

## مدل سازی اجزا غیرخطی مهاربندهای کمانش تاب (BRB) مدل Powercat در نرم افزار Perform

### هدف

برای کمک به تعریف اعضای BRB در برنامه تحلیل سازه‌ای Perform، Rutherford و Chekene اعضا را مطابق با نتایج هیستریتیک ۹ مهاربند آزمایش شده، مدل سازی کردند. هدف، ارائه مدل‌های بهینه سازی شده اعضا برای ۹ مهاربند آزمایش- شده مدل Powercat و ارائه روشی کلی برای درون‌یابی مدل‌های اجزا در پیکربندی مهاربندهایی است که آزمایش نشده‌اند. در این گزارش نتایج کارهای انجام شده به صورت خلاصه ارائه می‌گردد و همچنین دستورالعمل‌هایی برای کلی سازی اعضای غیرخطی مهاربندهای کمانش تاب مدل Powercat ارائه شده است.

### مهاربندهای استفاده شده در مدل سازی اعضای مهاربند کمانش تاب

شرکت StarSeismic لیستی از مشخصات مهاربند و نتایج آزمایش چرخه تغییر مکان - نیرو را برای نه مهاربند کمانش تاب مدل Powercat تهیه کرده است. هشت مهاربند در دانشگاه کالیفرنیا مورد آزمایش قرار گرفته‌اند و مقاومت  $P_{YSC}$  آن‌ها محاسبه شد. بازه این مقاومت از بازه ۱۵۹ kips تا ۱۲۰۲ kips را شامل می‌شد. طول هسته جاری شونده،  $L_z$ ، برای تمام هشت مهاربند بین ۱۷۶ تا ۱۸۵ اینچ بود. فاصله بین تا پین تمام مهاربندها ۲۵۲ اینچ بود.

مهاربند نهم هم در دانشگاه یوتا آزمایش شد. مقاومت محاسبه شده برای این مهاربند ( $P_{YSC}$ ) برابر با ۷۸۳ kips بود. طول هسته جاری شونده این مهاربند برابر با ۱۴۴ اینچ و فاصله بین تا پین این مهاربند هم برابر با ۲۰۵ اینچ بود.

### مدل های اعضای مهاربند بهینه سازی شده

ما مدل های اعضای مهاربند کمانش تاب را برای هر نه مهاربند مدل Powercat در نرم افزار Perform تعریف کرده‌ایم. المان مدل سازی شده در Perform یک عضو مرکب BRB است که شامل دو عضو اصلی می‌شود. برای نشان دادن رفتار الاستیک مهاربند در خارج از منطقه هسته جاری شونده، ما از یک عضو میله‌ای الاستیک خطی استفاده کردیم. رفتار هسته جاری شونده با المان غیر الاستیک BRB در Perform نشان داده شده می‌شود. از آنجا که ما تنها پیکربندی مهاربندهای آزمایش شده را مدل سازی می‌کنیم، مدل سازی دو انتهای صلب را که نشان دهنده طول اضافی از اتصال بین مهاربند تا نقطه همرسی (work point) BRB است را انتخاب نمی‌کنیم. برنامه Perform این امکان را در اختیار قرار می‌دهد تا بتوانیم این قسمت‌های صلب را در مدل‌های واقعی ساختمان، مدل سازی کنیم.

برای تأیید کافی بودن مدل‌های تحلیلی اعضا، ما از دو معیار ارزیابی استفاده کردیم. طبق اولین مقیاس ما نمودارهای رفتار نیرو - تغییر مکان مهاربند تست شده و عضو مرکب BRB در Perform را تحت تاریخچه‌های زمانی تغییر مکان مشابه به صورت بصری بازرسی کردیم. طبق دومین مقیاس هم ما انرژی پسماند تجمعی تلف شده را در مهاربند آزمایش شده به وسیله جمع مساحت پوشش داده شده در پسماند مهاربند در تمام چرخه‌ها را محاسبه کردیم. ما انرژی پسماند مهاربند آزمایش شده را با انرژی پسماند تجمعی تلف شده توسط عضو BRB شبیه سازی شده در Perform مقایسه کردیم تا خطای انرژی پسماند محاسبه شود. ما نشان دادیم که خطای انرژی پسماند در حد قابل قبولی برای تمام BRB های آزمایش شده قرار داشت.

