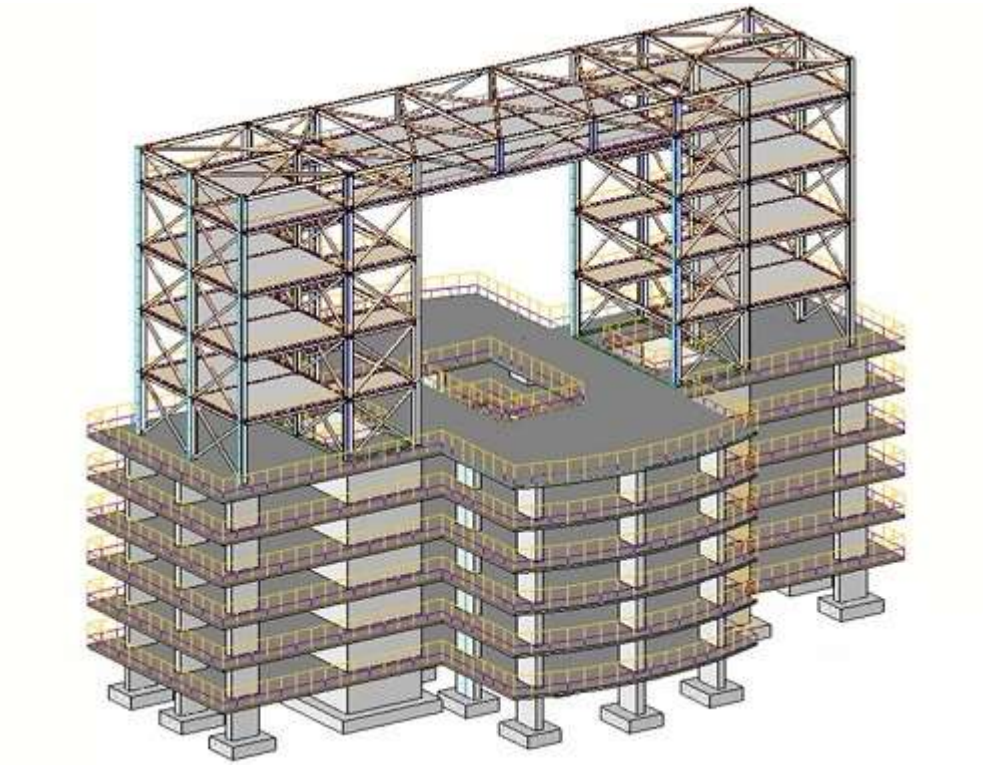
آیا در بحث تحلیل سازه بیش‌ازحد به کامپیوتر وابسته شده‌ایم؟ - پارت دوم

پروفسور گراهام اچ پاول

بخش دوم: راه حل



خروجی ها

ابتدا برخی خروجی های مناسب را در نظر بگیرید. فعلا فقط آموزش های دوره کارشناسی را در نظر می گیریم.قبل از اینکه دانشجویی درس تحلیل سازه را آغاز کند انتظار داریم که او ابتدا درسی در مقاومت مصالح و همچنین در استاتیک و دینامیک گذرانده باشد. فرض می کنم فقط یک ترم زمان برای درس تحلیل سازه ها مورد نیاز است و دوره های اضافی به عنوان دروس انتخابی در دسترس قرار می گیرند. پس از آن هم دانشجو می تواند دروس دوره ارشد را اخذ کند.

پس از پایان دوره اول، به نظر من دانشجویان باید توانایی های زیر را داشته باشند:

۱. یک مدل خطی الاستیک از یک سازه سه بعدی واقعی شامل قاب، دیوار و اتصالات را توسعه دهند، تحلیل های کامپیوتری را برای بارهای ثقلی و جانبی انجام دهند، پاسخ ها را ارایه و تفسیر کنند و با در دست داشتن مقاومت تیر و ستون ها نسبت نیاز به ظرفیت را محاسبه نمایند.
۲. یک مدل غیرخطی از یک قاب دوبعدی با مفاصل پلاستیک ساده را توسعه دهند، تحلیل های کامپیوتری را برای بارهای ثقلی و جانبی هم با در نظر گرفتن اثر پی دلتا و هم بدون آن انجام دهند، رفتار آن را توضیح دهند و با در دست داشتن مقاومت تیر و ستون ها و ظرفیت دورانی مفاصل، نسبت نیاز به ظرفیت مقاومتی و جابجایی را محاسبه کنند.

