

جامعة قاصدي مرباح ورقلة

كلية الرياضيات و علوم المادة

قسم الفيزياء



مذكرة ماستر أكاديمي

مسار: علوم المادة

قسم: الفيزياء

تخصص: فيزياء طاوية و طاقات متجددة

من طرف الطالبتين: عاشوري انتصار - مخلوفي نعيمة

تحت عنوان:

محاكاة عددية لظاهرة استهلاك و إنتاج الغازات المختلفة في خلية وقود الأكسيد الصلب SOFC الأنبوبة

نوقشت يوم : 13 جوان 2018

لجنة المناقشة:

رئيسا	أستاذ محاضر- أ-	جامعة قاصدي مرباح- ورقلة	لزهو بن مبروك
مناقشا	أستاذ مساعد- أ-	جامعة قاصدي مرباح- ورقلة	الزين عبد الله
مساعد	أستاذ مساعد- أ-	جامعة قاصدي مرباح- ورقلة	تليلي صالح
مقررا	أستاذ محاضر- أ-	جامعة قاصدي مرباح- ورقلة	محسن حسين

الموسم الجامعي: 2017/2018

كلمة شكر:

نتقدم بالشكر و التقدير و الامتنان إلى كل من تفضل و مد يد العون لإخراج هذا البحث إلى النور.

و نخص بالشكر و التقدير أساتذتنا المشرف " محسن حسين" و"المساعد" تليبي صالح " اللذان كانا لنا السند في إخراج هذا البحث إلى النور، و إرشادنا بنصائحهما القيمة و توجيهاتهما الصارمة ، و تدليل ما صادفنا من عقبات فلم يبخلا بوقتهما و علمهما و فكرهما لنخطو نحو الأفضل لانجاز هذا البحث.

كما نشكر الأستاذ تليبي فؤاد أستاذ التكوين المهني على ما قدمه لنا من مساعدة. و الشكر و الامتنان إلى الأساتذة أعضاء المناقشة الذين سيشترون في تقييم هذه المذكرة. نسأل الله العظيم أن يجزي الجميع عنا خير الجزاء.

وختاماً الشكر ممتد إلى كل من أسدى لنا معروفاً أو نصحاً أو إرشاداً ولكل من أعاننا في هذا البحث ولو بكلمة فللكل هؤلاء نقول جزاكم الله عنا خير الجزاء ولكم منا خالص الشكر والدعاء فإن وفقنا فمن الله تعالى وإن أخطأنا فمن أنفسنا وعزائنا في ذلك ما جاء من حكمة بالغة على لسان العمام الأصفهاني في قوله: " إني رأيت أنه لا يكتب إنسان كتابه في يومه إلا قيل في غده لو غير هذا لكان أحسن، ولو زيد هذا لكان يستحسن ، ولو قدم هذا لكان أفضل ولوترك هذا لكان أجمل وهذا من أعظم العبر وهو دليل على استيلاء النقص على جملة البشر.

إهداء:

إلى من يخجل العطاء من عطاءها ويعجز الشاء عن ثناءها ، ويذهب العناء بلقائها إلى من
أعطت بلا حدود عطاء غير محدود، إلى من عبدت لي دروب العلم وكانت سر نجاحي " أمي العالفة"
إلى من أعيش معه أحلى الكلمات إلى من علمني حب العلم ، ونصحتني وأرشدني بكل حلم ، إلى من نبض قلبه لي بالدعاء ولسانه بالشفاء و رمز الدفء
المتجدد ، والحنان المتدفق ، " أبي الحبيب "
حفظهما الله ومتعهما بطول العمر والصحة والعاففة.

والى سندي بعد الله تعالى في هذه الدنيا رمز القوة والكفاح ، ومن شاركني طفولتي ، إخوتي وأخواتي
إلى كل صديقاتي

إلى كل من يهتم برقي الأمم ويسعى لعلو الهمم ، ويتمنى بلوغ القمم ، ويحلم بتربية جيل فاضل مبدع
يسمو بنا بين الأمم

إلى كل من أسقطه قلبي ، ولم يسقطه قلبي اهدي ثمرة جهدي

واسأل الله العلي القدير أن يكون علما نافعا ينتفع به.

الصفحة

i	قائمة المحتويات
iv	قائمة الأشكال و الجداول
01	المقدمة العامة

الفصل الأول

عموميات حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

03	1-I المقدمة
03	2-I خلايا الوقود
03	1-2-I نبذة تاريخية عن خلايا الوقود
06	2-2-I وقود خلايا الوقود
07	3-2-I البنية الأساسية لخلية الوقود و مبدأ عملها
08	4-2-I أنواع خلايا الوقود، تطبيقاتها، مزاياها و عيوبها
11	3-I خلايا وقود الأكسيد الصلب
11	1-3-I ماهية خلية وقود الأكسيد الصلب
11	2-3-I مكونات خلية وقود الأكسيد الصلب
14	3-3-I مبدأ عمل خلايا وقود الأكسيد الصلب
15	4-3-I أشكال خلية وقود الأكسيد الصلب
20	5-3-I مزايا خلايا وقود الأكسيد الصلب و عيوبها

الفصل الثاني

دراسات سابقة حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

22	1-II المقدمة
22	2-II دراسات سابقة
22	1-2-II عمل P. Iora (2004)
23	2-2-II عمل Laura Vanoli (2007)
23	3-2-II عمل Aissa Touahir (2008)
25	4-2-II مراجعة S. Ahmad Hajimolana و آخرون (2010)
26	5-2-II عمل INEZARENE Smail (2015)
27	3-II الخلاصة

الفصل الثالث

نمذجة استهلاك و إنتاج الغازات في خلايا SOFC الأنبوبية

28	1-III المقدمة
29	2-III تعريف و اختيار النموذج
30	3-III موضع الإشكالية
03	4-III النموذج المادي
32	5-III النموذج الرياضي
32	1-5-III تبسيط فرضيات المشكلة
23	2-5-III المعادلات المتحكمة في الظاهرة

34	III-6 النموذج العددي
34	III-6-1 تجزئة مجال المحاكاة
36	III-6-2 مكاملة المعادلات في المجالات العنصرية
37	III-7 برنامج الحساب

الفصل الرابع

تحليل و مناقشة نتائج النمذجة

38	IV-1 المقدمة
38	IV-2 دراسة النمذجة أحادية البعد
38	IV-2-1 تأثير التدفق و نسبة بخار الماء في مسام المصعد
40	IV-2-2 تأثير المسامية
40	IV-2-3 تأثير النفاذية
40	IV-2-4 تأثير العنصر المدعوم
44	IV-3 النمذجة ثنائية الأبعاد
49	الخلاصة
51	المراجع

قائمة الجداول و الأشكال

قائمة الجداول و الأشكال:

قائمة الجداول:

الصفحة	
13	الجدول (1-I) يلخص خصائص أهم مكونات خلية الأكسيد الصلب

قائمة الأشكال:

الصفحة	
14	الشكل (1-I): يوضح المبدأ العام لعمل خلايا الوقود.
16	الشكل (2-I): يوضح الأشكال المختلفة للتصميم المستوي لخلايا وقود الأكسيد الصلب.
17	الشكل (3-I): يوضح الأشكال المختلفة للتصميم أحادي الليثيك لخلايا وقود الأكسيد الصلب.
19	الشكل (4-I): يوضح a- مبدأ العمل b- أشكال المختلفة للتصميم أحادي الغرفة لخلايا وقود الأكسيد الصلب.
20	الشكل (5-I): يمثل a- تركيب خلية وقود الأكسيد الصلب الأنبوية b- تركيب البطارية.
29	الشكل (1-III): يبين كيفية إيجاد النموذج الصحيح للظاهرة معينة (الظواهر الخاصة بخلايا الوقود مثلا)
31	الشكل (2-III): يبين مقاطع مختلفة للتصميم الأنبوي لخلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC
35	الشكل (3-III): رسم تخطيطي لتجزئة مجال المحاكاة.
37	الشكل (4-III) يمثل أهم جزء من برنامج الحساب المستخدم في هذه الدراسة.
39	الشكل (1-IV): تغير كمية كل من غاز الهيدروجين، الأكسجين و بخار الماء على طول قنوات الوقود، الهواء و المصعد على التوالي عند تغير تدفق الوقود و المؤكسد و زياد نسبة بخار الماء في في مسام المصعد.
41	الشكل (2-IV): تغير كمية كل من غاز الهيدروجين، الأكسجين و بخار الماء على طول قنوات الوقود، الهواء و المصعد على التوالي عند تغير المسامية.
42	الشكل (3-IV): تغير كمية كل من غاز الهيدروجين، الأكسجين و بخار الماء على طول قنوات الوقود، الهواء و المصعد على التوالي عند تغير النفاذية.
43	الشكل (4-IV): تغير كمية كل من غاز الهيدروجين، الأكسجين و بخار الماء على طول قنوات الوقود، الهواء و المصعد على التوالي عند تغير العنصر المدعوم.

قائمة الجداول و الأشكال

- 44 الشكل (5-IV): يمثل المقطع الابتدائي و الذي يكون عند بداية الخلية أي عندما $H = 0 \text{ cm}$.
- 45 الشكل (6-IV): يمثل المقاطع الداخلية الخاصة بالخلية المثالية.
- 45 الشكل (7-IV): يمثل المقاطع الداخلية الخاصة بالخلية عند زيادة تدفق الوقود.
- 45 الشكل (8-IV): يمثل المقاطع الداخلية الخاصة بالخلية عند زيادة تدفق المؤكسد.
- 46 الشكل (9-IV): يمثل المقاطع الداخلية الخاصة بالخلية عند زيادة بخار الماء في مسام المصعد.
- 46 الشكل (10-IV): يمثل المقاطع الداخلية الخاصة بالخلية ذات المصعد المدعوم.
- 47 الشكل (11-IV): يمثل المقاطع الداخلية الخاصة بالخلية ذات المهبط المدعوم.
- 47 الشكل (12-IV): يمثل المقاطع الداخلية الخاصة بالخلية ذات الإلكتروليت المدعوم.

المقدمة العامة:

يزداد الطلب العالمي على الطاقة لاعتبارات متعددة، لهذه الطاقة مصادر مختلفة لا يزال أغلبها تقليدية تتمثل في آلات الاحتراق و البطاريات الكلاسيكية. أساس توليد الطاقة في البطاريات التقليدية هو مكوناتها، التي تتفاعل كيميائيا فيما بينها لإنتاج الطاقة الكهربائية، و تستمر هذه العملية إلى حين انتهاء هذه المواد فتتوقف البطارية لحين إعادة شحنها مرة أخرى [1]. أما آلات الاحتراق الداخلي المنتجة للكهرباء تستمد الوقود من مصدر خارجي، الذي يكون غالبا الوقود الحفري الذي تفيد دراسات كثيرة انه على وشك النفاذ [2]. إن نواتج الاحتراق و بقايا تلك البطاريات منتهية الصلاحية يساهمان بشكل كبير في الإضرار بالبيئة، ذلك واضح في التلوث و الاحتباس الحراري اللذين يشكلان خطر على الحياة. مما أدى لزيادة الوعي بضرورة حماية هذه البيئة و المحافظة عليها، يتضح ذلك على وجه الخصوص من خلال البروتوكولات المختلفة التي ترى النور من حين لآخر لتقييد و تحدد الإنتاج الطاقوي. لذلك توجب البحث عن مصادر طاقة بديلة متجددة فعالة صديقة للبيئة، تلي الحاجيات المطلوبة و تستعمل وقود متوفر. فمن بين الحلول اقترح؛ إنتاج الطاقة من خلال محطات الطاقة النووية، التي لم تحدد وسائل إنتاجها بعد، إضافة إلى الخطر الذي قد ينجم عنها. طاقة الرياح ، الطاقة الشمسية التي تعاني من مشاكل التخزين و غيرها. فسطعت في الأفق مجدداً خلايا الوقود التي يمكن القول مجازاً أنها تتشابه مع البطارية و آلات الاحتراق في توليد الطاقة الكهربائية من تفاعلات كيميائية، لكن تختلف مع الأولى كون عمرها لا نهائي حيث انه طالما يدخلها وقود يخرج تيار كهربائي، بينما تختلف مع الثانية كونها تقوم بتحويل الطاقة الكيميائية المخزنة في الوقود إلى طاقة كهربائية مباشرة عن طريق التفاعلات الكيميائية و بدون أي عمليات احتراق للوقود، لذلك تتميز خلايا الوقود بأنها لا ينتج عنها أي تلوث بيئي يؤثر على المناخ بالعكس فهي منتجة للحرارة و الماء الذي يعتبر نفاذه أسباب حروب المستقبل [3].

