توليد الطاقة الكهربائية من الرياح بالاعتماد على تقنية الرنين

صلاح المصباحي	على الزرداب	فرج قنبو
أستاذ مساعد، علم المواد قوي	مساعد محاضر، ميكانيكية	مساعد محاضر، ميكانيكية قوي
كلية الهندسة القره بوللي	كلية الهندسة القره بوللي	كلية الهندسة القره بوللي
جامعة المرقب	جامعة المرقب	جامعة المرقب
salahalmusbahi@elmergib.edu.ly	afzerdab@elmergib.edu.ly	Faraj.ganbo@elmergrib.edu.ly

تاريخ استقبال البحث: 07 مارس 2026م تاريخ قبول البحث: 19 ابريل 2026م

الملخص:

تبحث هذه الدراسة في توليد الكهرباء من طاقة الرياح باستخدام اهتزازات دوامية كبديل للتوربينات الدوارة التقليدية، تم تطوير نموذج ديناميكي غير خطي وتطبيقه في برنامج MATLAB لمحاكاة التحفيز الهوائي واستجابة الهيكل عبر نطاق سرعة الرياح من 2 إلى 15 م/ث، أُجريت دراسة تحليلية لمعرفة تأثير نوع المادة وقطر العمود (0.05–0.15 م) وسمك الجدار (2–6 ملم) على سرعة الرنين والقدرة الكهربائية الناتجة، أظهر البوليمر المقوى بألياف الكربون (CFRP)أعلى سرعات رنين حرجة (حتى 12.4 م/ث) وأقصى قدرة توليدية حوالي 48 واط، حقق البوليمر المقوى بألياف الزجاج (GFRP) أداءً متوسطاً مع ذروة قدرة تقارب 32 واط، بينما رنت مادة البولي إيثيلين عالي الكثافة (HDPE)عند سرعات أقل (3.1–5.6 م/ث) لكنه أنتج قدرة محدودة (10واط)، أدت زيادة القطر إلى تعزيز القدرة بنسبة تصل إلى 35%، في حين أدت زيادة السمك إلى تقليل سعة الاهتزاز والإنتاجية بنحو 20K.% تؤكد هذه النتائج جدوى هذه التقنية للتطبيقات الحضرية الصغيرة النطاق.

الكلمات المفتاحية: طاقة الرياح، توليد الكهرباء، الاهتزازات الدوامية، المحاكاة العددية، برنامج ATLAB، المواد المركبة.

Wind Power Generation Based on Resonance Technology

Salah Almusbahi	Ali Zerdab	Faraj Ganbo
Assistant Professor, Materials Science Faculty of Engineering, Al-Qarahbulli	Assistant Lecturer, Power Mechanics Faculty of Engineering, Al-Qarahbulli	Assistant Lecturer, Power Mechanics Faculty of Engineering, Al-Qarahbulli
salahalmusbahi@elmergib.edu.ly	afzerdab@elmergib.edu.ly	Faraj.ganbo@elmergib.edu.ly

Abstract

This study investigates the generation of electrical power from wind energy using vortex-induced vibrations as an alternative to conventional rotating turbines. A nonlinear

dynamic model was developed and implemented in MATLAB to simulate aerodynamic excitation and structural response over a wind speed range of 2 to 15 m/s.

An analytical investigation was conducted to examine the effects of material type, column diameter (0.05–0.15 m), and wall thickness (2–6 mm) on resonance velocity and the resulting electrical power output. The results showed that carbon fiber reinforced polymer (CFRP) exhibited the highest critical resonance speeds (up to 12.4 m/s) and the maximum power output of approximately 48 W. Glass fiber reinforced polymer (GFRP) demonstrated moderate performance with a peak output of around 32 W, while high-density polyethylene (HDPE) resonated at lower wind speeds (3.1–5.6 m/s) but produced limited power output of about 10 W.

Furthermore, increasing the column diameter enhanced power generation by up to 35%, whereas increasing wall thickness reduced vibration amplitude and decreased output efficiency by approximately 20%. These findings confirm the feasibility of resonance-based wind energy systems for small-scale urban applications.

Keywords: Wind Energy, Electricity Generation, Vortex-Induced Vibrations, Numerical Simulation, MATLAB, Composite Materials.

