

## الاختبار الحاسوبي لفعالية استخدام مادة البوليمير المقوى بألياف الزجاج في تصميم أطراف الجري نوع Cheetah Foot

م. ثريا جبران محسنه\* م. ايناس صالح حسن\*\* د. م. لميس مصطفى قدسي\*\*\*  
د. م. زهير محمد سعيد مرمر\*\*\*\*

### الملخص

إن الأطراف الاصطناعية التقليدية تقدم سرعات ثابتة أو متحكم بها للمبتورين، ولكن بسبب وجود فئة كبيرة من الشباب والأطفال المبتورين وخاصة في البلدان النامية وبلدان الحروب ويهدف الحفاظ على صحتهم النفسية ولياقتهم الجسدية، كان اهتمامنا لجعل المبتورين قادرين على القفز والركض لمسافات كبيرة وبشكل أقرب ما يمكن للحالة الطبيعية باستخدام طرف اصطناعي ذو تصميم مناسب من حيث الوزن وقوة التحمل والتكلفة وهو الهدف الرئيسي من هذا البحث. تصمم أقدام الفهد الاصطناعية عادةً من البوليمير المقوى بألياف الكربون والذي يعرف بقدرته الكبيرة على تحمل الأوزان الدورية المطبقة عليه، ولكن بسبب عملية تصنيعه المعقدة وسعره المرتفع والذي ينعكس على سعر الطرف بأكمله عملنا في هذه الدراسة على اختبار إمكانية تصميم الطرف من مواد أخرى أقل سعراً وأقل تعقيداً في عملية تصنيعها وبذات الوقت تملك قوة عالية ووزن منخفض لا بأس بهما أمام ألياف الكربون، وهي مادة البوليمير المقوى بألياف الزجاج GFRP. إذ قمنا بتصميم نموذج عددي لطرف الفهد الاصطناعي باستخدام SOLIDWORKS 2016 x64 Edition لمبتور كتلته 70 kg وبطول 190 cm وعمره 24 عاما تعرض لبتير سفلي من تحت الركبة أحادي الجانب ثم حولنا النموذج لشبكة من العناصر المنتهية وبعد التأكد من جودة الشبكة وصحة النموذج العددي. اختبرناه نوعي اختبار، الأول يحدد مقدار الوزن الذي يستطيع تحمله قبل أن ينهار باستخدام التحليل الستاتيكي والاختبار الثاني هو اختبار التعب والذي نستطيع من خلاله تحديد العمر الافتراضي للطرف المصمم. وجدنا أنه وباستخدام مادة ألياف الزجاج نوع S2 مع بوليمير الإيبوكسي يمكن الحصول على طرف جري خفيف الوزن وذو قوة عالية وبتكلفة مقبولة وله عمر افتراضي جيد.

كلمات مفتاحية: طرف الجري، ألياف الكربون، ألياف الزجاج، البوليمير، الإيبوكسي، التصميم العددي للأطراف الاصطناعية، الاختبار الحاسوبي، تقنية العناصر المنتهية، قدم الفهد الاصطناعية.

\* طالبة ماجستير - قسم الهندسة الطبية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.  
\* طالبة ماجستير - قسم الهندسة الطبية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.  
\*\*\* أستاذ - قسم الهندسة الطبية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين.  
\*\*\* أستاذ - قسم الهندسة الطبية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

## Computer testing of effectiveness of using glass-fibre-reinforced-polymer in design of running limbs type Cheetah Foot

Eng. Thouraya g mouhssiena\* Eng. Inas s hasan\*\*

Dr. Lamis kodsiii Dr. Zuheir Marmar\*\*\*\*

---

### Abstract

Traditional prosthetics provide constant or controlled speeds for amputees, but due to the presence of a large group of young people and amputees, especially in developing countries and countries of war, and in order to preserve their mental health and physical fitness, our interest was to make the amputees able to jump and run for great distances and closer to normal through using a prosthesis with an appropriate design in terms of weight, durability and cost, which is the main objective of this research. Cheetah feet prosthetic are usually designed from carbon fiber reinforced polymer, which is known for its great ability to bear the periodic weights applied to it, but due to its complex manufacturing process and high price, which is reflected in the price of the entire limb, we worked in this study to test the possibility of designing the limb from other materials that are less expensive and less complex. In the process of manufacturing it, and at the same time, it has a high strength and low weight in comparison to carbon fibers, which is a glass fiber reinforced polymer (GFRP). We designed a numerical model of a Cheetah foot prosthetic using SOLIDWORKS 2016 x64 Edition for an amputee of mass 70 kg, length of 190 cm, and a 24-year-old who was subjected to a unilateral lower knee amputation. Then, we transformed the model into a mesh of finite elements then after ensuring the quality of the mesh and the validity of the numerical model. We tested it with two types of tests, the first one determines how much weight can it withstand before it collapses using static analysis, the second test is the fatigue test by which we can determine the life span of the designed prosthesis. We found that by using S2 glass fiber material with epoxy polymer it is possible to obtain a running prosthesis that is lightweight, has high strength, is affordable and has a good lifespan.

**key words:** GFRP, CFRP, S2-glass-fiber, epoxy, SOLIDWORKS , FEM, cheetah foot, prosthesis.

---

\*MA Student in the Department of Biomedical engineering of Mechanical and Electrical Faculty- Damascus University.

\*\*MA Student in the Department of Biomedical engineering of Mechanical and Electrical Faculty- Damascus University.

\*\*\*Professor in the Department Biomedical engineering of Mechanical and Electrical Faculty- Tishreen University.

\*\*\*\*Professor in the Department Biomedical engineering of Mechanical and Electrical Faculty- Damascus University.

**المقدمة:****لمحة عن المشكلة، أهمية البحث، والهدف منه:**

إن الأطراف الاصطناعية التقليدية تقدم سرعات ثابتة أو متحكم بها للمبتورين، ولكن بسبب وجود فئة كبيرة من الشباب والأطفال المبتورين وخاصة في البلدان النامية وبلدان الحروب ويهدف الحفاظ على صحتهم النفسية ولياقتهم الجسدية، كان اهتمامنا لجعل المبتورين قادرين على القفز والركض لمسافات كبيرة وبشكل أقرب ما يمكن للحالة الطبيعية باستخدام طرف اصطناعي ذو تصميم مناسب من حيث الوزن وقوة التحمل والتكلفة وهو الهدف الرئيسي من هذا البحث. تصمم أقدام الفهد الاصطناعية عادةً من البوليمير المقوى بألياف الكربون والذي يعرف بقدرته الكبيرة على تحمل الأوزان الدورية المطبقة عليه، ولكن بسبب عملية تصنيعه المعقدة وسعره المرتفع والذي ينعكس على سعر الطرف بأكمله عملنا في هذه الدراسة على اختبار إمكانية تصميم الطرف من مواد أخرى أقل سعراً وأقل تعقيداً في عملية تصنيعها وبذات الوقت تملك قوة عالية ووزن منخفض لا بأس بهما أمام ألياف الكربون، وهي مادة البوليمير المقوى بألياف الزجاج GFRP.

