

المان‌های محدود تعادلی در طراحی دال RC

به‌طور کلی مهندسين سازه در پی طراحی و ارزیابی سازه‌های باربر می‌باشند. در این زمینه، مهم‌ترین موضوع، تضمین ظرفیت سازه‌ای کافی (مقاومت) جهت مقاومت در برابر بارها (تقاضا) است. همچنین با توجه به مصرف فزاینده انرژی، جلوگیری از اتلاف مصالح نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. در طراحی دال‌های بتن مسلح (RC)، ممکن است یک مهندس از روش تحلیل حدی جهت ارزیابی مقاومت خمشی یک طرح استفاده کند، اما این روش نیز دارای محاسبات دستی بسیار سنگین با استفاده از تکنیک خط تسلیم یا روش نواری است. ابزارهای تحلیل حدی پیشرفته که موجب استفاده خودکار از این روش‌ها می‌گردد، در حال حاضر در دسترس بوده و در مجله STRUCTURE نسخه سپتامبر سال ۲۰۱۵ ارائه شده‌اند (ابزارهای تحلیل حدی پیشرفته برای دال‌های بتنی مسلح، رمزی و همکاران). با توجه به ارزیابی دال‌های RC، دو روش دارای کارایی یکسانی در ثبت بارهای گسیختگی به‌طور دقیق می‌باشند. با این حال، در مورد طراحی، روش کران پایین ارائه شده در نرم‌افزار المان محدود تعادلی موجب ارائه یک مزیت متفاوت می‌شود که علاوه بر ارائه برآورد ایمن از بار گسیختگی، مسیر بار موجب هدایت بارها به تکیه‌گاه‌ها می‌شود که این کار با توجه به مسیر لنگرهای اصلی ممکن است. با توجه به اطلاع از مسیر بار، مهندس می‌تواند طرح میلگرد گذاری را به‌طور مناسب اعمال کرده و در عین حال از مصالح نیز به میزان حداقل ممکن استفاده کند. این مقاله به بیان یک مثال ساده و رایج در مورد به‌کارگیری این روش می‌پردازد که طی آن استفاده از این روش موجب کاهش ۵۰٪ در استفاده از میلگردهای تقویتی می‌گردد.

اهمیت تعادل

در طراحی و یا ارزیابی اعضای سازه‌ای ساده، مهندس مجری می‌تواند از طیف گسترده‌ای از روش‌ها تحت عنوان راه‌حل‌های تئوریک دقیق برای مسائلی که دارای هندسه، شرایط مرزی و بارگذاری ساده می‌باشند، بهره‌برد. با پیچیده‌تر شدن شکل و پیکربندی سازه، جواب تئوریک آن در دسترس نبوده و مهندس باید از تکنیک‌های شبیه‌سازی عددی مانند روش المان محدود (FE) جهت دستیابی به یک جواب تقریبی استفاده کند.

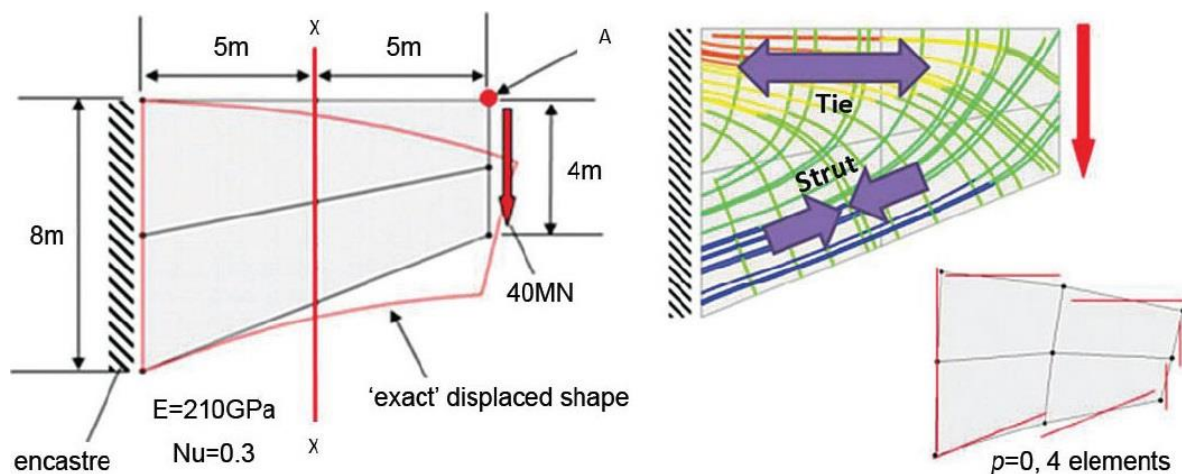
سینماتیک	پی در پی	استاتیک	
قدرتمند	قدرتمند	قدرتمند	مقاومت مصالح
قدرتمند	قدرتمند	ضعیف	مطابقت (CFE)
ضعیف	قدرتمند	قدرتمند	تعادل (EFE)