أولاً: المقدمة

في ظل تصاعد آثار التغير المناخي وتزايد الاعتماد العالمي على الوقود الأحفوري، أصبح التحول نحو مصادر الطاقة النظيفة خيارًا حتميًا لتحقيق التنمية المستدامة وتقليل الانبعاثات الضارة، وتُعد الطاقات المتجددة من أبرز البدائل الحديثة؛ إذ تتميز بكونها مصادر طبيعية متجددة وغير ناضبة نسبيًا، إضافة إلى دورها الفعال في الحد من التلوث البيئي وتعزيز أمن الطاقة، وتشمل هذه المصادر الطاقة الشمسية، وطاقة الرياح، والطاقة المائية، وغيرها من التقنيات التي تعتمد على ظواهر طبيعية مستمرة، وتبرز طاقة الرياح بشكل خاص كأحد أهم هذه المصادر، لما تتميز به من قدرة على تحويل الطاقة الحركية للهواء إلى طاقة كهربائية بطريقة نظيفة وفعالة.

إلا أن التوسع في استخدام توربينات الرياح التقليدية يواجه تحديات تقنية وبيئية متعددة، من بينها الضوضاء، وتعقيد الصيانة، والتأثيرات على النظم البيئية، إضافة إلى محدودية كفاءتها في البيئات ذات الرياح منخفضة السرعة أو المتقطعة.(IEA, 2024) .

في هذا السياق، برزت توجهات بحثية حديثة نحو تطوير تقنيات بديلة تستغل الطاقة الحركية للرياح بآليات غير تقليدية، من أهمها توليد الطاقة عبر ظاهرة الرنين الهوائي المعتمدة على دوامات فون كارمان، تنشأ هذه الظاهرة عندما يتدفق الهواء حول جسم أسطواني أو غير انسيابي، مما يؤدي إلى تكوين دوامات متناوبة تسبب اهتزازات دورية في الجسم. وعندما يتوافق تردد هذه الاهتزازات مع التردد الطبيعي للهيكل تحدث ظاهرة الرنين، والتي يمكن استغلالها لتحويل الطاقة الميكانيكية الناتجة إلى طاقة كهربائية بكفاءة مناسبة.

وقد شهدت هذه التقنية اهتمامًا متزايدًا في السنوات الأخيرة، خاصة مع ظهور نماذج عملية مثل أجهزة "الرياح الاهتزازية(Vortex-Induced Vibration Wind Energy Devices) "، التي تعتمد على تقليل الأجزاء الدوارة، مما يسهم في خفض تكاليف الصيانة وتقليل الضوضاء وتحسين التوافق البيئي(Zhao et al., 2022 ؛ Li & Chen, 2023) كما تشير دراسات حديثة إلى أن هذه الأنظمة قد تكون أكثر ملاءمة للتطبيق في المدن، وعلى أسطح المباني، وفي البيئات التي لا تناسبها التوربينات التقليدية.(IEA Wind TCP, 2023)

علاوة على ذلك، فإن التطور في مواد الهندسة الذكية وتقنيات التحويل الكهروميكانيكي، مثل استخدام المواد الكهرضغطية (Piezoelectric Materials) ، قد ساهم في تحسين كفاءة تحويل الاهتزازات إلى طاقة كهربائية، مما يعزز من الجدوى الاقتصادية لهذه التقنية .(Wang et al., 2024)، كما أن دمج هذه الأنظمة مع الشبكات الذكية وأنظمة تخزين الطاقة يفتح آفاقًا جديدة لاستخدامها كمصدر طاقة مكمل ومستدام.

قدّم Pandey et al. (2025) دراسة حول نظام لتوليد الطاقة الكهربائية من الرياح يعتمد على ظاهرة اهتزازات الدوامات الهوائية (Vortex-Induced Vibrations) التي تنشأ عند مرور الرياح حول جسم أسطواني، يعتمد النظام على مبدأ التوافق بين تردد الدوامات الهوائية والتردد الطبيعي للجسم، وهي الظاهرة المعروفة باسم Lock-in، والتي تؤدي إلى حدوث رنين يزيد من سعة الاهتزازات، يتم بعد ذلك تحويل هذه الاهتزازات إلى طاقة كهربائية بواسطة مولد مناسب، وقد أظهرت النتائج أن هذا النظام يمكن أن يشكل بديلاً واعداً للتوربينات الهوائية التقليدية، خاصة في التطبيقات التي تتطلب أجهزة بسيطة وقليلة الصيانة.