۳. با در دست داشتن نتایج یک تحلیل کامپیوتری، تعادل اجزای مختلف و اتصالات را با استفاده از نمودار جسم آزاد و معادلات تعادل کنترل کنند.
۴. با در دست داشتن نتایج یک تحلیل کامپیوتری برقرار بودن سازگاری را کنترل کنند (به این معنی که کنترل کند تغییر فرم المان ها با تغییر فرم گره ها سازگار است).
۵. ضرایب نرمی و سختی، و ماتریس های نرمی و سختی را توضیح دهند و ماتریس های سختی و نرمی را برای المان های تیر و المان های خرپایی محاسبه کنند.
۶. روش سختی مستقیم را توضیح دهند. همچنین توضیح دهند که چگونه حساسیت های عددی می تواند باعث ارائه پاسخ های نادرست در این روش شود.

پس از پایان دوره دوم، دانشجو باید قادر به مدلسازی، تحلیل و کنترل سازه های پیچیده تر با گوناگونی بیشتری از المان ها (شامل المان های ساده اجزای محدود) باشد. علاوه بر این باید بتواند بارهای دینامیکی (با داشتن فهمی پایه از نیروهای اینرسی و میرایی، شکل های مودی و برهم نهی مودها) را درنظر بگیرد و فهم عمیق تری از تئوری های مربوطه داشته باشد.

مهارت های گسترده

برای ایجاد خروجی های فوق، یک دانشجو باید مهارت هایی در مدلسازی و تفسیر کسب کند، قادر به اجرا کردن یک تحلیل باشد و فهم پایه ای از تئوری های پشتیبان اینها داشته باشد. مدلسازی نیازمند داشتن فهمی از رفتار اجزای مختلف که یک سازه را می سازند، فهمی از سختی و نرمی، توانایی بازشناختن جنبه های مهم و غیر مهم رفتاری، و توانایی ساختن یک مدل تحلیلی با جعبه ابزار المان های سازه ای، است.

تفسیر، نیازمند تعدادی مهارت است. کنترل اینکه آیا پاسخ های تحلیل قابل قبول اند، اینکه چه چیز باعث شده است جوابها غیر قابل قبول به نظر برسند و ساماندهی پاسخ ها به گونه ای که تصمیمات طراحی را پشتیبانی کنند؛ از این دسته مهارت ها هستند.

مهارت های مشخص برای مدلسازی و تفسیر

تعدادی از مهارت های مشخص عبارتند از:

۱. توانایی ترسیم انواع مختلف نمودار جسم آزاد، اعمال معادلات تعادل به این نمودارهای جسم آزاد برای کنترل اینکه تعادل برقرار هست یا خیر. به دانشجویان تاکید شود وجود اشتباه در نمودارهای جسم آزاد و اعمال معادلات تعادل غیر قابل بخشش است.
۲. توانایی استفاده از اصل کار مجازی برای سازه های استاتیکی ساده در سازه های معین به عنوان جایگزینی برای نمودار جسم آزاد و معادلات تعادل (اعمال اصل جابجایی های مجازی برای اجسام صلب و مکانیزم ها).
۳. توانایی محاسبه تلاش های داخلی (P,V,M) در سازه های معین و ترسیم دیاگرام ها (P,V,M).
۴. توانایی ترسیم شکل تغییر فرم یافته سازه ها و اجزای سازه ای مختلف برای اینکه به بصورت کیفی نشان دهند چطور یک سازه یا المان سازه ای تغییر شکل می دهد.

۵. توانایی انجام محاسبات ساده تغییرفرم برای قاب ها و خرپاها با استفاده از ابزارهایی مثل لنگرسطح یا دیاگرام ویلیوت. این ابزارها نیازمند درک روشنی از رابطه بین تغییر فرم های داخلی (انحنای تیرها،افزایش طول اعضای خرپایی و ...) و تغییر شکل های خارجی هستند. به عقیده من توانایی محاسبه تغییرفرم ها با استفاده از کار مجازی (با استفاده از اصل نیروهای مجازی) یک مهارت ضروری نیست – این مهارت به تلاش بسیاری برای آموختن نیازمند است و به دانشجو در ایجاد حسی نسبت به رفتار سازه ای کمک نمی کند و من به ویژه آن را مفید نمی دانم.