يعود فضل اكتشاف تقنية هذه الخلايا إلى السيد وليام روبرت جروف في إنجلترا منتصف القرن 19 ميلادي، حيث لم يكن يعلم أن اختراعه الذي وضعه في العام 1838م سيحل مشكلة تواجه العالم في القرن الواحد و العشرين، لكن نظراً لعدم جدوى استخدامها في تلك الفترة ظل هذا الاختراع حبيس الأدراج لأكثر من 130 سنة، فمن اجل تأمين الطاقة الكهربائية و مياه الشرب الضرورية لاستمرار حياة رواد الفضاء في المركبات و المحطات الفضائية عادت هذه خلايا مرة أخرى للظهور في عقد الستينيات عندما

طورت الشركة General Electric خلايا تعمل على توليد الطاقة الكهربائية اللازمة لإطلاق سفيني الفضاء الشهيرتين Apollo و Gemini، كانت الخلايا في تلك المركبتين كبيرة الحجم و باهظة التكلفة، لكنها أدت مهامها و المطلوب منها دون وقوع أي أخطاء [10-4]. و منذ نهاية التسعينيات فقط، بدأ عدد كبير من العلماء والصناعيين يعملون على هذا الموضوع، لذلك يشهد الاهتمام بخلية الوقود حاليًا نموًا كبيرًا و الذي سيستمر بالتأكيد لسنوات قادمة.

خلايا الوقود تتضمن عدة أنواع تشترك في بعض الخصائص و تختلف في أخرى و يظهر هذا في عرض جدول الملحق أ، فهي مثلا تنتج الطاقة الكهربائية عن طريق عملية كهروكيميائية، أين يتم الجمع بين غازي الهيدروجين و الأكسجين ليترج بخار الماء و الحرارة. و يختلف من نوع لأخر، فهو يحدث في المهبط في خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC و التي تتميز بأربعة أشكال هندسية. سوف نختص في دراستنا هذه بالشكل الأنبوبي أو الاسطواني منها، حيث نعمل على نمذجة ظاهرة انتشار الغازات المستهلكة و المنتجة في هذه الخلايا. و لنتمكن من ذلك يجب تنظيم عملنا و تنسيقه حسب الفصول التالية:

في الفصل الأول، سيتم تقديم مفاهيم عامة عن خلايا الوقود و خلايا SOFC انطلاقا من موجز عن وقود الخلايا، عرض كل من مكوناتها، مبدأ تشغيلها، تطبيقاتها، مزاياها و عيوبها. أشكالها.

سيتم توجيه الاهتمام في الفصل الثاني على الدراسات السابقة التي تناولت هذا النوع من خلايا الوقود ، محاولين وصف أهداف الدراسات و طرقها و أهم نتائجها.

سيتم تخصيص الفصل الثالث للنمذجة العددية و تجزئة المعادلات التي تحكم نقل الكتلة في قلب الخلية. ثم استخدام أداة رقمية (الحجوم المنتهية) وتطبيقها على دراستنا.

يعرض ضمن الفصل الرابع نتائج المحاكاة، مع تقديم تحليل مناسب لها.

و يختم العمل بملخص عامة تلخص نتائج البحث و تعرض أهم معوقاته و النقاط التي يمكن أن تكون أفاق بحث مستقبلية.

الفصل الأول:

عموميات حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

1-I المقدمة:

إن الحديث عن خلايا الوقود و كل ما يتعلق بها يطول، إلا أننا سوف نحاول التطرق في هذا الفصل لأهم المفاهيم الخاصة بها و المتمثلة في؛ تاريخها، ووقودها، بنيتها الأساسية و مبدأ عملها، أنواعها، تطبيقاتها، مزايا و عيوب كل منها، باستثناء النوع الخاص بدراستنا. إذ نتم في عملنا هذا بخلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC و التي نتناولها هنا بأكثر تفصيل من حيث ماهيتها، مكوناتها مبدأ تشغيلها و أشكالها، مزاياها و عيوبها.

2-I خلايا الوقود:

الخلايا الوقودية وسيلة فعالة صديقة للبيئة لاستعادة الطاقة المخزنة في الهيدروجين على هيئة طاقة كهربائية. و نظرا لكونها تقنية حديثة للتوليد المباشر للطاقة الكهربائية و بكفاءة عالية فقد تم التركيز عليها في الفقرات الآتية [1-40].

1-2-I نبذة تاريخية عن خلايا الوقود:

جاء في عمل Aissa Touahir (2008) أن:

في عام 1780، قام لويجي جالفاني (Luigi Galvani 1737 – 1798) بتسليط الضوء على ما سماه "الكهرباء الحيوانية" عن طريق توصيل صفيحتين من المعادن المختلفة (النحاس و الحديد)، المتسببة في تقلص أرجل الضفادع. و كان تفسيره وجود كهرباء ذاتية في جسم الضفدع.

الفصل الأول: عموميات حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

هذا التفسير ادحض سنة 1792 من طرف اليساندر فولتا (Alessandro Volta 1745 - 1827)، حيث بين أن المعادن المختلفة هي المنتجة للكهرباء و إغلاق الدائرة يؤدي إلى انكماش ملحوظ. تابع تجاربه التي قادته لتصميم أول بطارية كهربائية وذلك حسب ما نُشر سنة 1800 (و هي عبارة عن بطارية مشكلة من أقراص معدنية من الزنك و النحاس مفصولة بقطعة قماش أو ورق غارقة في الماء الحامض أو المالح)، بطارية فولتا هذه هي أول مصدر مستقل للطاقة الكهربائية المتاحة، رغم أنها كانت تستهلك خلال عشرين دقيقة إلا أنها مهدت الطريق لكثير من التجارب.

العالمان الإنجليزيان، ويليام نيكلسون (William Nicholson 1753-1815) و أنتوني كارلايل (Carlisle Anthony 1768-1840) اخترعا نفس بطارية فولتا و شرعا في بناءها في نفس العام، حيث لاحظا فقاعات غاز تتشكل بجوار قطرة الماء؛ هذه التجربة كانت أول عملية تحليل كهربائي للماء في عام 1800.

في عام 1806، أنتج السيد همفري ديفي (Sir Humphry Davy 1788-1829) الأكسجين و الهيدروجين عن طريق التحليل الكهربائي للماء المقطر.

في عام 1838، قام الأستاذ كريستيان فريدريك شونبين (Christian Friedrich Schonbein 1799-1869) في جامعة (Bâle)، بإجراء التحليل الكهربائي للماء بتطبيق تيار عبر قطبين كهربائيين من البلاتين في أنبوب على شكل حرف U. عند انقطاع التيار يلاحظ ظهور التيار المتولد من الغازات، في الاتجاه المعاكس لتلك التي فرضها: بذلك تولد التحليل الكهربائي العكسي للماء.

في الوقت نفسه، قام الإنجليزي ويليام روبرت غروف (William Robert Grove 1811-1896) و هو في الأصل محام بتحسين البطارية و أصبح مهتمًا بالتحليل الكهربائي لذلك طور فكرة أنه إذا تمكنا من فصل الماء إلى مكوناته بالكهرباء يجب أن نكون قادرين على القيام برد الفعل المعاكس. هذه الظاهرة هي المبدأ الأساسي لخلايا الوقود. في عام 1839، أنشأ هذا العالم أول خلية H_2-O_2 بين 1843-1845 في حمام حامض الكبريتيك بطاقة عالية، و لكن بسبب التقدم العلمي المتأخر في تلك الفترة ضل هذا الاكتشاف حبيس الأدراج و اتجه البحث عن تقنيات أخرى لإنتاج الطاقة.

الفصل الأول: عموميات حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

ظهر مصطلح خلية الوقود في عام 1889 مع الكيميائي البريطاني من أصل ألماني لودفيج موند (Ludwig Mond) و مساعده تشارلز لانغر (Charles Langer). الذين طوروا أول خلية وقود مزودة بأقطاب كهربائية مثبتة من البلاتين. قامت خلية الوقود الخاصة بهم بتطوير جهد 0.73v بكثافة تيار 6 A/ft^2 (مأخوذة بالنسبة إلى سطح القطب).

في عام 1897 طور والتر هيرمان نرنست (1894-1941 Walther Hermann Nernst) استخدام إلكتروليات صلبة للإضاءة (مصباح نرنست)، هذه التقنية ستكون قاعدة لبطاريات SOFC.

في بدايات القرن العشرين، أجرى العديد من العلماء أبحاثاً على خلايا الوقود في مختبراتهم. في الثلاثينيات، E. Baur و P. Preis أول من استخدم إلكتروليت صلب لتطبيقات خلايا الوقود مع درجات حرارة التشغيل المرتفعة حوالي 1000°C .

و يرجع الفضل في هذا القرن إلى البريطاني فرانسيس توماس بيكون (1909-1992 Francis Thomas Bacon) الذي طور خلية الوقود القلوية (AFC) Alkaline Fuel Cell، و التي ساهمت في توليد قوة مقدارها 6 kW في عام 1959. فكان أول من استخدم هذا النوع من الخلايا بأقطاب كهربائية قلوية و أقطاب النيكل أقل تكلفة بكثير من تلك المستخدمة من البلاتين. كما ساعدت مشاريع الفضاء الأمريكية في تطوير تكنولوجيا البطاريات مع برنامج جيميني (Gemini، 1968)، PEMFC لشركة جنرال إلكتريك - Général Electric - و ابولوا (Apollo، 1963) Pratt and Whitney - AFC، حيث وفرت البطارية لكبسولة الفضاء الطاقة لتشغيلها كما أنتجت المياه لطاقمها.

في سبعينات القرن الماضي، و بسبب الصدمات النفطية التي واجهة العالم في تلك الحقبة، ازدادت الأبحاث العالمية في اتجاه إنتاج الطاقة و تنويع مصادرها من أجل استقلال الدول بالأخص غير المنتجة للنفط. و مع ذلك، فإن النماذج الأولية لخلايا الوقود التي كانت موجودة في الثمانينات كانت باهظة الثمن و ذات عمر قصير. هاتان الميزتان أثارتا عدم الاهتمام بهذه التكنولوجيا، باستثناء الولايات المتحدة و اليابان اللتين واصلتا البحث.

استئناف تطوير خلايا الوقود ظهر في التسعينيات بهدف خلق طاقة نظيفة، و بسبب الوعي بأن مصادر الطاقة الموجودة محدودة. حالياً، يتم اختبار العديد من خلايا الوقود في ظل ظروف الحياة الحقيقية. الاختبارات الأولى لهذه البطاريات تبدي مستقبلاً واعداً، من خلال العديد من التطبيقات بالأخص المتنقلة منها كما سنرى لاحقاً [7].