بناءً على ما سبق، تهدف هذه الورقة إلى تصميم وتنفيذ نموذج تجريبي لتوليد الطاقة الكهربائية باستخدام ظاهرة الرنين الهوائي، مع دراسة الأداء والكفاءة تحت ظروف تشغيل مختلفة، كما تسعى إلى تقييم إمكانية اعتماد هذه التقنية كبديل أو مكمل لتوربينات الرياح التقليدية، خاصة في المناطق الحضرية والبيئات ذات الرياح المتغيرة، بما يسهم في دعم التحول نحو منظومة طاقة أكثر استدامة ومرونة.

ثانيًا: النموذج الرياضي

1-معادلة الحركة.

يمكن تمثيل حركة العمود المهتز بالمعادلة التفاضلية التالية:

$$F_{L(t)} = k_{y(t)} + cy_{(t)}^{\cdot} + my_{(t)}^{\cdot\cdot} \quad \rightarrow 1$$

حيث إن:

m : كتلة المكافئة.

c: معامل التخميد.

k : الصلابة المكافئة.

F_l : قوة الرفع الناتجة عن انفصال الدوامات.

2-التردد الطبيعي والصلابة.

$$w_n = 3.516\sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad \rightarrow 2$$

حيث إن:

w_n: التردد الزاوي الطبيعي (rad\s).

E: معامل يونغ مقياس الصلابة المادة (Pa).

I : العزم الثاني للمساحة يعتمد على شكل المقطع.

m : الكتلة الجسم (Kg).

L : الطول(m).

3- تردد الدوامات.

$$fv = \frac{st.U}{D} w_v = 2\pi f \quad \rightarrow \quad 3$$

حيث إن:

w_v : التردد الزاوي للدوامات (rad\s).

f_v : ترددا لدوامات (Hz).

St: عدد ستروهال يعتمد علي شكل الجسم والجريان قيمته غالبًا= 0.2 للأجسام الاسطوانية.

U :سرعة الجريان (هواء \ سائل) (m\s).

D: القطر أو البعد المميز للجسم.

4-سعة الاهتزاز.

$$Y = \frac{1}{\sqrt{(2\xi r)^2 + (r^2 - 1)^2}} . \frac{F_L}{k} \quad \rightarrow \quad 4$$

حيث إن:

$$r = \frac{w_v}{w_n} \quad \rightarrow \quad 5$$

حيث إن:

Y : سعة الاهتزاز (m).

ξ : نسبة التخميد.

r: نسبة التردد.

F: القوة المؤثرة (N).

k: الصلابة المكافئة (N\m).

w_n : التردد الزاوي الطبيعي (rad\s).

w_v : التردد الزاوي للدوامات (rad\s).

5-نموذج توليد الطاقة البيزوإلكتريكية:

تعتمد القدرة الكهربائية المتولدة على السرعة الاهتزازية ويمكن التعبير عنها بالعلاقة التقريبية التالية:

$$P = \mu_p (w.Y)^2 \quad \rightarrow \quad 6$$

حيث إن:

P : القدرة Power (بالوات).

μ_p : معامل الكفاءة الكهروضغطي.

w : التردد الزاوي (rad\s).

Y : السعة الاهتزاز الميكانيكي.

تم تحويل المعادلات الرياضية السابقة إلى خوارزمية عددية باستخدام برنامج MATLAB حيث تم إدخال المتغيرات الفيزيائية والهندسية للنظام، ثم حساب الاستجابة الاهتزازية والقدرة المتولدة عبر نطاق واسع من سرعات الرياح، كما تم إجراء دراسة بارامترية لتقييم تأثير نوع المادة، قطر العمود، وسماكته على الأداء الديناميكي للنظام.

تبدأ الخوارزمية بتحديد خصائص المادة والأبعاد الهندسية، ثم حساب التردد الطبيعي والصلابة المكافئة، بعدها يتم حساب تردد الدوامات عند كل سرعة رياح، في المرحلة التالية تُحسب سعة الاهتزاز والقدرة الكهربائية المتولدة، وأخيرًا تُعرض النتائج على شكل رسوم بيانية.

