

آموزش دینامیک سازوکارها به کمک رایانه

دکتر کاظم ابهری

استادیار دانشکده فنی دانشگاه تهران

عضو رسمی فرهنگستان مهندسان مکانیک ASME

چکیده

کاربرد رایانه در دانش و فن، روز به روز بیشتر می شود و امروز کندوکاو و طراحی مهندسی به کمک رایانه کاری است بسرایج. با این ابزار پربهرکت، مهندسان دسواربیهای بزرگی را از پیش پای خود برداشته و مساله های پیچیده یی گشوده اند. از اینرو امروزه، روشهای آموزش و پژوهش مهندسی نیز، زیرپر تو رایانه، تحول یافته است و رایانه همچون ابزاری نیرومند در این زمینه به کار گرفته می شود. یکی از مساله های دشوار و زمانگیر مهندسی مکانیک حل دینامیکی سازوکار از راه تحلیلی است. از اینرو تاکنون روش رایج حل اینگونه مساله ها، راه ترسیمی بوده است زیرا، نه تنها یافتن معادله های حرکت، سرعت و شتاب آنها، که حل آنها نیز کاری سنگین است، و در نتیجه امروزه تنها راه از میان برداشتن این دشواری بهره گیری از رایانه است و بس. نویسنده این نوشتار، در چند سال گذشته، در زمینه آموزش دینامیک سازوکارها، به کمک رایانه تجربه یی کرده است که، در راه بکارگیری این ابزار نوین آموزشی، بسیار پربار و پربازده بوده است. این نوشتار برای شناساندن این تجربه به دست اندرکاران آموزش این دانش مهم است که در طراحی ماشین از ارزش و اهمیت بسیار برخوردار است.

نمادها

 \bar{f} = نیروی لختی \bar{F}_{ij} = نیرویی که بندگاری i بر بندگاری j کارگر می کند \bar{g} = بردار نمایش گرانیگاه I = لنگر لختی $\sqrt{-1}$ = j \bar{F} = بردار نمایش بندگاری \bar{R} = بردار کمکی نمایش بندگاری \bar{V} = بردار سرعت W = وزن α = شتاب زاویه ای θ = زاویه بردار x از آسه ℓ = زاویه بردار سرعت از آسه x ω = سرعت زاویه ای

دییاجه

دینامیک سازوکارها، یعنی جنبش شناسی و نیروشناسی آنها، به معنای یافتن مسیر، سرعت و شتاب نقطه های گوناگون آن، و معمولاً "لولاها و گرانیگاههای آن، است. از اینرو، در نگاه نخست، چنین می نماید که همچون هر مساله دیگری دینامیک، می باید معادله حرکت نقطه های مورد نظر را نوشت و بامشتقگیری نسبت به زمان، سرعت و شتاب آنها را پیدا کرد. ولی از چند سازوکار نخستین، مانند ساز و کار

این تجربه چنین است که، در یک پروژه، آرایش هندسی، جرم و لنگر لختی بندگاریهای یک سازوکار را به دانشجویان داده از آنها خواسته می شود که معادله های مسیر، سرعت و شتاب لولاها و گرانیگاه بندگاریها را پیدا کنند و این معادله ها را با رایانه بگشایند و پاسخها را با پاسخهای ترسیمی سنجیده، دقت کار ترسیم و ارزش بهره گیری از رایانه را دریابند و سپس منحنی برخی ویژگیهای سازوکار را، از روی پاسخهای رایانه ای بکشند.

تجربه نشان داده است که این پروژه، از اینکه دانشجویان را وامی دارد تا دانش خود را در برنامه نویسی رایانه ای، برای گشودن یک مساله مهندسی به کار گیرند و ورزیدگی یابند به شادی می آورد و از اینکه در راه روند نوین و امروزی طراحی، یعنی "طراحی به کمک رایانه" تجربه ای می کنند شور و دل بستگی تازه ای در آنان پدید می آورد. نمونه ای از این پروژه ها، که دانشجویان با راهنمایی و رایزنی نویسنده، به کمک رایانه IBM 370-135 دانشگاه تهران، به زبان فرترن IV انجام داده اند، چنین است.

پروژه نمونه

در سازوکار شکل ۱، بندگار ۲ با سرعت زاویه ای ω_2 رادیان در ثانیه می چرخد و از راه بندگارهای ۳ و ۴، لغزنده های ۵ و ۶ را به رفت و برگشت وامی دارد. نقطه G_1 ، گرانیگاه بندگار ۱ است.

(الف) معادله حرکت، سرعت و شتاب لولاها و گرانیگاهها را به دست آورید.

(ب) نیروی دوسر هر بندگار، توان کارانداز و نیروی لرزشی سازوکار را پیدا کنید.

(پ) برنامه ای برای رایانه بنویسید که این کمیتها را در زاویه θ_2 از صفر تا 360° ، با افزایش $\Delta\theta_2 = 15^\circ$ حساب کند. برای اطمینان از درستی برنامه خود، پاسخهای ترسیمی سازوکار را در آن هنگام که آرایش آن مانند شکل ۱ است، با پاسخهای رایانه ای بسنجید.

(ت) منحنی سرعت و شتاب نقطه خروجی سازوکار (E) را در دستگاه کارترین، و منحنی توان کارانداز و نیروی لرزشی سازوکار را، در مختصات قطبی بکشید.

