1. تحلیل نتایج
   1. مقدمه

بررسی رفتار تیرهای بتنی، همواره دارای اهمیت زیادی بوده است. بنابراین روش‌های مختلفی برای مقاوم‌سازی تیر‌های بتنی وجود دارد. از میان این روش‌ها، استفاده از ورق‌های FRP روش بسیار مطرح در این زمینه هست. در استفاده از ورق‌های FRP، از دو روش با مهار و بدون مهار بهره گرفته می‌شود. در تحقیق حاضر، به بررسی و مقایسه رفتار تیر بتنی مقاوم‌سازی شده با این دو روش و مقایسه نتایج آن‌ها خواهیم پرداخت.

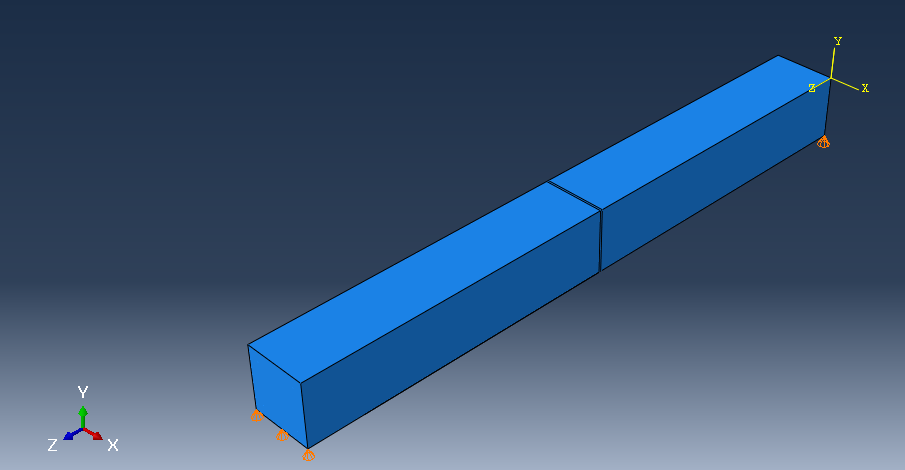
* 1. مدل با بتن Fc=20MPa

برای بررسی رفتار المان مقاوم‌سازی شده، یک مدل تیر ساده به عنوان مدل پایه انتخاب شده و مدل مقاوم‌سازی شده بر روی آن صورت گرفته است. در ابتدا مدل مقاوم‌سازی شده با FRP بدون مهار انتهایی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

برای مقاوم‌سازی تیر مورد نظر با FRP، از دو مدل مختلف با ضخامت ورق 3 و 5 میلی‌متر استفاده شده است. مشخصات ورق FRP مورداستفاده در این تحقیق در جدول زیر آمده است. بتن نیز با دو مقاومت 20 و 25 مگاپاسکال مدل شده است.

* + - * 1. : مشخصات مصالح FRP

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | ρ(kg/m3) | E (MPa) | Fy (MPa) |
| FRP | 2000 | 5e5 | 900 |



* + 1. : مدل تیر بتنی
    2. : نمودار پوش آور تیر بتنی (Fc=20MPa) مقام‌سازی شده
    3. نیروی تسلیم و نهایی

نمودار بالا نشان می‌دهد که مهار انتهایی ورق FRP می‌تواند مقاومت سازه را در برابر نیروهای وارده بهبود ببخشد. با دقت در نمودار بالا می‌توان بیان کرد که افزایش ضخامت ورق‌های FRP باعث افزایش نیروهای مورد تحمل در تیر می‌باشد. همان‌طور که در جدول زیر مشخص است نیروی تسلیم در مدل بدون مهار با ورق 5 میلی‌متری نسبت به مدل با ورق 3 میلی‌متری با 5 درصد کاهش از 135 به 128 کیلونیوتن می‌رسد. اما نیروی نهایی در این مدل افزایش 6.5 درصدی نسبت به مدل اصلی دارد و از 140 به 149 کیلونیوتن رسیده است.