الفصل الأول: عموميات حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

I-2-2-2 وقود خلايا الوقود:

تستخدم خلايا الوقود غاز الهيدروجين لتشغيلها، وهي تعمل على النقي منه و لكنه ليس مصدرا أوليا و إنما يتم تصنيعه أو استخلاصه من مصادر أخرى مثل النفط و مشتقاته، الغاز الطبيعي، أو عن طريق التحليل الكهربائي للماء. عادة تتم عملية استخلاص الهيدروجين من هذه المصادر خارج نظام خلايا الوقود بتقنيات مختلفة، أين تعتمد درجة نقاوته على مصدر الوقود أو على الطريقة المستخدمة لإنتاجه، فقد يتطلب معالجة و تقنية إضافية ليكون ملائما لاستخدامه. كما يمكن استخلاصه داخل نظام هذه الخلايا بأقل تكلفة و أكثر مرونة، من اجل الاستفادة من الحرارة الناتجة من هذه العملية، و تستخدم هذه الطريقة عادة في خلايا الوقود ذات درجة حرارة التشغيل المرتفعة [6].

قد تكون هذه المعالجات مقبولة عند استخدام خلايا الوقود في توليد الطاقة كمحطات الإنتاج الثابتة، و لكن تقع الإشكالية عند استخدام خلايا الوقود في وسائل النقل و المواصلات و الاستخدامات المتنقلة، لأنه يتطلب إنتاج الهيدروجين و حفظه فقط عندما يكون إنتاجه خارج المركبة، لذلك قامت عدة شركات خصوصا شركات تصنيع السيارات بعدد من المحاولات التطبيقية لحفظ الهيدروجين على متن المركبة (السيارة) عن طريق اتحاده مع مواد صلبة (Métal Hydrides)، و قد اتضح أن ذلك يزيد من الثقل على المركبة. كما كانت هناك محاولات لحفظه في خزانات على شكل غاز سائل أو غاز مضغوط، و تمت أيضا محاولات استخلاصه على متن المركبة نفسها، مع العلم أن متطلبات الوقود المرغوب فيه لخلايا الوقود يجب أن يكون متوفرا، سهل النقل و التخزين، غير سام و أن يكون بسعر منافس من الناحية الاقتصادية [3-10].

لا يوجد حاليا وقود يحقق جميع هذه المتطلبات، و لكن هناك بعض أنواع الوقود القريبة من تحقيقها، منها الميثانول الجازولين، الإيثانول، الديزل، و لكل منها محاسن و مساوئ [1, 3, 6].

1- الميثانول متوفر و رخيص الثمن، لكن يرى البعض انه غير مناسب لأنه يسبب تآكل المعادن بسرعة، كما انه قليل الكفاءة و سام [1, 3, 6].

2- الجازولين متوفر إلا أن تركيبته الكيميائية معقدة مما يصعب من عملية معالجته لاستخلاص الهيدروجين النقي منه، كما أن كفاءته قليلة مقارنة باستعماله في المركبات التقليدية [1, 3, 6].

الفصل الأول: عموميات حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

3- الإيثانول خيار جديد و لكنه متوفر في أماكن معينة (محدودة) [1, 3, 6].

4- الديزل عادة يحتوي على نسبة عالية من الكبريت، و هو أصعب أنواع الوقود السائل من ناحية إعادة صياغة تركيبه

الكيميائي، و استخدامه قد يكون في مجال التطبيقات العسكرية و التي لا تخضع للمتطلبات المذكورة [1, 3, 6].

و تجري الأبحاث حاليا على تحسين و تطوير تقنيات و مواد استخلاص الهيدروجين من هذه الأنواع السائلة للوقود.

بالإضافة إلى أنواع أخرى من الوقود مثل النفط الخفيف و الثقيل. و كما هو واضح فإن جميع الخيارات المذكورة سائلة، مما يسهل

التعامل معها من ناحية الحفظ و النقل و التوزيع. و مما لا شك فيه أن وقود هذه الخلايا لا يزال معضلة تحد من تطويرها و استخدامها

على مستوى واسع خاصة في وسائل المواصلات [2].

I-2-3 البنية الأساسية لخلية الوقود و مبدأ عملها:

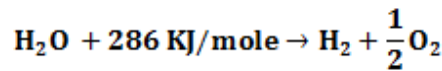
الخلية الوقودية في جوهرها خلية كهروكيميائية تقوم بتحويل الطاقة الكيميائية للوقود المغذي لها (كالهيدروجين أو الغاز

الطبيعي) بشكل مباشر إلى طاقة كهربائية. لا تختلف البنية الأساسية لخلية الوقود عن البنية الأساسية لأي خلية كهروكيميائية أخرى

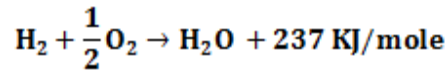
مثل أجهزة التحليل الكهربائي للماء. فهي تتكون من قطبين: مصعد، مهبط، إلكتروليت بالإضافة إلى الأجهزة المساعدة [1-40].

أما مبدأ عملها فهو عكس مبدأ عمل وعاء التحليل الكهربائي للماء. حيث يقوم هذا الأخير بتحليل الماء إلى مركبيه

الهيدروجين و الأكسجين مستهلكا قدرا معيناً من الطاقة الكهربائية [6-7]:



بينما تقوم خلية الوقود بتركيب الماء من الهيدروجين و الأكسجين منتجتا قدرا معيناً من الطاقة الكهربائية:



و عليه فإن لخلية الوقود ناتجا ثانويا مفيدا جدا و هو الماء النقي، و الذي يكون إما بحالته السائلة ماء ساخن أو على هيئة

بخار، و ذلك حسب درجة حرارة عمل الخلية كما سنرى لاحقا عند دراسة الأنواع المختلفة لخلايا الوقود [1-41].

و الشكل (I-1) يبين المخطط بنية و مبدأ عمل خلية الوقود من نوع الأكسيد الصلب كما سنرى لاحقا.

الفصل الأول: عموميات حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

الإلكتروليت (Electrolyte) كما هو معروف في الخلايا الكهروكيميائية يجب أن يكون ناقلا للأيونات (الشوارد) و غير

ناقل للإلكترونات، تختلف مادة صنعه باختلاف نوع الخلية، سنرى ذلك في نوع الخلية التي سنقوم بدراستها [1-4].

تغذى خلية الوقود بالهيدروجين من جهة المصعد (Anode) لذا يسمى هذا القطب "بقطب الوقود" (Electrode Fuel)

و عنده تتفصل إلكترونات الهيدروجين عن بروتوناته (شوارد H^+) ، أما الإلكترونات التي لا يمررها الإلكتروليت فتضطر إلى التدفق عبر

دائرة خارجية (كالحمل مثلا) لتهبط على القطب الآخر للخلية و هو المهبط (Cathode)، و هذا ما يشكل مرور التيار الكهربائي

الذي يزودنا بالطاقة الكهربائية [1-40].

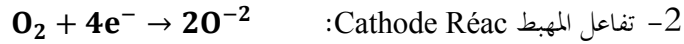
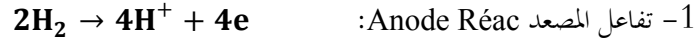
أما عند القطب (المهبط) فتغذى الخلية بالهواء لتوفير الأكسجين اللازم لعملها، لذلك يسمى المهبط هنا " بقطب الهواء"

(Air Electrode)، و عند هذا القطب تعود إلكترونات الهيدروجين الآتية عبر الدائرة الخارجية لتندمج مع أيونات الأكسجين

لتشكل ايونات O^{2-} ، و تتفاعل الايونات الناتجة من القطبين لتشكّل الماء و لكن يحدث هذا في احد القطبين و يتحدد هذا حسب

نوع الإلكتروليت أي حسب نوع الخلية. و عليه فإنه يمكن اعتبار التفاعل الكهروكيميائي داخل الخلية مؤلفا من قسمين: الأول عند

المصعد و الثاني عند المهبط [6-7]:



يمكن تحويل التيار الكهربائي المستمر (DC)، إلى تيار متردد (AC) لأداء مهام تشغيلية معينة، عمليا توضع أكثر من خلية

وقود في إطار واحد على شكل مصفوفات حسب القدرة الكهربائية المطلوبة [11].

I-2-4 أنواع خلايا الوقود، تطبيقاتها، مزاياها و عيوبها:

لقد حظيت خلايا الوقود في الآونة الأخيرة باهتمام كبير من قبل المؤسسات و الهيئات المعنية بصناعة الطاقة الكهربائية

و تقنيات توليدها و تخزينها، فقد تم حتى الآن تطوير عدة أنواع نذكر منها الأكثر استخداما و انتشارا على المستويين العلمي

و التجاري [6-7]:

الفصل الأول: عموميات حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

1- خلايا الوقود القلوية AFC.

2- خلايا وقود حمض الفسفور PAFC.

3- خلايا وقود الكربونات المصهورة MCFC.

4- خلايا ذات الغشاء البوليميري PEMFC.

5- خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC.

و هناك عدة أنواع مازالت قيد التطوير أو الاختبار مثل DMFC خلايا الميثانول المباشر، ZAFC خلايا الزنك / الهواء،

RSOFC خلايا الأكسيد الصلب العكوسة و SAFC خلايا الحمض الصلب. و هكذا نرى أن تسمية نوع خلية الوقود يعود في

المقام الأول إلى طبيعة إلكتروليتها.

- خلايا الوقود القلوية إلكتروليتها حمض وسط قلوي من هيدروكسيد البوتاسيوم (KOH).
- خلايا حمض الفسفور إلكتروليتها حمض الفسفور المركز.
- خلايا الكربونات المصهورة إلكتروليتها مزيج من كربونات الليثيوم و البوتاسيوم المصهورة.....

كما تصنف الخلايا الوقودية حسب درجة حرارة تشغيلها.

خلايا الوقود ذات درجات الحرارة المنخفضة (حتى 200°C) مثل:

1- خلايا الوقود القلوية AFC.

2- خلايا وقود حمض الفسفور PAFC.

3- خلايا الغشاء البوليميري PEMFC.

خلايا درجات الحرارة المرتفعة (أعلى من 6000°C) مثل:

1- خلايا وقود الكربونات المصهورة MCFC.

2- خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC.

الفصل الأول: عموميات حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

تحتاج خلايا درجات الحرارة المنخفضة عادة إلى مادة محفزة (Catalyst) للمساعدة على إقلاع (بدأ) التفاعلات و تسريعها سواء على المصعد أو على المهبط، و ذلك بخلاف الخلايا ذات درجة الحرارة المرتفعة، فحرارة تشغيلها المرتفعة كافية لبدء التفاعلات و تسريعها.

و الميزة الثانية لخلايا درجات الحرارة المرتفعة أنها لا تحتاج إلى معالج خارجي (External Reformer) للوقود، فبفضل درجات الحرارة العالية تصبح نظم الخلايا الوقودية قادرة على معالجة الوقود داخليا و استخلاص الهيدروجين اللازم لعمل الخلية [10]. أما خلايا درجات الحرارة المنخفضة فتحتاج إلى معالج وقود خارجي (منفصل) ليقوم بتزويدها بالهيدروجين اللازم، و ذلك للمحطات الثابتة، أما وحدات خلايا الوقود المستخدمة في التطبيقات المتنقلة (كالسيارات و الأجهزة المحمولة) فتستخدم خزانات هيدروجين صغيرة مضغوطة محمولة تسمى "بالاسطوانات أو خراطيش الهيدروجين" [3].

