بخش بعدی، جرم و ممان اینرسی هر یک از میله ها حول مرکز جرم آن بدست آمده است.

در بخش انتهایی نیز ماتریس های لازم برای حل معادلات گشتاور و نیرو بدست آمده اند و ماتریس مجهول نیروها به این روش محاسبه و رسم شده است.



شکل ۶ - میله ۲

$$\begin{aligned} F_{21}^x + F_{23}^x &= m_2 * a_2^x \\ F_{21}^y + F_{23}^y &= m_2 * a_2^y \\ T + (R_{21}^x * F_{21}^y - R_{21}^y * F_{21}^x) + (R_{23}^x * F_{23}^y - R_{23}^y * F_{23}^x) &= I_{2} * \alpha_2 \end{aligned}$$



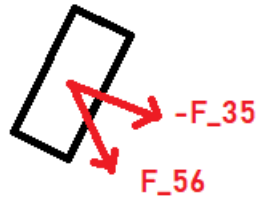
شکل ۷ - میله ۳

$$\begin{aligned} -F_{23}^x + F_{34}^x + F_{35}^x &= m_3 * a_{3x} \\ -F_{23}^y + F_{34}^y + F_{35}^y &= m_3 * a_{3y} \\ -(R_{32}^x * F_{23}^y - R_{32}^y * F_{23}^x) + (R_{34}^x * F_{34}^y - R_{34}^y * F_{34}^x) \\ + (R_{35}^x * F_{35}^y - R_{35}^y * F_{35}^x) &= I_3 * \alpha_3 \end{aligned}$$



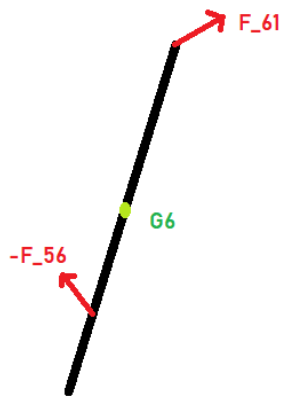
شکل ۸ - میله ۴

$$\begin{aligned} -F_{34}^x + F_{41}^x &= m_4 * a_{4x} \\ -F_{34}^y + F_{41}^y &= m_4 * a_{4y} \\ -(R_{43}^x * F_{34}^y - R_{43}^y * F_{34}^x) + (R_{41}^x * F_{41}^y - R_{41}^y * F_{41}^x) &= I_4 * \alpha_4 \end{aligned}$$



شکل ۹ - میله ۵

$$\begin{aligned} -F_{35}^x + F_{56}^x &= m_5 * a_5^x \\ -F_{35}^y + F_{56}^y &= m_5 * a_5^y \\ F_{56}^x * \cos\theta_6 + F_{56}^y * \sin\theta_6 &= 0 \end{aligned}$$