* + - * 1. : نیروی تسلیم و نهایی مدل‌های مقاوم‌سازی شده با FRP

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | FRP=3mm  W/O anchor | FRP=5mm  W/O anchor | FRP=3mm  W anchor | FRP=5mm  W anchor |
| نیروی تسلیم (kN) | 135.29 | 128.035 | 133.8761 | 137.8924 |
| نیروی نهایی (kN) | 140.363 | 149.194 | 156.6537 | 164.4864 |

در ادامه مدل با ورق 3 میلی‌متری و مهار نیروی تسلیم نسبت به مدل با ورق 5 میلی‌متری بدون مهار افزایش نشان می‌دهد. نیروی تسلیم در این مدل به 134 کیلونیوتن رسیده است که مقدار این افزایش یه حدی است که بتوان نیروی تسلیم در این مدل را نزدیک به نیروی به مدل اصلی دانست. نیروی نهایی در این مدل نسبت به مدل با ورق 5 میلی‌متری بدون مهار، 5 درصد افزایش یافته است. این افزایش نسبت به مدل بدون با مهار با ورق 3 میلی‌متری نیز مقدار 11 درصدی می‌باشد.

نیروی تسلیم مدل با ورق‌های 5 میلی‌متری با مهار نیز با افزایش 3 درصدی نسبت به مدل با ورق 3 میلی‌متری با مهار، به 138 کیلونیوتن می‌رسد. با این افزایش نیروی تسلیم در این مدل از مقدار متناظر در مدل ورق 3 میلی‌متری بدون مهار فراتر می‌رود. هم‌چنین نیروی نهایی این مدل نیز نسبت به مدل ورق 3 میلی‌متری بدون مهار 17 درصد افزایش یافته است.

* + 1. : نیروی تسلیم مدل ‌های مقاوم سازی شده با FRP

* + 1. : نیروی نهایی مدل ‌های مقاوم سازی شده با FRP

همان طور که از نمودارهای ستونی بالا برمی‌آید، نیروی تسلیم با افزودن FRP ابتدا کاهش یافته سپس با افزایش در ضخامت ورق، روند افزایشی به خود می‌گیرد و با رسیدن ضخامت ورق FRP به 5 میلی‌متر از نیروی تسلیم مدل اصلی نیز عبور می‌کند. اما نیروی نهایی در همه مدل‌های مقاوم‌سازی شده از نیروی نهایی مدل ورق 3 میلی‌متری بدون مهار بالاتر است و با افزایش ضخامت ورق نیز بیش‌تر می‌شود.

* + 1. ضریب اضافه مقاومت

برای بررسی ضریب اضافه مقاومت مدل‌ها از پارامتر ضریب اضافه مقاومت که براساس نسبت نیروی نهایی به نیروی تسلیم تعریف شده است، استفاده می‌شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (معادله 1-4) | Ω= Fu/Fy |

ضریب اضافه مقاومت مدلهای مختلف در جدول زیر نمایش داده شده است. مقادیر نشان‌دهنده افزایش 12 درصدی ضریب اضافه مقاومت در مدل بدون مهار با افزودن ورق 5 میلی‌متری نسبت به ورق 3 میلی‌متری می‌باشد. مقدار این پارامتر در مدل با ورق 3 میلی‌متری بدون مهار 1.04 است، حال آنکه در مدل با ورق 5 میلی‌متری ضریب اضافه مقاومت به 1.165 می‌رسد.

با مهار ورق 3 میلی‌متری، افزایش ناچیزی در پارامتر ضریب اضافه مقاومت اتفاق می‌افتد و این پارامتر به 1.17 افزایش پیدا می‌کند.

افزایش ضخامت ورق به 5 میلی‌متر در مدل با مهار سبب افزایش پارامتر ضریب اضافه مقاومت به 1.19 می‌شود. این افزایش 2 درصدی نیز مقدار ناچیزی می‌باشد. باید به این نکته نیز توجه نمود که مقدار اضافه مقاومت این مدل در مقایسه با مدل با ورق 3 میلی‌متری بدون مهار افزایش 15 درصدی دارد.