جدول شرایط برآورد شده به شکل ضعیف یا قوی برای فرمول‌بندی خالص المان محدود

روش FE موجب ارائه تنش‌ها و لنگرهایی می‌گردد که جواب تئوریک را به‌طور تقریبی ارائه می‌کنند و جواب نیز به‌طور معمول با اصلاح شبکه ارائه می‌شود. ماهیت این جواب تقریبی وابسته به فرمول‌بندی FE پذیرفته شده مطابق جدول است که طی آن فرمول‌بندی FE خالص یعنی حالت‌هایی که روابط پی در پی را به‌طور دقیق برآورده کرده و تنها در یکی از شرایط اصلی ضعیف عمل کند، در نظر گرفته می‌شوند.

تعادل از این حیث حائز اهمیت می‌باشد که اگر تنش‌های FE در تعادل قوی با بارهای اعمالی نباشند، در این صورت مهندس مجری نمی‌تواند در مورد کفایت عناصر تقویتی به کار گرفته شده جهت مقاومت در برابر بارهای اعمالی، اطمینان حاصل کند. این گفته برگرفته از نظریه کران پایین پلاستیسیته که در زیر نیز بیان شده است، می‌باشد:

تنها دلیلی که طراحان سازه‌ای می‌توانند با آسودگی کامل به طراحی خود بپردازند، قضیه دوم نظریه پلاستیسیته (کران پایین) است. این قضیه بیان می‌کند که صرف‌نظر از نوع طراحی سازه، سازه‌ها به دلیل وجود تعادل در تمامی قسمت‌ها و اعضا ایمن می‌باشند و در هیچ قسمتی تنش‌ها بیش از حد بزرگ نیستند و می‌توان از عناصر و اتصالات شکل‌پذیر نیز بهره برد.



	تغییر مکان	عمود		مماسی		لنگر	
		چپ	راست	چپ	راست	چپ	راست
EFE	-۳,۵۸	۰	۰	۴۰	۴۰	۲۰۰	۲۰۰
CFE (چهار گرهی)	-۲,۵۶	۲۷,۱	۱۹,۷	۱۴,۵	۸۰	۲۰۰,۲	۶۲,۸
CFE (هشت گرهی)	-۳,۴۸	۰,۰	۰,۰	۳۹,۵	۳۸,۹	۲۰۵,۲	۲۲۰,۷
دقیق	-۳,۵۴	۰	۰	۴۰	۴۰	۲۰۰	۲۰۰