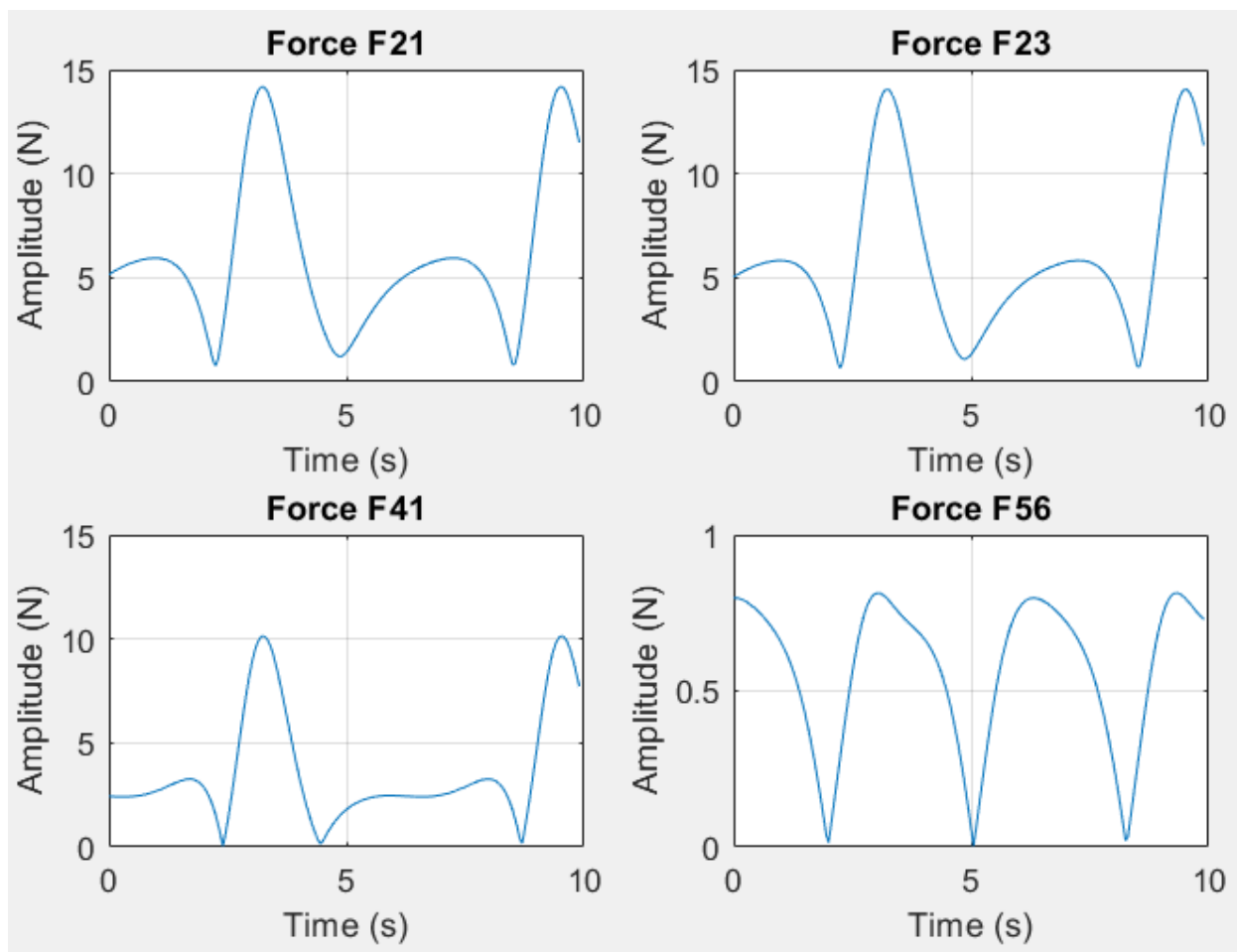


شکل ۱۰ - میله ۶

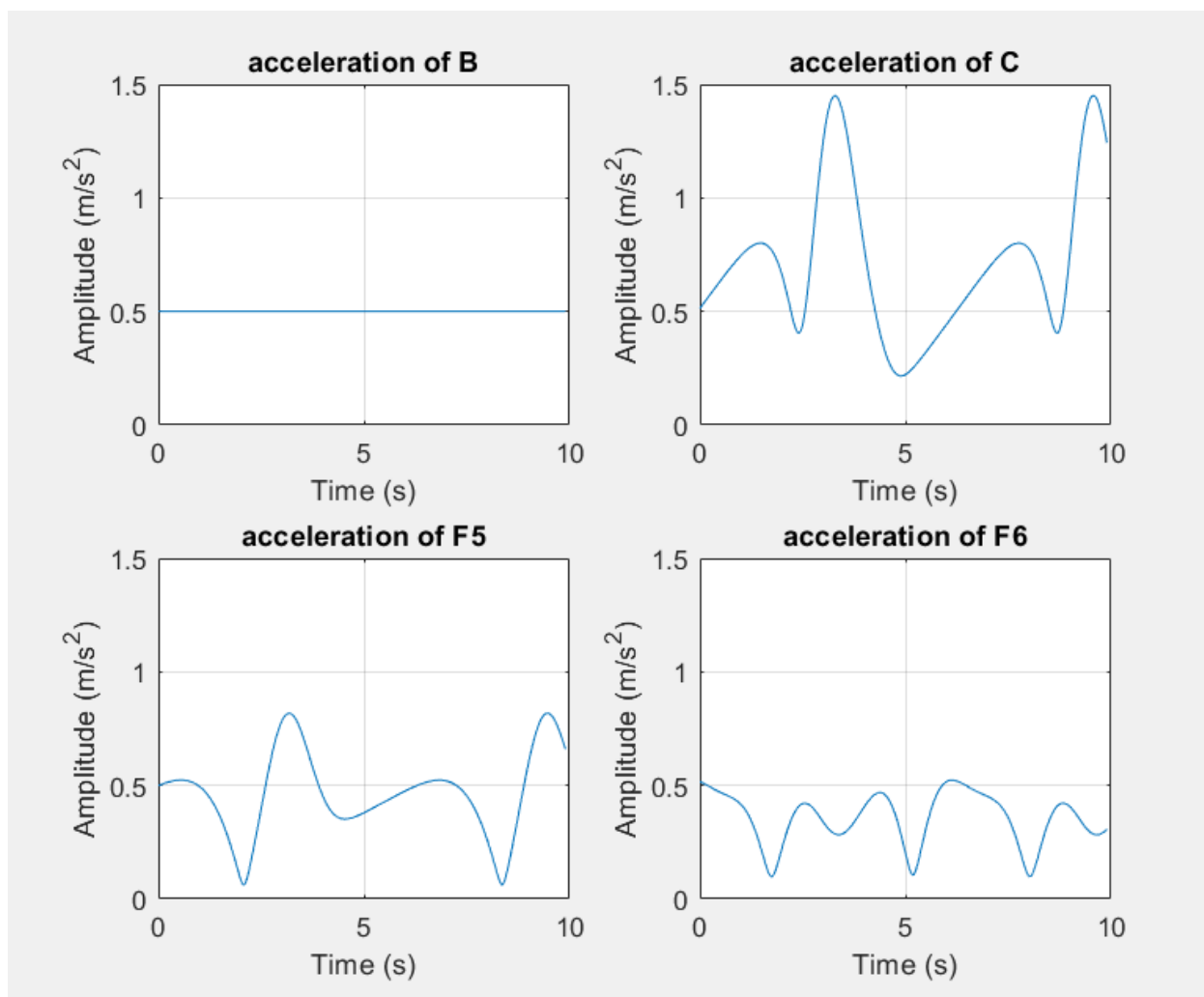
$$\begin{aligned} -F_{56}^x + F_{61}^x &= m_6 * a_6^x \\ -F_{56}^y + F_{61}^y &= m_6 * a_6^y \\ -(R_{65}^x * F_{56}^y - R_{65}^y * F_{56}^x) + (R_{61}^x * F_{61}^y - R_{61}^y * F_{61}^x) &= I_6 * \alpha_6 \end{aligned}$$