**البوليمير المقوى بالألياف FRP:**

في العقود القليلة الماضية أصبح استخدام المواد المركبة أكثر انتشاراً في مختلف المجالات والصناعات [6]. تنتج المواد المركبة خصائص مركبة من مادتين أو أكثر لا يمكن تحقيقها عند استخدام المادة بشكل مفرد [2]. من بين أهم المواد المركبة انتشاراً في الفترة الأخيرة هي مركبات البوليمير المقوى بالألياف (FRP) والتي تحل تدريجياً محل المواد المعدنية التقليدية بسبب قوتها العالية وخفة وزنها ومقاومتها الأفضل للتآكل رغم أن تكلفتها لا تزال أعلى من المعادن التقليدية إذ تعتبر خاصية خفة الوزن ومقاومة التآكل في الوقت الراهن من أكثر الخصائص

المرغوبة في أي منتج مصنع [8]. ويمكن تعريفها بأنها مواد مركبة مصنوعة من الألياف كـ(زجاج، كربون، أراميد، والفينيلون) مضمنة في مصفوفة بوليميرية من الراتنج كـ(إيبوكسي، فينيل استر، بوليستر، أو فينول). يعمل الراتنج كمادة رابطة تربط الألياف ببعضها البعض مما يبقيها محافظة على شكلها ويسهل نقل الأحمال وتوزيع الضغوط بين الألياف كما تلعب دوراً مهماً في وقاية الألياف من تأثيرات البيئة المحيطة. مزيج الألياف مع الراتنج يعطي خصائص لا يمكن أن تمتلكها المواد بمفردها مع الحفاظ على السمات الكيميائية المميزة لكل مكون من المكونات. تستخدم FRP ضمن التطبيقات الهندسية المختلفة بثلاثة أشكال [6] وهي:

1. تقوية باللف الخارجي مثل كالأعمدة والعوارض التالفة.
2. التعزيز الداخلي مثل القضبان الطويلة والركائب.
3. حجم الهيكل كاملاً وفيها يتكون الهيكل بأكمله من FRP.

يمكن ذكر أهم العوامل المساهمة في زيادة استخدام البوليمير المقوى بالألياف ضمن المزايا [6] التالية:

1. وزنها أقل بثلاث مرات (GFRP) إلى ستة مرات (AERP) من الفولاذ.
2. وعلى عكس الفولاذ ليست عرضة للتآكل عند التعرض المباشر للعناصر المختلفة الموجودة في البيئة المحيطة.
3. تتمتع بنسبة صلابة للوزن عالية نسبياً.
4. غير موصلة للكهرباء.
5. لا تتأثر بالمجالات المغناطيسية.
6. سهلة التصنيع والتعامل والقطع نسبياً.
7. يمكن تصنيعها بمجموعة متنوعة من الخصائص وذلك على أساس التكوين الكيميائي للألياف المستخدمة والبوليمر وطريقة الإنتاج.

الاصطناعية ولا سيما الأقدام الرياضية وكذلك في غرف الرنين المغناطيسي ضمن المستشفيات بسبب طبيعتها غير المغناطيسية [6] كما يستخدم بسبب طبيعته قليلة المسامية وعدم تلوثه وتحمله الكبير في صنع حاويات الأدوات الطبية وأسرّة الأشعة السينية بسبب شفافيته للأشعة [2]. وكل ذلك نظراً لخواصها الميكانيكية الممتازة كالقوة العالية والصلابة ومقاومة التآكل [3]. وخفة الوزن التي تسمح لها بتقديم هياكل خفيفة الوزن وعالية الأداء [5].

#### ألياف الكربون والبوليمير المقوى بها CFRP:

هي ألياف رقيقة جداً تتكون من ذرات الكربون يشبه التركيب الذري لألياف الكربون هيكل الجرافيت المكون من صفائح من ذرات الكربون مرتبة في نمط سداسي منتظم ويكون الاختلاف في طريقة تشابك الصفائح. تتميز ألياف الكربون بخصائص مناسبة مثل قوة الشد العالية والصلابة العالية والوزن المنخفض وتحمل درجات الحرارة العالية والتمدد الحراري المنخفض ولا تتأثر بالمواد القلوية والأشعة فوق البنفسجية. لكنها باهظة الثمن وذات قدرة أقل على التحمل عند مقارنتها بالألياف الأخرى مثل الألياف الزجاجية أو ألياف الأراميد [6]. عند دمجها ببوليمير الريزين البلاستيكي بوجود ضغط وحرارة تكون مادة قوية وخفيفة الوزن. ولكن من أكبر عيوبها سعرها المرتفع وطرق تصنيعها المعقدة.

$$P_{FRP} = P_f v_f + P_m v_m$$

#### ألياف الزجاج:

$m$  [5-24] الألياف الزجاجية هي ألياف دقيقة بقطر . مطورة مركبة ومحضرة بشكل لا عضوي. تستخدم [8] لتعزيز في المواد المركبة. نظراً لخصائصها الميكانيكية الممتازة. إذ تمتلك الألياف الزجاجية خصائص جيدة مثل

أما عيوبها [6] فهي:

1. تعرف بكونها مواد هشّة. سلوك الانفعال والاجهاد خطي حتى الانهيار بدون ظهور لهضبة الخضوع. وهذا قد يقود لفشل دون أي تحذير.
  2. معامل المرونة فيها أقل مقارنة بالفولاذ. وهذا قد يقود لانحرافات أكبر ويجعلها عرضة للشقوق.
  3. تعد ضعيفة نسبياً في القص والضغط.
  4. غير مناسبة للاستخدام في درجات الحرارة المرتفعة جداً ويعود ذلك لتحلل مادة الراتنج مما يؤثر على الخواص الميكانيكية.
  5. كذلك هي مادة قابلة للاشتعال وإطلاق غازات سامة عند الحرائق.
  6. وتكلفتها أعلى نسبياً من الفولاذ.
  7. معظمها غير قابلة لإعادة التدوير.
- خصائص هذه المواد: بشكل عام تكون قوة الشد أكثر اعتماداً على خصائص الألياف، بينما بعض الخصائص الأخرى مثل مقاومة القص تتأثر أكثر بخصائص مصفوفة البوليميرات، بالتالي الخصائص الميكانيكية والفيزيائية لمواد FRP تعتمد على عدد من العوامل وأكثرها تأثيراً هو نوع الألياف ونوع البوليمير ونسبة كل منهما وترتيب توضع الألياف [6].
- عادة يوصف تأثير الخواص النسبي للألياف والبوليمير من خلال قاعدة المخاليط التالية [6]:

