



الجمهورية الجزائرية

الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا لأساتذة التعليم التكنولوجي - سكيكدة-



قسم التكنولوجيا

التخصص: هندسة الطرائق

مذكرة التخرج لنيل شهادة أستاذ التعليم الثانوي

تحضير مواد مضادة لإلتصاق الغبار والأتربة على سطح ألواح الطاقة
الشمسية

السنة الجامعية 2025/2024

من اعداد:

- شنية عبد القادر
- شينور صلاح الدين

الصفة
رئيس
مشرف
مناقش

الرتبة
Pr
Pr
MCA

أعضاء اللجنة
خريف نصر الدين عبد المالك
بن جفال حسان
علوي منال

شكر و عرفان

بسم الله الرحمن الرحيم والصلاة والسلام على أشرف الأنبياء والمرسلين سيدنا وحبيبنا
محمد عليه أفضل السلة والتعليم

الحمد لله حمداً كثيراً على تيسيره لنا في انجاز هذا العمل وتوفيقه لنا في إتمامه

كل التقدير والاحترام أستاذنا الفاضل وقُدوتنا البروفيسور "بن جمال حسان" نظير كل الجهود التي بذلتها من أجلنا في التوجيه والترشيد والمتابعة المتواصلة على عملنا هذا، وهذا إن دل على شيء، فإنما يدل على تفانيك في العمل والرغبة الشديدة في إخراج نخبة من الباحثين الذين يعول عليهم مستقبلاً فكنة حقاً نعمة الأستاذ ونعم الأخ أستاذنا العزيز.

كما يسعدنا أن نتوجه بخالص الشكر والعرفان إلى العائلة التي احتضنتنا داخل الحرم الجامعي، ممثلة في إدارة قسم التكنولوجيا، التي لم تخنر جهداً في دعم الطلبة ومساندتهم في مختلف الظروف. وأخص بالذكر رئيس قسم التكنولوجيا، الأستاذ "رحموني صالح"، الذي كان لنا نعم الأخ والصديق، ولم يبخل علينا بعطائه وتوجيهاته، سواء في ما يتعلق بشؤون الجامعة أو حتى فيما يتجاوزها، فله منا أصدق عبارات الشكر والتقدير.

إلى زملاء الدراسة الذين رافقوني طيلة خمس سنوات، تقاسمنا فيها لحظات الجهد والاجتهاد، وعبرنا خلالها تحديات العلم والحياة، أقدم أصدق عبارات الشكر والعرفان. لقد كنتم لي أكثر من مجرد زملاء، كنتم إخوة في المسار، وشركاء في الطموح، ورفاقاً في كل لحظة تعبٍ وأمل. لكل منكم أثر في رحلتي، وذكري لا تنسى في قلبي. فشكراً لصدقكم، ووقوفكم، ورفقتكم النبيلة. أسأل الله أن يوفقكم جميعاً، ويجمعنا دوماً على الخير والمحبة

وأتقدم بالشكر والعرفان إلى الأساتذة "لجنة المناقشة" الذين تحملوا عناء قراءة وتفحص المذكرة

إهداء:

الحمد لله حمدًا يليق بجلاله، حتى يبلغ الحمد منتهاه. الحمد لله حمدًا طيبًا مباركًا فيه، على ما أفاض به من توفيق وفضل، إذ منَّ عليَّ ببلوغ هذا المقام العلمي. فبعد سنوات من الدراسة، والاجتهاد، والمثابرة، كتب الله لي أن أبلغ هذا اليوم المنتظر، اليوم الذي أختتم فيه مساري الدراسي بحصولي على شهادة أستاذ التعليم الثانوي. وإذ أسطر هذه الكلمات في مستهل مذكرتي، فإنني أهدي هذا العمل المتواضع إلى كل من كان له فضل عليَّ، قريبًا كان أو بعيدًا، دعمني أو أرشدني، فلکم مني أصدق عبارات الامتنان والعرفان :

إلى والدي الغالية، وقرّة عيني، شنية رومية، صاحبة الفضل الأكبر بعد الله في بلوغي هذا المقام، فقد كانت السند الثابت والداعم الأول لي طيلة سنوات دراستي، لا تكلم ولا تملّ من العطاء والدعاء. وإلى والدي العزيز، شنية ميلود، الذي ورثت عنه حب مهنة التعليم، وكان خير قدوة ومرشد، أستلهم منه القيم، وأتعلم منه في كل تفاصيل الحياة؛ وأسأل الله أن يحفظها لي، ويطلّ في عمرها، وأن يجعلني ولدًا بارًا بها في القول والعمل.

إلى من شدّ الله بهم أزرّي، وكانوا بعد الله خير معين وسند في دربي، إخوتي الأعزاء: مصطفى، أساء، إسلام، جهاد، وشهد، الذين أحاطوني بدعائهم، ورفعوا من عزيمتي بكلماتهم، فكان لوجودهم حولي طمأنينة، ولحبهم أثر لا يقدر، فلکم مني كل المحبة والتقدير والامتنان .

إلى رفيق الدرب، وصديق العمر، صلاح شيتور، الذي تقاسمت معه سنوات الدراسة الجامعية، بجلوها ومزها، فكان خير رفيق وأوفى صديق، شددنا أزر بعضنا، وتشاركنا الطموح والتحديات. أسأل الله أن يبارك فيك، ويوفّقك في مسيرتك، ويجزيك عن صداقتك ورفقتك كل خير.

إلى كل أصدقائي الذين جمعني بهم مقاعد الدراسة، وإلى رفاق الطفولة الذين تقاسمت معهم البدايات الأولى، والذكريات التي لا تُنسى، أخص بالذكر: ش. صلاح، ط. أحمد، ر. رفيق، ب. أمين، ق. محمد، خ. بن عمر، س. أسامة، غ. إلياس، ب. أمين، ب. أكرم، ع. عادل، غ. هشام، ه. فارس، ح. أحمد، ز. طاهر .

إلى زميلاتي الذين وجدتهم في طيلة سنوات الدراسة ولم يبخل عليا من أي معونة وخص بذكر
ه.مسعودة ، ب.نور الهدى ،ح.نور الهدى

إلى كل الأساتذة الكرام الذين كان لهم شرف الإشراف على تعليمي طيلة مساري الدراسي، والذين ألهمني حب مهنة التدريس بقيمهم، وعطائهم، وصدق رسالتهم، أخص بالذكر: الأستاذ حسان بن جفال، الأستاذة عبير دربالي، الأستاذ خير الدين كرايم، الأستاذة بجزاز هجيرة، والأستاذ مزروع عبد الحليم.

شنية عبد القادر

إهداء:

الحمد لله حمدًا يليق بجلاله، حتى يبلغ الحمد منتهاه. الحمد لله حمدًا طيبًا مباركًا فيه، على ما أفاض به من توفيق وفضل، إذ منَّ عليَّ ببلوغ هذا المقام العلمي. فبعد سنوات من الدراسة، والاجتهاد، والمثابرة، كتب الله لي أن أبلغ هذا اليوم المنتظر، اليوم الذي أختتم فيه مساري الدراسي بحصولي على شهادة أستاذ التعليم الثانوي. وإذ أسطر هذه الكلمات في مستهل مذكرتي، فإني أهدي هذا العمل المتواضع إلى كل من كان له فضل عليَّ، قريبًا كان أو بعيدًا، دعمني أو أرشدني، فلکم مني أصدق عبارات الامتنان والعرفان :

إلى والدي الغالية، وقرّة عيني، هبال عائشة، صاحبة الفضل الأكبر بعد الله في بلوغي هذا المقام، فقد كانت السند الثابت والداعم الأول لي طيلة سنوات دراستي، لا تكمل ولا تملّ من العطاء والدعاء. وإلى والدي العزيز، شيتور أحمد، الذي كان خير قدوة ومرشد، أستلهم منه القيم، وأتعلم منه في كل تفاصيل الحياة؛ وأسأل الله أن يحفظهما لي، ويحلّ في عمرهما، وأن يجعلني ولنا بارًا بهما في القول والعمل.

إلى من شدّ الله بهم أزرّي، وكانوا بعد الله خير معين وسند في دربي، إخوتي الأعزاء: مسعودة، صابر، عبدالصمد، رائد الإسلام، أماني، الذين أحاطوني بدعائهم، ورفعوا من عزيمتي بكلماتهم، فكان لوجودهم حولي طمأنينة، ولحيمهم أثر لا يقدر، فلکم مني كل المحبة والتقدير والامتنان .

إلى رفيق الدرب، وصديق العمر، عبدالقادر شنية، الذي تقاسمت معه سنوات الدراسة الجامعية، بجلوها ومرّها، فكان خير رفيق وأوفى صديق، شددنا أزر بعضنا، وتشاركنا الطموح والتحديات. أسأل الله أن يبارك فيك، ويوفّقك في مسيرتك، ويجزيك عن صداقتك ورفقتك كل خير.

إلى كل أصدقائي الذين جمعني بهم مقاعد الدراسة، وإلى رفاق الطفولة الذين تقاسمت معهم البدايات الأولى، والذكريات التي لا تنسى، أخص بالذكر: ش. عبدالقادر، ط. أحمد، ر. رفيق، ب. أمين، ق. محمد، خ. بن عمر، س. أسامة، غ. إلياس، ب. أيمن، د. صلاح، ح. أحمد، ح. أمين، ب. محمد، ع. عبدالقدوس، م. إلياس، ق. يوسف، خ. خالد، ق. أحمد، ش. يونس.

إلى كل الأساتذة الكرام الذين كان لهم شرف الإشراف على تعليمي طيلة مساري الدراسي، والذين ألهمني حب مهنة التدريس بقيهم، وعطائهم، وصدق رسالتهم، أخص بالذكر: الأستاذ حسان بن جفال، الأستاذة بن جبيحة فارس، الأستاذ خير الدين كرايم، الأستاذ سايحي يوسف، والأستاذ عنقر عادل.

شيتور صلاح الدين

يُعد توليد الطاقة الكهروضوئية من التقنيات الرئيسية المعتمدة للحد من التلوث البيئي بفضل استدامته ونظافته، إلا أن تراكم الغبار على أسطح الألواح الكهروضوئية يمثل عائقاً كبيراً يؤثر سلباً على أدائها ويؤدي إلى انخفاض ملموس في كفاءة تحويل الطاقة. وللتغلب على هذا التحدي، تبرز الحاجة إلى اعتماد استراتيجيات تنظيف فعالة تساهم في استعادة الأداء الأمثل لهذه الألواح. وعلى الرغم من تعدد الدراسات التي تناولت تأثير الغبار وطرق إزالته، إلا أن معظمها يفتقر إلى تحليل شامل ومقارنة منهجية للنتائج الكمية، مما يبرز الحاجة إلى مراجعة موسعة تتناول آليات ترسيب الغبار والعوامل المؤثرة فيه، وتأثيره على أداء الألواح، بالإضافة إلى النماذج التنبؤية لفقدان الكفاءة، وطرق التنظيف المختلفة، وأنظمة مراقبة الانساخ. وفي هذا الإطار، قمنا في هذا العمل بترسيب طبقات من أكسيد الزنك المطعم بنسب مختلفة من الألومين وبسبائك متعددة باستخدام تقنية السيلار (SILAR)، و للحصول على طبقات ذات جودة عالية و خصائص ضوئية وكهربائية جيدة تم دراسة تأثير مجموعة من العوامل الفيزيوكيميائية على عملية الترسيب متمثلة في ثلاث عوامل رئيسية وهي درجة حرارة التلدين حيث اخذنا ثلاث قيم لهذا العامل ($450C^{\circ}$ و $350C^{\circ}$ و $250C^{\circ}$) أما العامل الثاني فهو عدد دورات الغمس والسحب بحيث قمنا بدراسة هذا العامل بثلاث قيم مختلفة (10 و 55 و 100) والعامل الثالث فهو نسبة الألومين الموجودة في الطبقة المرسبة وقيم النسب هي (1% و 3.5% و 6%) و هذا بالاعتماد على طريقة تصميم التجارب باستخدام نموذج Box Bhenken . حيث أظهرت النتائج المحصلة أن :

زيادة محسنة في قيمة درجة الحرارة تلدين أدت الى ارتفاع قيمة الإمتصاصية ، ولكن في حالة زيادة في قيمة عدد دورات و نسبة الألومين يؤدي الى إنخفاض قيمة الإمتصاصية، أما بنسبة للمقاومة فإن زيادة المحسنة في عامل الثلاث أدت الى إنخفاض في قيمة المقاومة. و أظهرت نتائج التجربة أن القيم المثلى التي تحقق أعلى كفاءة في الترسيب هي درجة حرارة تلدين $450C^{\circ}$ ، ونسبة ألومينوم 3.37374%، وعدد الدورات 100 دورة حيث سجلت أقصى استجابة في الامتصاصية بلغت 89.6925%، في حين سُجِّلت أعلى قيمة للمقاومة الكهربائية عند $0.0004182(\Omega \cdot cm)$.

La production d'énergie photovoltaïque est considérée comme l'une des principales technologies adoptées pour réduire la pollution environnementale en raison de sa durabilité et de sa propreté ; cependant, l'accumulation de poussière sur les surfaces des panneaux photovoltaïques représente un obstacle majeur qui affecte négativement leurs performances et entraîne une baisse notable de l'efficacité de conversion de l'énergie. Pour surmonter ce défi, il est essentiel d'adopter des stratégies de nettoyage efficaces permettant de restaurer les performances optimales de ces panneaux. Bien que de nombreuses études aient traité les effets de la poussière et les méthodes de son élimination, la plupart d'entre elles manquent d'une analyse complète et d'une comparaison systématique des résultats quantitatifs, ce qui met en évidence la nécessité d'une revue approfondie portant sur les mécanismes de dépôt de la poussière, les facteurs qui l'influencent, son impact sur les performances des panneaux, les modèles prédictifs de perte d'efficacité, les différentes méthodes de nettoyage, ainsi que les systèmes de surveillance de l'encrassement. Dans ce cadre, nous avons déposé des couches d'oxyde de zinc dopées avec différentes proportions d'aluminium et à des épaisseurs variables en utilisant la technique SILAR (Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction). Afin d'obtenir des couches de haute qualité avec de bonnes propriétés optiques et électriques, nous avons étudié l'influence de trois principaux paramètres physico-chimiques sur le processus de dépôt : la température de recuit (250 °C, 350 °C et 450 °C), le nombre de cycles d'immersion et de retrait (10, 55 et 100), et la teneur en aluminium dans la couche déposée (1 %, 3,5 % et 6 %), en utilisant une méthode de conception des expériences basée sur le modèle de Box-Behnken. Les résultats ont montré qu'une :

augmentation modérée de la température de recuit améliorait l'absorbance, tandis qu'une augmentation du nombre de cycles et de la concentration en aluminium entraînait une diminution de l'absorbance ; en parallèle, une augmentation optimisée des trois facteurs a permis une réduction significative de la résistivité. Les conditions optimales permettant d'atteindre la meilleure efficacité de dépôt ont été une température de recuit de 450 °C, une teneur en aluminium de 3,37374 % et 100 cycles, conditions sous lesquelles l'absorbance maximale enregistrée a atteint 89,6925 % et la résistivité électrique la plus basse a été de 0,0004182 Ω .cm.

Photovoltaic energy generation is considered one of the main technologies adopted to reduce environmental pollution due to its sustainability and cleanliness; however, the accumulation of dust on the surfaces of photovoltaic panels represents a significant obstacle that negatively impacts their performance and leads to a noticeable reduction in energy conversion efficiency. To overcome this challenge, it is essential to adopt effective cleaning strategies that help restore the optimal performance of these panels. Although numerous studies have addressed the effects of dust and its removal methods, most lack a comprehensive analysis and systematic comparison of quantitative results, highlighting the need for an extensive review covering dust deposition mechanisms, influencing factors, its impact on panel performance, predictive models for efficiency loss, various cleaning methods, and soiling monitoring systems. In this context, we deposited zinc oxide layers doped with different proportions of aluminum and at varying thicknesses using the SILAR (Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction) technique. To obtain high-quality layers with good optical and electrical properties, we examined the influence of three main physicochemical parameters on the deposition process: annealing temperature (250 °C, 350 °C, and 450 °C), the number of dipping and withdrawal cycles (10, 55, and 100), and the aluminum content in the deposited layer (1%, 3.5%, and 6%), using a design of experiments based on the Box-Behnken model. The results showed that :

a moderate increase in annealing temperature improved the absorptance, whereas increasing the number of cycles and aluminum concentration led to a decrease in absorptance; meanwhile, optimized increases in all three factors resulted in a reduction in resistivity. The optimal conditions for achieving the highest deposition efficiency were found to be an annealing temperature of 450 °C, an aluminum content of 3.37374%, and 100 cycles, under which the maximum absorptance recorded was 89.6925% and the lowest electrical resistivity was 0.0004182 Ω ·cm.

قائمة الأشكال		
الصفحة	العنوان	الرقم
5	دورة حياة تراكم الغبار .	1.I
6	قوى التصاق الغبار .	2.I
7	العوامل المؤثرة على ترسب الغبار على الألواح الكهروضوئية.	3.I
7	العلاقة بين هطول الأمطار وكثافة ترسب الغبار.	4.I
9	تأثير الرطوبة النسبية على كثافة ترسب الغبار .	5.I
9	مخطط تخطيطي للجسيمات ذات تأثير الرحلان الحراري؛ تمثل FT و FD و FG القوة الرحلانية الحرارية والسحب وجاذبية جسيم الغبار على التوالي.	6.I
10	تباين معدل ترسب الغبار مع حجم الجسيمات تحت سرعات الرياح المختلفة.	7.I
10	العلاقة بين معدل ترسب الغبار وحجم الجسيمات.	8.I
11	تأثير تركيز الغبار في الهواء على وزن ترسب الغبار .	9.I
12	مخطط آلية الجسيمات المشحونة على الألواح الشمسية.	10.I
12	تأثير القوة الكهروستاتيكية على كثافة ترسب الغبار .	11.I
13	معدل ترسب الغبار على الألواح الكهروضوئية المعزولة ومصفوفات الألواح الكهروضوئية .	12.I
13	معدلات ترسب الغبار لأحجام مختلفة من جسيمات الألواح الكهروضوئية عند زوايا إمالة مختلفة.	13.I
14	انخفاض نفاذية الوحدات الكهروضوئية في مواقع مختلفة في الهند .	14.I
15	انخفاض في نفاذية وحدات الطاقة الكهروضوئية بسبب عينات الغبار ذات الأشكال المختلفة.	15.I
15	الانخفاض في النفاذية الناجم عن عينات الغبار ذات الأطوال الموجية المختلفة (430 نانومتر - 710 نانومتر) في دولة الإمارات العربية المتحدة .	16.I
16	العلاقة بين انخفاض الانعكاسية وكثافة الكنتا في الصين .	17.I
16	متوسط انخفاض الانعكاسية لوحدة الطاقة الكهروضوئية في مواقع مختلفة في هوهوت، الصين.	18.I
18	توليد الطاقة من الألواح الكهروضوئية بعد 30 و 60 يوماً من تراكم الغبار في ولاية صحار بسلطنة عمان.	19.I
20	الدليل خطوة بخطوة لمذجة سلوك الناتج الكهربائي لنظام الطاقة الكهروضوئية .	20.I
22	طريقة تنظيف الغبار من الألواح الكهروضوئية.	21.I
23	التنظيف اليدوي .	22.I
23	التنظيف القائم على الماء .	23.I

24	تنظيف تدفق الهواء القسري .	24.I
24	التنظيف بالاهتزاز .	25.I
25	التنظيف بالموجات فوق الصوتية.	26.I
25	طلاء التنظيف الذاتي. (أ) طلاء شديد الكراهية للماء، (ب) طلاء شديد المحبة للماء	27.I
26	الشاشات الكهروديناميكية (EDS) .	28.I
27	روبوت التنظيف مع وحدة التجميع .	29.I
27	روبوت التنظيف بدون ماء لأنظمة الطاقة الكهروضوئية الموزعة .	30.I
28	تنظيف الطائرات بدون طيار .	31.I
36	أبعاد الطبقة المترسب.	1.II
37	مراحل تشكل و نمو طبقة رقيقة.	2.II
37	طرق ترسيب الطبقات الرقيقة.	3.II
38	التوضع الفيزيائي للطور البخاري.	4.II
38	مبدأ الإنزاع بالليزر النبضي.	5.II
39	تقنية الرش المهبطي.	6.II
39	تقنية التوضع الكيميائي للطور البخاري.	7.II
40	طريقة الترسيب بالغمر.	8.II
41	طريقة الترسيب الدورانية.	9.II
41	ترسيب الطبقات الرقيقة بتقنية السيلار.	10.II
42	مراحل آلية الترسيب بالسيلار .	11.II
47	رسم بياني توضيحي لاختبار التكيف بعامل واحد في كل مرة لنظام ثلاثي العوامل بمستويين لكل عامل.	1.III
28	مثال على شبكة عصبية ذات طبقة مخفية واحدة.	2.III
49	نمذجة عملية أو نظام.	3.III
50	مجال العوامل.	4.III
51	نمذجة سطح الاستجابة باستخدام النقاط التجريبية.	5.III
53	مخطط تصنيف نوع وزارة الطاقة.	6.III

54	مكعب يتكون من نقطة المركز ونقاط منتصف الحواف.	7.III
55	رسم تخطيطي يوضح البرنامج المصمم لوزارة الطاقة.	8.III
60	مخطط يوضح مراحل تنظيف الدعامات.	1.IV
61	بعض الأجهزة المستعملة.	2.IV
62	رسم تخطيطي يوضح مبدأ عمل مطيافية UV – Visible.	3.IV
63	مخطط يوضح عملية الترسيب بطريقة السيلار.	4.IV
63	مخطط باريتو للتأثيرات الفردية والمتداخلة.	5.IV
	منحنيات التأثيرات الرئيسية للاستجابات (Res).	6.IV
	التأثيرات التداخلية بين المستويات الدنيا والعليا لعوامل الثلاثة التي تم دراستها.	7.IV
	مخطط باريتو للتأثيرات الفردية والمتداخلة.	8.IV
	مخطط تأثيرات الرئيسية للاستجابات ل %T	9.IV
	نتائج التداخل بين العوامل المدروسة على جودة الترسيب.	10.IV
	منحنيات مدى تأثير كل عامل وتوضيح الظروف المثلى.	11.IV

قائمة الجداول		
الصفحة	العنوان	رقم
17	ملخص تأثير ترسب الغبار على إعدادات الكهربية الكهروضوئية حسب المنطقة.	1.I
21	ملخص نماذج توقع أداء الوحدات الكهروضوئية.	2.I
63	المستويات مختلفة للعوامل التي تم اختبارها في تحضير الطبقات الرقيقة لأكسيد الزنك مطعم بالألومين.	1.IV
64	قيمة المقاومة الكهربية والنفذية الضوئية.	2.IV
66	معاملات الانحدار المقدرة لتحسين جودة الترسيب.	3.IV
66	معاملات الانحدار المقدرة لتحسين جودة الترسيب.	4.IV
69	معاملات الانحدار المقدرة لتحسين جودة الترسيب.	5.IV
69	معاملات الانحدار المقدرة لتحسين جودة الترسيب.	6.IV
72	الظروف المثلى للترسيب طبقات رقيقة ذات شفافية عالية وناقلية جيدة.	7.IV
73	قيم الاستجابة Y التي تم الحصول عليها في الشروط المثلى.	8.IV
73	دراسة بين الأعمال المنجزة سابقا.	9.IV

قائمة المختصرات والرموز	
المختصرات	المعنى باللغة العربية
SHOP	طلاء فائق الكراهية للماء
SHIP	طلاء فائق المحبة للماء
UV,Vis	مطيافية الأشعة فوق البنفسجية والمرئية
PVD	التوضيع الفيزيائي للطور البخاري
ESV	التبخير تحت الفراغ
CVD	التوضيع الكيميائي للطور البخاري
PC	الرش المهبطي
LPCVD	التوضيع الكيميائي للأبخرة تحت ضغط منخفض
EDS	الشاشات الكهروديناميكية
LCVD	التوضيع الكيميائي للأبخرة بواسطة أشعة الليزر
SILAR	طريقة الغمس والسحب المتكرر
SC	الترسيب بالطرد المركزي
Sg	المحلول الهلامي
OFAT	طريقة اختبار عامل واحد في كل مرة
BBD	تصميم بوكس - بهنكن
DC	الترسيب بالغمر
BU	حوض الأمواج الصوتية
MO	فرن كهربائي
DOE	تصميم التجارب
ANOVA	طبق تحليل التباين
RN	عمليات المحاكاة
ANN	الشبكات العصبية الاصطناعية
DEM	طريقة العناصر الفردية
CFD	ديناميكا الموائع الحاسوبية
الرموز	
ϵ	الحد المتبقي.
ϵ	عدد العوامل المدروسة.
ai	المعاملات الخطية.
0a	قيمة الاستجابة في متوسط المجال .
aijk ، aij	يرمز إلى معاملات التفاعل بين العوامل المختبرة.
xk و xj و xi	المتغيرات المستقلة.

Res	القاومة الكهربائية.
T%	نسبة النفاذية الضوئية.
AI%	نسبة الألومين.
T°	درجة حرارة التلدين.
N°cyc	عدد دورات الغمس والسحب.
D	الدالة المرغوب فيها.
y	الاستجابات المتوقعة.

المخصص	
1..... المقدمة العامة	
الجزء النظري	
الفصل الأول: مشاكل تراكم الغبار على الألواح الشمسية وطرق معالجتها	
4..... 1.I المقدمة	
4..... 2.I آلية ترسب الغبار	
5..... 2.1.I توليد الغبار	
6..... 2.2.I ترسب الغبار	
7..... 3.I العوامل المؤثرة على ترسب الغبار	
7..... 1.3.I العوامل البيئية	
7..... 1.1.3.I هطول الأمطار	
8..... 2.1.3.I سرعة الرياح واتجاهها	
8..... 3.1.3.I الرطوبة النسبية	
9..... 4.1.3.I درجة الحرارة المحيطة	
10..... 2.3.I عامل الغبار	
11..... 1.2.3.I نوع الغبار	
11..... 2.2.3.I تركيز الغبار المحمول جواً	
11..... 3.2.3.I حالة شحن الغبار	
12..... 3.3.I عوامل وحدة الطاقة الكهروضوئية	
12..... 1.3.3.I طريقة التثبيت	
13..... 2.3.3.I زاوية الميل والاتجاه	
13..... 3.3.3.I مواد السطح	
14..... 4.I تأثير تراكم الغبار على كفاءة الأنظمة الكهروضوئية	
14..... 1.4.I تأثير الغبار على أداء الطاقة الكهروضوئية	
14..... 1.1.4.I تأثير الغبار على المعلمات البصرية للألواح الكهروضوئية	
16..... 2.1.4.I تأثير الغبار على المعلمات الكهربائية للطاقة الكهروضوئية	
19..... 3.1.4.I تأثير الغبار على المعلمات الحرارية للطاقة الكهروضوئية	
21..... 2.4.I نماذج التنبؤ بأداء الطاقة الكهروضوئية	
21..... 5.I طرق تنظيف ترسب الغبار	
22..... 1.5.I التنظيف الطبيعي	
22..... 2.5.I التنظيف اليدوي	
23..... 3.5.I التنظيف باستخدام الماء	
23..... 4.5.I تنظيف تدفق الهواء القسري	
24..... 5.5.I التنظيف بالاهتزاز	
24..... 6.5.I التنظيف بالموجات فوق الصوتية	
25..... 7.5.I طلاء التنظيف الذاتي	
25..... 1.7.5.I طلاء فائق الكراهية للماء (SHOP)	
25..... 2.7.5.I الطلاء فائق المحبة للماء (SHIP)	
26..... 3.7.5.I الشاشات الكهروديناميكية (EDS)	

26	.....8.5.I. التنظيف الذكي
26	.....1.8.5.I. التنظيف باستخدام الروبوت
28	.....6.I. الخاتمة
29	..... قائمة المراجع:
	<u>الفصل الثاني: طرق تحضير الطبقات الرقيقة والعوامل المؤثرة عليها</u>
36	.....1.II. الطبقات الرقيقة
36	.....2.II. مبدأ ترسيب الطبقات الرقيقة
36	.....3.II. مراحل تشكيل الطبقات الرقيقة
36	.....1.3.II. مرحلة الترسيب Nucléations
36	.....2.3.II. مرحلة الإلتحام Coalescence
37	.....3.3.II. مرحلة النمو Croissance
37	.....4.II. تقنيات ترسيب الطبقات الرقيقة
37	.....1.4.II. الطرق الفيزيائية
38	.....1.1.4.II. التوضع الفيزيائي للطور البخاري (PVD)
38	.....1.1.1.4.II. التبخير تحت الفراغ (ESV)
38	.....2.1.1.4.II. الانتزاع بالليزر
39	.....3.1.1.4.II. الرش المهبطي (Pulviritation cathodique)
39	.....2.4.II. الطرق الكيميائية
39	.....1.2.4.II. التوضع الكيميائي للطور البخاري (CVD)
40	.....1.1.2.4.II. التوضع الكيميائي للأبخرة تحت ضغط منخفض (LPCVD)
40	.....3.1.2.4.II. التوضع الكيميائي للأبخرة بواسطة الليزر (LCVD)
40	.....2.2.4.II. هلام-سائل (Sol-Gel)
40	.....1.2.2.4.II. الترسيب بالغمر (dip-Coating)
40	.....2.2.2.4.II. الترسيب بالطرد المركزي spin-Coating
41	.....3.2.4.II. الترسيب بالغمس والسحب (السيالار SILAR)
42	.....5.II. العوامل المؤثرة على الترسيب بطريقة سيالار
42	.....1.5.II. درجة حرارة التحضير :
42	.....2.5.II. عدد دورات الترسيب :
43	.....3.5.II. زمن الغمر في كل محلول
43	.....4.5.II. تركيز المحاليل ونسبة Al:Zn
43	.....5.5.II. درجة الحموضة (pH) للمحاليل :
44	.....6.5.II. نوع الركيزة :
45	..... قائمة المراجع :
	<u>الفصل الثالث: طرق تحسين عمليات الإزالة</u>
46	.....1.III. مقدمة
46	.....2.III. العوامل المؤثرة على الامتصاص
46	.....3.III. صعوبات في تحسين عمليات الإزالة
47	.....4.III. طريقة عامل واحد في كل مرة
47	.....1.4.III. المزايا

47	..... 2.4.III العيوب
48	..... 5.III طرق تحسين الشبكات العصبية
49	..... 1.5.III فوائد
49	..... 6.III الخطة التجريبية
49	..... 1.6.III المقدمة ونطاق الاستخدام
49	..... 2.6.III تصنيف التصميم التجريبي
49	..... 3.6.III شروط التصميم التجريبي
50	..... 4.6.III تاريخ التصميم التجريبي
50	..... 5.6.III مصطلحات التصميم التجريبي
50	..... 1.5.6.III عامل
50	..... 2.5.6.III مستوى العامل
50	..... 3.5.6.III تفاعل العوامل
50	..... 4.5.6.III الإجابات
51	..... 5.5.6.III أبعاد
51	..... 6.5.6.III مصفوفة تجريبية
51	..... 7.5.6.III المتغيرات الموحدة والمتغيرات المشفرة
51	..... 8.5.6.III سطح الاستجابة
51	..... 9.5.6.III خطأ عشوائي
52	..... 6.6.III النمذجة الرياضية
52	..... 7.6.III مبدأ
52	..... 8.6.III أنواع التصاميم التجريبية الإحصائية
53	..... 1.8.6.III مخططات سطح الاستجابة القياسية
53	..... 1.1.8.6.III تصميم عاملي كامل
53	..... 2.1.8.6.III التصاميم العاملة الكسرية
54	..... 3.1.8.6.III بوكس-بينكن (BBD)
55	..... 9.6.III التطبيقات
55	..... 1.9.6.III التطبيق في الكيمياء:
55	..... 10.6.III البرمجيات المستخدمة
55	..... 11.6.III وجهات النظر والمناهج المنهجية
56	..... 7.III خاتمة
57	..... قائمة المراجع:

الجانب التطبيقي

الفصل الرابع: تحضير طبقات من أكسيد الزنك مطعم الألومين ودراسة خصائصه

60	..... 1.IV تمهيد
60	..... 2.IV تنظيف الدعائم (الركائز)
60	..... 3.IV المحاليل والوسائل المستعملة
60	..... 1.3.IV المحاليل المستعملة
61	..... 2.3.III الوسائل والأجهزة المستعملة
62	..... 4.IV ترسيب الطبقات الرقيقة

63	5.IV. تصميم التجارب.....
63	1.5.IV. برامج تصميم التجارب:.....
63	1.1.5.IV. عرض برنامج Minitab :.....
63	6.IV. تحليل النتائج.....
63	1.6.IV. اختيار نموذج التحسين.....
64	2.6.IV. تصميم نموذج بوكس-هينكن الكامل.....
65	3.6.IV. تأثير عوامل التجربة على المقاومة الكهربائية للطبقات المحضرة.....
65	1.3.6.IV. تحديد التأثيرات والمعاملات الهامة للنموذج.....
67	2.3.6.IV. مخطط باريتو.....
67	3.3.6.IV. تأثير العوامل الفردية الرئيسية على خصائص المقاومة الكهربائية للطبقات المدروسة.....
68	4.3.6.IV. آثار التداخل بين العوامل المدروسة.....
68	4.6.IV. تأثير عوامل التجربة على النفاذية الضوئية للطبقات المحضرة.....
68	1.4.6.IV. تحديد التأثيرات والمعاملات الهامة للنموذج.....
70	4.2.6.IV. مخطط باريتو.....
71	3.4.6.IV. تأثير العوامل الفردية الرئيسية على خصائص النفاذية الضوئية للطبقات المدروسة.....
71	4.4.6.IV. آثار التداخل بين العوامل المدروسة.....
72	5.6.IV. تحديد الظروف المثلى.....
73	7.IV. تحسين الإستجابة.....
73	8.IV. دراسة مقارنة بين الأعمال منجزة سابقا.....
75	قائمة المراجع.....
76	خاتمة عامة.....

مع التزايد السريع في عدد سكان العالم، تصاعدت الحاجة إلى الطاقة والاعتماد على مواردها بشكل غير مسبوق. غير أن وتيرة الاستهلاك الحالية أدت إلى اقتراب معظم احتياطات الوقود الأحفوري من النفاذ [1]. إلى جانب ذلك، يُسهم احتراق هذه الموارد التقليدية في انبعاث ملوثات ضارة مثل PM10 وPM2.5 وNO_x [2]، ما يشكل تهديدًا مباشرًا للصحة الجسدية والعقلية. ونتيجة لذلك، أصبح التحول نحو مصادر الطاقة المتجددة أمرًا ضروريًا لا محالة. [3]

تُعد الطاقة الكهروضوئية إحدى أبرز حلول الطاقة المتجددة، لما توفره من بديل نظيف ومستدام، قادر على تقليص الانبعاثات الضارة وتلبية الطلب العالمي المتزايد على الطاقة [4]. ووفقًا لتقارير الوكالة الدولية للطاقة المتجددة [5]، بلغ إجمالي القدرة التراكمية لأنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية على مستوى العالم 1047 جيجاوات في عام 2022، بزيادة صافية قدرها 191 جيجاوات مقارنة بالعام السابق. ورغم هذا التطور، تبرز مشكلة رئيسية تؤثر بشكل مباشر على أداء الوحدات الكهروضوئية، وهي تراكم الغبار والأوساخ على أسطحها، ما يشكل حاجزًا ضوئيًا يقلل من كفاءة التفاعل بين الخلية الشمسية والإشعاع الساقط عليها [6]. يتكوّن الغبار من جسيمات دقيقة لا يتجاوز قطرها 500 ميكرومتر، وتشمل ملوثات عضوية وغير عضوية مثل جزيئات التربة، الدخان، حبوب اللقاح، البكتيريا، الفطريات، وغيرها [7]. أما التلوث، فيشير إلى ترسيب هذه الجزيئات على سطح الألواح الشمسية، مما يؤدي إلى امتصاص وتشتيت الإشعاع الشمسي، ويؤثر سلبيًا على كفاءة الخلية. [4]

شهدت السنوات الأخيرة اهتمامًا متزايدًا من الباحثين بدراسة تأثير تراكم الغبار على أداء الخلايا الكهروضوئية، حيث نُشرت العديد من المقالات التي تناولت هذا الموضوع من جوانب متعددة [8-9]، بما في ذلك الخصائص الكهربائية، النفاذية، والعوامل البيئية المؤثرة في التدهور [10، 4-11]، كما تم استعراض طرق التنظيف المختلفة المستخدمة لمواجهة هذه المشكلة [12-13]. يوضح هذا الاهتمام العلمي المتزايد حجم الأثر الذي يسببه تراكم الغبار، وأهمية البحث عن حلول فعالة للتعامل معه.

و لتقليل من تأثير هذه الظواهر على كفاءة الخلية الشمسية تم تطوير عدة مواد وتقنيات متقدمة لمقاومة التصاق الأتربة والغبار على أسطح ألواح الطاقة الشمسية، أبرزها الطلاءات النانوية التي تعتمد على مواد مثل ثاني أكسيد التيتانيوم (TiO₂) والسيليكا (SiO₂) لتكوين أسطح فائقة النعومة تمنع تراكم الأوساخ، بالإضافة إلى الطلاءات الطاردة للماء (Hydrophobic) مثل تلك المعتمدة على السيليكون أو الفلوروبوليمرات (مثل PTFE)، والتي تساعد على تنظيف السطح ذاتياً عند هطول المطر. كما تُستخدم طلاءات طاردة للزيوت (Oleophobic) لتقليل التصاق المواد الدهنية والغبار معاً، وتُضاف أحياناً طلاءات ذاتية التنظيف تعتمد على التحلل الضوئي، حيث تقوم بتفكيك المواد العضوية والأتربة باستخدام ضوء الشمس. إلى جانب ذلك، يُستخدم الزجاج المعالج حرارياً أو كيميائياً لتقليل التوتر السطحي، وتتوفر أيضاً طلاءات هجينة تجمع بين مقاومة الغبار، والماء، والحدوش، والانعاكسات، مما يحسن من كفاءة الألواح ويقلل من الحاجة إلى التنظيف المستمر. ورغم تنوع الدراسات، لا تزال هناك فجوات بحثية واضحة، أبرزها محدودية التغطية لبعض الجوانب مثل آليات ترسيب الغبار، نماذج التنبؤ بالأداء، وطرق المراقبة. كما أن معظم الدراسات ركزت على المبادئ العامة لطرق التنظيف دون تقديم تقييم مقارن وشامل لمزاياها وعيوبها، إلى جانب نقص في تسليط الضوء على التقنيات الناشئة والأكثر تطوراً في هذا المجال. كذلك، يلاحظ غياب واضح لاستراتيجيات عملية ومتمكاملة لمنع تراكم الغبار قبل حدوثه.

يُعدّ استخدام طبقات رقيقة من "أكسيد الزنك (ZnO) المطعم بأكسيد الألمين (Al₂O₃)" من التقنيات المتقدمة والفعالة في تسهيل عملية إزالة الأتربة من أسطح الخلايا الشمسية، خاصة في البيئات ذات التلوث الغباري العالي. يُضفي أكسيد الزنك على السطح خواصاً نانوية مميزة، مثل الخشونة الدقيقة التي تعزز من قدرة السطح على طرد الماء والغبار، حيث يتمتع بخاصية "طارد للماء (hydrophobic)" أو حتى "فائق الطرد (superhydrophobic)"، مما يسمح للماء بالانزلاق بسهولة على السطح حاملاً معه الأتربة. وعند تطعيمه بالألمين، تزداد فعالية الطبقة من حيث "المتانة الكيميائية والميكانيكية"، كما أن الألمين يُعزز مقاومة الطبقة للأشعة فوق البنفسجية ويُحسن استقرارها الحراري. يُساهم هذا الدمج بين المادتين في تكوين طبقة واقية شفافة لا تعيق مرور الضوء، مما يحافظ على

كفاءة الخلية الشمسية في امتصاص الطاقة، مع تقليل الحاجة إلى التنظيف اليدوي أو التلقائي المتكرر. وبذلك، تمثل هذه التقنية حلاً ذكياً ومستداماً لتحسين أداء الخلايا الشمسية وزيادة عمرها التشغيلي في ظروف مناخية قاسية.

استناداً إلى ذلك، تهدف هذه الدراسة إلى تحضير طبقات رقيقة من أكسيد الزنك (ZnO) المطعم بأكسيد الألومين (Al_2O_3) على سطوح زجاجية شفافة باستخدام طريقة SILAR، ودراسة خصائصها الضوئية والكهربائية بغية استخدامها في تسهيل عملية تنظيف الألواح الشمسية من الاتربة والغبار المتراكم. وللحصول على طبقات ذات جودة عالية وخصائص ضوئية وكهربائية جيدة تم دراسة تأثير مجموعة من العوامل الفيزيوكيميائية على عملية الترسيب (درجة حرارة التادين، عدد دورات الغمس والسحب، نسبة الألومين) و هذا بالاعتماد على طريقة تصميم التجارب باستخدام نموذج Box Bhenken تتكون هذه المذكرة من جزئين :

- الجزء النظري يحتوي على 3 فصول :

الفصل الأول يشمل مشاكل تراكم الغبار على الألواح الشمسية وطرق معالجتها بينما خصص الفصل الثاني لطرق تحضير الطبقات الرقيقة والعوامل المؤثرة عليها، احتوى الفصل الثالث على طرق تحسين عمليات الإزالة.

- فيما يخص الجزء العملي فقد خصص "الطرق والوسائل المخبرية وتحليل النتائج"، حيث يشمل الدراسة العملية التي قمنا بإنجازها والتي تحتوي على الطرق المخبرية المستعملة في تنظيف الدعامة، تحضير المحاليل وترسيب الطبقات الرقيقة بالإضافة إلى مختلف أجهزة التحليل المستعملة وكذلك النتائج المتحصل عليها من خلال عرض المنحنيات الإمتصاصية والمقاومة وتحديد الخصائص الضوئية والبنوية لجميع العينات المحضرة في هذا العمل.

نختتم هذه المذكرة بخاتمة تشمل حوصلة حول النتائج المتحصل عليها في هذه الدراسة، بالإضافة إلى بعض التوصيات والإقتراحات لمواصلة هذا العمل في المستقبل.