ما برای عضو BRB غیر الاستیک از گزینه رابطه نیرو - تغییر مکان سه خطی استفاده کردیم. مهاربندهای آزمایش شده رفتار الاستیک - پلاستیک را نمایش نمی‌دهند و گزینه سه خطی تناسب بیش‌تری با عضو دارد. از آنجا که مهاربندهای آزمایش شده انعطاف‌پذیری را روی هم انباشت می‌کنند، سخت‌شدگی اتفاق می‌افتد. ما این رفتار سخت‌شدگی را با استفاده از گزینه سخت‌شدگی برای عضو غیر الاستیک BRB مدل‌سازی کرده‌ایم. ما دریافتیم که گزینه «Maximum Deformation Only» بهترین تناسب را با سخت‌شدگی مهاربند Powercat آزمایش شده دارد.

مشخصات اعضای BRB غیر الاستیک بهینه‌سازی شده در جدول ۱ نشان داده شده است. گزینه‌های سخت‌شدگی برای مهاربندها در جدول ۲ نشان داده شده است. مشخصات المان میله‌ای الاستیک خطی در جدول ۳ نشان داده شده است. یک نمونه نمودار از رفتار نیرو - تغییر مکان برای مهاربند آزمایش شده و عضو مرکب متناظر با آن در نرم افزار Perform در شکل ۱ نشان داده شده است.

### محاسبه مشخصات عضو Perform عمومی

برای ارائه پارامترهای مدل‌سازی عضو در مهاربندهای آزمایش نشده، رگرسیون خطی مشخصات اعضای BRB غیر الاستیک بهینه‌سازی شده را محاسبه کردیم. تمام مدل‌های عضو از سختی هسته جاری شدن محاسبه شده و سختی بخش الاستیک که توسط StarSeismic محاسبه شده‌اند، استفاده می‌کنند. مقاومت جاری شدن و مقاومت‌های سخت‌شدگی بر اساس نتایج رگرسیون محاسبه می‌شوند. مشخصات مهاربندهای آزمایش شده بر اساس نتایج مدل کلی در جدول ۴ نشان داده شده است. مقایسه نتایج پسماند نیرو - تغییر مکان برای مدل‌های عضو BRB بهینه‌سازی شده و تعریف شده در Perform، در شکل ۲ نشان داده شده است.

ما فرض می‌کنیم که شرکت StarSeismic اطلاعات زیر را برای تمام مهاربندهای مقاوم در برابر کمانش ارائه می‌دهد:

- $K_{CORE}$  بر حسب kip/in: سختی الاستیک هسته جاری شونده
- $K_{ELASTIC SEGMENT}$  بر حسب kip/in: سختی الاستیک مهاربند به جز هسته جاری
- $K_{EFF}$  بر حسب kip/in: سختی الاستیک عمومی مهاربند
- $P_{YSC}$  بر حسب kip: مقاومت جاری شدن مهاربند
- $L_{YZ}$  بر حسب اینچ: طول هسته جاری شونده
- $L_{PIN-PIN}$  بر حسب اینچ: طول پین تا پین مهاربند
- $A_{ELASTIC SEGMENT}$  بر حسب اینچ مربع: مساحت معادل مهاربند به جز هسته جاری شونده

عضو BRB غیر الاستیک (شکل ۴-۳): بر اساس این مشخصات اساسی مهاربند، ما ورودی‌های عضو BRB (مهاربند کمانش تاب) غیر الاستیک را در Perform به صورت زیر محاسبه می‌کنیم (واحدها بر حسب kips و اینچ هستند):

$$K_0 = K_{CORE}$$

$$KF = 0.02 K_{EFF}$$

$$FY(T) = 0.89 P_{YSC}$$

$$FY(C) = 0.88 P_{YSC}$$

$$FU(T) = 1.05 P_{YSC}(T)$$

$$FU(C) = 1.04 P_{YSC}(C)$$

$$DU(T) = 0.70$$

$$DU(C) = 0.70$$

$$DX(T) = 0.04 L_{YSC}$$

$$DX(C) = 0.04 L_{YSC}$$

پارامترهای سخت شدگی برای عضو غیر الاستیک BRB باید بر اساس گزینه «Maximum Deformation Only» و پارامترهای زیر وارد شوند:

$$\text{Deformation at } FU - FUH \text{ Average} = 2 \left( \frac{L_{YZ}}{180} \right)$$

$$\text{Deformation at } FUH = 3.5 \left( \frac{L_{YZ}}{180} \right)$$

میله الاستیک خطی (شکل ۵): عضو نوار الاستیک خطی به صورت زیر مدل سازی می شود (واحدها بر حسب kips و اینچ هستند):

$$E = 29000$$

$$A = A_{ELASTIC SEGMENT}$$

عضو مرکب BRB (شکل ۶): عضو مرکب BRB از یک عضو غیر الاستیک BRB، عضو میله ای الاستیک خطی همراه آن و بخش انتهایی صلب تشکیل شده است. منطقه انتهایی صلب را می توان برای نشان دادن طول از اتصال بین مهاربند تا نقطه همرسی مهاربند تعریف کرد. عضو مرکب مهاربند نشان داده شده در شکل ۴ شامل بخش انتهایی صلب نمی شود.

جدول ۱: مشخصات عضو BRB غیر الاستیک بهینه سازی شده در Perform												
$D_X(C)$	$D_X(T)$	$D_U(C)$	$D_U(T)$	$F_{UH}(C)$	$F_{UH}(T)$	$F_U(C)$	$F_U(T)$	$F_Y(C)$	$F_Y(T)$	KF	K.	قطعه
In	In	In	In	Kip	Kip	Kip	Kip	Kip	Kip	Kip/in	Kip/in	
7.04	7.04	0.7	0.7	250	225	160	160	130	135	11.3	625	PC160
7.18	7.18	0.7	0.7	370	340	250	245	190	195	16.8	963	PC250
7.33	7.33	0.7	0.7	520	470	355	345	280	300	22.6	1319	PC350
7.40	7.40	0.7	0.7	790	750	530	515	420	430	33.5	1983	PC500
7.37	7.37	0.7	0.7	1200	1050	720	720	625	640	47.7	2810	PC750
7.18	7.18	0.7	0.7	1200	1050	720	720	625	640	50.3	2888	PC750-2
7.41	7.41	0.7	0.7	1735	1520	1275	1325	1100	1100	75.0	4467	PC1200
7.25	7.25	0.7	0.7	1700	1500	1300	1300	1100	1100	77.8	4578	PC1200-2
5.77	5.77	0.7	0.7	1325	1215	785	785	680	690	63.4	3822	PC98A

جدول ۲. مشخصات سخت شدگی عضو BRB غیر الاستیک بهینه سازی شده در Perform

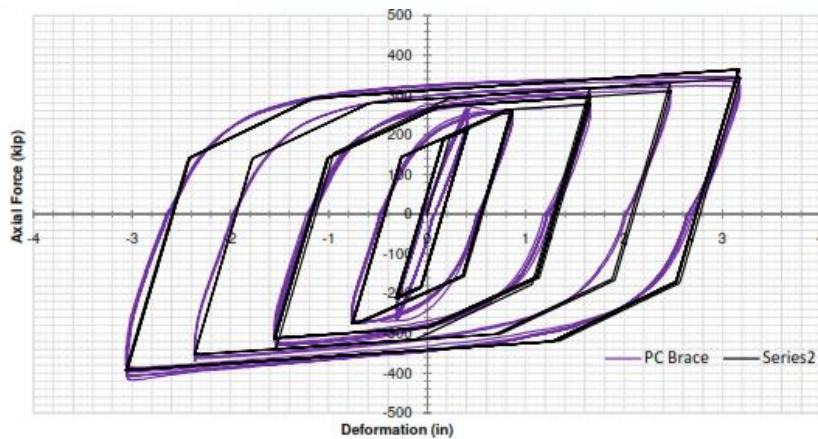
نهایی	میانگین	گزینه	قطعه
-	-	-	
۳,۵	۲	Max	PC۱۶۰
۳,۵	۲	Max	PC۲۵۰
۳,۵	۲	Max	PC۳۵۰
۳,۵	۲	Max	PC۵۰۰
۳,۵	۲	Max	PC۷۵۰
۳,۵	۲	Max	PC۷۵۰-۲
۳,۵	۲	Max	PC۱۲۰۰
۳,۵	۲	Max	PC۱۲۰۰-۲
۲,۸	۱,۶	Max	PC۷۹۸A