حيث أن:

- $P_f$ : الخواص الميكانيكية للألياف.
  - $v_f$ : الكسر الحجمي للألياف.
  - $P_m$ : الخواص الميكانيكية لمصفوفة البوليمير.
  - $v_m$ : الكسر الحجمي لمصفوفة البوليمير.
- تستخدم هذه المواد في التطبيقات العسكرية والفضاء والطيران والسيارات والمجالات الطبية كالأطراف

إنشائه في الأصل بواسطة Owens-Corning ولكنه نسج في عام 1998 وهو الآن علامة تجارية مسجلة لشركة (AGY Holdings Corp). الاختلاف الأساسي بين المجموعتين الأخيرتين هو في التحجيم [7]. يمكن إنتاج شكلين من الألياف الزجاجية الأول هو المستمرة والثاني هو التيلة (غير المستمرة) [10]. لكل نوع مركبات كيميائية محددة وهي معطاة في الجدول (1) بـ %Wt. كما تتمتع الألياف بخواص ميكانيكية وحرارية موضحة في الجدول (2).

**مركبات البوليمير المقوى بالألياف الزجاجية (GFRP):** ربما يكون أحد أكثر أنواع FRP انتشاراً هو GFRP إذ تشير التقديرات لأكثر من 90% من مركبات FRP المصنعة تستخدم الزجاج لتقويتها. وأحد الأسباب وراء ذلك هو لأداء العالي المقدم نسبة للتكلفة المنخفضة [6]. فالألياف الزجاجية أرخص بكثير وأقل هشاشة مقارنة بالألياف الأخرى كالألياف الكربون وغيرها. كما تقاوم قوى الشد والضغط جيداً [11]. ولديها مقاومة عالية للتآكل وقوة عالية وتوصيل حراري منخفض وخصائص العزل الكهربائي [4]. كما أنها تتمتع بصلابة أكبر من الألمنيوم ويكتافة نسبية أقل من الفولاذ [1]. تحضر مركبات GFRP بواسطة طرق تصنيع مختلفة وتستخدم على نطاق واسع في تطبيقات مختلفة [2]. درس Morampudi P, Namala K. K, Gajjela Y. K, Majjiga B, and Prudhvi G [1] خصائص مركبات GFRP واستنتج أنه إذا أردنا استخدام أفضل جودة من المركب علينا بالذهاب إلى زجاج S مع الأيبوكسي أو البوليستر. بشكل عام تستخدم هذه المواد عالية الجودة بتطبيقات الفضاء.

. واعتماداً على [1] القوة العالية والمرونة والصلابة والمتانة المواد الخام المستخدمة في تكوينها تصنف:

**A:** وهو زجاج قلوي مصنع من سيليكات الصودا والجير يستخدم عندما لا تكون المقاومة الكهربائية ضرورية وهو الزجاج السائد للاستخدام في الحاويات وألواح النوافذ.

**AR:** الزجاج المقاوم للقلويات يصنع من سيليكات الزركونيوم ويستخدم في ركائز الاسمنت البورتلاندي.

**C:** زجاج مقاوم للتآكل مصنوع من بوروسيليكات الكالسيوم يستخدم في البيئات المسببة للتآكل الحمضي.

**D:** هو زجاج ذو ثابت عزل منخفض مصنع من بوروسيليكات ويستخدم في التطبيقات الكهربائية.

**E:** زجاج خال من القلويات وعالي المقاومة للكهرباء مصنوع من بوروسيليكات الألومينا والكالسيوم ويعرف بأنه ليف للأغراض العامة بسبب قوته ومقاومته الكهربائية وهو النوع من الألياف الأكثر استخداماً في صناعة مركب البوليمر المقوى بالألياف.

**ECR:** وهو زجاج من نوع E ذو مقاومة عالية للتآكل الحمضي مصنوع من سيليكات الكالسيوم تستخدم عند الحاجة إلى قوة وتوصيل كهربائي ومقاومة للتآكل الحمضي.

**R:** زجاج تعزيز مصنوع من سيليكات الكالسيوم يستخدم عن الحاجة لقوة أعلى ومقاومة للتآكل الحمضي.

**S:** زجاج ذو قوة عالية مصنوع من سيليكات المغنيسيوم. تستخدم في التطبيقات الهيكلية المعقدة [7] عند الحاجة لقوة عالية وصلابة عالية مقاومة الحرارة العالية جداً والتآكل. قد يطلق عليه زجاج T أو U.

**S-2:** زجاج يشبه لحد كبير زجاج S ولكنه يملك خصائص محسنة أكثر. (S-2) هو اسم علامة تجارية تم

الجدول رقم (1): التركيب الكيميائي لأنواع مختلفة من ألياف الزجاج:

Type	(SiO <sub>2</sub> )	(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	TiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(CaO)	(MgO)	(Na <sub>2</sub> O)	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
E-glass	55.0	14.0	0.2	7.0	22.0	1.0	0.5	0.3	-
C-glass	64.6	4.1	-	5.0	13.4	3.3	9.6	0.5	-
S-glass	65.0	25.0	-	-	-	10.0	-	-	-
A-glass	67.5	3.5	-	1.5	6.5	4.5	13.5	3.0	-
D-glass	74.0	-	-	22.5	-	-	1.5	2.0	-
R-glass	60.0	24.0	-	-	9.0	6.0	0.5	0.1	-

المصدر: [2]

الجدول رقم (2): الخواص الميكانيكية والحرارية لألياف الزجاج:

Fiber	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Tensile strength (GPa)	Young's modulus (GPa)	Elongation (%)	Coefficient of thermal expansion (10 <sup>-7</sup> /°C)	Poisson's ratio	Refractive index
E-glass	2.58	3.445	72.3	4.8	54	0.2	1.558
C-glass	2.52	3.310	68.9	4.8	63	-	1.533
S-glass	2.46	4.890	86.9	5.7	16	0.22	1.521
A-glass	2.44	3.310	68.9	4.8	73	-	1.538
D-glass	2.11-2.14	2.415	51.7	4.6	25	-	1.465
R-glass	2.54	4.135	85.5	4.8	33	-	1.546

المصدر: [2]

الجدول رقم (3): مقارنة لخصائص المواد الثلاثة:

الإيبوكسي	ألياف الزجاج	ألياف الكربون	الخصائص
85 N/mm <sup>2</sup>	[3445-4890] MPa يمكن أن تطول أكثر قبل أن تنكسر.	عالية جدا [4000-6000] MPa نسبة القوة للوزن عالية جداً.	قوة الشد
1.25 g/cm <sup>3</sup>	2.5 g/cm <sup>3</sup> (كثافة ألياف كربون إيبوكسي)	1.55 g/cm <sup>3</sup> (كثافة ألياف الزجاج إيبوكسي)	الكثافة
3.6 GPa	78 GPa	85 GPa	معامل الشد