۶. توانایی محاسبه سختی و نرمی انواع مختلف اجزای سازه ای، و فهم اهمیت مفاهیم نرمی و سختی. این مهم را می توان برای بیشتر اجزای سازه با استفاده از مهارت های ذکر شده انجام داد. این مهارت باید شامل توانایی محاسبه سختی و نرمی اجزای ساده سازه ای که به صورت سری یا موازی قرار دارند هم باشد (به این معنی افزودن سختی ها به هم در اجزای موازی و افزودن نرمی ها به هم در اجزای سری).

۷. توانایی بکار بردن احساس فنی. به عنوان مثال باید بتواند تشخیص دهد چه زمانی تغییر فرم محاسبه شده خیلی بزرگ یا خیلی کوچک است یا اینکه تناسبات یک عضو سازه ای آشکارا غیر واقعی است.

اصولا کسب این مهارت ها برای درک رفتار سازه ها (به عنوان مثال، چگونگی انتقال نیروها در یک اتصال) و برای کنترل قابل قبول بودن نتایج کامپیوتری مورد نیاز هستند. این مهارت ها گاهی برای تحلیل های دستی هم استفاده می شوند اما تنها هنگامی که سازه هندسه بسیار ساده ای داشته باشد از تحلیل های کامپیوتری کارایی بیشتری دارند.

من توانایی تحلیل یک سازه نامعین با دست را ذکر نکردم. من فکر می کنم این مهارتی است که یک مهندس هرگز نیازی به آن ندارد و مهارت مفیدی نیست. در زندگی حرفه ای، من همیشه از معادلات تعادل استفاده می کنم؛ اغلب اشکال تغییر فرم یافته را ترسیم می کنم، و معمولا محاسبات ساده تغییر شکل را انجام می دهم. من هیچگاه از روش پخش لنگر یا سایر روش های کلاسیک برای تحلیل یک سازه نامعین استفاده نکرده ام. این روش ها مورد علاقه تاریخدانان است ولی اعتقاد دارم تدریس آنها تلف کردن وقت و انرژی ارزشمند دانشجویان است. چیزهای خیلی مفیدتر و خیلی جذاب تر برای یاد دادن وجود دارند.

مهارت های عددی مورد نیاز

فاز محاسبات ریاضی، آنطور که من تعریف کرده ام شامل هر دوقسمت تئوری و محاسبات است. در عصر حاضر، تمام تحلیل ها به روش سختی مستقیم انجام می شوند. محاسبات با کامپیوتر انجام می گیرد. مهندس مدل را تعریف می کند ولی یک برنامه کامپیوتری سختی المان ها را محاسبه می کند، آنها را سر هم می کند، بارها را تنظیم می کند، معادلات را حل می کند و ... . به این فرایند تا حد زیادی به صورت یک جعبه سیاه نگاه می شود- می توانیم فرض کنیم که کارها درست انجام می شود و نگرانی بابت جزییات نداشته باشیم.

با این وجود، واضح است هنگامی که یک مهندس از یک روش تحلیلی استفاده می کند باید درکی از پایه های تئوریک و محاسباتی روش داشته باشد. پرسش اینجاست که: چه میزان از جزییات باید آموزش داده شود؟

معتقدم نیازی نیست برای یک دوره کارشناسی به میزان زیادی وارد جزییات شویم. دانشجو نیاز دارد مفاهیم سختی و نرمی، ماتریس سختی وضرایب سختی، فرایند سرهم کردن ماتریس سختی از روی سختی المان ها و تعداد کمی نکات دیگر را بیاموزد. اینها را می شود با دلیل آوری های فیزیکی توضیح داد بدون آنکه از ریاضی پیشرفته ای استفاده کرد. در مقایسه با پیچیدگی

های مدلسازی و تفسیر، آموختن روش سختی مستقیم دشوار نیست. جزییات کامل را می توان برای دوره های پیشرفته تحصیلات تکمیلی باقی گذاشت.

مهم است دانشجویان تشخیص دهند که روش طرح مستقیم، یک روش بدون ایراد نیست. یک مشکل رایج زمانی بروز می کند که در یک سازه یک المان خیلی سخت فرض شود، یک مهندس کم تجربه المان را به صورت نجومی سخت می کند (مثلا با مشخص کردن مساحتی برای $۱۰^{۲۰}$ برای یک المان خرپایی خیلی سخت). چنین اشتباهاتی می تواند باعث خطاهای عددی در قسمت حل معادلات روش سختی مستقیم شود. دانشجویان نیازمندند مبانی روش های عددی را بیاموزند تا از چنین اشتباهاتی جلوگیری کنند.