جدول ۳. مشخصات عضو میله‌ای الاستیک خطی بهینه سازی شده در Perform

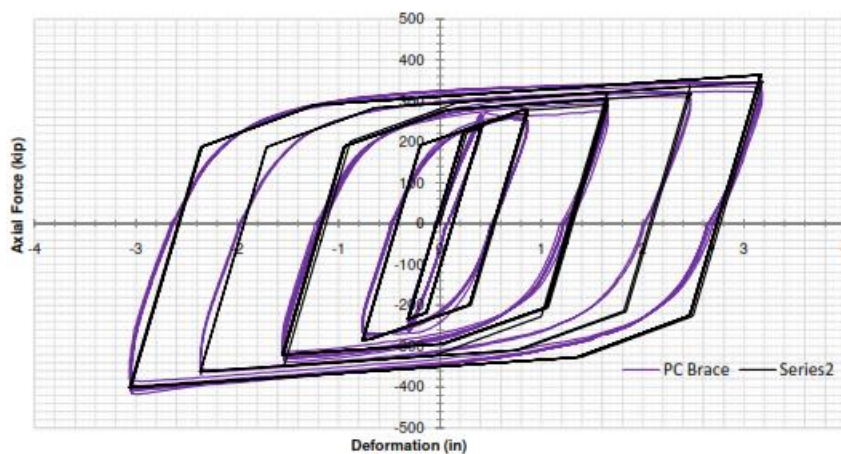
A	E	قطعه
$in^2$	Kip/in	
۱۵,۰۸	۲۹۰۰۰	PC۱۶۰
۱۶,۴۰	۲۹۰۰۰	PC۲۵۰
۱۸,۴۱	۲۹۰۰۰	ثی
۲۴,۷۴	۲۹۰۰۰	PC۵۰۰
۳۶,۹۲	۲۹۰۰۰	PC۷۵۰-۲۹۰۰۰
۴۹,۱۱	۲۹۰۰۰	PC۷۵۰-۲
۵۳,۸۹	۲۹۰۰۰	PC۱۲۰۰
۶۳,۱۵	۲۹۰۰۰	PC۱۲۰۰-۲
۳۹,۱۶	۲۹۰۰۰	PC۷۹۸A