إن الجيل الأول من خلايا الوقود و هما النوعان AFC و PAFC يستخدم إلكتروليتا سائلا، و لتفادي مشكلات الإكتروليت السائل من تسرب و غيره طور نوع ثالث إلكتروليتها غير سائل و هو النوع PEMFC تلاه النوع الرابع MCFC، لذلك فإن هذين النوعين يعدان من الجيل الثاني لخلايا الوقود [21]. النوع الأول و هو الخلايا القلوية التي لازالت حتى الآن تستخدم على الرغم من قدمها خاصة في مركبات الفضاء، الغواصات و الأغراض العسكرية الأخرى [5].

أما خلايا حمض الفسفور و خلايا الكربونات المصهورة فقد ازدهرت صناعتها و انتشر استخدامها بشكل واسع ما بين السبعينيات و التسعينيات من القرن الماضي، و لكن بسبب عيوبها و مشكلاتها الكثيرة تضائل استخدامها و لم تعد تصنع منذ نهاية القرن الماضي [10].

في الوقت الحاضر الخلايا المستخدمة للتطبيقات الصغيرة و النقالة هي خلايا الغشاء البوليميري PEMFC، و خلايا الأكسيد الصلب SOFC للتطبيقات الكبيرة و الثابتة كمحطات التوليد العادية و الهجينة، و التي لم نتطرق لها هنا لأننا سوف نهتم بدراستها بالتفصيل في الفقرات المقبلة [5].

الفصل الأول: عموميات حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

I-3 خلايا وقود الأكسيد الصلب:

I-3-1 ماهية خلية وقود الأكسيد الصلب:

خلايا الأكسيد الصلب SOFC ظهرت في نهاية الخمسينيات [8]، و هي الجيل الثالث من خلايا الوقود التي تتلافى معظم مساوئ و مشكلات الأجيال السابقة، و نظرا لطبيعة الإلكتروليت الصلب السيراميكية فإنه يمكن رفع درجة حرارة عمل الخلية إلى 1000°C أو أعلى من ذلك، الأمر الذي يؤدي إلى رفع مردود هذا النوع و الحصول على كثافة استطاعة عالية من الخلية بالإضافة إلى إمكانية الوصول إلى استطاعة مركبة كبيرة تصل إلى رتبة MW لذلك هذا النوع يعد من أفضل أنواع الخلايا المتاحة على المستوى التجاري [7-40].

تتميز هذه الخلايا بأنها تعمل بفعالية عالية عند الضغط الجوي و درجات الحرارة العالية كما جاء أعلاه، وتتمتع بمقدرة جيدة على معالجة الغاز الطبيعي بإعادة تشكيله (إصلاحه) (Natural Gas Reforming)، أي يمكنها العمل على طيف أوسع من أنواع الوقود مثل الميثان، البروبان، البوتان، الغاز الطبيعي، غازات التخمر و غازات الكتلة الحيوية. إلا انه يجب إزالة مركبات الكبريت الموجودة في الوقود قبل استخدامه في الخلية. أي يمكنها الإستخدام المباشر لأنواع الوقود الملوث كغاز CO و الغاز المستخلص من الفحم الحجري و المشتقات النفطية الثقيلة [10].

كذلك فإن درجة حرارة الغازات العادمة لهذه الخلايا تتراوح ما بين 600°C و 900°C ، مما يسمح بالاستفادة من هذه الحرارة العادمة في توليد إضافي للطاقة الكهربائية الأمر الذي يؤدي إلى رفع مردودها الإجمالي إلى أكثر من 85%. العمل بدرجة الحرارة هذه يسمح لهذه الخلايا باستخدام أنواع إلكتروليت رخيصة، كما أنها ضرورية للسماح للإلكتروليت بتركيب أكسيد الزركونيوم و البيرسيوم، مما يكسب الخلايا موصلية بروتونية كافية. حاليا تتركز جهود التنمية على خفض درجة حرارة التشغيل من خلال تطعيم الإلكتروليت بمركبات أخرى حيث تستند المحفزات المستخدمة على النيكل و الأكاسيد [12].

I-3-2 مكونات خلية وقود الأكسيد الصلب:

تتألف خلية وقود الأكسيد الصلب كمثيلاتها من خلايا الوقود من؛ مصعد، مهبط، إلكتروليت، محفز و طبقة الوصل (مجمع التيار ثنائي القطبية)، بشكل أدق تتكون من أربع طبقات، يكون ثلاث منها من مواد سيراميكية، سمك الخلية الواحدة المؤلفة من

الفصل الأول: عموميات حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

الطبقات الأربعة لا يتعدى بضع مليمترات، حيث لا يمكن تنشيط السيراميك المستخدم في الخلايا أيونياً أو كهربائياً حتى تصل إلى درجة حرارة تشغيل مرتفعة جداً، كما ذكر سابقاً . مكوناتها هي كالتالي [7-40]:

أ- المصعد (Anode): هو القطب السالب للخلية، يجب أن تكون طبقة المصعد سيراميكية تحوي الكثير من المسام لكي تسمح للوقود بالجران نحو الإلكتروليت، يمكنه نقل الإلكترونات و الأيونات. أكثر المواد المستخدمة شيوعاً في تركيبه هي مادة السرميت (Cermet) التي تصنع من النيكل الذي يخلط مع المادة السيراميكية المستخدمة في إلكتروليت الخلية (أكسيد الزركونيوم) (Ni-ZrO₂). المصعد هو الطبقة الأثخن و الأقوى في كل الخلية لأنه القطب الذي يحصل فيه أقل فقد، كما أنه الطبقة التي تزود الدعم الهيكلي للخلية. و بشكل كهروكيميائي فإن وظيفة المصعد هي استخدام أيونات الأكسجين التي تنحل داخل الإلكتروليت لأكسدة هيدروجين الوقود.

ب- المهبط (Cathode): هو القطب الموجب لخلية الوقود، إذ يحتوي على مجار لتوزيع الأكسجين على سطح المخز، كما أنه يستقطب إلكترونات الدارة الكهربائية نحوه. يصنع قطب المهبط من منغنيت اللثانيوم المطعم بالسترونيوم (Sr-doped La MnO₃)، و هي مادة مسامية أيضاً .

ج- الإلكتروليت أو المحلول الكهربائي (Electrolyte): هذه المادة نفوذة فقط لأيونات الأكسجين السالبة، و تنقلها من قطب إلى آخر، و باتجاه واحد مع منع مرور الأيونات الموجبة، الإلكتروليت و الغازات من خلالها. يكون الإلكتروليت على شكل طبقة كثيفة من السيراميك، كما يجب الحفاظ على ناقلية كهربائية أقل ما يمكن لتجنب الفقد في التيار. تسمح حرارة التشغيل العالية للخلية بحركة نقل الأكسجين بشكل جيد من أجل رفع الكفاءة. إلا أنه مع انخفاض درجة حرارة التشغيل و اقتربها من الحد الأدنى (600 درجة مئوية) يبدأ الإلكتروليت بإبداء ممانعة لمرور أيونات الأكسجين مما يؤثر على الكفاءة. يصنع الإلكتروليت من أكاسيد المعادن، و غالباً ما تكون من أكسيد الزركونيوم المثبت بأكسيد اليتريوم (Stabilized Zirconium Yttrium).

د- المحفزات (Catalysts): و هي مؤلفة من مواد خاصة، تستعمل فيها معادن نادرة مثل البلاتين، النيكل، لكي يسهل استخدام هذه المحفزات في النظام.

الفصل الأول: عموميات حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

الجدول (1-1) أدناه يلخص خصائص أهم مكونات خلية الأكسيد الصلب المذكورة أعلاه:

المكونات	نوع الوسط	الوظيفة	درجة حرارة التشغيل	المواد المؤثرة عليه (الحساسية)	مادة الصنع
المصعد (الأنود) Anode	مسامي	حاملة لأيونات + مقر أكسدة الهيدروجين	عالية لتسهيل التبادلات	CO، الكبريت	
المهبط (الكاثود) Cathode	مسامي	حاملة لأيونات + مقر إرجاع الأوكسجين	عالية لتسهيل التبادلات		
الالكتروليت Elecrolyte	صلب (مستمر)	- ناقل لأيونات و غير ناقل للالكتروليتات - غير نفوذ للغازات	عالية		الأكاسيد الصلبة
طبقة الوصل أو الدعامات (طبقة الانتشار المحيطة بالأقطاب الكهربائية) Interconnexion	صلب	تسريع التفاعل			الحديد و النيكل بالنسبة لمصعد النيكل الملبدة و الأكاسيد بالنسبة للمهبط
لوحات ثنائية القطب		- موصلة للتيار - إدارة تدفقات المياه - نقل الغازات القادمة من الخارج.			الجرافيت

الفصل الأول: عموميات حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

هـ- مجمع التيار ثنائي القطبية (Bipolar Plates): يعمل على تجميع الإلكترونات من الأقطاب و توزيع الوقود عليها،

و يصنع من معادن موصلة أو مطلية بالذهب ذات متانة ميكانيكية جيدة، و يكون على طرف الخلية.

و- طبقة الوصل (Interconnector): من الممكن أن تكون طبقات الوصل معدنية أو سيراميكية و تكون بين الخلايا،

مهمتها هي وصل الخلايا على التسلسل بحيث يتم تكامل الكهرباء المولدة في كل خلية لتوليد التيار الكلي. لأن طبقة الوصل تكون

معرضة على طرفيها لتفاعلي الأكسدة و الإرجاع يجب أن تكون خاملة كيميائياً لدرجة كبيرة. و لهذا يفضل استخدام السيراميك بدل

المعادن الأخرى بشكل كبير في هذا المجال.

I-3-3 مبدأ عمل خلايا وقود الأكسيد الصلب:

كما جاء في الفقرة (I-2-3) من هذا الفصل، فإن مبدأ تشغيل خلايا وقود الأكسيد الصلب هو نفسه المبدأ العام لخلايا

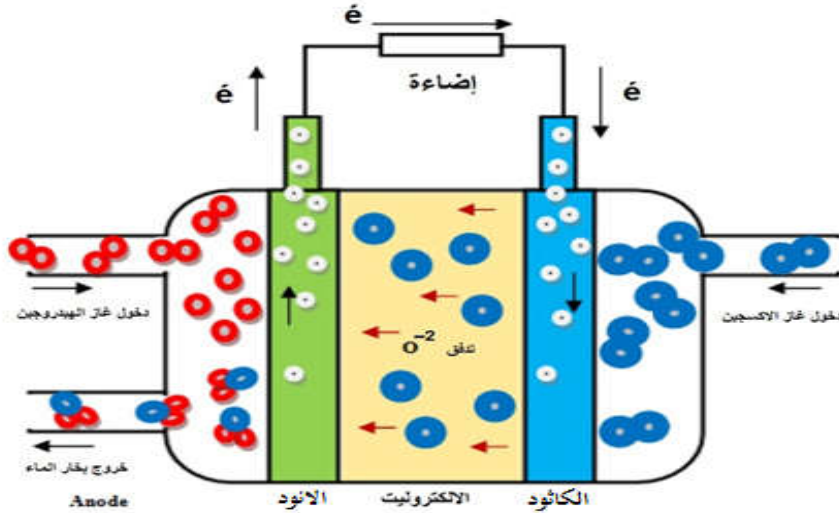
الوقود من حيث التفاعل الكيميائي الحاصل، الناتج الطاقوي و الحراري. و الإختلاف يكون في موضع التفاعل الإجمالي أي إنتاج الماء،

الذي يحدث هنا في المهبط أي القطب السالب. و كما رأينا سابقا تتميز هذه الخلايا بالعمل في درجات الحرارة المرتفعة

(أعلى من 600°C) الذي يسمح للوسيط (الإلكتروليت الذي هو عبارة عن مادة خزفية صلبة رقيقة تحتوي على مسامات) بمرور

أيونات الأكسجين O^{2-} ، هذا الوسيط لا يسمح بمرور الغاز و الالكترونات من قطب كهربائي إلى الأخر، و يتلخص مبدأ التشغيل

هذا في الشكل (I-1) أدناه [7-40].