مهارت های برنامه نویسی کامپیوتر

معتقدم اکثر دوره های تحلیل سازه وقت زیادی را به فاز محاسبات عددی اختصاص می دهند. در میان چیزی های دیگر، نامرسوم نیست که از دانشجو تدوین یک برنامه کامپیوتری برای پیاده سازی روش سختی مستقیم (یا احتمالا سایر روش ها) خواسته شود. برنامه نویسی به تلاش زیادی نیازمند است و من معتقد نیستم در دوره کارشناسی این استفاده درستی از وقت دانشجو باشد – چیزهای مهم تری برای آموزش وجود دارد.

با این وجود ذکر این نکته نباید به مفهوم عدم تشویق دانشجویان به استفاده از کامپیوتر تفسیر شود. تعدادی از وظایف در فازهای مدلسازی و تفسیر نیازمند استفاده از تعادل، سازگاری و سایر محاسبات هستند. معمولا این محاسبات را می توان به سرعت با دست انجام داد ولی می توان با توسعه راه حل هایی با استفاده از MATLAB یا MATCHAD کارایی بهتری داشت. معتقدم دانشجویان هرگاه مقتضی باشد به استفاده از این برنامه ها تشویق شوند.

روش تدریس

معتقدم بهترین و سریعترین برای یادگرفتن تحلیل سازه ها انجام دادن تحلیل سازه هاست.

از روز اول درس اول تحلیل سازه ها به دانشجو یک برنامه کامپیوتری بدهید و شروع به اختصاص دادن تمرین هایی در راستای بخش اول این مقاله نمایید. با استفاده از این نمونه تمرین ها به او چگونگی مدل کردن سازه ها و چگونگی کنترل نتایج تحلیل را بیاموزید. نشان دهید چگونه از روش جابجایی های مجازی استفاده کند و ابزارهایی نظیر لنگر سطح و دیاگرام های ویلیوت را استفاده نماید. نشان دهید چطور ماتریس های سختی و نرمی را برای المان های ساده می توان تشکیل داد و چطور سختی و نرمی المان های موازی و سری را می توان محاسبه کرد. مبانی فیزیکی روش سختی مستقیم را توضیح دهید، اثر پی دلتا (تعادل در پیکربندی تغییرشکل یافته) را شرح دهید و رفتار ساده غیر الاستیک را معرفی نمایید (مفهوم مفصل پلاستیک). این را در چارچوب تعدادی تمرین که نیازمند مهارت هایی در مدلسازی، تحلیل و تفسیر هستند انجام دهید.

با این رویکرد، دانشجو به صورت پیش رونده مهارت های لازم را کسب خواهد کرد و هم احساسی از رفتار سازه ای کسب می کند. این رویکرد دانشجو را علاقمند نگه خواهد داشت.

یک نمونه تمرین

نمونه ای تمرین های ذکر شده ارایه شده است (صفحه ۷) که می تواند به عنوان نخستین تمرین اولین دوره درسی کارشناسی مورد استفاده قرار گیرد. از این تمرین برای معرفی مفاهیم سختی، روش سختی مستقیم، نشان دادن اینکه چطور می توان از

ابزارهای ساده تعادل و سازگاری برای بررسی نتایج تحلیل استفاده کرد، و ترغیب دانشجو به تفکر درباره رفتار سازهای استفاده کرد.

انواع دیگری از تمرین ها برای نشان دادن جنبه های مختلف رفتار سازه ای و توسعه مهارت های مختلف قابل تخصیص دادن هستند. در یک ترم آموزشی ممکن است شش نمونه از این دسته تمرین ها ارایه کرد.

دوره های تحصیلات تکمیلی

در دوره های تحصیلات تکمیلی، احتمالا تعدادی دروه تحلیلی وجود دارد. معتقدم دو دوره مبنایی باید وجود داشته باشد که در راستای همان اهداف دوره های کارشناسی ولی در سطحی پیشرفته تر قرار دارد. این دوره ها باید شامل بارهای دینامیکی، رفتار غیرخطی، مبانی المان های محدود، مقایسه اثر پی دلتا با اثر جابجایی های واقعی بزرگ باشد.