#### ۴-۲- نمودارهای نهایی Matlab

در این بخش، ابتدا نمودارهای سرعت و شتاب حاصل از اجرای کد متلب را برای نقاط خواسته شده، رسم کرده ایم.

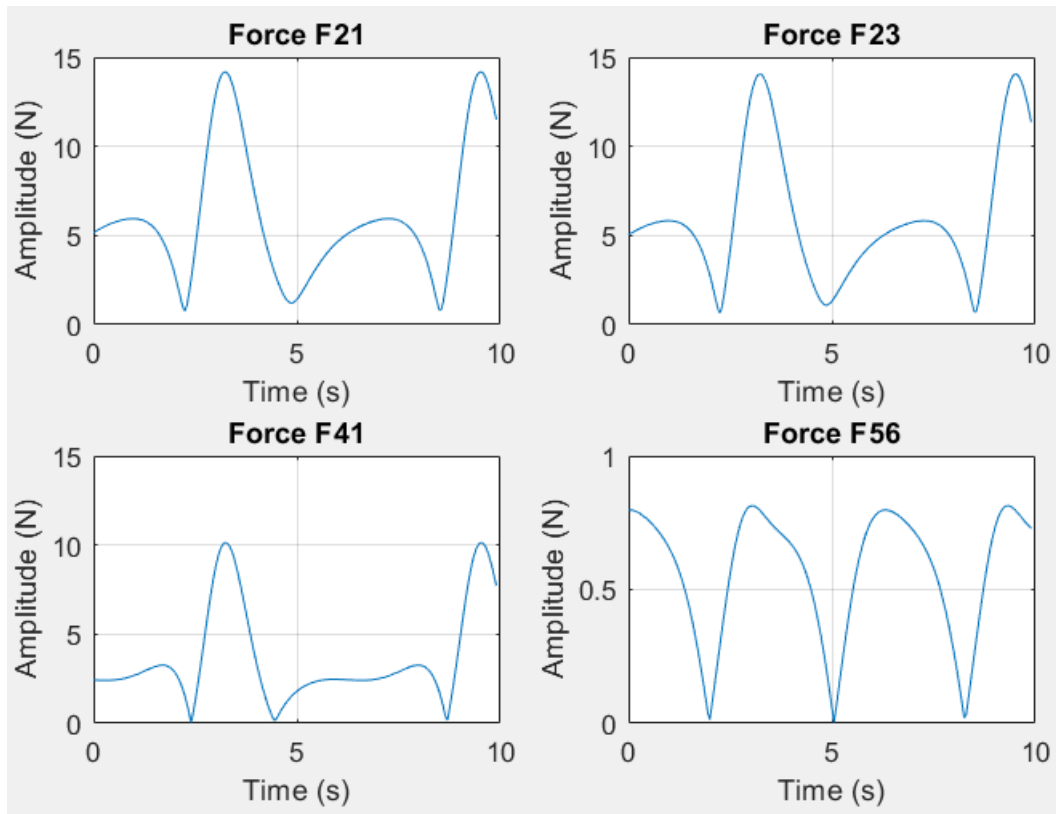


شکل ۱۱ - نمودار سرعت مطلق نقاط

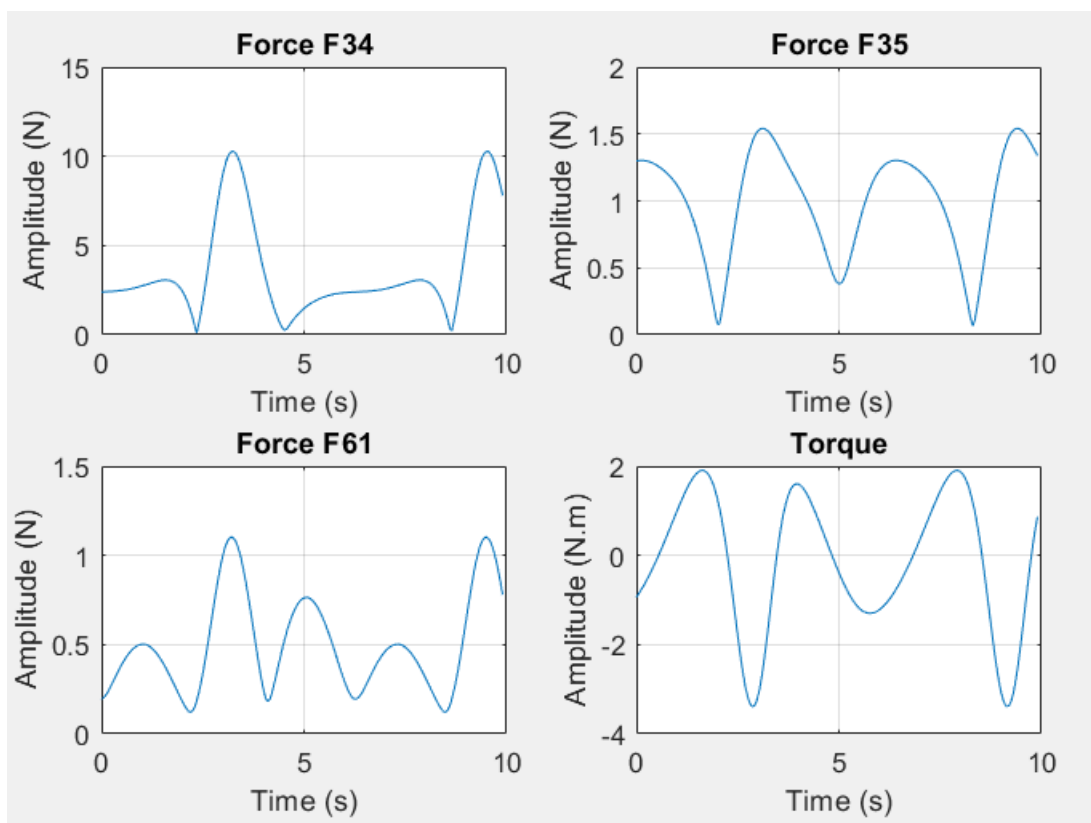


شکل ۱۲ نمودار شتاب مطلق نقاط

و نمودارهای بعدی نیز نیروی مفاصل هستند که مربوط به اجرای بخش تحلیل دینامیکی برنامه است که در دو تصویر ارائه شده اند.