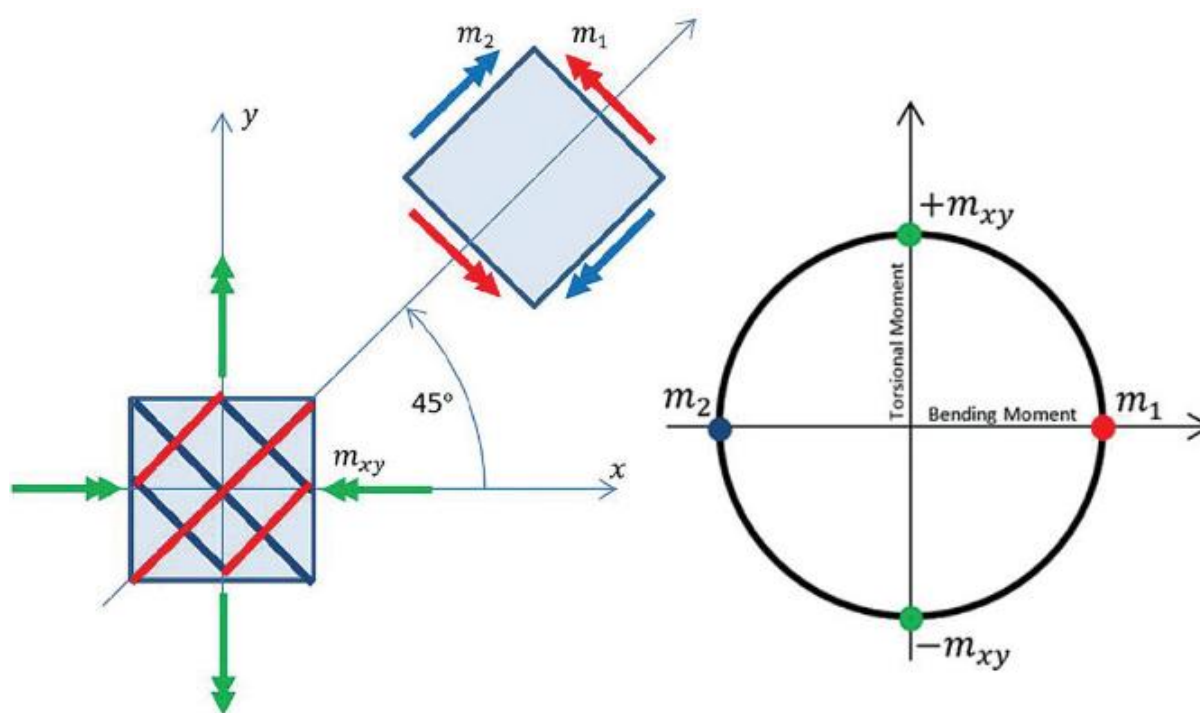
با استفاده از مدل‌های CFE، ممکن است مهندس قصد استفاده از قضیه کران پایین را نداشته باشد، مگر آن‌که او مطمئن شود که مدل به‌طور مناسب جهت ارائه یک تقریب مناسب از جواب تعادلی قدرتمند اصلاح شده است. از سوی دیگر فرمول‌بندی EFE موجب ارائه جواب‌هایی می‌شود که حتی برای درشت‌ترین شبکه، موجب ارائه یک راه‌حل تعادلی قدرتمند به مهندس مجری می‌گردد که طی آن می‌توان یک طرح ایمن را تعیین کرد. مسئله تیر طره مخروطی شکل ۱ نشان دهنده این ایده‌ها با مقایسه نتایج تنش مقطعی از مدل‌های CFE و EFE درشت است.

المان‌های CFE که قادر به تقریب میدان‌های تنش خطی و ثابت برای المان‌های چهار گرهی و هشت گرهی می‌باشند، تغییر مکان‌های پیوسته را در حالت تعادل قدرتمند بازیابی می‌کنند (و همچنین سازگاری تغییر مکان / کرنش). المان تعادلی، تعادل را در حالت سازگاری قدرتمند مطابق تغییر مکان‌های لبه‌ای ناپیوسته نشان داده شده برای المان میدان تنش ثابت برآورده می‌کند. با این حال، تغییر مکان‌ها از مدل المان تعادلی به‌طور متوسط مطابق با شکل و جدول ۱ از دقت بیشتری برخوردار می‌باشند (تغییر مکان قائم در نقطه A) و از کفایت بیشتری جهت ارزیابی شرایط خدمت‌پذیری مانند حالت تغییر مکان حداکثر برخوردار می‌باشند.

مؤلفه‌های تنش دقیق بر روی مقطع به‌سادگی با استفاده از روش‌های استاتیکی تعیین می‌شوند. تنش‌های FE برای هر دو فرمول‌بندی در مقطع به‌صورت ناپیوسته می‌باشند. در مورد مدل CFE، این موضوع منجر به نتایج تنش متفاوتی در هر قسمت

مقطع صرف نظر از تعادل آن‌ها با بار اعمالی می‌گردد. با این حال با استفاده از مدل EFE، هر چند که تنش‌ها ممکن است به صورت ناپیوسته باشند، اما مقاطع مساوی و مخالف یکدیگر بوده و از همه مهم‌تر، در حالت تعادل با بار اعمالی می‌باشند.