جدول ۱: مشخصات عضو BRB غیر الاستیک بهینه سازی شده در Perform

$D_x(C)$	$D_x(T)$	$D_U(C)$	$D_U(T)$	$F_{UH}(C)$	$F_{UH}(T)$	$F_U(C)$	$F_U(T)$	$F_y(C)$	$F_y(T)$	KF	K.	قطعه
In	In	In	In	Kip	Kip	Kip	Kip	Kip	Kip	Kip/in	Kip/in	
۷,۰۴	۷,۰۴	۲۴۱	۲۱۴	۱۶۵	۱۶۷	۱۴۰	۱۴۲	۱۳۰	۱۳۵	۱۱,۳	۶۲۵	PC۱۶۰
۷,۱۸	۷,۱۸	۳۷۸	۳۳۶	۲۶۰	۲۶۲	۲۲۰	۲۲۳	۱۹۰	۱۹۵	۱۶,۸	۹۶۳	PC۲۵۰
۷,۳۳	۷,۳۳	۵۲۹	۴۷۱	۳۶۴	۳۶۷	۳۰۹	۳۱۲	۲۸۰	۳۰۰	۲۲,۶	۱۳۱۹	PC۳۵۰
۷,۴۰	۷,۴۰	۷۵۵	۶۷۲	۵۱۹	۵۲۴	۴۴۱	۴۴۶	۴۲۰	۴۳۰	۳۳,۵	۱۹۸۳	PC۵۰۰
۷,۳۷	۷,۳۷	۱۱۳۲	۱۰۰۸	۷۷۸	۷۸۵	۶۶۱	۶۶۹	۶۱۰	۶۴۰	۴۷,۷	۲۸۱۰	PC۷۵۰
۷,۱۸	۷,۱۸	۱۱۳۳	۱۰۰۹	۷۷۹	۷۸۶	۶۶۱	۶۶۹	۶۲۵	۶۴۰	۵۰,۳	۲۸۸۸	PC۷۵۰-۲
۷,۴۱	۷,۴۱	۱۸۱۵	۱۶۱۶	۱۲۴۸	۱۲۵۸	۱۰۵۹	۱۰۷۲	۱۱۰۰	۱۱۰۰	۷۵,۰	۴۴۶۷	PC۱۲۰۰
۷,۲۵	۷,۲۵	۱۸۱۵	۱۶۱۶	۱۲۴۸	۱۲۵۸	۱۰۵۹	۱۰۷۲	۱۱۰۰	۱۱۰۰	۷۷,۸	۴۵۷۸	PC۱۲۰۰-۲
۵,۷۷	۵,۷۷	۱۱۸۲	۱۰۵۳	۸۱۳	۸۲۰	۶۹۰	۶۹۸	۶۸۰	۶۹۰	۶۳,۴	۳۸۲۲	PC۷۹۸A



شکل ۳. عضو مرکب بهینه سازی شده PC۲۵۰ در Perform و پسماند مهاربند آزمایش شده



شکل ۴. عضو مرکب معمولی PC۲۵۰ در Perform و پسماند مهاربند آزمایش شده

**COMPONENT PROPERTIES**

Materials Strength Sects Compound Cross Sects.

**Inelastic**

Type: BRB (Buckling Restrained Brace)

Name: PC160

Length Unit: in Force Unit: kip

Status: Saved

Graph Save Save As Delete

Shape of Relationship:  E-P-P  Tailored

Use Cross Section:  Yes  No

Symmetry:  Yes  No

Deformation Capacities:  Yes  No

Strength Loss:  Yes  No

Cyclic Degradation:  None

Upper/Lower Bounds:  Yes  No

YULRX:  YULRX  YX+3

Import Components: Export Components

Selected components of this type.  All components of all types.

**Basic Properties**

Push-Over Upper/Lower Bounds Hardening Behavior Capacities

**F = axial force. D = axial extension or shortening.**

Tension Positive

BRB length: 176

This is used later, for a BRB compound component.

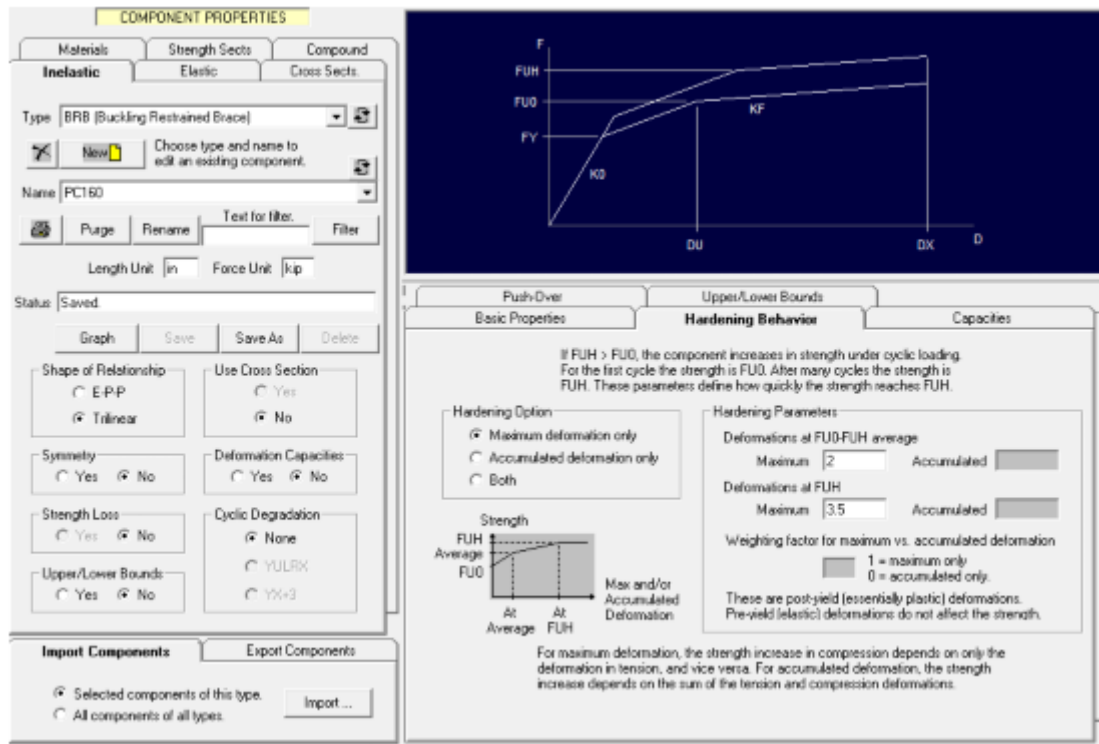
Forces	Tension	Compression
FY	142	140
FUD	167	165
FUH	214	241