شکل ۱۳ - نمودار نیروی بخش اول مفاصل

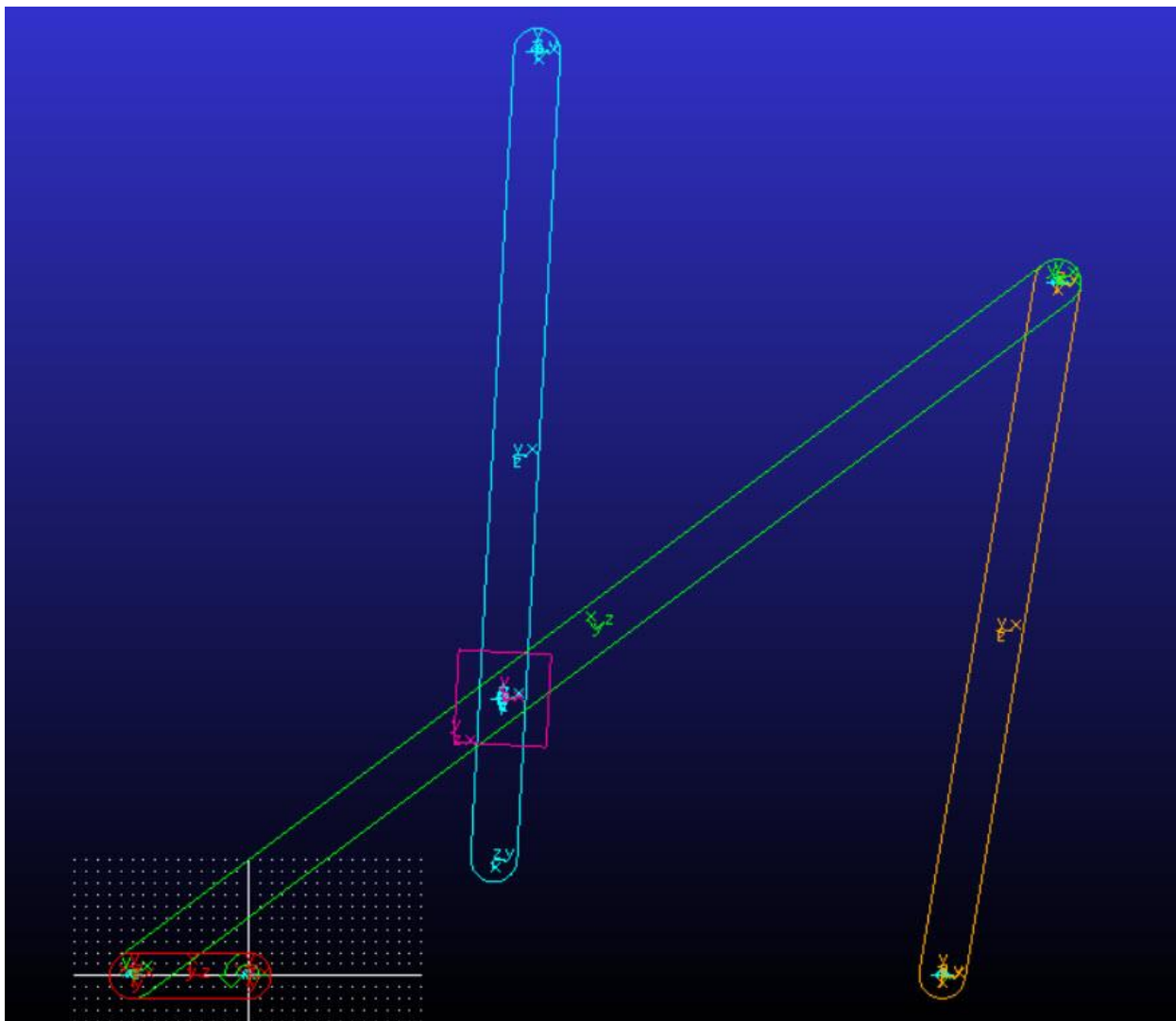


شکل ۱۴ - نمودار نیروی بخش دوم مفاصل



## ۶- شبیه سازی در Adams

در آخرین گام از مراحل مدلسازی مکانیزم، به شبیه سازی آن در نرم افزار تجاری Adams می پردازیم. ابتدا مکانیزم مورد نظر را در