

## روش تحلیل دینامیکی طیفی

### ۱- مقدمه

سالیانه تعداد قابل توجهی ساختمان، با کاربری های گوناگون در کشور طراحی و ساخته می شوند. هدف از طراحی یک ساختمان دستیابی به طرحی اقتصادی، ایمن، با کیفیت است. شکل (۱) فرایند کلی طراحی سازه ای ساختمانها را نشان می دهد. در صورتیکه هریک از گام های نشان داده شده در شکل (۱) بطور صحیح صورت نگیرد نتیجه نامطلوب خواهد بود و اهداف مورد نظر پیمانکار محقق نخواهد شد. سازه ای تحلیل های صحیح و دقیق است. صحت نتایج تحلیل سازه نیز به مدلسازی و درست وابستگی دارد. ادامه بحث این یادداشت فنی بر گام های دوم و سوم یعنی بارگذاری و تحلیل سازه تمرکز پیدا با توجه به لرزه خیزی ایران، طراحی ساختمانها بصورتی که در برابر زلزله مقاوم باشند اهمیت پیدا می کند.



فصل هفتم از مبحث محاسبه عمل لرزه خیزی و زلزله خیزان ساختمان را با چند روش پیشنهاد نموده است روش تحلیل استاتیکی معادل و روش تحلیل دینامیکی طیفی (روش تحلیل های بیشترین کاربرد را دارند. با توجه به محدودیت های روش استاتیکی معادل، همچنین دقت روش تحلیل دینامیکی طیفی، استفاده از تحلیل روش تحلیل را قوت می بخشد. هدف از این نوشتار آشنایی با روش دینامیکی طیفی می باشد، در ادامه ابتدا روش استاتیکی معادل به اختصار آمده و پس از آن روش دینامیکی طیفی تشریح گردیده است.

### ۲- روش استاتیکی معادل

در این روش نیروی مجازاتی کلیش فلت و لرزه گشتی صورت سازه اعمال می شود. لازم به ذکر است مقدار این نیرو با توجه به رابطه ۶-۷-۱ مبحث ششم مقررات ملی ساختمان محاسبه می شود.

$$V=C.W$$

$$(۱-۷-۶)$$

که در رابطه فوق  $V$  نیروی جانبی زلزله،  $W$  وزن کل ساختمان (شامل همه بار مرده و درصدی از بار زنده و برف) و  $C$  ضریب زلزله می شود که با استفاده از رابطه ۶-۷-۲ مبحث ششم مقررات ملی ساختمان قابل محاسبه می باشد. همانطور که از رابطه ۶-۷-۱ نیز مشخص است در روش استاتیکی معادل درصدی از وزن سازه بعنوان نیروی جانبی زلزله تعیین شده و بصورت افقی بر آن اعمال می شود. زلزله وارد بر ساختمان، به کمک رابطه ۶-۷-۱۰ در میان طبقات ساختمان توزیع می شود تا نیروی زلزله وارد بر هر طبقه تعیین گردد. در نهایت نیروی زلزله هر طبقه بصورت استاتیکی رفت و برگشتی بر ساختمان اعمال شده و نیروهای ایجادشده در هر عضو مشخص می گام بعدی طراحی اعضا است که در اینجا به آن پرداخته نمی شود.

## ۲-۱- دامنه کاربرد روش تحلیل

روش تحلیل استاتیکی معادل تنها در یکی از سه حالت زیر قابل استفاده است:

الف. ساختمان های منظم با ارتفاع کمتر از ۵۰ متر از تراز پایه (ساختمان ۱۵ یا ۱۶ طبقه)

ب. ساختمان های نامنظم تا ۵ طبقه و یا با ارتفاع کمتر از ۱۸ متر از تراز پایه

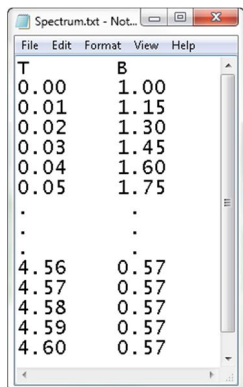
پ. ساختمان هایی که در آنها سختی جانبی قسمت فوقانی به طور قابل ملاحظه ای کمتر از سختی جانبی در قسمت تحتانی است به شرط آن که:

- ✓ هر یک از دو قسمت فوقانی و تحتانی به تنهایی منظم باشند
- ✓ سختی متوسط طبقات تحتانی حداقل ده برابر سختی متوسط طبقات فوقانی باشد
- ✓ زمان تناوب اصلی نوسان کل سازه کمتر از ۱.۰۱ برابر زمان تناوب اصلی قسمت فوقانی باشد (با این فرض که قسمت فوقانی جدا و با پایه گیردار فرض شود).