همچنین شکل ۱ نشان دهنده نموداری از مسیرهای تنش با توجه به مدل EFE است. این مسیرها موجب تشکیل شبکه‌ای متعامد از خطوط شده و اطلاعاتی را در مورد جهت و اندازه (رنگ) تنش‌های اصلی در یک نقطه ارائه می‌کنند. این مسیرها به طور مشخص نشان می‌دهند که نیرو از بارهای اعمالی به سمت تکیه‌گاه‌ها منتقل شده است. با توجه به اینکه تعادل همواره برقرار می‌شود، آن‌ها با تغییر شبکه چندان تغییر نمی‌کنند. می‌توان از مسیرهای تنش اصلی برای نمایش دستک فشاری و کش استفاده کرد به طوری که میلگرد گذاری از نظر طرح و اندازه نیز به صورت بهینه خواهد بود.



شکل ۲- میدان لنگر پیچشی ثابت در یک دال RC

علاوه بر تحلیل الاستیک خطی، می‌توان از EFE جهت انجام تحلیل حدی به منظور تعیین بار حدی پلاستیک بهره برد. برخلاف تکنیک خط تسلیم که به عنوان یک تکنیک کران بالا با ارائه برآوردهای غیر ایمن از بار گسیختگی به شمار می‌آید، EFE موجب ارائه جواب‌های کران پایین ایمن می‌شود. میدان لنگر پیچشی ثابت شکل ۲ نشان دهنده مثال ساده‌ای از این ایده‌ها است. این میدان لنگر در یک دال مربعی دارای تکیه‌گاه در سه گوشه و با یک بار نقطه‌ای در گوشه چهارم مشاهده می‌شود.

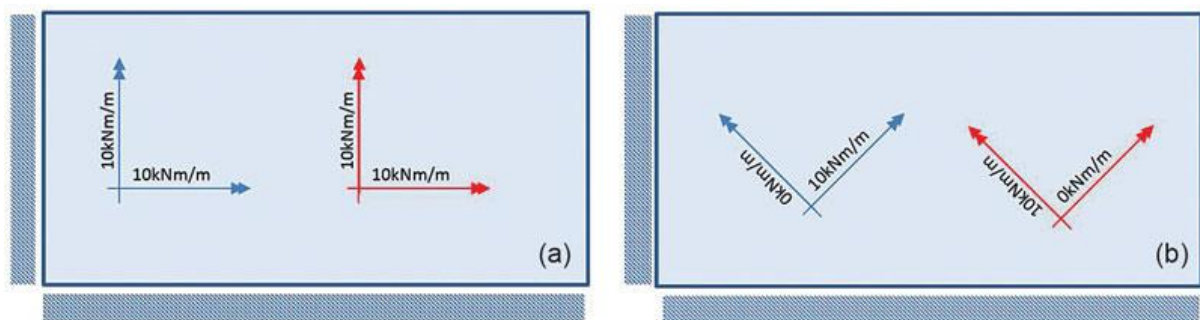
لنگرهای اصلی با استفاده از دایره موهر تعیین می‌شوند. مسیرهای لنگر اصلی به رنگ قرمز (خمیدگی) و آبی (برآمدگی) نشان داده می‌شوند. این مسئله توسط IStructE مورد پذیرش قرار گرفته و در مجله مهندسی سازه در نسخه اوت سال ۲۰۱۶ مورد استفاده قرار گرفته است.

میدان لنگر پیچشی ثابت به لنگرهای اصلی (مسیرهای لنگر اصلی در شکل ۲ نشان داده شده است) تبدیل می‌شود. مسیرها در زاویه ۴۵ درجه به دال برخورد می‌کنند که مسیرهای خمیدگی با رنگ قرمز و مسیرهای برآمدگی با رنگ آبی نشان داده شده‌اند. بزرگی لنگرهای اصلی در هر نقطه دال یکسان است. هر چند که می‌توان چنین دالی را با استفاده از یک شبکه متعامد در هر

دو قسمت بالا و پایین و موازی با اضلاع دال مسلح کرد، با توجه به مسیرهای لنگر اصلی واضح است که یک لازم است تا شکل بهینه‌ای از میلگردها را موازی با مسیرها قرار داد. همچنین مشاهده می‌شود که به‌جای مسلح کردن هر دو قسمت بالا و پایین در جهت‌های دوسویه متعامد، تنها یک جهت مورد نیاز است؛ بنابراین، شناخت میدان لنگر در یک دال منجر به کاهش میزان مصرف میلگرد فولادی به میزان ۵۰٪ می‌گردد.