ثالثًا: المواد المستخدمة ومعايير المقارنة:

في إطار الدراسة البارامترية للنظام المقترح، تم اختيار ثلاث مواد إنشائية تختلف فيما بينها اختلافًا كبيرًا في الخصائص الميكانيكية، وذلك قصد إبراز تأثير نوع المادة على السلوك الديناميكي للعمود المهتز وقدرته على توليد الطاقة، وتمثل هذه المواد نطاقًا واسعًا من الصلابة والكثافة ونسبة التخميد، مما يسمح بإجراء مقارنة شاملة بين مواد صلبة، متوسطة، ومرنة، وهي كما يلي:

1-الألياف الزجاجية (Fiberglass – GFRP)

تُعد مادة الألياف الزجاجية من أكثر المواد استخدامًا في التطبيقات الهندسية المتعلقة بالأعمدة والهياكل الخفيفة، نظرًا لتوازن خصائصها الميكانيكية بين الصلابة والوزن، تتميز هذه المادة بمعامل مرونة متوسط وكثافة معتدلة، مما يجعلها مرجعًا مناسبًا للمقارنة مع باقي المواد المدروسة.

2-ألياف الكربون (Carbon Fiber – CFRP):

تتميز ألياف الكربون بمعامل مرونة مرتفع جدًا مقارنة بكتلتها، وهو ما يؤدي إلى زيادة التردد الطبيعي للعمود، يُتوقع أن تُظهر هذه المادة سلوكًا ديناميكيًا يتمثل في حدوث الرنين عند سرعات رياح مرتفعة، إضافة إلى سعة اهتزاز أقل نسبيًا نتيجة صلابتها العالية.

3-البوليمر عالي الكثافة (HDPE):

تُعد مادة الـ HDPE مادة مرنة نسبيًا ذات معامل مرونة منخفض وكثافة صغيرة، مما يؤدي إلى انخفاض التردد الطبيعي للعمود، ويجعلها ذلك مناسبة للتطبيقات التي تعمل عند سرعات رياح منخفضة؛ حيث يُتوقع حدوث الرنين عند قيم أقل من سرعة الرياح مقارنة بالمواد الأخرى (Schrader & Jean,1988).

إن هذا التنوع في الخصائص الميكانيكية للمواد المختارة يتيح تحليل التأثير المباشر لمعامل المرونة والكثافة ونسبة التخميد على سعة الاهتزاز وسرعة الرنين والقدرة الكهربائية المتولدة.

رابعًا: النتائج ومناقشتها:

النتائج المستخلصة من المحاكاة العددية للنموذج الرياضي الذي تم تطويره، وذلك باستخدام برنامج MATLAB. تتمثل في تحليل الاستجابة الديناميكية للعمود المهتز تحت تأثير الاهتزازات الناتجة عن انفصال الدوامات، ومعرفة مدى تأثير المتغيرات الفيزيائية والهندسية المختلفة، مثل نوع المادة وقطر العمود وسماكته، على سعة الاهتزاز والقدرة الكهربائية المتولدة، ودراسة هذه النتائج وربطها بالجوانب الفيزيائية للنظام المستخدم.

1- تأثير نوع المادة على سرعة الرنين الحرجة.

تُظهر النتائج الواردة في الجدول (1) أن سرعة الرنين الحرجة تختلف اختلافًا واضحًا باختلاف نوع المادة، حتى عند ثبات الأبعاد الهندسية، وشملت الدراسة تأثير كل من قطر العمود D وسماكته tعلى سرعة الرنين الحرجة والقدرة الكهربائية العظمى المتولدة.

الجدول (1) سرعة الرنين الحرجة

New to MATLAB? See resources for Getting Started.

PARAMETRIC STUDY RESULTS

Material	D(m)	t(m)	Crit.Speed	Max Power
Fiberglass (GFRP)	0.10	0.002	1.60	0.04
Fiberglass (GFRP)	0.10	0.004	0.00	0.00
Fiberglass (GFRP)	0.10	0.006	0.00	0.00
Fiberglass (GFRP)	0.15	0.002	3.60	0.55
Fiberglass (GFRP)	0.15	0.004	3.50	0.12
Fiberglass (GFRP)	0.15	0.006	3.50	0.04
Fiberglass (GFRP)	0.20	0.002	6.40	3.00
Fiberglass (GFRP)	0.20	0.004	6.30	0.74
Fiberglass (GFRP)	0.20	0.006	6.20	0.32
Carbon Fiber (CFRP)	0.10	0.002	4.10	1.61
Carbon Fiber (CFRP)	0.10	0.004	4.00	0.37
Carbon Fiber (CFRP)	0.10	0.006	3.90	0.12
Carbon Fiber (CFRP)	0.15	0.002	9.30	16.74
Carbon Fiber (CFRP)	0.15	0.004	9.10	3.67
Carbon Fiber (CFRP)	0.15	0.006	9.00	1.86
Carbon Fiber (CFRP)	0.20	0.002	16.70	102.88
Carbon Fiber (CFRP)	0.20	0.004	16.40	25.73
Carbon Fiber (CFRP)	0.20	0.006	16.20	11.59
Polymer (HDPE)	0.10	0.002	0.50	0.00
Polymer (HDPE)	0.10	0.004	0.00	0.00
Polymer (HDPE)	0.10	0.006	0.00	0.00
Polymer (HDPE)	0.15	0.002	1.10	0.05
Polymer (HDPE)	0.15	0.004	1.10	0.01
Polymer (HDPE)	0.15	0.006	1.10	0.00