قائمة المراجع:

- [1]H.M.S. Al-Maamary, H.A. Kazem, M.T. Chaichan, The impact of oil price fluctuations on common renewable energies in GCC countries, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 75 (2017) 989–1007.
- [2]P.Y. Jiang, X.L. Chen, Q.Y. Li, H.H. Mo, L.Y. Li, High-resolution emission inventory of gaseous and particulate pollutants in Shandong Province, eastern China, *J. Clean. Prod.* 259 (2020).
- [3]H.M.S. Al-Maamary, H.A. Kazem, M.T. Chaichan, Climate change: The game changer in the Gulf Cooperation Council Region, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 76 (2017) 555–576.
- [4]Y.N. Chanchangi, A. Ghosh, S. Sundaram, T.K. Mallick, Dust and PV Performance in Nigeria: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 121 (2020) 109704.
- [5]IRENA. Solar, <http://www.irena.org/solar>; 2023 [accessed 29 November 2023].
- [6]A. Sayyah, M.N. Horenstein, M.K. Mazumder, Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels, *Sol. Energy* 107 (2014) 576–604.
- [7]Z.A. Darwish, H.A. Kazem, K. Sopian, M.A. Al-Goul, H. Alawadhi, Effect of dust pollutant type on photovoltaic performance, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 41 (2015) 735–744.
- [8]H. Abuzaid, M. Awad, A. Shamayleh, Impact of dust accumulation on photovoltaic panels: a review paper, *Int. J. Sustain. Eng.* 15 (1) (2022) 266–287.
- [9]Z. Song, J. Liu, H.X. Yang, Air pollution and soiling implications for solar photovoltaic power generation: A comprehensive review, *Appl. Energy* 298 (2021) 117247.
- [10]Z.J. Quan, H. Lu, W.J. Zhao, C.X. Zheng, Z. Zhu, J. Qin, M. Yue, A Review of Dust Deposition Mechanism and Self-Cleaning Methods for Solar Photovoltaic Modules, *Coatings* 13 (1) (2023) 49.
- [11]B. Laarabi, Y. El Baqqal, N. Rajasekar, A. Barhdadi, Updated review on soiling of solar photovoltaic systems Morocco and India contributions, *J. Clean. Prod.* 311 (2021) 127608.
- [12]H.M. Khalid, Z. Rafique, S.M. Muyeen, A. Raqeeb, Z. Said, R. Saidur, K. Sopian, Dust accumulation and aggregation on PV panels: An integrated survey on impacts, mathematical models, cleaning mechanisms, and possible sustainable solution, *Sol. Energy* 251 (2023) 261–285.
- [13]R. Conceicao, J. Gonzalez-Aguilar, A.A. Merrouni, M. Romero, Soiling effect in solar energy conversion systems: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 162 (2022) 112434.

الفصل الأول:

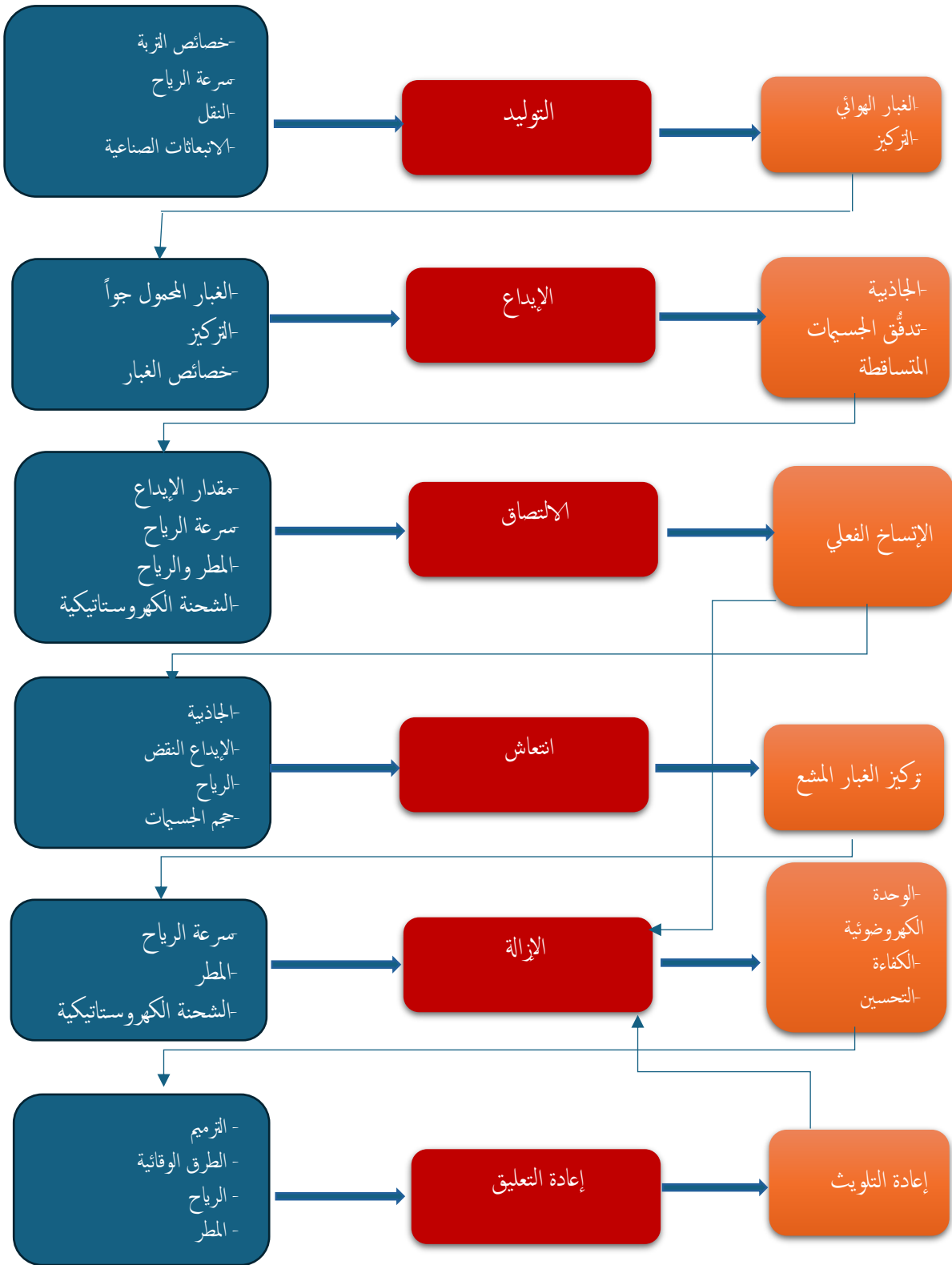
مشاكل تراكم الغبار على الألواح الشمسية
وطرق معالجتها

1.1. المقدمة

مع تزايد عدد السكان عالميًا، ارتفع الطلب على الطاقة، مما أدى إلى استنزاف احتياطيات الوقود الأحفوري وزيادة الانبعاثات الملوثة. لذلك، أصبح التحول إلى مصادر الطاقة المتجددة، وخاصة الطاقة الكهروضوئية، أمرًا ضروريًا لتلبية الطلب وتقليل الأضرار البيئية. الطاقة الكهروضوئية تُعد مصدرًا نظيفًا يجدد من الانبعاثات ويُلبي احتياجات الطاقة المتزايدة. بحلول عام 2022، بلغت القدرة العالمية للطاقة الشمسية الكهروضوئية 1047 جيجاوات. إلا أن أحد أبرز التحديات هو تراكم الغبار على الألواح الشمسية، مما يقلل من كفاءتها عبر تقليل امتصاص الضوء. الغبار يتكون من جزيئات متنوعة قد تؤدي إلى تدهور بصري وحراري وكهربائي في أداء الألواح. رغم الأبحاث المكثفة حول تأثير الغبار، لا تزال هناك فجوات، منها محدودية الدراسات حول آليات الترسب، ونماذج التنبؤ، ومراقبة الأوساخ، إلى جانب نقص التحليل المقارن لطرق التنظيف المختلفة، خاصة الحديثة منها. كما لم يتم اقتراح استراتيجيات وقائية فعالة حتى الآن. يشمل هذا الفصل مراجعة شاملة لمختلف الأعمال المنجزة بين سنة 2000 و2023، تركز على فهم تأثير الغبار وآليات ترسبه، وتقديم نماذج للتنبؤ بحسائر الأداء، واستعراض طرق التنظيف المتاحة، بما فيها الذكية مثل الروبوتات والطائرات بدون طيار. كما تقترح استراتيجية متكاملة للوقاية تشمل المراقبة، التنبؤ، واتخاذ قرارات تنظيف فعالة.

2.1. آلية ترسب الغبار

لفهم كيفية تقليل خسائر تلوث الغبار على الألواح الكهروضوئية، يجب دراسة العمليات الأساسية لتراكم الغبار وترسيبه، التي تشمل توليد الغبار (إنتاج جزيئات الغبار، حملها، ونقلها). بالإضافة لترسيب الغبار (الالتصاق، الارتداد، وإعادة التعليق). توضح العمليات دورة حياة الغبار على الألواح، بدءًا من توليده وصولًا إلى ترسيبه، حيث يلتصق البعض بينما يرتد البعض الآخر أو يُعاد تعليقه كما هو مبين الشكل 1.1.



الشكل 1.I.1 دورة حياة تراكم الغبار. [1]

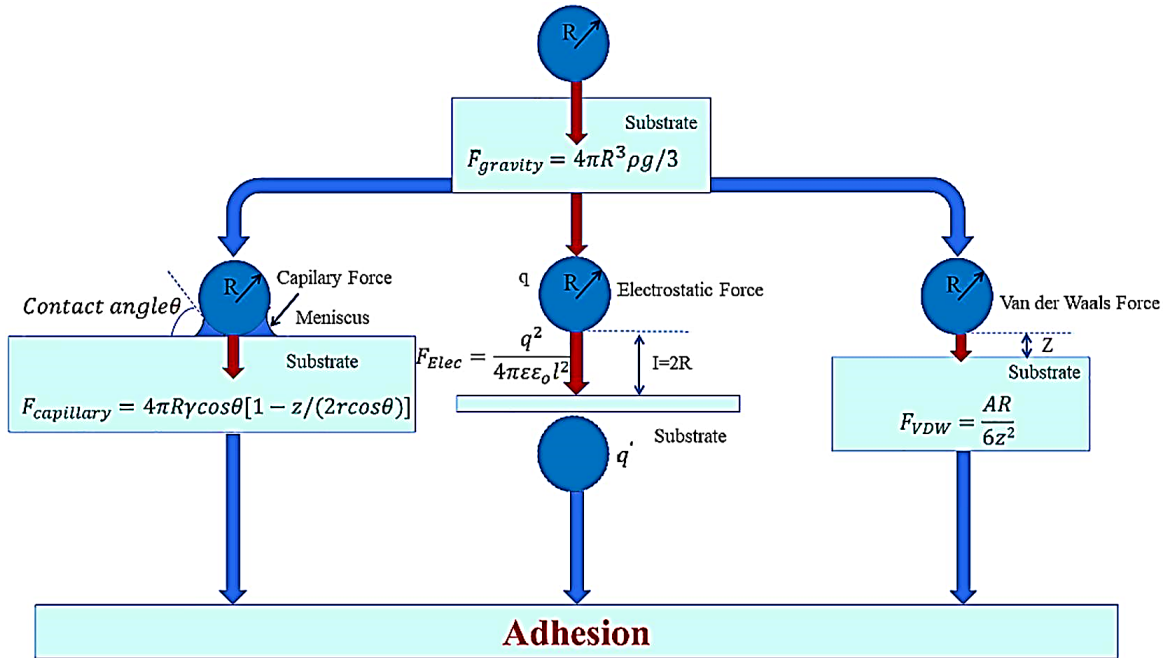
2.1.I توليد الغبار

يتغير مفهوم الغبار حسب السياق، فمثلاً تُعرّفه إدارة السلامة والصحة في المناجم بأنه جزيئات صلبة لا تتغير كيميائياً أو فيزيائياً إلا بالسحق. يُصنف الغبار حسب قطر الجزيئات إلى: الجسيمات المترسبة والتي تستقر على الأسطح، جزيئات بقطر ≤ 50 ميكرومتر، جزيئات بقطر ≤ 10 ميكرومتر، و جزيئات بقطر ≤ 2.5 ميكرومتر. تنتج هذه الجزيئات من مصادر طبيعية وصناعية. الصناعية تتركز في

المدن ومواقع التصنيع وتسبب آثارًا محلية، بينما الطبيعية، مثل العواصف الترابية، تنتج جزيئات أكبر تُنقل لمسافات بعيدة. شمال إفريقيا، الصين، وآسيا الوسطى تمثل أكبر مصادر الغبار عالميًا، حيث تسهم الصحراء الكبرى وغرب الصين بنحو 70% من الانبعاثات العالمية، يليها شبه الجزيرة العربية وأستراليا، ثم أمريكا الجنوبية وجنوب إفريقيا بنسبة 5%. تنتقل الجزيئات في الغلاف الجوي حسب الحجم والوزن والشكل. الجسيمات الأكبر لا تتجاوز عادة 1000 متر، بينما الجسيمات الأصغر (خاصة >10 ميكرومتر) قد تقطع آلاف الكيلومترات. فمثلاً، الجزيئات بين 10-20 ميكرومتر يمكن أن تسافر حتى 500 كم، بينما الأكبر من 20 ميكرومتر نادرًا ما تتجاوز 40 كم.

2.2.I ترسب الغبار

يؤثر ترسب الغبار بشكل كبير على أداء وحدات الطاقة الكهروضوئية. لذلك، من الأهمية بمكان إجراء تحقيق متعمق في آليات ترسب الغبار وتحليل تأثيراته المتأصلة على وحدات الطاقة الكهروضوئية. [2] خلال المراحل الأولية لترسب الغبار على سطح وحدات الطاقة الكهروضوئية، تتعرض الجسيمات لقوى مختلفة تساهم في ترسبها، بما في ذلك قوة فان دير فالس، والقوة الكهروستاتيكية، والقوة الشعرية، والجاذبية. [3,4] كما هو موضح في الشكل 2.I تصبح الجاذبية غير مهمة بالنسبة للجسيمات الصغيرة التي يبلغ نصف قطرها أقل من 500 ميكرومتر. [3,5,6]

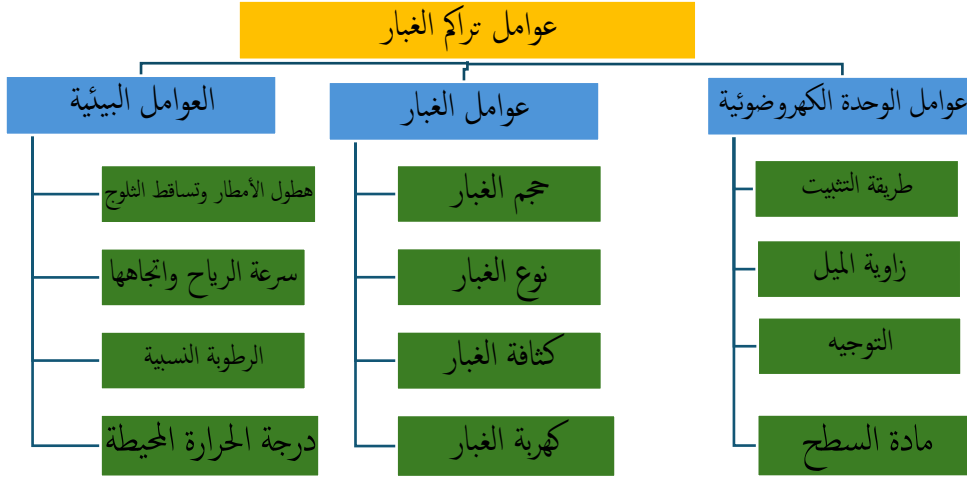


الشكل 2.I قوى التصاق الغبار (مأخوذة من المرجع [7,8]).

تشير قوى فان دير فالس إلى تفاعلات جذب ضعيفة بين الذرات أو الجزيئات [9]، وتُعد عامل الالتصاق الأساسي في البيئات الجافة بين الجسيمات والأسطح الصلبة. في الغلاف الجوي، قد تكتسب جسيمات الغبار شحنات كهربائية من خلال الاصطدامات أو الشحن الاحتكاكي، مما يؤدي إلى تكون قوى كهروستاتيكية تساهم في ترسب الغبار على الأسطح، مثل زجاج الخلايا الكهروضوئية. حتى دون وجود شحنة أولية، يمكن للجسيمات المشحونة جذب شحنة صورة على السطح، مؤدية إلى قوى كولومبية إضافية [10]. عند ارتفاع الرطوبة، تصبح القوى الشعرية العامل الرئيسي في التصاق الغبار، حيث تشكل الجسور السائلة بين الجزيئات والسطح. تعود هذه الظاهرة إلى التوتر السطحي للماء والضغط داخل الأسطح المنحنية للسائل. أما الجاذبية، فيبرز تأثيرها على الجسيمات الأكبر من 500 ميكرومتر، حيث تزيد كتلتها وبالتالي قوة الجذب نحو السطح [11]. تختلف آليات ترسب الغبار بحسب نوع القوة المهيمنة: تسود القوى الكهروستاتيكية عند الشحن العالي، وتؤثر قوى فان دير فالس بشكل أكبر على الجسيمات الصغيرة، بينما تعزز الجاذبية ترسب الجسيمات الثقيلة.

3.I. العوامل المؤثرة على ترسب الغبار

يتأثر ترسب الغبار على وحدات الطاقة الكهروضوئية بشكل أساسي بالعوامل البيئية وعوامل الغبار وعوامل وحدات الطاقة الكهروضوئية، كما هو موضح في الشكل 3.I. تشمل العوامل البيئية بشكل عام هطول الأمطار وسرعة الرياح واتجاهها والرطوبة النسبية ودرجة الحرارة. تشمل عوامل الغبار حجم الغبار ونوعه وتركيز الغبار المحمول جواً وحالة شحنه. تشمل عوامل وحدة الطاقة الكهروضوئية طريقة التركيب وزاوية الميل والتوجيه ومادة السطح.

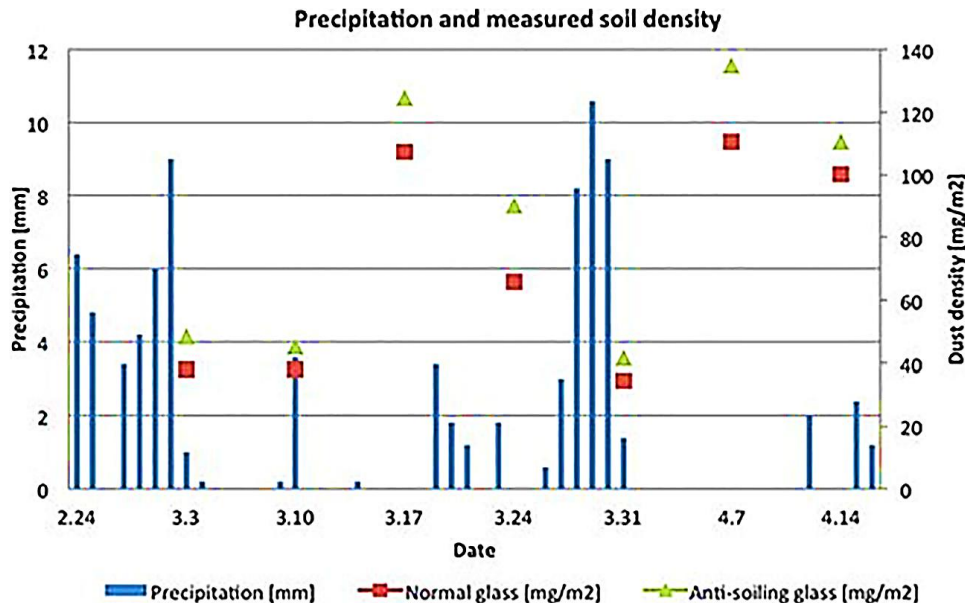


الشكل 3.I. العوامل المؤثرة على ترسب الغبار على الألواح الكهروضوئية.

1.3.I. العوامل البيئية

1.1.3.I. هطول الأمطار

يؤثر هطول الأمطار على ترسب الغبار على الألواح الكهروضوئية [12]، إذ يلعب دورًا حاسمًا في تنظيفها. خاصة عندما تتجاوز شدتها 38 مم/ساعة، حيث يمكنها إزالة معظم جزيئات الغبار. لكن هذا التأثير يبلغ حد الإشباع عند كثافة غبار تصل إلى 40 مجم/م² [13]. كما بين نموذج رياضي أن المطر الخفيف يزيل فقط 26٪ من الجسيمات، بينما يزيل المطر المتوسط 51٪، والمطر الغزير يزيل نحو 96٪، مما يدل على فعاليته الكبيرة في تنظيف الوحدات الكهروضوئية. [14]



الشكل 4.I. العلاقة بين هطول الأمطار وكثافة ترسب الغبار. [13]

بالإضافة إلى ذلك، في ظل ظروف هطول الأمطار الخفيفة، تميل قطرات المطر إلى تجميع الجسيمات المحمولة جواً وتسهيل تراكم الغبار على وحدات الطاقة الكهروضوئية. كونسيكو وآخرون. [15] اكتشف أن الفترات الأقصر في الواقع، تعمل الأمطار الخفيفة على تعزيز تراكم الغبار على سطح الألواح الكهروضوئية، مما يتسبب في تحو الغبار إلى مادة موحلة. توصل [16] أيضاً إلى استنتاج مفاده أن هطول الأمطار منخفضة الكثافة ليس له تأثير على تنظيف الألواح الكهروضوئية، بل يتسبب في تراكم المزيد من جزيئات الغبار على "الوحدات. يمكن أن يؤدي هذا إلى تكوين رواسب عتيقة يصعب إزالتها، مما يؤدي إلى ظاهرة تُعرف باسم "التاسك".

2.1.3.I. سرعة الرياح واتجاهها

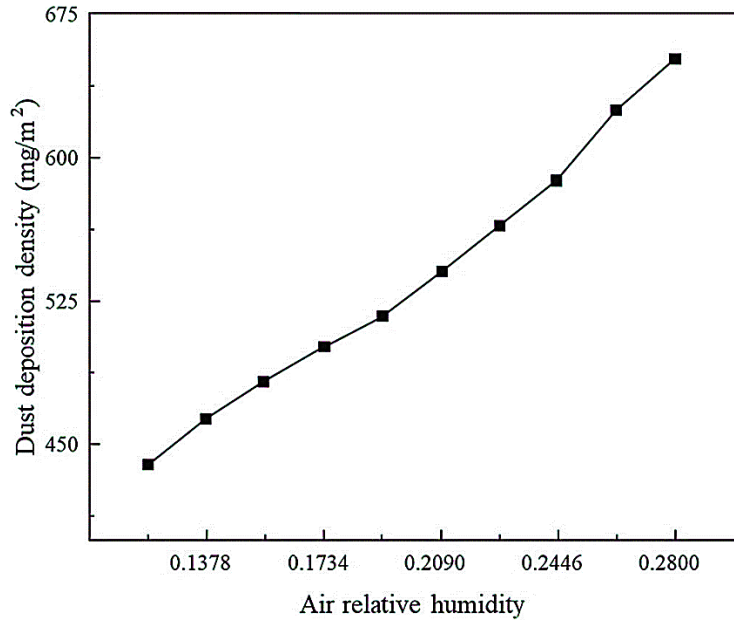
تؤثر الرياح بشكل كبير على ترسب الغبار على الألواح الكهروضوئية. عند سرعات الرياح المنخفضة، تزداد فرصة ترسيب الجسيمات الصغيرة على سطح الألواح [17]، كما أثبتت دراسات عدة باستخدام المحاكاة الحاسوبية (CFD) و DEM والتجارب الميدانية، مثل تلك التي أُجريت في كينيا. بالمقابل، عندما تتجاوز سرعة الرياح حدًا معينًا، تبدأ الجزيئات المترسبة في الانفصال عن السطح، مما يقلل من تراكم الغبار [18]. وقد أظهرت الأبحاث أن سرعة الرياح العالية تؤدي إلى ارتفاع قوة السحب، وبالتالي انخفاض كثافة ترسب الغبار على الألواح الكهروضوئية. [19]

تؤدي زيادة كثافة الغبار إلى تعزيز انفصال الجزيئات عن الألواح الكهروضوئية [16]، كما أن الرياح القوية تسهم في إزالة هذه الجزيئات. لا تقتصر أهمية الرياح على سرعتها فقط، بل إن اتجاهها يؤثر بدرجة أكبر على ترسب الغبار [20]. أظهرت دراسات، منها ما أُجري في الصين [12]، أن الألواح المواجهة للجنوب تتعرض لتراكم أكبر للغبار عند زوايا ميل أقل من 45 درجة بسبب الرياح الجنوبية السائدة. كما بينت دراسة في إيران أن اتجاه الرياح غالبًا ما يتطابق مع اتجاه الألواح التي تشهد أعلى مستويات ترسيب للغبار خلال معظم أشهر السنة. [21]

لمعالجة مشكلة ترسب الغبار، فإن النهج الشائع هو استخدام كنس تدفق الهواء القوي [22] بالإضافة إلى ذلك، يتم تركيب حواجز الرياح أمام أنظمة الطاقة الكهروضوئية المثبتة على الأرض [23] من المهم ممارسة سيطرة معقولة على سرعة الرياح واتجاهها حيث يساعد ذلك في إزالة الغبار ويقلل من تأثير الغبار الثانوي.

3.1.3.I. الرطوبة النسبية

تلعب الرطوبة النسبية دورًا مهمًا في تراكم الغبار على الألواح الكهروضوئية، إذ تؤدي في البيئات الرطبة إلى تكوين جسور شعرية بين الجزيئات وسطح اللوحة، مما يسهل التصاقها وتكثفها في شكل هلامي. [24] وتؤدي الرطوبة النسبية بين 40% و 80% إلى زيادة التصاق الجسيمات بنسبة تصل إلى 80%. [17] كما تبين القوى الشعرية عند ارتفاع الرطوبة، مما يعزز ترسيب الغبار. بالإضافة إلى ذلك، تؤدي الأملاح الذائبة في الرطوبة إلى تآكل الألواح وتقليل عمرها الافتراضي. [25, 26]

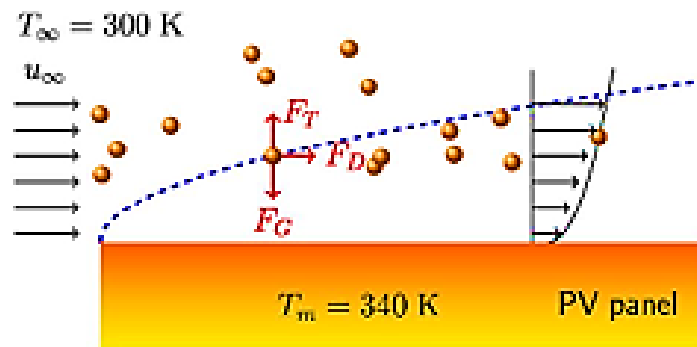


الشكل 5.I تأثير الرطوبة النسبية على كثافة ترسب الغبار (منقول من المرجع [19]).

بعد الإزالة الفعالة لتكتلات الغبار أمرًا ضروريًا لاستعادة أداء وحدات الطاقة الكهروضوئية، على الرغم من أنها تتطلب تكاليف عمالة كبيرة [27]. قد يؤدي عدم إزالة تكتلات الغبار إلى حدوث محلول سائل يؤدي ذلك إلى جفاف الطبقة بين سطح اللوحة وجزيئات الغبار. ويؤدي هذا إلى زيادة القوة المماسية اللازمة لإزالة الملامط الجاف من سطح الوحدة، مما يجعل عملية التنظيف أكثر تحديًا [18،28] بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن يؤدي هذا الإهمال إلى تدهور كبير في أداء وحدة الطاقة الكهروضوئية [19،29] ومن ثم، فمن الأهمية بمكان تعزيز قوة التنظيف للتخلص بشكل فعال من جزيئات الغبار التي تتجمع على سطح الوحدة، وخاصة في البيئات الرطبة.

4.1.3.I. درجة الحرارة المحيطة

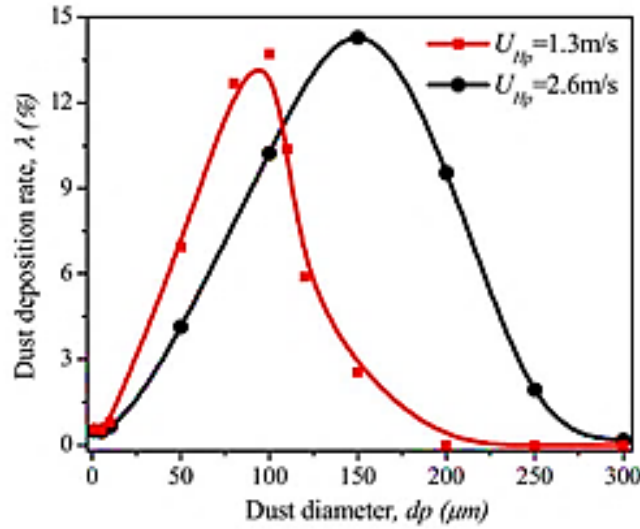
تلعب درجة الحرارة المحيطة دورًا مهمًا في ترسب الغبار وأداء وحدات الطاقة الكهروضوئية. أظهرت دراسة Zorrilla-Casanova et al [30] في جنوب إسبانيا أن الأمطار تقلل من تأثير الغبار، حيث ينخفض الإشعاع الشمسي بأقل من 4٪ خلال موسم الأمطار، بينما تتجاوز الحسائر 20٪ يوميًا في الصيف نتيجة تراكم الغبار. كما أشار Ipe و Gazi [31] إلى أن تأثير الظروف الجوية على أداء الألواح كان أكبر من تأثير الغبار وحده، ما يبرز ضرورة دراسة التأثير المشترك لدرجة الحرارة والطقس. من جهة أخرى، يؤدي ارتفاع درجة حرارة الألواح إلى تمدد جزيئات الغبار، مما يقلل الفجوات بينها ويزيد من امتصاص وانعكاس الإشعاع، وبالتالي انخفاض كفاءة نقل الضوء. بالمقابل، قد تُسهّم الحرارة المنقولة في طرد الجسيمات الدقيقة، حيث بين Oh et al [32] أن التدرج الحراري بين اللوح والهواء المحيط يقلل من تراكم الجسيمات متناهية الصغر، مما يشير إلى أن تأثير درجة الحرارة قد يساهم أيضًا في تقليل ترسب الغبار.



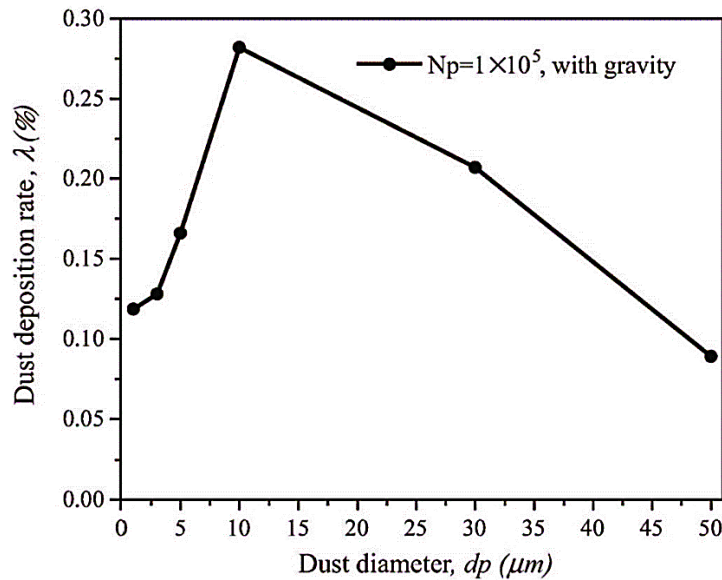
الشكل 6.I مخطط تخطيطي للجسيمات ذات تأثير الرحلان الحراري؛ تمثل F_T و F_D و F_G القوة الرحلانية الحرارية والسحب وجاذبية جسم الغبار على التوالي. [32]

2.3.I. عامل الغبار

تختلف معدلات ترسب الغبار حسب حجمه. استخدم لو وآخرون الديناميكيات الحسابية للموائع لمحاكاة ترسيب 11 نوعًا من الغبار بأحجام مختلفة قرب الألواح الكهروضوئية تحت سرعات رياح أظهرت النتائج **الشكل 7.I**. أن معدل ترسيب الغبار يزداد أولاً مع زيادة حجم الجسيمات ثم ينخفض. وُجد أن جزيئات الغبار متوسطة الحجم تسجل أعلى معدل ترسيب عند سرعة رياح 1.3 متر/ثانية، بينما عند سرعة 2.6 متر/ثانية، يكون معدل الترسيب الأقصى لجزيئات بحجم 150 ميكرومتر، مع مسار ترسيب مشابه لسرعات الرياح المنخفضة. **الشكل 8.I** يوضح العلاقة بين معدل الترسيب وحجم الجسيمات تحت سرعات رياح وظروف جاذبية معينة. عند قطر 10 ميكرومتر، يصل معدل الترسيب الأقصى إلى 0.28%، بينما الجسيمات ذات قطر 50 ميكرومتر تسجل أدنى معدل ترسيب 0.13% [33] وتؤكد دراسات أخرى لو وآخرون [35,34] وبينج وآخرون [36] أنماط ترسيب مماثلة.



الشكل 7.I تباين معدل ترسب الغبار مع حجم الجسيمات تحت سرعات الرياح المختلفة. [37]



الشكل 8.I العلاقة بين معدل ترسب الغبار وحجم الجسيمات. [33]

من الدراسات السابقة، يتضح أن الجسيمات الصغيرة الحجم تؤثر بشكل رئيسي عبر الحركة البراونية أو الترسيب الناتج عن الرياح على وحدات الطاقة الكهروضوئية، بينما تكون الجسيمات كبيرة الحجم أكثر عرضة للترسيب بفعل الجاذبية. أما جزيئات الغبار متوسطة

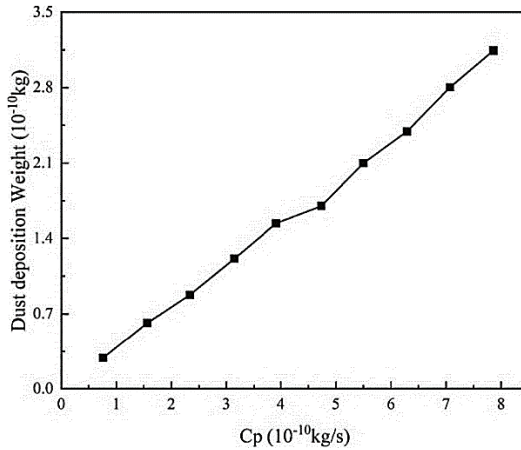
الحجم فتتأثر بكل من الجاذبية والرياح، حيث يختلف حجم الجسيمات التي تحقق أعلى معدل ترسيب وبذلك، يتم ترسيب الغبار أساسًا نتيجة لتداخل تأثيرات الرياح والجاذبية، حيث تتحكم سرعة الرياح في حركة الجسيمات ويعتمد قطر الجسيمات على هذه السرعة.

1.2.3.I. نوع الغبار

الغبار الطبيعي يتكون من جزيئات شبه كربونية وأملاح قابلة للذوبان ومكونات متنوعة [35]، ويؤثر تركيب هذه الجزيئات على معدل ترسيبها على وحدات الطاقة الكهروضوئية. استخدم كازميرسكي وآخرون [38] مجهر القوة الذرية لتقييم التصاق الغبار، ووجدوا أن الجزيئات التي تحتوي على مكونات معدنية وعضوية مذابة تلتصق بقوة أكبر، مما يزيد من احتمالية ترسيبها على الألواح. كما درس فارجا وآخرون [39] تأثير تركيبة الغبار على قابلية إزالة التلوث، ولاحظوا أن المواد العضوية والكربونية مثل حبوب اللقاح والجرافيت تظهر التصاقًا عاليًا بسطح الزجاج. أجرى لو وآخرون [40،41] تجربتين لفحص ترسيب أنواع مختلفة من الغبار على الألواح المكسوة بطبقات ذاتية التنظيف. ، بينت النتائج أن غبار "Dust C" من قواغتشو له أعلى كثافة ترسيب بسبب طاقة سطحه العالية، بينما أظهر غبار "Dust D" أقل كثافة ترسيب بسبب ارتفاع معامل يونغ الذي يسبب ارتداد الجسيمات. كانت التربة الجافة تُظهر كثافة ترسيب أكبر من الرمل الجاف عند نفس زاوية الميل، [40،41] أخيرًا، قام داغر وآخرون [42] بمحاكاة تأثير أربع مواد غبار مختلفة على الترسيد باستخدام ديناميكيات الموائع الحسابية، وأظهرت النتائج أن الدولوميت يمتلك أعلى معدل ترسيب، في حين أن الجبس لديه أقل معدل ترسيب عند سرعات رياح تزيد عن 2 متر/ثانية.

2.2.3.I. تركيز الغبار المحمول جواً

تركيز الغبار المحمول جواً يؤثر بشكل كبير على كمية الغبار التي تترسب على سطح وحدات الطاقة الكهروضوئية، حيث يؤدي ارتفاع تركيز الغبار إلى زيادة كمية الترسيد [43]. في دراسة ليو وآخرون [44]، استخدم الباحثون محاكاة DEM لتحليل تأثير التركيز الأولي لجزيئات الغبار (cp) على وزن الغبار المترسب على النظارات الشمسية. أظهرت النتائج الشكل 9.I أن زيادة قيمة cp تؤدي إلى زيادة وزن الغبار المترسب، ويرجع ذلك إلى كثرة تصادمات الجسيمات التي تقلل من قوة التلامس بينها، مما يسمح ببقاء المزيد من الجسيمات على السطح. وعليه، فإن انخفاض معامل القدرة يؤدي إلى تقليل وزن الغبار المترسب. بالمثل، استنتج يوي وآخرون [19] أن كثافة ترسب الغبار تتناقص مع انخفاض تركيز الجسيمات الأولي، مما يؤكد أهمية تركيز الغبار في تحديد كمية الترسيد.

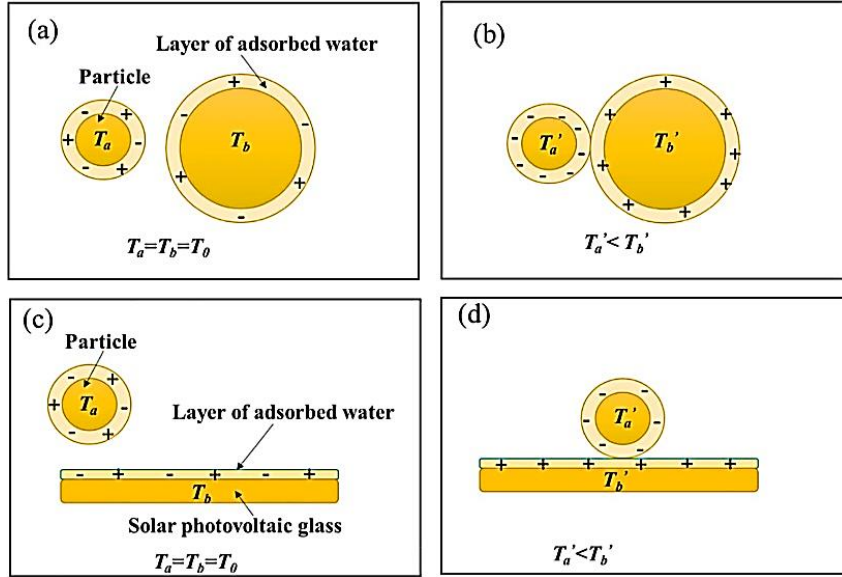


الشكل 9.I تأثير تركيز الغبار في الهواء على وزن ترسب الغبار. [44]

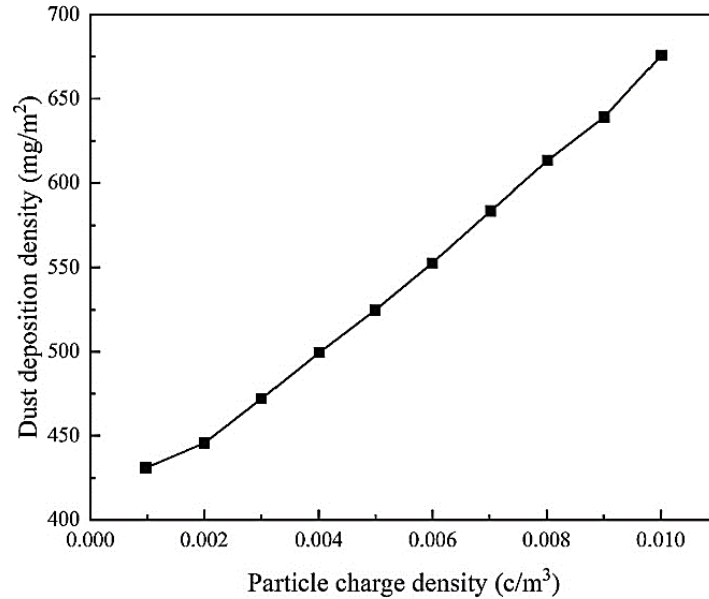
3.2.3.I. حالة شحن الغبار

أثناء تشغيل وحدات الطاقة الكهروضوئية، يُولد مجال كهروستاتيكي يجذب جزيئات الغبار ويشحنها، مما يسهم في ترسيب الغبار بشكل ملحوظ [45،46]. هذه الظاهرة تجعل جزيئات الغبار المشحونة على الوحدة تلتصق بجزيئات الغبار المحمولة جواً، مما يزيد من كمية الغبار المتراكمة. في دراسة ليو وآخرون [47]، تم التحقيق في تأثير الشحنات الكهروستاتيكية على تراكم الغبار وخصائصه، حيث لوحظ أن الاصطدامات المتكررة بين الجسيمات تسبب نقل شحنة تؤثر على ترسيب الغبار [48]. كما أظهر بحث يوي وآخرون [19]

أن كثافة ترسيب الغبار تزداد مع زيادة كثافة شحنة الجسيمات، مما يعني أن القوة الكهروستاتيكية هي القوة الرئيسية في ترسيب الغبار، حيث يشحن المجال الكهروستاتيكي الجسيمات ويعزز ترسيبها على اللوحات. وبالتالي، زيادة شحنة الجسيمات تؤدي إلى تراكم أكبر للغبار على وحدات الطاقة الكهروضوئية.