روش تحلیل دینامیکی طیفی برای کلیه ساختمان ها قابل استفاده است اما استفاده از روش تحلیل استاتیکی معادل فقط محدود به ساختمانهایی منطبق با بند های الف، ب یا پ است و در سایر حالت ها انجام تحلیل دینامیکی الزامی است.

## ۳- روش تحلیل دینامیکی طیفی

در این روش، تحلیل دینامیکی سازه با فرض رفتار خطی آن انجام می شود. ابتدا به کمک آنالیز مودال، مد های نوسان سازه تعیین می شوند، سپس با توجه به زمان تناوب هر مد، با مراجعه به طیف طرح، حداکثر بازتاب در هر مد بدست می آید و در مرحله بعد با ترکیب آماری، بازتاب مد ها با هم ترکیب می شوند. در ادامه نحوی انجام تحلیل دینامیکی طیفی در نرم افزار SAP2000 تشریح می گردد. پیش از آن لازم به ذکر است که باید با استفاده از رابطه ۶-۷-۴ مبحث ششم مقررات ملی ساختمان و به کمک نرم افزار Excel، مقادیر بازتاب (B) به ازای زمان تناوب های از صفر تا ۴.۶ ثانیه ( $T=0 \sim 4.6$ ) محاسبه شده و مقادیر عددی در یک فایل متنی ذخیره گردد (شکل ۱).



T	B
0.00	1.00
0.01	1.15
0.02	1.30
0.03	1.45
0.04	1.60
0.05	1.75
.	.
.	.
.	.
4.56	0.57
4.57	0.57
4.58	0.57
4.59	0.57
4.60	0.57

	A	B
1	T	B
2	0.00	1.00
3	0.01	1.15
4	0.02	1.30
5	0.03	1.45
6	0.04	1.60
7	0.05	1.75
	⋮	⋮
456	4.56	0.57
457	4.57	0.57
458	4.58	0.57
459	4.59	0.57
460	4.60	0.57

شکل ۱- محاسبه مقادیر عددی بازتاب در نرم افزار Excel و ذخیره سازی در فایل متنی

### ۳-۱- شروع کار با نرم افزار SAP2000

پس از اتمام مدل سازی و بارگذاری سازه، بمنظور انجام آنالیز دینامیکی طیفی ابتدا پارامتر های آنالیز مودال را در نرم افزار تنظیم می کنیم، سپس تابع طیف پاسخ را از فایل متنی که پیش تر به آن اشاره شد وارد نرم افزار می کنیم. در مرحله بعد پارامتر های مربوط به آنالیز دینامیکی طیفی را تنظیم می کنیم. در نهایت آنالیز را انجام داده و پس از اتمان آن باید مقادیر برش پایه حاصل از تحلیل دینامیکی طیفی با مقدار برش پایه حاصل از روش تحلیل استاتیکی معادل همپایه شود همچنین باید کنترل کنیم که تعداد مد های در نظر گرفته شده کافی بوده یا خیر. مراحل فوق بصورت عملی در ادامه آمده است.