المصدر: [8]

باستخدام طريقة المد اليدوي، ثم أجري التحليل الرقمي باستخدام ANSYS APDL Ver.15 وتلاه تحليل تجريبي لتحديد تأثير تصميم القدم على خواصها الميكانيكية. رقمياً حسب إجهادات von-Mises وانفعالات القص المرنة والانحرافات للقدم تحت تأثير حمولة 1600 N وهي ما تقابل ثلاث أضعاف وزن الجسم وذلك في حالتها تحميل الأول عندما القدم في 0° والثاني

الدراسات المرجعية: في دراسة تمت في العراق [14]، كان الهدف منها البحث الرقمي وكذلك التجريبي في تصميمين من الأقدام الرياضية (C,J) المصنوعة من الإيبوكسي المقوى بألياف الزجاج وفهم السلوك الميكانيكي للتصميمات المقترحة لاختيار الأفضل بينها، تم التصميم العددي باستخدام برنامج SOLIDWORKS Ver.2015 أما التصميم الواقعي تم

بعدد الطبقات. علاوة على ذلك قدموا تطبيقاً للتحقيق في استخدام هذه المواد في قدم flex-foot cheetah الاصطناعي وهو الهدف الرئيسي من هذه الدراسة، حيث صممت ثلاث أقدام عددية باستخدام برنامج SOLIDWORKS ليتم دراستها عددياً باستخدام ANSYS Composite Prep-post ACP) وأخرى حقيقية لتدرس تجريبياً باستخدام جهاز Tinius Olsen Horizon H10KT ثم تم التحقق من صحة النتائج العددية باستخدام البيانات التجريبية من حيث التشوه في ظل ظروف التحميل المختلفة تم إجراء الاختبارات من خلال فرض أن القدم تستخدم بحالتين الأولى وهي للوقوف وفيها يتم تطبيق وزن الشخص فقط على القدم كقوة ثابتة والثانية هي حالة الجري وفيها يمكن أن يصل الحد الأقصى للحمل المطبق إلى ثلاث أضعاف وزن العداء واعتبرت كتلة العداء 80kg أي أن الوزن الأقصى المطبق سيكون 2400N وتجدر الإشارة إلى أن الأقدام جميعها خضعت لـ40 دورة تحميل لتحديد ما إذا كان بإمكانها تحمل التعب. وأظهرت النتائج توافقاً جيداً بين القيم التجريبية والقيم العددية من حيث التشوه الكلي الأعظمي والتي تبلغ حوالي 50mm عند أقصى قوة. كما بينت الدراسة أن قيم هذه التشوهات تتأثر بشكل كبير بنوع مادة الألياف المستخدمة للقدم فمثلاً عند قوة تحميل 800N عند الوقوف بلغ التشوه الأعظمي قيمة موضحة في الجدول (5). كذلك أبدت RbWGF تشوه أقل في حالتين الوقوف والجري وهذا ما يؤدي إلى انخفاض مستوى التدهور الميكانيكي ويرتبط ذلك بالصلابة والمرونة لهذه المادة مقارنة بالمادة الثانية. ويمكن من الجدول (5) ملاحظة أن عمليات المحاكاة للتشوه الكلي أعلى قليلاً من التشوه الذي حصلوا عليه عند التجريب ولكن يمكن اعتبارها متشابهة وضمن الشك التجريبي (حوالي 10%). تشير النتائج النهائية للاختلاف

عند 25° من الانثناء الظهراني. في حين تم إجراء التحليل التجريبي المقابل لحالتين التحميل السابقتين لدراسة الانحراف فقط. النتائج الرقمية لأقصى انحراف بالإضافة لقيم الإجهادات المدروسة رقمياً موضحة في الجدول (4)، ووجد أن الحد الأقصى من إجهاد Von Mises على المنطقة الأكثر إنحناء في القدم مما يجعلها المكان الأكثر تأهيلاً للتصدع في حال حدوث فشل، وجميع قيم الإجهادات تقع ضمن المجال الآمن من الفشل الستاتيكي الناتج عن التحميل كذلك لم تظهر أي علامة على الفشل عند تطبيق نفس قيمة الحمل في الاختبارات التجريبية. كما وجد أن تحت نفس الحمل فإن القدم C تتميز بصلابة أعلى من J وتكون كلا القدمين ضمن الحد الأقصى المقبول للانحراف في الأقدام الاصطناعية الرياضية. والتغير في شكل القدم عند تطبيق الحمل بالتالي تغير محاذاتها يغير من نقطة تلامس القدم مع الأرض مما يؤثر على الصلابة بشكل كبير وهذا يتوافق مع الدراسات السابقة.

الجدول رقم (4): الإجهادات الأعظمية والانحرافات نتيجة التحليل العددي:

Foot Angle	DESIGN C		DESIGN J	
	°0	°25	°0	°25
Maximum Deflection (mm)	28	38	37	34
Von Mises Stress (MPa)	265.198	399.889	293.823	236.321

في دراسة أخرى تمت في المغرب [15] ، كان الهدف منها دراسة تأثير التشوهات المختلفة على خصائص المركبات المصنفة القائمة على البولييمير وألياف الزجاج بنوعين Woven mat و Chopped strand mat أنتجت عينات بنفس السماكة وبعدد مختلف من الطبقات وأظهرت النتائج أن الخواص الميكانيكية عند نفس السماكة تتأثر

أكبر. من خلال هذه الحسابات والنتائج نظراً للقوة العالية لألياف الكربون يُفترض أنه يمكن استخدام مواد أقل في التصميم مما يسمح بتخفيض الوزن. وأما نتيجة اختبار انحراف\_ حمل تم تسجيل النتائج في الجدول (6) لكنتا العينتين حيث لوحظ وجود تقارب كبير بين النتائج. وقدم الكربون لديها انحراف أقل من القدم المصنوعة من ألياف الزجاج هذا يشير إلى أن ألياف الكربون لديها قوة أعلى.

الجدول رقم (6): نتائج الانحراف التجريبية والرقمية.

FOOT	FEM	EXP
GF+UNSA	54mm	53mm
CF+UNSA	28mm	26mm

#### منهجية الدراسة التحليلية:

قمنا بداية بتحديد مواصفات المريض للدراسة، ثم صممنا نموذج طرف الجري العددي المناسب له، حددنا كافة البارامترات للمادة المختارة، ثم اخترنا مواصفات شبكة العناصر المنتهية، بعد التأكد من جودة الشبكة وصحة النموذج العددي، انتقلنا لعملية التحليل، وأثناء التحليل أجرينا التحليل الأول من النوع الستاتيكي ثم أجرينا تحليل التعب للتأكد من قدرته على تحمل الاجهادات الدورية المطبقة عليه.