الشكل 10.I مخطط آلية الجسيمات المشحونة على الألواح الشمسية. [47]

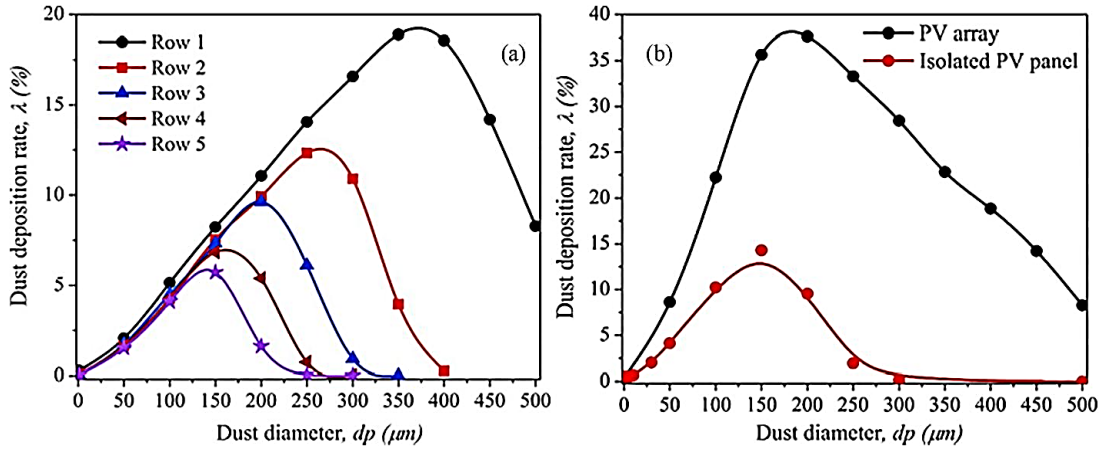


الشكل 11.I تأثير القوة الكهروستاتيكية على كثافة ترسيب الغبار (منقول من المرجع [19]).

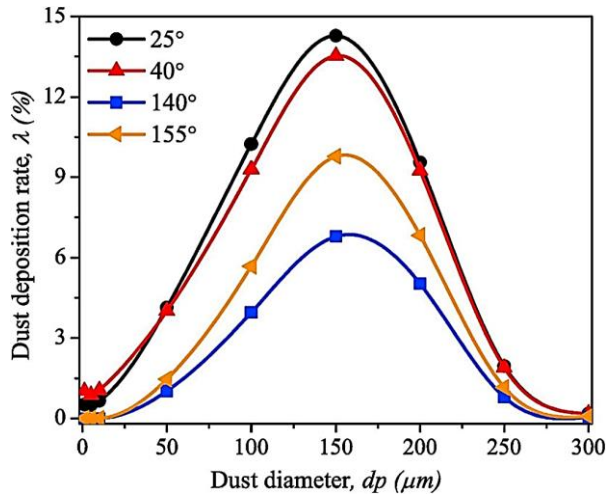
3.3.I عوامل وحدة الطاقة الكهروضوئية

1.3.3.I طريقة التثبيت

يمكن تركيب وحدات الطاقة الكهروضوئية بطرق متعددة مثل التركيب على الأرض، السطح، الأعمدة، الدمج الكهروضوئي في المباني، والتركيب على المظلات الكهروضوئية [49]. تختلف التأثيرات الناتجة حسب طريقة التركيب، إذ تُرتب وحدات الطاقة الشمسية على الأرض والأسطح عادةً في مجموعات، بينما تكون التركيبات الأخرى غالبًا معزولة [50]. كما أظهر معدل ترسيب الغبار على صفوف الألواح الكهروضوئية انخفاضًا تدريجيًا مع زيادة عدد الأعمدة، مما يؤثر على كفاءة التثبيت.



الشكل 12.I معدل ترسب الغبار على الألواح الكهروضوئية المعزولة ومصنوفات الألواح الكهروضوئية (مقتبس من المرجع [34]).



الشكل 13.I معدلات ترسب الغبار لأحجام مختلفة من جسيمات الألواح الكهروضوئية عند زوايا إمالة مختلفة.

2.3.3.I. زاوية الميل والاتجاه

زاوية الميل واتجاه تركيب وحدات الطاقة الكهروضوئية هما عاملان رئيسيان يؤثران على معدل ترسب الغبار على سطح اللوحات. عموماً، عند زوايا ميل أكبر، تنزلق جزيئات الغبار بسهولة أكبر بفعل الجاذبية، مما يقلل من تراكم الغبار [51]. في دراسة لو وآخرين [35]، أظهرت النتائج أن معدلات تراكم الغبار ترتفع أولاً مع زيادة حجم الجسيمات ثم تنخفض، مع أعلى تراكم عند زاوية ميل 25 درجة، تليها 40 و 15 و 140 درجة. وبشكل عام، تقل معدلات التراكم تدريجياً مع زيادة زاوية الميل. دراسات متعددة في مواقع مختلفة مثل فوانغتشو وبولندا وإيران والإمارات [16،54،48،43،52،53] أكدت هذه النتائج مع اختلاف زاوية الميل القسوى حسب حجم الجسيمات. كما أظهرت محاكاة حيدر آبادي وآخرين [55] أن أعلى ترسب للجسيمات الأكبر من 10 ميكرومتر يكون عند زاوية 45 درجة، بينما للجسيمات الأصغر تحدث الذروة عند زاوية 90 درجة. بالإضافة إلى ذلك، يلعب اتجاه تركيب الوحدات دوراً هاماً، حيث وجد المينير وآخرون [56] أن تراكم الغبار كان أعلى على العينات الموجهة شمال شرقاً، بسبب حمل الرياح لجزيئات الغبار من ذلك الاتجاه.

3.3.3.I. مواد السطح

معدل ترسب الغبار على أسطح الألواح الكهروضوئية يتأثر بشكل كبير بخصائص السطح والمادة المستخدمة [57]. الأسطح المطلية عادةً تقلل من ترسيب الغبار مقارنة بالأسطح غير المطلية [58]. في دراسة جيانج وآخرين [59]، كانت الأسطح المصنوعة من سيليكون متعدد البلورات والمغطاة بالأيوكسي أكثر عرضة لتراكم الغبار مقارنة بالأسطح السيليكون أحادي البلورة وغير المتبلور. كما لاحظ Zaihidee وآخرون [60] أن الأسطح المصنوعة من مواد مثل التيدلار والبلاستيك والراتنج الإيوكسي تظهر ترسيباً أعلى للغبار مقارنة بالأسطح الزجاجية. علاوة على ذلك، طبق غلامي وآخرون [61] أغشية نانوية كارهة ومحببة للماء على أسطح زجاجية، مما قلل ترسب الغبار بنسبة 41% وحتى أزال بقايا الغبار بعد هطول الأمطار في العينات المطلية. يتضح مما سبق أن العديد من العوامل مثل سرعة

الرياح، هطول الأمطار، وزاوية الميل تؤثر إيجابيًا أو سلبًا على ترسب الغبار، وغالبًا ما تتفاعل هذه العوامل معًا مما يصعب الفصل بين تأثيرات كل عامل بشكل منفرد. لذا، في البيئات الحقيقية، يتحدد ترسب الغبار عبر التأثيرات المجمعة لهذه العوامل. وبما أن تجارب الحقل قد تواجه صعوبة في عزل تأثير عامل معين، يوصى باستخدام المحاكاة الرقمية والمذجة النظرية للتحكم الأفضل في المتغيرات. عمليًا، يُفضل الحفاظ على زاوية ميل معتدلة للألواح الكهروضوئية لتقليل تراكم الغبار مع ضمان كفاءة امتصاص الطاقة الشمسية.

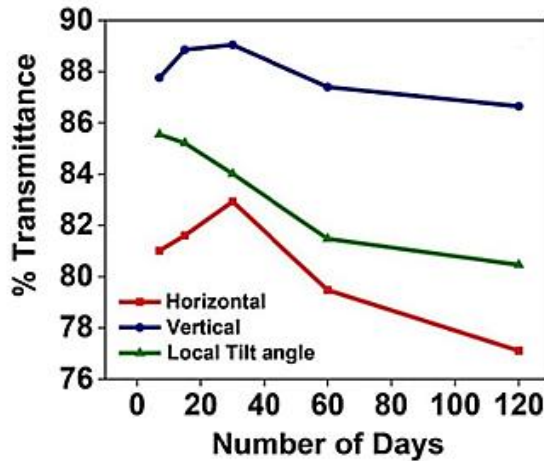
4.I. تأثير تراكم الغبار على كفاءة الأنظمة الكهروضوئية

تتأثر الخصائص البصرية والكهربائية والحرارية لوحدات الطاقة الكهروضوئية بشكل كبير بجزيئات الغبار المحمولة في الغلاف الجوي. يقلل تراكم الغبار على سطح الوحدة من كمية الإشعاع الشمسي التي تصل إلى اللوح، حيث تعمل طبقة الغبار كحاجز يعكس أو يمتص الإشعاع، مما يؤدي إلى خسائر ملحوظة في إنتاج الطاقة [62]. كما يعيق الغبار تبديد الحرارة، مما يخل بالتوازن الحراري داخل اللوحة، ويؤثر سلبًا على كفاءة التحويل الطاقوي [63]. إضافة إلى ذلك، يسبب تراكم الغبار ظلًا على سطح اللوح، مما يؤدي إلى ارتفاع درجات الحرارة المحلية وزيادة التأثير السلبي على أداء الوحدة [64]. ويختلف تأثير الغبار حسب الموقع الجغرافي والظروف المناخية، وتعتبر منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا من أكثر المناطق تأثرًا بهذا التأثير بسبب كثافة الغبار في الجو. [65]

1.4.I. تأثير الغبار على أداء الطاقة الكهروضوئية

1.1.4.I. تأثير الغبار على المعلمات البصرية للألواح الكهروضوئية

يؤدي ترسب الغبار والملوثات على الألواح الكهروضوئية إلى انخفاض في الخصائص البصرية مثل النفاذية والانعكاسية، مما يؤثر سلبًا على أداء النظام. أظهرت دراسة Enaganti وآخرون [66] تأثير تراكم الغبار على زجاج منخفض الحديد المستخدم في وحدات الطاقة الشمسية في الهند. في تجربتهم التي استمرت 120 يومًا دون تنظيف، تم وضع الزجاج في أوضاع رأسي، أفقي، ومائل جزئيًا. وأظهرت النتائج انخفاضًا في النفاذية بنسبة 17.48% في الوضع الرأسي، و7.94% في الأفقي، و14.13% في الوضع المائل، مما يعكس تأثير تراكم الغبار على كفاءة الألواح الشمسية كما هو موضح في الشكل 14.I.

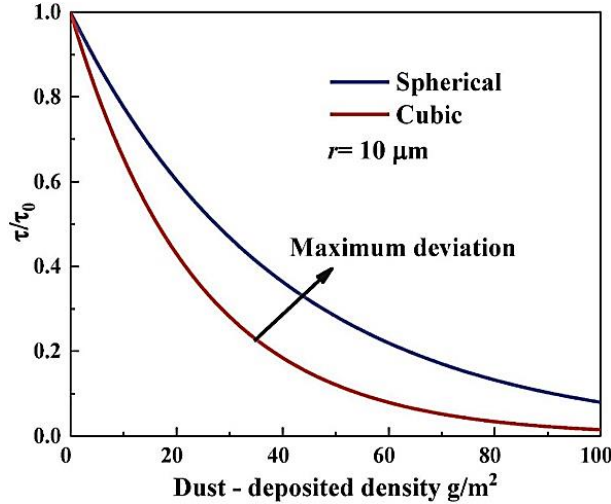


الشكل 14.I. انخفاض نفاذية الوحدات الكهروضوئية في مواقع مختلفة في الهند (مقتبس من المرجع [66]).

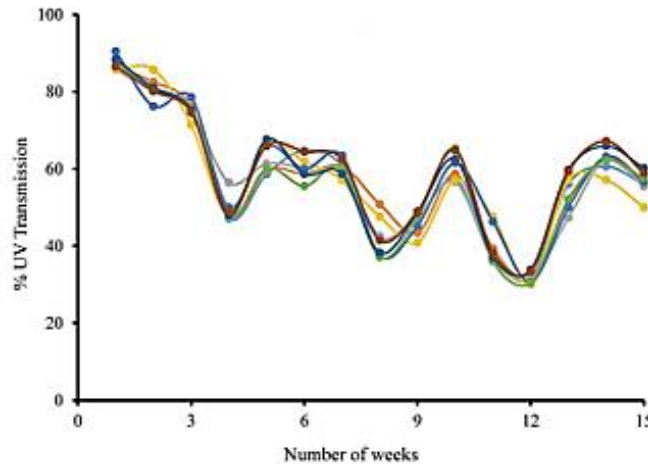
تلخص الدراسات تأثير تراكم الغبار على نفاذية الألواح الكهروضوئية كما يلي:

- وجد وو وآخرون [67] أن شكل جزيئات الغبار يؤثر بشكل كبير على النفاذية، حيث يؤدي الغبار المكون من جزيئات مكعبة إلى انخفاض أكبر في النفاذية مقارنة بالجزيئات الكروية. عند كثافة ترسب 10 جم/م²، انخفضت النفاذية بنسبة 35.47% للغبار المكعب و22.36% للغبار الكروي الشكل 15.I.
- Dhaouadi وآخرون [68] درسوا تأثير الغبار على الألواح في محطات الطاقة بدولة الإمارات، ووجدوا أن النفاذية انخفضت بنسبة 30% بعد 15 أسبوعًا عند زاوية 25 درجة الشكل 16.I، مما يشير إلى أهمية التنظيف لتجنب خسائر كبيرة في الإنتاج.

- Eredavaa وآخرون [69] أظهروا أن أنابيب الزجاج في مجمع طاقة شمسية في منغوليا شهدت انخفاضًا في النفاذية بنسبة تصل إلى 50% خلال 20 أسبوعًا في موسم البرد، خاصة في الوحدات المائلة بزاوية 60 درجة.
- جوان وآخرون [70] أجروا تجربة في شيآن بالصين وأظهروا أن تراكم الغبار الطبيعي يؤدي إلى انخفاض بنسبة 20% في النفاذية خلال ثمانية أيام فقط.
- غلامي وآخرون [53] لاحظوا في أصفهان بإيران أن النفاذية النسبية انخفضت بنسبة 20% خلال ثمانية أيام، واستمرت في الانخفاض إلى 25% بعد 70 يومًا بسبب تراكم الغبار، مع تأثير إضافي يتمثل في ارتفاع درجات حرارة الألواح وتقليل كفاءتها. توضح هذه الدراسات أن تراكم الغبار يؤدي إلى انخفاض ملحوظ في نفاذية الألواح الكهروضوئية، مما يقلل من كفاءة الطاقة ويزيد من الحاجة إلى تنظيف وصيانة منتظمة.



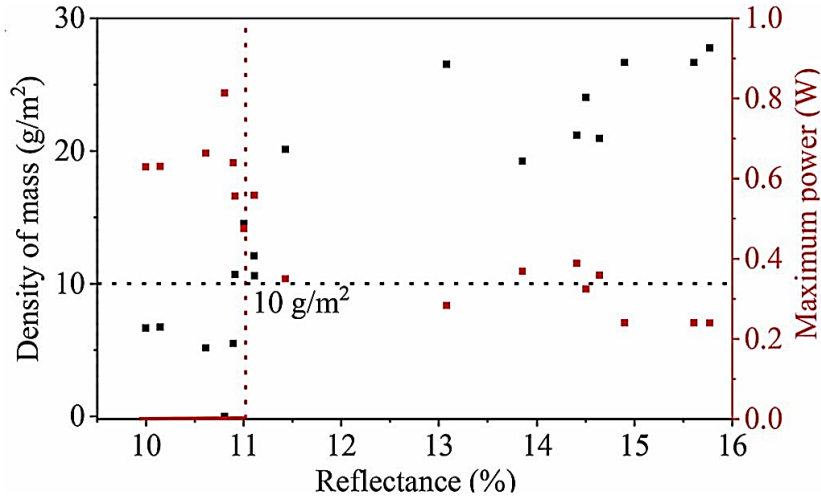
الشكل I.15 انخفاض في نفاذية وحدات الطاقة الكهروضوئية بسبب عينات الغبار ذات الأشكال المختلفة. [67]



الشكل I.16 الانخفاض في النفاذية الناجم عن عينات الغبار ذات الأطوال الموجية المختلفة (430 نانومتر - 710 نانومتر) في دولة الإمارات العربية المتحدة. [68]

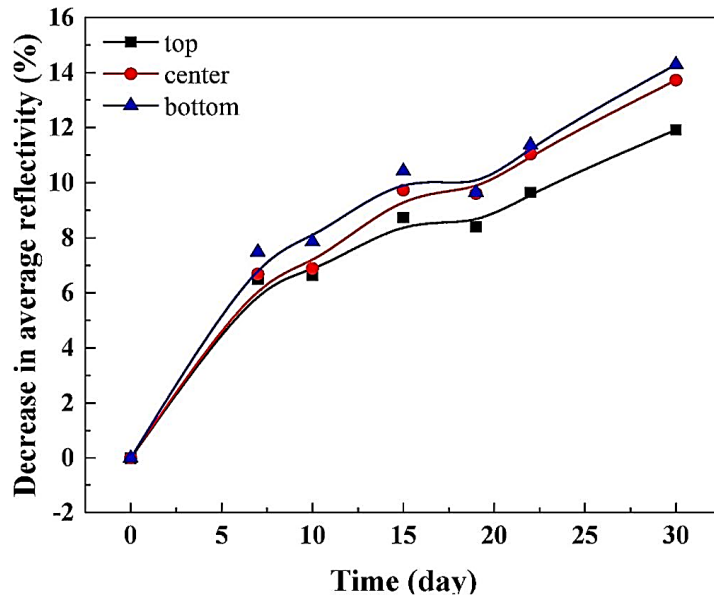
في دراسة ليو وآخرون [71] في الصين، تم فحص العلاقة بين كثافة ترسب الغبار والأداء البصري للألواح الكهروضوئية، حيث تبين أن انعكاسية الألواح انخفضت بنحو 1.1% عند تراكم غبار بكثافة تتراوح من 0 إلى 10 جم/م²، بينما انخفضت نفاذية اللوحة بنسبة كبيرة بلغت حوالي 35%، مما يجعل النفاذية مؤشرًا أكثر ملاءمة لتقييم الخسارة الضوئية لوحدة الطاقة الكهروضوئية **الشكل I.17**. أما Zhao et al [72] فقد درسوا تأثير الغبار على الانعكاسية الشمسية لعاكس فريزل الخطي، ووجدوا أن زيادة كثافة الغبار بمقدار 1 جم/م² خلال 48 يومًا أدت إلى انخفاض متوسط في الانعكاسية بنسبة 9.4%، مع معدل انخفاض أعلى في المرايا المصنوعة من الألومنيوم

مقارنة بالمرآيا الفضية. كما قدموا نموذجًا تنبؤيًا لتأثير تراكم الغبار على الانعكاس النسبي لعواكس فريزل، حيث أظهر النموذج انحرافًا بنحو 1٪ عن نتائج الاختبار. من ناحية أخرى، أجرى Saber et al [73] دراسة في الجبيل الصناعية بالمملكة العربية السعودية على تأثير الغبار على الانعكاس الشمسي لمادة طلاء السقف العاكسة (RCM)، حيث سجلوا انخفاضًا في الانعكاس بمقدار 6.7٪ بعد 91 يومًا من تراكم الغبار، وقدموا تعليمات دقيقة لتقييم تركيز الغبار وإزالة البقايا من أسطح هذه المواد.



الشكل 17.I العلاقة بين انخفاض الانعكاسية وكثافة الكتلة في الصين (مقتبس من المرجع [71]).

في دراسة أجراها وو وآخرون [74] في محطة الطاقة الحرارية الشمسية ذات الحوض المكافئ في هوهوت، الصين، تم تحليل تأثير ترسب الغبار على الانعكاسية في مواقع مختلفة من العاكس، حيث لوحظ أن أكبر انخفاض في الانعكاسية كان عند الحافة السفلية مقارنة بالحواف المركزية والعلوية، مع انخفاضات في متوسط الانعكاسية خلال 30 يومًا بلغت 12٪ عند الحافة العلوية، و14٪ عند الحافة الوسطى، و15٪ عند الحافة السفلية الشكل 18.I. أما عبد الرزاق وآخرون [75] فقد أجروا دراسة في الجزائر على تأثير الغبار على الألواح الشمسية ذات الأغشية الرقيقة، حيث أظهروا أن الغبار يقلل من انعكاسية لوح زجاجي بزوايا 37 درجة بجوالي 7٪.



الشكل 18.I. متوسط انخفاض الانعكاسية لوحدة الطاقة الكهروضوئية في مواقع مختلفة في هوهوت، الصين. [74]

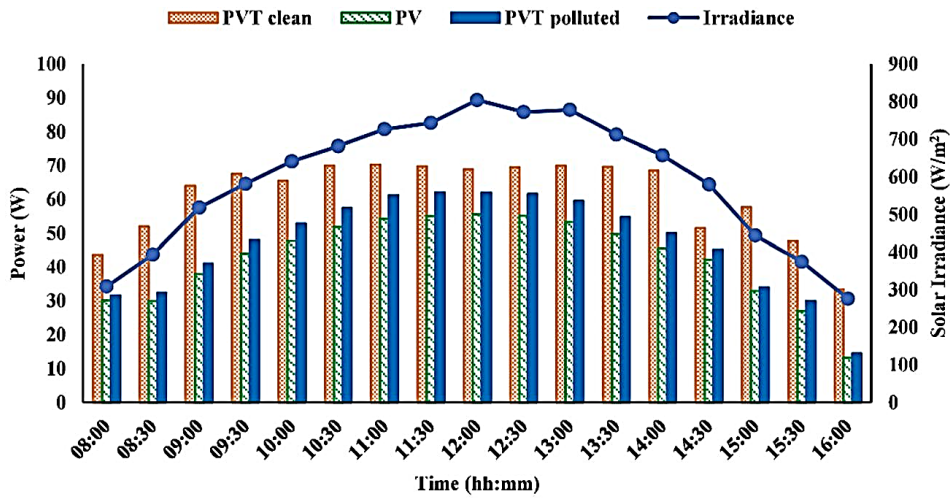
2.1.4.I. تأثير الغبار على المعلمات الكهربائية للطاقة الكهروضوئية

يمكن أن يؤدي ترسب الغبار على أسطح وحدات الطاقة الكهروضوئية إلى خسائر كبيرة في الأداء الكهربائي للألواح الشمسية. أجريت العديد من الدراسات، للتحقق من تأثير الغبار على المعلمات الكهربائية للألواح ومحطاتها، كما هو موضح في الجدول 1.I في تجربة خارجية، قام كاظم وآخرون [76] بتحليل تأثير الغبار على نظام الطاقة الكهروضوئية/الحرارية تحت ظروف الطقس القاسية في منطقة

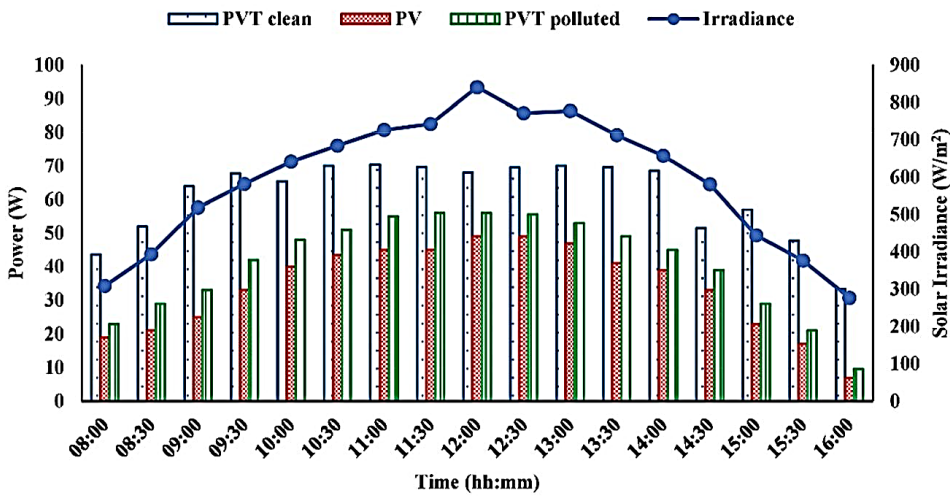
صحار بسلطنة عمان، حيث تم تصميم نظامين: أحدهما يُنظف كل أسبوعين، والآخر يُترك ملوثًا بالغبار. أظهرت النتائج التجريبية في الشكل I.19 أنه بعد 30 يومًا، بلغ متوسط توليد الطاقة اليومية 61.17% للأنظمة الكهروضوئية/الحرارية النظيفة، و46.96% للأنظمة الملوثة، و42.73% للأنظمة التقليدية مقارنة بالطاقة الكهروضوئية القياسية. وبعد 60 يومًا، انخفض المتوسط إلى 60.00%، و38.18%، و33.90% على التوالي، مما يؤكد التأثير الكبير لترسب الغبار على كفاءة الأنظمة الشمسية.

موقع	التركيب/الاسم/الكيمياء	نوع الطاقة الشمسية	النوع
عمان	الغبار طبيعي	النظام الكهروضوئي	طبيعي/خارجي
إيران	الغبار طبيعي	النظام الكهروضوئي	طبيعي/خارجي
الصين	رماد- لا تريت - غبار حجري رملي- مسحوق الفحم- إسمنت	لوحة زجاجية	طبيعي/خارجي
الجزائر	غبار طبيعي	النظام الكهروضوئي	طبيعي/خارجي
الإمارات المتحدة العربية	الكربون-أكسيد الحديد- ثاني أكسيد المنغنيز- أكسيد الكالسيوم- غبار طبيعي	لوحة زجاجية	طبيعي/داخلي

الجدول I.1: ملخص تأثير ترسب الغبار على إعدادات الكهربية الكهروضوئية حسب المنطقة.



(a)



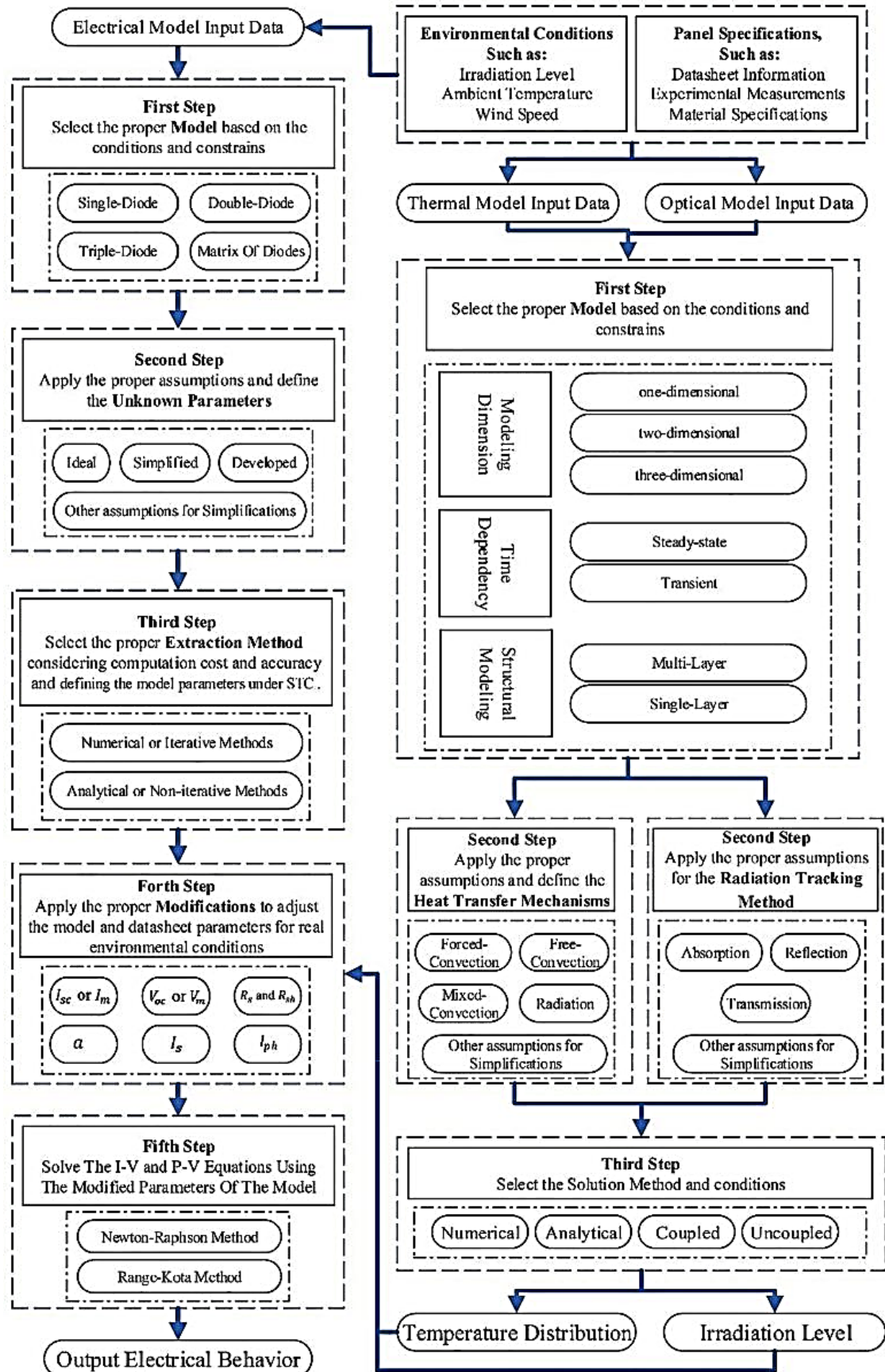
(b)

الشكل I.19 توليد الطاقة من الألواح الكهروضوئية بعد 30 و 60 يوماً من تراكم الغبار في ولاية صحار بسلطنة عمان [76].

قيم اولاه وآخرون [77] فقدان الطاقة الناتج عن ترسب الغبار على الألواح الشمسية في لاهور، باكستان، على مدى 120 يوماً بزوايا ميل مختلفة، حيث تراوح الانخفاض اليومي للطاقة من 1.11٪ عند زاوية 0° إلى 0.11٪ عند زاوية 90°. الألواح ثنائية الوجه أظهرت خسائر مائة، مما يعكس تأثيراً كبيراً للتلوث في المناطق الحضرية في جنوب آسيا والشرق الأوسط. في تجربة بديدا وآخرون، تم قياس تأثير الغبار على وحدات الطاقة الشمسية البلورية في الصحراء الكبرى جنوب شرق الجزائر، حيث تراكم الغبار بكمية 4.36 جم/م² بعد 8 أسابيع، مما أدى إلى انخفاض حمدة الدائرة المفتوحة وتيار الدائرة القصيرة وأقصى طاقة بمعدلات 0.51٪ و 6.10٪ و 8.41٪ على التوالي مقارنة بالوحدات النظيفة. قام Ndeto et al. [18] بدراسة سبعة أشهر في مقاطعة ماشاكوس بكينيا على وحدات طاقة شمسية بزوايا ميل مختلفة، حيث تسبب تراكم الغبار في انخفاض الحد الأقصى للطاقة بنسبة تراوحت بين 1.3٪ و 20.1٪ حسب زاوية الميل. كما أظهرت دراسة ليو وآخرون [71] انخفاض كفاءة تحويل الطاقة الكهروضوئية بشكل كبير مع زيادة كثافة ترسب الغبار، حيث أدى تراكم 14.45 جم/م² من الغبار إلى انخفاض إنتاج الطاقة بجوالي 50٪، مع تراجع ملحوظ في الطاقة القصوى وتيار الدائرة القصيرة الشكل I.20. في الهند، قيمت دراسة لأكشمي وآخرون [78] تأثير أربعة أنواع من الغبار (الفحم، الرمل، غبار الطوب، غبار الطباشير) على وحدات الطاقة الكهروضوئية، وأظهرت خسائر كبيرة في الطاقة تتراوح بين 61.42٪ و 73.51٪، مما يبرز الأثر الضار لترسب الغبار على إنتاج الكهرباء.

3.1.4.I. تأثير الغبار على المعلمات الحرارية للطاقة الكهروضوئية

تأثير تراكم الغبار على الأداء الحراري لأنظمة الطاقة الكهروضوئية يظهر بشكل رئيسي من خلال تغير درجة حرارة وحدة الطاقة، حيث يسبب الغبار توزيعاً غير متساوٍ للحرارة ونقاطاً ساخنة تؤدي إلى انخفاض الكفاءة واحتمال تلف الوحدات [79]. دراسات متعددة تناولت هذا التأثير تجريبياً ونظرياً؛ فعلى سبيل المثال، أظهر عبد الرزاق وآخرون [80] أن الغبار يرفع حرارة الخلايا حتى 10 درجات مئوية بسبب الظلال وتأثير نوع الجسيمات، حيث تساعد الجسيمات ذات الموصلية العالية على تبديد الحرارة، بينما ترفع ذات الموصلية المنخفضة الحرارة. كذلك، أشارت دراسة تشين وآخرون [81] إلى أن طبقة الغبار تعمل كعازل حراري تزيد من درجة حرارة السطح بمقدار متوسط 1 درجة مئوية مع ذروة تصل إلى 2.8 درجة في ساعات الصباح، مما يعيق تبديد الحرارة. في الدراسة التي أجراها Xu et al. [82] في ينتشوان، لوحظ ارتفاع أكبر في درجات حرارة الأسطح العلوية والسفلية للألواح المغبرة مقارنة بالنظيفة، مع تأثير أكبر على السطح السفلي، كما أن زيادة سرعة الرياح ساعدت على تبريد الألواح المغبرة. وبحث الغصين وآخرون [83] تأثير الرياح على تبريد أنواع مختلفة من الألواح الشمسية في القاهرة، حيث خفضت سرعة الرياح درجات الحرارة الشهرية بمعدلات متفاوتة حسب نوع اللوح. بناءً على هذه الدراسات، تم تطوير نماذج لحساب درجات حرارة الخلايا الكهروضوئية تأخذ في الاعتبار العوامل البيئية مثل ترسب الغبار، الإشعاع الشمسي، درجة الحرارة المحيطة، الرطوبة، وسرعة الرياح. غلامي وآخرون [84] قدموا نماذج شبه تجريبية دقيقة للتنبؤ بدرجة حرارة الخلايا مع مراعاة هذه العوامل، مؤكدين تأثير الإشعاع ودرجة الحرارة المحيطة بشكل مباشر، وتأثير عكسي للرطوبة والرياح والغطاء الغباري. كما طُورت طرق استخراج المعلمات وتحسينها لتناسب الظروف البيئية المتغيرة [85.86]. استخدم Sohani et al. [87] البرمجة الوراثية لتحديد أفضل شكل وظيفي للتنبؤ بدرجة حرارة الألواح على مدى عام كامل بأربعة مدخلات بيئية رئيسية. وأخيراً، ركز المختار وآخرون [88] على تأثير الغبار على تشتت الضوء وعززو دقة نماذج التنبؤ بدرجة الحرارة من خلال دمج عوامل بصرية مثل: النفاذية والامتصاص والانبعاثية. الشكل I.20



الشكل 20.1. الدليل خطوة بخطوة لنمذجة سلوك الناتج الكهربائي لنظام الطاقة الكهروضوئية. [86]

2.4.I. نماذج التنبؤ بأداء الطاقة الكهروضوئية

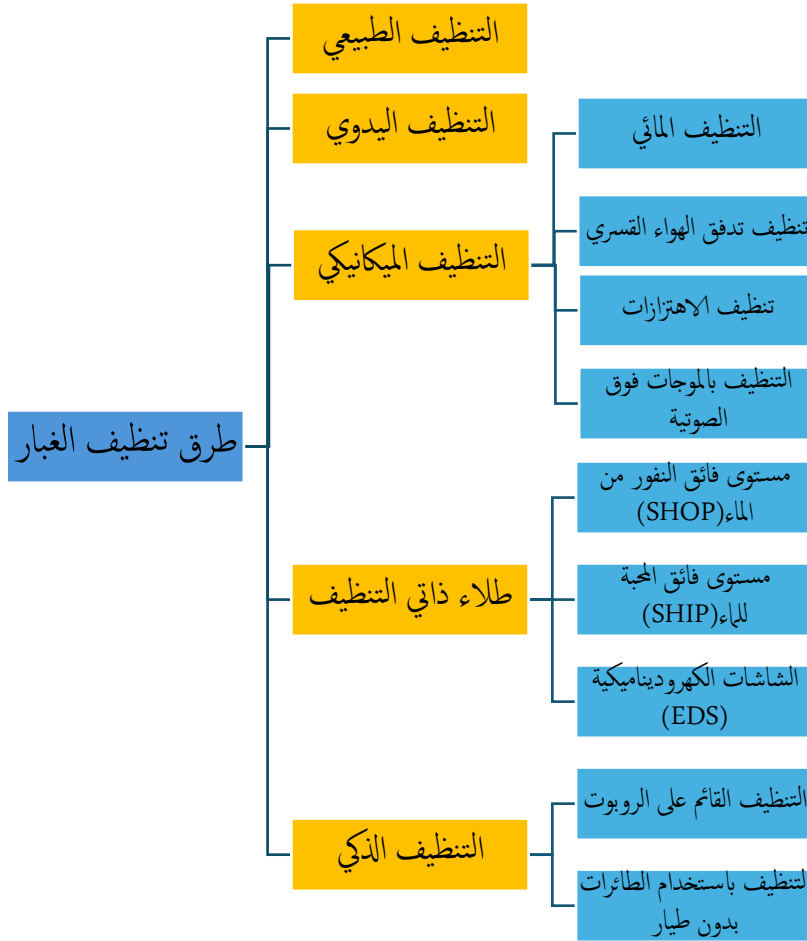
حساب معاملات أداء وحدات الطاقة الكهروضوئية ضروري لتحسين وتصميم أنظمة الطاقة الشمسية، ويتطلب التنبؤ الدقيق بخسائر الأداء الناجمة عن تراكم الغبار وتغير الظروف البيئية نماذج متخصصة كما تناولتها عدة دراسات [89،86،85،90]. تنقسم هذه النماذج إلى قسمين: نمذجة المعلمات البصرية مثل الإشعاع الشمسي، إضعاف الامتصاصية والانعكاسية، وفعالية الألواح المتأثرة بالغبار، ونمذجة المعلمات الكهربائية التي تشمل تأثير الغبار على توليد الطاقة، كفاءة التحويل، جهد الدائرة المفتوحة، تيار الدائرة القصيرة ودرجة حرارة الخلية. تُستخدم هذه النماذج لتحسين التنبؤ بأداء أنظمة الكهروضوئية في ظروف تراكم الغبار **الجدول 2.I.2**.

المعلمة المتوقعة	نوع الطاقة الشمسية	التركيب/الاسم/الكيمياء	موقع
تباين الامتصاصية α	المجمع الحراري	الغبار طبيعي	الصين
الفرق في الكفاءة مع وبدون تأثير الغبار η	النظام الكهروضوئي	الغبار طبيعي	اليابان
إنتاج الطاقة الكهروضوئية $E_{sol \rightarrow PV, Out}$	النظام الكهروضوئي	الغبار الطبيعي	تركيا
كفاءة تحويل الطاقة $E_{mod el}$	متعدد البلورات	الغبار طبيعي	الإمارات العربية المتحدة
تدفقات الغبار F	متعدد البلورات	الرداذ	قطر

الجدول 2.I.2: ملخص نماذج توقع أداء الوحدات الكهروضوئية.

5.I. طرق تنظيف ترسب الغبار

أظهرت الدراسات أن التنظيف المنتظم لتراكم الغبار على الألواح الكهروضوئية يحسن كفاءة توليد الطاقة [90،91-57]. تشمل طرق التنظيف الأساسية: التنظيف الطبيعي، التنظيف اليدوي، التنظيف الميكانيكي، والطلاءات ذاتية التنظيف، والتنظيف الذكي باستخدام الروبوتات والطائرات بدون طيار **الشكل 21.I.1** الغسيل بالماء يحتاج إلى معدات تستهلك طاقة كبيرة، أما النفخ فيقلل استهلاك الماء لكنه قد يسبب تلف الألواح. الاهتزاز والتنظيف بالموجات فوق الصوتية يحتاجان إلى مصادر طاقة خاصة [90،91-57]. الطلاءات الذاتية التنظيف مثل SHIP و SHOP و SHEDS تحتاج ماء أو تدخل بشري لكنها قد تؤثر على كفاءة الألواح وتتطلب تكلفة إضافية.



الشكل 21.1 طريقة تنظيف الغبار من الألواح الكهروضوئية.

مع تطور الذكاء الاصطناعي، تم دمج الطرق الميكانيكية مع خوارزميات ذكية لإنشاء روبوتات وطائرات تنظيف ذكية توفر الموارد البشرية والمادية [92]. وأشار كاظم وآخرون إلى الحاجة لمزيد من الدراسات لتحديد أفضل الطرق من حيث الفعالية والتكلفة.

1.5.I. التنظيف الطبيعي

تؤثر الظواهر الطبيعية مثل هطول الأمطار والرياح بشكل كبير على إزالة الغبار من أسطح الألواح الكهروضوئية [91، 1، 93]. تُعتبر الأمطار منطقتاً طبيعياً فعالاً، حيث تغسل الغبار السطحي [29، 21]. لكن عند نقص كمية الأمطار، لا تكفي بعدم تنظيف الألواح بشكل جيد، بل تسبب أيضاً التصاق جزيئات الغبار، مما يؤدي إلى ظاهرة "التكتل". كما أن المناطق القاحلة وشبه القاحلة لا يمكنها الاعتماد على الأمطار كوسيلة تنظيف موثوقة [57]. من جهة أخرى، تعمل الرياح ذات السرعات العالية على تنظيف الألواح بفعالية عبر زيادة إعادة تعليق الغبار وإزالته [42، 94]، بينما تؤدي الرياح الهادئة إلى إعادة ترسيب الغبار على الألواح، مما يسبب تدهور أدائها [17]. ومع ذلك، وجد جيانج وآخرون [95] أن تنظيف الرياح غير فعال ضد الجسيمات الصغيرة.

2.5.I. التنظيف اليدوي

تتضمن طريقة التنظيف اليدوي استخدام أدوات تنظيف مثل النايلون والقماش وفرشاة رغوة المطاط السيليكوني لإزالة الغبار والأوساخ المتراكمة من الألواح الكهروضوئية، كما هو موضح في الشكل 30. [96] يستخدم هذا النهج عادةً تقنية الفرشاة المستقيمة، والتي تزيل الأوساخ العنيدة والمواد اللاصقة بشكل فعال. [1] يُنصح باستخدام فرش عالية الجودة لمنع أي ضرر محتمل للألواح الشمسية.