الشكل (I-1): يوضح المبدأ العام لعمل خلايا الوقود [9].

الفصل الأول: عموميات حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

I-3-4 أشكال خلية وقود الأكسيد الصلب:

على خلاف الكثير من خلايا الوقود فإن خلية وقود الأكسيد الصلب قد تأخذ أشكال مختلفة، هي ثلاث أشكال رئيسية: مستوية، أحادية الغرفة و أنبوبية (اسطوانية) [7-40]. كما يظهر نوع رابع في بعض المراجع [8]، حيث نهتم في دراستنا بالشكل الأنبوبي.

I-3-4-1 خلية وقود الأكسيد الصلب ذات التصميم المستوي (Planaire):

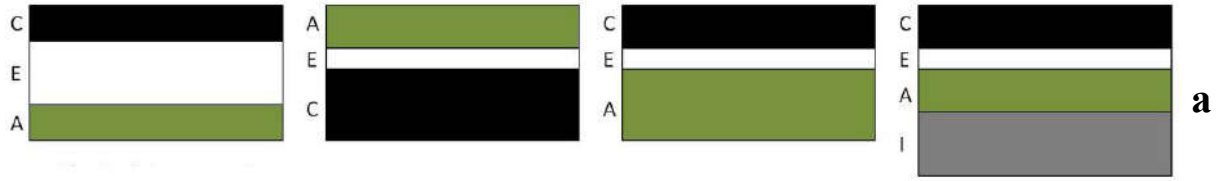
في التصميم المستوي كل عنصر من مكونات الخلية يكون مسطح، ذو سمك رقيق. لهذه الهندسة أشكال متعددة منها: ما يتم التفريق بينها بواسطة العنصر المدعوم الذي يمثل قاعدة الخلية و الذي يكون أنخن المكونات، يمكن أن يكون العنصر المدعوم أحد الأقطاب الكهربائية، الوصلات البينية أو الإلكتروليت حيث يتم وضع العناصر الأخرى في طبقات رقيقة، و هي الأشكال الموضحة في الشكل (I-2-a) [7-8].

كما أن اتجاه تدفق الغاز يسمح بالتمييز بين تكوينين: التدفق المتقاطع؛ المتعامد(الأكثر شيوعاً)، حيث تشكل تدفقات الغاز زاوية 90 درجة فيما بينها -Crossflow-. أو التدفق المتوازي؛ حيث تكون تدفقات الغازات في نفس الاتجاه -Coflow-، و هذا ما يبينه الشكل (I-2-b) [7-8].

هذه التكنولوجيا تمكن من الحصول على كثافة طاقة عالية، لأن ضياعات التوصيل و المقاومة مستقلة عن السطح. توفر الخصائص الكهربائية التي يتم الحصول عليها مجموعة واسعة من التطبيقات (المتنقلة و الثابتة)، يستخدم هذا التشكيل تقنيات غير مكلفة. مع ذلك لها عيوب أهمها؛ ضيق هذا التصميم يقلل من ضمان تشغيلها، بالإضافة إلى تسبب درجة حرارة التشغيل العالية لهذه الخلايا في تزايد الإجهادات الحرارية التي قد تتسبب في تمدد مكوناتها [2].

هذا التشكيل طورته Sulzer-Hexis ليصبح مستخدماً لتقنية مستوية مع تخطيط دائري، حيث يدخل الوقود عبر مركز الخلية بينما يأتي الهواء من الخارج. يتم إنشاء "مكدس" من 50 خلية منفردة في تركيب متسلسل. خلية وقود الأكسيد الصلب هذه تحقق كفاءة تصل إلى 85% عند استخدامها في التوليد المشترك، مع حد أقصى من الطاقة الكهربائية يقدر بـ 1 kW (الشكل I-2-c) [2].

الفصل الأول: عموميات حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

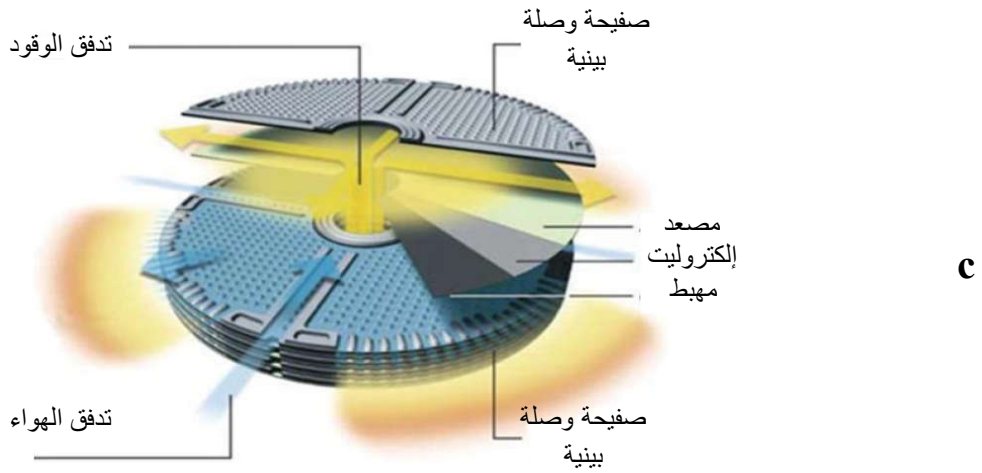
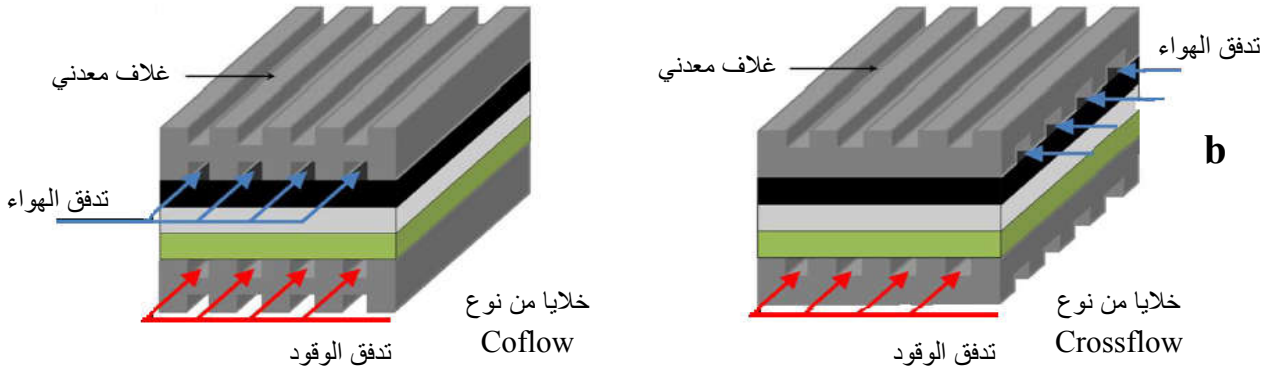


إلكتروليت مدعوم

مهبط مدعوم

مصعد مدعوم

وصلة بينية مدعومة



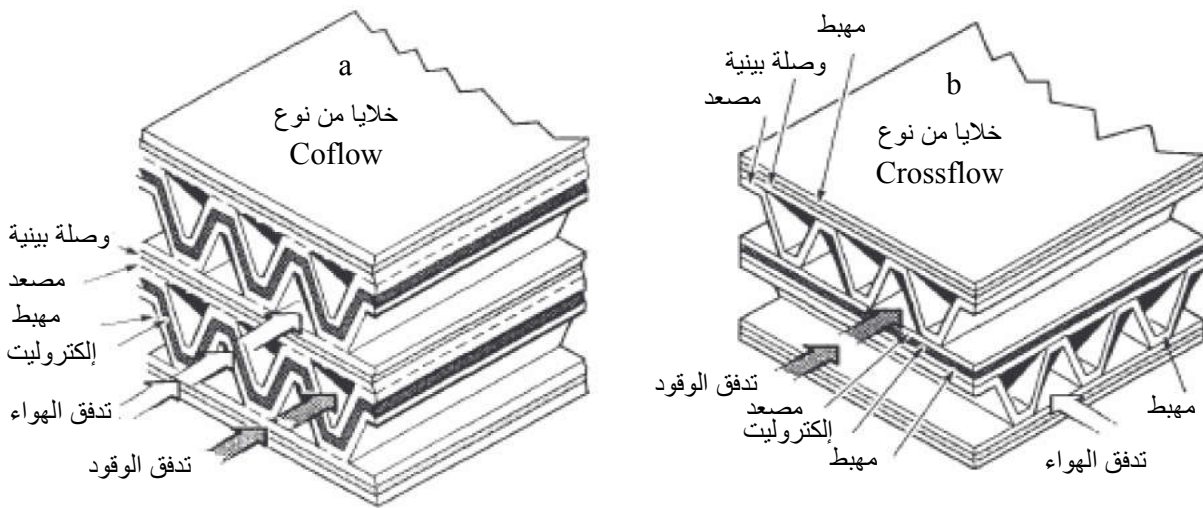
الشكل (2-1): يوضح الأشكال المختلفة للتصميم المستوي لخلايا وقود الأكسيد الصلب [8]:

- a- يمثل التصنيف حسب عنصر الدعم.
- b- يمثل التصنيف حسب اتجاه الغازات.
- c- يمثل التصنيف المطور من طرف Sulzer-Hexis.

الفصل الأول: عموميات حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

I-3-4-2 خلية وقود الأكسيد الصلب ذات التصميم أحادي الليثيك (Monolithique):

يتكون التصميم أحادي الليثيك من جزء مسطح و جزء متموج. في الحالة التي تكون فيها تدفقات الغاز متعاكسة الاتجاه (Crossflow)، فإن الجزء المتموج يمثل قنوات الغازات المؤكسد و الوقود و يتكون من مواد المهبط و المصعد على التوالي. أما الجزء المسطح الفاصل لتلك القنوات يتكون بالتناوب من تجمع تسلسل مهبط / إلكتروليت / مصعد ثم تسلسل مصعد / وصلات بينية / مهبط (انظر الشكل (I-3-b)). أما في الحالة التي تكون فيها تدفقات الغاز متوازية الاتجاه (Coflow)، فإن الجزء المتموج يتكون من تجمع مصعد / إلكتروليت / مهبط، أما الجزء المسطح فيتكون من تجمع مصعد / وصلات بينية / مهبط. الوصلات البينية (لاحظ الشكل (I-3-a)). سمك هذه الخلايا حوالي 100 ميكرومتر و المسافة بينها من 1 إلى 2 مم [2].



الشكل (I-3): يوضح الأشكال المختلفة للتصميم أحادي الليثيك لخلايا وقود الأكسيد الصلب [8].

يتميز هذا التصميم بأبعاده الصغيرة، مساحة كبيرة نشطة بالإضافة إلى كثافة تيار كبيرة تؤدي إلى الحصول على كثافة

إستطاعة كبيرة. يسمح التصميم المتموج كذلك بتحرير عناصر نشطة ناقلة تؤدي إلى تخفيض مهم في كتلة النظام.

الفصل الأول: عموميات حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

مجموعة هذه الخصائص تأهل هذا التصميم للاستعمال في الميدان الفضائي أو في ميدان الطاقة المتنقلة عموماً. لكن من

العيوب الرئيسية لهذه الهندسة تطلبها استخدام تقنيات باهظة التكلفة و معقدة نسبياً [2].