* + - * 1. : ضریب اضافه مقاومت مدل‌های مقاوم‌سازی شده با FRP

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | FRP=3mm  W/O anchor | FRP=5mm  W/O anchor | FRP=3mm  W anchor | FRP=5mm  W anchor |
| ضریب اضافه مقاومت | 1.037497 | 1.165259 | 1.170139 | 1.192861 |

به طور کلی می‌توان روند افزایش در ضریب اضافه مقاومت مدل با افزایش ضخامت ورق FRP و افزودن مهار به عنوان روش مقاوم‌سازی را مشاهده نمود.

* + 1. : ضریب اضافه مقاومت مدل ‌های مقاوم سازی شده با FRP
    2. شکل‌پذیری

پارامتر دیگر مورد بررسی در این تحقیق، نسبت شکل پذیری می‌باشد. نسبت شکل پذیری عبارتست از نسبت تغییرمکان نهایی به تغییرمکان تسلیم. جدول زیر نسبت شکل‌پذیری را برای مدلهای مقاوم‌سازی شده با FRP نمایش می‌دهد.

* + - * 1. نسبت شکل پذیری ‏مدل‌های مقاوم‌سازی شده با FRP

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | FRP=3mm  W/O anchor | FRP=5mm  W/O anchor | FRP=3mm  W anchor | FRP=5mm  W anchor |
| نسبت شکل پذیری ‏ | 5.22 | 6.76 | 7 | 7.17 |

مقادیر نشان‌دهنده افزایش نسبت شکل پذیری با افزایش ضخامت ورق می‌باشد. مقدار این پارامتر در مدل با ورق 3 میلی‌متری بدون مهار 5.22 است، حال آنکه در مدل با ورق 5 میلی‌متری نسبت شکل پذیری ‏به 6.76 می‌رسد.

با مهار ورق 3 میلی‌متری، افزایش ناچیزی در پارامتر نسبت شکل پذیری ‏اتفاق می‌افتد و این پارامتر به 7 افزایش پیدا می‌کند.

افزایش ضخامت ورق به 5 میلی‌متر سبب افزایش پارامتر نسبت شکل پذیری ‏به 7.17 می‌شود. این افزایش 2 درصدی نیز مقدار ناچیزی می‌باشد. باید به این نکته نیز توجه نمود که مقدار نسبت شکل پذیری این مدل در مقایسه با مدل با ورق 3 میلی‌متری بدون مهار افزایش 37 درصدی دارد.

* + 1. : نسبت شکل پذیری مدل ‌های مقاوم سازی شده با FRP
  1. مدل با بتن Fc=25 MPa

نمودار نیرو – تغییرمکان مربوط به مدل با بتن 25 مگاپاسکال در زیر آمده است.

* + 1. : نمودار پوش آور تیر بتنی مقام‌سازی شده
    2. نیروی تسلیم و نهایی

نمودار بالا نشان می‌دهد که استفاده از ورق های FRP می‌تواند مقاومت تیر را در برابر نیروهای وارده به خوبی بهبود ببخشد. با دقت در نمودار بالا می‌توان بیان کرد که افزایش ضخامت ورق‌های FRP باعث افزایش نیروهای مورد تحمل سازه می‌باشد. همان‌طور که در جدول زیر مشخص است نیروی تسلیم در مدل مقاوم‌سازی شده با ورق 5 میلی‌متری بدون مهار نسبت به مدل با ورق 3 میلی‌متری بدون مهار با 6 درصد کاهش از 135 به 128 کیلونیوتن می‌رسد. اما نیروی نهایی در این مدل افزایش 3.5 درصدی نسبت به مدل با ورق 3 میلی‌متری بدون مهار دارد و از 140 به 145 کیلونیوتن رسیده است.

* + - * 1. : نیروی تسلیم و نهایی مدل‌های مقاوم‌سازی شده با FRP

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | FRP=3mm  W/O anchor | FRP=5mm  W/O anchor | FRP=3mm  W anchor | FRP=5mm  W anchor |
| نیروی تسلیم (kN) | 135.29 | 128.03 | 134.43 | 142.50 |
| نیروی نهایی (kN) | 140.363 | 145.194 | 155.35 | 170.89 |

در ادامه مدل با ورق 3 میلی‌متری با مهار نیروی تسلیم نسبت به مدل با ورق 5 میلی‌متری بدون مهار افزایش نشان می‌دهد. نیروی تسلیم در این مدل به 134.4 کیلونیوتن رسیده است. نیروی نهایی در این مدل نسبت به مدل با ورق 5 میلی‌متری بدون مهار، 7 درصد افزایش یافته است. این افزایش نسبت به مدل با ورق 3 میلی‌متری بدون مهار نیز مقدار 10 درصدی می‌باشد.