الشكل 22.I. التنظيف اليدوي. [96]

لوحات. [57،97] ومع ذلك، فإن التنظيف اليدوي يتطلب عمالة ماهرة واستخدامًا كبيرًا للمياه [93،91،58،98]، مما يجعله مكلفًا وأكثر ملاءمة لأنظمة الطاقة الكهروضوئية الصغيرة الحجم. [99]

3.5.I. التنظيف باستخدام الماء

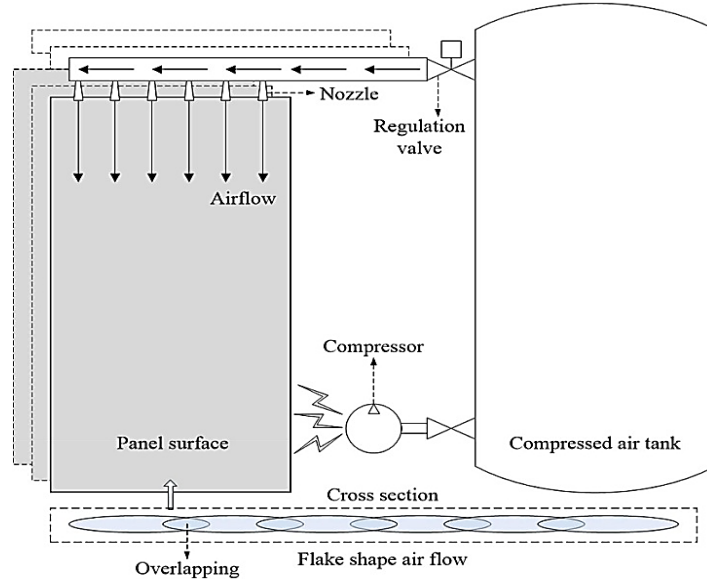
تقنية التنظيف القائمة على الماء هي طريقة ميكانيكية شائعة لتنظيف الألواح الكهروضوئية عبر رش ماء عالي الضغط بواسطة فوهة متصلة بخزان ومضخة وخرطوم، مما يزيل الغبار بفعالية [29،100،101][91]. أحيانًا يُخلط الماء مع عوامل تنظيف لتعزيز الإزالة [103-102]، كما يساهم الماء في تبريد الألواح [91،104]. مع ذلك، هذه التقنية غير ملائمة للمناطق شبه القاحلة والجافة بسبب ندرة المياه [57]. كما أن مضخات الماء عالية الضغط تستهلك طاقة من الكهرباء المنتجة، وقد يؤدي وجود السطح الرطب لجذب المزيد من الغبار، مما يقلل كفاءة الألواح. كما أن استخدام ماء بارد لتنظيف الألواح الساخنة قد يسبب صدمة حرارية تضر بها. [1،91]



الشكل 23.I. التنظيف القائم على الماء. [105]

4.5.I. تنظيف تدفق الهواء القسري

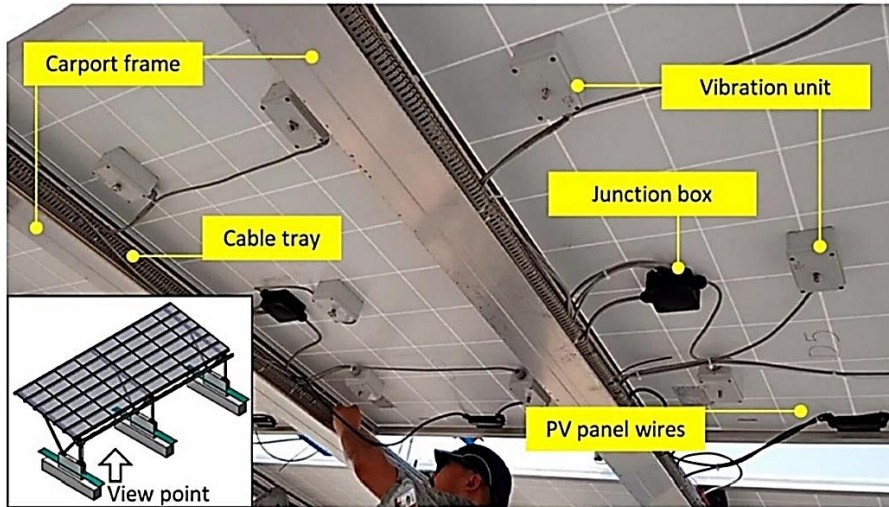
طريقة التنظيف بتدفق الهواء القسري هي تقنية ميكانيكية تستخدم جهاز هواء مضغوط مكون من ضاغط، صمام تدفق الهواء، خزان تخزين وفوهة [106] الشكل 24.I. يُشغل الضاغط بواسطة الطاقة المولدة من الألواح الكهروضوئية، ويوجه الهواء المضغوط لإزالة الغبار من سطح الوحدات بفعالية [108،22،107]. تتميز هذه الطريقة بعدم اعتمادها على المياه، مما يجعلها مناسبة للمناطق القاحلة وشبه القاحلة ذات درجات حرارة مرتفعة ومياه محدودة، كما يساهم الهواء المبرد في تحسين تبريد الألواح وبالتالي أداءها [109]. لكن تشغيل الضاغط يستهلك جزءًا من الكهرباء المولدة، مما قد يؤثر على كفاءة النظام.



الشكل 24.I. تنظيف تدفق الهواء القسري. [106]

5.5.I. التنظيف بالاهتزاز

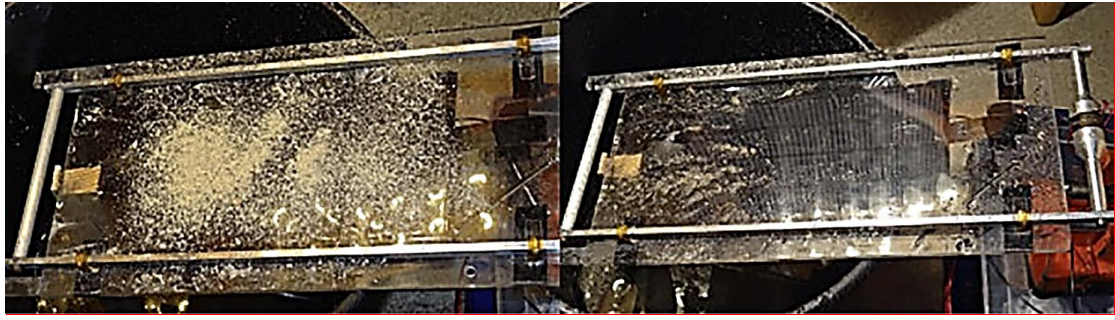
تستخدم طرق التنظيف الاهتزازي تقنية كهربائية ضغطية لتوليد اهتزازات ميكانيكية على سطح الوحدات الشمسية، تعمل على تخفيف التصاق جزيئات الغبار وإزالتها بفعالية دون الإضرار بالزجاج [108، 25، 101، 110، 111]. يُثبت جهاز الاهتزاز عادةً على الجزء الخلفي من اللوحة لتحفيز تردد اهتزاز أساسي، مما يتيح تنظيفًا ذاتيًا دون الحاجة إلى الماء أو العمل اليدوي، ويستعيد بذلك كفاءة توليد الطاقة لوحدة الطاقة الكهروضوئية إلى حوالي 95%.



الشكل 25.I. التنظيف بالاهتزاز. [101]

6.5.I. التنظيف بالموجات فوق الصوتية

تعتمد تقنية التنظيف بالموجات فوق الصوتية على ظاهرة التجويف الصوتي في السوائل لإزالة الملوثات مثل الأوساخ والشحوم من الأسطح، بما فيها الألواح الكهروضوئية [112، 91]. تتميز هذه التقنية بقدرتها على الوصول إلى الشقوق المعقدة وإزالة الجزيئات الدقيقة جداً بفعالية عالية، حيث يُستخدم تردد يتراوح بين 20 و80 كيلو هرتز في التنظيف [113] الشكل 26.I. ومع ذلك، تتطلب هذه الطريقة عادةً مصدر طاقة متخصص لتنفيذها. [91]



الشكل I.26. التنظيف بالموجات فوق الصوتية [113]

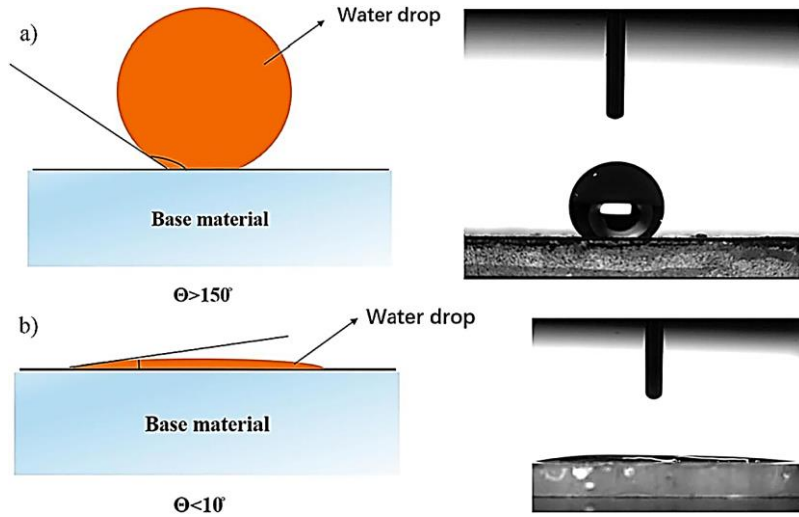
7.5.I. طلاء التنظيف الذاتي

1.7.5.I. طلاء فائق الكراهية للماء (SHOP)

تستند الطلاءات فائقة الكراهية للماء إلى "تأثير ورقة اللوتس" حيث تتجاوز زاوية التلامس بين قطرة الماء والسطح 150 درجة، مما يسمح بتدحرج قطرات الماء بسهولة على وحدات الطاقة الكهروضوئية وحمل الغبار معها، خاصة أثناء الأمطار، مما يحقق تنظيفًا ذاتيًا فعالاً [50، 114، 40]. تتميز هذه الطلاءات بخصائص مقاومة للتلوث دون الحاجة إلى تدخل بشري أو استهلاك طاقة، كما تقلل من تراكم الغبار وتحسن نفاذية الضوء وكفاءة الوحدة [116-51، 115]. لكنها أقل فعالية في البيئات الجافة ولها عمر محدود بسبب تعرضها للأشعة فوق البنفسجية العالية، مما قد يسبب تدهورها مع الوقت. [98، 118، 57، 117، 58، 49]

2.7.5.I. الطلاء فائق المحبة للماء (SHIP)

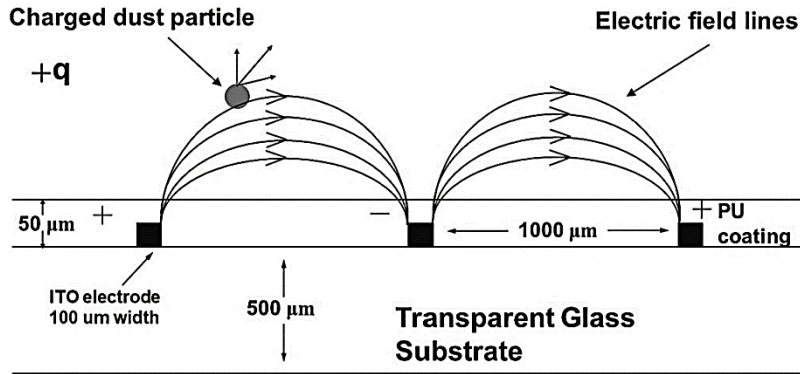
تستند الطلاءات فائقة المحبة للماء إلى عملية التحفيز الضوئي المستوحاة من التركيب الضوئي في الأوراق الخضراء، حيث يكسر ضوء الشمس الغبار والملوثات على وحدات الطاقة الكهروضوئية. عندما تكون زاوية الاتصال أقل من 10 درجات، تنتشر قطرات الماء بشكل موحد على السطح، مما يساعد على إزالة الغبار عبر مياه الأمطار، في ظاهرة تنظيف ذاتي لا تحتاج إلى طاقة خارجية أو تدخل بشري. هذه الطلاءات تقلل تراكم الغبار وتعزز كفاءة توليد الطاقة، لكنها تتطلب شدة ضوء مناسبة لتعمل بفعالية، وتفقد جزءًا من فعاليتها في الإضاءة المنخفضة. كما أن تدهور الطلاء مع الزمن والتعرض للأشعة فوق البنفسجية يزيد من تراكم الغبار، مما قد يستدعي التنظيف اليدوي خاصة في الظروف الجافة. [117، 50، 38، 46، 98، 114، 118-119]



الشكل I.27. طلاء التنظيف الذاتي. (أ) طلاء شديد الكراهية للماء، (ب) طلاء شديد المحبة للماء [120].

3.7.5.I. الشاشات الكهروديناميكية (EDS)

تُستخدم الشاشة الكهروديناميكية (EDS) لإزالة الغبار تلقائيًا عبر القوة الكهروستاتيكية، حيث تتكوّن من أقطاب كهربائية شفافة على ركيزة زجاجية. عند تطبيق جهد، تُشحن جسيمات الغبار كهربائيًا نتيجة لتبادل الشحنات بين ذرات السطح، ثم تُزال بفعل المجال الكهربائي المتحرك. وقد أثبتت دراسات فعاليتها في تنظيف أسطح الألواح الكهروضوئية. [121–122]



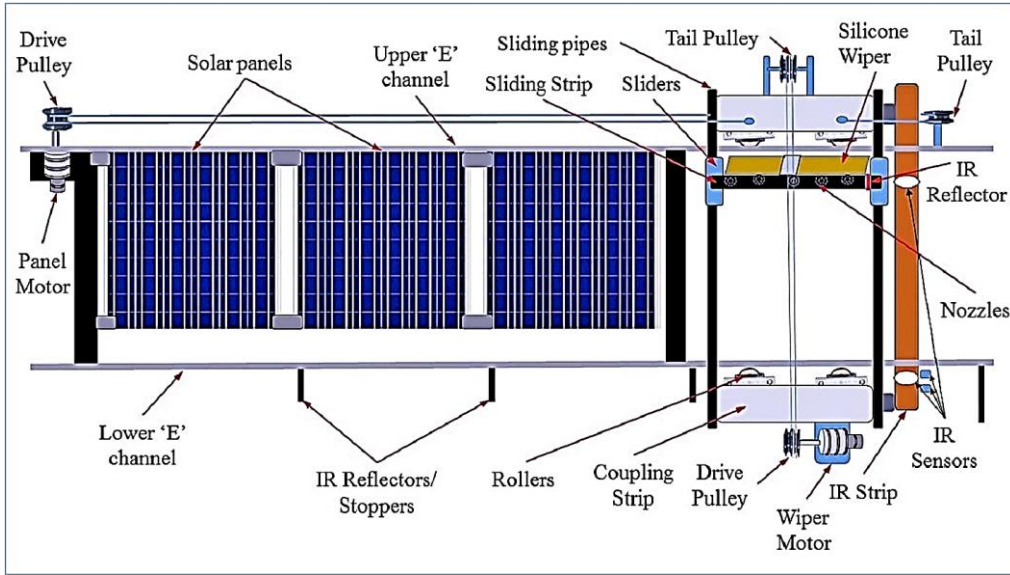
الشكل 28.I الشاشات الكهروديناميكية (EDS) (مقتبسة من المرجع [122]).

تُعد تقنية إزالة الغبار باستخدام الأنظمة الكهروستاتيكية (EDS) فعالة في إزالة ما يصل إلى 90٪ من الغبار المتراكم على الألواح الكهروضوئية خلال أقل من دقيقتين، دون الحاجة إلى استخدام الماء أو العمالة [123، 58، 121–124]، مما يجعلها مناسبة بشكل خاص للمناطق الجافة والقاحلة والصحراوية [112، 117]. ومع ذلك، فإن فعاليتها تقل عند التعامل مع جزيئات الغبار الرطبة أو الدقيقة [117، 112، 1، 58، 126–127]، مما استدعى اقتراح تحسينات مختلفة [107، 128]. كما أن الاعتماد على مصدر طاقة عالي الجهد لتوليد المجال الكهربائي اللازم يؤدي إلى تقليل كفاءة توليد الطاقة بنسبة تصل إلى 15٪ [117، 58، 98].

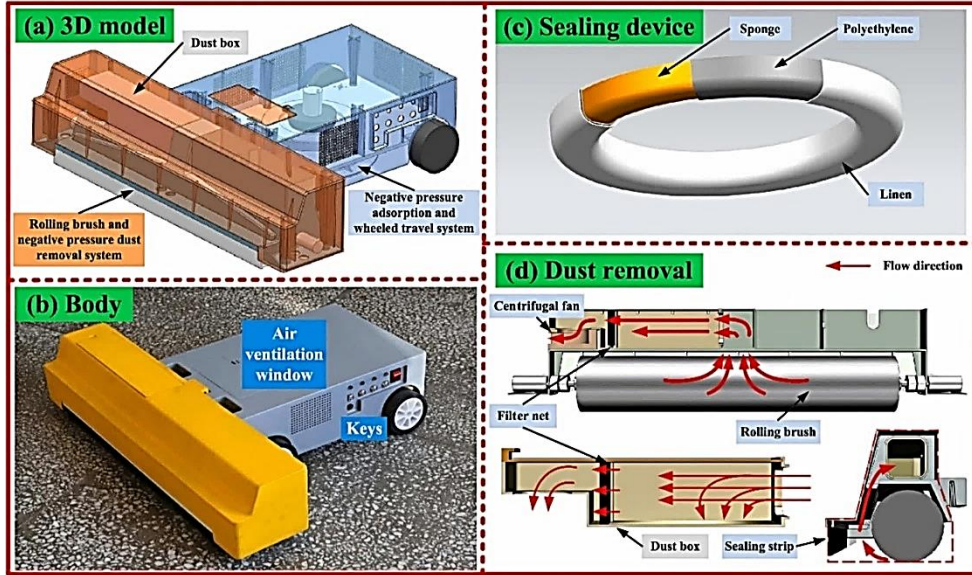
8.5.I. التنظيف الذكي

1.8.5.I. التنظيف باستخدام الروبوت

تُجسّد تقنيات التنظيف الآلية التكامل الذكي في عمليات تنظيف الألواح الكهروضوئية من خلال استخدام أذرع آلية وحاملات مستقلة مزودة بميزات مثل الشحن اللاسلكي والتشغيل الليلي [129، 103، 97–130]. في دراسة لغودي وآخري [131]، طُوّر نظام تنظيف آلي بذراع روبوتية يستخدم أجهزة استشعار بالأشعة تحت الحمراء ومسحة سيليكونية بمحركات PWM لتنظيف فعال في ظروف مختلفة. كما قدّم فان وآخرون [132] روبوتًا دون ماء مصممًا للبيئات قليلة الموارد المائية، مع تحسينات في التصميم والمواد لزيادة كفاءته وقدرته على التعامل مع الانحدارات والعوائق. تدعم هذه الابتكارات صيانة وتشغيلًا ذكيًا وفعالًا لأنظمة الطاقة الكهروضوئية.



الشكل I.29 روبوت التنظيف مع وحدة التجميع. [131]



الشكل I.30 روبوت التنظيف بدون ماء لأنظمة الطاقة الكهروضوئية الموزعة. [132]

يُعد التنظيف الآلي تقنية متقدمة تحاكي الحركات البشرية وتوفر تنظيفًا مستمرًا وسريعًا للألواح الكهروضوئية، مما يحسن كفاءة التنظيف بشكل كبير. ومع ذلك، فإن تطبيق هذه التقنية يتطلب استثمارات أولية وتشغيلية مرتفعة بسبب تعقيد التصميمات الميكانيكية وأنظمة التحكم [117]. وفي المقابل، ظهرت تقنية التنظيف باستخدام الطائرات بدون طيار كخيار ذكي وفعال، حيث تتيح مراقبة الألواح عن بُعد، وتسجيل البيانات بكفاءة، وتنفيذ عمليات التفتيش والتنظيف بسهولة. [133، 134] الشكل I.31



الشكل 31.I. تنظيف الطائرات بدون طيار. [133]

تم تطوير طائرة بدون طيار هجينة مجهزة لتنظيف الألواح الشمسية كما في دراسة سركيس وآخرون [135]، حيث تندرج على سطح الألواح وتنتقل طائرًا بين الخلايا. في المقابل، استخدم المهندس وآخرون [136] الدفع الهابط الناتج عن تخليق الطائرة بدون طيار على ارتفاع معين لإزالة الغبار، وأظهروا أن الطيران الأفقي هو الأكثر كفاءة في استهلاك الطاقة مقارنة بالرأسي. كما دمج الحسيني وآخرون [137] تقنيات تنظيف مختلفة، مثل الماسح والفرش والمكانس الكهربائية، مع الطائرات بدون طيار، وأظهرت النتائج أن مسحات وفرش الألياف الدقيقة هي الأفضل نظرًا لخفة وزنها. وتوفر هذه الطائرات مرونة واستقلالية عالية، مع إمكانية التشغيل في مختلف الظروف الجوية، مستفيدة من التحليل الفوري والبيانات والتعلم الآلي وتوليد الصور. ومع ذلك، أشار الباحثون إلى محدودية قدرة هذه الطائرات على حمل محاليل التنظيف، بالإضافة إلى قصر زمن الطيران وسرعة نفاذ البطارية.

6.I. الخاتمة

يتسبب تراكم الغبار في تدهور كبير لأداء وحدات الطاقة الكهروضوئية، ويتأثر ذلك بعوامل مثل البيئة وخصائص الغبار وتصميم الوحدة. لذا، من الضروري اختيار طرق تنظيف فعالة وصيانتها بشكل دوري. لتقييم الفقد في الأداء بدقة، يجب تطوير نماذج رياضية تأخذ في الحسبان ترسب الغبار والظروف البيئية، إلى جانب مراقبة اتساخ الألواح في الوقت الفعلي لتحسين التنظيف. تستعرض الدراسة خصائص الغبار وتأثيراته السلبية، وآليات ترسبه. كما توضح أن ترسب الغبار يتأثر بحجم الجزيئات، حيث يزداد في البداية مع زيادة الحجم ثم ينخفض لاحقًا. الغبار المتراكم يشكل طبقة تقلل الضوء الواصل، مما يؤدي إلى انخفاض كبير في كفاءة الألواح.

قائمة المراجع:

- [1]H.Z. Al Garni, The Impact of Soiling on PV Module Performance in Saudi Arabia, *Energies* 15 (21) (2022) 8033.
- [2]X.Q. Liu, S. Yue, L.Y. Lu, J.L. Li, Investigation of the Dust Scaling Behaviour on Solar Photovoltaic Panels, *J. Clean. Prod.* 295 (2021) 126391.
- [3]Y.Y. Quan, L.Z. Zhang, R.H. Qi, R.R. Cai, Self-cleaning of Surfaces: the Role of Surface Wettability and Dust Types, *Sci. Rep.* 6 (2016) 38239.
- [4]J.C. Lu, S. Hajimirza, Optimizing sun-tracking angle for higher irradiance collection of PV panels using a particle-based dust accumulation model with gravity effect, *Sol. Energy* 158 (2017) 71–82.
- [5]S. Aramrak, M. Flury, J.B. Harsh, Detachment of Deposited Colloids by Advancing and Receding Air-Water Interfaces, *Langmuir* 27 (16) (2011) 9985–9993.
- [6]O. Pitois, X. Chateau, Small particle at a fluid interface: Effect of contact angle hysteresis on force and work of detachment, *Langmuir* 18 (25) (2002) 9751–9756.
- [7]R.J. Isaifan, D. Johnson, L. Ackermann, B. Figgis, M. Ayoub, Evaluation of the adhesion forces between dust particles and photovoltaic module surfaces, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 191 (2019) 413–421.
- [8]Y.N. Chanchangi, A. Ghosh, S. Sundaram, T.K. Mallick, Dust and PV Performance in Nigeria: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 121 (2020).
- [9]H. Choi, H. Kim, S. Hwang, W. Choi, M. Jeon, Dye-sensitized solar cells using graphene-based carbon nano composite as counter electrode, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 95 (1) (2011) 323–325.
- [10]B. Figgis, B. Brophy, PV coatings and particle adhesion forces, *Conference Proceedings PV-Days Halle* (2015) 1–9.
- [11]H.R. Moutinho, C.S. Jiang, B. To, C. Perkins, M. Muller, M.M. Al-Jassim, L. Simpson, Adhesion mechanisms on solar glass: Effects of relative humidity, surface roughness, and particle shape and size, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 172 (2017) 145–153.
- [12]W.X. Yao, X. Han, Y. Huang, Z.M. Zheng, Y. Wang, X. Wang, Analysis of the influencing factors of the dust on the surface of photovoltaic panels and its weakening law to solar radiation d A case study of Tianjin, *Energy* 256 (2022) 124669.
- [13]H. Pedersen, J. Strauss, J. Selj, Effect of soiling on photovoltaic modules in Norway, *Proceedings of the 6th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics (Siliconpv 2016)* 92 (2016) 585–589.
- [14]S. Sengupta, S. Sengupta, C.K. Chanda, H. Saha, Modeling the Effect of Relative Humidity and Precipitation on Photovoltaic Dust Accumulation Processes, *IEEE J. Photovoltaics* 11 (4) (2021) 1069–1077.
- [15]R. Conceicao, I. Vazquez, L. Fialho, D. Garcia, Soiling and rainfall effect on PV technology in rural Southern Europe, *Renew. Energy* 156 (2020) 743–747.
- [16]M. Jaszczur, A. Koshti, W. Nawrot, P. Sedor, An investigation of the dust accumulation on photovoltaic panels, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27 (2) (2020) 2001–2014.
- [17]S.A.M. Said, G. Hassan, H.M. Walwil, N. Al-Aqeeli, The effect of environmental factors and dust accumulation on photovoltaic modules and dust-accumulation mitigation strategies, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82 (2018) 743–760.

- [18]M.P. Ndeto, D.W. Wekesa, F. Njoka, R. Kinyua, Correlating dust deposits with wind speeds and relative humidity to overall performance of crystalline silicon solar cells: An experimental study of Machakos County, Kenya, *Sol. Energy* 246 (2022) 203–215.
- [19]S. Yue, M. Li, Study on the formation and evolution mechanism of dust deposition on solar photovoltaic panels, *Chem. Pap.* 76 (2) (2022) 763–774.
- [20]Y.Y. Wu, S.Y. Wu, L. Xiao, Numerical study on convection heat transfer from inclined PV panel under windy environment, *Sol. Energy* 149 (2017) 1–12.
- [21]M. Abdolzadeh, R. Nikkhah, Experimental study of dust deposition settled over tilted PV modules fixed in different directions in the southeast of Iran, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 26 (30) (2019) 31478–31490.
- [22]D.C. Li, M. King, M. Dooner, S.S. Guo, J.H. Wang, Study on the cleaning and cooling of solar photovoltaic panels using compressed airflow, *Sol. Energy* 221 (2021) 433–444.
- [23]B. Raillani, D. Chaatouf, M. Salhi, S. Amraoui, A. Mezrhab, Effect of wind barrier height on the dust deposition rate of a ground-mounted photovoltaic panel, *Sustainable Energy Technol. Assess.* 52 (2022) 102035.
- [24]K.K. Ilse, B.W. Figgis, M. Werner, V. Naumann, C. Hagendorf, H. Pollmann, J. Bagdahn, Comprehensive analysis of soiling and cementation processes on PV modules in Qatar, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 186 (2018) 309–323.
- [25]J. Tanesab, D. Parlevliet, J. Whale, T. Urmee, T. Pryor, The contribution of dust to performance degradation of PV modules in a temperate climate zone, *Sol. Energy* 120 (2015) 147–157.
- [26]A.A. Kazem, M.T. Chaichan, H.A. Kazem, Dust effect on photovoltaic utilization in Iraq: Review article, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 37 (2014) 734–749.
- [27]B. Figgis, A. Ennaoui, S. Ahzi, Y. Remond, Review of PV soiling particle mechanics in desert environments, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 76 (2017) 872–881.
- [28]B.S. Yilbas, H. Ali, A. Al-Sharafi, N. Al-Aqeeli, N. Abu-Dheir, F. Al-Sulaiman, M. Khaled, Characteristics of a solar selective absorber surface subjected to environmental dust in humid air ambient, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 172 (2017) 186–194.
- [29]H.A. Kazem, M.T. Chaichan, The effect of dust accumulation and cleaning methods on PV panels' outcomes based on an experimental study of six locations in Northern Oman, *Sol. Energy* 187 (2019) 30–38.
- [30]J. Zorrilla-Casanova, M. Piliouline, J. Carretero, P. Bernaola-Galvan, P. Carpena, L. Mora-Lopez, M. Sidrach-de-Cardona, Losses produced by soiling in the incoming radiation to photovoltaic modules, *Prog Photovoltaics* 21 (4) (2013) 790–796.
- [31]S. Ghazi, K. Ip, The effect of weather conditions on the efficiency of PV panels in the southeast of UK, *Renew. Energy* 69 (2014) 50–59.
- [32]S. Oh, B.W. Figgis, S. Rashkeev, Effects of thermophoresis on dust accumulation on solar panels, *Sol. Energy* 211 (2020) 412–417.
- [33]H. Lu, L. Lu, Y.H. Wang, Numerical investigation of dust pollution on a solar photovoltaic (PV) system mounted on an isolated building, *Appl. Energy* 180 (2016) 27–36.
- [34]H. Lu, L.Z. Zhang, Influences of dust deposition on ground-mounted solar photovoltaic arrays: A CFD simulation study, *Renew. Energy* 135 (2019) 21–31.

- [35]H. Lu, L.Z. Zhang, Numerical study of dry deposition of monodisperse and polydisperse dust on building-mounted solar photovoltaic panels with different roof inclinations, *Sol. Energy* 176 (2018) 535–544.
- [36]H.T. Peng, H. Lu, X.Q. Chang, C.X. Zheng, Y.L. Wang, 3D CFD modelling of dust deposition characteristics and influences on building-mounted photovoltaic system, *Case Stud. Therm. Eng.* 35 (2022) 102138.
- [37]H. Lu, W.J. Zhao, CFD prediction of dust pollution and impact on an isolated ground mounted solar photovoltaic system, *Renew. Energy* 131 (2019) 829–840.
- [38]L.L. Kazmerski, A.S.A.C. Diniz, C.B. Maia, M.M. Viana, S.C. Costa, P.P. Brito, C.D. Campos, L.V.M. Neto, S.D. Hanriot, L.R.D. Cruz, Fundamental Studies of Adhesion of Dust to PV Module Surfaces: Chemical and Physical Relationships at the Microscale, *IEEE J. Photovoltaics* 6 (3) (2016) 719–729.
- [39]H.F. Varga, M.R. Wiesner, Effect of Dust Composition on the Reversibility of Photovoltaic Panel Soiling, *Environ. Sci. Tech.* 55 (3) (2021) 1984–1991.
- [40]H. Lu, R.R. Cai, L.Z. Zhang, L. Lu, L.F. Zhang, Experimental investigation on deposition reduction of different types of dust on solar PV cells by self-cleaning coatings, *Sol. Energy* 206 (2020) 365–373.
- [41]H. Lu, S.W. Liang, Reduction of Dust Deposition on Solar Photovoltaic Cells by Self-Cleaning Coating: Experimental Study of Influencing Factors, *Energy Technol.* 9 (2) (2021) 2000795.
- [42]M.M. Dagher, H.A. Kandil, Computational prediction of dust deposition on solar panels, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 30 (5) (2023) 12545–12557.
- [43]F.G. Liu, Z. Zhang, Y.Z. Zhao, Z.W. Zhu, W.C. Pan, L. Wang, X.E. Bin, A Method of Calculating the Daily Output Power Reduction of PV Modules Due to Dust Deposition on Its Surface, *IEEE J. Photovoltaics* 9 (3) (2019) 881–887.
- [44]X.Q. Liu, S. Yue, L.Y. Lu, J.L. Li, Study on Dust Deposition Mechanics on Solar Mirrors in a Solar Power Plant, *Energies* 12 (23) (2019) 4550.
- [45]J.K. Kaldellis, P. Fragos, Ash deposition impact on the energy performance of photovoltaic generators, *J. Clean. Prod.* 19 (4) (2011) 311–317.
- [46]F. Lisco, F. Bukhari, S. Ulicna, K. Isbilir, K.L. Barth, A. Taylor, J.M. Walls, Degradation of Hydrophobic, Anti-Soiling Coatings for Solar Module Cover Glass, *Energies* 13 (15) (2020) 3811.
- [47]X.Q. Liu, S. Yue, J.L. Li, L.Y. Lu, Study of a dust deposition mechanism dominated by electrostatic force on a solar photovoltaic module, *Sci. Total Environ.* 754 (2021) 142241.
- [48]H. Lu, W.J. Zhao, Effects of particle sizes and tilt angles on dust deposition characteristics of a ground-mounted solar photovoltaic system, *Appl. Energy* 220 (2018) 514–526.
- [49]A.A. Babatunde, S. Abbasoglu, M. Senol, Analysis of the impact of dust, tilt angle and orientation on performance of PV Plants, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 90 (2018) 1017–1026.
- [50]B.H. He, H. Lu, C.X. Zheng, Y.L. Wang, Characteristics and cleaning methods of dust deposition on solar photovoltaic modules-A review, *Energy* 263 (2023) 126083.
- [51]L.Z. Zhang, A.J. Pan, R.R. Cai, H. Lu, Indoor experiments of dust deposition reduction on solar cell covering glass by transparent super-hydrophobic coating with different tilt angles, *Sol. Energy* 188 (2019) 1146–1155.
- [52]A.A. Hachicha, I. Al-Sawafta, Z. Said., Impact of dust on the performance of solar photovoltaic (PV) systems under United Arab Emirates weather conditions, *Renew. Energy* 141 (2019) 287–297.

- [53] A. Gholami, A. Saboonchi, A.A. Alemrajabi, Experimental study of factors affecting dust accumulation and their effects on the transmission coefficient of glass for solar applications, *Renew. Energy* 112 (2017) 466–473.
- [54] W.P. Zhao, Y.K. Lv, Q.W. Zhou, W.P. Yan, Collision-adhesion mechanism of particles and dust deposition simulation on solar PV modules, *Renew. Energy* 176 (2021) 169–182.
- [55] H. Heydarabadi, M. Abdolzadeh, K. Lari, Simulation of airflow and particle deposition settled over a tilted Photovoltaic module, *Energy* 139 (2017) 1016–1029.
- [56] A. Khodakaram-Tafti, M. Yaghoubi, Experimental study on the effect of dust deposition on photovoltaic performance at various tilts in semi-arid environment, *Sustainable Energy Technol. Assess.* 42 (2020) 100822.
- [57] Y.N. Chanchangi, A. Ghosh, S. Sundaram, T.K. Mallick, Dust and PV Performance in Nigeria: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 121 (2020) 109704.
- [58] W.J. Jamil, H.A. Rahman, S. Shaari, Z. Salam, Performance degradation of photovoltaic power system: Review on mitigation methods, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 67 (2017) 876–891.
- [59] H. Jiang, L. Lu, K. Sun, Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance of solar photovoltaic (PV) modules, *Atmos. Environ.* 45 (25) (2011) 4299–4304.
- [60] F.M. Zaihidee, S. Mekhilef, M. Seyedmahmoudian, B. Horan, Dust as an unalterable deteriorative factor affecting PV panel's efficiency: Why and how, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 65 (2016) 1267–1278.
- [61] A. Gholami, A.A. Alemrajabi, A. Saboonchi, Experimental study of self-cleaning property of titanium dioxide and nanospray coatings in solar applications, *Sol. Energy* 157 (2017) 559–565.
- [62] H.A. Kazem, M.T. Chaichan, A.H.A. Al-Waeli, K. Sopian, Effect of dust and cleaning methods on mono and polycrystalline solar photovoltaic performance: An indoor experimental study, *Sol. Energy* 236 (2022) 626–643.
- [63] S.Y. Fan, X. Wang, S.X. Cao, Y. Wang, Y.H. Zhang, B.Z. Liu, A novel model to determine the relationship between dust concentration and energy conversion efficiency of photovoltaic (PV) panels, *Energy* 252 (2022) 123927.
- [64] S. Ghazi, A. Sayigh, K. Ip, Dust effect on flat surfaces - A review paper, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 33 (2014) 742–751.
- [65] S. Ghazi, A. Sayigh, K. Ip, Dust effect on flat surfaces - A review paper, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 33 (2014) 742–751.
- [66] P.K. Enaganti, A. Bhattacharjee, A. Ghosh, Y.N. Chanchangi, C. Chakraborty, T.K. Mallick, S. Goel, Experimental investigations for dust build-up on low-iron glass exterior and its effects on the performance of solar PV systems, *Energy* 239 (2022) 122213.
- [67] Z. Wu, S.Y. Yan, T.Z. Ming, X.Y. Zhao, N. Zhang, Analysis and modeling of dust accumulation-composed spherical and cubic particles on PV module relative transmittance, *Sustainable Energy Technol. Assess.* 44 (2021) 101015.
- [68] R. Dhaouadi, A. Al-Othman, A.A. Aidan, M. Tawalbeh, R. Zannerni, A characterization study for the properties of dust particles collected on photovoltaic (PV) panels in Sharjah, United Arab Emirates, *Renew. Energy* 171 (2021) 133–140.
- [69] P. Erdenedavaa, A. Akisawa, A. Adiyabat, E. Otgonjanchiv, Observation and modeling of dust deposition on glass tube of evacuated solar thermal collectors in Mongolia, *Renew. Energy* 130 (2019) 613–621.

- [70] Y.L. Guan, H. Zhang, B. Xiao, Z. Zhou, X.Z. Yan, In-situ investigation of the effect of dust deposition on the performance of polycrystalline silicon photovoltaic modules, *Renew. Energy* 101 (2017) 1273–1284.
- [71] L. Liu, H.C. Qian, E.H. Sun, B. Li, Z.H. Zhang, B.P. Miao, Z.H. Li, Power reduction mechanism of dust-deposited photovoltaic modules: An experimental study, *J. Clean. Prod.* 378 (2022) 134518.
- [72] X.Y. Zhao, Z. Chen, S.Y. Yan, T.Z. Ming, Z. Wu, R. Ma, Influence of Dust Accumulation on the Solar Reflectivity of a Linear Fresnel Reflector, *J. Therm. Sci.* 30 (5) (2021) 1526–1540.
- [73] H.H. Saber, A.E. Hajiah, S.A. Alshehri, H.J. Hussain, Investigating the Effect of Dust Accumulation on the Solar Reflectivity of Coating Materials for Cool Roof Applications, *Energies* 14 (2) (2021) 455.
- [74] Z. Wu, S.Y. Yan, Z.F. Wang, T.Z. Ming, X.Y. Zhao, R. Ma, Y.T. Wu, The effect of dust accumulation on the cleanliness factor of a parabolic trough solar concentrator, *Renew. Energy* 152 (2020) 529–539.
- [75] M. Abderrezek, M. Fathi, Effect of Dust Deposition on the Performance of Thin Film Solar Cell, *Elektron Elektrotech* 24 (1) (2018) 41–45.
- [76] H.A. Kazem, M.T. Chaichan, A.H.A. Al-Waeli, R. Al-Badi, M.A. Fayad, A. Gholami, Dust impact on photovoltaic/thermal system in harsh weather conditions, *Sol. Energy* 245 (2022) 308–321.
- [77] A. Ullah, A. Amin, T. Haider, M. Saleem, N.Z. Butt, Investigation of soiling effects, dust chemistry and optimum cleaning schedule for PV modules in Lahore, Pakistan, *Renew. Energy* 150 (2020) 456–468.
- [78] K.R.C. Lakshmi, G. Ramadas, Dust Deposition's Effect on Solar Photovoltaic Module Performance: An Experimental Study in India's Tropical Region, *J. Renewable Mater.* 10 (8) (2022) 2133–2153.
- [79] D. Matusz-Kalasz, I. Bodnar, Operation Problems of Solar Panel Caused by the Surface Contamination, *Energies* 14 (17) (2021) 5461.
- [80] M. Abderrezek, M. Fathi, Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels' energy yield, *Sol. Energy* 142 (2017) 308–320.
- [81] Y.Y. Chen, D.J. Wang, Y.F. Liu, Y. Dong, J.P. Liu, Research on Photovoltaic Performance Reduction due to Dust Deposition: Modelling and Experimental Approach, *J. Therm. Sci.* 28 (6) (2019) 1186–1194.
- [82] L. Xu, S. Li, J. Jiang, T. Liu, H. Wu, J. Wang, X. Li, The influence of dust deposition on the temperature of soiling photovoltaic glass under lighting and windy conditions, *Sol. Energy* 199 (2020) 491–496.
- [83] L. Al-Ghussain, O. Taylan, M. Abujubbeh, M.A. Hassan, Optimizing the orientation of solar photovoltaic systems considering the effects of irradiation and cell temperature models with dust accumulation, *Sol. Energy* 249 (2023) 67–80.
- [84] A. Gholami, M. Ameri, M. Zandi, R.G. Ghoachani, S.J. Gerashi, H.A. Kazem, A.H.A. Al-Waeli, Impact of harsh weather conditions on solar photovoltaic cell temperature: Experimental analysis and thermal-optical modeling, *Sol. Energy* 252 (2023) 176–194.
- [85] A. Gholami, M. Ameri, M. Zandi, R.G. Ghoachani, S. Pierfederici, H.A. Kazem, Step-By-Step Guide to Model Photovoltaic Panels: An Up-To-Date Comparative Review Study, *IEEE J. Photovoltaics* 12 (4) (2022) 915–928.
- [86] A. Gholami, M. Ameri, M. Zandi, R.G. Ghoachani, Electrical, thermal and optical modeling of photovoltaic systems: Step-by-step guide and comparative review study, *Sustainable Energy Technol. Assess.* 49 (2022) 101711.
- [87] A. Sohani, H. Sayyaadi, Employing genetic programming to find the best correlation to predict temperature of solar photovoltaic panels, *Energ. Conver. Manage.* 224 (2020) 113291.