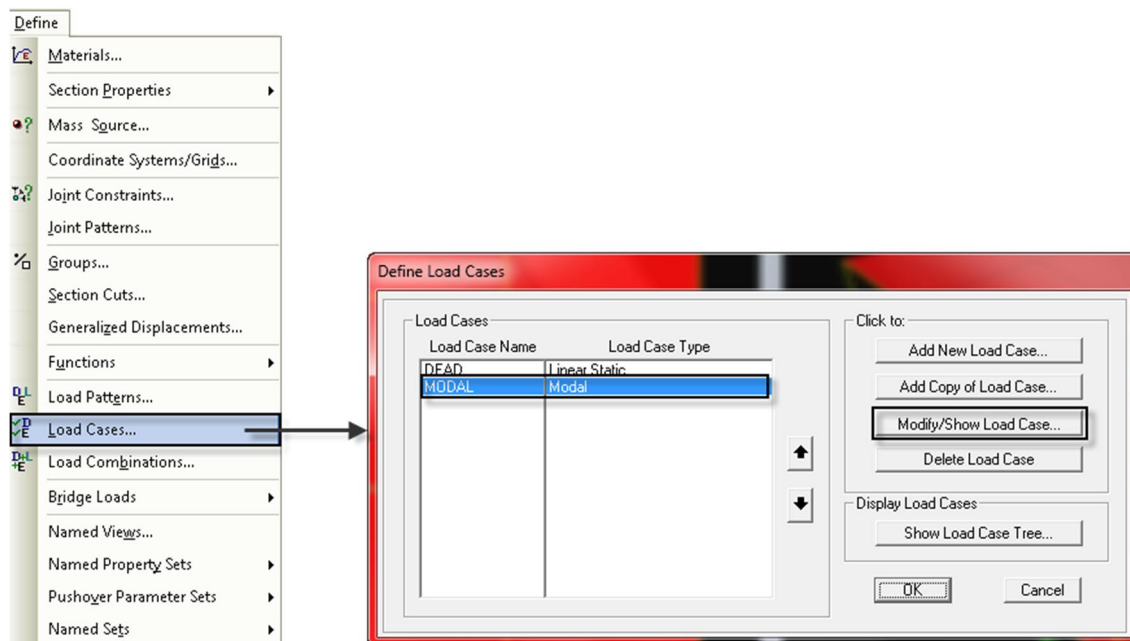
#### ۳-۱-۱- آنالیز مودال

با توجه به بخش ۶-۷-۲-۶-۲ از مبحث ششم مقررات ملی ساختمان:

"در هر یک از دو امتداد ساختمان باید حداقل سه مد اول نوسان، یا تمام مد های نوسان با زمان تناوب بیشتر از ۰.۴ ثانیه و یا تمام مدهای نوسان که مجموع جرمهای موثر در آنها بیشتر از ۹۰ درصد جرم کل سازه است، هر کدام که تعدادشان بیشتر است در نظر گرفته شود."

به ازای هر یک از طبقات ساختمان سه مد در نظر می گیریم (مثلا ۱۵ مد برای یک ساختمان ۵ طبقه). بخش ۶-۷-۲-۶-۲ از مبحث ششم مقررات ملی ساختمان مقرر می دارد که حداکثر بازتابهای دینامیکی سازه از قبیل نیرو های داخلی، اعضا، تغییر مکانها، نیرو های طبقات، برش های طبقات و عکس العمل پایه در هر مد را باید با روش های آماری شناخته شده مانند روش جذر مجموع مربعات (SRSS) و یا روش ترکیب مربعی کامل (CQC) تعیین نمود.

از منوی Define گزینه Load Cases... را انتخاب نموده تا به پنجره تعریف حالات بار دسترسی پیدا می کنیم. سپس در پنجره ظاهر شده آنالیز مودال را انتخاب نموده و بر روی دکمه Modify/Show Load Case... کلیک می کنیم (شکل ۲).



## شکل ۲- مسیر و پنجره تعریف حالات بار

پنجره تنظیمات آنالیز مودال باز شده و پارامترهای آنرا با توجه به ضوابط مقررات ملی ساختمان تعیین می کنیم. تعداد مد ها را برابر ۱۵ عدد قرار می دهیم. همچنین روش CQC را بعنوان روش ترکیب مدی انتخاب خواهیم نمود (شکل ۳).