مواصفات المريض الذي صمم له الطرف:

كان المريض المختار بعمر 24 عام تعرض للبتير سفلي من النوع تحت الركبة أحادي الجانب، بطول 190 cm، وبكتلة 70 kg.

مواصفات الطرف الرقمي:

تتكون هذه القدم من صفيحة واحدة تركيب فيها المادة المستخدمة بشكل حرف J، قمنا برسمه بواسطة السوليدوركس. وكان له المواصفات في الجدول (7).

الطفيف بين قيم التشوه العددي والتجريبي إلى أن تصنيع الأقدام كان ناجحاً.

الجدول رقم (5): ملخص لقيم التشوه التي تم الحصول عليها تجريبياً وعددياً:

Sample	Experimental deformation (mm)	Numerical deformation (mm)
RbMGF	49.1±1.0	52.6±1.0
RbWGF	36.3±1.6	39.4±0.9

في دراسة أخرى أجريت في العراق [16]. لاختبار عينتين من أقدام الجري نوع Cheetah Foot مصنعين من مادتين مختلفتين وهي (زجاج \ كربون) مع البوليستر في تحليل عددي وآخر تجريبي. في الدراسة العددية تم حساب الإجهاد الرئيسي الأقصى maximum principal stress، طاقة الانفعال strain energy، وأخيراً التشوه الكلي total deformation للقدم لكلا المادتين. ثم أجريت التجربة عملياً وتم فيها اختبار انحراف\_حمولة load-deflection test لكل عينة لحساب التشوه وكانت النتائج العملية قريبة جداً من النتائج الرقمية وكان منحنى عينة القدم الكربونية أقل من ذلك لعينة ألياف الزجاج والذي يشير إلى قوة ألياف الكربون. تم التصميم للنموذج باستخدام AutoCAD حيث رسمت الأبعاد المطلوبة للتصميم ثم حولت إلى ANSYS WORKBENCH. ثم طبق حمل 1500N وهو ما يقابل ثلاث أضعاف وزن المريض وكانت النتائج كالتالي بالنسبة للدراسة العددية يتم المحافظة على قيم الضغوط الرئيسية القصوى ثابتة بين المادتين وذلك لأن الإجهاد لا يعتمد على خصائص المواد بل يعتمد على القوة المطبقة والمساحة التي تتوزع عليها، كما أن تشوه الشفرة الاصطناعية باستخدام ألياف الكربون له قيمة أقل. عند مقارنة اختبار المواد لكل تصميم يتضح أن ألياف الكربون هي مادة أفضل من خلال خفض جميع القيم المحسوبة ومساعدة التصميمات على الأداء بكفاءة



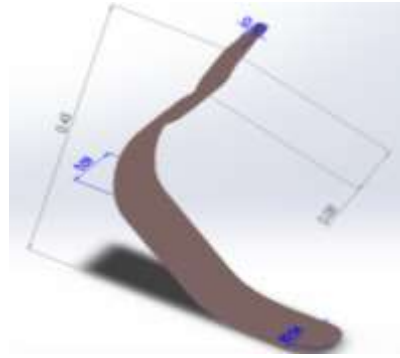
الجدول رقم (8): المواصفات الميكانيكية لمادة GFRP:

<b>Model type:</b>	Linear Elastic Isotropic
<b>Default failure criterion:</b>	Max von Mises Stress
<b>Yield strength:</b>	1e+009 N/m <sup>2</sup>
<b>Tensile strength:</b>	1.9e+009 N/m <sup>2</sup>
<b>Elastic modulus:</b>	9.03e+010 N/m <sup>2</sup>
<b>Poisson's ratio:</b>	0.23
<b>Mass density:</b>	2488 kg/m <sup>3</sup>
<b>Shear modulus:</b>	3.81e+010 N/m <sup>2</sup>

خصائص شبكة العناصر المنتهية:

يتم تقسيم الشكل لشبكة من العناصر المنتهية ليتم التحليل عندها تم ذلك بإنشاء شبكة من نوع صلب وقد تم استخدام الشبكة القياسية التي شكل عناصرها مثلثية نظراً لوجود زوايا عديدة في تصميم الطرف وللحصول على أكبر قدر من التعميم وبالتالي دقة أعلى في الدراسة. حجم العنصر الواحد 0.007m مع درجة تفاوت 0.00035 m ودقة عالية للشبكة يوضح الجدول (9) عدد العناصر 12770 وعدد العقد 22895 للشبكة وكذلك معدل الامتداد الأعظمي والنسبة المئوية للعناصر بالنسبة لمعدل الامتداد وكذلك عدد العناصر المشوهة والوقت اللازم لإنشاء الشبكة كاملة.

تجدر الملاحظة أنه تم إجراء دراسة تقارب شبكة العناصر المنتهية convergence of FEM للتأكد من صحة ومناسبة ودقة النموذج العددي للطرف للاستخدام في التحليل، حيث تم تجريب مجموعة من القيم المختلفة لحجوم العناصر بدأ من عنصر بحجم 10mm و ثم تم تصغير الحجم 1mm في كل تجريب واختبرنا قيم الإزاحة الأعظمية في كل مرحلة مع ثبات القوة المطبقة بقيمة 700N وذلك حسب [16] وجدنا أن قيمة الإزاحة الأعظمية بدأت عند حجم عنصر 0.007m أي 7mm فما بعد [6,5,3] تأخذ قيم متقاربة جداً وهي تقريبا 3.36mm وكون الحجم 7mm يعطي قيم متقاربة ويتم التحليل عندها بسرعة مقبولة فيتم اعتماده.



الشكل (1): أهم الأبعاد للطرف المصمم.

الجدول رقم (8) مواصفات طرف الجري المصمم.

450mm	الطول
90mm	العرض
10mm	السمائة
1.30152 kg	الكتلة



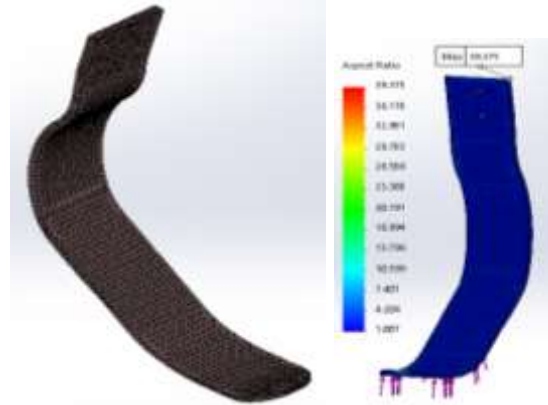
الشكل (2): طرف الفهد الاصطناعي الذي صممناه.