نرم افزار رسم کرده و نقاط آنرا به مختصات مورد نظر میبریم. سپس نقاط اتصال به زمین را پین می کنیم.

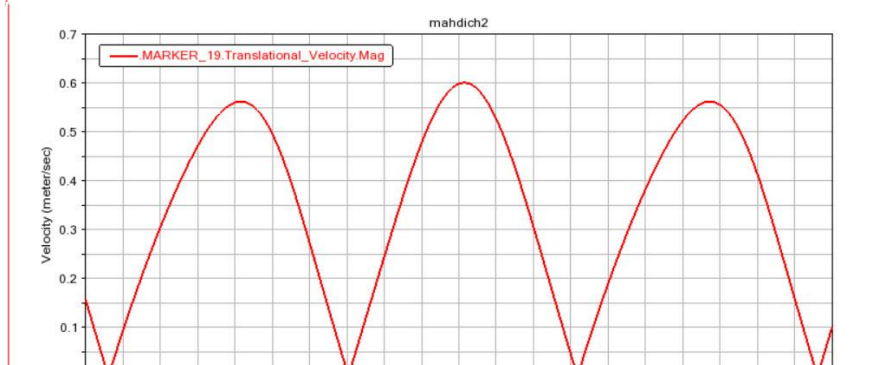
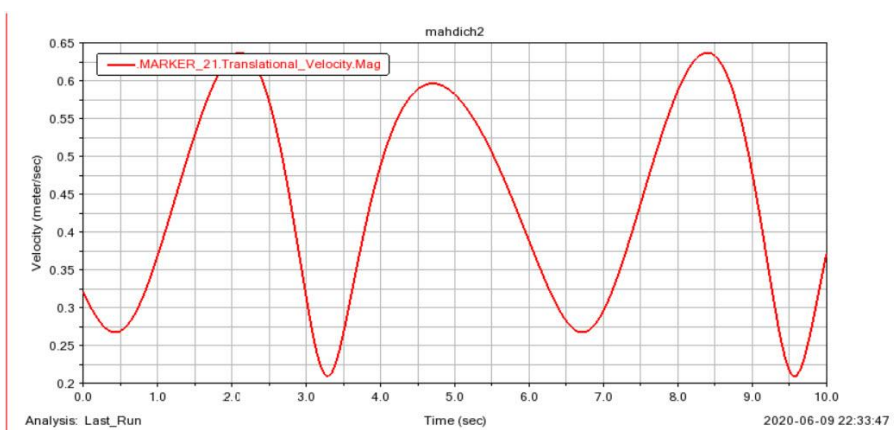
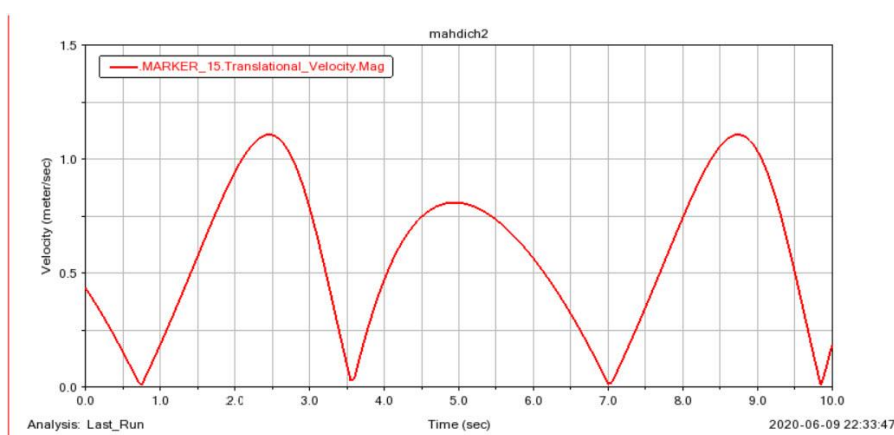
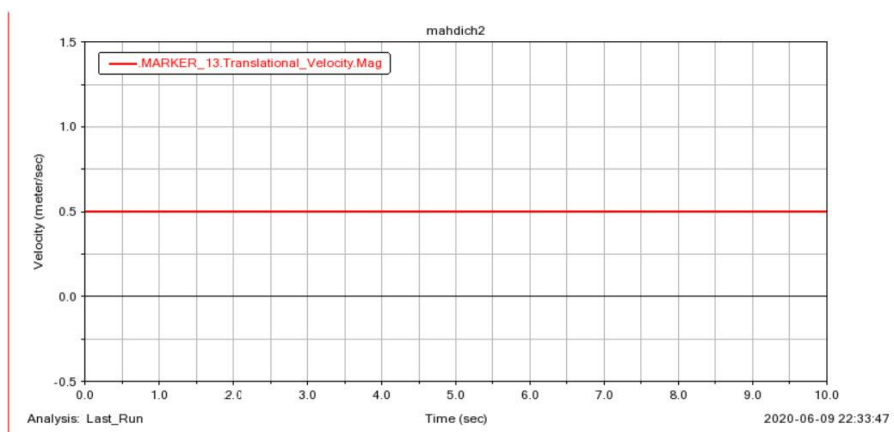