مسیرهای لنگر اصلی موجب ارائه یک تصویر کلی از اصول استاتیکی در داخل می‌گردند که طی آن می‌توان شکل بهینه میلگردها را به‌سادگی در نظر گرفت. این موضوع در مسئله زیر برای یک دال که در آن میدان‌های لنگر پیچیده‌تر می‌باشند، در نظر گرفته شده است.

مسئله طراحی دال

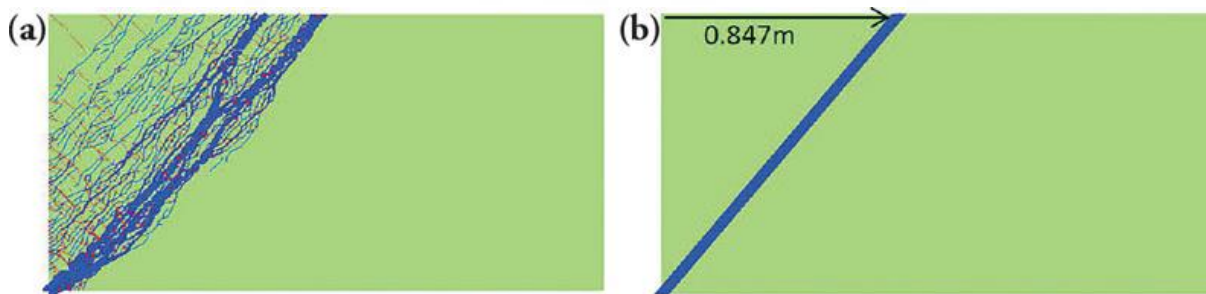


شکل ۳- پیکره‌بندی و میلگرد گذاری دال (a) طراحی اولیه (b) طراحی بهینه

در این قسمت میلگرد گذاری یک دال مستطیلی ۲x۱ متر با تکیه‌گاه‌های ثابت بر روی دو ضلع مجاور و با بار یکنواخت ۲۵ کیلو پاسکال، مطابق شکل ۳ انجام می‌شود. روش مورد استفاده، طراحی به‌وسیله ارزیابی است؛ به‌طوری که لایه‌بندی میلگردها به‌طور فرضی در نظر گرفته شده، ارزیابی انجام شده و مقیاس بندی ساده از اندازه میلگردها جهت تضمین تحمل بار به‌طور ایمن توسط آن‌ها انجام می‌شود.

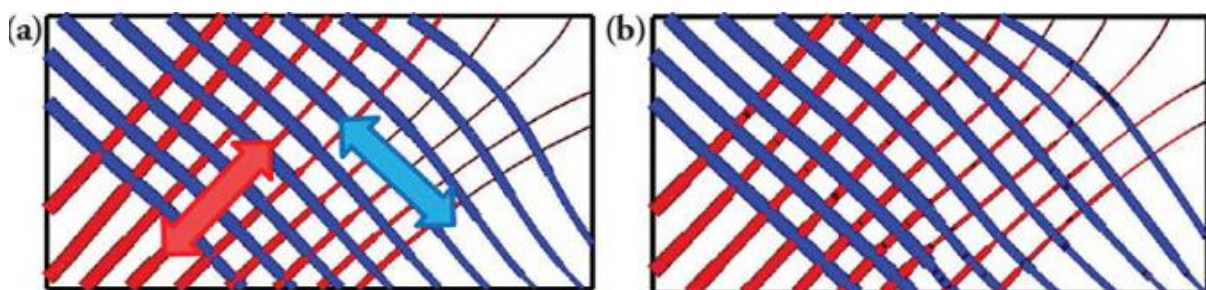
EFE برای طراحی مورد استفاده قرار خواهد گرفت، اما با توجه به اینکه این دال دارای هیچ جواب تئوریک نمی‌باشد، تکنیک خط تسلیم در ابتدا جهت ایجاد کران بالا برای بار گسیختگی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. این روش به‌منظور صحت سنجی جواب EFE استفاده خواهد شد.

هر چند که نرم‌افزارهای تجاری با کارایی زیاد در حال حاضر برای تحلیل خط تسلیم در دسترس می‌باشند، یک روش مرسوم دیگر در این مثال نشان داده خواهد شد. دلیل استفاده از این روش این است که این روش موجب ارائه یک رویکرد حل دستی معمول که طی آن مکانیزم‌های گسیختگی احتمالی مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس به‌طور هندسی جهت یافتن جواب با کمترین کران بالا بهینه‌سازی می‌شود، می‌گردد.