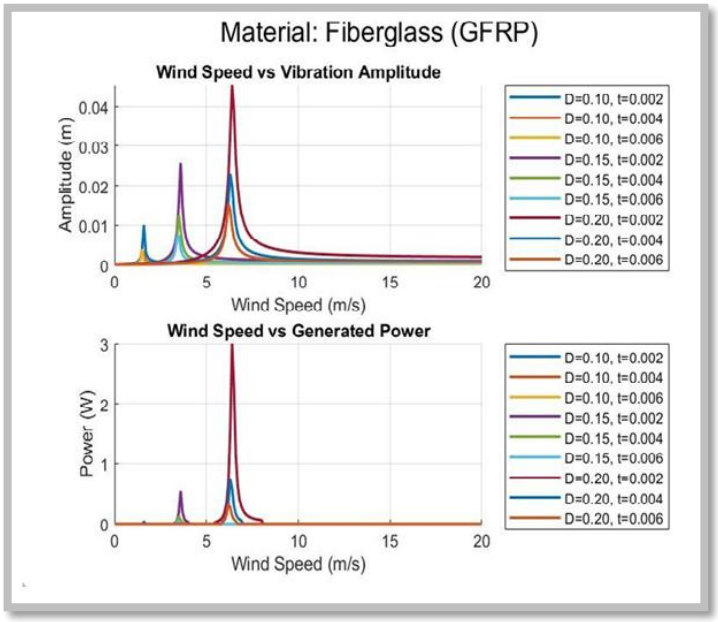
```
Polymer (HDPE)        | 0.20      | 0.004     | 2.00          | 0.05
Polymer (HDPE)        | 0.20      | 0.006     | 1.90          | 0.03

✔ Simulation Finished Successfully
```

المصدر: من النتائج المتحصل عليها من استخدام برنامج (MATLAB)

حيث أظهرت النتائج أن مادة الألياف الزجاجية (GFRP) هي الأفضل عند مقارنها بألياف الكربون (Carbon Fiber – CFRP) والبوليمر عالي الكثافة (HDPE) خاصة سرعات رنين متوسطة تراوحت بين $1.60m\backslash s$ و$6.40m\backslash s$وهو ما يعكس خصائصها الميكانيكية المتوازنة من حيث الصلابة والكثافة كما موضح بالشكل (1).

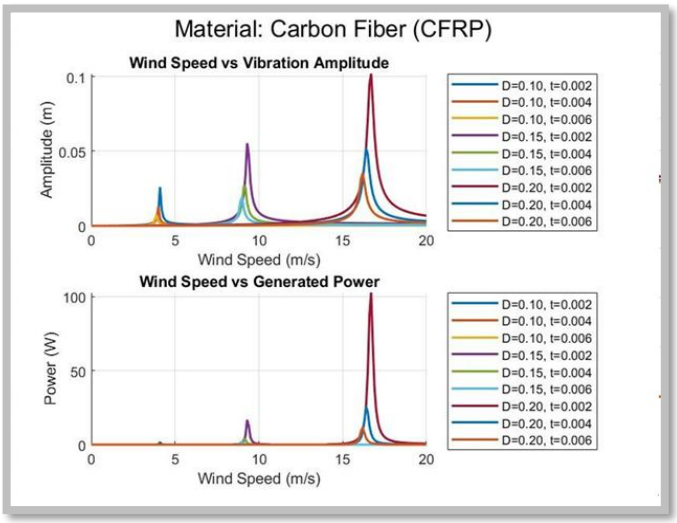
الشكل (1) سرعات رنين في حالة مادة الألياف الزجاجية (GFRP).