- [88] H. Almkhtar, T.T. Lie, W.A.M. Al-Shohani, Comprehensive analysis of dust impact on photovoltaic module temperature: Experimental insights and mathematical modeling, *Sol. Energy* 265 (2023) 112125.
- [89] A. Younis, Y. Alhorr, Modeling of dust soiling effects on solar photovoltaic performance: A review, *Sol. Energy* 220 (2021) 1074–1088.
- [90] H.M. Khalid, Z. Rafique, S.M. Muyeen, A. Raqeeb, Z. Said, R. Saidur, K. Sopian, Dust accumulation and aggregation on PV panels: An integrated survey on impacts, mathematical models, cleaning mechanisms, and possible sustainable solution, *Sol. Energy* 251 (2023) 261–285.
- [91] H.A. Kazem, M.T. Chaichan, A.H.A. Al-Waeli, K. Sopian, A review of dust accumulation and cleaning methods for solar photovoltaic systems, *J. Clean. Prod.* 276 (2020) 123187.
- [92] H.A. Kazem, A.H.A. Al-Waeli, M.T. Chaichan, K. Sopian, A. Gholami, W. E. Alnaser, Dust and cleaning impact on the performance of photovoltaic: an outdoor experimental study, *Energy Sources Part A* 45 (1) (2023) 3107–3124.
- [93] H. Abuzaid, M. Awad, A. Shamayleh, Impact of dust accumulation on photovoltaic panels: a review paper, *Int. J. Sustain. Eng.* 15 (1) (2022) 266–287.
- [94] W. Javed, Y. Wubulikasimu, B. Figgis, B. Guo, Characterization of dust accumulated on photovoltaic panels in Doha, Qatar, *Sol. Energy* 142 (2017) 123–135.
- [95] Y. Jiang, L. Lu, A.R. Ferro, G. Ahmadi, Analyzing wind cleaning process on the accumulated dust on solar photovoltaic (PV) modules on flat surfaces, *Sol. Energy* 159 (2018) 1031–1036.
- [96] A. Al Shehri, B. Parrott, P. Carrasco, H. Al Saiari, I. Taie, Accelerated testbed for studying the wear, optical and electrical characteristics of dry cleaned PV solar panels, *Sol. Energy* 146 (2017) 8–19.
- [97] A. Al Shehri, B. Parrott, P. Carrasco, H. Al Saiari, I. Taie, Impact of dust deposition and brush-based dry cleaning on glass transmittance for PV modules applications, *Sol. Energy* 135 (2016) 317–324.
- [98] D. Deb, N.L. Brahmhatt, Review of yield increase of solar panels through soiling prevention, and a proposed water-free automated cleaning solution, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82 (2018) 3306–3313.
- [99] M.R. Maghami, H. Hizam, C. Gomes, M.A. Radzi, M.I. Rezadad, S. Hajjghorbani, Power loss due to soiling on solar panel: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 59 (2016) 1307–1316.
- [100] H.A. Kazem, M.T. Chaichan, Experimental analysis of the effect of dust's physical properties on photovoltaic modules in Northern Oman, *Sol. Energy* 139 (2016) 68–80.
- [101] A.S. Alghamdi, A.S. Bahaj, L.S. Blunden, Y. Wu, Dust Removal from Solar PV Modules by Automated Cleaning Systems, *Energies* 12 (15) (2019) 2923.
- [102] H.A. Kazem, M.T. Chaichan, A.H.A. Al-Waeli, A comparison of dust impacts on polycrystalline and monocrystalline solar photovoltaic performance: an outdoor experimental study, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 29 (59) (2022) 88788–88802.
- [103] F. Ekinici, A. Yavuzdeger, H. Nazligul, B. Esenboga, B.D. Mert, T. Demirdelen, Experimental investigation on solar PV panel dust cleaning with solution method, *Sol. Energy* 237 (2022) 1–10.
- [104] A. Elnozahy, A.K.A. Rahman, A.H.H. Ali, M. Abdel-Salam, S. Ookawara, Performance of a PV module integrated with standalone building in hot arid areas as enhanced by surface cooling and cleaning, *Energ. Buildings* 88 (2015) 100–109.

- [105] Greig D. Heliotex' Automatic Solar Panel Cleaning System, <https://newatlas.com/heliotex-solar-panel-cleaning/11009/>; 2009. [accessed 29 November 2023].
- [106] X.Q. Du, F. Jiang, E.X. Liu, C.Y. Wu, F. Ghorbel, Turbulent airflow dust particle removal from solar panel surface: Analysis and experiment, *J. Aerosol Sci* 130 (2019) 32–44.
- [107] H. Kawamoto, Improved detachable electrodynamic cleaning system for dust removal from soiled photovoltaic panels, *J. Electrostat.* 107 (2020) 103481.
- [108] B.O. Olorunfemi, O.A. Ogbolumani, N. Nwulu, Solar Panels Dirt Monitoring and Cleaning for Performance Improvement: A Systematic Review on Smart Systems, *Sustainability* 14 (17) (2022) 10920.
- [109] A. Assi, A. Hassan, M. Al-Shamisi, H. Hejase, Removal of Air Blown Dust from Photovoltaic Arrays Using Forced Air Flow of Return Air from Air Conditioning Systems. 2012 International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (redc), 2012.
- [110] E. Babu, S. Yesudasan, S. Chacko, Cymatics inspired self-cleaning mechanism for solar panels, *Microsyst. Technol.* 27 (3) (2021) 853–861.
- [111] K. Eisa, R. Shenouda, M.S. Abd-Elhady, H.A. Kandil, T. Khalil, Mitigation of dust on PV panels that operate light posts using a wind shield, mechanical vibrations and AN antistatic coating, *Ain Shams Eng. J.* 14 (5) (2023) 101993.
- [112] W.P. Zhao, Y.K. Lv, Z. Wei, W.P. Yan, Q.W. Zhou, Review on dust deposition and cleaning methods for solar PV modules, *J. Renewable Sustainable Energy* 13 (3) (2021) 032701.
- [113] P. Vasiljev, S. Borodinas, R. Bareikis, A. Struckas, Ultrasonic system for solar panel cleaning, *Sensor Actual A-Phys* 200 (2013) 74–78.
- [114] A.N. Pan, R.R. Cai, L.Z. Zhang, Numerical methodology for simulating particle deposition on superhydrophobic surfaces with randomly distributed rough structures, *Appl. Surf. Sci.* 568 (2021) 150872.
- [115] H. Salehi, A. Eshaghi, M. Rezazadeh, H. Zabolian, Antireflective and anti-dust modified silica based thin film on solar cell cover glass, *J. Alloy. Compd.* 892 (2022) 162228.
- [116] M. Fathi, M. Abderrezek, M. Friedrich, Reducing dust effects on photovoltaic panels by hydrophobic coating, *Clean Techn. Environ. Policy* 19 (2) (2017) 577–585.
- [117] Z.J. Quan, H. Lu, W.J. Zhao, C.X. Zheng, Z. Zhu, J. Qin, M. Yue, A Review of Dust Deposition Mechanism and Self-Cleaning Methods for Solar Photovoltaic Modules, *Coatings* 13 (1) (2023) 49.
- [118] S.H. Liu, X.J. Liu, S.S. Lathe, L. Gao, S. An, S.S. Yoon, B.S. Liu, R.M. Xing, Self-cleaning transparent superhydrophobic coatings through simple sol-gel processing of fluoroalkylsilane, *Appl. Surf. Sci.* 351 (2015) 897–903.
- [119] A. Syafiq, A.K. Pandey, N.N. Adzman, N. Abd Rahim, Advances in approaches and methods for self-cleaning of solar photovoltaic panels, *Sol. Energy* 162 (2018) 597–619.
- [120] H. Zhong, Y. Hu, Y.H. Wang, H.X. Yang, TiO₂/silane coupling agent composed of two layers structure: A super-hydrophilic self-cleaning coating applied in PV panels, *Appl. Energy* 204 (2017) 932–938.
- [121] S. Panat, K.K. Varanasi, Electrostatic dust removal using adsorbed moisture-assisted charge induction for sustainable operation of solar panels, *Sci. Adv.* 8 (10) (2022).

- [122] M. Mazumder, M.N. Horenstein, J.W. Stark, P. Girouard, R. Sumner, B. Henderson, O. Sadler, I. Hidetaka, A.S. Biris, R. Sharma, Characterization of Electrodynamic Screen Performance for Dust Removal from Solar Panels and Solar Hydrogen Generators, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 49 (4) (2013) 1793–1800.
- [123] M.K. Mazumder, M.N. Horenstein, N.R. Joglekar, A. Sayyah, J.W. Stark, A.A. R. Bernard, S.M. Garner, J.E. Yellowhair, H.Y. Lin, R.S. Eriksen, A.C. Griffin, Y. Gao, R. La Centra, A.H. Lloyd, Mitigation of Dust Impact on Solar Collectors by Water-Free Cleaning With Transparent Electrodynamic Films: Progress and Challenges, *IEEE J. Photovoltaics* 7 (5) (2017) 1342–1353.
- [124] M. Al-Housani, Y. Bicer, M. Koc, Assessment of Various Dry Photovoltaic Cleaning Techniques and Frequencies on the Power Output of CdTe-Type Modules in Dusty Environments, *Sustainability* 11 (10) (2019) 2850.
- [125] H. Kawamoto, T. Shibata, Electrostatic cleaning system for removal of sand from solar panels, *J. Electrostat.* 73 (2015) 65–70.
- [126] H. Kawamoto, B. Guo, Improvement of an electrostatic cleaning system for removal of dust from solar panels, *J. Electrostat.* 91 (2018) 28–33.
- [127] S.A. Baqraf, M.A. Gondal, M.A. Dastageer, R. Muhammad, A. Al-Aswad, Parametric Optimization of an Unmanned Three-Phase Electrodynamic Dust Shield for Sustainable Photovoltaic Panel Operation for Dusty Environments and Space Applications, *ACS Appl. Energy Mater.* 5 (12) (2022) 15048–15057.
- [128] A. Sayyah, M.N. Horenstein, M.K. Mazumder, G. Ahmadi, Electrostatic force distribution on an electrodynamic screen, *J. Electrostat.* 81 (2016) 24–36.
- [129] T.P. Nguyen, H. Nguyen, V.H. Phan, H.Q.T. Ngo, Modeling and practical implementation of motion controller for stable movement in a robotic solar panel dust-removal system, *Energy Source Part A* (2021) 1934194.
- [130] B. Parrott, P.C. Zanini, A. Shehri, K. Kotsovos, I. Gereige, Automated, robotic dry-cleaning of solar panels in Thuwal, Saudi Arabia using a silicone rubber brush, *Sol. Energy* 171 (2018) 526–533.
- [131] M.K. Ghodki, An infrared based dust mitigation system operated by the robotic arm for performance improvement of the solar panel, *Sol. Energy* 244 (2022) 343–361.
- [132] S.Y. Fan, W.S. Liang, G. Wang, Y.H. Zhang, S.X. Cao, A novel water-free cleaning robot for dust removal from distributed photovoltaic (PV) in water-scarce areas, *Sol. Energy* 241 (2022) 553–563.
- [133] S. Gallardo-Saavedra, L. Hernandez-Callejo, O. Duque-Perez, Technological review of the instrumentation used in aerial thermographic inspection of photovoltaic plants, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 93 (2018) 566–579.
- [134] N.M. Kumar, K. Sudhakar, M. Samykan, V. Jayaseelan, On the technologies empowering drones for intelligent monitoring of solar photovoltaic power plants, *International Conference on Robotics and Smart Manufacturing (Rosma2018)* 133 (2018) 585–593.
- [135] S.S. Sarkis, L.A. Khanfar, B.N. Ghabour, L. Zaki, M. Alahmed, M.A. Jaradat, A. Wadi, A. Khalil, Novel design of a hybrid drone system for cleaning solar panels, *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), IEEE 2022* (2022) 1–6.
- [136] M. Mohandes, S. Rehman, W. Suliman, F. Schulze, Cleaning PhotoVoltaic Solar Panels by Drone Aerodynamic, *2021 4th International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (Isaect)* (2021).

[137] M. Al-Housani, Y. Bicer, M. Koc, Experimental investigations on PV cleaning of large-scale solar power plants in desert climates: Comparison of cleaning techniques for drone retrofitting, *Energ. Conver. Manage.* 185 (2019) 800–815.

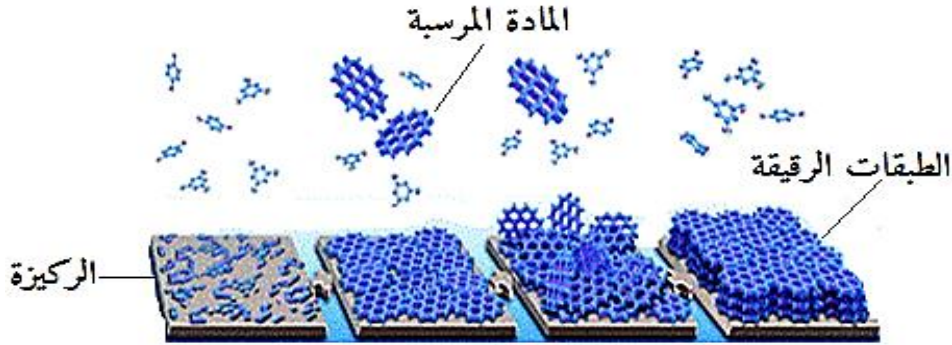
الفصل الثاني:

طرق تحضير الطبقات الرقيقة والعوامل

المؤثرة عليها

1.II. الطبقات الرقيقة

يستعمل مصطلح الأغشية الرقيقة لوصف طبقة أو طبقات عديدة من ذرات المادة (بوليميرات، معقدات، أكاسيد وهيدروكسيدات) لا يتعدى سمكها ميكرومترا واحدا (μm) أو عدة نانومترا (nm)، مرسبة على مادة أخرى تسمى "الركيزة أو الدعامة" مثل: الزجاج، الكوارتز، السيليكون و المعادن... الهدف من تحضير هذه الطبقات هو تغيير الخواص الفيزيوكيميائية (كهربائية، ضوئية أو مغناطيسية...) لسطح الدعامة وإكسابها خصائص جديدة. و يعتمد على الطريقة المستعملة في تحضيرها وحسب ميدان استعمالها (الخلايا الشمسية، المرشحات الضوئية، الدوائر الإلكترونية، وسائل تخزين المعلومات مثل القرص المرن) [2.1].



الشكل 1.II: أبعاد الطبقة المترسبة

2.II. مبدأ ترسيب الطبقات الرقيقة

لترسيب طبقة رقيقة على أسطح صلبة، يجب أن تمر جسيمات المادة عبر وسط ناقل يكون على تماس مباشر مع الركيزة. عند وصول الجسيمات، تلتصق بالسطح عبر قوى فان دير فال أو بتفاعل كيميائي، وقد تكون هذه الجسيمات ذرات، أيونات، أو جزيئات. يختلف وسط النقل ويكون إما صلباً، سائلاً، أو غازياً، يتطلب الوسط الصلب تماس مباشر بين الركيزة والمادة، وهو صعب الاستخدام الوسط السائل أسهل نسبياً، كما هو الحال مع استخدام الهلام السائل في بعض الدراسات. بينما الوسط الغازي هو الأكثر استخداماً، خاصة في الترسيب الكيميائي للأبخرة، ويختلف عن الفراغ في المسار الوسيط الحر بين التصادمات. لا توجد طريقة واحدة معقدة لترسيب الطبقات الرقيقة، وتتوفر تقنيات وأساليب متعددة، كما أن تحضير الركيزة يُعد خطوة حاسمة لضمان جودة الشرائح الناتجة. [3]

3.II. مراحل تشكيل الطبقات الرقيقة

تُعدّ البنية المجهرية للطبقات الرقيقة شديدة الحساسية أثناء ترسيبها، وكذلك تجاه الشروط التجريبية لترسيبها. وتخضع معظم طرق الترسيب لثلاث مراحل رئيسية: تحضير المواد المرسبة المناسبة على شكل أيونات، جزيئات، أو ذرات؛ نقل هذه المواد إلى الركيزة؛ ثم تكثيفها على سطح الركيزة إما بطريقة مباشرة أو من خلال تفاعل كيميائي يؤدي إلى تشكيل ترسبات صلبة وفقاً للمعايير الترموديناميكية. وتشمل هذه الخطوة الأخيرة ثلاث عمليات متتالية تشمل التوضع، الالتحام، والنمو. [4]

1.3.II. مرحلة الترسيب Nucléations

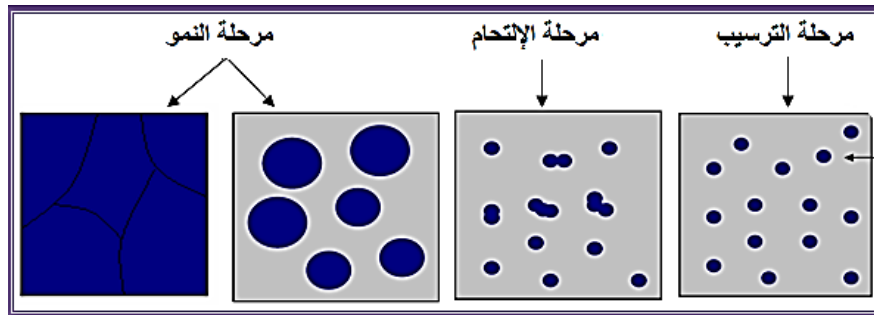
يظهر في هذه المرحلة على الواجحة العلوية للركيزة تجمعات عناصر صغيرة من المادة المرسبة، تطرأ على حالة المادة تغيرات وتمثل في نقطة التحول التي تطور بنية المادة إلى بنية فيزيائية وكيميائية جديدة، تحول هذه المواد إلى رذاذ على سطح الركيزة ويتم تكثيفها فيزيائياً من قبل سطح الركيزة فتشكل ما يعرف باسم الأنوية المنشأة. [4]

2.3.II. مرحلة الإلتحام Coalescence

عند زيادة حجم النوى المشكلة في المرحلة السابقة تتكثف فيما بينها وتتقارب من بعضها تدريجياً مشكلة جزر على سطح الركيزة، بحيث تتميز هذه المرحلة بالإلتحام المجموعات فيما بينها لتشكل طبقة تغطي الركيزة. [4]

3.3.II. مرحلة النمو Croissance

هي المرحلة الاخيرة في تشكل الطبقات الرقيقة حيث يزداد حجم الجزر لتقترب من بعضها البعض لتصل إلى مرحلة الإلتحام مشكلة حبيبات التي بدورها تشكل الطبقة الرقيقة على سطح الركيزة ويفصل بين الجزر ما يسمى بحدود الحبيبات. [4]

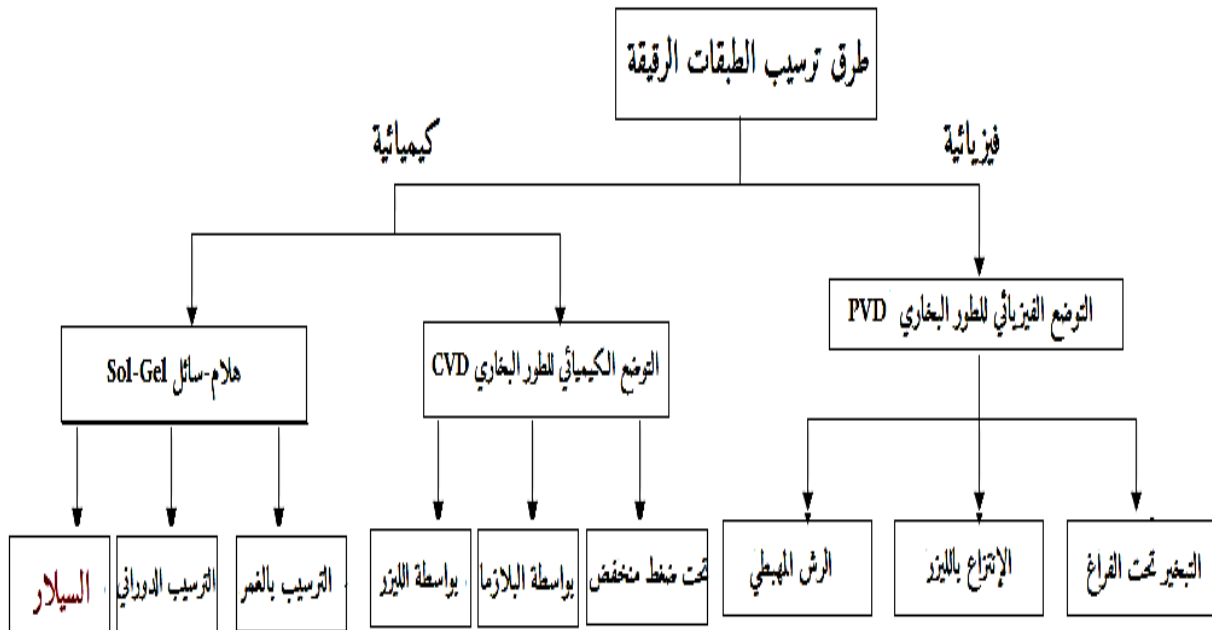


الشكل II.2: مراحل تشكل و نمو طبقة رقيقة

4.II. تقنيات ترسيب الطبقات الرقيقة

تنوعت الأساليب المستخدمة في عملية تحضير الطبقات الرقيقة وهذا راجع لإستعمالها المتنوعة والكثيرة، حيث تكون بعض الطرائق مناسبة لمواد معينة و غير مناسبة لمواد أخرى و بعضها تكون سهلة الاستعمال و بعضها الآخر تكون معقدة، و يعتمد تحضير الطبقات الرقيقة على عدة عوامل من بينها. نوع المادة المستخدمة، مجال الإستخدام، تكلفة التحضير وطبيعة الركيزة التي سيتم وضع الشريحة عليها. [6.5]

تصنف هذه الطرق إلى صنفين أساسيين حسب طرق الترسيب : فيزيائية و كيميائية موضحة في الشكل أدناه.



الشكل 3.II: طرق ترسيب الطبقات الرقيقة

1.4.II. الطرق الفيزيائية

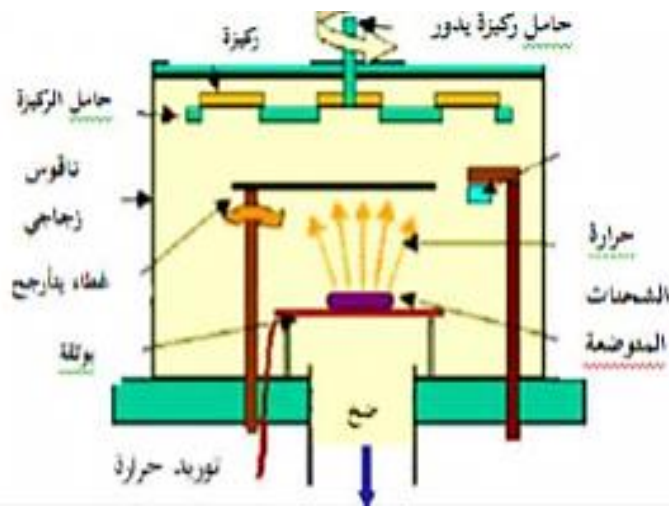
تعتمد الطرق الفيزيائية على عملية التبخير الحراري للمواد تحت ضغوط المنخفضة وتميز بكونها سهلة المراقبة والتطبيق من بينها:

1.1.1.4.II. التوضع الفيزيائي للطور البخاري (PVD)

هي تقنية تعتمد على عملية التبخير الحراري للمواد (التسامي) تحت ضغوط منخفضة، وتتميز بنقاؤها، وقدرتها على إنتاج طبقات كثيفة وسهلة المراقبة. ولتحضير طبقة رقيقة باستخدام هذه التقنية، تُتبع الخطوات التالية [7]: أولاً، تحويل المواد المراد ترسيبها إلى شكل ذرات أو جزيئات؛ ثم نقلها في الطور البخاري من المصدر نحو الدعامة؛ وأخيراً، ترسيبها على الدعامة ونمو الطبقة. [2]

1.1.1.4.II. التبخير تحت الفراغ (ESV)

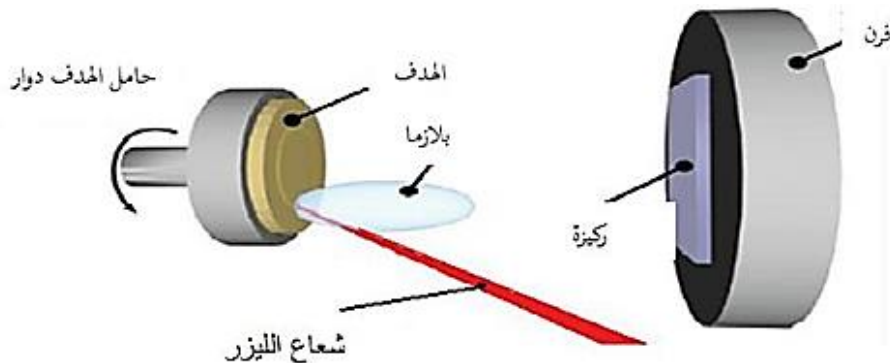
"تعتمد هذه التقنية على تبخير المواد الموضوعة في البوتقة تحت الفراغ، وذلك بعد تسخينها إلى درجات حرارة عالية، حيث تتسبب المواد المتبخرة على الركيزة مُشكَّلةً غشاءً رقيقاً. وتوجد عدة طرق لتسخين هذه المواد، منها: تأثير جول، التحريض الكهربائي، وتسليط حزمة إلكترونية مكثفة وطاقوية [8]. ويسمح الفرق في درجة الحرارة بين المواد المتبخرة والركيزة بتكثيف هذه الجزيئات على سطح الدعامة للحصول على غشاء رقيق [9]. كما أن تصاعد البخار يكون في اتجاه محدد، وغالباً ما يكون من الضروري تدوير مصدر البخار، مما يسمح بالحصول على ترسيب متجانس وسمك منتظم للطبقة. ويتم وضع الدعامة بشكل عمودي على تدفق البخار لتحقيق أفضل النتائج.



الشكل II.4: التوضع الفيزيائي للطور البخاري. [10]

2.1.1.4.II. الانتزاع بالليزر

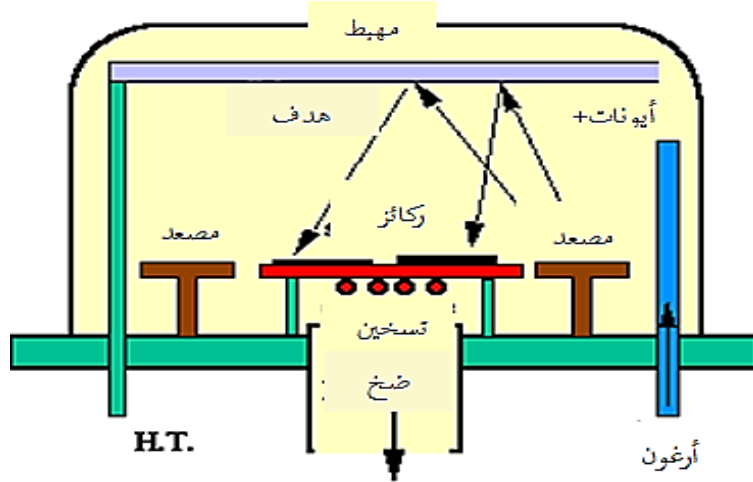
تعتمد هذه التقنية على تركيز شعاع الليزر ذو شدة عالية من خلال نافذة الغرفة المفرغة على سطح هدف كبير فيمتص الشعاع جزئياً. وإطلاقاً من كثافة الطاقة الموجهة إلى الهدف تخرج منه كمية كبيرة من المواد في شكل بخار فيشكل سحابة (بلازما) بحيث تعتمد عتبة كثافة طاقتها على مادة الهدف وخصائص مادة الليزر مثل الطول الموجي و مدة النبض. وتوضع الركيزة في هذه التقنية على بعد يضع سنتمترات من مادة الهدف وبوضعية موازية له، و المواد المنتزعة تتكثف على الركيزة حيث يتم الحصول على طبقة بعد نبضات متتالية. وخلال عملية النمو يمكن إدخال غاز محايد أو تفاعلي في الغرفة والذي يمكن أن يؤثر على نمو الطبقة، كما يمكن تسخين الركيزة أيضاً أثناء النمو لجلب طاقة إضافية للمواد المكثفة وبالتالي تحفيز تبلور الطبقة الرقيقة. [11]



الشكل II.5: مبدأ الانتزاع بالليزر النبضي.

3.1.1.4.II. الرش المهبطي (Pulvritation cathodique)

هي طريقة تعتمد على إنتزاع ذرات مادة ما بواسطة قذفها بأيونات طاقوية ناتجة عن التفريغ الكهربائي للغاز حامل تثبت مادة على المهبط الذي يحمل حمدا سالبا بالنسبة للمصعد و موازيا له، تفصل بينهما مسافة بضعة سنتيمترات (بين 3 و 5 سم). إذا كان الضغط المطبق بين اللوسين (1 إلى 10^2 Pa) تتسارع الأيونات الطاقوية تحت تأثير الحقل الكهربائي متجهة نحو المهبط فتتصادم مع مادة الهدف و يتبادلان كمية الحركة فيما بينهما، وينتج عن ذلك إنتزاع ذرات محايدة كهربائيا توضع على الركيزة مشكلة طبقة رقيقة. [2]

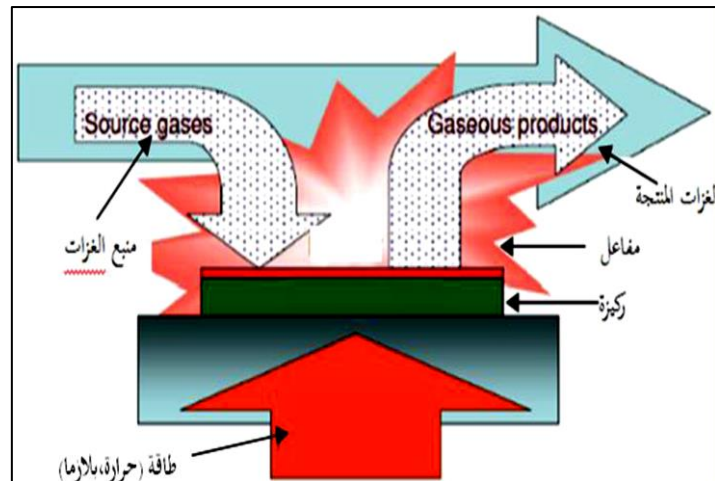


الشكل 6.II: تقنية الرش المهبطي. [12]

2.4.II. الطرق الكيميائية

1.2.4.II. التوضع الكيميائي للطور البخاري (CVD)

أول إستخدام لهذه التقنية كان سنة 1983 (توضع التنغستين من أجل المصابيح المتوهجة) [13]، تعرف طريقة الترسيب بواسطة الأبخرة الكيميائية على أنها تشكيل طبقة على ركيزة إنطلاقا من التفاعلات الكيميائية بين المكونات المستخدمة في أشكالها الغازية و ذلك عن طريق طاقة التنشيط. هذا التفاعل الكيميائي يتطلب توفير حرارة من الركيزة سواء بفعل جول، الحث الإشعاعي الحراري أو الليزر و تتضمن هذه التقنية ثلاث أجزاء رئيسية هي [14]: جهاز تغذية المكونات الغازية، مفاعل الترسيب (مفاعلات الجدار الساخن و مفاعلات الجدار البارد). بالإضافة لجهاز الإسترجاع/ إعادة تدوير الغاز.



الشكل II.7: تقنية التوضع الكيميائي للطور البخاري. [10]

وهناك عدة طرق لتقنية الترسيب بواسطة الأبخرة الكيميائية نذكر منها:

II.1.1.2.4.1. التوضع الكيميائي للأبجزة تحت ضغط منخفض (LPCVD)

التوضع يتم تحت ضغط منخفض ويوجد نوعان من المفاعلات، مفاعل الجدار الساخن: في هذه الحالة الغرفة كلها ساخنة مما يسمح لنا بإجراء التوضع عند ضغط منخفض في حدود 9,99 pa كما أن التوضع على الركيزة يكون جيد، و مفاعل الجدار البارد: الركيزة فقط تكون ساخنة بحيث يكون التفاعل غير فعال على مستوى الركيزة كما أن التوضع يجري في الضغط الجوي. [10]

II.3.1.2.4.1. التوضع الكيميائي للأبجزة بواسطة الليزر (LCVD) [15]

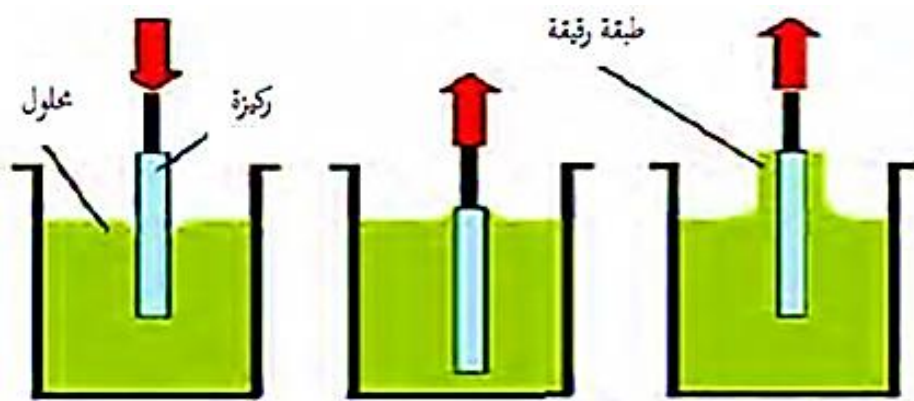
يتم استخدام أشعة الليزر إما لتفعيل المواد الغازية وإما لتسخين الركيزة لزيادة التفاعل على سطحها. من إيجابيات هذه التقنية أنها سهلة التنفيذ، تسمح بالحصول على ترسبات في سرعة عالية، تكوين طبقة رقيقة ذات تركيب متجانس بالإضافة إلى الالتصاق الجيد. كما أن لها سلبيات تتمثل في درجة حرارة التفاعل تكون عالية جدا، تكوين طبقات رقيقة ملوثة بفعل بقايا المستحضرات الغازية.

II.2.2.4.1. هلام-سائل (Sol-Gel)

المبدأ الأساسي لهذه التقنية يتمثل في ترسيب طبقة رقيقة صلبة إنطلاقاً من محلول سائل وذلك عن طريق مجموعة من التفاعلات الكيميائية عند درجة حرارة الغرفة، حيث تتم العملية في ثلاث خطوات: تحضير محلول التوضع، تشكيل طبقات رقيقة و المعالجة الحرارية [15]. وهناك عدة طرق يمكن إستعمالها للترسيب بتقنية هلام-سائل نذكر منها:

II.1.2.2.4.1. الترسيب بالغمر (dip-Coating)

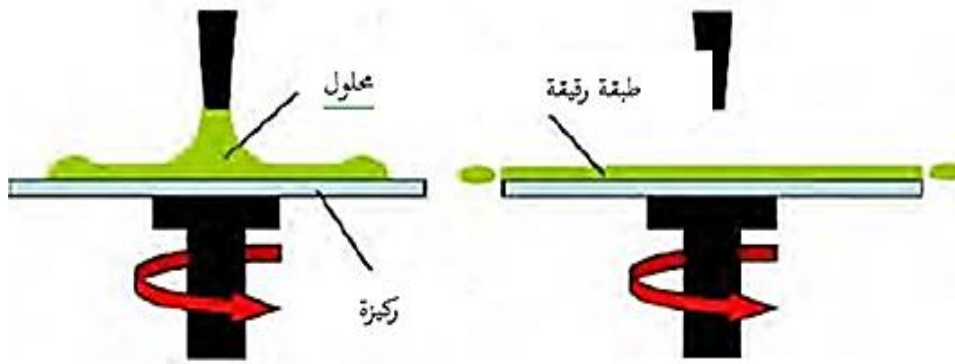
مبدأ هذه الطريقة يتمثل في غمر الركيزة في محلول ثم سحبه بسرعة ثابتة بدون اهتزاز ثم تجفف الركيزة في الهواء فنحصل على طبقة ذات طبيعة هلامية، ثم تخضع لعملية المعالجة الحرارية لإعطاء طبقة صلبة ذات نوعية جيدة. حيث تؤثر لزوجة السائل في تحديد الخواص المرفولوجية وكذلك سرعة غمر وإخراج الركيزة في المحلول تؤثر على سمك الشريحة المتكونة. تتم هذه الطريقة على ثلاث خطوات وهي: غمر الركيزة، سحب الركيزة، تبخر المركبات المتطايرة [15]



الشكل II.8: طريقة الترسيب بالغمر

II.2.2.4.1. الترسيب بالطرد المركزي (spin-Coating) [16]

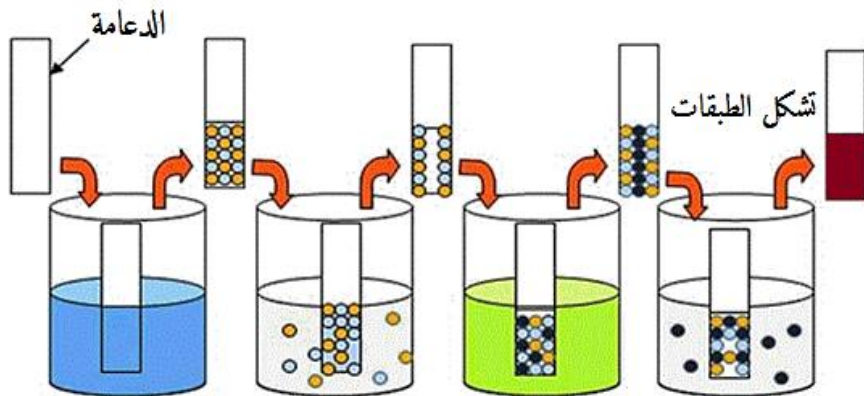
تعتبر تقنية الطرد المركزي من التقنيات التي يجري تنفيذها بسهولة، كما تسمح هذه التقنية بتحقيق طبقات رقيقة متجانسة وذات سمك رقيق جداً وتعتبر من أسهل طرق الترسيب وتتم في أربع مراحل: حيث يوضع محلول الترسيب على ركيزة ثابتة. ثم يتم تدوير الركيزة إلى غاية السرعة القصوى المطلوبة حيث يتجانس توزيع المحلول بفعل القوة الطاردة المركزية كما يتم إخراج فائض السائل المتوضع بفعل هذه القوة. حيث تثبت سرعة المسند للتحكم في سمك الطبقة. لتبخير المذيبات وتشكيل طبقة هلامية.



الشكل II.9: طريقة الترسيب الدورانية.

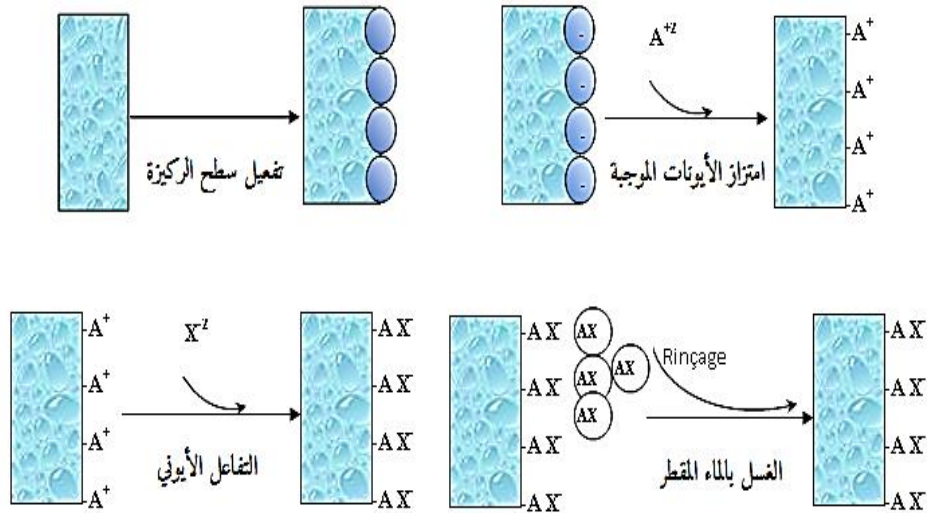
II.3.2.4. الترسيب بالغمس والسحب (السيلار SILAR)

وهي الطريقة المتبعة في بحثنا الحالي، تعد من الطرائق الكيميائية الأكثر شيوعاً في تحضير الأغشية الرقيقة، و أول من إستخدم هذه الطريقة الباحث الفرنسي Y.K Nicolau عام 1985. وتتلخص هذه الطريقة في ترسيب محلول المادة المراد تحضير الغشاء منها على شكل طبقات رقيقة مثل: الشالكوجينات، الشالكوجينات الثنائية، أكاسيد المعادن. تستخدم تقنية السيلار على نطاق واسع في المختبرات وذلك لسهولةها، تكلفتها المنخفضة، ترسيب مجموعة متنوعة من المواد، كما تكمن من التحكم في سمك الطبقات الرقيقة. من ناحية أخرى، تضمن هذه التقنية تجانس سطح الطبقات. [18,17]



الشكل II.10: ترسيب الطبقات الرقيقة بتقنية السيلار

يتم امتصاص وتفاعل الأيونات من محلول السلائف على سطح الركيزة لتكوين طبقة رقيقة. حيث تُغمر الركيزة أولاً في محلول يحتوي على كاتيونات (A^{+2})، ثم تُشطف بالماء المقطر، وتُغمر بعد ذلك في محلول أنيوني يحتوي على الأنيونات المقابلة (X^-)، وتُشطف مرة أخرى بالماء المقطر. تُنتج هذه الدورة طبقة واحدة، ويؤدي تكرارها عدة مرات إلى تحقيق السماكة المطلوبة للغشاء. وتعتمد آلية هذه الطريقة على أربع خطوات أساسية: تبدأ بتفعيل سطح الركيزة، حيث تُنشأ مواقع نشطة عبر المعالجة الكيميائية باستخدام قواعد قوية، مما يتيح التصاقاً جيداً للطبقة الأولى. تلي ذلك عملية امتزاز الأيونات الموجبة على هذه المواقع النشطة، بفضل قوى الجذب الكيميائية وأو الكهربائية بين الأيونات و سطح الركيزة، وهي عملية تتأثر بتركيز المحلول ودرجة حرارته وطبيعة الركيزة المستخدمة. بعد ذلك يحدث التفاعل الأيوني، حيث تتفاعل الأنيونات مع الكاتيونات الممتزة مسبقاً لتكوين طبقة أحادية من مادة غير قابلة للذوبان في الماء. وأخيراً، تأتي مرحلة الغسل التي تهدف إلى منع تلوث المحاليل الأصلية، وتجنب تكوّن تجمعات غير مرغوبة من المادة على سطح الركيزة. [19,20,21]



الشكل 11.II: مراحل آلية الترسيب بالسيالار [21،20،19]

5.II. العوامل المؤثرة على الترسيب بطريقة سيالار

تقنية الترسيب الطبقي الأيوني المتتابع (SILAR) تُعتبر طريقة بسيطة ومنخفضة التكلفة لتحضير أغشية رقيقة من أكسيد الزنك مُطعاً الألومين. وتتأثر خصائص هذه الأغشية البلورية والضوئية والكهربية بعدة عوامل مصنعية ومحلولية. سنستعرض أدناه تأثير كل عامل رئيسي على الخصائص البلورية والبصرية والإلكترونية لأغشية ZnO:Al، مع دعم الحقائق بالمراجع الحديثة. [23] [22]

1.5.II. درجة حرارة التحضير :

- **التبلور والبنية البلورية:** ارتفاع درجة حرارة عملية الترسيب أو المعالجة الحرارية اللاحقة يحسن جودة البلورة ويقلل العيوب الشبكية. فمثلاً، عند ترسيب أغشية ZnO على درجة حرارة $450^{\circ}C$ تم الحصول على بلورات أفضل وخلايا شعرية أقل، مما أدى إلى كثافة حاملة شحنة أعلى وحركية إلكترونية أكبر (ومقاومة كهربائية أقل).
- **النقل الضوئي:** درجات الحرارة الأعلى تسهم في إزالة الروابط الضعيفة وتحسين انتظام الطبقة، مما يؤدي إلى طبقة أكثر شفافية في النطاق المرئي مع انتقال سريع في الحافة الطيفية للامتصاص.
- **التوصيلية الكهربائية:** بتحسين البلورة تقل العيوب التي تحجز الشحنات، فترتفع التوصيلية الكهربائية للأفلام المهيتة حرارياً بشكل جيد. ومع ذلك، فإن درجة حرارة عالية جداً قد تسبب إجهاد طبقي أو تقشيراً في الفيلم الرقيق إن فُرطت.