شکل ۱۵- شبیه سازی مکانیزم در Adams

در مرحله بعدی، به میله ۲ سرعت زاویه ای ثابت و برابر ۱ اختصاص می دهیم و بازه زمانی را ۱۰ ثانیه تعریف می کنیم. در انتهای این مرحله، مکانیزم آماده شبیه سازی است. پس از اجرای شبیه سازی، چهار نقطه مورد نظر را تک به تک انتخاب می کنیم و سرعت و شتاب مطلق آن نقاط در نمودار به نمایش در می آید.

۵-۱- نمودار

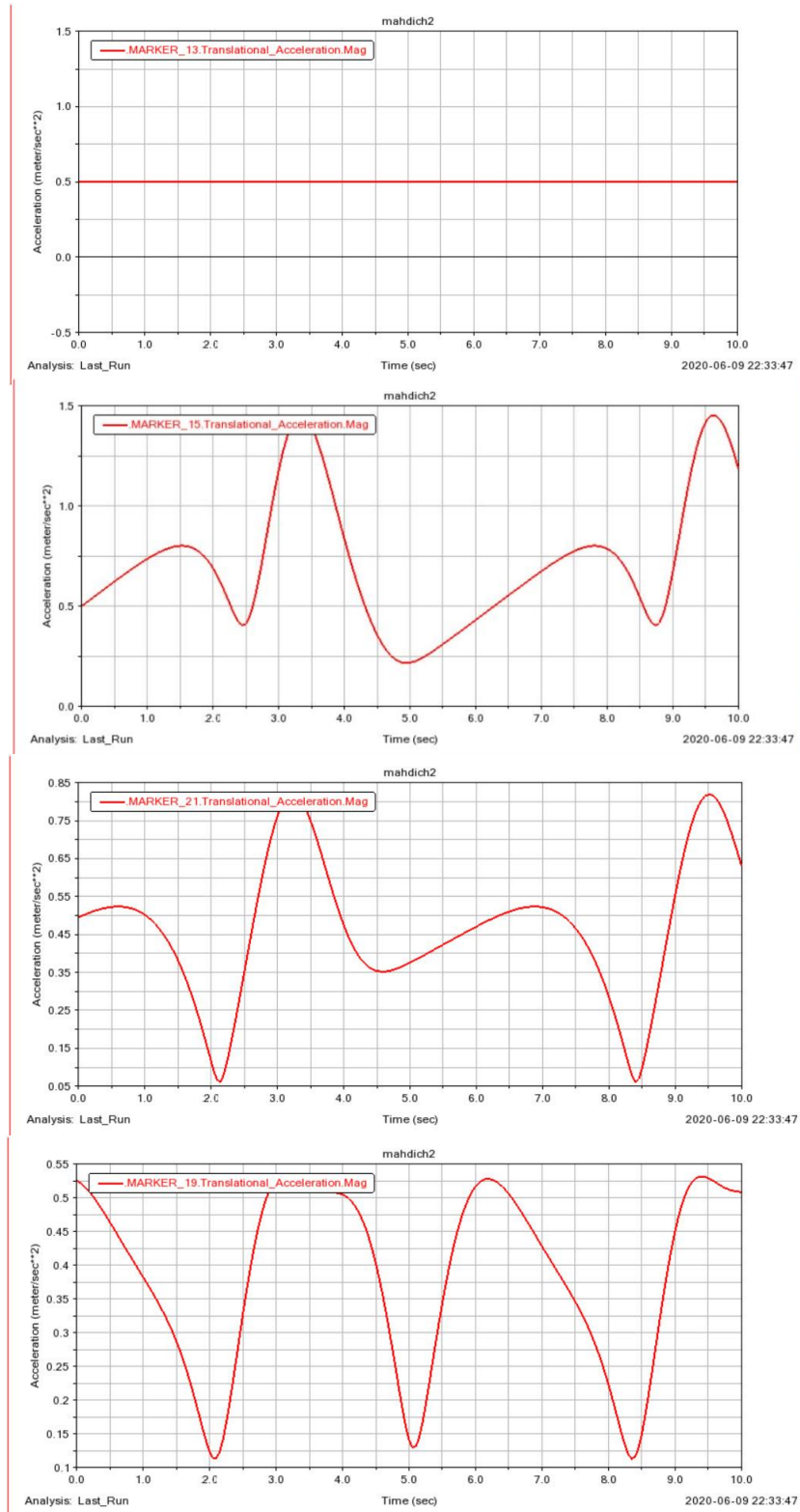
سرعت



شکل ۱۶ - نمودار سرعت نقاط B,C,F5,F6

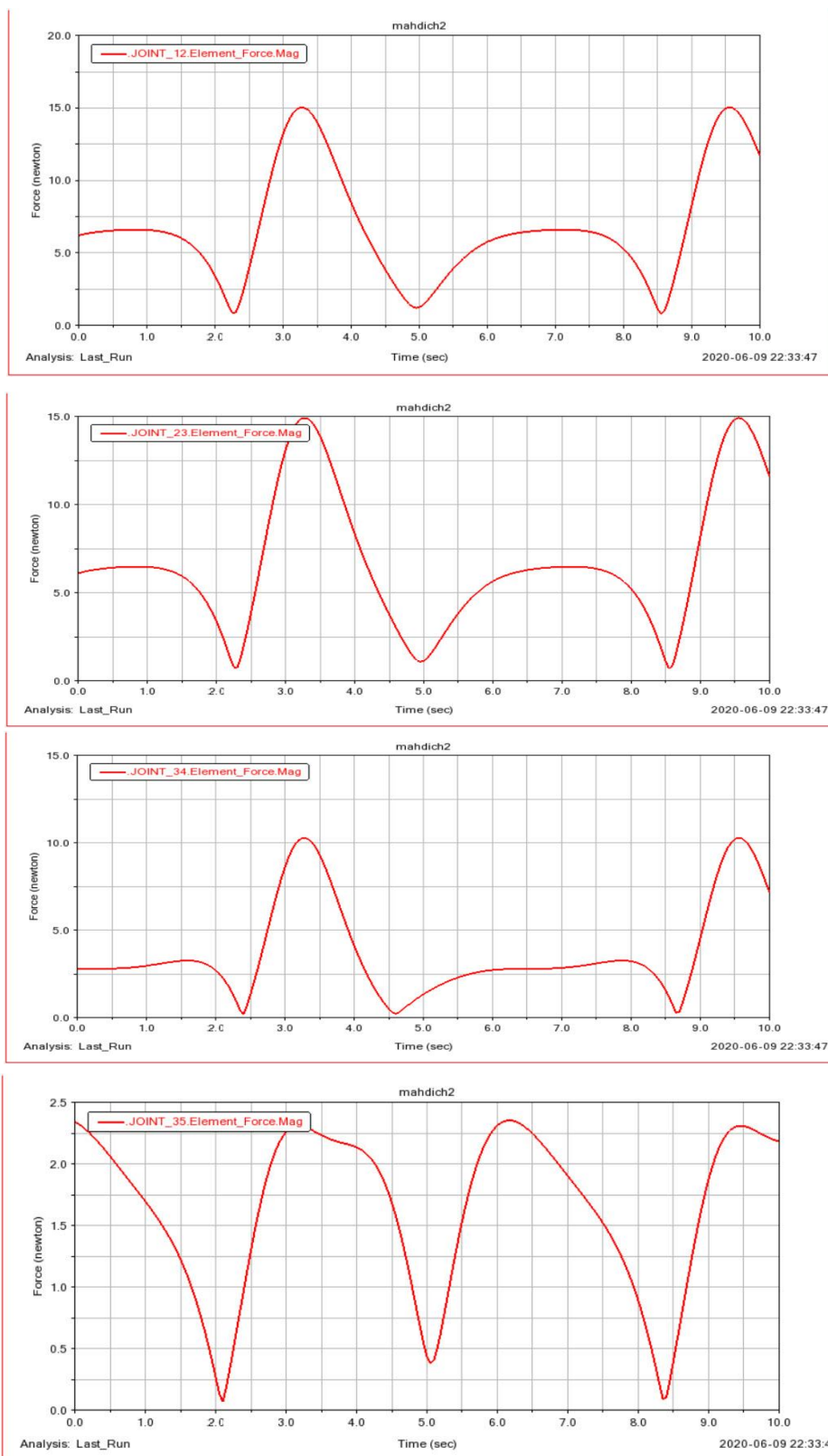
۵-۲- نمودار

شتاب

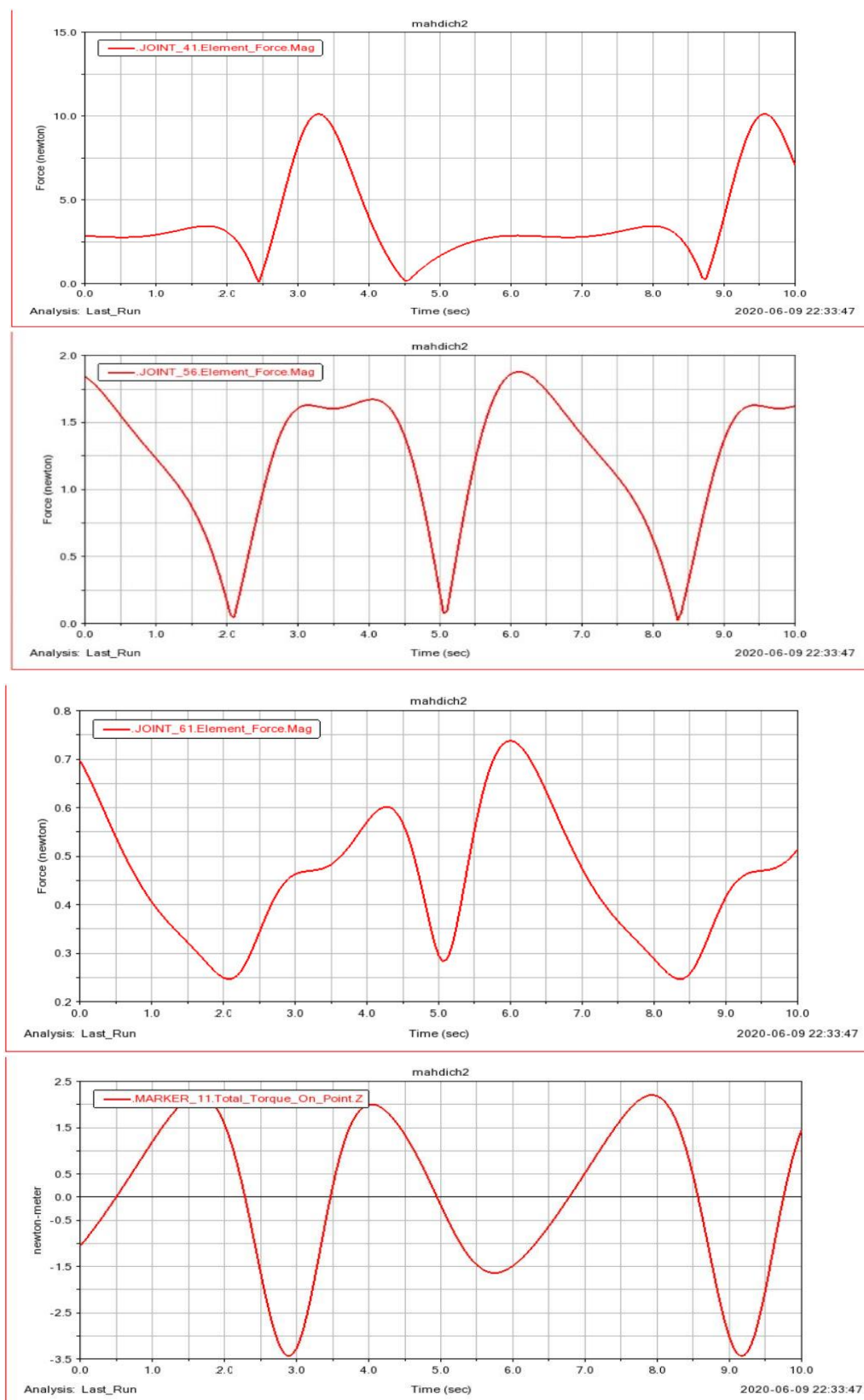


شکل ۱۷ - نمودار شتاب نقاط B, C, F5, F6