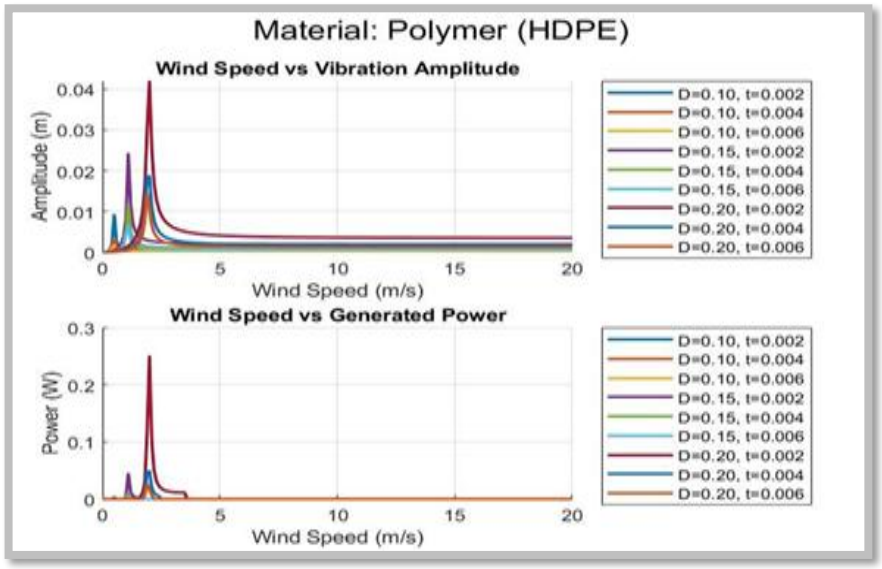
المصدر: من النتائج المتحصل عليها من استخدام برنامج (MATLAB)

أما مادة ألياف الكربون (CFRP) فقد سجلت أعلى سرعات رنين؛ حيث بلغت قيمتها العظمى حوالي $16.70m\backslash s$ نتيجة ارتفاع معامل المرونة وانخفاض الكتلة النوعية، مما يؤدي إلى زيادة التردد الطبيعي للعمود كما موضح بالشكل (2).

الشكل (2) سرعات رنين في حالة مادة ألياف الكربون (CFRP)



الشكل (3) سرعات رنين في حالة مادة البوليمر (HDPE).



المصدر: من النتائج المتحصل عليها من استخدام برنامج (MATLAB)

وكذلك سُجّلت أقل سرعات رنين في حالة مادة البوليمر (HDPE)؛ إذ تراوحت بين $0.50m\backslash s$ و $1.10m\backslash s$، ويُعزى ذلك إلى انخفاض معامل المرونة لهذه المادة مما يؤدي إلى انخفاض التردد الطبيعي كما بالشكل (3).

2- تأثير القطر والسماكة على سرعة الرنين:

تشير النتائج إلى أن زيادة قطر العمود D تؤدي إلى ارتفاع سرعة الرنين الحرجة لجميع المواد المدروسة، وهو ما يُلاحظ بوضوح عند الانتقال من $D = 0.10m$ إلى $D = 0.20m$. وكما يُلاحظ أن زيادة السماكة t تؤدي في معظم الحالات إلى انخفاض القدرة المتولدة مع تغير طفيف في سرعة الرنين، وذلك بسبب زيادة الصلابة والكتلة، مما يقلل من سعة الاهتزاز عند الرنين.

عند مقارنة المواد الثلاث، يمكن استخلاص ما يلي:

CFRP: أعلى سرعة رنين وأكبر قدرة متولدة، مناسب للتطبيقات ذات سرعات الرياح العالية.

GFRP: أداء متوازن، مناسب للتطبيقات متوسطة السرعة والتكلفة.

HDPE: يعمل عند سرعات منخفضة جدًا؛ لكن بقدرة محدودة، مما يجعله أقل كفاءة لتوليد الطاقة.

1- **تحليل تكلفة دورة الحياة (Life-Cycle Cost).**

عند النظر إلى المدى الطويل (50–100 سنة)، تتغير الكفة لصالح المواد المركبة (الألياف) في بيئات معينة، والخرسانة والفولاذ يتطلبان صيانة دورية باهظة (دهانات حماية، ترميم من الصدأ، معالجة تشققات)، في البيئات البحرية، قد يحتاج الفولاذ إلى استبدال أو ترميم جذري كل 15–20 سنة.