به عقیده من، هر دو عنوان بارهای دینامیکی و رفتار غیرخطی باید در این دوره های پایه گنجانده شود. در اثر برنامه های تحصیلات تکمیلی، دینامیک به عنوان یک حوزه جداگانه در نظر گرفته می شود و رفتار غیرخطی فقط در دوره های پیشرفته آموزش داده می شود که به اعتقاد من نادرست است.

پس از این دوره های تکمیلی پایه، تعدادی از دوره های پیشرفته از قبیل نظریه المان محدود، دینامیک پیشرفته، تحلیل غیرخطی پیشرفته و برنامه نویسی برای تحلیل سازه ها قرار دارد. این عناوین در دوره های دکتری برای تعداد نسبتا کمی از دانشجویان که نیازمند فهم تئوریک عمیق تری هستند ضروری است.

روش های ماتریسی

در مقاله آوریل ۲۰۰۷ تحت عنوان آموزش پایه یک مهندس سازه یک دوره درسی با عنوان تحلیل ماتریسی وجود داشت. این عنوان به صورت ضمنی بیان می کرد که در سایر روش ها تحلیل ماتریسی وجود ندارد و باید تحت روشی مجزا آموزش داده شود. به این مفهوم واقعا چیزی به عنوان تحلیل ماتریسی وجود ندارد- تنها عدد نویسی ماتریسی وجود دارد که می توان در هر روشی و هر گاه که مقتضی باشد به کار برد.

آزمون های اعطای صلاحیت

در حال حاضر قسمت تحلیل سازه آزمون های حرفه ای نیازمند تحلیل سازه های نامعین به روش های دستی است. چرا؟ وقتی به کسی گواهینامه رانندگی می دهند باید نشان دهد اسب سواری هم می داند؟

نتیجه گیری

باید هدف دوره های تحلیل سازه آموزش مهندسان جوان برای انجام تحلیل سازه های پیچیده با استفاده از روشهای مدرن باشد. علاوه بر این، باید درک کنند که چه می کنند و چرا چنین عمل می کنند؟ معتقدم که اکثر دوره های تحلیل سازه در دانشگاه های ما، در دستیابی به این هدف ناتوانند. اولین قسمت این مقاله مشکل را شرح داد و در این قسمت یک راه حل پیشنهاد کردیم.

ما خدمت نادرستی هم به دانشجویانمان و هم به حرفه ای ها ارایه می کنیم. زمان آنست که دوره ها به روز شوند و دانشجویانمان را به روش های مفید مجهز نماییم.

گراهام پاول، پروفسور بازنشسته در دانشگاه برکلی کالیفرنیا است. در مدت خدمت خود، نرم‌افزارهای مختلفی را که به‌صورت گسترده در تحقیقات و صنعت استفاده می‌شوند، توسعه داد یا بر تدوین آن نظارت کرد. او اکنون به‌عنوان مشاور شرکت CSI، توسعه‌دهنده و پشتیبان برنامه کامپیوتری CSI PERFORM مشغول به فعالیت است.

نمونه تمرین – عامل تغییر فرم در یک قاب خمشی

قاب خمشی ساده ای مشابه شکل در نظر بگیرید.