2.5.II. عدد دورات الترسيب :

- **السماعة والبلورات:** يزداد سمك الطبقة المترسبة بزيادة عدد دورات الغمر، حيث تتراكم طبقات ZnO المترسبة كل دورة. ومع تزايد عدد دورات الترسيب يصل الفيلم إلى سمك أمثل قبل ظهور أضرار؛ فقد وُجد أن حجم البلورات يتناقص تدريجياً كلما ارتفع عدد الدورات حتى حوالي 50 دورة، ثم يرتفع قليلاً عند 60 دورة [24]. هذا يشير إلى زيادة كثافة البلور وتناقص العيوب مع دورات معتدلة.
- **الشفافية البصرية:** مع زيادة الدورات تزيد سماكة الفيلم، مما يرفع امتصاصيته (يقلل نفاذيته)، خاصة قرب حافة امتصاص ZnO، وينخفض انتقال الضوء المرئي تدريجياً.
- **التوصيلية الكهربائية:** يرتبط عدد الدورات بتركيز الشحنات المحمولة وحركيتها؛ ففي مثال عملي ارتفع تركيز الناقلات مع دورات حتى 40 دورة ثم انخفض بعد 60 دورة بسبب تراكم العيوب والشوائب التي تحجز الشحنات [24]. بالتالي، هنالك عدد أمثل من الدورات للحصول على أقل مقاومة كهربائية (أعلى حركية).

- الخصائص الضوئية والكهربائية الأخرى: زيادة الدورات تزيد من الكثافة الضوئية للصفحة وتقلل الأعايد السطحية، مما قد يحسن الاستجابة الضوئية UV. كما تؤدي إلى انخفاض فجوة الطاقة الظاهرية بعض الشيء نتيجة زيادة التبلور، حسب الوسط المحلولي المستخدم [24].

3.5.II. زمن الغمر في كل محلول

- كمية الترسيب: يحدد زمن الغمر في محلول الزنك أو محلول القاعدة كمية الأيونات الممتصة على السطح في كل دورة. فمثلاً، استخدم شيرونجي وآخرون وقت غمر 20 ثانية لكل وعاء لكل دورة SILAR [23]. إذا زاد زمن الغمر عن ذلك، يُسمح بمزيد من امتصاص أيونات Zn^{2+}/Al^{3+} ، فتزداد سماكة الطبقة المرسوبة في الدورة الواحدة، مما يؤدي إلى فيلم أثقل.
- النسيج البلوري والمورفولوجيا: زيادة زمن الغمر تمنح بلورات ZnO مزيداً من الوقت للنمو والتجمع، مما قد يزيد حجم الحبيبات ويُحسن انتظامها. لكن غمر طويل جداً قد يؤدي إلى ترسيب سريع وفقدان تجانس الطبقة، وبالتالي ظهور تكتلات غير منتظمة أو طبقات متكسرة.
- الخصائص البصرية: أطول زمن غمر يعني طبقة أسمك في النهاية، فيقل نفاذ الفيلم ويزيد امتصاصه. لذلك، يختار الباحثون غالباً زمن غمر معتدل (عشرات الثواني) لضمان تكوين طبقة ملساء ومتجانسة مع نفاذية بصرية عالية نسبياً [23].
- التوصيلية الكهربائية: بطبقة سميكة نتيجة زمن غمر أطول، يزداد عدد الناقلات الحرة (خاصة مع وجود عامل تطعيم)، فيتحسن التوصيل الكهربائي ما لم تزيد العيوب بشكل كبير. لكن كما سبق، إذا كان الزمن طويلاً جداً قد تتجمع شوائب وتقل نقاوة البلورات فيضعف التوصيل.

4.5.II. تركيز المحاليل ونسبة Al:Zn

- نسبة التطعيم (Al:Zn): تزود زيادة نسبة Al^{3+} في محلول الزنك إلكترونات حرة إضافية في شبكة ZnO، مما يرفع التوصيلية الكهربائية. وقد أظهرت القياسات أنه مع زيادة نسبة الألمين من 0% إلى 6% مثلاً، زيادة حجم البلورات البلورية [23] وتحسناً في جودة التبلور (ازدياد شدة قم XRD وتناقص عرضها) [25]. هذه التحسينات البلورية تؤدي إلى تقليل العيوب والحلقات الخالية، وزيادة كثافة حاملات الشحنة.
- تأثير على الفجوة الشرىة: إدخال ذرات Al في مصفوفة ZnO يؤدي إلى تغيير فجوة الطاقة الظاهرية. في الحقيقة لوحظ انخفاض في قيمة فجوة الطاقة (حركة الحافة نحو طول موجي أكبر) مع زيادة نسبة Al [25]، وذلك نتيجة لتحسين التبلور وزيادة الحجم الحبيبي. هذا يعني تراجع طفيف في طاقة امتصاص الزنك في الأشعة فوق البنفسجية عند مستويات تطعيم عالية. حيث كلما زادت نسبة التطعيم عادة من امتصاص الفيلم في النطاق القريب من UV بسبب زيادة الناقلات الخالصة، مع تراجع بسيط في شفافية الطيف المرئي. بيد أن النسبة المثلى تحافظ على شفافية عالية مع تحسين التوصيل. من جهة أخرى تزيد نسبة Al من تركيز الناقلات الإلكترونية، فتزداد التوصيلية. لكن فوق حد معين من التطعيم قد تبدأ ذرات Al بالتراكم وشكل حبيبات رقيقة، مما يزيد تشتيت الشحنات ويقلل الفائدة. لذلك يجري اختيار نسبة Al معملياً (مثلاً 1-6%) حسب المطلوب [23، 25].

5.5.II. درجة الحموضة (pH) للمحاليل :

- التركيب البلوري والنمو: يعتمد معدل ترسيب ZnO في كل غمر بشكل كبير على pH المحلول. عند pH مرتفع (قاعدية قوية)، يتكون $Zn(OH)_2$ بسرعة ثم يتحلل حرارياً إلى ZnO، مما ينتج ترسيباً أسرع للفيلم. كما وجد أن زيادة pH تؤدي إلى تحسين نقاوة البلورات في الفيلم المنتج. بالاستناد إلى التحليل الطيفي للطبقات، لوحظ أن زيادة pH من 10.5 إلى 12.1 رفعت نفاذية الطبقة في النطاق المرئي بنسبة ملحوظة [22]، كما خفضت الانعكاسية السطحية [22]. هذا يعني أن للطبقات المودعة عند pH أعلى كانت أبقى وأقل إساءةً للضوء المرئي.

- **المورفولوجيا:** الحموضة المرتفعة تؤدي إلى ترسيب حبيبات أصغر وأكثر انتظاماً ، بينما الحموضة المنخفضة تُفضي إلى ترسيب أبطأ وحبيبات أكبر وأكثر مسامية. يمكن تعديل pH للتحكم في جزيئات ZnO وفجوات الشبكة، مما يؤثر على سُمك الطبقة وخصائصها .

6.5.II. نوع الركيزة :

- **التوافق البلوري والتشكل:** يؤثر نوع الركيزة على الشكل والنمو البلوري لـ ZnO:Al. فقد أظهرت صور SEM أن فيلم ZnO على ركيزة النحاس شكل أعمدة (أو إبر) بقطر ~750 نانومتر، بينما على ركيزة السيليكون اتخذت الحبيبات أشكال “زهرة صغيرة” وأطراف مغزلية، وعلى ركيزة الزجاج ظهرت أشكال نانوية مسطحة “نانو-منصات” و”ورود” . [22]
- **ناقلية الضوئية والكهربية:** تختلف الشفافية النهائية للفيلم باختلاف الركيزة؛ فالزجاج الشفاف يتيح فيلماً خفيفاً وشفافاً، بينما الركائز الموصلية (مثل ITO أو النحاس) قد تتداخل مع النقل الإلكتروني للفيلم. التوافق الشبكي بين ZnO والركيزة يؤثر على توجيه النمو البلوري؛ فركيزة متوافقة بكريستاليتها تعزز توجيه محدد (مثل المحور c)، مما يرفع الشفافية ويخفض العيوب البينية.

قائمة المراجع :

- [1] H. Benzarouk, superlattices and microstructure, 52, **2012**, 594-604.
- [2] S. Benramaches, Elaboration et caractérisation des couches minces Zn A dopées Cobalt et Indium, Biskra(2012).
- [3] A. Rahal. Elaboration des verres conducteurs par déposition de ZnO sur des verres ordinaires . Université d'El oued . **2013**.
- [4] A. Necmeddin Yazici, O. Mustafa, zetas-MetinBed'ir, Journal of Luminescence 104 (**2003**) 115.
- [5] R. N. Bulakhe et al, Current Applied Physics ,13, **2013**, 1661-1667.
- [6] G. E. Buono-Core et al, Materials Chemistry and Physics, 96, **2006**, 98-102.
- [7] عبيدة سعيدة، دراسة ثلاث أبعاد للمقادير الكهربائية في جهاز الرش المهبطي المغنيطوني باستعمال طريقة الهجوم المتتبية، جامعة ورقلة، **2012**.
- [8] D. Ouarda, Elaboration et caractérisation de couches absorbantes des cellules solaires en couches minces à base de Cu₂, ZnSnS, constantine1 ,**2013**.
- [9] K . Mouloud, Caractérisation de films minces déposés par plasma PECVD à partir de vapeurs de TMS, constantine, **2006**.
- [10] Bahi Azzououm ahmed " Etude des couches minces du monoxyde de nickle NiO" oran, **2014**.
- [11] Fayssal Ynineb, Contribution à l'élaboration de couches minces d'Oxydes Transparents conducteurs (TCO)" Constantine **2009**.
- [12] A. Chennoufi, «L'effet de la molarité et de la température du substrat sur les propriétés des couches minces d' Oxyde d' Indium (In₂O₃) par spray ultrasonique» Biskra ,(2012) .
- [13] H. Moualkia, « Elaboration et caractérisation de couches minces de sulfure de cadmium(CdS) », Thèse de DOCTORAT, Université Constantine, **2010**.
- [14] I. Gharbi , Mise au point et étalonnage d'un appareil de pulvérisation cathodique", Ouargla, **2007**.
- [15] K. Kamli, "Elaboration et caractérisations physico-chimique des couches minces de sulfure d'étain par spray ultrasonique: Effet des sources d'étain", Biskra, **2013**.
- [16] S. Hariech "Elaboration et caractérisation des couches minces de sulfure de cadmium(cdS) préparées par bain chimique (CBD) Constantine 1(2009).
- [17] R. A. SMITH, "Semiconductors",Cambridge University, Press 2nd ed, England, (**1987**) .
- [18] K. SEGGER, "Semiconductors Physics", 2nd ed, New York, USA(**1980**)
- [19] H. Bendjeffal, D. Guibedj, G. Chastanet, J-F. Letard, F. Djazi, A. Abbaci , K. Guerfi Y. Bouhedja, SILAR deposition of Ni(bpy)₃X : { X =(NCS)₂, (Fe(CN)₅NO) and (Ag(CN)₂)₂} thin films on glass substrates, Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic, and Nano-Metal Chemistry 46 (**2016**) 1741–1750.
- [20] H. Bendjeffal, D. Guibedj, G. Chastanet, J-F. Letard,F. Djazi,A. Abbaci, K. Guerfi Y. Bouhedja, SILAR deposition of Ni(bpy)₃X :{ X =(NCS)₂, (Fe(CN)₅NO) and (Ag(CN)₂)₂} thin films on glass substrates, Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic, and Nano-Metal Chemistry 46 (**2016**) 1741–1750.
- [21] H. Bendjeffal, D. Guibedj, H. Mamine, K. Guerfi, N. Rebbani, Y. Bouhedja, Optical and electrical properties of [Co(bpy)₃Fe(CN)₅NO] thin films deposited by successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR), Method Mater, 5 (**2016**)
- [22] A. Raidou, F. Benmalek, T. Sall, M. Aggour, A. Qachaou, L. Laanab et M. Fahoume, «Characterization of ZnO Thin Films Grown,» *Open Access Library Journal*, 2014.

- [23] B. Yadir, A. Ajdour, I. Antohe, G. Socol, L.-I. Toderascu, D. Saadaoui, I. Chaoulli, R. Leghrib et H. Lahlou, «Aluminum doped zinc oxide nanoplatelets based sensor with enhanced hydrogen sulfide detection,» *scientific reports*, n° %18633, 2025.
- [24] G. Yergaliuly, B. Soltabayev, S. Kalybekkyzy, Z. Bakenov et A. Mentbayeva, «Effect of thickness and reaction media on properties of ZnO thin films by SILAR,» *scientific reports*, n° %1851, 2022.
- [25] I. Kara, A. Ibrahim rashid hafedh et I. Sadeq Raheem Waeli, «Fabrication and analysis of ZnO and Al-doped ZnO films using the SILAR,» *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, n° %11074-1079, 2024.

الفصل الثالث :

طرق تحسين عمليات الإزالة

تعد عملية تحضير الطبقات الرقيقة من أكسيد الزنك المطعم الألومين عملية معقدة تتحكم فيها عدة عوامل، من أبرزها نسبة الألومين، وعدد دورات الترسيب بطريقة سيلر، ودرجة حرارة التلدين. ومن أجل الحصول على طبقات ذات شفافية عالية وناقلية جيدة وتكلفة منخفضة، يجب دراسة تأثير هذه العوامل بدقة. وتتوفر عدة منهجيات لدراسة تأثير المتغيرات، من بينها طريقة عامل واحد في كل مرة (OFAT)، والشبكات العصبية الاصطناعية (ANN)، وتصميم التجارب (DOE) إلا أن بعض هذه الطرق تتطلب وقتاً طويلاً وعددًا كبيراً من التجارب، وقد تفتقر إلى الدقة في تحديد الشروط المثلى. في المقابل، يتيح تصميم التجارب بناء نماذج تنبؤية دقيقة باستخدام عدد محدود من التجارب وفي وقت قصير، ويمكن تنفيذه اعتماداً على نماذج إحصائية متعددة. في هذا العمل، تم اعتماد نموذج بوكس-بينكن لدراسة تأثير نسبة الألومين، وعدد دورات الترسيب، ودرجة حرارة التلدين، باعتبارها من العوامل المؤثرة في تحضير الطبقات الرقيقة.

2.III. العوامل المؤثرة على الامتصاص

• ذوبانية المادة الممتصة

العلاقة العكسية بين ذوبان المذاب في المذيب الذي يتم امتصاصه فيه وكمية المذاب الممتصة. الامتصاص يكون أضعف لأن الرابطة بين المذاب والمذيب قوية [1][2].

• التحريض

اعتماداً على درجة التحريك، فإن الانتشار في الفيلم أو في المسام ينظم معدل الامتصاص. سيحدث الانتشار في المسام بمعدل تحريك أعلى (نظام اتصال من نوع الدفعة).

• حجم جزيئات المادة الممتصة

نظراً لأن المادة الممتصة يجب أن تخرق المسام الدقيقة، فإن حجمها الجزيئي أمر بالغ الأهمية. وتساعد الحركة المستمرة للجزيئات وشكلها غير المتماثل ومسامها ذات الشكل غير المنتظم على تجنب مثل هذا الانسداد. تستغرق الجزيئات الكبيرة وقتاً أطول للانتشار عبر المسام مقارنة بالجزيئات الصغيرة لأنها أقل قدرة على الحركة.

• خصائص وتركيب المادة الماصة

يمكن تسمية جزء المساحة السطحية الكلية المفتوحة للامتصاص بالمساحة السطحية النوعية. إذا كانت المادة مقسمة بشكل أكثر دقة ومسامية للغاية، فسوف يعمل الماص بشكل أفضل.

• درجة حموضة البيئة

يؤثر الرقم الهيدروجيني للمحلول على قدرة المادة الماصة على الارتباط بالمادة الممتصة. في الواقع، تتغير الشحنات الكهربائية على سطح المادة الماصة اعتماداً على الرقم الهيدروجيني. على الرغم من أن زيادة كفاءة العملية تعد هدفاً أساسياً، إلا أنها قد تؤدي في كثير من الأحيان إلى زيادة التكاليف.

3.III. صعوبات في تحسين عمليات الإزالة

بعد التحسين، والذي يتضمن اختيار أفضل الأجزاء من البدائل المتاحة، استراتيجية أساسية لتحقيق الأداء الأمثل [3]. تقليدياً، يتضمن التحسين تتبع تأثير كل متغير مستقل على الاستجابة. يتم تغيير متغير واحد فقط في كل مرة، في حين تبقى المتغيرات الأخرى ثابتة. ومع ذلك، فإن هذه التقنية لا تأخذ في الاعتبار تأثيرات التفاعل بين المتغيرات، وهو ما قد يقيد عرض التأثير الكلي للمتغير على استجابة محددة. ولمعالجة هذه القيود، يمكن استخدام استراتيجية أكثر تعقيداً، مثل تصميم التجارب [4].

4.III. طريقة عامل واحد في كل مرة

يعد عامل واحد في كل مرة (OFAT) أحد أقدم وأقدم الأساليب في أبحاث المرونة التي وضعها فريدمان وسافاج (1947). سوف يقوم OFAT بإجراء تجربة عاملية كاملة [5] إنها عملية تتم من تجربة لأخرى، حيث يتم تغيير عامل واحد فقط. يتم الاحتفاظ بالتغيرات في المتغيرات التي تعمل على تحسين الاستجابة، في حين يتم عكس تلك التي تكون ضارة. يتم تكرار هذه التقنية حتى استنفاد جميع العوامل [6] كما هو موضح في الشكل 1.III. لنظام مكون من ثلاثة مكونات، يتم فحص كل منها على مستويين [7]. يتم وصف المراحل المختلفة للعملية بالخطوات التالية [8]

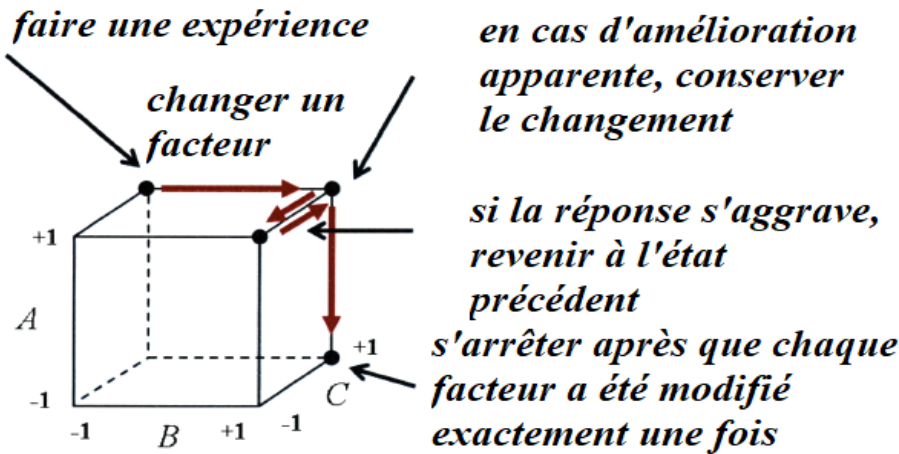
الخطوة 1: اختيار مجموعة محددة من المتغيرات المستقلة.

الخطوة 2: تنظيم المتغيرات المستقلة.

الخطوة 3: إجراء الاختبارات عند نقطة البداية الأولية وفي تسلسل النقاط التي تغير فقط القيمة المخصصة للمتغير المستقل الأول، مع إبقاء المتغيرات الأخرى ثابتة. تحديد المتغير المستقل الأول الذي تكون قيمته هي التي تعظم الاستجابة.

الخطوة 4: تكرار الخطوة 3 مع المتغير المستقل الثاني، مع إبقاء المتغير المستقل الأول عند الحد الأقصى للقيمة المكتشفة في الخطوة 3 والمتغيرات المستقلة الأخرى، باستثناء الثاني، عند القيم المخصصة لها في البداية.

الخطوة 5: بمجرد تغيير جميع المتغيرات (دورة واحدة من التجارب)، يمكن تكرار العملية، إلا أن نقطة البداية الأولية يتم استبدالها بمجموعة قيم المتغيرات المستقلة التي تم الحصول عليها في نهاية الدورة الأولى.



الشكل 1.III: رسم بياني توضيحي لاختبار التكيف بعامل واحد في كل مرة لنظام ثلاثي العوامل بمستويين لكل عامل [7].

لقد تعرضت خطط OFAT لانتقادات واسعة النطاق في الأدبيات الإحصائية وفي الأدبيات المتعلقة بالخطط المرنّة [9] لأنه ثبت أن الجوانب السلبية المختلفة تفوق الجوانب الإيجابية. ولكن من الضروري أن ندرس بعناية مزاياها وعيوبها، على النحو التالي:

1.4.III. المزايا

لا تتطلب الدراسات التقليدية التي تعتمد على "عامل واحد في كل مرة" (OFAT) مهارات إحصائية واسعة النطاق لتنفيذها أو تفسير البيانات. لا تزال العديد من الشركات تستخدم تقنية OFAT عند إجراء الاختبارات لتحديد تعديل العناصر المهمة [10]. في الأنظمة التي يحتمل أن يكون بها تفاعلات، قد تكون تقنية OFAT هي المفضلة لأنها تركز الملاحظات في المناطق التي يحتمل أن تحتوي على أفضل. [11]

2.4.III. العيوب

• الاعتماد على نقطة البداية: بسبب اعتماده على نقطة البداية الأولية، فإن نهج OFAT يكافح من أجل الكشف عن الظروف

المثالية، مما يؤدي إلى استكشاف غير ضروري للمساحة التجريبية. [12][13]

● **تحيز الباحث:** إن نهج OFAT عرضة لتحيز الباحث، حيث أن افتراضاتهم أو توقعاتهم قد تؤثر على اختيار المعلمات التجريبية، وبالتالي الحد من دراسة المواقف المتفوقة المحتملة.-[12][13]

● **المعرفة المحدودة بالتفاعلات:** نظرًا لأن تقنية OFAT لا تدرس التفاعلات بين المتغيرات بشكل منهجي، فإنها تخاطر بإغفال الارتباطات المعقدة بين المتغيرات التي يمكن أن يكون لها تأثير كبير على الإنتاج وجودة المنتج.-[12][13]

● **عدم الكفاءة في توليد المعلومات:** بالمقارنة مع تقنية منهجية مثل التصميم التجريبي، حيث يسمح التعديل المتزامن للمعلمات بفهم أكثر اكتمالاً للمساحة التجريبية، قد تكون طريقة OFAT أقل كفاءة في توليد معلومات مفيدة.-[12][13]

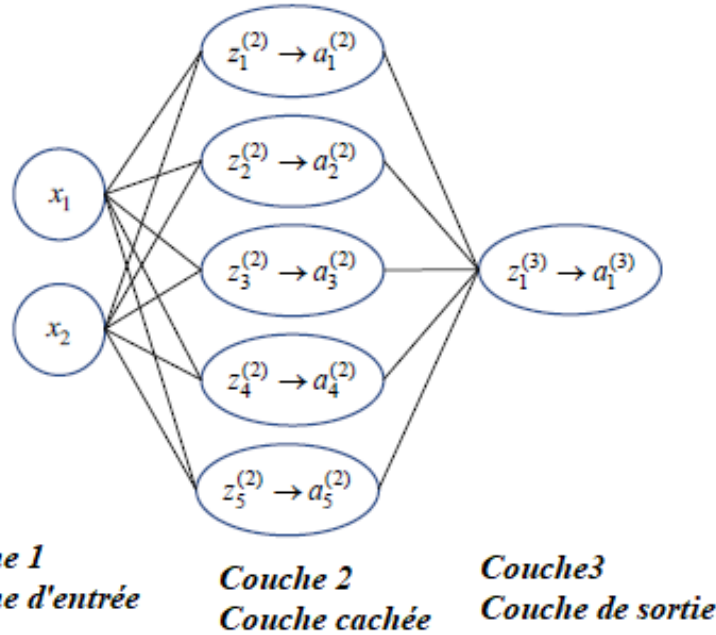
● **الخوف بشأن ارتفاع التكاليف والوقت المطلوب والموثوقية**

● **قد يكون OFAT أكثر تكلفة ويستغرق وقتًا أطول ويكون أقل موثوقية.-[12][13]**

5.III. طرق تحسين الشبكات العصبية

الشبكات العصبية الاصطناعية (ANNs) هي نماذج تعلم آلي معيارية تستخدم عادة في مهام تحديد الأنماط. يمكن تحويل مجموعة متنوعة من المشاكل الواقعية في الفيزياء والكيمياء والاقتصاد والطب وغيرها من المجالات إلى مشاكل التعرف على الأنماط وحلها باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية..[14]

نماذج الشبكات العصبية (NN) هي خوارزميات للأنشطة المعرفية مثل التعلم والتحسين، استنادًا إلى كيفية عمل الدماغ البشري. يتم بناء نموذج الشبكة العصبية من عدد كبير من مكونات المعالجة تسمى الخلايا العصبية. كل خلية عصبية متصلة بخلايا عصبية أخرى عن طريق اتصالات، ولكل منها وزنها الخاص. يتم استخدام متغيرات الحالة لتمثيل الخلايا العصبية. متغيرات الحالة هي عبارة عن مجموعات مرجحة من متغيرات الإدخال ومتغيرات الحالة الأخرى. بطريقة متوازية موزعة، يقوم كل عصبون بإجراء تحويل أساسي في نفس الوقت.[15][16] يوضح الشكل III.2 المبادئ الأساسية للشبكات العصبية. في هذا المثال، هناك ثلاثة مستويات. طبقات الإدخال والإخراج هي الطبقات الأولى والأخيرة على التوالي. الطبقة الوسطى تسمى الطبقة المخفية.[17]



الشكل III.2: مثال على شبكة عصبية ذات طبقة مخفية واحدة.

يتطلب بناء نماذج المحض النووي الريبي فهم مبادئ الشبكات العصبية والمجال العلمي الذي سيتم استخدامها فيه. نظرًا لأن العناصر التي تحدد الشبكة، مثل بنيتها أو قيم المعلمات المستخدمة في تدريبها، مترابطة مع بعضها البعض، فمن الضروري فهم كيفية تفاعل هذه العوامل إذا أردنا أن يكون استخدام الشبكة العصبية الاصطناعية مثيرًا. [18] دعونا نفكر في بعض مزاياها الرئيسية، متبوعة بالخاوف المهمة بشأن حدودها.

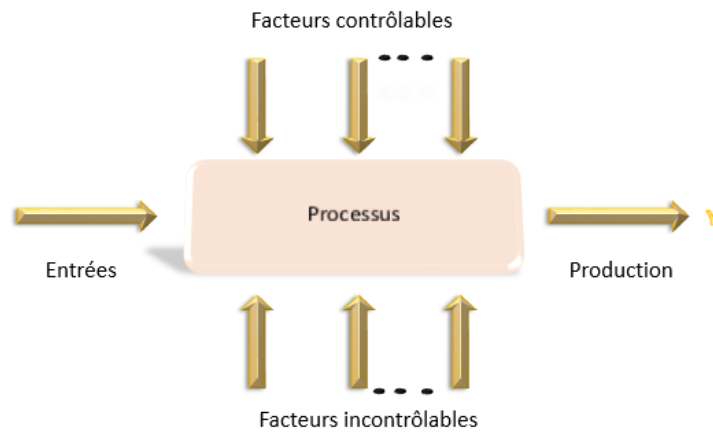
1.5.III. فوائد

- **النمذجة المفيدة للعمليات المعقدة:** تعتبر RNs تقنيات مفيدة لنمذجة العمليات الكيميائية المعقدة، خاصة عندما تكون النماذج المبدئية غير خطية ومكلفة حسابيًا.
- **المعالجة السريعة:** تتطلب عمليات محاكاة RN حسابات جبرية غير تكرارية، مما يسمح بمعالجة سريعة للنموذج، وهو أمر ممتاز للتطبيقات والأنشطة عبر الإنترنت التي تنطوي على عدد كبير من عمليات المحاكاة.
- **تحسين العمليات بكفاءة:** إن استخدام RN مع أساليب التحسين التقليدية، مثل البرمجة غير الخطية، يمكن من تحسين العمليات بكفاءة. [19][20]

6.III. الخطة التجريبية

1.6.III. المقدمة ونطاق الاستخدام

تصميم التجربة هو استراتيجية منهجية لتحليل تأثير معلمات الإدخال على عملية معينة، **الشكل 3.III** وهي استراتيجية إحصائية تستخدم على نطاق واسع في العديد من القطاعات، بما في ذلك الهندسة الكيميائية، والتنمية الصناعية، والبحوث الزراعية والبيولوجية. [21]



الشكل 3.III: نمذجة عملية أو نظام

يتألف بناء الخطة التجريبية من استخراج عدد كافٍ من التركيبات الخاصة من المجال التجريبي من أجل تقدير المجهولات p للنموذج (إضافي أو متعدد الحدود) مع الحد الأدنى من عدم اليقين ولكن أيضًا المتجانس مع احترام القيود الفنية والاقتصادية للدراسة. [22]

2.6.III. تصنيف التصميم التجريبي

يتم تصنيف التصميمات التجريبية إلى فئتين [23]:

- التصميمات التجريبية المتزامنة: تعني أن جميع التجارب يتم إكمالها قبل تحليل البيانات.
- التصميم التجريبي المتسلسل: نتائج التجربة تحدد ظروف التجربة.

3.6.III. شروط التصميم التجريبي

- إن المجرمين في المختبرات، الذين ليسوا بالضرورة علماء رياضيات، يدركون أنه لإجراء تجربة، يجب استيفاء الشروط التالية:
- وحدة تجريبية مناسبة لكل مجال.

- مساحة التصميم هي مجموعة من المواقف التجريبية.
- القياسات أو الاستجابات (y) المكتسبة لقيم توضيحية مختلفة أو متغيرات إدخال (u). في أغلب الأحوال، يقوم المحرب بتصميم كتل في الأسئلة الكيميائية، والوحدة التجريبية هي الأداة التي تعطي القياسات. [24]

III.4.6. تاريخ التصميم التجريبي

من العصور القديمة إلى العصور الوسطى، أجريت التجارب لاستكشاف وفهم الظواهر. تناولت نيكول أورسم (1325-1382) هذا الموضوع في كتاباتها، مما أثر على مفكرين مثل ديكرت ولاينتر. كان فرانسيس بيكون (1561-1626) رائدًا في المنهج التجريبي من خلال إجراء دراسات على إنبات القمح في ظل ظروف مختلفة. [25]

أكتسب النهج التجريبي شعبية في القرن التاسع عشر، وذلك بفضل عمل آرثر يونج (1746-1820) في مجال علم الزراعة والزراعة التجريبية. كما ساهم كريست دي بالويل (1741-1798) أيضًا في دراسة فوائد الجذور كسماد للأغنام. [26]

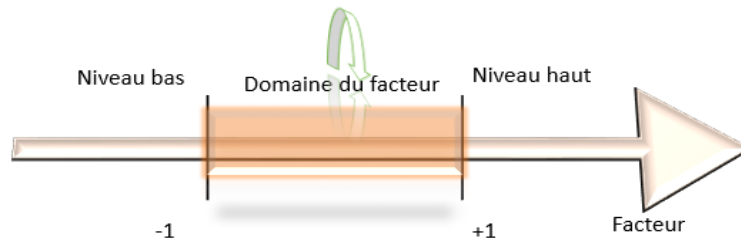
أجرى كلود برنارد (1813-1878) تجارب طيبة رائعة ونشر أفكارًا حول الطب التجريبي. [27] لقد ساهمت هذه المساهمات في تشكيل تقدم المنهج التجريبي على مر السنين. [28]

قام فيشر في ثلاثينيات القرن العشرين بقياس تأثير العوامل التي يتحكم فيها المحرب. وقد قام باحثون مثل بيتس، وكوشران، وبلايكت، وبورمان بإثراء هذه الطريقة. قام بوكس وهنتر بتطوير نهج محدد لنماذج سطح الاستجابة. تُستخدم التصميمات التجريبية بشكل متزايد في الشركات والجامعات. تم تطوير برامج سهلة الاستخدام لتسهيل إنشائها وتحليلها. [29]

III.5.6. مصطلحات التصميم التجريبي

III.5.6.1. عامل

الهدف من التجربة هو ربط التأثير بالحافز رياضيا. في سياق التصميم التجريبية، تسمى المحفزات "العوامل"، في حين تسمى التأثيرات "الاستجابات". العامل هو مجموعة من القيم التي يتم تقييم الحافز ضمنها. يُطلق على هذا النطاق اسم نطاق العامل ويتم تحديده بمستويين: منخفض وعالي الشكل III.4. يتم تصنيف المستوى المنخفض على أنه -1، بينما يتم تصنيف المستوى العالي على أنه +1. [30]



الشكل III.4: مجال العوامل

III.5.6.2. مستوى العامل

مستويات العامل هي القيم العديدة التي يمكنه أن يأخذها. يحدد التصميم التجريبي المستويات المستخدمة في التجربة، من بين جميع التركيبات الممكنة لهذه المستويات. [31]

III.5.6.3. تفاعل العوامل

إذا كان تأثير أحد العوامل يعتمد على مستوى المتغير الآخر، يتفاعل عاملان مستقلان. [32]

III.4.5.6. الإجابات

التفاعلات التجريبية هي مظاهر قابلة للقياس يتم اكتشافها عند تعديل المعلمات المدروسة. يمكن استخدام العديد من التفاعلات التجريبية لتوصيف ظاهرة ما [33].

III.5.6.5. أبعاد

إن عدد مستويات كل مكون وعدد العوامل يحددان أبعاد التجربة العملية. على سبيل المثال، تجربة ثلاثية العوامل، حيث يحتوي المكون الأول على مستويات P ، ويحتوي المكون الثاني على مستويات Q ، ويحتوي المكون الثالث على مستويات R ، سيتم وصفها بأنها تجربة عملية $P*Q*R$. هذا هو الشكل العام، والأبعاد في الحالة الخاصة يمكن أن تأخذ أي قيمة لـ P و Q و R . [34]

III.5.6.6. مصفوفة تجريبية

تسمى الترجمة المدونة لخطة تجريبية بمصفوفة تجريبية. ويأتي على شكل جدول يزود الباحث بالبيانات المنظمة اللازمة للتجربة. يمثل كل صف في هذا الجدول تجربة واحدة ويمثل كل عمود عاملاً أو مجموعة من العوامل. [35]

III.5.6.7. المتغيرات الموحدة والمتغيرات المشفرة

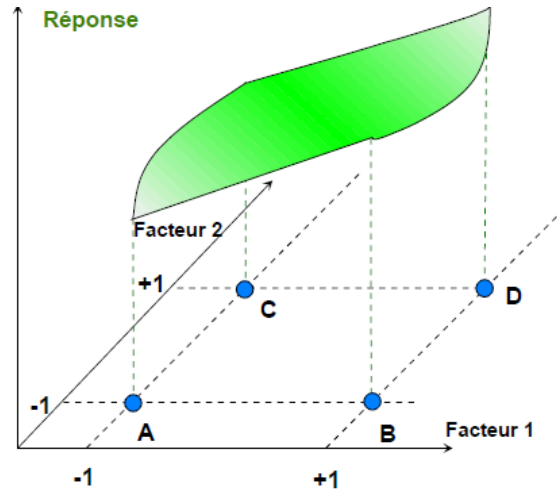
يسمح استخدام المتغيرات المشفرة بإنشاء تصميم تجريبي مناسب لإعدادات ومجالات دراسية متعددة. ومن خلال تحويل المتغيرات الحقيقية إلى متغيرات مشفرة، يتم إنشاء نطاق ثابت من التباين (من -1 إلى $+1$) لكل مكون، مما يسمح بمقارنة تأثيراتها المنفصلة بسهولة. يمكن استخدام الصيغة التالية (المعادلة III.1) لتحويل المتغيرات الحقيقية إلى متغيرات مشفرة والعكس صحيح: $X = (A - A_0)$ (المعادلة III.1)

يمثل X القيمة المشفرة، و A القيمة الفعلية، و A_0 متوسط القيمة الفعلية، والفاصل هو الفرق بين متوسط موضع المتغير وأحد طرفي

النطاق. [36]

III.5.6.8. سطح الاستجابة

المستويات X_i هي إحداثيات النقطة التجريبية و Y تمثل قيمة الاستجابة المقابلة. يتم إنشاء محور عمودي على المساحة التجريبية وتخصيصه للاستجابة ليعكس بشكل بياني التصميم التجريبي ورد الفعل. بالإضافة إلى البيئة التجريبية، هناك حاجة إلى تمثيل هندسي للتصميم التجريبي والاستجابة. على سبيل المثال، يتطلب التصميم ثنائي العوامل مساحة ثلاثية الأبعاد حيث يكون هناك بعد واحد للاستجابة وبعدين للعوامل. كل نقطة في مجال البحث تتوافق مع قيمة الاستجابة. تتوافق مجموعة جميع النقاط في مجال البحث مع مجموعة من الاستجابات الموضوعة على سطح الاستجابة الشكل III.5. [37]



الشكل III.5: نموذج سطح الاستجابة باستخدام النقاط التجريبية

III.5.6.9. خطأ عشوائي

تباين الاستجابة بسبب عوامل خارجة عن السيطرة (إزعاج) أثناء التجربة. بشكل عام، ليس من الضروري الحصول على نفس النتيجة في تجربتين لنفس مجموعة المستويات بسبب خطأ عشوائي. الأخطاء العشوائية أمر لا مفر منه في التجارب الصناعية. عندما نكرر التجربة في نفس الإطار التجريبي، قد نحصل على نتائج مختلفة بسبب الأخطاء العشوائية، وهو ما يعرف بالتجارب المتكررة أو التجارب

المكررة. في معظم الدراسات، يمكن اعتبار الخطأ العشوائي موزعاً وفقاً لقانون طبيعي، $(0, \sigma^2)$. يعبر التباين 2 عن أهمية الخطأ العشوائي. يتطلب وجود خطأ عشوائي تصميمات ونماذج أكثر تعقيداً [44]. [38]

6.6.III. النمذجة الرياضية

تبدأ عملية النمذجة الرياضية باختيار دالة رياضية تربط الاستجابة بالمعاملات المعتبرة. يتم استخدام توسع سلسلة تايلور-ماكلورين بشكل شائع، حيث يُفترض أن المشتقات ثابتة وأن التوسع يأخذ شكل كثير حدود بدرجات متفاوتة. المعادلة الأساسية لهذه هي: [39]

$$y = \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ij} x_i^2 + a_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z \quad (\text{المعادلة III.2})$$

حيث يمثل y الاستجابة التي لوحظت في التجارب ويشير x_i إلى قيم العوامل التي اختارها الباحث. إن المجهول الذي سيتم تحديده من النتائج التجريبية هو المعاملات a_{ij} و a_i و a_0 . يتنبأ هذا النموذج، الذي يُطلق عليه أيضاً "النموذج المفترض" أو "النموذج المسبق"، باستجابات لمجموعات مختلفة من العناصر دون الحاجة إلى تجارب جديدة. ومع ذلك، هناك نوعان من الخلاف يجب مراعاتهما: عدم الملاءمة والخطأ التجريبي، والذي يتم دمجها أحياناً في مصطلح خطأ واحد يسمى وبالتالي يصبح نموذج المجرى

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z + e \quad (\text{المعادلة III.3})$$

تسمح لنا التصميمات التجريبية بدراسة تأثير العديد من العوامل دون زيادة عدد التجارب بشكل مفرط. في حالة التصميمات التجريبية، غالباً ما تكون هذه الوظيفة الرياضية متعددة الحدود. [40]

7.6.III. مبدأ

إن أسلوب تصميم التجارب هو استراتيجية تهدف إلى تلبية احتياجات محددة. يعتمد هذا النموذج على ثلاثة مبادئ أساسية: التكرار، والعشوائية، والحظر (أو التحكم في الخطأ)، والتي يجب اتباعها بدقة من أجل التنفيذ الهادف للظروف التجريبية والتنبؤ المعقول بأفضل متغيرات الاستجابة. وتوفر الأقسام التالية مزيداً من المعلومات حول مفاهيم التصميم التجريبي المذكورة أعلاه. [41][42]

• التكرار

من المستحسن استخدام عدد كبير من التكرارات في أي نقطة في التصميم التجريبي لتقليل الأخطاء التجريبية. لا توجد قاعدة صارمة وسريعة لاختيار عدد التكرارات، ولكن بالنسبة لأي خطة فمن الأفضل استخدام ثلاثة تكرارات على الأقل.

• التخصيص العشوائي

من الأفضل إجراء جميع التجارب بشكل عشوائي وإجراءها بترتيب عشوائي. يساعد هذا على تجنب التحيزات التجريبية التي قد تنتج عن إجراء الاختبارات التسلسلية.