خصائص المادة المختارة في تصميم الطرف:

كما ذكرنا سابقاً نحن في هذه الدراسة ندرس إمكانية تصميم الطرف من مادة البوليمير المقوى بألياف الزجاج من النوع S2، تؤخذ خصائصها بحسب ما قدمته شركة AGY و PRINCE-LUND [11][12]. لتقدم لبرنامج السوليدوركس ثم تطبق على النموذج العددي وكانت الخصائص كما هي وضحة في الجدول (8).

الجدول رقم(9): خصائص شبكة العناصر المنتهية.

Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Standard mesh
Automatic Transition:	Off
Include Mesh Auto Loops:	Off
Jacobian points	4 Points
Element Size	0.007 m
Tolerance	0.00035 m
Mesh Quality Plot	High
Total Nodes	22895
Total Elements	12770
Maximum Aspect Ratio	39.375
% of elements with Aspect Ratio < 3	96.8
% of elements with Aspect Ratio > 10	0.227
% of distorted elements(Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:00:02



الشكل (3): الشبكة عند تطبيقها على الطرف.

بعد التقسيم لشبكة من العناصر المنتهية يجب أن يتم التأكد من جودة الشبكة الناتجة لنقرر فيما إذا كانت نتائج المحاكاة موثوق بها، يتيح برنامج Solidworks استخدام معيار Aspect ratio وفيه يتم حساب نسبة العرض للارتفاع لكل عنصر، كما يتيح عرض توزع Aspect ratio في الشبكة المبنية بشكل بياني ويتيح إمكانية تحديد موضع العناصر الهرمية التي عندها يأخذ aspect ratio قيم كبيرة (العنصر مع نسبة كبيرة يعني أنه طويل ونحيل). قيمة aspect ratio يجب أن تبقى أقل من 50 في المناطق التي تكون عندها تحليلاً للإجهاد وغيرها مهمة وحدية. وفي جميع المناطق الأخرى القيمة يجب ألا تتجاوز الـ 500 [17]. بالنسبة لشبكتنا فإن رسم مخطط جودة الشبكة وفقاً لـ aspect ratio، يعطي قيمة أعظمية تساوي 39.375 وهذا في منطقة تثبيت فلا يشكل مشكلة كبيرة أما في المناطق الحرجة فإن جميع المناطق تبدو زرقاء كما هو موضح في الشكل (3) وهذا يوضح أن الشبكة لها جودة عالية. ومن الجدول (9) أيضاً يمكن ملاحظة أن 96.8% من العناصر لها نسبة أقل من 3 وهذا ممتاز.

#### بداية التحليل العددي:

كما ذكرنا يوجد نوعين من التحاليل قمنا بها الأول تحليل ستاتيكي يتم على بارومتري المريض الذي صمم لأجله الطرف وتعيين مقدار التحمل الأعظمي للحمولات الستاتيكية، والثاني هو تحليل التعب الذي سينتج عن الحمل المتكرر المطبق.

#### 1. التحليل الستاتيكي:

بعد أن قمنا بتصميم الطرف وتطبيق المواد اللازمة وتقسيمه لعدد من العناصر المنتهية قمنا بدراسته دراسة ستاتيكية للتأكد من مدى تحمله ومن صحة تصميمه وأيضاً لمعرفة نقاط الضعف في التصميم لتحسينها. تعطي الدراسة الستاتيكية مقدار الـ Displacement الناتج عن تطبيق القوة وكذلك الإجهاد (Stress(principal\von-mises) والانفعال (Strain).

الجدول رقم (10): قيم القوة المطبقة في الاتجاهات الثلاثة مقدره بالـN.

X	Y	Z	Resultant
1073.2	6749.8	0.33811	6834.61

#### نتائج الدراسة الستاتيكية:

تظهر الأشكال الآتية نتائج الدراسة السابقة حيث يوضح: الشكل (6): أعظم قيمة للإجهاد von-mises عند العقدة 1861 هي  $129.507 \text{ MPa}$  وهي قيمة مقبولة مقارنة مع معامل الخضوع.

الشكل (7): أعظم قيمة للإجهاد principal عند العنصر 1861 هي  $128.975 \text{ MPa}$  وهي قيمة مقبولة مقارنة مع معامل الخضوع.

الشكل (8): أعلى قيمة للإزاحة عند العقدة 22560 وكانت  $3.359 \times 10^1 \text{ mm}$

ونظرا لأن الحمولة المطبقة على الطرف قد تكون أكبر من وزن المريض في بعض الأوقات نتيجة الضغط الزائد مثلا ولنصل إلى نتائج دقيقة ونثبت مدى متانة الطرف قمنا بعدة اختبارات له وذلك بتطبيق قوى مختلفة ابتداءً من وزن المريض حتى نصل إلى أعلى قيمة للقوى الستاتيكية التي يستطيع الطرف تحملها والتي يتجاوز عندها الضغط معامل الخضوع الجدول رقم (11) يوضح النتائج التي وصلنا إليها.

#### تفسير نتائج الدراسة الستاتيكية:

نتيجة لتطبيق قوة تساوي  $700 \text{ N}$  حيث كتلة المريض المدروس  $70 \text{ kg}$  ثم تطبيق مجموعة من الأوزان المختلفة بدأ من  $700 \text{ N}$  وحتى  $4300 \text{ N}$  وجدنا أن الطرف المصمم من مادة البوليمير المقوى بألياف الزجاج يمكنه تحمل الحمولة الستاتيكية المطبقة نتيجة وزن المريض المدروس حتى تقريبا ستة أضعاف وزن المريض بقوة

#### خطوات الدراسة الستاتيكية:

1. التثبيت: تم اختيار نقاط التثبيت في المنطقة التي يتم تثبيت الطرف مع الأدايتز من خلالها وهي ثلاث سطوح ثابتة كما موضح في الشكل (4).