نیروی تسلیم مدل با ورق‌های 5 میلی‌متری با مهار نیز با افزایش 6 درصدی نسبت به مدل با ورق 3 میلی‌متری با مهار، به 142.5 کیلونیوتن می‌رسد. با این افزایش نیروی تسلیم در این مدل از مقدار متناظر در مدل با ورق 3 میلی‌متری بدون مهار فراتر می‌رود. هم‌چنین نیروی نهایی این مدل نیز نسبت به مدل با ورق 3 میلی‌متری بدون مهار 21 درصد افزایش یافته است.

* + 1. : نیروی تسلیم مدل ‌های مقاوم سازی شده با FRP
    2. : نیروی نهایی مدل ‌های مقاوم سازی شده با FRP

همان طور که از نمودارهای ستونی بالا برمی‌آید، نیروی تسلیم با افزایش ضخامت FRP ابتدا کاهش یافته سپس با افزایش در ضخامت ورق، روند افزایشی به خود می‌گیرد و با رسیدن ضخامت ورق FRP به 5 میلی‌متر از نیروی تسلیم مدل اصلی نیز عبور می‌کند. اما نیروی نهایی در همه مدل‌های مقاوم‌سازی شده از نیروی نهایی مدل اصلی بالاتر است و با افزایش ضخامت ورق نیز بیش‌تر می‌شود.

* + 1. ضریب اضافه مقاومت

برای بررسی ضریب اضافه مقاومت مدل‌ها از پارامتر ضریب اضافه مقاومت که براساس نسبت نیروی نهایی به نیروی تسلیم تعریف شده است، استفاده می‌شود.

|  |  |
| --- | --- |
| (معادله 1-4) | Ω= Fu/Fy |

ضریب اضافه مقاومت مدلهای مختلف در جدول زیر نمایش داده شده است. مقادیر نشان‌دهنده افزایش 12 درصدی ضریب اضافه مقاومت با افزودن ورق 5 میلی‌متری بدون مهار می‌باشد. مقدار این پارامتر در مدل با ورق 3 میلی‌متری بدون مهار 1.04 است، حال آنکه در مدل با ورق 5 میلی‌متری بدون مهار ضریب اضافه مقاومت به 1.13 می‌رسد.

با مهار ورق 3 میلی‌متری، افزایش ناچیزی در پارامتر ضریب اضافه مقاومت اتفاق می‌افتد و این پارامتر به 1.16 افزایش پیدا می‌کند.

افزایش ضخامت ورق به 5 میلی‌متر با مهار سبب افزایش پارامتر ضریب اضافه مقاومت به 1.2 می‌شود. این افزایش 3 درصدی نیز مقدار ناچیزی می‌باشد. باید به این نکته نیز توجه شودکه مقدار ضریب اضافه مقاومت این مدل در مقایسه با مدل با ورق 3 میلی‌متری بدون مهار افزایش 15 درصدی دارد.

* + - * 1. : ضریب اضافه مقاومت مدل‌های مقاوم‌سازی شده با FRP

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | FRP=3mm  W/O anchor | FRP=5mm  W/O anchor | FRP=3mm  W anchor | FRP=5mm  W anchor |
| ضریب اضافه مقاومت | 1.037497 | 1.13 | 1.16 | 1.2 |

به طور کلی می‌توان روند افزایش در ضریب اضافه مقاومت مدل با افزایش ضخامت و مهار ورق FRP به عنوان روش مقاوم‌سازی را مشاهده نمود.