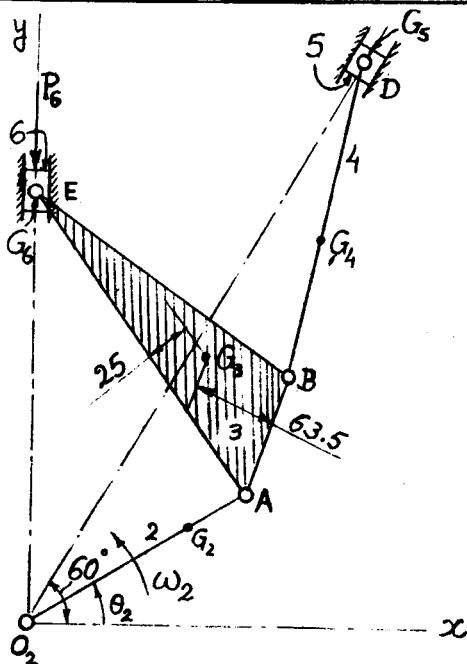
"لغزنده - لنگسی" یا "سازوکار چهاربندگاره" که بگذریم، حتی برای سازوکارهای ساده، معادله حرکت چنان پیچیده و دراز می شود که گشودن آنها، از میدان شکیبایی و برداری انسان بیرون است. نه تنها این، که یافتن این معادله های حرکت، خود کاری است پرنج، و گاه توانفرسا.

از اینرو، از دیرباز، همه نویسندگان کتابهای دینامیک ماشین را رسم بر این بوده است که مساله های دینامیک سازوکارها را، از راه ترسیمی گشوده، به همین شیوه آموزش دهند و روش کار چنین است که هر دوره تناوب سازوکار (مثلاً از 0° تا 360°) را، بسته به دقتی که نیاز است، چند بخش کرده (مثلاً ۲۴ بخش ۱۵ درجه ای) آرایش سازوکار را در آغاز و پایان هر بخش مشخص می کنند و سپس به جنبش شناسی و نیروشناسی سازوکار، از راه ترسیمی می پردازند، یعنی بترتیب، نمودار سرعت، شتاب و نیروی سازوکار را، باروشی که در همه این کتابها دست، می کشند [۱] و [۲].

این راه، که ساده ترین راه جنبش شناسی و نیروشناسی سازوکارها بوده است، خود با دشواریهایی همراه است. نخست، چنانکه می بینیم، در هر دوره تناوب، به شمار بخشهای آن (در مثال بالا ۲۴ بار) باید این سه نمودار را، با دقت زیاد کشید، که در جای خود، کار دشواری است. دوم، در بسیاری از مساله ها، خطای این پاسخهای ترسیمی ناخوشدونی است و در کار طراحی به پاسخهای دقیقتری، که تنها از راه تحلیلی می توان به دست آورد، نیاز داریم، یعنی روش ترسیمی پاسخگوی نیاز طراح نیست.

تنها راه جنبش شناسی و نیروشناسی دقیق سازوکارها، همچون دیگر مساله های دشوار مهندسی، بهره گیری از رایانه است. امروزه برخی دانشگاهها و پژوهشگاههای بزرگ دنیا کوشیده اند تا جنبش و نیروی سازوکارها را باروش تحلیلی، ولی به کمک رایانه، بشناسند [۳] تا هم بار محاسبه بردوش طراح سنگینی نکند و هم طراح، با همه زنجی که در راه یافتن پاسخهای ترسیمی می کشد، از پذیرفتن خطای آنها ناگزیر نباشد*. نویسنده، در درازای چندین سال آموزش دینامیک ماشین، پیوسته به این نکته برخورد داشته که، گشودن مساله های دینامیک سازوکارها از راه ترسیمی سلاح کم توانی است که دانشجویان را، بویژه در پروژه های طراحی ماشین، چنانکه باید و شاید یاری نمی دهد. از اینرو، چند سال است که همپای آموزش نظری این درس، تجربه دیگری نیز کرده است که نتیجه آن، بر روی بیش از صد دانشجو، نشانگر موفقیت آمیز و پربار بودن آن می باشد.

$O_2A=175 \text{ mm}$	$W_2=9 \text{ Kgf}$	$I_2=7.5 \text{ Kgf-mm-s}^2$
$AB = 87.5 \text{ mm}$	$W_3=7.5 \text{ ''}$	$I_3=6 \text{ ''}$
$AE = 262.5 \text{ ''}$	$W_4=5 \text{ ''}$	$I_4=22.5 \text{ ''}$
$BE = 219 \text{ ''}$	$W_5=6 \text{ ''}$	$I_5=30 \text{ ''}$
$BD = 225 \text{ ''}$	$W_6=6 \text{ ''}$	$I_6=30 \text{ ''}$
$O_2G_2 =125 \text{ ''}$	$P_6=40 \text{ ''}$	$\theta_2=30^\circ$
$BG_4=100 \text{ ''}$		$\omega_2=12 \text{ rpm}$



شکل ۱ - آرایش ساز و کار

روش به دست آوردن معادله‌ها

این معادله‌های برداری، با بهره‌گیری از مختصات

قطبی مختلط، بترتیب به چهره زیر درمی‌آیند:

$$r_2 e^{j\theta_2} + r_3 e^{j\theta_3} = r_6 e^{j\frac{\pi}{2}} \quad (1)$$

$$r_2 e^{j\theta_2} + r_3 e^{j(\theta_3 - \beta)} + r_4 e^{j\theta_4} = r_5 e^{j\frac{\pi}{3}}$$

و از گشودن این معادله‌ها، ناشناخته‌های مساله، برحسب θ_2 ،

$$s = -\frac{r_2}{r_3} \cos \theta_2 \quad \text{به دست می‌آید:}$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} s \quad (2)$$

$$r_6 = r_2 \sin \theta_2 + r_3 \sin \theta_3$$

$$r_B e^{j\theta_B} = r_2 e^{j\theta_2} + r_3 e^{j(\theta_3 - \beta)}$$

$$U = \frac{-r_B}{r_4} \sin \left(\theta_B - \frac{\pi}{3} \right)$$

$$\theta_4 = \frac{\pi}{3} + \sin^{-1} U$$

$$r_5 = 2r_4 \cos \theta_4 + 2R \cos \theta_B$$

$$r_{G3} e^{j\theta_{G3}} = r_2 e^{j\theta_2} + r_3 e^{j(\theta_3 - \beta + \gamma)}$$

$$r_{G4} e^{j\theta_{G4}} = r_B e^{j\theta_B} + r_4 e^{j\theta_4}$$

معادله‌های حرکت، سرعت و شتاب را می‌توان به چند

روش به دست آورد که کوتاهترین و مناسبترین آنها بهره‌گیری

از مختصات قطبی مختلط است [۴]. در این نوشتار، برای نمونه،

معادله‌های حرکت و سرعت لولاها و گرانیگاهها، و نیز معادله‌های

حرکت بندگاریها را با این روش به دست می‌آوریم. معادله‌های

شتاب از مشتق‌گیری معادله‌های سرعت به دست می‌آید.