مطالعات پایه ای

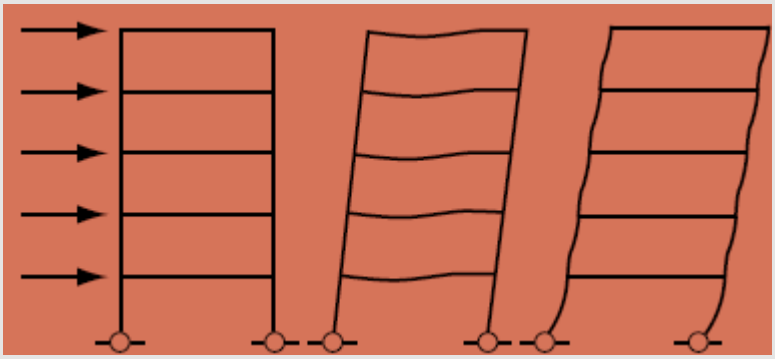
۱. با استفاده از کامپیوتر قاب را برای ستون های خیلی سخت و تیر های تغییرشکل پذیر تحلیل کنید (شکل ب). به دریفت بام نگاه کنید و شکل تغییر فرم یافته را توضیح دهید.
۲. سازه را با تیرهای خیلی سخت و ستون های تغییرشکل پذیر تحلیل کنید (شکل ج). مجددا به دریفت بام نگاه کنید و شکل تغییر فرم یافته را توضیح دهید.
۳. دریفت بام ها را مقایسه کنید تا ایده ای از اینکه چه مقدار از تغییر شکل قاب ها در ستون ها و چه میزان از تیرها سرچشمه می گیرد، بدست آورید.
۴. قاب را با تیر و ستون شکل پذیر تحلیل کنید. به دریفت بام و شکل تغییرفرم یافته نگاه کنید. ببینید که آیا دریفت بام مجموع دریفت های دوحالت قبل است یا خیر. دلیلی ندارد که دریفت حالت سوم برابر مجموع دو حالت قبل باشد ولی باید به این مجموع نزدیک باشد.
۵. برقراری تعادل در نتایج را چک کنید. به عنوان مثال، با در دست بودن نیروی برشی ستون ها، برش طبقه را بدست آورید و آن را با برش حاصل از بارهای جانبی مقایسه کنید.
۶. برای حالات (ب) و (ج) تغییر فرم را به روش دستی کنترل کنید. اینکار را می توان به آسانی با استفاده از هندسه و نرمی استاندارد تیر و طره انجام داد (تغییر فرم = $PL^3/3EI$ برای طره با بار انتهایی، تغییر فرم=$PL^3/12EI$ برای انتقال جانبی ستون دو سر گیردار و دوران انتهایی =$ML/6EI$ برای تیر).
۷. برای حالت (ب) با دریفت داده شده، دوران انتهای تیر را بدست آورید. با استفاده از سختی های تیر لنگرهای انتهایی را محاسبه نمایید. بررسی کنید نتیجه با تحلیل کامپیوتری تطابق دارد.

تعدادی مطالعه تکمیلی

۱. برای حالت تیر با سختی زیاد، حالات تکیه گاهی صلب و مفصلی را برای ستون های طبقه پایین در نظر بگیرید. نشان دهید که طبقه اول با تکیه گاه های مفصلی چهار بار از همان طبقه با تکیه گاه های صلب شکل پذیرتر است. به دیاگرام های لنگر خمشی نگاه کنید و با استفاده از روش لنگر سطح دلیل تفاوت دریفت را ببینید. توضیح دهید چگونه می توان اتصال مفصلی و گیردار (مقاوم در برابر لنگر خمشی) در یک قاب واقعی ایجاد کرد. توضیح دهید چطور واقعا چنین اتصالات گیرداری از نظر دورانی صلب هستند.
۲. اندازه تیرها و ستون ها در محدوده کاربردهای عملی تغییر دهید. نسبت های عملی دهانه به عمق را شرح دهید.
۳. برای حالتی که تیر تغییرفرم پذیر است، ناحیه سخت شده انتهایی را به تیرها اضافه کنید تا سختی زیاد اتصالات را به حساب آورده باشید. بررسی کنید که چقدر به سختی اضافه می شود. لنگر خمشی را در بر ستون و خط مرکزی ستون مقایسه کنید.
۴. برای یک اندازه معمول عضو فولادی، تیر و ستون خیلی سخت با چشمه اتصال تغییرشکل پذیر را تحلیل کنید. بررسی کنید که چه میزان از تغییر فرم ها ناشی از چشمه اتصال است.
۵. سختی ستون را به صورت نجومی افزایش دهید. پاسخ ها بی ربط خواهند بود. نشان دهید که اگر نسبت سختی بین تیرها و ستون ها از دقت کامپیوتر بیشتر شود، صحت پاسخ ها از بین می رود. به صورت پیوسته سختی

ستون ها را کم کنید و نشان دهید که جواب درست چه موقع بدست می آید. نشان دهید که اگر سختی ستون ها ۱۰۰ برابر یا بیشتر از سختی تیرها باشد، پاسخ ها تغییر زیادی نمی کنند.

۶. به جای ستون خیلی سخت، از قید لینک صلب برای ایجاد ستون واقعا صلب استفاده کنید. توجه کنید که مشکلات حساسیت عددی بروز نمی کند. توجه کنید وقتی که ستون خیلی سخت است کامپیوتر مقادیری برای P,M,V ستون محاسبه می کند ولی با استفاده از قید لینک صلب مقادیر تلاش ها صفر گزارش می شود.



الف ب ج

مترجم: عبدالمهدی عباسی