۳-۵ - نمودار نیروها و گشتاور



شکل ۱۸ - نمودار نیروهای ۱۲ و ۲۳ و ۳۴ و ۳۵



شکل ۱۹ - نمودار نیروهای ۴۱ و ۵۶ و ۶۱ و گشتاور ۲



## ۶- نتیجه گیری

در این پروژه، توانستیم مکانیزم ۶ میله‌ای که در صورت پروژه داده شده بود را با استفاده از نرم افزار متلب و با کدزنی شبیه سازی کرده و سپس با ADAMS، صحت این نتایج را بررسی کنیم.

با مقایسه نتایج حاصل، مشاهده می‌شود که با دقت خوبی هر دو نتایج یکسانی را می‌دهند. در بعضی نمودارها، اندکی تفاوت مشاهده می‌شود که مربوط به عوامل مختلفی است. از جمله تقریب‌هایی که هر نرم افزار استفاده می‌کند و در بحث عددی، خطای ذخیره سازی و گرد کردن دارد. عامل دیگر، solver های نرم افزارها هستند. در درس محاسبات عددی با تعدادی از روش‌های مرسوم برای حل معادلات مانند تقریب نیوتون رافسون آشنا شدیم. هر یک از این نرم افزارها، از یک نوع solver برای حل معادلات استفاده می‌کنند که نتایج مختلفی را به ما می‌دهد.

در نهایت، می‌توان دریافت استفاده از نرم افزارهای شبیه ساز دینامیکی، با دقت بسیار خوبی نتایج دقیق به ما بازمیگردانند و استفاده از آنها، باعث صرفه جویی بسیار در وقت خواهد شد.



- [1] Robert L.Norton; *Design of Machinery*, 2<sup>nd</sup> edition, McGraw-Hill Publications, 1999