معادله‌های حرکت لولاها و گرانیگاهها

هریک از بندگاریها را، در چهره یک بردار، مانند

شکل ۲، نمایش می‌دهیم آنچنانکه اندازه آن، اندازه

همان بندگار بوده، شیب آن از یک راستای شناخته شده، مثلاً

آسه x ، مشخص شود (در بندگاریهای دوبعدی، مانند

بندگار ۳، در صورت نیاز هرپهلوی آن را می‌توان بایک بردار

نمایش داد).

در این سازوکار، θ_3 ، θ_4 ، r_5 و r_6 ناشناخته‌اند که

از گشودن معادله‌های برداری دو حلقه O_2AEO_2 و O_2ABDO_2

به دست می‌آیند [۵]

$$\bar{r}_2 + \bar{r}_3 - \bar{r}_6 = 0 \quad \text{حلقه } O_2AEO_2$$

$$\bar{r}_2 + \bar{r}_3 + \bar{r}_4 - \bar{r}_5 = 0 \quad \text{حلقه } O_2ABDO_2$$

$$\dot{s} = \frac{r_2}{r_3} \omega_2 \sin \theta_2$$

$$\omega_3 = -\dot{s} / \sin \theta_3$$

$$\bar{V}_A = V_A e^{j\ell_A} = r_2 \omega_2 e^{j(\theta_2 + \frac{\pi}{2})}$$

$$H e^{jh} = r_2 \omega_2 e^{j\theta_2} + R_3 \omega_3 e^{j(\theta_3 - \beta)}$$

$$\dot{\theta}_B = \frac{H}{r_B} \cos(\theta_B - h)$$

$$\dot{r}_B = H \sin(\theta_B - h)$$

$$\bar{V}_B = V_B e^{j\ell_B} = H e^{j(h + \frac{\pi}{2})}$$

$$U = \frac{-\dot{r}_B}{r_4} \sin(\theta_B - \frac{\pi}{3}) - \frac{r_B}{r_4} \dot{\theta}_B \cos(\theta_B - \frac{\pi}{3})$$

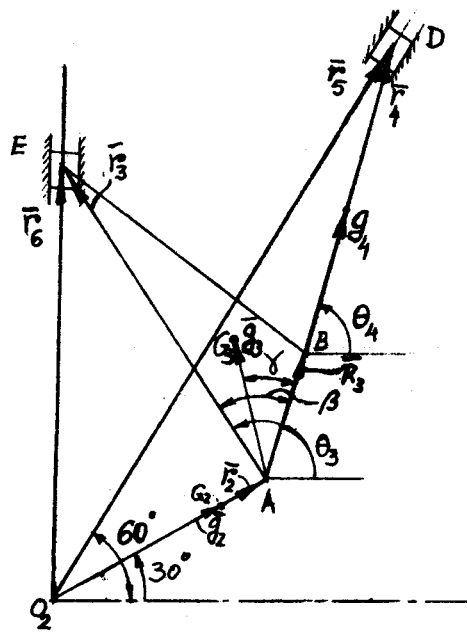
$$\omega_4 = \dot{U} / \cos(\sin^{-1} U)$$

$$\bar{V}_D = V_D e^{j\ell_D} = 2(-r_4 \omega_4 \sin \theta_4 + \dot{r}_B \cos \theta_B - r_B \dot{\theta}_B \sin \theta_B) e^{j\frac{\pi}{3}} \quad (4)$$

$$\bar{V}_E = V_E e^{j\ell_E} = (r_2 \omega_2 \cos \theta_2 + r_3 \omega_3 \cos \theta_3) e^{j\frac{\pi}{2}}$$

$$\bar{V}_{G3} = V_{G3} e^{j\ell_{G3}} = r_2 \omega_2 e^{j(\theta_2 + \frac{\pi}{2})} + g_3 \omega_3 e^{j(\theta_3 - \beta + \gamma + \frac{\pi}{2})}$$

$$\bar{V}_{G4} = V_{G4} e^{j\ell_{G4}} = H e^{j(h + \frac{\pi}{2})} + g_4 \omega_4 e^{j(\theta_4 + \frac{\pi}{2})}$$



شکل ۲ - نمایش برداری ساز و کار

کمیت‌های کمکی s و U برای آسان شدن کار محاسبه و کوتاه شدن دستورها و پیشگیری از اشتباه در برنامه‌نویسی است. در این معادله‌ها، $r_B = O_2 B$ و $\theta_B = \widehat{xO_2 B}$ که با هم بردار جایگان نقطه B را می‌دهند و روی شکل نشان داده نشده است. همچنین است بردار جایگان نقطه‌های G_3 و G_4 (یعنی \bar{F}_{G3} و \bar{F}_{G4}) آشکار است که کمیت‌های بالا باید به همان ترتیبی که نوشته شده است حساب شوند. پس مختصات لولها و گرانیگاهها، و به دیگر سخن معادله حرکت یا بردار جایگان آنها، چنین است

- A بردار جایگان نقطه A : $r_2 e^{j\theta_2}$
- B بردار جایگان نقطه B : $r_B e^{j\theta_B}$
- D بردار جایگان نقطه D : $r_5 e^{j\frac{\pi}{3}}$ (۳)
- E بردار جایگان نقطه E : $r_6 e^{j\frac{\pi}{2}}$
- G_3 بردار جایگان نقطه G_3 : $r_{G3} e^{j\theta_{G3}}$
- G_4 بردار جایگان نقطه G_4 : $r_{G4} e^{j\theta_{G4}}$

سرعت‌شناسی و شتاب‌شناسی

سرعت لولها و گرانیگاهها، مشتق معادله‌های (۳)

نسبت به زمان است، که به کمک معادله‌های (۲) معادله سرعت‌های خطی و زاویه‌ای سازوکار به دست می‌آید.