الألياف الزجاجية والكربون: تتميز بمقاومة مطلقة للتآكل والكيميائيات، تشير الدراسات إلى أن استخدام ألياف الزجاج في الجسور قد يقلل تكلفة "دورة الحياة" بنسبة تصل إلى 40% مقارنة بالفولاذ التقليدي بسبب انعدام الصيانة تقريباً.

2- **الجدوى الاقتصادية المرتبطة بالوزن والتركيب.**

الوزن: ألياف الكربون والزجاج أخف من الفولاذ بنسبة تصل إلى 75%.

الأثر الاقتصادي: توفير ضخم في تكاليف النقل، الحاجة إلى رافعات أصغر، وقواعد خرسانية أقل ضخامة (لأن المبنى نفسه أخف).

سرعة التنفيذ: المواد البوليمرية والألياف غالباً ما تأتي مسبقة الصب، مما يقلل من تكلفة العمالة الزمنية في الموقع بنسبة كبيرة، وسبب وجود ثلاث قمم رنين (Three Resonance Peaks) منفصلة ومتباعدة في الرسم هو أن الكود قام بمحاكاة ثلاثة أقطار مختلفة (Diameters) للعمود.

3- **مقارنة اقتصادية بين الألياف الزجاجية وألياف الكربون والبوليمر وفولاذ إنشائي وخرسانة:**

أ- المقارنة من حيث التكلفة الأولية (Initial Cost)

هنا يتفوق الفولاذ والخرسانة بوضوح؛ حيث يمثلان الخيار الأرخص عند الشراء والبناء لأول مرة.

جداول (2) المقارنة من حيث التكلفة الأولية (Initial Cost)

المادة	التكلفة الأولية	السبب
الخرسانة	منخفضة جدا	توفر المواد الخام محليًا وسهولة التصنيع
الفولاذ الإنشائي	منخفضة إلى متوسطة	إنتاج واسع النطاق ولكنه يتأثر بأسعار السوق العالمية للمعادن
الألياف الزجاجية (GFRP)	متوسطة	أغلى من الفولاذ بنسبة 25%إلى 50%في المتوسط
البوليمر (غير المدعم)	متوسطة	تعتمد على نوع الراتنج المستخدم وتكاليف القولبة
ألياف الكربون (CFRP)	عالية جدًا	عمليات تصنيع معقدة واستهلاك عالي للطاقة في الإنتاج

المصدر: من النتائج المتحصل عليها من استخدام برنامج (MATLAB)

الأثر الاقتصادي: توفير ضخم في تكاليف النقل، الحاجة إلى رافعات أصغر، وقواعد خرسانية أقل ضخامة (لأن المبنى نفسه أخف).

سرعة التنفيذ: المواد البوليمرية والألياف غالباً ما تأتي مسبقة الصب، مما يقلل من تكلفة العمالة الزمنية في الموقع بنسبة كبيرة.

ب-ملخص المقارنة الاقتصادية

جداول (3) المقارنة الاقتصادية

المعيار	الخرسانة	الفولاذ	ألياف الزجاج	ألياف الكربون
سعر المادة	أرخص خيار	رخيص	مرتفع	باهظ جدًا
تكلفة الصيانة	عالية (تشققات)	عالية (صدا)	منخفضة جدًا	منخفضة جدًا
العمر الافتراضي	30-50 سنة	50 سنة (مع صيانة)	80+سنة	100+سنة
أفضل استخدام	المباني العادية	الهياكل الكبيرة	البيئات الكيميائية \البحرية	الطيران \السيارات الفاخرة

المصدر: من النتائج المتحصل عليها من استخدام برنامج (MATLAB)

خامسًا: القدرة الكهربائية المتولدة:

تبين النتائج أن القدرة الكهربائية المتولدة تعتمد بشكل كبير على كل من نوع المادة والأبعاد الهندسية، بالنسبة لمادة الألياف الزجاجية (GFRP)، تراوحت القدرة القصوى بين $0.04W$ و $3.00W$ حيث تحققت أعلى قيمة عند القطر الأكبر $D = 0.20m$ والسماكة الأدنى $t = 0.002m$ كما بالشكل (5)، أما مادة ألياف الكربون (CFRP) فقد أظهرت تفوقًا ملحوظًا في القدرة المتولدة؛ حيث بلغت القدرة القصوى حوالي $102.88W$ عند $D = 0.20m$ و $t = 0.002m$ وهو ما يعكس تأثير الصلابة العالية التي تؤدي إلى تضخيم الاهتزازات عند الرنين كما بالشكل (6)، في المقابل سجلت مادة البوليمر (HDPE) قدرات منخفضة جدًا، لا تتجاوز $0.05W$ رغم حدوث الرنين عند سرعات رياح منخفضة، ويُعزى ذلك إلى شدة التخميد وضعف نقل الطاقة الميكانيكية كما بالشكل (7).