FUO = strength for first loading cycle. FUH = strength after full hardening.

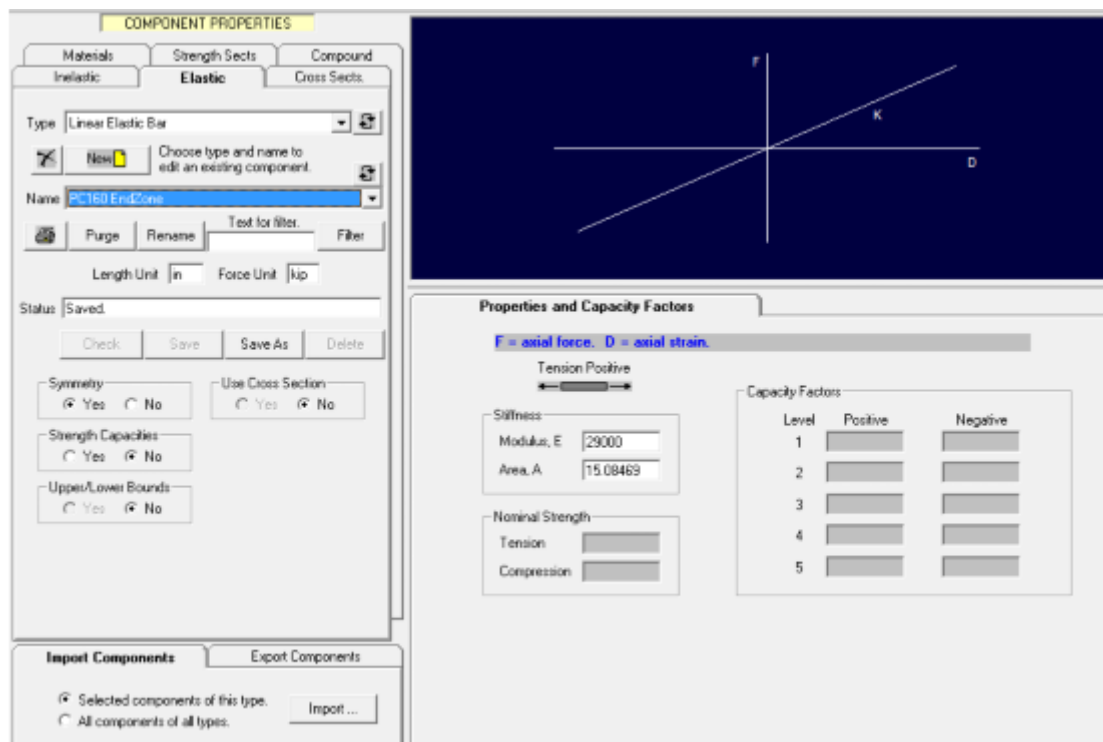
Stiffnesses	Tension	Compression
KD	625	
KF	11.28	