در این معادله‌ها H و h کمیت‌های کمکی هستند.

البتد می توان معادله دوم (۵) را نسبت به B نوشت تا تنها یک ناشناخته F_{15} در آن بماند. بدینسان، می توان معادله های تعادل هر بندگار را نوشت و نیروی لولاهای آن را دریافت. اگر ساز و کار چنان باشد که مجهولهای برخی بندگارهای آن از شمار معادله های تعادل آن بیشتر شود می توان اثر نیروهای استاتیکی (نیروهای معلوم بیرونی، \bar{P}_6) و نیروهای لختی بندگارها را جدا جدا، در هر لولا پیدا کرد و سپس با بهره گیری از اصل انطباق، آنها را برهم افزود تا نیروی کاری بر هر بندگار، در هر سر آن، پیدا شود. نیروشناسی ساز و کار مورد نظر نیز به همین روش انجام شده است.

در اینجا، برای سادگی، از نیروهای مالش چشم پوشیده ایم.

برنامه رایانه ای

این برنامه که نمودار جریان آن در شکل ۴ دیده می شود، مختصات، سرعت و شتاب لولاها و گرانیگاهها، سرعت و شتاب زاویه ای بندگارها، نیروی لولاها و توان راه انداز ساز و کار را، در هر θ حساب کرده، چاپ می کند. کمیتهای کمکی s ، $H \cdot U$ و h برای کوتاه کردن معادله ها به کار گرفته شده اند و از اینرو در کوتاه کردن و ساده شدن برنامه تاثیر بسزایی دارند.

چنانکه می بینیم، در این برنامه، چندین بار، به یافتن برآیند دو بردار، مانند دستور چهارم از معادله های (۲) و (۴)، نیاز می افتد که برای جلوگیری از تکرار محاسبات مشابه، از زیر برنامه کوچک SUM بهره گیری شده است. این زیر برنامه برآیند دو بردار $R_1 e^{j\theta_1}$ و $R_2 e^{j\theta_2}$ را حساب می کند ($\text{Re}^{j\theta} = R_1 e^{j\theta_1} + R_2 e^{j\theta_2}$) و R و θ را به دست می دهد.

معادله های شتاب خطی و زاویه ای نیز با مشتق گیری از معادله های (۴) و بهره گیری از معادله های پیشین به دست می آید. این نکته درخور یادآوری است که، این معادله ها برای هر ساز و کار باید از آغاز جداگانه حساب شود، و این یکی از هدفهای این پروژه است، که دانشجو دشواریهایی را که بر سر راه تحلیل نیز هست دریابد و بفهمد که یک برنامه یکسان برای همه ساز و کارها تا چه اندازه با ارزش بوده، می تواند مفید باشد.

نیروشناسی

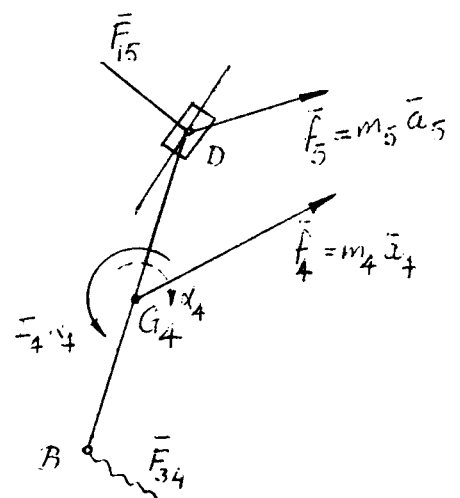
برای نیروشناسی ساز و کار، پیکر آزاد بندگارها را

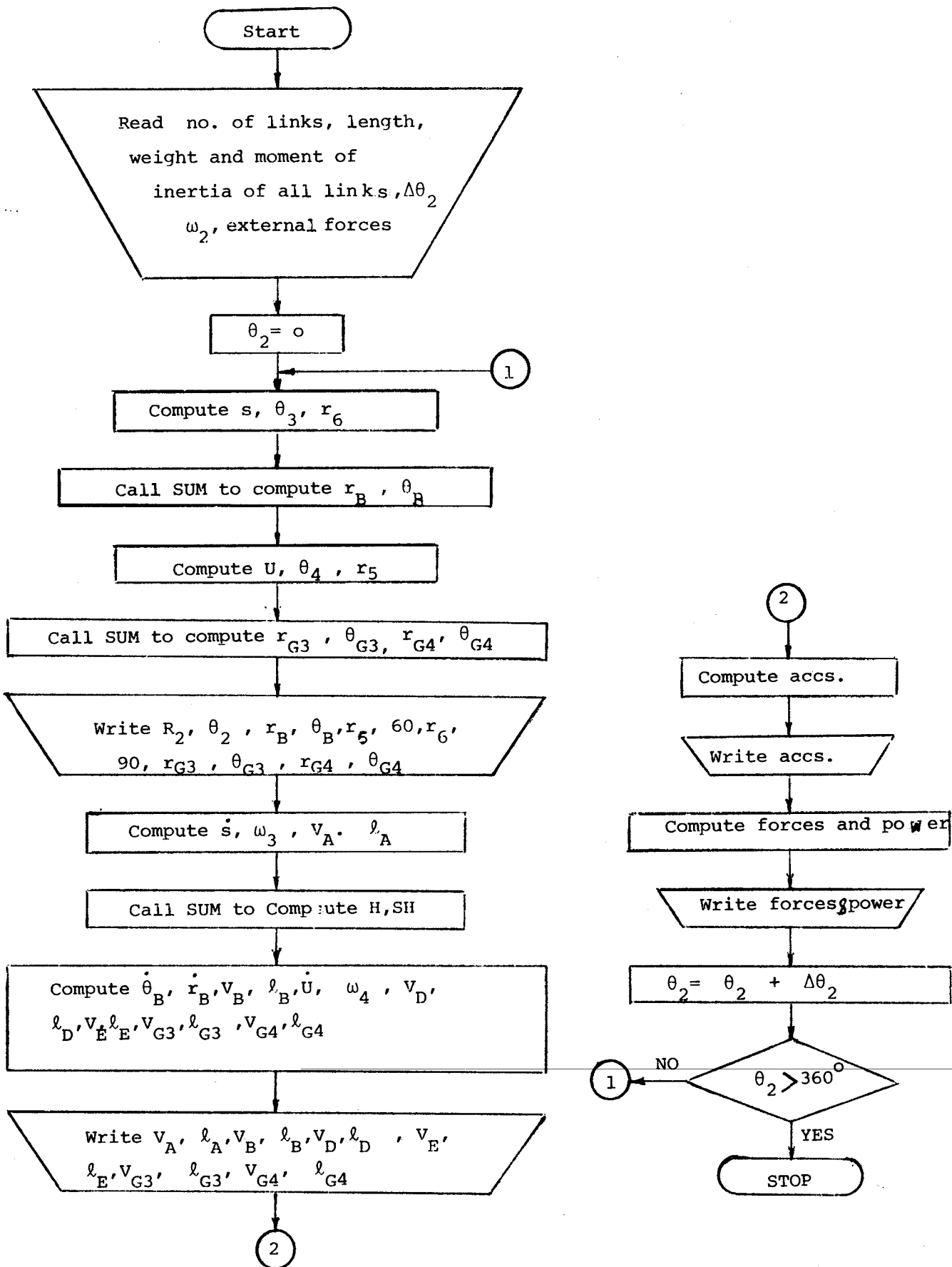
می کشیم. برای نمونه، پیکر آزاد بندگار ۴ و ۵ یکجا، در شکل (۳)، نموده شده است. در این شکل سه ناشناخته هست (اندازه \bar{F}_{15} ، اندازه و راستای \bar{F}_{34}) که از معادله های تعادل، (با توجه به اصل دالامبر) حساب می شوند [۶].