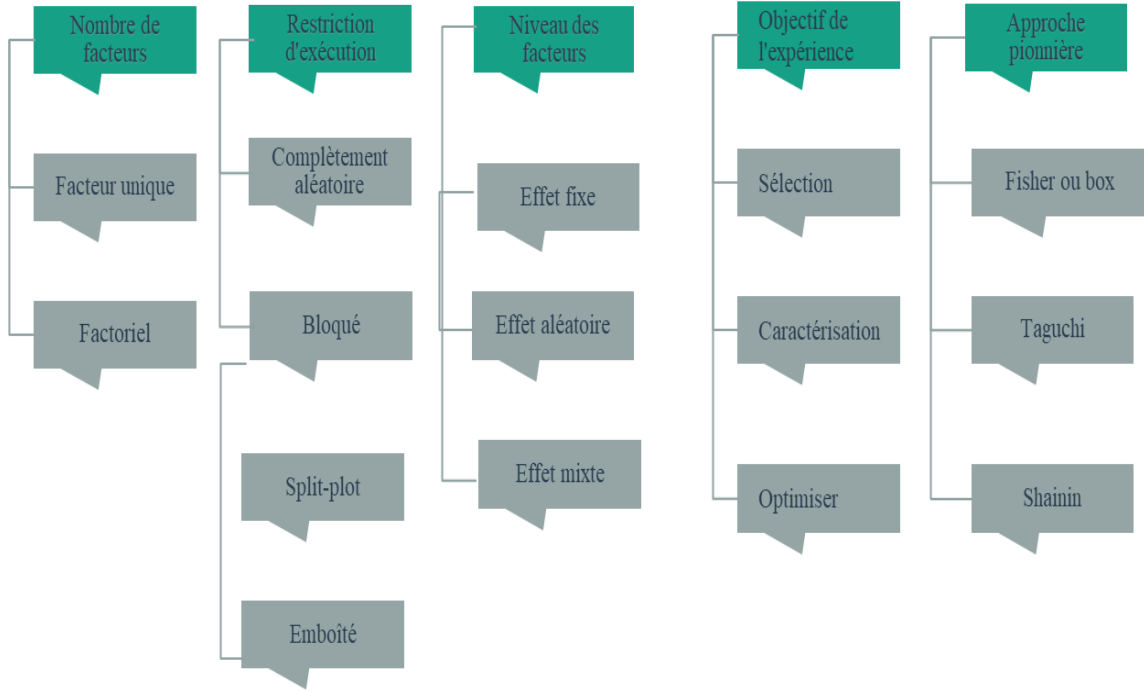
• التحكم في الخطأ أو الحظر

الحجب هو تقنية لتقليل أو القضاء على التباين الناتج عن العناصر غير المرغوب فيها والتي قد تؤثر على نتائج التجربة.

8.6.III. أنواع التصميم التجريبية الإحصائية

يتم تحديد DOE الصحيح الذي يجب استخدامه من خلال معايير مثل هدف التجربة، وعدد العوامل المشاركة، وعدد مستويات هذه العوامل، والقيود التي يجب مراعاتها أثناء التجربة. يمكن تصنيف أنواع DOE بطرق مختلفة كما هو موضح في الشكل III.6. [43]

Classification des types d'expériences DOE



الشكل III.6: مخطط تصنيف نوع وزارة الطاقة

1.8.6.III. مخططات سطح الاستجابة القياسية

غالبًا ما تُعرف باسم تصميمات الانحدار لأنها غالبًا ما يتم تحليلها باستخدام تقنيات الانحدار. [44] تعتبر التصميمات من الدرجة الأولى مفيدة جدًا لدراسات الاختيار. الأكثر شيوعًا هو فئة 2^m، حيث m هو عدد المكونات التجريبية والعوامل الكسرية 2ⁿ-م. التصميمات من الدرجة الثانية: على عكس التصميم من الدرجة الأولى، فإنه يتطلب ثلاثة مستويات على الأقل لكل عامل تم أخذه في الاعتبار مثل تصميم [44] Box Behnken.

1.1.8.6.III. تصميم عاملي كامل

يتم استخدام التصميم العامل الكامل لدراسة مجموعة مكونة من عاملين أو أكثر. في هذه الخطوة، كل خيار من كل عامل مرتبط بكل خيار من العوامل الأخرى. يؤدي هذا إلى إنشاء ترتيب منظم للأشياء، والذي يمكن تمثيله كشبكة مربعة أو مستطيلة لعاملين، أو كشبكة مكعبة أو متوازية السطوح لثلاثة عوامل، وهكذا. [45]

2.1.8.6.III. التصميمات العاملية الكسرية

تم تقديمه في ثلاثينيات وأربعينيات القرن العشرين استجابةً للعدد المفرط من التجارب المشاركة في التصميمات العاملية الكاملة. [46] على عكس التصميم الكامل، يتمتع التصميم الكسري بمزايا تسهل إجراء التجارب من خلال دراسة جميع العوامل، ولكن مع عدد أقل من التشغيلات

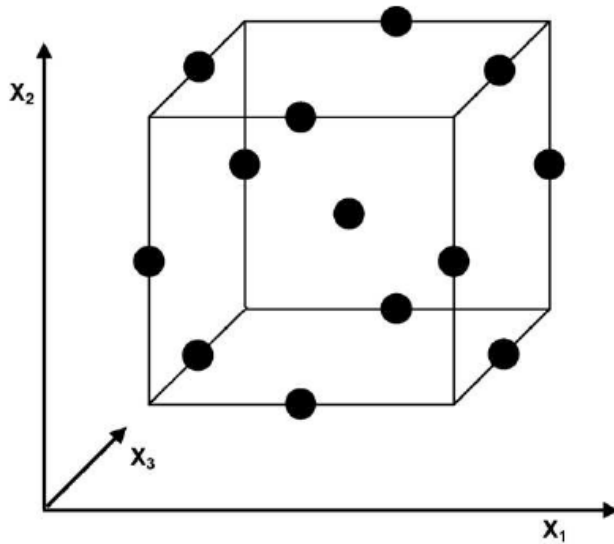
يحتوي التصميم العامل الكسري على 2ⁿ مرات أو 4ⁿ مرات أو 2ⁿ مرات أقل من التشغيلات من التصميم العامل الكامل المقابل. [47] يتميز التصميم العامل الكسري 2ⁿ-m بوجود m من الكلمات المستقلة المكونة من حروف والتي تعمل كعلامات للعوامل التي يمثلها 1، 2، ...، n . يتوافق طول الكلمة مع عدد الحروف التي تحتويها. العلاقة التي تحدد الكسر هي مجموعة الكلمات المختلفة التي تم إنشاؤها بواسطة جميع المنتجات التي يمكن تحقيقها باستخدام m كلمة مميزة. [48]

III.1.2.1.8.6 هدف التصميم العاملية الكسرية

الهدف هو توفير المال على العلاجات من خلال السماح بخلط بعض التأثيرات الناجمة عن إضافة عناصر جديدة إلى إطار التصميم العامل الكامل، والمعروف أيضًا باسم التصميم الأساسي. أما الهدف الثاني، وهو الأكثر جوهرية، فهو الحفاظ على صفات التعامد للتصاميم العاملية الكاملة من أجل الحصول على تقديرات مستقلة لأي فعل أو مجموع الأفعال مجتمعة.. [49]

III.1.8.6.3. بوكس-بهينكن (BBD)

اقترحه بوكس وبهينكن (1958) [50] تصميمات (BBD) Box-Behnken هي نوع من التصميم من الدرجة الثانية الذي يدور أو يكاد يدور ويعتمد على تصميمات عاملية غير مكتملة ذات ثلاثة مستويات. يوضح الشكل III.7 تمثيلًا بيانيًا لثلاثة عناصر. [51] يسمح هذا الهيكل بتقييم كل مستوى عامل أربع مرات مع مراعاة 13 فقط من 27 مجموعة علاجية محتملة لتصميم عاملي تقليدي ثلاثي المستويات. نظرًا لاستبعاد التركيبات ذات المستوى المنخفض والمستوى العالي فقط، فإن تصميم Box Behnken يحدد منطقة تجريبية أكثر كروية من الشكل المكعب الشائع في التصميمات العاملية.. [52]



الشكل III.7: مكعب يتكون من نقطة المركز ونقاط منتصف الحواف.

III.1.3.1.8.6 الهدف من BBDs

- تطوير النماذج الكروية: يمكن تنفيذها باستخدام ثلاثة مستويات فقط من المتغيرات. وهذا يبسط تنفيذ التجربة. [53][54]
- السماح بتدوير النموذج: إنشاء مستويات Box-Behnken التي يمكن تدويرها بسهولة. وهذا يوفر حرية أكبر في تصميم التجارب. [53][54]
- تجنب التركيبات المتطرفة: قم بإنشاء نماذج لا تحتوي على تركيبات تكون فيها جميع المكونات عند الحد الأقصى أو الحد الأدنى لقيمتها في نفس الوقت. يساعد هذا على تجنب إجراء الاختبار في ظل ظروف صعبة، مما قد يؤدي إلى نتائج غير مرضية. [53][54]
- تقليل عدد الاختبارات: من أجل الحصول على نتائج ذات صلة. وهذا يوفر الوقت والموارد والمال الذي يتم إنفاقه على إجراء التجربة. [53][54]
- تقليل عدد الاختبارات: من أجل الحصول على نتائج ذات صلة. وهذا يوفر الوقت والموارد والمال الذي يتم إنفاقه على إجراء التجربة. [53][54]

9.6.III. التطبيقات

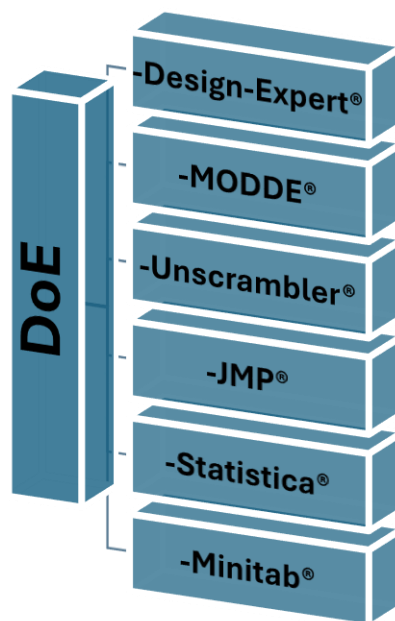
تُستخدم التجارب المصممة إحصائيًا في تطبيقات جميع أنواع الصناعات تقريبًا. يُقال في كثير من الأحيان أن التجارب المصممة يمكن تطبيقها في أي مكان توجد فيه منتجات وعمليات. وتستخدمها الصناعات مثل الزراعة والكيمياء والكيمياء الحيوية والأدوية وتصنيع أشباه الموصلات والهندسة الميكانيكية والمنسوجات والسيارات بشكل منتظم. لا داعي للقول بأن هناك العديد من المقالات البحثية المتاحة التي توضح التطبيقات الواسعة للتجارب المصممة إحصائيًا في العديد من العمليات والمنتجات والأنشطة المتعلقة بالإدارة، بما في ذلك توصيف العمليات وتحسينها وتصميمها وتطوير المنتجات وخفض التكاليف. [55]

1.9.6.III. التطبيق في الكيمياء:

حتى الآن، ظلت الكيمياء موضوعًا يعتمد بشكل كبير على التحقيق التجريبي. يجب على الكيميائيين أن يفهموا كيفية استخدام التصميم التجريبي لاستخراج المعلومات المفيدة من التجارب الكيميائية بكفاءة وتحقيق ظروف التفاعل المثالية للعملية الكيميائية التي تتم دراستها. إن التجربة المصممة جيدًا والنموذج المناسب لا يوفران المزيد من المعلومات فحسب، بل يحققان أيضًا الظروف التجريبية المثالية، في حين أن التجربة الكيميائية المصممة بشكل سيئ قد توفر معلومات غير كافية للغاية، حتى لو تم استخراج المعلومات الكيميائية باستخدام طريقة تحليل بيانات جيدة جدًا. لذلك، فإن التصميم الفعال للتجربة الكيميائية أمر ضروري للكيميائيين. [56]

10.6.III. البرمجيات المستخدمة

يعد استخدام البرمجيات مفيدًا للغاية في حل المشكلات الرياضية والإحصائية المعقدة التي تواجهها عند تنفيذ التصميمات التجريبية. يقدم السوق مجموعة مختارة من البرامج المصممة خصيصًا لإجراء دراسات DoE، كما هو موضح في الرسم التخطيطي الشكل 8.III، تقدم هذه الأدوات عمومًا واجهة سهلة الاستخدام ترشد المستخدم خلال كل خطوة من خطوات عملية تطوير المنتج. [57]



الشكل 8.III: رسم تخطيطي يوضح البرنامج المصمم لوزارة الطاقة

11.6.III. وجهات النظر والمنهج المنهجية

وتتراوح ظروف تكييف هذه الطريقة من إدارة الجودة وحل المشكلات إلى تحسين المنتج (من وجهة نظر التصميم) أو عملية التصنيع. علاوة على ذلك، يمكن اعتبار تصميم التجارب (DOE) بمثابة مجموعة من الإجراءات والأدوات التي يمكن اختيارها وفقًا لأهداف الدراسة. وترد أدناه المنهج الرئيسية لوزارة الطاقة، والتي تم تصميمها لتلائم الاحتياجات والمتطلبات المحددة. [58]

● تحديد الأهداف والاستجابات:

يهدف التصميم المقارن إلى إقامة رابط سببي بين المكونات المختلفة للبحث وتحديد العنصر الأكثر صلة مسبقًا. التحدي هنا هو تحديد ما إذا كان العنصر له تأثير "كبير" في الحصول على الاستجابة وما إذا كان يسبب تغييراً كبيراً في الاستجابة اعتياداً على درجاته المختلفة.

● اختيار المتغيرات والمساحة التجريبية:

يتم استخدام خطة الاختيار لدراسة مجال تجريبي غير معروف. يتم بناء الخطط بطريقة تسمح بفصل الجوانب المؤثرة ودراسة نتائجها الرئيسية.

● التحقق من صحة النموذج: هناك احتمالان:

يتم تحقيق الأهداف إذا تم التحقق من النموذج، أي أنه يصف بشكل صحيح الظواهر التي تم فحصها في المنطقة التجريبية. وفي هذه الحالة، يمكن استخدام النموذج للتنبؤ بالنتائج في أي نقطة في المنطقة التجريبية.

● لا يمكن استخدام النموذج إلا إذا تم التحقق منه. لذلك يجب اقتراح نموذج آخر [59]

7.III. خاتمة

تتوفر اليوم عدة طرق لمعالجة المياه، ولكن القليل منها فقط يعتبر فعالاً من حيث التكلفة وصديقاً للبيئة. يعد الامتزاز أحد الطرق المفيدة، كما أن استخدام التصميم التجريبي يسمح بتحسين ظروف المعالجة إحصائياً وكفاءة. وتوفر هذه الأساليب آفاقاً واعدة لتحسين كفاءة وفعالية التكلفة لمعالجة الملوثات الدقيقة في المياه، مما يمهد الطريق للتقدم المستقبلي في هذا المجال الحيوي لمعالجة المياه.

- [1] M. EL JAÏ, Prise en compte de l' aspect multiobjectif dans la modélisation des systèmes industriels : Approche holonique et optimisation multiobjectif, UNIVERSITE SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH, 2016.
- [2] E.M. Silva, D.R. Pompeu, Y. Larondelle, H. Rogez, Optimisation of the adsorption of polyphenols from *Inga edulis* leaves on macroporous resins using an experimental design methodology, *Sep. Purif. Technol.* 53 (2007) 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2006.07.012>.
- [3] F. Rabier, Modélisation par la méthode des plans d' expériences du comportement dynamique d' un module IGBT utilisé en traction ferroviaire, (2007) 239 pages.
- [4] A.I. Vogel, J. Mendham, J. Toullec, M. Mottet, Analyse chimique quantitative de Vogel, (2006) 889.
- [5] C.P. Kitsos, Optimal Experimental Design for Non-Linear Models, n.d.
- [6] J. Klein, G. Giglioni, Francis Bacon, (2003).
- [7] P. Dagnelie, Le plan d' expérience évolue ..., (1920) 13–36.
- [8] W.R. CAMPBELL, Claude Bernard, 1813-1878: The Founder of Modern Medicine, *Can. Med. Assoc. J.* 89 (1963) 127.
- [9] Walter Tinsson, Plans d'expérience: constructions et analyses statistiques , n.d.
- [10] S. KARAM, Application de la méthodologie des plans d'expériences et de l'analyse de données à l'optimisation des processus de dépôt, Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France, (2004) Thèse, UNIVERSITE DE LIMOGES, France.
- [11] T. Fabien, Amélioration de la fiabilité d'un système complexe Application ferroviaire : Accès voyageurs, Université de VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS, 2013.
- [12] A. Rosenblad, The Concise Encyclopedia of Statistics, 2011. <https://doi.org/10.1080/02664760903075614>.
- [13] A.T. Abdulrahman, Construction and Analysis of Experimental Designs, (2020).
- [14] D.S. Anderson, Value-added management with design of experiments, 1995. [https://doi.org/10.1016/0261-3069\(95\)90080-2](https://doi.org/10.1016/0261-3069(95)90080-2).
- [15] K.D. Broota, Experimental Design in Behavioural Research, 1989.
- [16] L. Ronin, Développement de la production en continu dans l'industrie pharmaceutique : étude bibliographique et expérimentale de la mise en forme de poudres par extrusion. *Sciences pharmaceutiques*. 2017. hal-01931807 HAL, (2018).
- [17] S. Zeyneb, Séparation des ions de lanthane(III) par la technique de point de trouble. Optimisation expérimentale et statistique., UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMEN, 2020.
- [18] J. Goupy, Les plans d'expériences, *Rev. Modul.* (2006) 74–116.
- [19] P. He, D.K.J. Lin, M.Q. Liu, Q. Xu, Y. Zhou, Theory and application of uniform designs, 2020. <https://doi.org/10.1360/SSM-2020-0065>.
- [20] B. Hamida, Etude de l'élimination de la pollution des composés récalcitrants d'un milieu réactionnel en appliquant les procédés d'oxydation avancée (PAO), (Université Badji Mokhtar - Annaba), 2021.
- [21] C. F. Jeff Wu Michael Hamada, Basic Concepts for Experimental Design and Introductory Regression Analysis, in: 2021: pp. 1–44. <https://doi.org/10.1002/9781119470007.CH1>.
- [22] K.A. Al-ghamdi, IMPROVING THE PRACTICE OF EXPERIMENTAL DESIGN IN MANUFACTURING ENGINEERING., The University of Birmingham, 2011.
- [23] P. Goos, The optimal design of blocked and split-plot experiments, 2014.
- [24] J.-J. Dreesbeke, J. Fine, G. (Gilbert) Saporta, Association pour la statistique et ses utilisations., Société statistique de France., Plans d'expériences : applications à l'entreprise, (1997) 509.
- [25] M. Tanco, E. Viles, L. Pozueta, Comparing different approaches for design of experiments (DoE), *Lect. Notes Electr. Eng.* 39 LNEE (2009) 611–621. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2311-7_52.

-
- [26] J. Goupy, Tutoriel: Les plans d'expériences, Rev. Modul. (2006) 43.
- [27] H. Chen, Some projective properties of fractional factorial designs, Stat. Probab. Lett. 40 (1998) 185–188. [https://doi.org/10.1016/S0167-7152\(98\)00110-2](https://doi.org/10.1016/S0167-7152(98)00110-2).
- [28] R. Linder, Les plans d'expériences: un outil indispensable à l'expérimentateur, (2005) 320.
- [29] T.F. Zhang, J.F. Yang, D.K.J. Lin, Small Box-Behnken design, Stat. Probab. Lett. 81 (2011) 1027–1033. <https://doi.org/10.1016/j.spl.2011.02.024>.
- [30] S.L.C. Ferreira, R.E. Bruns, H.S. Ferreira, G.D. Matos, J.M. David, G.C. Brandão, E.G.P. da Silva, L.A. Portugal, P.S. dos Reis, A.S. Souza, W.N.L. dos Santos, Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods, Anal. Chim. Acta. 597 (2007) 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.07.011>.
- [31] W.P. Gardiner, G. Gettinby, Experimental design techniques in statistical practice : a practical software-based approach, (n.d.) 390.
- [32] A. Niazi, N. Khorshidi, P. Ghaemmaghami, Microwave-assisted of dispersive liquid–liquid microextraction and spectrophotometric determination of uranium after optimization based on Box–Behnken design and chemometrics methods, Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc. 135 (2015) 69–75. <https://doi.org/10.1016/J.SAA.2014.06.148>.
- [33] M.M. Ba-Abbad, P.V. Chai, M.S. Takriff, A. Benamor, A.W. Mohammad, Optimization of nickel oxide nanoparticle synthesis through the sol–gel method using Box–Behnken design, Mater. Des. 86 (2015) 948–956. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2015.07.176>.
- [34] D. Selvamuthu, D. Das, Introduction to statistical methods, design of experiments and statistical quality control, Introd. to Stat. Methods, Des. Exp. Stat. Qual. Control. (2018) 1–430. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-1736-1/COVER>.
- [35] Y.Z. Liang, K.T. Fang, Q.S. Xu, Uniform design and its applications in chemistry and chemical engineering, Chemom. Intell. Lab. Syst. 58 (2001) 43–57. [https://doi.org/10.1016/S0169-7439\(01\)00139-3](https://doi.org/10.1016/S0169-7439(01)00139-3).
- [36] S. Beg, Design of Experiments for Pharmaceutical Product Development, Springer Singapore, 2021.
- [37] D.H. Samir, APPLICATION DES PLANS D'EXPERIENCES ET RESOLUTION DE PROBLEME D'OPTIMISATION NON LINEAIRE, n.d.
- [38] N. LAID, ETUDE COMPARATIVE DE LA PHOTODÉGRADATION D ' UN COLORANT CATIONIQUE ET D ' UN COLORANT ANIONIQUE EN PHASE HOMOGÈNE ET HÉTÉROGÈNE : MODÉLISATION DES CINÉTIQUES À L ' AIDE DES PLANS D ' EXPÉRIECES, UNIVERSITE MENTOURI-CONSTANTINE, 2017.
- [39] A.F.I. De Maria Isabel Rodrigues, Experimental Design and Process Optimization, 2014.
- [40] B. Djamel, Étude du phénomène électromagnétomécanochimique et du mécanisme de transfert dans les contacts glissants secs et lubrifiés bronze-acier et graphite-bronze, UNIVERSITÉ FRÈRES MENTOURI - CONSTANTINE 1, 2020.
- [41] Montgomery ,D. C. Design and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons, 5th edition, Arizona State University, 2001.
- [42] Cochran, W. G. The Design of Experiments. John Wiley & Sons, 2nd edition, 1992.
- [43] Box, G, E, P.; Draper,N, R. Empirical Model Building and Response Surfaces. John Wiley & Sons, New Jersey, 1987.
- [44] Ludstedt ,T.; Seifert ,E.; Abramo ,L.; Thelin ,B.; Nyström ,Å.; Pettersen ,J.; Bergman ,R. Experimental design and optimization. Elsevier B.V, 1998.
- [45] Box, G. E. P.; Hunter, J. S.; Hunter ,W .G. Statistics for Experimenters. John Wiley & Sons, 2nd edition, New Jersey, 2005.
- [46] Vuchkov, N.; Boyadjieva, L. N .Quality Improvement with Design of Experiments. Springer-Science and Business Media, 2001.

-
- [47] R, Ghanem.; D, Higdon.; H,Owhadi. Handbook of Uncertainty Quantification. Springer International Publishing, Switzerland, 2017.
- [48]Goose, P.; Meintrup, D. Statistics with JMP: Hypothesis test, ANOVA and regression. John Wiley & Sons, 1st edition, 2016.
- [49] Judd, C.M.; McClelland, G. H.; Ryan, C. S. Data Analysis: A Model Comparison Approach to Regression, ANOVA, and Beyond. Taylor and Francis group, 3rd edition, New York, 2017.
- [50] Mason, R. L.; Gunst, R. F.; Hess, J. L. Statistical design and analysis of experiments, with applications to engineering and science.John Wiley& Sons, New Jersey (2003).
- [51] Judd, C. M.; McClelland, G. H.; Ryan, C. S. Data Analysis: A Model Comparison Approach to Regression, ANOVA,
- [52] Box, G. E. P.; Hunter, J. S.; Hunter, W. G. *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery*, 2nd ed.; John Wiley & Sons: New York, 2005.
- [53] Montgomery, D. C. *Design and Analysis of Experiments*, 8th ed.; John Wiley & Sons: New York, 2017.
- [54] Kempthorne, O. *The Design and Analysis of Experiments*; Wiley-Interscience: New York, 1952.
- [55]Wu, C. F. J.; Hamada, M. *Experiments: Planning, Analysis, and Optimization*; John Wiley & Sons: New York, 2009.
- [56]Draper, N. R.; Smith, H. *Applied Regression Analysis*, 3rd ed.; Wiley-Interscience: New York, 1998.
- [57} Fisher, R. A. *The Design of Experiments*; Oliver and Boyd: Edinburgh, 1935.
- [58] Ghosh, M. *Statistical Design and Analysis of Experiments*; Springer: Berlin, 2013.
- [59]Rathi, S.; Bhattacharyya, D. Optimization of composting process through experimental design. *Waste Manag.* 2018, 74, 38–49. .

الفصل الرابع :

تحضير طبقات من أكسيد الزنك

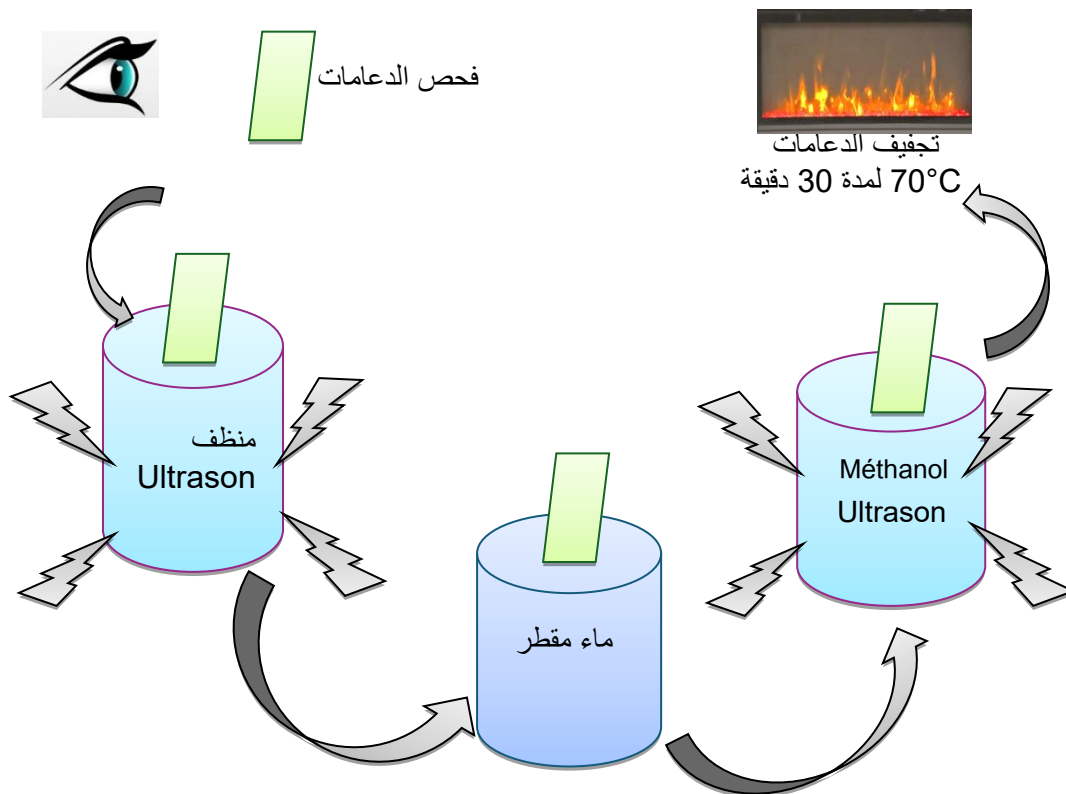
مطعم بالألومين ودراسة خصائصه

1.IV. تهييد

تحضر الطبقات الرقيقة إما بطرق كيميائية أو بطرق فيزيائية، وقد اعتمدنا في بحثنا هذا على الطريقة الكيميائية SILAR لسهولة وفاعليتها في ترسيب الطبقات حيث تتميز بتكلفتها المنخفضة كما بإمكاننا التحكم في سمك الطبقات وتجانسها على غرار الطرق الأخرى. سنقدم في هذا الفصل وصفا دقيقا لعملية الترسيب بالغمس والسحب أو ما يعرف بالسيلار لتحضير طبقات رقيقة من أكسيد الزنك المطعم بالألومين على سطح دعامة زجاجية (22* 22mm)، كما سنطرق لمتنوع الأجهزة المستعملة ومبدأ عمل كل منها في قياس وتحليل مختلف خصائص الطبقات الرقيقة كالخصائص البنيوية و الضوئية و الناقية.

2.IV. تنظيف الدعامة (الركائز)

قبل ترسيب أكسيد الزنك المطعم بالألومين على سطح الدعامة، قمنا بتنظيفها جيدا لإزالة الشوائب العالقة على سطحها، نظرا لأن وجود أي شوائب قد يؤثر سلبا على الخصائص الفيزيائية والكيميائية والضوئية للطبقات المحضرة. تم أولاً فحص الدعامة للتأكد من خلوها من أي خدوش أو تصدعات، ثم وُضعت في بيشر يحتوي على محلول منظف داخل حمام فوق صوتي (Ultrason) لمدة عشر دقائق. بعد ذلك، جرى غسل الدعامة بالماء المقطر لإزالة بقايا المنظف والشوائب المتبقية، ثم وُضعت في بيشر ثانٍ يحتوي على الميثانول (Méthanol) داخل حمام فوق صوتي لمدة عشر دقائق إضافية. عقب ذلك، تم إسناد الركائز على دعامة مزودة بدبابيس، ثم وُضعت في فرن للتجفيف عند درجة حرارة 70°C لمدة 30 دقيقة. وأخيراً، نُعت الركائز الزجاجية في محلول NaOH لمدة 30 دقيقة لضمان إزالة أي بقايا عضوية أو شوائب سطحية دقيقة.



الشكل 1.VI: مخطط يوضح مراحل تنظيف الدعامة.

3.IV. المحاليل والوسائل المستعملة

لترسيب الطبقات الرقيقة بطريقة SILAR نستعمل المحاليل و الوسائل التالية:

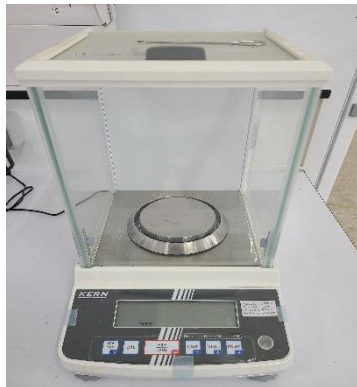
1.3.IV. المحاليل المستعملة

- محلول أكسيد الزنك المطعم بالألومين (ZnO:Al)

من أجل تحضير 1000ml من محلول أكسيد الزنك المطعم بالألومين (نسبة الألومين 3.5%) نقوم بإذابة 0.2118g من أسيتات الزنك مع إذابة 0.01313g من الألومين في بيشر يحتوي على 1000ml من الإيثانول.
من أجل تحضير 500ml من محلول أكسيد الزنك المطعم بالألومين (نسبة الألومين 6%) نقوم بإذابة 0.1031g من أسيتات الزنك مع إذابة 0.01125g من الألومين في بيشر يحتوي على 500ml من الإيثانول.
من أجل تحضير 500ml من محلول أكسيد الزنك المطعم بالألومين (نسبة الألومين 1%) نقوم بإذابة 0.1086g من أسيتات الزنك مع إذابة 0.00187g من الألومين في بيشر يحتوي على 500ml من الإيثانول.

2.3.III. الوسائل والأجهزة المستعملة

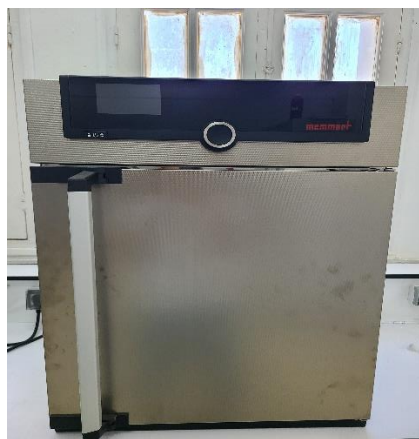
- ميزان حساس: من أكثر الأجهزة انتشارا في المختبرات، وهو جهاز ميكانيكي حساس جدا يستخدم لتحديد كتلة الأجسام التي تتراوح بين الكيلوغرامات و الميكرو غرامات (Kg-µg).
- حوض الأمواج فوق الصوتية (Bain à Ultrason): جهاز يعمل بالتأثير الميكانيكي للأمواج فوق الصوتية ترددها عموما بين 20KHz – 400KHz يستعمل لتنظيف المنتجات أو أجزاء منها عن طريق غمرها في الحمام.
- حمام مائي: عبارة عن جهاز مخبري مملوء بالماء الساخن، يتم استخدامه لاحتضان العينات عند درجة حرارة ثابتة لفترة زمنية طويلة يحتوي على واجهة بمؤشر تتيح للمستخدم ضبط درجة الحرارة المطلوبة.
- الفرن الكهربائي Micro-Onde: هو عبارة عن جهاز أو فرن إلكتروني يستعمل للتسخين عن طريق التدفئة العازلة.



ميزان حساس



حوض الأمواج فوق الصوتية



الفرن الكهربائي

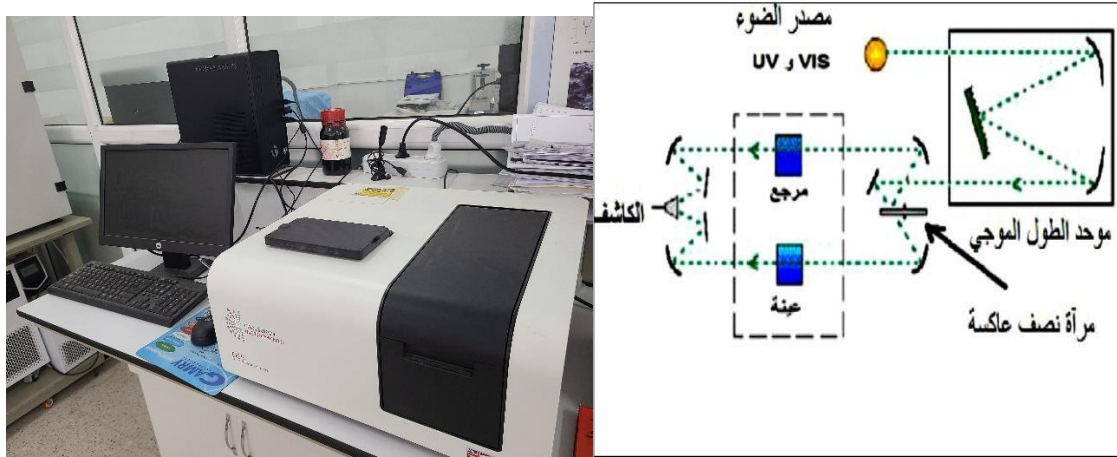


الحمام المائي

الشكل 2.VI: بعض الأجهزة المستعملة.

● جهاز قياس المطيافية UV-Vis

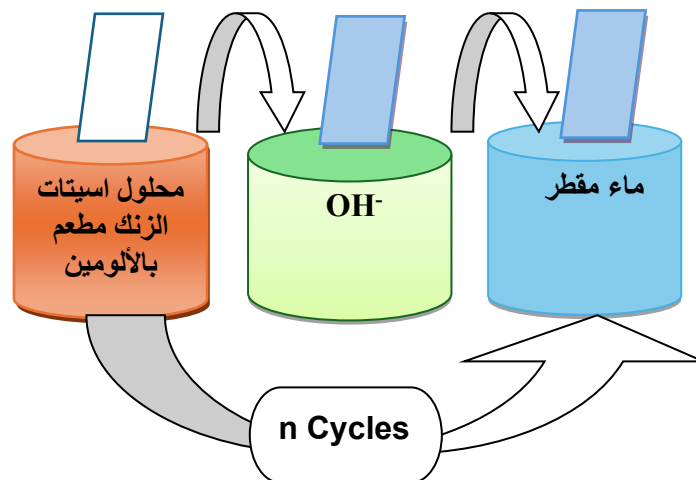
في مطيافية الضوء المرئي /فوق البنفسجي تم دمج جهاز مطيافية الضوء المرئي مع مطيافية الأشعة فوق البنفسجية وهذا الجهاز مزود بمصدرين للضوء أحدهما مصدر للأشعة المرئية و الآخر مصدر للأشعة فوق البنفسجية مع استخدام كشاف يستطيع كشف طاقة الأشعة المرئية و فوق البنفسجية، لذلك يمكن لهذا الجهاز قياس الأشعة الممتصة في نطاق الأشعة المرئية و فوق البنفسجية، ومن ثم تقدير تركيز المواد الملونة والمواد التي تمتص في نطاق الأشعة فوق البنفسجية. يعتمد مبدأ هذه التقنية على تفاعل الضوء مع العينة المراد تحليلها، إذ أن جزء من الشعاع الساقط يمتص أو ينفذ عبر العينة و الطاقة الممتصة للضوء في نطاق الأشعة فوق البنفسجية والمرئية تسبب اضطرابات في البنية الإلكترونية للطبقة الرقيقة مما ينتج عنها انتقال للإلكترونات من مستوى طاقي أقل إلى مستوى طاقي أعلى حيث تقع هذه التحولات الإلكترونية في المجال المرئي (190-900nm) والأشعة فوق البنفسجية . [1]



الشكل 3.VI: رسم تخطيطي يوضح مبدأ عمل مطيافية UV – Visible . [1]

4.IV. ترسيب الطبقات الرقيقة

بعد تحضير كل من الركيزة والمحلول نبدأ مباشرة في عملية الترسيب بتقنية السيلار حيث تمر هذه الأخيرة بمجموعة من الخطوات: حيث تغمس الركيزة لمدة 30 ثانية كاملة في محلول أكسيد الزنك المطعم بالألومين ثم تسحب وتوضع على ورق تجفيف بعدها تغمس في محلول العامل المؤكسد لمدة 30 ثانية ثم توضع على ورق تجفيف، تغمر الركيزة أخيراً في الماء المقطر لمدة 10 ثانية ثم توضع على ورق التجفيف. وصولاً إلى هذه الخطوة تكتمل دورة واحدة وتكرر العملية حسب عدد الدورات المدروسة تحت تأثير ثلاث عوامل متمثلة في درجة حرارة التادين و نسبة الألومين وكذلك عدد دورات ترسيب طبقة بطريقة سيلار ثم تجفف الركائز في درجة حرارة المحبر Δm .



الشكل 4.VI: مخطط يوضح عملية الترسيب بطريقة السيلار.

5.IV. تصميم التجارب

1.5.IV. برامج تصميم التجارب:

يحتوي برنامج تصميم التجارب على مكتبات للتصميمات الكلاسيكية كما أنها تتيح لك إنشاء تصميمات محددة. يمكننا حساب معاملات الخطط التجريبية بجدول بيانات يحتاج لبرمجة والقليل من الوقت. لذا من الأفضل استخدام البرمجيات التي لا تحسب المعاملات نحسب، بل تقوم بإجراء الحسابات الإحصائية التي تسمح بتقييم جودة النموذج الرياضي، تمت برمجة تصميم التجارب أيضا لحساب الاستجابات في جميع مجالات الدراسة وإجراء تحليلات التباين ورسم منحنيات الاستجابة وتحديد مواضع الاستجابة. من بين هذه البرامج: Statgraphics، Statistica، Minitab، JMP، Modde، Pirouette، Unscrambler.

1.1.5.IV. عرض برنامج Minitab :

هو برنامج إحصائي تجاري خاص، تم تطويره بواسطة شركة Minitab لنظام التشغيل Windows فقط. يتم استخدامه على نطاق واسع لتدريس الإحصاء و يوجهه المطورون بشكل خاص إلى الشركات من خلال عرض اهتمامهم لجعله أكثر كفاءة وفقا لطريقة Six Sigma. تم تطويره سنة 1972 وهو متوفر ب8 لغات. [2]

6.IV. تحليل النتائج

1.6.IV. اختيار نموذج التحسين

اخترنا في هذه الدراسة العمل مع تصاميم (Box-Behnken BBD)، والتي يتم من خلالها تغيير جميع العوامل من تجربة إلى أخرى من أجل تقدير تأثيراتها المختلفة. بعبارة أخرى ندرس تأثير أحد العوامل بتغيير العوامل الأخرى في الاستجابة. تكمن مزايا التصاميم المعمول بها بشكل أساسي في انخفاض تكلفتها، انخفاض عدد التجارب، ودراسة التداخلات المحتملة بين العوامل. يتألف تصميم بوكس-بهنكن (BBD) من 2^k تجربة (k: تمثل العوامل الثلاثة في التجربة، 2: عدد مستويات كل تجربة)، وهو مفيد جداً للدراسات الأولية أو لمرحلة التحسين. في دراستنا هذه تم استخدام تصميم تجريبي كامل مكون من 15 تجربة لدراسة تحت تأثير ثلاث عوامل فيزيوكيميائية أساسية : عدد دورات الغمس و السحب ،درجة الحرارة T، نسبة الألومين، لتحضير طبقات رقيقة من أكسيد الزنك المطعم بالألومين

يوضح الجدول IV.1 عوامل الإدخال ومستوياتها في التجربة. ودراسة التداخلات المختلفة بين العوامل الفيزيوكيميائية التي تؤثر على التفاعل، استخدمنا طريقة التصميم التجريبي لثلاث عوامل مستقلة بمستويات مختلفة، بما في ذلك عدد دورات الغمس و السحب ،درجة الحرارة T،نسبة الألومين، مع التكرارات الثلاثة في النقطة المركزية .

العوامل	الوحدة	الرمز	المستوى الأدنى	النقطة المركزية	المستوى الأعلى
عدد دورات الغمس	Cyc	N°_{Cyc}	10	55	100
نسبة الألومين	%	Al	1	3.5	6
درجة حرارة التلدين	$^{\circ}C$	T	250	350	450

الجدول 1.IV: المستويات مختلفة للعوامل التي تم اختبارها في تحضير الطبقات الرقيقة لأكسيد الزنك مطعم الألومين .

في هذه الدراسة، تم اختيار النفاذية الضوئية و المقاومة الكهربائية كاستجابة Y) للحصول على الشروط المثلى للعوامل. تم تحليل البيانات باستخدام البرنامج الإحصائي Minitab 18، والذي تم استخدامه لاستنتاج التغييرات الأساسية الفردية والتغييرات الأساسية المتداخلة بين مختلف العوامل المدروسة ، في هذه الدراسة تم إعطاء العدد الإجمالي للتجارب التي أجريت من خلال هذه المعادلة:

$$N_{b\text{rexp}} = 2E + P$$

حيث:

E: عدد العوامل المدروسة.