Deformations	Tension	Compression
DU	0.7	0.7
DX	7.04	7.04

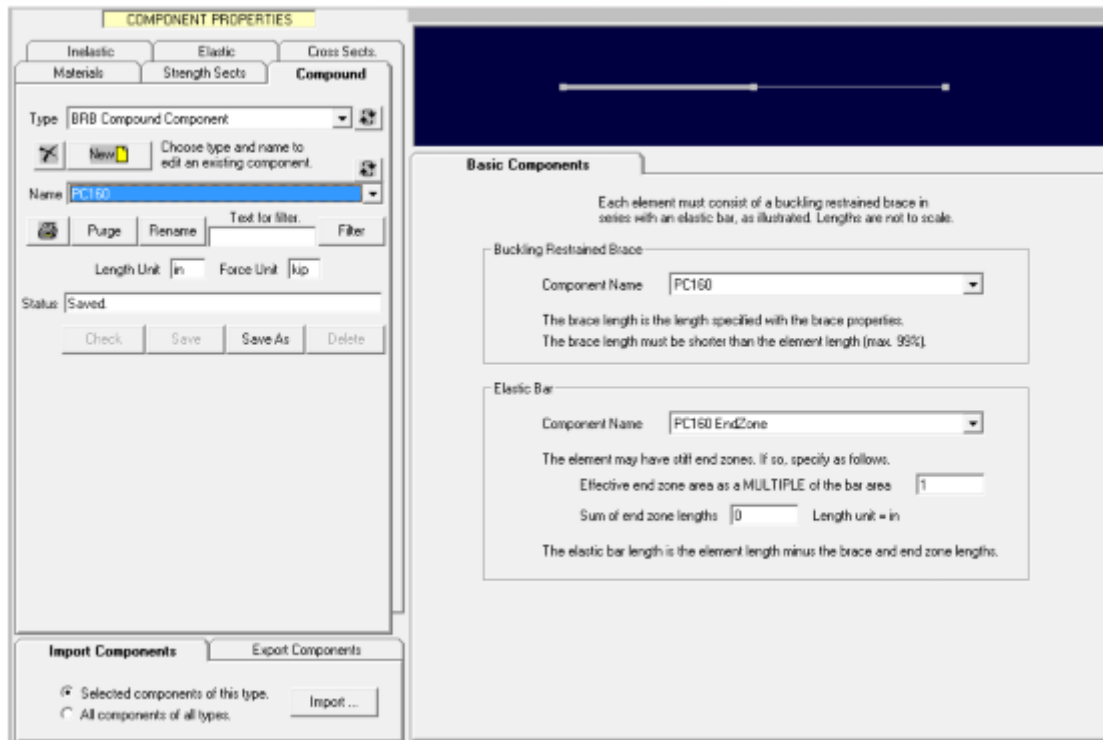
شکل ۳: نمونه ورودی داده های عضو غیر الاستیک BRB (مهاربند مقاوم در برابر کماتش) در نرم افزار Perform. عضو BRB رفتار و مشخصات منطقه هسته جاری شونده BRB را نشان می دهد. اطلاعات نشان داده شده مربوط به مهاربند Powercat™ PC۱۶۰ است که با علامت UCSD۱ آزمایش شده است.



شکل ۴: نمونه ورودی داده های رفتار سخت شدگی عضو غیر الاستیک BRB (مهاربند مقاوم در برابر کمانش). اطلاعات نشان داده شده مربوط به مهاربند Powercat™ PC160 است که با کد UCSD1 آزمایش شده است.



شکل ۵: نمونه ورودی داده های عضو میله ای الاستیک خطی. میله الاستیک خطی مشخصاتی دارد که مشخصات خالص بخش الاستیک BRB را نشان می دهد. اطلاعات نشان داده شده مربوط به مهاربند Powercat™ PC160 است که با کد UCSD1 آزمایش شده است.



شکل ۶. نمونه ورودی داده های عضو مرکب BRB. عضو مرکب شامل عضو BRB غیر الاستیک و عضو میله ای الاستیک خطی است. اطلاعات نشان داده شده مربوط به مهاربند Powercat PC160 است که با کد قطعه UCSD1 آزمایش شده است.

مترجم: علی اکبر خلیلی