سادسًا: الخلاصة:

تُعدّ طاقة الرياح من المصادر المتجددة الواعدة، وتسعى الأبحاث الحديثة إلى تطوير تقنيات بديلة أكثر كفاءة من التوربينات التقليدية، من بين هذه التقنيات، يبرز استخدام ظاهرة انفصال الدوامات لتوليد الطاقة عبر الاهتزازات واستغلالها بوسائل مثل المواد الكهرضغطية، تستعرض هذه الدراسة نموذجًا رياضيًا وتحليلًا عدديًا لفهم سلوك هذا النظام وتقييم كفاءته في التطبيقات الصغيرة كما موضح في الآتي:

1. تطوير نموذج رياضي لظاهرة الاهتزازات الناتجة عن انفصال الدوامات، مع اقتراح آلية لتوليد الطاقة البيزوإلكتريكية، كما تم اعتماد المحاكاة العددية باستخدام برنامج (MATLB) لتحليل استجابة النظام ودراسة تأثير المتغيرات المختلفة، مما يمهّد لعرض النتائج.
2. أظهرت الدراسة البارامترية أن أداء نظام توليد الطاقة باستخدام ظاهرة انفصال الدوامات يعتمد بشكل أساسي على خصائص المادة والأبعاد الهندسية للعمود وتبين أن اختيار مادة ذات معامل مرونة مرتفع وكتلة منخفضة، مع قطر كبير وسماكة صغيرة نسبيًا، يؤدي إلى تحقيق أعلى قدرة متولدة مع قطر كبير وسماكة صغيرة نسبيًا، يؤدي إلى تحقيق أعلى قدرة كهربائية عند الرنين، كما تؤكد النتائج أن ظاهرة الرنين لا تحدث بنفس الشدة لجميع الحالات، بل تتأثر بشدة بالتخميد والتوافق الترددي بين النظام والإثارة الهوائية.

3- من خلال المحاكاة العددية باستخدام (MATLB) تبيّن أن تكلفة إنتاج الطاقة الكهربائية من طاقة الرياح بالرنين منخفضة.

سابعًا: التوصيات:

1. إجراء المزيد من الدراسات التجريبية حول استخدام ظاهرة الرنين في توليد الطاقة الكهربائية من الرياح، وذلك لتحديد أفضل التصاميم التي تحقق أعلى كفاءة في تحويل الطاقة.
2. إجراء مقارنات علمية بين أنظمة التوربينات الهوائية التقليدية وأنظمة التوليد المعتمدة على الرنين من حيث الكفاءة والتكلفة والصيانة.
3. دعم التعاون بين الجامعات ومراكز البحث العلمي لتطوير تقنيات جديدة في مجال استغلال طاقة الرياح بطرق مبتكرة تعتمد على الرنين والاهتزازات الهوائية.

4 استخدام مواد حديثة مثل الألياف الزجاجية وألياف الكربون والمواد الكهروضغطية لتحسين كفاءة تحويل الاهتزازات الميكانيكية إلى طاقة كهربائية.

ثامناً: المراجع:

1- Schrader, D. M., & Jean, Y. C. (1988). Positron and positronium chemistry. Amsterdam, Netherlands: Elsevier.

2-Pandey, A., Kumar, S., & Sharma, R. (2025). VIVWPGEN: Vortex-induced vibration wind power generation. Power System Technology Journal, 49(2), 115–123

3-International Energy Agency (IEA) (2024). *Renewables 2024 Report*.

4-IEA Wind TCP (2023). *Innovation in Wind Energy Technologies*.

5-Zhao, Y., et al. (2022). *Vortex-induced vibration for wind energy harvesting: A review*. Renewable Energy Journal.

6-Li, X., & Chen, H. (2023). *Recent advances in bladeless wind energy systems*. Energy Conversion and Management.

7-Wang, J., et al. (2024). *Piezoelectric energy harvesting from flow-induced vibrations*. Applied Energy Journal.