$$\Sigma \bar{F} = \bar{F}_{34} + \bar{F}_{15} + \bar{F}_4 + \bar{F}_5 = 0 \quad (5)$$

$$\Sigma M_{G4} = G_4 B \times \bar{F}_{34} + G_4 D \times (\bar{F}_{15} + \bar{F}_5) - I_4 \ddot{\alpha}_4 = 0$$

این معادله ها، همان معادله حرکت گرانیگاه و حرکت گردگرانیگاه است [۷] که از گشودن آنها \bar{F}_{15} و \bar{F}_{34} به دست می آید.



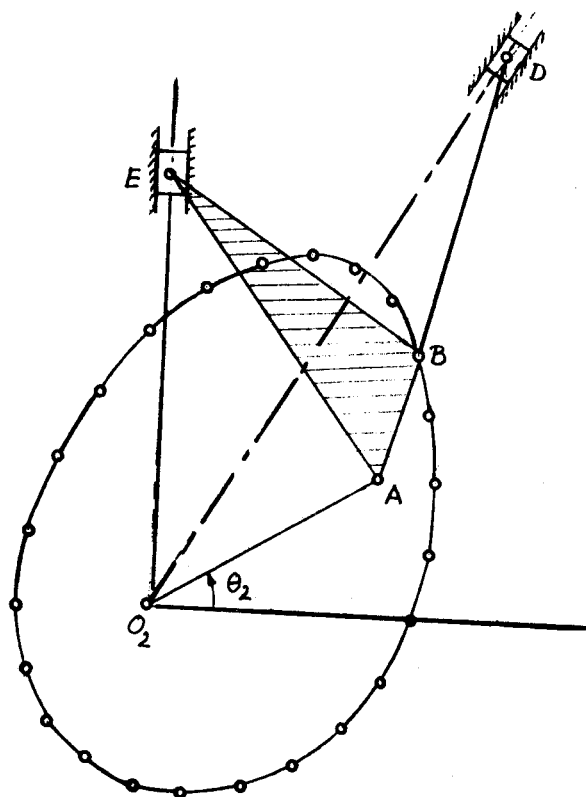


شکل ۴ - نمودار جریان برنامه

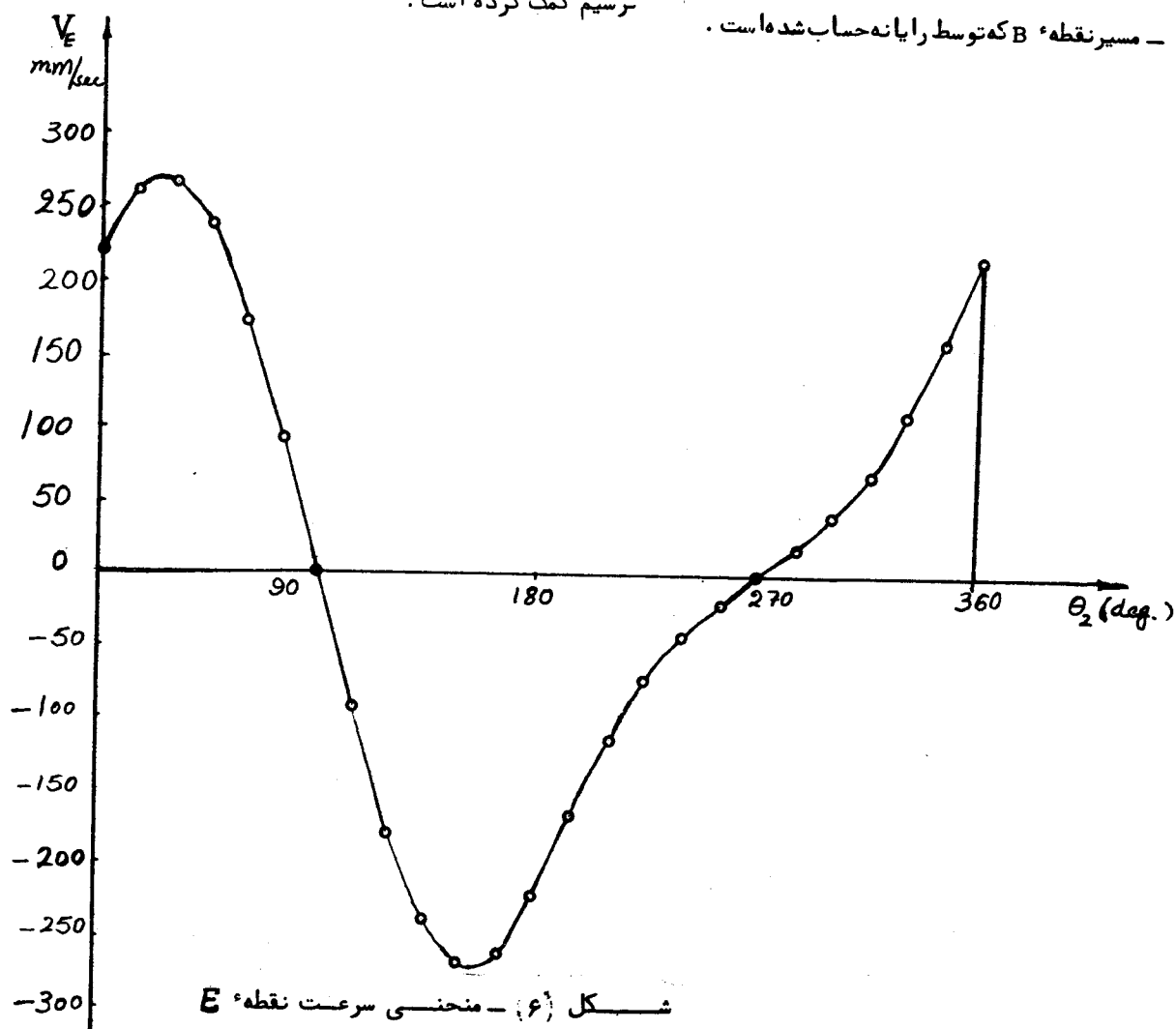
این برنامه مختصات، سرعتها، شتابها و نیروها را برای هر θ_2 حساب کرده، آنچه را که در صورت پروژه خواسته شده است چاپ می‌کند. دانشجو از همسنجی