2. تطبيق القوة: تم تطبيق القوة الكلية بشكل قوى موزعة على السطح السفلي للطرف الملامس للأرض باعتباره قوة رد فعل الأرض، حيث اخترنا في دراستنا هذه تطبيق وزن المريض على الطرف كقوة رد فعل الأرض على الطرف وهي بحسب قانون الثقل:

$$W = m \times g$$

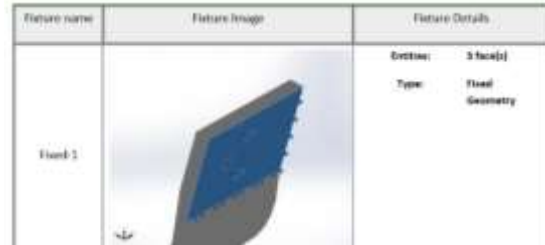
حيث:

w: هي ثقل المريض يقدر بـ N

m: كتلة المريض ويقدر بـ kg

g: تسارع الجاذبية الأرضية فرضناه  $10 \text{ m. s}^{-2}$

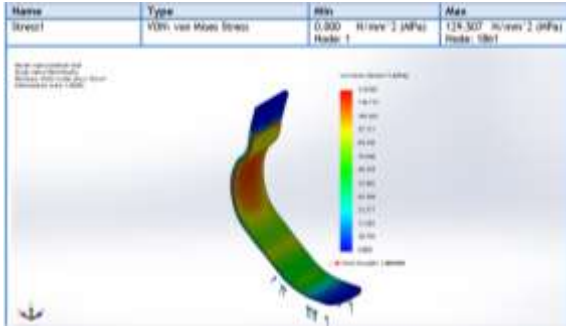
والشكل (5) يوضح موضع تطبيق القوة ومقدارها بما يتوافق مع وزن المريض المصمم له هذا الطرف. كما يظهر الجدول (10) قيم القوة على المحاور الثلاثة.



الشكل (4): أسطح التثبيت.



الشكل (5): أسطح تطبيق القوة.



عالية وليس هناك حاجة لأي تعديل بالشكل أو الزوايا أو السماكة، وكذلك يمكنه تحمل أي حمولة مفاجأة بمرونة طالما أنها تقع تحت قيمة 4300 N تقريبا. بعد هذه القيمة يتجاوز الإجهاد المطبق على الطرف نتيجة الحمولة حد الخضوع وتصبح المادة من اللدائن أي تحافظ على أي تشوه يطبق عليها.

الشكل(6): نتائج تحليل الإجهاد *Von-mises*.



الشكل(8): نتائج التحليل ومناطق الإزاحة.

الشكل(7): نتائج تحليل الإجهاد الرئيسي *principal*.

الجدول (11): النتائج التي توصلنا إليها بتطبيق الأحمال المختلفة بدأ من وزن المريض 700N.

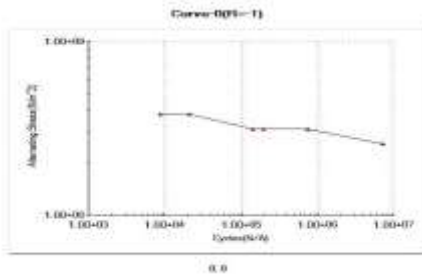
Forces (N)	Stress (von-Mises) MPa	Stress (Principal) MPa	Strain	Displacement (mm)
700	129.5	129.0	0.000937	33.59
750	139.02	138.46	0.000976	34.99
800	148.79	148.18	0.001045	37.41
850	158.6	157.96	0.001114	39.83
900	169.2	168.1	0.001222	43.59
950	179.5	178.0	0.001294	46.11
1000	189.8	188.0	0.00367	48.63
1100	210.8	208.1	0.001514	53.71
1500	297.4	290.7	0.002117	74.28
2800	613.178	208.1	0.004106	140.24
3000	663.957	643.24	0.004426	150.129
3200	715.139	692.53	0.004746	159.852
3400	766.648	742.08	0.0050668	169.416
3500	786.417	760.91	0.0051813	171.124
4000	919.6	888.5	0.006177	199.2
4100	945.6	913.4	0.006342	203.7
4300	997.4	9.630	0.006671	212.5

الدراسة التجريبية [10] وهي موضحة بالجدول (12) بحذف النقاط الشاذة نحصل على منحنى S-N له الشكل (10).

الجدول (12): قيم تجريبية لرسم مخطط S-N لمادة البوليمر المقوى بألياف الزجاج S2 .

Specimen (No.)	Maximum Cyclic Stress, $\sigma_M$ ( $10^7 N.m^{-2}$ )	Fatigue Cycles to failure (NO.)
13	25.5	$7.246 \times 10^6$
19	25.5	$5.76 \times 10^5$
9	29.3	$6.75 \times 10^4$
16	29.3	$8.36 \times 10^4$
18	29.3	$7.38 \times 10^4$
7	31.0	$1.96 \times 10^5$
12	31.0	$1.42 \times 10^5$
20	31.0	$7.46 \times 10^5$
6	37.9	$8.85 \times 10^3$
10	37.9	$2.22 \times 10^4$
11	37.9	$2.09 \times 10^4$
24	71.0	$3.93 \times 10^2$

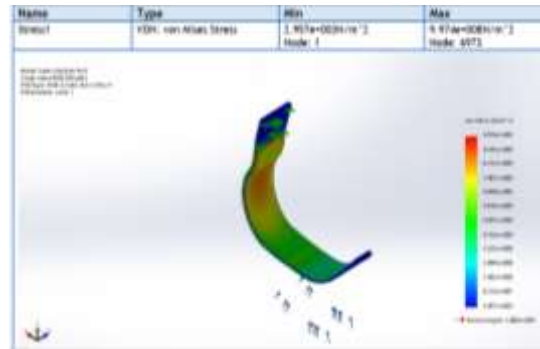
المصدر: [9].



الشكل (10): مخطط S-N من القيم التجريبية.

#### نتائج دراسة التعب وتفسيرها:

قمنا بإجراء تحليل التعب بتطبيق وزن المريض بشكل دوري لـ 2120000 دورة وكانت النتيجة بأن الطرف تحمل هذه الأوزان الدورية ولم يتضرر أو يتخرب وأبدى التحليل الرسالة التالية (الإجهادات الدورية في كل مكان من النموذج هي تحت القيم الأصغرية لمنحنى S-N



الشكل (9): الإجهاد وكمية التشوه الكبير لقوة 4300N. معامل المرونة في S2 يقود لهذه الانحرافات الأكبر [6].

#### 2. تحليل التعب:

نعلم أن التحليل الستاتيكي للهياكل الميكانيكية لا يكفي إذ أن حمل المريض يطبق بشكل دوري على الطرف ولحساب مقدار التحمل مع الزمن بالنسبة للطرف نلجأ لما يسمى بتحليل التعب وفيه نعمل على تكرار تطبيق حمل المريض بشكل دوري لعدد من المرات للتأكد من مقدار تحمله وأجرينا التحليل كالتالي:

بفرض أن الشخص يركض مسافة مقدارها 50 km في الأسبوع الواحد وبالتالي سيركض 2650 km في كل العام. إذا اعتبر طول الخطوة المغطاة أثناء الركض 1,25 m فنحن بحاجة إلى 2120000 خطوة للعام الواحد وهذا بفرض عمر الطرف الافتراضي عام. أي يجب أن يصمد الطرف أمام تحميل وتحرير متكرر لكتلة 70 kg عدده 2120000 مرة لكي نقول أن عمره الافتراضي عام كامل.