3-4-3-I خلية وقود الأكسيد الصلب ذات التصميم أحادي الغرفة (Monochambre):

التصميم أحادي الغرفة (أو الغرفة المنفردة الشكل (b-2-II))، SCFC (Single Chambre Fuel Cell) يعمل مباشرة

بمزج وقود / هواء. و هذا يسمح على عكس التصاميم الأخرى بالتحريك من الانفصال بين القسمين المهبطي و المصعدي يعني مشاكل

في التثبيت (انظر الشكل (a-4-I)). لا يمكن استخدام الهيدروجين كوقود نظراً لاتساع مجال احتمال تعرضه للانفجار في الهواء، يقدر

هذا المجال من 4.0 إلى 75 % [7]، لذلك يكون الوقود المستعمل من المحروقات (C_nH_{2n+2},.....) أو الكحولات

(C_nH_{2n+10H},.....).

يوجد هندستين ممكنتين للبطاريات أحادية الغرفة، الهندسة المستوية (Planaire) و المستوية المتوازية (Coplanaire)

- انظر الشكل (b-4-I) - يوجد عاملين يتحكمان في حركة المزيج الغازي. يقتضي الأول بإرسال المزيج الغازي إلى المصعد أولاً أو إلى

مكان إرجاع الأكسجين، ثم ينتقل المزيج إلى المهبط، من أجل أكسدة الوقود. أما العامل الثاني فيقتضي بإرسال المزيج الغازي متزامناً

إلى مختلف القطبين. أما في الهندسة المستوية المتوازية أين تتموضع الأقطاب في نفس جهة الإلكتروليت، هجرة أيونات الأكسجين في

الإلكتروليت في هذه الحالة تكون هجرة سطحية.

غياب الانفصال بين المكونات المصعدية و المهبطية يسمح بتبسيط الأنظمة و كذلك خفض تكلفة التصنيع. في التصميم

مزدوج الغرف يجب أن يكون الإلكتروليت كثيف و يقدم تنظيم ميكانيكي لضمان انسداد محكم و يعطي نوع من التدرج في درجة

الحرارة و الضغط الذين يمكن أن يظهرها بين الغرف. هذه التحديدات ليست إلزامية في التركيب أحادي الغرفة. الإلكتروليت يمكن أن

يكون مسامي جاعلاً إمكانية استعمال التقنيات أكثر بساطة و منه تخفيض التكاليف.

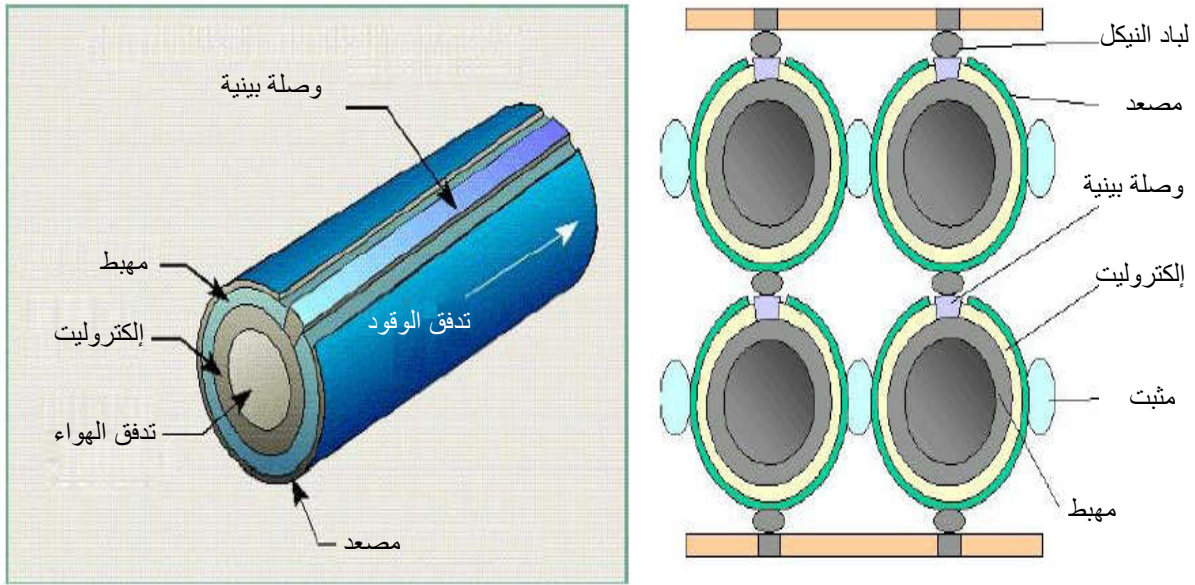
يجب تفادي التفاعل الكيميائي المباشر للوقود مع المؤكسد في الطور الغازي أو على سطح الأقطاب الذي يؤدي إلى تخفيض

الكفاءة، مواد الأقطاب يجب أن تكون مستقرة كيميائياً.

الفصل الأول: عموميات حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

في هذا التصميم يتم تصنيع كل من المهبط و المصعد بشكل أنبوبي متمحور بحيث يكون المهبط في الداخل و المصعد في الخارج تفصل بينهما طبقة الإلكتروليت. (الشكل (a-5-I)) [7-10].

لهذا التصميم أشكال متعددة وفق تصنيفات مختلفة؛ من بينها حسب العنصر المدعوم الذي تم الاطلاع على أربعة أنواع منه في التصميم المستوي سابقا، حيث تقتصر هنا على ثلاثة أشكال. باستثناء الوصلات البينية كعنصر مدعوم. الشركة المطورة لهذا التصميم و المذكورة أعلاه تعتمد المهبط كعنصر مدعوم منذ 1998 [8].



الشكل (5-I): يمثل a- تركيب خلية وقود الأكسيد الصلب الأنبوبية b- تركيب البطارية [10]

يمر الهواء داخل الأنبوب، في حين أن الوقود يمر بشكل ملامس للسطح الخارجي للمصعد و كلاهما تحت درجة حرارة 600 °C و ضغط من 3 إلى 4 bar [8].

و بهذا التصميم لن نحتاج لمواد إحكام فهو قادر على الفصل بين الوقود و الهواء، كما يتميز بتوزيع متجانس للحرارة، لكنه يعاني من مشكلتين أساسيتين:

الفصل الأول: عموميات حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

ارتفاع تكاليف التصنيع و انخفاض كثافة الاستطاعة ($0.3-0.25 \text{ cm}^2/\text{w}$) بالمقارنة مع تلك التي يتم الحصول عليها في التصميم المستوي ($2 \text{ cm}^2/\text{w}$). تستخدم هذه الهندسة لتصنيع الطاقة الثابتة المتطورة المقدرة بمئات من kw [8].

يستخدم لباد النيكل لربط الخلايا ببعضها البعض، كما يتم استعمال شعيرات من النيكل لربط أنبوبين على التسلسل، أو على التوازي (الشكل (b-5-I)) [7].

I-3-5 مزايا خلايا الأكسيد الصلب و عيوبها:

بالإضافة لما جاء سابقا:

مزاياها [7]:

- 1- البناء السيراميكي الصلب للخلية يلغي مشكلات التسرب و التآكل.
- 2- طبيعة الإلكتروليت السيراميكية الصلبة تسمح بتصميم الخلية بأشكال مختلفة مما يسهل تصنيعها و تطويرها.
- 3- إمكانية استخدام غاز CO كوقود بشكل مباشر.
- 4- إمكانية استخدام أنواع مختلفة من الوقود الأحفوري و حتى الملوثة منها.
- 5- لا تحتاج إلى مادة محفزة فدرجة الحرارة العالية للخلية كافية لإقلاع عمليات التفاعل و تسريعها.
- 6- ذات مردود عال بالمقارنة مع الأنواع الأخرى.
- 7- تصلح للاستخدام في محطات التوليد المركزية الكبيرة.
- 8- حرارة عادمها المرتفعة تسمح بتوليد إضافي للطاقة الكهربائية.

عيوبها [7]:

- 1- درجة حرارة التشغيل العالية تفرض اعتبارات معينة على مواد بناء الخلية مما يرفع من تكاليفها.
- 2- مقاومة إلكتروليتها الأيونية كبيرة نسبيا مما ينعكس سلبا على أداء الخلية خاصة عند كثافة التيار العالية.
- 3- بطيئة الإقلاع بسبب ارتفاع درجة حرارة تشغيلها.

الفصل الثاني:

دراسات سابقة حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

1-II المقدمة:

من خلال ما تم الاطلاع عليه في الفصل السابق فيما يتعلق بهذا النوع من خلايا الوقود، أصبح من الممكن في هذا الفصل الاطلاع بشكل مختصر على أهم الأبحاث السابقة التي تمكنا من جمعها و التي تناولت مواضيعها هذه الخلايا. و ذلك من حيث كفاءات و طرق الدراسة و أهم سبل التطوير الخ.

2-II دراسات سابقة:

1-2-II عمل P. Iora (2004):

توصلت الباحثة P.Lora في هذا العمل بتعريف حجم محدود لـ SOFC الذي يقوم على تحليل كهروكيميائي مفصل و حساب ديناميكي لشروط نقل الحرارة الداخلية. تتضمن النمذجة الكهروكيميائية تقييماً للضياع الأومي، التفعيل (التنشيط) الانتشار بالإضافة إلى نموذج حركي للتفاعلات الهيدروكربونية، استناداً إلى أحدث التجارب. تم تطبيق النموذج على هندسة أنبوبية، و تمت معايرته على البيانات التجريبية المتاحة لـ SOFCs الأنبوبية في الغلاف الجوي و الضغط، مما يدل على القدرة بالتنبؤ بدقة شروط تشغيل SOFC.

الفصل الثاني: دراسات سابقة حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

يولد هذا النموذج مجموع التوازن الخلوي والمظهر الخلوي الداخلي لأي متغير حراري أو كهروكيميائي، مما يتيح إمكانية مناقشة تأثيرات شروط التشغيل المختلفة على سلوك FC الداخلي.

أظهر تحليل الحساسية المطبق على معطيات النموذج تأثير فرضية مختلفة لتقييم ضياع الخلية، و كذلك عمليات تبادل الحرارة الداخلية للخلية و عمليات تفاعلات إعادة تشكيل الهيدروكربونات. و من بين النتائج الأخرى، يتبين أن أهمية اعتماد المعطيات المناسبة لتقييم استقطاب التنشيط، كذلك أهمية النموذج الحركي لإصلاح التفاعلات.

في الأعمال المستقبلية، سيتم توسيع النماذج لتشكيلات هندسات أخرى وسيتم تطبيقها لمحاكاة أداء الـ SOFC عند دمجها في تكوينات أكثر تعقيداً مع شروط تشغيل متغيرة [14].

II-2-2 عمل Laura Vanoli (2007):

تقدم هذه المقالة مقارنة أصلية للمحاكاة التماثلية المحورية المتناظرة لخلية الـ SOFC الأنوبية. يسمح نموذج المحاكاة المقدم بحساب دقيق للخصائص الفيزيائية، الكيميائية، الكهربائية و الكهروكيميائية الرئيسية في النظام، مثل درجة الحرارة، الضغط، التركيب الكيميائي، الجهد الزائد، التيار... إلخ. ويشمل هذا التقريب عدداً من النماذج التفصيلية لحساب الكيمياء الكهربائية وحركية عملية الإصلاح الداخلي، التي تم معايرتها بشكل صحيح من أجل الامتثال لبيانات تجريبية لـ SOFC. أظهرت النتائج أن بعض الافتراضات المبسطة المعتمدة عادة في محاكاة الـ SOFC ليست مقبولة بشكل عام، على سبيل المثال: شروط الاختصارات [20].