* + 1. : ضریب اضافه مقاومت مدل ‌های مقاوم سازی شده با FRP
    2. شکل‌پذیری

پارامتر دیگر مورد بررسی در این تحقیق، نسبت شکل پذیری می‌باشد. نسبت شکل پذیری عبارتست از نسبت تغییرمکان نهایی به تغییرمکان تسلیم. نسبت شکل‌پذیری برای مدل های مقاوم‌سازی شده با FRP در جدول زیر نمایش داده شده است.

* + - * 1. نسبت شکل پذیری ‏مدل‌های مقاوم‌سازی شده با FRP

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | FRP=3mm  W/O anchor | FRP=5mm  W/O anchor | FRP=3mm  W anchor | FRP=5mm  W anchor |
| نسبت شکل پذیری ‏ | 5.22 | 6.93 | 7.46 | 7.86 |

مقادیر نشان‌دهنده افزایش نسبت شکل پذیری با افزودن ورق 5 میلی‌متری در مدل بدون مهار می‌باشد. مقدار این پارامتر در مدل با ورق 3 میلی‌متری بدون مهار 5.22 است، حال آنکه در مدل با ورق 5 میلی‌متری نسبت شکل پذیری ‏به 6.93 می‌رسد.

با مهار ورق 3 میلی‌متری، افزایش ناچیزی در پارامتر نسبت شکل پذیری ‏اتفاق می‌افتد و این پارامتر به 7.46 افزایش پیدا می‌کند.

افزایش ضخامت ورق به 5 میلی‌متر سبب افزایش پارامتر نسبت شکل پذیری ‏به 7.86‌ می‌شود. باید به این نکته نیز توجه نمود که مقدار نسبت شکل پذیری این مدل در مقایسه با مدل با ورق 3 میلی‌متری بدون مهار افزایش 51 درصدی دارد.

* + 1. : ضریب اضافه مقاومت مدل ‌های مقاوم سازی شده با FRP

1. نتیجه گیری و پیشنهادها
   1. مقدمه

عموم تیرهای بتنی را می‌توان با مقاوم‌سازی برشی در برابر زمین‌لرزه ایمن‌تر نمود. تحقیق حاضر به بررسی رفتار تیرهای مقاوم سازی شده با FRP به دو روش با مهار و بدون مهار پرداخته است. این دو روش روش‌های متداول در مقاوم‌سازی المان‌های بتنی می‌باشند.

* 1. نتیجه گیری

نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

1- نیروی تسلیم با افزودن FRP ابتدا کاهش یافته سپس با افزایش در ضخامت ورق و افزودن مهار انتهایی، روند افزایشی به خود می‌گیرد.

2- مقدار اضافه مقاومت مدل مقاوم سازی شده تیر با بتن 20 مگاپاسکال با ورق FRP 5 میلی‌متری با مهار در مقایسه با مدل با ورق 3 میلی‌متری بدون مهار افزایش 15 درصدی دارد.

3- مقدار نسبت شکل پذیری مدل مقاوم سازی شده تیر با بتن 20 مگاپاسکال با ورق FRP 5 میلی‌متری با مهار در مقایسه با مدل با ورق 3 میلی‌متری بدون مهار افزایش 37 درصدی دارد.

4- نسبت شکل پذیری مدل مقاوم سازی شده تیر با بتن 25 مگاپاسکال با FRP 5 میلی‌متری با مهار در مقایسه با مدل با ورق 3 میلی‌متری بدون مهار افزایش 51 درصدی دارد.

5- مقدار ضریب اضافه مقاومت مدل مقاوم سازی شده تیر با بتن 25 مگاپاسکال با FRP 5 میلی‌متری با مهار در مقایسه با مدل با ورق 3 میلی‌متری بدون مهار افزایش 15 درصدی دارد.

* 1. پیشنهادها

در ادامه تحقیق حاضر می‌توان موضوعات زیر را نیز مطرح و بررسی نمود:

1- بررسی رفتار لرزه‌ای ستون بتنی در صورت استفاده از میلگردهای FRP ‌به جای میلگردهای فولادی

2- بررسی رفتار تیرهای عمیق مقاوم‌سازی شده با FRP

3- بررسی روش‌های مقاوم‌سازی دال‌های بتنی