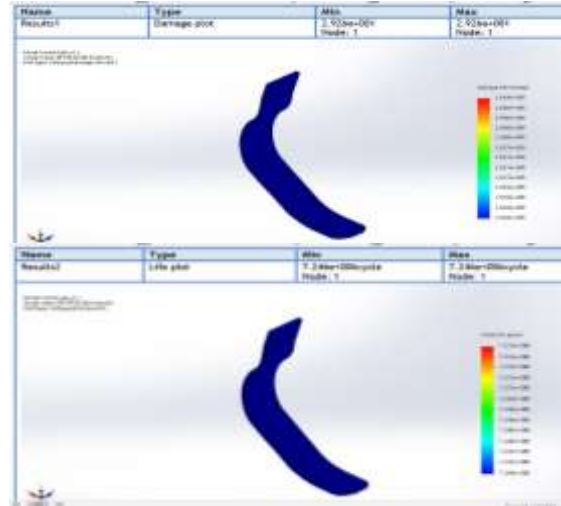
بالتالي لإجراء تحليل التعب:

نبدأ بإنشاء دراسة تعب جديدة على الدراسة الستاتيكية الخاصة بكتلة المريض أي عند 70 kg ونحدد بارومترزات الدراسة بأنها حمل دوري يتكرر 2120000 مرة، ولإجراء دراسة تحليل التعب يجب أن نعرف مخطط S-N لمادة البوليمر المقوى بألياف الزجاج ونأتي بها من

### المراجع:

1. Morampudi P, Namala K. K, Gajjela Y. K, Majjiga B, Prudhvi G. (2021). Review on glass fiber reinforced polymer composites. *ScienceDirect*, 43(1), pp. 314-319.
2. Sathishkumar TP, Satheeshkumar S, Naveen J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites – a review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 33(13). pp. 1258–1275.
3. Patel S, Ahmad S, Mahajan P. (2016, DECEMBER). Probabilistic Finite-Element Analysis of S2-Glass Epoxy Composite Beams for Damage Initiation Due to High-Velocity Impact. *Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems*. 2(044504). pp. 1-3.
4. Alhayek A, Syamsir A, Anggraini V, Muda Z. C, Nor N. M. (2019, November). Numerical Modelling of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Cross Arm. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 8(4). pp. 2277-3878.
5. Iqbal, Abu Rakib Md. (2020). Material Characterization of Fiber-Reinforced Composite Material Characterization of Fiber-Reinforced Composite Materials Under Dynamic Loading Condition. Doctor of Philosophy Dissertation, The University of Nevada, Las Vegas.
6. Alsalihi Mohammed A. J. (2014). Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polymer Bars After Exposure to Elevated Temperatures. Master's thesis, The University of Wisconsin – Milwaukee.
7. Kinsella M, Murray D, Crane D, Mancinelli J, Kranjc M. (2016). MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITES REINFORCED WITH HIGH STRENGTH GLASS FIBERS. Retrieved February 20<sup>th</sup>, 2022.
8. Batabyal A, Nayak R. K, Tripathy S. (2018, November). Evaluation of Mechanical Properties of Glass Fibre and Carbon Fibre Reinforced Polymer Composite. *Journal of Communication Engineering & Systems*. 8(2). pp. 2321-5151.

نتيجة لذلك فهو لا يتضرر.. أي أن جميع الإجهادات الدورية هي تحت مخطط S-N وبالتالي جميعها رغم تكرارها الكبير آمنة بدرجة كبيرة.



الشكل (11): نتائج تحليل التعب.

### الخاتمة:

في تصنيع الأطراف الاصطناعية الخاصة بالجري رغم أن CFRP تبدي قوة وصلابة أعلى من GFRP إلا أنه وبسبب تكلفتها المرتفعة وطرق تصنيعها المعقدة وخاصة بالنسبة للبلدان النامية ولدى تصنيع أقدام الأطفال والتي تحتاج لتبديل دوري كل عدة سنوات حاولنا العمل على تحليل استخدام مواد أرخص وأسهل في التصنيع وكذلك لها قوة ومثانة جيدة وخفيفة الوزن وهي GFRP وكنتيجة لبحثنا وجدنا أن المادة المقترحة يمكن استخدامها في تصنيع الأطراف الرياضية الخاصة بالجري كقدم الفهد الاصطناعية وتعطي مواصفات جيدة من حيث الوزن والتحمل والتكلفة. ونوصي مستقبلاً بإجراء دراسات أكثر وأن يتم تحليل التعب عند قوة تساوي ثلاث أضعاف وزن المريض وإجراء التجارب عملياً.

9. RALPH L, TOBLER T, DAVID T, READ. (1975, October). Fatigue Resistance of a Uniaxial S-Glass/Epoxy Composite at Room and Liquid Helium Temperatures. *Journal of Composite Materials*. 10. pp. 32.
10. [https://extrudesign.com/different-types-of-glass-fiber/?fbclid=IwAR08pxvoOqqoqfFLDMX8iIEiHiIWM\\_Tc46U3af16k4xQdtLIXYBNEwprMfE](https://extrudesign.com/different-types-of-glass-fiber/?fbclid=IwAR08pxvoOqqoqfFLDMX8iIEiHiIWM_Tc46U3af16k4xQdtLIXYBNEwprMfE) [ 21 مايو ، 2021 ]
11. <https://www.princelund.com/fiber-reinforced-polymers.html?fbclid=IwAR2WTvcg-7oFUuxl-5aXz5kQYKGzq2gqzYtExObutczE333QpRRZkoBGGEA> [ 21 مايو ، 2021 ]
12. [https://www.agy.com/wp-content/uploads/2014/03/High\\_Strength\\_Glass\\_Fibers-Technical.pdf](https://www.agy.com/wp-content/uploads/2014/03/High_Strength_Glass_Fibers-Technical.pdf)
13. [ 21 مايو ، 2021 ]
14. <https://wiki.cadcam.com.my/knowledgebase/mesh-quality-analysis-aspect-ratio/> [2 أبريل، 2022]
15. Hamzah M, Merza A, Ali L. (2017). Experimental and Numerical Investigations of Athletic Prosthetic Feet Made of Fiber Glass Reinforced Epoxy. *1st IJRTESS – 2017 First International Conference on Recent Trends of Engineering Sciences and Sustainability*.
16. Ouarhim W, Ait-Dahi M, Bensalah M.O, El Achaby Mounir, Rodrigue D, Bouhfid R, Qaiss A. (2020). Characterization and numerical simulation of laminated glass fiber–polyester composites for a prosthetic running blade. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 0(0), pp.1–16.
17. Abood S, Faidh-Allah M. (December 2019). Analysis of Prosthetic Running Blade of Limb Using Different Composite Materials. *Journal of Engineering*, 12(25), pp. 15-25.