P: عدد نقاط المركز المطبقة لاختيار الحدود التربيعية بين المستويات المنخفضة والعالية.
وتستخدم النقاط المركزية لتقدير وضوح وانحناء النموذج المطبق. وهكذا تم إجراء 15 تجربة في هذه الدراسة، بما في ذلك مجموعة من مستويات العوامل المدروسة كما هو موضح في الجدول 1.IV. يمكن تطبيق نتائج التصميم المشار إليه من حيث نموذج الانحدار والاستجابة النظرية من خلال المعادلة التالية:

$$(y) = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k a_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

حيث :

ε هو الحد المتبقي .

و a_0 قيمة الاستجابة في متوسط المجال .

و a_i هو المعاملات الخطية .

و a_{ijk} ، و a_{ij} يرمز إلى معاملات التفاعل بين العوامل المختبرة.

و x_i و x_j و x_k هي المتغيرات المستقلة.

تم استخدام برنامج Minitab 18 الإحصائي لنظام ويندوز لإنشاء تصميم التجارب (DoE) وتحليل البيانات التي تم الحصول عليها من التجارب. تم اعتماد اختبار F-value و p-value لتحليل المعاملات. تم استخدام معادلة رياضية من الدرجة الثانية لحساب معاملات الانحدار. استُخدم اختبار عدم التطابق لتقييم مدى التوافق مع النماذج الرياضية. تم التحقق من الدلالة الإحصائية للنموذج باستخدام اختبار F-test. تم تطبيق التمثيل البياني لسطح الاستجابة لتوضيح تأثيرات المتغيرات المستقلة على الاستجابات المختارة. تم اختيار أفضل نموذج على أساس أعلى قيم R^2 ، ويجب أن تكون قيم P قيم النموذج أقل من 0.05.

2.6.IV. تصميم نموذج بوكس-بهنكن الكامل

تم إجراء تحسين التصميم التجريبي لنموذج بوكس-بهنكن الكامل في شكل مصفوفة من 15 تجربة لمستويات مختلفة من العوامل المدروسة وقيمة المقاومة الكهربائية و النفاذية الضوئية النظرية والمتحصل عليها من التجارب المخبرية، كما هو موضح في الجدول 2.IV. وتظهر النتائج التي تم الحصول عليها بوضوح أن قيمة المقاومة الكهربائية و النفاذية الضوئية تراوحت بين 71,76% و 97,75% بينما المقاومة في تتراوح بين 0,0004Ω.cm و 0,0016Ω.cm ويمكن اعتبار هذه المساحة التجريبية الكبيرة ميزة لدراستنا حيث يمكن أن تحتوي على الظروف المثلى المطلوبة . وباستخدام هذه النتائج، يمكننا تقدير التأثيرات الفردية الرئيسية والتأثيرات التفاعلية بين العوامل التي تم اختبارها.

N° Exp	العوامل			المقاومة		الإمتصاصية	
	N°Cyc	T °C	Al%	ρ_{Exp} Ω.cm	ρ_{pre} Ω.cm	T _{Exp} %	T _{Pre} %
1	10	250	3.5	0,0013	0,001281	91,31	91,32
2	100	250	3.5	0,00108	0,001059	84,94	83,84
3	10	450	3.5	0,0009	0,000921	97,75	98,84
4	100	450	3.5	0,0004	0,000419	89,44	89,42
5	10	350	1	0,0015	0,001468	94,64	93,21
6	100	350	1	0,0009	0,00087	91,52	91,20
7	10	350	6	0,00098	0,00101	87,77	88,08
8	100	350	6	0,00085	0,000883	71,76	73,18

9	55	250	1	0,0016	0,001651	89,37	90,77
10	55	450	1	0,0011	0,001111	90,16	90,48
11	55	250	6	0,0014	0,001389	72,69	72,36
12	55	450	6	0,00098	0,000929	87,15	85,74
13	55	350	3.5	0,00085	0,00082	90,27	90,27
14	55	350	3.5	0,0008	0,00082	90,38	90,27
15	55	350	3.5	0,00081	0,00082	90,16	90,27

الجدول 2.IV: قيمة المقاومة الكهربائية و النفاذية الضوئية .

3.6.IV. تأثير عوامل التجربة على المقاومة الكهربائية للطبقات المحضرة

1.3.6.IV. تحديد التأثيرات والمعاملات الهامة للنموذج

تم استخدام تحليل التباين ANOVA لتحديد التأثير الهامة للمتغيرات الأساسية الفردية والمتداخلة على تحسين خصائص المقاومة. تم تلخيص النتائج التي تم إجراؤها من النماذج التربيعية المحسوبة للاستجابة في الجدول 3.IV. و يقدم الجدول الفرق في التباين الموضح

بالنموذج الرياضي للمرسب الناتج. وجد أن الانحدار ذو دلالة إحصائية عند قيمة F البالغة 60,47 و قيمة الاحتمال $P=000.0$ (أقل من 0.05). من خلال القراءة التحليلية Ω . cm (المتعلق بتحليل التباين ANOVA) الذي تم الحصول عليه باستخدام ATO. يتم تحديد أهمية البيانات المكتسبة بتحديد قيم p، والتي يجب أن تكون أقل من 0.05 عند مستوى الثقة 95% لتكون ذات دلالة إحصائية. يمكن استخدام المعادلة الرياضية غير المشفرة التي تربط الاستجابة (L) بالعوامل المؤثرة (T، N_{Cyc}° ، Al%) تم تحليل قيم الاستجابة لتحسين العوامل. تعبر المعادلة التالية عن نموذج متعدد الحدود الناتج .

معادلة الانحدار بالوحدات غير المشفرة

$$\text{Res} = 0.000001 + 0.004478 N_{Cyc}^{\circ} - 0,000013 T^{\circ} - 0,000459 \text{Al}\% - 0.000000 N_{Cyc}^{\circ} * N_{Cyc}^{\circ} + T^{\circ} * T^{\circ} + 0.000047 \text{Al}\% * \text{Al}\% - 0.000000 N_{Cyc}^{\circ} * T^{\circ} + 0.000001 N_{Cyc}^{\circ} * \text{Al}\% + 0.000000 T^{\circ} * \text{Al}\%$$

كانت تأثيرات الإعدادات المدروسة وتداخلاتها ذات دلالة إحصائية بمجال ثقة يزيد عن 95%. يشير مجموع R^2 (AdjSS) لكل المعاملات إلى أهميتها. زادت أهمية العامل المناظر في نفس النظام مع مجموع R^2 (AdjSS) المعدلة، وبلغت قيمة R^2 99,09% أما قيمة R^2 (adj) هي 97,45% و قيمة R^2 (prédi) هي 86,84%. ما يشير إلى أن المصطلحات التي تم قياسها في النموذج المتبع ملحوظة بما يكفي لعمل نتائج مرضية. بالإضافة إلى ذلك، فإن قيمة F الجيدة للنسبة (60.47) تؤكد أهمية وصلابة النموذج النظري انظر الجدول 3.IV.

شرط	Coef	SE Coef	قيمة T	قيمة P
ثابت	0,000820	0,000029	28,49	0,000
N°cyc	-0,000181	0,000018	-10,28	0,000
T°	-0,000250	0,000018	-14,18	0,000
Al%	-0,000111	0,000018	-6,31	0,001
N°cyc*N°cyc	-0,000056	0,000026	-2,17	0,082
T°*T°	0,000156	0,000026	6,02	0,002
Al%*Al%	0,000294	0,000026	11,32	0,000
N°cyc*T°	-0,000070	0,000025	-2,81	0,038
N°cyc*Al%	0,000118	0,000025	4,71	0,005
T°*Al%	0,000020	0,000025	0,80	0,459
ملخص النموذج				
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	/
0,0000498	99,09%	97,45%	86,84%	/

الجدول 3. IV. معاملات الانحدار المقدرة لتحسين جودة الترسيد .

المصدر	DF	Adj SS	Adj MS	قيمة F	قيمة P
النموذج	9	0,000001	0,000000	60,47	0,000
الخطية	3	0,000001	0,000000	115,60	0,000
N°cyc	1	0,000000	0,000000	105,76	0,000
T°	1	0,000000	0,000000	201,21	0,000
Al%	1	0,000000	0,000000	39,84	0,001
التربيع	3	0,000000	0,000000	55,55	0,000
N°cyc*N°cyc	1	0,000000	0,000000	4,70	0,082
T°*T°	1	0,000000	0,000000	36,28	0,002
Al%*Al%	1	0,000000	0,000000	128,21	0,000
تداخل عاملين-2	3	0,000000	0,000000	10,25	0,014
N°cyc*T°	1	0,000000	0,000000	7,89	0,038
N°cyc*Al%	1	0,000000	0,000000	22,22	0,005
T°*Al%	1	0,000000	0,000000	0,64	0,459
الخطأ	5	0,000000	0,000000		
عدم الملاءمة في التوافق	3	0,000000	0,000000	5,25	0,164

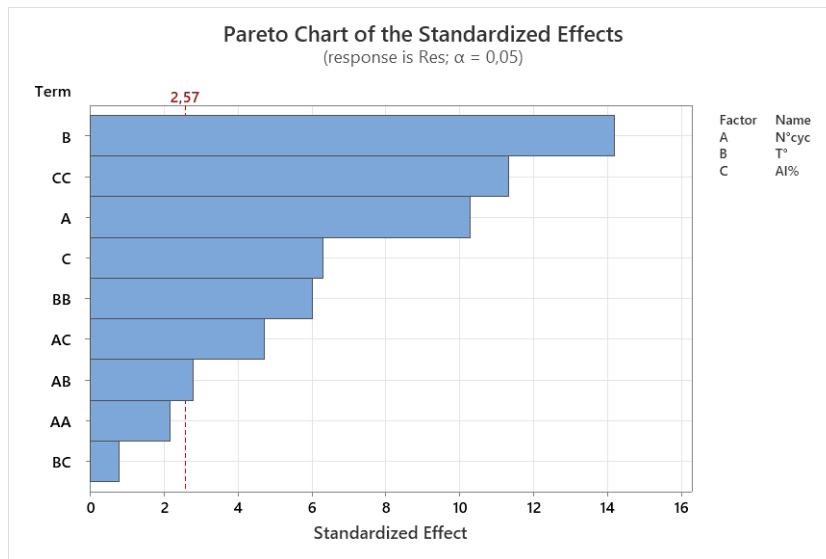
الخطأ النقي	2	0,000000	0,000000		
المجموع	14	0,000001			

الجدول 4.IV: معاملات الانحدار المقدرة لتحسين جودة الترسيب.

2.3.6.IV. مخطط باريتو

يعتبر مخطط باريتو المرحلة الأولى في العملية المستمرة لتحسين العوامل المؤثرة على العملية من خلال الاستجابة. أنه يجعل من الممكن تحديد التأثيرات الرئيسية وتفاعلاتها التي تشير إلى حالة التقدم في حل المشكلة، لكل إجراء تصحيحي يؤدي إنشاء مخطط باريتو إلى تحسين الجودة. تم إنشاء الرسوم البيانية لكل معلمة للتأثيرات الرئيسية لتمثيل نتائج تحليل الانحدار. فهي تظهر العوامل الهامة في مجال ثقة قدره 95% وتمثل التأثيرات الرئيسية الانحرافات بين المستويات العالية والمنخفضة لكل عامل.

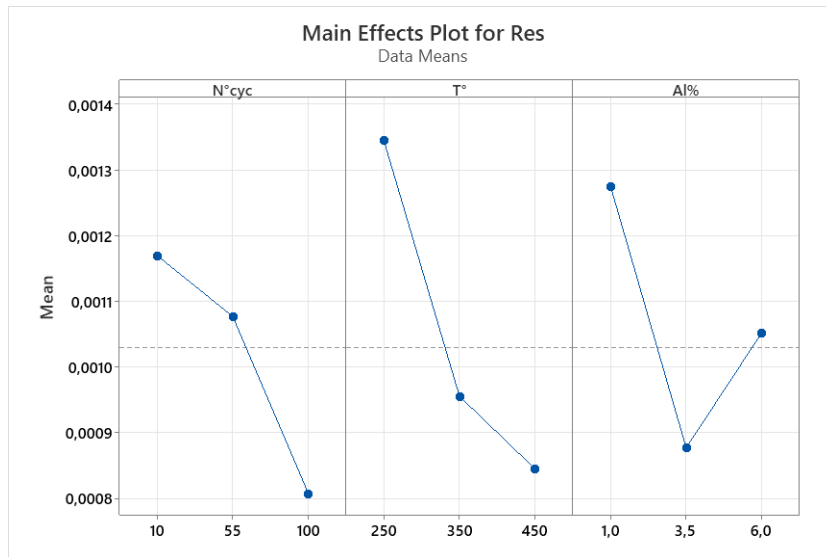
عندما يكون تأثير العامل إيجابياً (ينتقل العامل من مستوى منخفض إلى مستوى مرتفع)، تزداد قيمة السمك L . ومن ناحية أخرى، إذا كانت التأثيرات سلبية، يحدث انخفاض في L عند المستوى العالي لنفس العامل. تم رسم كل تأثير أفقياً على مخطط باريتو بمستوى ثقة قدره 95% وقيمة Res تساوي 11.89، وتم إجراء اختبار Res للتحقق مما إذا كانت تختلف اختلافاً كبيراً عن الصفر. يوضح الشكل 5.VI أن الأشرطة التي تمثل العوامل عدد الدورات الغمس والسحب N_c ، نسبة $Al\%$ ، درجة الحرارة تلدين T ، $(T*N_c)$ ، $(T*Al\%)$ ، $(N_c*Al\%)$ ، (N_c*N_c) ، $(Al\%*Al\%)$ ، $(T*T)$ و على مخطط باريتو قد تجاوزت الخط المرجعي عند 2.57. لا يمكن تحديد ما إذا كان تأثير العامل يزيد أو يقلل من قيمة السمك (L)، حيث يمثل هذا الرقم قيمة التأثير المطلق الذي تم تحديده من أكبر تأثير إلى أصغر تأثير.



الشكل 5.VI: مخطط باريتو للتأثيرات الفردية والمتداخلة.

3.3.6.IV. تأثير العوامل الفردية الرئيسية على خصائص المقاومة الكهربائية للطبقات المدروسة

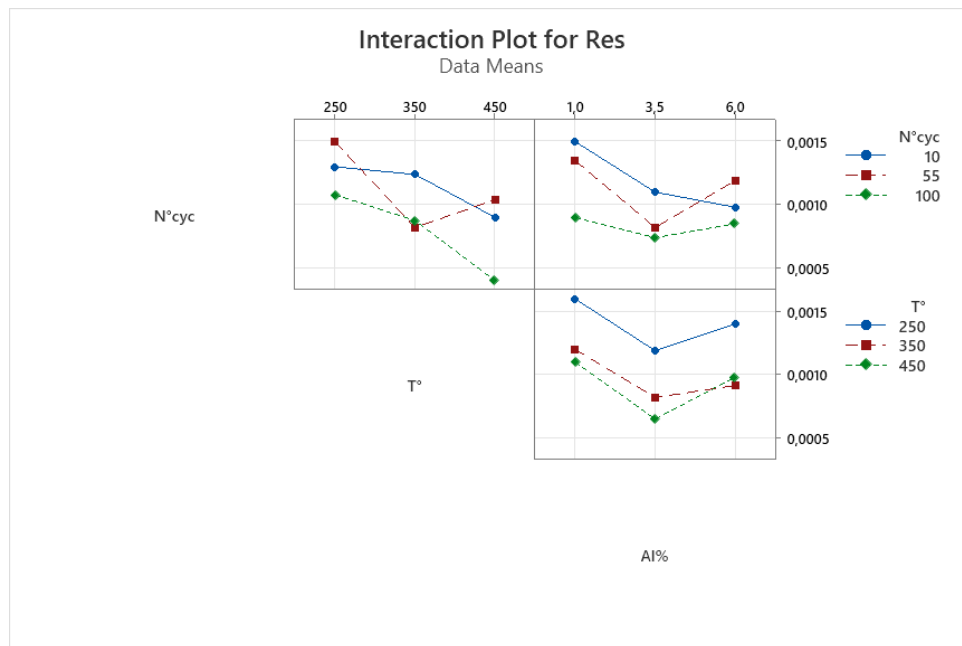
يتبين من خلال منحنيات التأثيرات الفردية للطبقات المدروسة الخاصة بكل من العوامل متمثلة في نسبة الألومين و عدد الدورات و درجة حرارة التلدين التي تتميز بأعلى التأثيرات ذات الدلالة، كما هو موضح من خلال انحراف منحنياتهم إثنين من مرتفع (+1) إلى مرتفع - (1) والذين يمثلان عامل درجة حرارة التلدين والآخر عدد دورات الغمس، يُظهر العاملان تأثيراً سلبياً على تأثيرات الترسيب، وتم العثور على قيم p ذات دلالة إحصائية عالية، والتي كانت أقل بكثير من 0.05، وأما بالنسبة لعامل نسبة الألومين نلاحظ انخفاض في المردود المقاومة كما هو موضح في الشكل 6.VI.



الشكل 6.VI : منحنيات التأثيرات الرئيسية للاستجابات (Res).

4.3.6.IV آثار التداخل بين العوامل المدروسة

يوضح الشكل التالي التأثيرات التفاعلية بين المستويات الدنيا، الوسطى والعليا للعوامل التي تمت دراستها. إن التفاعلات بين $(T^*Al\%)$, $(Nc*Al\%)$, $(Nc*T)$, $(Al\%*Al\%)$, $(T*T)$, $(Nc*Nc)$ لها تأثيرات كبيرة جداً، تصل إلى قيم -0.000056 ، 0.000156 ، 0.000294 ، -0.000070 ، 0.000118 ، 0.000020 على التوالي، مع قيم p ذات دلالة إحصائية أقل من 0.05 ، والتي تمنحها الحدود غير المتوازية لمخططات التأثير، كما هو موضح في الشكل 7.VI. (. يتفق مخطط باريتو مع هذه الملاحظة).



الشكل 7.VI : نتائج التداخل بين العوامل المدروسة على جودة الترسيب .

4.6.IV تأثير عوامل التجربة على النفاذية الضوئية للطبقات المحضرة

1.4.6.IV تحديد التأثيرات والمعاملات الهامة للنموذج

تم استخدام تحليل التباين ANOVA لتحديد التأثير الهامة للمتغيرات الأساسية الفردية والمتداخلة على تحسين الخصائص الضوئية. تم تلخيص النتائج التي تم إجراؤها من النماذج التربيعية المحسوبة للاستجابة في الجدول 5.IV. و يقدم الجدول الفرق في التباين الموضح بالنموذج الرياضي للمرسب الناتج. وجد أن الانحدار ذو دلالة إحصائية عند قيمة F البالغة $35,05$ وقيمة الاحتمال $P=0.001$ (أقل من 0.05). من خلال القراءة التحليلية الجدول 5.IV المتعلق بتحليل التباين (ANOVA) الذي تم الحصول عليه باستخدام

ATO. يتم تحديد أهمية البيانات المكتسبة بتحديد قيم p، والتي يجب أن تكون أقل من 0.05 عند مستوى الثقة 95% لتكون ذات دلالة إحصائية. يمكن استخدام المعادلة الرياضية غير المشفرة التي تربط الاستجابة (L) بالعوامل المؤثرة (N°Cyc، T، Al%). تم تحليل قيم الاستجابة لتحسين العوامل. تعبر المعادلة التالية عن نموذج متعدد الحدود الناتج.

معادلة الانحدار بالوحدات غير المشفرة

$$T\% = 87,1 - 0,0149N^{\circ}cyc + 0,0255T^{\circ} - 0,00A1\% + 0,000536N^{\circ}cyc * N^{\circ}cyc - 0,000049T^{\circ} * T^{\circ} - 0,789 A\% * A\% - 0,000108N^{\circ}cyc * T^{\circ} - 0,02864N^{\circ}cyc * A\% + 0,01367 T^{\circ} * A\%$$

كانت تأثيرات الإعدادات المدروسة وتداخلاتها ذات دلالة إحصائية بمجال ثقة يزيد عن 95%. يشير مجموع (AdjSS) R² لكل المعاملات إلى أهميتها. زادت أهمية العامل المناظر في نفس النظام مع مجموع R² (AdjSS) المعدلة، وبلغت قيمة R² 98,44 أما قيمة R²(adj) هي 95,63 و R²(prédi) هي 75.08. ما يشير إلى أن المصطلحات التي تم قياسها في النموذج المتبع ملحوظة بما يكفي لعمل نتائج مرضية. بالإضافة إلى ذلك، فإن قيمة F الجيدة للنسبة (35,05) تؤكد أهمية وصلابة النموذج النظري انظر الجدول 5.IV

شرط	Coef	SE Coef	قيمة-T	قيمة-P	VIF
ثابت	90,270	0,850	106,18	0,000	
N°Cyc	-4,226	0,521	-8,12	0,000	1,00
T°	3,274	0,521	6,29	0,001	1,00
Al%	-5,790	0,521	-11,12	0,000	1,00
N°Cyc*N°Cyc	1,085	0,766	1,42	0,216	1,01
T°*T°	-0,495	0,766	-0,65	0,547	1,01
Al%*Al%	-4,932	0,766	-6,44	0,001	1,01
N°Cyc*T°	-0,485	0,736	-0,66	0,539	1,00
N°Cyc*Al%	-3,222	0,736	-4,38	0,007	1,00
T°*Al%	3,418	0,736	4,64	0,006	1,00
ملخص النموذج					
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	/	/
1,47255	98,44%	95,63%	75,08%	/	/

الجدول 5.IV: معاملات الانحدار المقدرة لتحسين جودة الترسيب.

المصدر	DF	Adj SS	Adj MS	قيمة-F	قيمة-P
النموذج	9	683,997	76,000	35,05	0,001
الخطية	3	496,822	165,607	76,37	0,000
N°Cyc	1	142,890	142,890	65,90	0,000
T°	1	85,740	85,740	39,54	0,001
Al%	1	268,193	268,193	123,68	0,000
التربيع	3	97,979	32,660	15,06	0,006

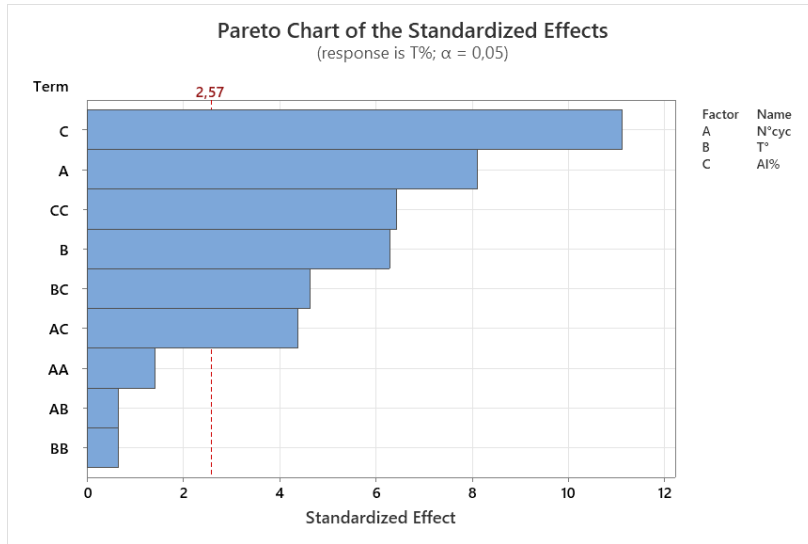
$N^{\circ}cyc * N^{\circ}cyc$	1	4,347	4,347	2,00	0,216
$T^{\circ} * T^{\circ}$	1	0,905	0,905	0,42	0,547
$Al\% * Al\%$	1	89,832	89,832	41,43	0,001
تداخل عاملين-2	3	89,196	29,732	13,71	0,008
$N^{\circ}cyc * T^{\circ}$	1	0,941	0,941	0,43	0,539
$N^{\circ}cyc * Al\%$	1	41,538	41,538	19,16	0,007
$T^{\circ} * Al\%$	1	46,717	46,717	21,54	0,006
الخطأ	5	10,842	2,168		
عدم الملاءمة في التوافق	3	10,818	3,606	298,01	0,003
الخطأ النقي	2	0,024	0,012		
المجموع	14	694,839			

الجدول 6.IV: معاملات الانحدار المقدرة لتحسين جودة الترسيب.

4.2.6.IV. مخطط باريتو

يعتبر مخطط باريتو المرحلة الأولى في العملية المستمرة لتحسين العوامل المؤثرة على العملية من خلال الاستجابة. أنه يجعل من الممكن تحديد التأثيرات الرئيسية وتفاعلاتها التي تشير الى حالة التقدم في حل المشكلة، لكل إجراء تصحيحي يؤدي إنشاء مخطط باريتو إلى تحسين الجودة . تم إنشاء الرسوم البيانية لكل معلمة للتأثيرات الرئيسية لتمثيل نتائج تحليل الانحدار. فهي تظهر العوامل الهامة في مجال ثقة قدره 95% وتمثل التأثيرات الرئيسية الانحرافات بين المستويات العالية والمنخفضة لكل عامل .

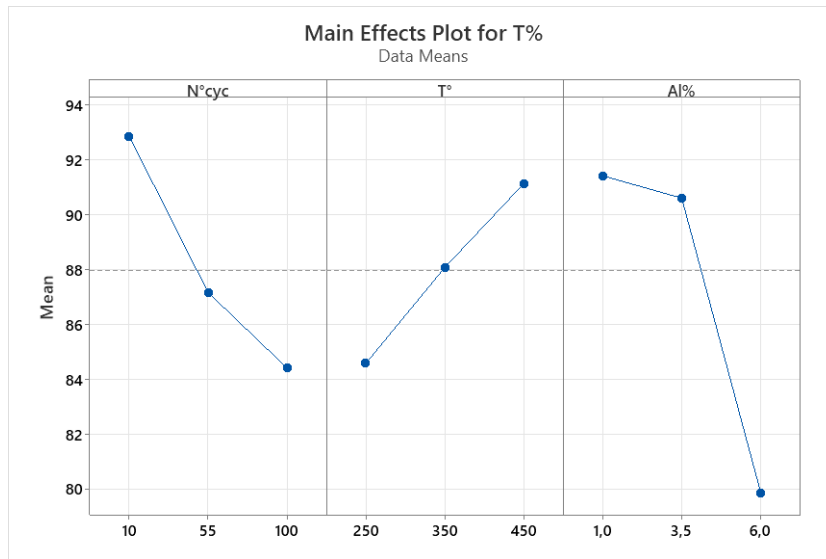
عندما يكون تأثير العامل إيجابياً (ينتقل العامل من مستوى منخفض إلى مستوى مرتفع)، تزداد قيمة السمك L . ومن ناحية أخرى، إذا كانت التأثيرات سلبية، يحدث انخفاض في L عند المستوى العالي لنفس العامل. تم رسم كل تأثير أفقياً على مخطط باريتو بمستوى ثقة قدره 95% وقيمة T تساوي 11.89، وتم إجراء اختبار T للتحقق مما إذا كانت تختلف اختلافاً كبيراً عن الصفر. يوضح الشكل 8.VI أن الأشرطة التي تمثل العوامل عدد الدورات الغمس والسحب Nc ، نسبة $Al\%$ ، درجة الحرارة تلدين T ، $(T * Nc)$ ، $(T * Al\%)$ ، $(Nc * Al\%)$ ، $(Nc * Nc)$ ، $(Al\% * Al\%)$ ، $(T * T)$ و على مخطط باريتو قد تجاوزت الخط المرجعي عند 2.57. لا يمكن تحديد ما إذا كان تأثير العامل يزيد أو يقلل من قيمة السمك (L)، حيث يمثل هذا الرقم قيمة التأثير المطلق الذي تم تحديده من أكبر تأثير إلى أصغر تأثير.



الشكل 8.VI: مخطط باريتو للتأثيرات الفردية والمتداخلة.

3.4.6.IV تأثير العوامل الفردية الرئيسية على خصائص النفاذية الضوئية للطبقات المدروسة

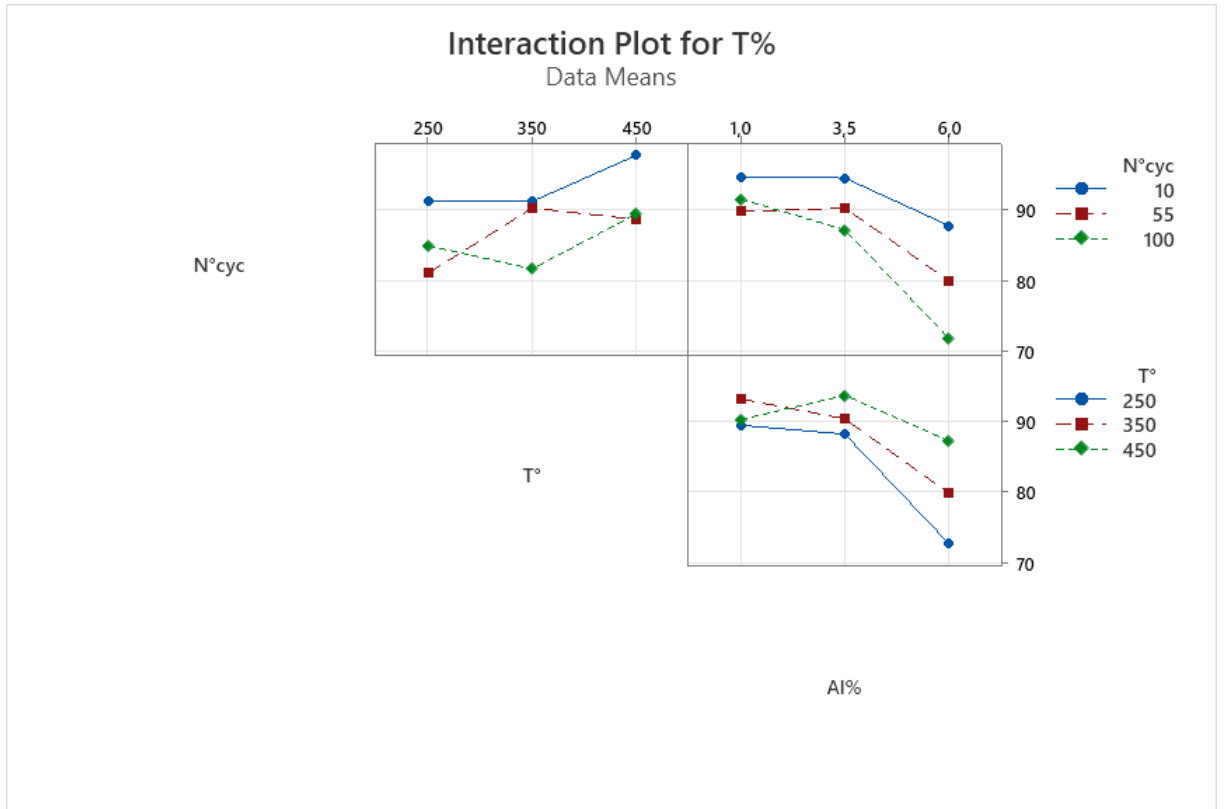
يتبين من خلال منحنيات التأثيرات الفردية للطبقات المدروسة الخاصة بكل من العوامل متمثلة في نسبة الألومين و عدد الدورات و درجة حرارة التلدين التي تتميز بأعلى التأثيرات ذات الدلالة، كما هو موضح من خلال انحراف منحنياتهم أحدهم من منخفض (-1) إلى مرتفع (+1) والذي يمثل عامل درجة حرارة التلدين والآخرين العكس، يُظهر العامل تأثيراً إيجابياً على تأثيرات الترسيب ، وتم العثور على قيم p ذات دلالة إحصائية عالية، والتي كانت أقل بكثير من 0,05، الشكل 9.VI.



الشكل 9.VI: مخطط تأثيرات الرئيسية للإستجابات ل T% .

4.4.6.IV آثار التداخل بين العوامل المدروسة

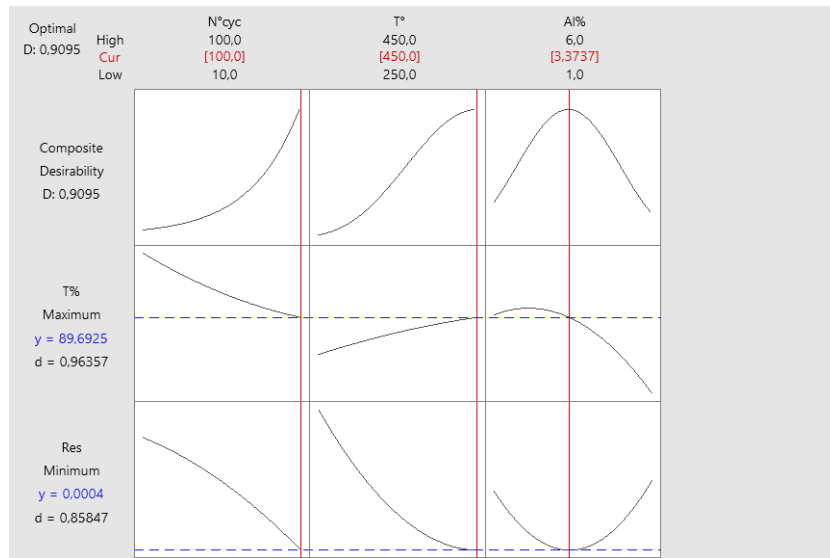
يوضح الشكل التالي التأثيرات التفاعلية بين المستويات الدنيا، الوسطى والعليا للعوامل التي تمت دراستها. إن التفاعلات بين $(T^*Al\%)$ ، $(Nc^*Al\%)$ ، (Nc^*T) ، $(Al\%*Al\%)$ ، (T^*T) ، (Nc^*Nc) ، تصل إلى قيم 1.085 ، -0.495 ، -4.932 ، -0.485 ، -3.222 ، 3.418 على التوالي، مع قيم p ذات دلالة إحصائية أقل من 0,05، والتي تمنحها الحدود غير المتوازية لمخططات التأثير، كما هو موضح في الشكل 10.VI. (. يتفق مخطط باريتو مع هذه الملاحظة).



الشكل 10.VI نتائج التداخل بين العوامل المدروسة على جودة الترسيب.

6.5.IV. تحديد الظروف المثلى

في دراستنا، كان الهدف الرئيسي من التحسين هو تحديد الظروف المثلى للترسيب طبقات رقيقة ذات شفافية عالية وناقلية جيدة. وقد تم اعتبار الاستجابة هي نسبة السمك بقيمتها القصوى للحصول على ترسيب جيد الشكل 11.VI.



الشكل 11.VI: منحنيات المدى تأثير كل عامل وتوضيح الظروف المثلى.

Solution	N°cyc	T°	AI%	T% الملائمة	Res الملائمة	Composite Desirability
1	100	450	3,37374	89,6925	0,0004182	0,909503

الجدول 7.IV: الظروف المثلى للترسيب طبقات رقيقة ذات شفافية عالية وناقلية جيدة.

7.IV. تحسين الإستجابة

يعد مُحسن الاستجابة خياراً للحصول على أفضل تفاعل بين العوامل المدروسة للحصول على أكبر قيمة في نسبة السمك. يوضح الرسم البياني التحسيني كيفية تأثير المتغيرات على الاستجابات المتوقعة (Y) ويعرض العوامل النظرية المثلى بناء على القيم المعطاة [23]. بالإضافة إلى ذلك، تم تطبيق تقنية الدالة المرغوبة المركبة (D) لتقييم مجموعات متعددة من العوامل مثل نسبة الألومين، عدد الدورات، درجة الحرارة. أشار مُحسن الاستجابة إلى أن زيادة محسنة في قيمة درجة الحرارة تلدين أدت إلى ارتفاع قيمة الإمتصاصية، ولكن في حالة زيادة في قيمة عدد دورات و نسبة الألومين يؤدي إلى انخفاض قيمة الإمتصاصية، أما بنسبة للمقاومة فإن زيادة المحسنة في عامل الثلاث أدت إلى انخفاض في قيمة المقاومة (انظر الجدول 8.IV). أظهرت النتائج المحصّلة أن أقصى استجابة في الامتصاصية بلغت 89.6925%، في حين سُجّلت أعلى قيمة للمقاومة الكهربائية عند $0.0004182(\Omega \cdot \text{cm})$ وقد توافقت هذه القيم المثالية مع ظروف معالجة بلغت 100 دورة تحت درجة حرارة قدرها (450°C) ، ونسبة ألومينوم مدخلة تبلغ 3.37374% من الكتلة..

العوامل	الرمز	المستوى الإمتصاصية	المستوى المقاومة	القيمة المثلى	الدالة المرغوب فيها D
نسبة الألومين	Al	-1	-1	3,37374%	d=1,00
درجة الحرارة	T	+1	-1	450	
عدد الدورات	N _{cyc}	-1	-1	100	
الامتصاصية	T	/	/	89,6925%	
المقاومة	Res	/	/	0,0004182	

الجدول 8.IV: قيم الإستجابة Y التي تم الحصول عليها في الشروط المثلى.

8.IV. دراسة مقارنة بين الأعمال المنجزة سابقا

اسم الكاتب	طريقة الترسيب	درجة حرارة تلدين	سمك الطبقة/ عدد الدورات	نسبة الألومين	قيمة المقاومة	قيمة الشفافية	المرجع
Kurtaran et al. (2021)	الرش الحراري	400°C (3 ساعات)	34 nm	8%	$13.9 \Omega \cdot \text{cm}$	60%	[3]
Wang et al. (2022)	طلاء الدوران	490°C	110 nm	2%	$\sim 4.95 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$	90%	[4]
El-Nahass et al. (2022)	الرش اليدوي	500°C	$\sim 180 \text{ nm}$	2%	$\sim 1.2 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$	88–92%	[5]
Nateq & Ceccato (2019)	طلاء الدوران	400°C	300 nm	2%	$< 0.006 \Omega \cdot \text{cm}$	$\approx 80\%$	[6]
ظروف المثلى المتحصل عليها	سيلر	450°C	100 دورة	3,37374%	0,0004182	89,6925%	/

الجدول 8.IV: دراسة من الأعمال المنجزة سابقا

بالمقارنة بين نتائج الدراسات السابقة والنتائج المتحصّل عليها في دراستنا، يتبيّن أن اختلاف طريقة الترسيب لا يؤثر بشكل كبير على جودة الطبقة المحضّرة. كما أن العوامل المعتمدة في الدراسات السابقة تُعدّ متقاربة إلى حدّ كبير مع الظروف المثلى التي توصلنا إليها. وبالإضافة إلى ذلك، فإن قيم المقاومة الكهربائية والامتصاصية التي تم الحصول عليها تقع ضمن نفس النطاق الذي سجلته الدراسات السابقة، مما يؤكّد موثوقية النتائج المحقّقة في هذا العمل.

- [1]H. Villavicencio Garcia, M. Hernandez Vélez, O.SanchezGarrido, J. M. MartinezDuart, J.Jiménez," CdS doped-MOR type zeolitecharacterization" ,Solid State Electronics, Vol. 43,N.6, p. 1171-1175, **1999** .
- [2]M. Maâche ,"Dépôt et Caractérisation de Couches Minces de ZnO par Spray Pyrolyse " ,thèse de doctorat, Université de Biskra, **2005** .
- [3]S. Kurtaran, «Al doped ZnO thin films obtained by spray pyrolysis technique: Influence of different annealing time,» *sciencedirect*, vol. 114, 2021.
- [4]J. Lee, C. Hyeon Jo, G. Lee, M.-s. Bea, S. Prucnal, S. Zhou, M. Zubair khan, O. Gohar, m. Saleem et J.-H. Koh, «Advancing Al-doped ZnO thin films structural, optical and electrical properties of low temperature PET substrates via flash lamp annealing,» *Journal of Semiconductors*, 2024.
- [5]K. Zhao, J. Xie, Y. Zhao, D. Han, Y. Wang, B. Liu et j. Dong, «Investigation on Transparent, Conductive ZnO:Al Films Deposited by Atomic Layer Deposition Process,» *MDPI*, 2021.
- [6]M. Elnahass, E. Elesh et A. Gamal, «Structural and optical properties of nanoparticles of tetraphenyl Porphin cobalt (II) annealed thin films,» *Sciencedirect*, vol. 202, 2020.

خاتمة عامة

تندرج هذه المذكرة ضمن الإطار البحثي الذي يهدف إلى تطوير الخصائص الفيزيائية والبصرية للمواد الرقيقة وتحسين أدائها في تطبيقات الطاقة المتجددة. وقد شمل الجانب النظري دراسة طرق تنظيف الألواح الشمسية وتأثير الملوثات على كفاءتها، بالإضافة إلى عرض لأهم تقنيات ترسيب الأغشية الرقيقة من حيث المبادئ والتطبيقات، مع التركيز على تقنية SILAR لما تمتاز به من بساطة وفعالية وتكلفة منخفضة.

في الجانب التطبيقي، تم تحضير طبقات رقيقة من أكسيد الزنك المطلع بالألومين (AZO) باستخدام تقنية SILAR، حيث تم تحديد الشروط المثلى للتحضير، والمتمثلة في: نسبة تطعيم بالألومين تبلغ 3.37374%، عدد دورات ترسيب قدره 100، ودرجة حرارة تالدين تساوي 450°C. أظهرت النتائج أن هذه المعايير ساهمت في تحسين انتظام الطبقات وزيادة الامتصاصية، مع طاقة غاب تُصنّف المادة ضمن فئة أشباه الموصلات ذات الفجوة الطاقوية الواسعة، مما يجعلها مناسبة للاستعمال في مجالات مثل الخلايا الشمسية، الحساسات البصرية، والفلاتر الضوئية.

واستناداً إلى النتائج المتحصل عليها، توصي هذه الدراسة مستقبلاً بـ اعتماد ركائز زجاجية تتحمل درجات حرارة تفوق 450°C، لتمكين التلدين عند درجات أعلى، مما قد يحسن التبلور ويقلل العيوب في البنية. كما يُقترح دراسة تأثير عوامل أخرى مثل نوع الركيزة، زمن التلدين، أو استعمال مطعّات مختلفة، لتعزيز خصائص الطبقات واستقرارها.

وفي الختام، نأمل أن تسهم هذه الدراسة في تطوير المعارف حول المواد الرقيقة، وأن تمهّد لأعمال بحثية مستقبلية أكثر دقة، تدعم التطور الحاصل في مجالات الطاقة والإلكترونيات الضوئية، وتواكب التحديات التقنية التي تفرضها المرحلة الانتقالية نحو الطاقات البديلة والمستدامة.