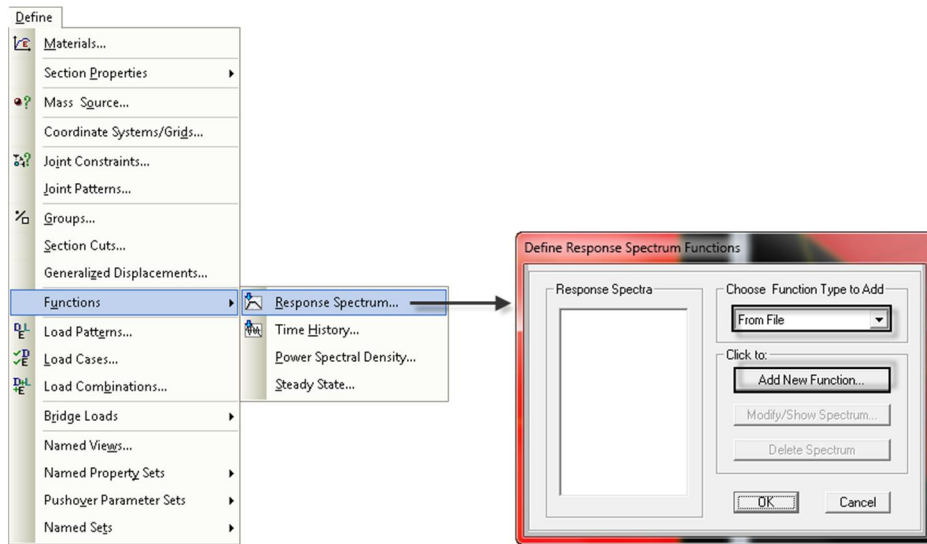
## شکل ۳- پنجره تنظیم پارامترهای آنالیز مودال

لازم به ذکر است که نرم افزار SAP2000 قادر است آنالیز مودال را از دو روش مقدار ویژه و روش ریتز محاسبه نماید. در سازه هایی با درجات آزادی زیاد روش بردارهای ریتز سریعتر و مناسب تر است، اما بمنظور حفظ سهولت، در اینجا روش مقادیر ویژه استفاده شده است.

### ۳-۱-۲- تعریف تابع طیف در نرم افزار

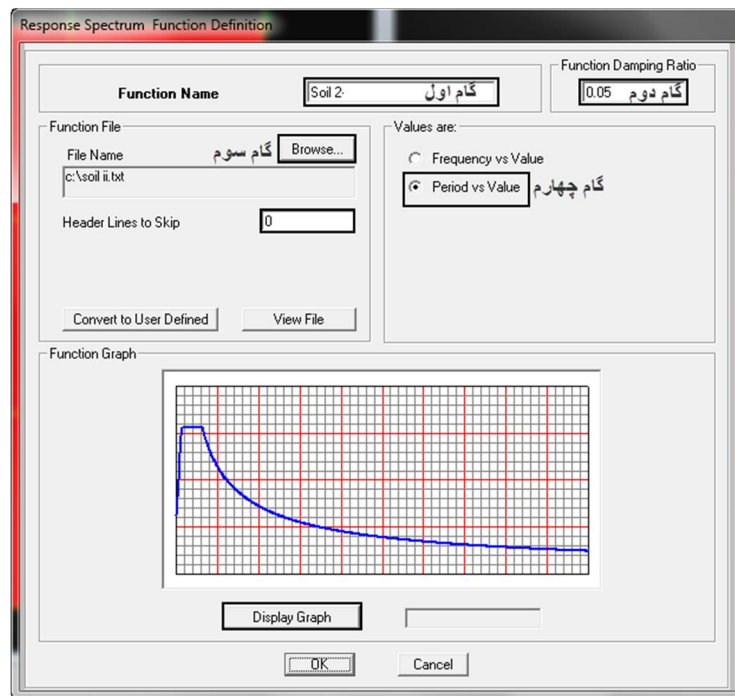
برای انجام آنالیز دینامیکی باید طیف طرح آیین نامه مورد نظر به نرم افزار معرفی شده و یا از طیف های موجود در نرم افزار استفاده شود. با توجه به اینکه طیف طرح آیین نامه ایران در نرم افزار وجود ندارد باید آنرا از طریق فایل متنی به نرم افزار وارد کنیم. پیشتر نحوه ایجاد مقادیر طیف در Excel و ذخیره سازی در فایل متنی به اختصار بیان شد. در ادامه نحوی فراخوانی این فایل متنی در نرم افزار SAP2000 می آید.