II-2-3 عمل Aissa Touahir (2008):

أثبتت الدراسة في هذه المذكرة، أنه يمكننا القول أن خلية الوقود تعتبر واحدة من أنظف أنظمة توليد الطاقة و تستخدم في مختلف التطبيقات الثابتة و المحمولة. هذا النظام عبارة عن جهاز كهروكيميائي يقوم بتحويل الطاقة الكيميائية مباشرة في التفاعل إلى الطاقة الكهربائية مع إطلاق الحرارة و الماء.

الفصل الثاني: دراسات سابقة حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

يتكون هذا العمل من محاكاة و تحسين أداء البطارية للحصول على وقود للنوع SOFC مع أنود مدعوم. هذه المحاكاة المدعومة تسمح لنا بمعرفة جيدة لظواهر نقل الحرارة و الكتلة التي تحدث في قلب الخلية. و قد تم تصميم المعادلات الرياضية في حالتين: أحادية البعد و ذات بعدين. تم تطوير برنامج كمبيوتر في "visual Fortran 5.0" تم اختيار طريقة الحجم المحدود لحل هذه المعادلات و تستخدم خوارزمية TDMA لحل نظام المصفوفة.

يتم إجراء هذه الدراسة العددية وفقا للمستوي الموازي لاتجاه التدفق لتحديد مجال درجة الحرارة تبعا لنوع مصدر الحرارة و كثافة التيار المفروضة، تتم مناقشة مجال الأنواع وفقا لمعدل تدفق الغازات الداخلة، الأبعاد و خصائص المواد (المسامية و التموج). ثم ملاحظة تأثير الضياعات الأومية و التركيز على الاستطاعة و الجهد للبطارية، يتم أيضا تحليل تأثير مصطلح مصدر الحرارة على الأداء وفقاً للنطاقات المختلفة لكثافة التيار. و أخيرا تتم مناقشة أداء البطارية وفقا لدرجة الحرارة.

لقد أوضحت حلول النموذج العديد من الظواهر التي تحدث في مكونات المكس، من خلالها تم الحصول على النتائج التالية:

- يوفر التكوين الهندسي المستوي مع الأنود المدعوم طاقة جيدة والتغلب على تأثير جول من خلال الحد الأدنى من سمك الالكتروليت.

- تزيد مسامية الأنود من إمكانية التفاعل بين الهيدروجين والأكسجين.

- ينخفض الأداء لمعظم خلايا درجات حرارة التشغيل العالية.

لذلك وفقا للنتائج التي تم الحصول عليها اقترح:

• دراسة الظواهر مع الأخذ بعين الاعتبار النقل بالإشعاع.

• دراسة التدفق عكس التيار.

• دراسة الظواهر في الهندسة الأنبوبية [7].

الفصل الثاني: دراسات سابقة حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

II-2-4 مراجعة S. Ahmad Hajimolana و آخرون (2011):

بعد مراجعة مجموعة من الباحثين توصلوا في مقالاتهم إلى أن النمذجة الرياضية هي أداة أساسية في تصميم أنظمة خلايا الوقود، حيث أنه من المهم فهم استجابة مكس الخلية في الشروط العادية. يمكن لهذه النماذج أن تقدم صورة عن الإجهاد الخلوي، الكمون، كثافة التيار، درجة الحرارة بالإضافة إلى وظيفتها وموقعها في تكوينات الخلية المختلفة و شروط التشغيل. يفيد النموذج أيضاً تغيير متغيرات المعطيات و تحسين الأداء. و قد أجريت العديد من الدراسات البحثية في هذا المجال. و مع ذلك، لا تزال هناك العديد من جوانب نمذجة خلية الوقود متاحة للدراسة.

في هذه الدراسة، تم استعراض النمذجة الرياضية لمركبات SOFC لكل من التكوينات الأنبوبية و المستوية في خمسة أنظمة فرعية مع الأخذ بعين الاعتبار عوامل مثل ضياع الاستقطاب، انخفاض الكتلة، الطاقة، كمية الحركة، الانتشار عبر الأوساط المسامية و الظواهر الكهروكيميائية التي تحدث في المصعد و المهبط (PEN) و تحولات الإصلاح بداخلها و هو أمر جديد في هذا المجال. أيضاً، تمت مناقشة استخدام مجموعة متنوعة من الوقود التي تم تغذيتها بمركبات الكربون الكلورية الفلورية و تمت مقارنة تأثيرها على النظام لفترة و حيزه. كما تم عرض مراجعة قصيرة لتكوينات خلايا وقود الأكسيد الصلب و تيارات التدفق المختلفة. لأول مرة في هذا المجال، تمت دراسة نماذج جديدة مبنية على التقريب القائم على البيانات الإحصائية الموجودة في الدراسات.

كما أشاروا إلى المواضيع التي تحتاج إلى المزيد من البحث. درجة حرارة خلية الوقود و الجهد يعتمد على رد فعل الكهروكيميائية. تحدث الأكسدة الكهروكيميائية لكل من الهيدروجين و أول أكسيد الكربون ، أكسدة ثاني أكسيد الكربون تؤثر على الأداء العام للخلية و مقاومة الاستقطاب و تأثير الجهد مباشرة. في العديد من الدراسات، يتم إهمال أكسيد الكربون عند التفاعل الكهروكيميائي أو لا يتم حساب ضياع الاستقطاب بشكل كامل.

و مع ذلك، لا يزال من الواضح أنه من خلال اقتراح بعض الفرضيات المبسطة للنمذجة الكهروكيميائية يمكن أن تؤثر على دقة النموذج. الفرق بين القيم التجريبية الملاحظة و نتائج النمذجة الرياضية. حساب الأخطاء حتى بالنسبة للتغيرات الصغيرة. و لذلك، ينبغي دراسة هذه الظواهر بعمق في كل من النمذجة الرياضية و مجالات التجارب لإجراء نموذج أكثر دقة و مصادقة.

الفصل الثاني: دراسات سابقة حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

ركزت الدراسات على كيفية تأثير البنية المجهرية لـ SOFC على التفاعلات الكيميائية و نقل الكتلة في القطب المسامي لـ SOFC عموماً، المسامية، سماكة الأقطاب الكهربائية و الإلكتروليونات له تأثير على أداء PEN. و بالتالي، فإن التصميم الأمثل لـ PEN من أجل تحسين كفاءته هو أمر مهم. يؤثر الانتشار عبر الوسائط المسامية بشكل كبير على أداء خلايا وقود الأكسيد الصلب. كما يؤثر انتقال الحرارة على درجة حرارة خلية الوقود. و لذلك، فمن الضروري النظر في نشر النماذج من أجل الحصول على تنبؤ دقيق لسلوكيات خلايا الوقود. على الرغم من أن العديد من البحوث قامت بتقديم نموذج انتشاري مفيد (FM، SMM، DGM) في شروط مختلفة، لا يزال يتطلب المزيد من التحقيق لمقارنة هذه النماذج الثلاثة معاً لتقليل الخطأ بين النمذجة الرياضية و النتائج التجريبية [30].

II-2-5 عمل INEZARENE Smail (2015):

من خلال مذكرة عمل Inezarene Smail توصل إلى أن عمل خلية الوقود هي نظام بديل محتمل لإنتاج الكهرباء بطريقة نظيفة وذات كفاءة عالية مع انخفاض استهلاك الوقود التقليدي. تلعب ظواهر التدفق الكتلي و نقل الحرارة دوراً حاسماً في تصميم وتطوير جهاز تحويل الطاقة. توزيع الحرارة أمر بالغ الأهمية لتشغيل نظام خلايا وقود الأكسيد الصلب. و تلعب الصفائح ثنائية القطب التي تدمج تدفق الغاز وقنوات التوزيع دوراً هاماً في تبديد الحرارة، حتى أن المصممين يجدون تحديات كبيرة في تصميم و اختيار المبادلات الحرارية لأنظمة خلايا الوقود ذات درجات الحرارة العالية. في خلية وقود الأكسيد الصلب طاقة الوقود خلال التحويل تنقسم إلى حرارة مع عدد من التفاعلات المتعلقة بضياء التنشيط و ضياء نقل الكتلة، الضياعات الأومية بسبب مقاومة الأيون و نقل الإلكترون. ينتج عن هذه الطاقة الحرارية توزيع درجة الحرارة في خلية الوقود وتؤثر على شروط التشغيل للخلايا. يجب إزالة هذه الحرارة المتبقية باستمرار لضمان عملية متوازنة للخلية. نظام توزيع الحرارة أمر ضروري للحفاظ على درجة حرارة الخلية للحصول على كفاءة عامة أفضل للنظام.

الفصل الثاني: دراسات سابقة حول خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC

من المنحنيات التي تم الحصول عليها و النتائج الموجودة في الدراسات السابقة، درجة الحرارة هي المعطى الضروري لتشغيل هذا النوع من خلايا الوقود [8].

3-II-3 الخلاصة:

بعد الاطلاع على هذه الدراسات، يمكن استخلاص أن:

- الدراسات قليلة حول هذا النوع من الخلايا بالأخص أنبوية التصميم.
- تعرض معظم هذه الدراسات لانتقال الأنواع أو الغازات بشكل مرتبط إما بالحرارة أو بعلاقتها بمردود الخلايا أو علاقتها بالنتائج الكهربائي، أي أنها لم تعتبرها مستقلة.

الفصل الثالث:

نمذجة استهلاك وإنتاج الغازات في خلايا SOFC الأنبوبية

III-1 المقدمة:

إن دراسة التغيرات الموضوعية و الزمنية للظواهر الفيزيائية ضروري لفهمها و بالتالي التحكم بها و تطويرها، لذلك يستوجب تمثيلها رياضيا. هذا التمثيل يكون على شكل عادلة أو جملة من المعادلات التفاضلية التي يحدد حلها الدوال التي تصف هذه الظواهر. هذا الحل معقد و صعب جدا بالطرق التحليلية، لذلك نلجأ عادة للطرق العددية و التي لا يمكنها إعطاء صيغة الدالة، إنما إعطاء قيم عددية لبعض المقادير في نقاط محددة.

سوف يتم في هذا الفصل القيام بنمذجة لظاهرة استهلاك و إنتاج الغازات المختلفة في خلايا وقود الأكسيد الصلب الأسطوانية، كما يجب أن تكون هذه النمذجة محاكية رياضيا لعناصر هذه الخلايا، حيث تم التعرف على مبدأ تشغيل الخلايا و مكوناتها في الفصل الأول.

و من جهة أخرى توصلنا في الفصل الثاني إلى أن أغلب الدراسات السابقة المتناولة لذات الموضوع لم تتناوله كما نريد و إنما اعتبرت انتقال الأنواع (المادة أو الغازات) غير مستقل عن باقي الظواهر مثل؛ الترموديناميكية، الكهروكيميائية.... الخ ، لذلك سوف نحاول القيام بهذه النمذجة بتطبيق نموذج لموائع نظام مستقر في بعد أو بعدين - الذي يفرضه التجانس الاسطواني المتماثل - على انتشار تلك الغازات بمختلف انتقالاتها بين مختلف المكونات، و حل المعادلات التفاضلية بطريقة الحجم المنتهية و استعمال الطرق التكرارية لحل هذا النظام المصفوفي الناتج في الأخير [26].