پاسخهای رایانه‌ای و ترسیمی در لحظه مورد نظر، شکل ۱، به درستی برنامه خود و نیز کم دقتی کار ترسیم و نیز کارآیی روش رایانه‌ای پی می‌برد.

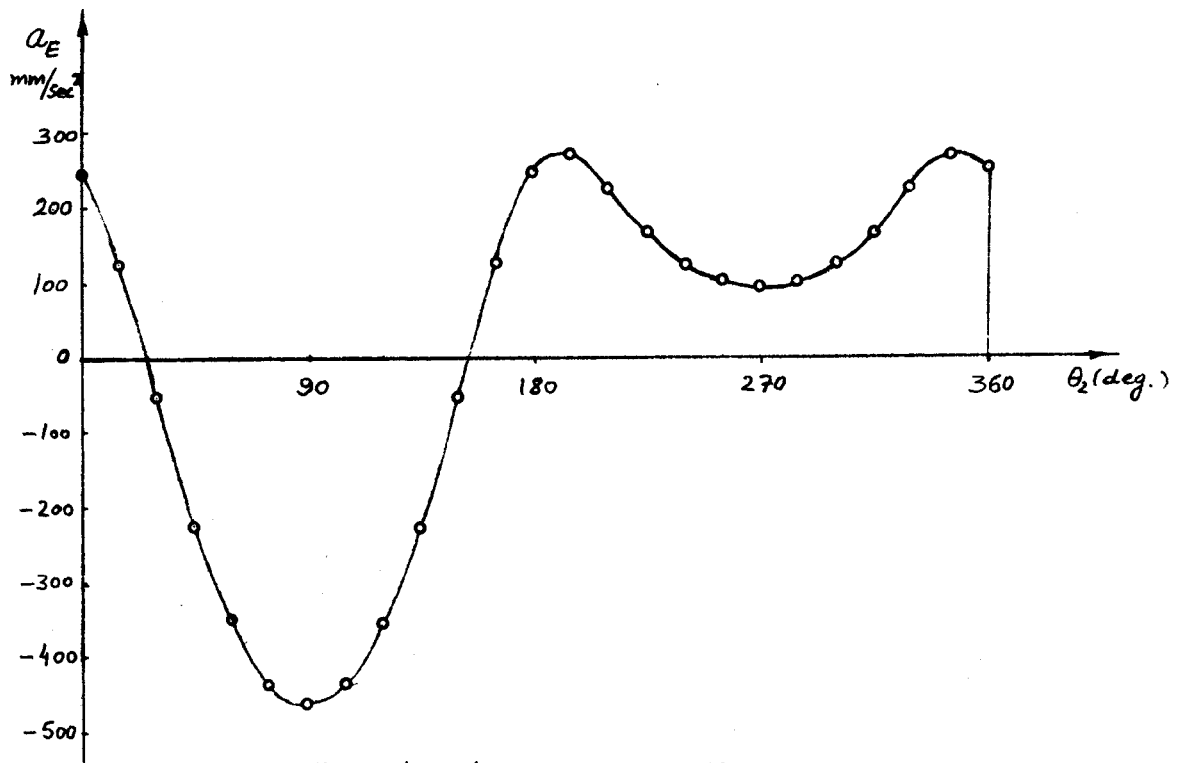
پاسخهای رایانه‌ای

در شکل ۵ مسیر نقطه B، که از محاسبه رایانه‌ای به دست آمده، نموده شده است. جدولهای ۱ تا ۴، نتیجه‌های ترسیمی و رایانه‌ای را نشان می‌دهد. البته باید یادآور شد که در این پروژه، کار ترسیم با دقت زیاد انجام شده است تا درستی برنامه رایانه‌ای با درجه اعتماد زیاد ارزیابی شود، وگرنه خطای ترسیم، در عمل، معمولاً "بیش از اینهاست". بویژه، در اینجا ویژگیهای سازوکار چنان بوده است که به دقت ترسیم کمک کرده است.