با توجه به مسیری که در شکل ۴ مشخص شده است، از منوی Define پنجره تعریف توابع را باز می کنیم. در پنجره Define Response Spectrum Functions از قسمت Choose Function Type to add گزینه From File را انتخاب نموده و سپس روی دکمه Add New Function کلیک می کنیم تا پنجره ای با عنوان Response Spectrum Function Definition، مشابه شکل ۵ باز شود. گام اول، در قسمت نام تابع نام دلخواهی برای طیف مورد نظر وارد می کنیم. در گام دوم در قسمت مربوط به درصد میرایی طیف، با توجه به ضوابط آیین نامه مقدار ۰.۰۵ را وارد می کنیم. گام سوم، روی دکمه Browse



شکل ۴- مسیر و پنجره تعریف تابع طیف

کلیک نموده و فایل متنی طیف را در نرم افزار فراخوانی می کنیم. در گام چهارم گزینه Period vs Value را انتخاب می کنیم، چون طیف مورد نظر بر حسب پریود می باشد و نه فرکانس. با فشردن دکمه Display Graph شکل طیف ترسیم می گردد. در آخر برای اینکه تابع تعریف شده به فایل متنی فراخوانی شده وابسته نباشد بر روی دکمه Convert to User Defined کلیک می کنیم، در غیر اینصورت هنگامی که فایل مدل به دستگاه دیگری منتقل شود و یا فایل متنی جابجا یا پاک شود طیف تعریف شده دچار مشکل می گردد.



شکل ۵- فراخوانی فایل متنی طیف در نرم افزار SAP2000

### ۳-۱-۳- تعریف حالت بار تحلیل دینامیکی طیفی در نرم افزار

از مسیر اشاره شده در قسمت ۳-۱-۱ (شکل ۲) به پنجره حالات بار رفته و روی دکمه Add New Load Case کلیک می کنیم تا پنجره ای مشابه شکل ۶ ظاهر شود. در قسمت نام یا اسم دلخواه برای حالات بار تعیین می کنیم و از قسمت Load Case Type نوع تحلیل انتخاب می شود که در اینجا Response Spectrum را انتخاب می کنیم. در قسمت ترکیب مودی یکی از دو روش CQC یا SRSS را انتخاب می کنیم (رجوع شود به پیوست شماره ۳ استاندارد ۲۸۰۰). در قسمت Modal Load Case آنالیز مودال را که قبلاً تعریف کرده بودیم انتخاب می کنیم. سپس پارامترهای Loads Applied را تعیین می کنیم؛ قسمت Load Name برای زلزله در جهت X مقدار U1 و برای زلزله در جهت Y مقدار U2 را انتخاب می کنیم. در قسمت Function، تابع طیفی را انتخاب می کنیم که در مراحل قبلی ایجاد نموده ایم و در قسمت Scale Factor حاصل  $A \cdot I \cdot g / R$  را قرار می دهیم. برای سایر موارد پارامترهای پیش فرض را می پذیریم. تحلیل دینامیکی طیفی باید در هر دو جهت اصلی ساختمان انجام شود.

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	Soil2	0.4905
Accel	U1	Soil2	0.4905

شکل ۶- معرفی پارامترهای تحلیل دینامیکی طیفی

### ۳-۱-۴- اصلاح مقادیر بازتاب ها

طبق دستور آیین نامه، در مواردی که برش پایه بدست آمده از تحلیل دینامیکی طیفی کمتر از برش پایه تحلیل استاتیکی معادل است، باید مقدار برش پایه روش طیفی اصلاح گردد که اینکار با اعمال ضریبی با نام ضریب همپایه سازی انجام می شود. در سازه های نا منظم ضریب

همپایه سازی برابر است با نسبت برش پایه استاتیکی معادل به برش پایه تحلیل دینامیکی طیفی؛ در مواردی که ساختمان منظم است ضریب همپایه برابر ۹۰٪ نسبت فوق الذکر در نظر گرفته می شود.

$$\text{ساختمان نامنظم:} \quad \frac{V_{\text{استاتیکی}}}{V_{\text{طیفی}}} = \text{ضریب همپایه سازی}$$

$$\text{ساختمان منظم:} \quad \frac{V_{\text{استاتیکی}}}{V_{\text{طیفی}}} = 0.9 \times \text{ضریب همپایه سازی}$$

روش انجام این کار بدین ترتیب است که بعد از انجام تحلیل با مراجعه به خروجی ها، مقادیر برش پایه حاصل از روش استاتیکی معادل و دینامیکی طیفی را استخراج می کنیم (برای اینکار از منوی Display گزینه Show Tables را انتخاب نموده سپس جدول موجود در مسیر "ANALYSIS RESULTS >> Structure Output >> Base Reactions" را فعال می کنیم تا برش پایه حاصل از تحلیل ها را ملاحظه نماییم). پس از محاسبه ضریب همپایه سازی، مقدار آنرا در با عدد Scale Factor ۳-۱-۳ (بخش ۳-۱-۳) ضرب نموده و حاصل ضرب را در همان فیلد وارد می کنیم.