شکل ۴- جواب‌های (خط تسلیم) کران بالا (a) شبکه اصلاح شده غیر سازه‌ای (b) شبکه درشت بهینه‌سازی شده

تحلیل خط تسلیم بر اساس تحلیل المان محدود یک شبکه غیر سازه‌ای از المان‌های مثلثی موجب ارائه یک تصویر مناسب از مکانیزم گسیختگی مطابق شکل 4a می‌گردد. این موضوع نشان می‌دهد که می‌توان مکانیزم گسیختگی را به صورت یک خط تسلیم (آبی رنگ) برآمده در دال و با شروع از گوشه تکیه‌گاه به طور ایده آل در نظر گرفت. با توجه به اینکه تحلیل خط تسلیم موجب ارائه یک تقریب کران بالا می‌گردد، موقعیت دارای حداقل بار گسیختگی به عنوان موقعیت بهینه در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۵- جواب‌های کران پایین نشان دهنده مسیرهای لنگر اصلی و بارهای گسیختگی (a) حالت اولیه (b) حالت بهینه

جواب کران پایین حاصل از EFE بر اساس یک شبکه نسبتاً درشت در شکل 5a نشان داده شده است و یک کران کوچک با اعمال بار گسیختگی ایجاد شده است که نشان دهنده صحیح بودن جواب در مقایسه با جواب خط تسلیم است.

در صورتی که بار گسیختگی ایمن ارائه شده توسط EFE در نظر گرفته شود، در این صورت بار گسیختگی کمتر از مقدار 25 کیلو پاسکال مورد نیاز است. لازم است تا اندازه میلگردها را جهت در نظر گرفتن این موضوع افزایش داد. با در نظر گرفتن یک طرح ایمن که چندان محافظه کارانه نیز به نظر نمی‌رسد، مهندس می‌تواند تحلیل را در این مرحله خاتمه دهد. با این حال اگر مهندس بخواهد تا هزینه دال را کاهش دهد، مراحل بیشتری مورد نیاز است.

می‌توان مسیرهای لنگر اصلی شکل 5a را به صورت یک طرح و اندازه بهینه از میلگردها در نظر گرفت. با توجه به این شکل واضح است که مشابه با حالت لنگر پیچشی ثابت، با دوران لایه میلگرد گذاری به میزان ۴۵ درجه و حذف میلگردهای بدون کارایی خاص، می‌توان به کاهش ۵۰٪ در استفاده از میلگردها دست یافت. این موضوع با استفاده از روش EFE محقق شده است و نتیجه در شکل 5b نشان داده شده است. مسیرهای لنگر اصلی تقریباً بدون تغییر همانند بار گسیختگی پیش بینی شده که به میزان ۱٪ کاهش یافته است، باقی مانده است.

نتایج اجرایی

در این مقاله نشان داده شد که چگونه با استفاده از یک ابزار نرم‌افزاری مناسب مانند EFE که موجب ارائه یک نمایش گرافیکی ساده و کامل قابل فهم از استاتیک در یک دال با توجه به مسیرهای لنگر اصلی می‌گردد، مهندس مجری می‌تواند به‌طور ایمن صرفه‌جویی‌های هزینه‌ای / مصالح قابل توجهی را در طراحی یک دال RC ایجاد کند.

این مقاله شرایط حالت حدی خدمت پذیری (SLS) خیز و ترک خوردگی را در نظر نگرفته است. با این حال، می‌توان این موضوعات را به‌طور مجزا در نظر گرفت. در این صورت نیاز است برای تقویت دال جهت برآورده کردن این شرایط، لایه‌های میلگرد گذاری اضافه شود.

EFE در حال حاضر جهت ارزیابی دال‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما می‌توان از آن برای طراحی دال با استفاده از یک روش طراحی با ارزیابی بهره برد. همچنین امکان فرمول‌بندی EFE به عنوان یک ابزار طراحی مناسب وجود دارد به‌طوری که لایه تقویتی در طی فرآیند تبدیل به یک متغیر می‌شود.

مترجم: امیررضا بخشی

منبع:

<http://www.structuremag.org/?p=11774>