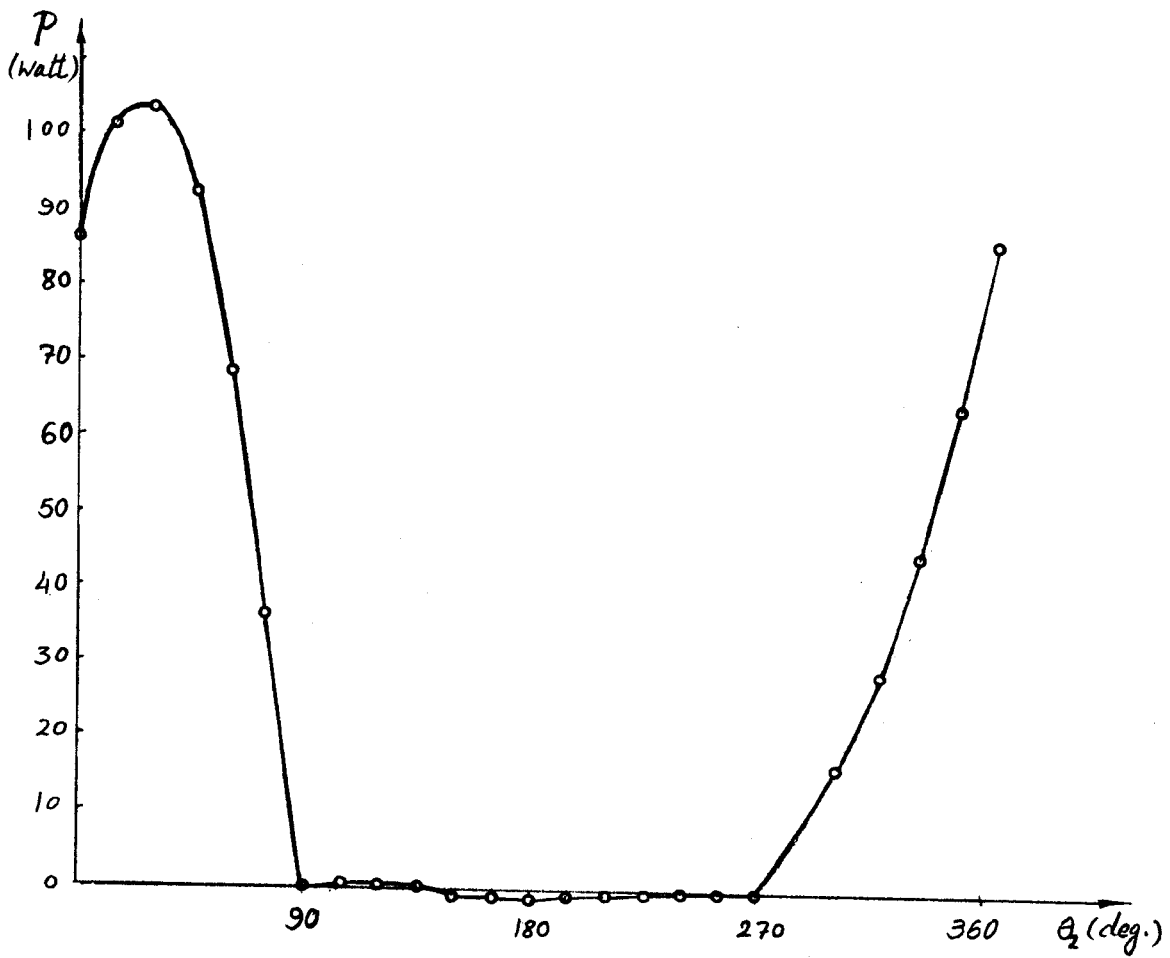


شکل ۵ - مسیر نقطه B که توسط رایانه حساب شده است.





شکل (۷) - منحنی شتاب نقطه E



شکل (۸) - منحنی توان کارانداز ساز و کار

جدول (۲) - شتابهای خطی و زاویه‌ای

شتاب	پاسخ رایانه‌ای	پاسخ ترسیمی
$A (mm/s^2)$	276 / 210°	276.3 / 210°
B "	246 / 227°	246 / 228°
D "	-334 / 160°	336 / 240°
E "	-54 / 90°	52.5 / 270°
G_2 "	197 / 210°	196.5 / 210°
G_3 "	185 / 222°	186 / 222°
G_4 "	283 / 234°	285 / 234°
$\alpha_3 (rad/s^2)$	0.93)	0.93)
α_4 "	0.11)	0.083)

جدول (۱) - سرعت‌های خطی و زاویه‌ای

سرعت	پاسخ رایانه‌ای	پاسخ ترسیمی
A (mm/s)	220 / 120°	219.9 / 120°
B "	191 / 110°	90 / 111°
D "	166 / 60°	166.2 / 60°
E "	268 / 90°	268.7 / 90°
G_2 "	157 / 120°	156.2 / 120°
G_3 "	220 / 106°	218.7 / 106°
G_4 "	163 / 90°	162.5 / 90°
$\omega_3 (rad/s)$	0.51)	0.5)
ω_4 "	0.68)	0.69)

جدول (۴) - نیروها و گشتاور کارانداز دینامیکی

نیروی دینامیکی	پاسخ رایانه‌ای	پاسخ ترسیمی
* 12 (Kgf)	-0.628 / 61°	0.593 / 243°
15 "	-0.075 / 330°	0.073 / 150°
16 "	-0.776 / 10°	0.080 / 180°
23 "	-0.482 / 72°	0.473 / 253°
43 "	0.353 / 70°	0.350 / 695°
54 "	0.217 / 80°	0.217 / 80°
63 "	0.084 / 157°	0.087 / 157°
نیروی لرزشی	0.680 / 149°	0.686 / 149°
$T_2 (Kgf-m)$	0.566)	0.548)