بعنوان مثال فرض کنید ضریب همپایه برابر ۱.۱ محاسبه شده است و مقدار اولیه Scale Factor برابر با ۰.۴۹۰۵ می باشد؛ حاصل ضرب ۱.۱\*۰.۴۹۰۵ را که برابر است با ۰.۵۳۹۵ در قسمت Scale Factor وارد می کنیم.

### ۳-۱-۵- کنترل حداقل تعداد مد ها

آیین نامه مقرر می دارد که حداقل سه مد اول ارتعاش، کلیه مد هایی که زمان تناوب بیشتر از ۰.۴ ثانیه دارند و یا کل مد هایی که مجموع جرمهای موثر در آنها بیشتر از ۹۰ درصد جرم کل سازه است باید در نظر گرفته شوند. برای کنترل این ضابطه باید نتایج آنالیز مودال بررسی گردد. برای این منظور از منوی Display گزینه Show Tables را انتخاب نموده و سپس جدول موجود در مسیر "ANALYSIS RESULTS >> Structure Output >> Modal Information >> Modal Participating Mass Ratio" را باز می کنیم (شکل ۷).

در شکل ۷، مد هایی که پریود بزرگتر از ۰.۴ ثانیه دارند با دایره مشخص شده اند که شامل سه مد می شوند. همچنین مجموع جرم های موثر در هر دو امتداد اصلی با یک مستطیل مشخص شده است. همانطور که در شکل ۷ نیز قابل مشاهده است در این مثال لازم است ۶ مد ارتعاش برای انجام آنالیز دینامیکی طیفی در نظر گرفته شود.

### ۳-۲- تفاوت تحلیل دینامیکی طیفی و استاتیکی معادل

همانطور که در بخش ۳-۱-۱ اشاره شد، لازم است تا با اعمال ضرایب اصلاحی مقدار برش پایه طیفی بر مبنای برش پایه استاتیکی همپایه شود. بنابراین مقدار نیروهای این دو روش چیست؟ تفاوت این دو روش در نحوه توزیع نیروی برش پایه در میان طبقات است. در روش استاتیکی معادل سهم نیروی زلزله هر طبقه متناسب با وزن آن طبقه و فاصله اش از تراز پایه تعیین می گردد. اما در تحلیل دینامیکی طیفی سهم نیروی زلزله در هر طبقه بر اساس ترکیب برش پایه مد های مختلف بدست می آید.

Modal Participating Mass Ratios

File View Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Modal Participating Mass Ratios

	OutputCase Text	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless	SumUX Unitless	SumUY Unitless
▶	MODAL	Mode	1	1.634965	0	0.775155	0	0	0.775155
	MODAL	Mode	2	0.549249	0	0.12792	0	0	0.903075
	MODAL	Mode	3	0.528042	0.795689	0	0	0.795689	0.903075
	MODAL	Mode	4	0.318339	0	0.043126	0	0.795689	0.946201
	MODAL	Mode	5	0.207445	0	0.053798	0	0.795689	1
	MODAL	Mode	6	0.179317	0.162006	0	0	0.957695	1
	MODAL	Mode	7	0.120038	0	0.0000002177	0	0.957695	1
	MODAL	Mode	8	0.109933	0.000043	0	0	0.957738	1
	MODAL	Mode	9	0.104019	0.028478	0	0	0.986216	1
	MODAL	Mode	10	0.081085	0.013637	0	0	0.999854	1
	MODAL	Mode	11	0.075669	0	0.0000002126	0	0.999854	1
	MODAL	Mode	12	0.031987	0.000126	0	0	0.99998	1

Record: 1 of 12

Add Tables... Done

شکل ۷- نتایج آنالیز مودال- درصد مشارکت جرمی مدی

منابع:

۱-مبحث ششم مقررات ملی ساختمان

۲-استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش سوم)