جدول (۳) - نیروها و گشتاور کارانداز استاتیکی

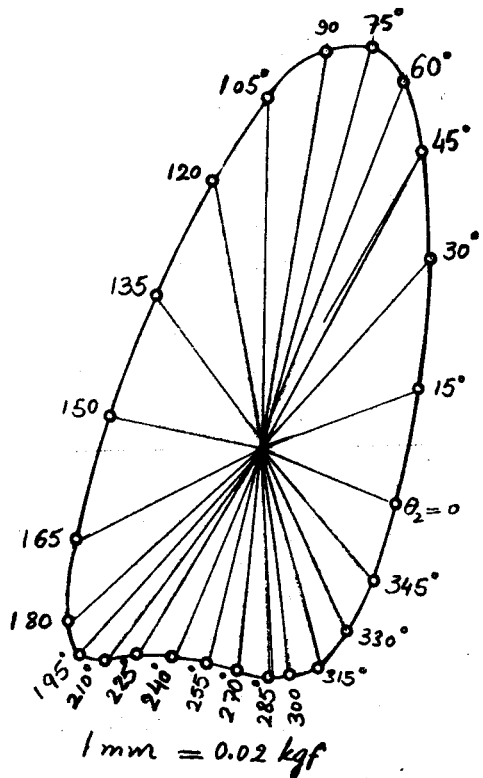
نیروی استاتیکی	پاسخ رایانه‌ای	پاسخ ترسیمی
* 12 (Kgf)	48.984 / 125°	49 / 125°
16 "	28.275 / 0°	28 / 0°
32 "	-48.984 / 125°	-49 / 125°
63 "	-48.984 / 125°	-49 / 125°
$T_2 (kgf-m)$	85.137)	85.362)

* یعنی نیرویی که بندگار ۱ بر ۲ کارگر می‌کند.

* یعنی نیرویی که بندگار ۱ بر ۲ کارگر می‌کند.

(ت) دانشجویان از همسنجی پاسخهای رایانه‌ای و ترسیمی در لحظه مورد نظر، به درستی برنامه خود و نیز کم دقتی کار ترسیم و نیز کارآیی روش رایانه‌ای در صرفه‌جویی زمانی پی خواهند برد.

(ج) دانشجویان بهره‌گیری از رایانه را در گشودن مساله‌های مهندسی می‌آزمایند و برای "طراحی به کمک رایانه" که روند نوین و امروزیین طراحی است تشویق و آماده می‌شوند. واپسین، ونه کمترین نکته اینکه با بهره‌وری از رایانه‌های کوچک که روز به روز فراوانتر و گوناگونتر و ارزانتر پا به میدان علم و فن می‌گذارند، این پروژه آموزشی برای دانشجویان بسیار شوق‌انگیزتر و گیراتر خواهد شد، با این ابزار پرتوان، می‌توانند، افزون بر محاسبه، آرایش سازوکار، و نیز شکل منحنیهای خواسته شده را روی صفحه تلویزیونی رایانه بکشند و ببینند. از این راه، زمان انجام پروژه نیز بسیار کوتاهتر می‌شود.



شکل ۹ - منحنی نیروی لرزشی ساز و کار

نقطه خروجی این سازوکار E است که شکل ۶ منحنی سرعت و شکل ۷ منحنی شتاب آن را که با رایانه حساب شده است نشان می‌دهد و شکل ۸ منحنی توان کارانداز است که از روی آن بیشترین توان مورد نیاز، یعنی توان موتور سازوکار را، می‌توان یافت. شکل ۹ منحنی نیروی لرزشی $(\sum_{i=1}^n \bar{F}_i)$ در مختصات قطبی، بر حسب θ_2 ، است. از روی این منحنی می‌توان بسادگی نیروی لرزشی بیشینه و زمان پدید آمدن آن را پیدا کرد. این منحنیها، که از روی پاسخهای رایانه‌ای کشیده شده‌است، با هم، آگاهی کاملی از ویژگیهای دینامیکی سازوکار به دست می‌دهند.

نتیجه

در این نوشتار، روش کندوکاو دینامیکی یک سازوکار را با رایانه، توسط دانشجویان، دیدیم. آموزش دینامیک سازوکارها با رایانه چند خوبی و برتری دارد:

(الف) رهایی از رنج حل ترسیمی، که در فاصله‌های مشخص، در یک دوره تناوب، باید آن را از سر گرفت.

(ب) دستیابی به پاسخهای دقیق، به جای پاسخهای خطا آمیز ترسیمی.

(پ) جلوگیری از دوباره کاری، به این معنی که اگر داده‌های مساله تغییر کند تنها داده‌های برنامه رایانه‌ای تغییر خواهد کرد. در حالی که باروش ترسیمی باید همگی ترسیمها را، با داده‌های جدید از سر گرفت.

واژه‌نامه فارسی - انگلیسی

block diagram	نمودار جریان برنامه
position vector	بردار جایگان
link	بندگار
kinematics	جنبش‌شناسی
computer	رایانه
subroutine	زیربرنامه
four bar mechanism	سازوکار چهاربندگاره
slider-crank mechanism	سازوکار لغزنده - لنکی
computer aided design	طراحی به کمک رایانه
centre of gravity	گرانیکاه
moment of inertia	لنگر لختی
complex polar coordinates	مختصات قطبی مختلط
kinetics	نیروشناسی
inertia force	نیروی لختی
shaking force	نیروی لرزشی
symbol	نماد

فهرست منابع

- 1- A.R. Holowenko, Dynamics of Machinery, John Wiley, 1958, pp 3-126.
- 2- J.E. Shigley & J.J. Uicker, Jr., Theory of Machines and Mechanisms, Mc Graw Hill, 1980, pp 69-168.

(۳) - همان، ص ۱۸۸ تا ۱۹۱.

(۴) - همان، ص ۴۶ تا ۵۱.

(۵) - همان، ص ۱۸۱.

(۶) - همان، ص ۴۲۶ تا ۴۲۹.

(۷) - دکتر جلیل نامیلی، مهندس کاظم ابهری،

مکانیک برداری، دینامیک، امیرکبیر، ۱۳۴۹، ص ۱۷۷.