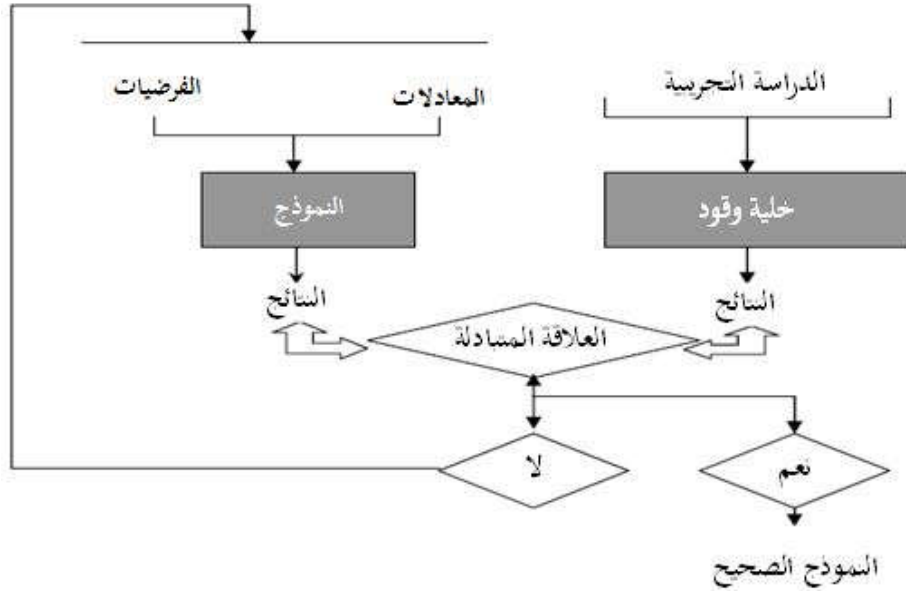
الفصل الثالث: نمذجة استهلاك وإنتاج الغازات في خلايا SOFC الأنوبوية

III-2 تعريف و اختيار النموذج:

النموذج هو عرض رياضي يعتمد على المعادلات التي تحاكي الظواهر المدروسة، لكن أغلب النماذج تكون معقدة لأنه يجب أن تعمل على تداخل العديد من العوامل الفيزيائية، الكيميائية، الكهروكيميائية، الميكانيكية و الحرارية ... إلخ، و بالتالي يجب استخدام نماذج مبسطة تسمح بمراعاة أهم المعاملات الرئيسية.

يمكن أن تكون هذه النماذج المستخدمة ثابتة (مستقرة) أو ديناميكية (متغيرة)؛ الثابتة تستخدم مثلا في تحليل المنحنيات لكثافة الجهد و التيار، و الديناميكية تعتمد على تقريب ميكانيك الموائع التي تسمح أيضاً بمعرفة جيدة بالظاهرة الكهروكيميائية. يمكن أيضاً أن تكون النماذج أحادية أو ثنائية أو ثلاثية الأبعاد أو شبه ثنائي - ثلاثي البعد.

يتم تعريف النموذج من خلال فرضيات خاصة بالمدخلات، المخرجات و المعالجة و الربط بينهما، حيث تستخدم معادلات تتضمن المعاملات التي نريد دراستها. إن تبسيط الفرضيات (اعتبار الغازات كغازات مثالية) يسمح بمقارنة ابتدائية أسرع. تتم مقارنة نتائج المحاكاة بنتائج القياسات للتحقق من صحة النموذج. في حالة الاختلاف، يتم إعادة النظر في النموذج و التحقق منه. هذا النهج التكراري يجعل من الممكن تنقيح النموذج الذي يجب أن يسمح بتعميم النمذجة التي تم الحصول عليها (انظر الشكل [1]).



الشكل (III-1): يبين كيفية إيجاد النموذج الصحيح لظاهرة معينة (الظواهر الخاصة بخلايا الوقود مثلا)

الفصل الثالث: نمذجة استهلاك وإنتاج الغازات في خلايا SOFC الأنبوبية

III-3 موضع الإشكالية:

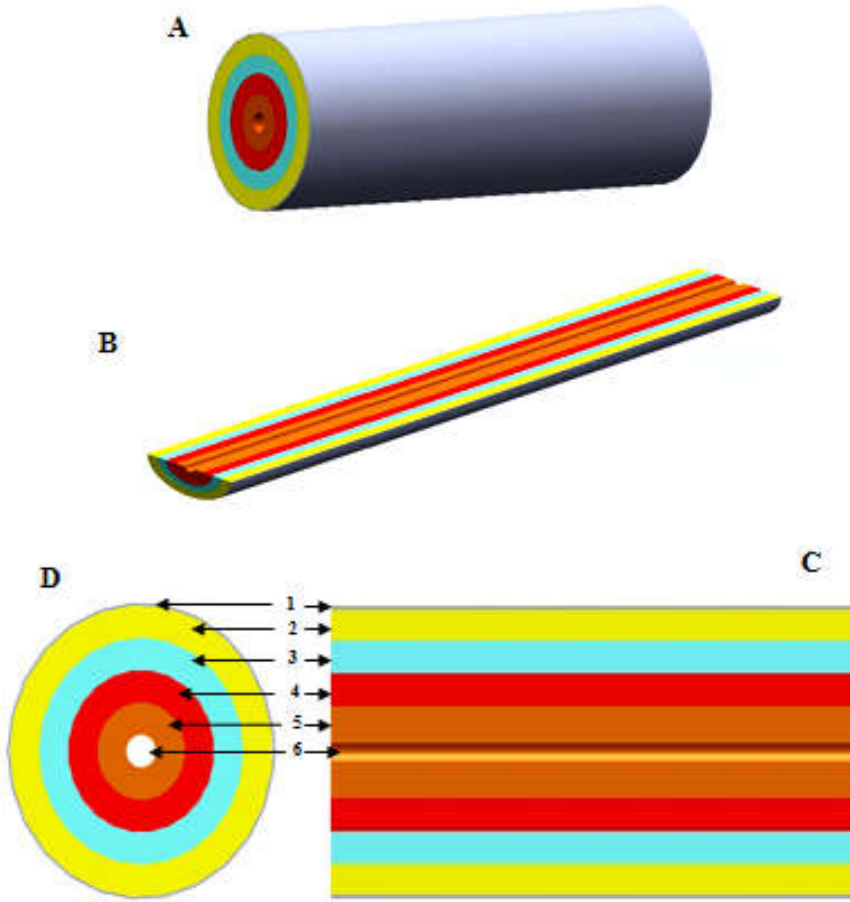
كما جاء في الفصل الأول مجال دراستنا الذي يمثل بالشكل (III-2) و المصمم باجتهدانا يتميز ببعدين (θ, r) ، و هو عبارة عن هندسة اسطوانية تشتمل على وسيطين مساميين (المصعد و المهبط) و وسط صلب كثيف مستمر يمثل الإلكتروليت. حيث تتمركز كل الاسطوانات حول المركز المخاط باسطوانة مجوفة لمرور الهواء، محاطة بالمهبط الذي يليه الإلكتروليت و المصعد على التوالي، و أخيرا يحاط المصعد و قبل اسطوانة الغلاف باسطوانة مجوفة يسري بها الوقود. يتفاعل الهيدروجين و الأكسجين عند المصعد و ينتجان الماء و الحرارة و الكهرباء.

إذن من المفترض تمييز تدفقين للسوائل، أولها عن طريق الحمل من منطقة القنوات نحو الأوساط المسامية أي نقل الغازات التي نعتبرها غازات مثالية، و ثانيها عن طريق نقل الكتلة و الحرارة و الانتشار من الوسط المسامي نحو الوسط الصلب المستمر. سيتم تطبيق محاكاة في عملنا على انتقال الكتلة فقط على مستوى خلية واحدة لنكون قادرين على تحديد أداء هذه الأخيرة دون تأثير جوانب أخرى كالجانب الحراري و الكهروكيميائي.

III-4 النموذج المادي:

سوف نتناول في عملنا خلايا SOFC الاسطوانية ؛ ذات الأقطاب المدعومة أو الإلكتروليت المدعوم، لأننا لسنا في حاجة إلى استثناء أي منها لعدم تطرقنا للخصائص الكهربائية للخلايا، أي لا نهتم بتخفيض الموصلية أو تقليل الخسائر الأومية عن طريق تقليل سمك أي منها. فعملنا يتركز فقط على حركية الأنواع $(H_2 و O_2 و H_2O)$ ، وفقاً للإحداثيات الاسطوانية.

الفصل الثالث: نمذجة استهلاك وإنتاج الغازات في خلايا SOFC الأنبوبية



الشكل (III-2): يبين مقاطع مختلفة للتصميم الأنبوبي لخلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC، حيث

A- مظهر كلي للاسطوانة. B- مقطع علوي. C- مقطع طولي. D- مقطع عرضي.

1- غلاف الخلية. 2- قناة نقل الوقود. 3- المصعد. 4- الإلكتروليت. 5- المهبط. 6- قناة ناقلة للهواء.

الفصل الثالث: نمذجة استهلاك وإنتاج الغازات في خلايا SOFC الأنبوبية

III-5 النمذجة الرياضي:

تقدم النماذج الرياضية أداة هامة لا غنى عنها للموافقة على تصميم و أداء خلايا الوقود. النهج الرئيسي يشمل النموذج الميكاني، الذي يهدف إلى محاكاة نقل الحرارة ونقل الكتلة والظواهر الكهروكيميائية المنتجة في البطارية. تركز بعض هذه النماذج على نمذجة العناصر المحددة لسلوك البطارية، مثل المصعد، المهبط و الإلكتروليت، بينما يهدف البعض الآخر إلى تقديم محاكاة كاملة لخلية الوقود. كل هذه النماذج تخطط لشرح العمليات الأساسية التي تحدث في نظام خلايا الوقود، و بالتالي تعمل كأداة لتصميم و تحسين المكونات المختلفة للخلايا [13].

III-5-1 تبسيط فرضيات المشكلة:

بالنظر إلى درجة حرارة التشغيل المرتفعة، مع الأخذ بعين الاعتبار طبيعة الغازات المتفاعلة التي وضعناها في الفرضيات التالية:
- التدفق دائم، بمعنى:

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

- الغازات و منتجات التفاعل يجب اعتبارها غازات مثالية لذلك:

$$\frac{P}{\rho} = r * T \quad (2)$$

- التدفق في الوسط المسامي (الأقطاب الكهربائية) هو صفائحي أي طبقية في بعدين.
- الخلية معزولة عن الإشعاعات (لا تبادل لإشعاع من الخارج و لا في الداخل بين الغازات و المكونات).
- الوسط المسامي المتجانس المناحي.

III-5-2 المعادلات المتحكممة في الظاهرة:

المعادلة التفاضلية العامة و التي يمكن استنتاج منها معادلات الانتشار، الانخفاض، الاستمرارية... الخ. يمكن كتابتها كالتالي:

الفصل الثالث: نمذجة استهلاك وإنتاج الغازات في خلايا SOFC الأنبوبية

$$\frac{\partial(\rho_j \varepsilon_j \phi_j)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_j \varepsilon_j \vec{u}_j \phi_j) = \varepsilon_j \sum_k \alpha_{jk} (\phi_k - \phi_j) + \nabla \cdot (\varepsilon_j T \nabla \phi_j) + \varepsilon_j s_j''' \quad (3)$$

إذن معادلة الحفظ الأنواع: بصفة عامة تكتب كالتالي:

$$\frac{\partial(\rho_j \bar{u}_j)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_j \bar{u}_j \vec{u}_j) = -\vec{\nabla} P_j - F_j \varepsilon_j \bar{u}_j + \nabla \cdot (\mu_j \nabla \bar{u}_j) \quad (4)$$

حيث من اجل خلية الوقود هذه يكون:

عند المصعد معادلة الانحفاظ الخاصة بكتلة الهيدروجين في مصعد الخلية، تأخذ بعين الاعتبار التدفق، الانتشار و الحمل.

لدينا استهلاك الهيدروجين على جانب المصعد، و التعبير عن مصطلح المصدر و معامل الانتشار تأخذ الأشكال التالية على

التوالي المسامية و التموج، الكتلة المولية للهيدروجين، كثافة التيار، ثابت فراداي، معامل الانتشار الفعال، حد مصدر الهيدروجين المعين

من قبل إشارة ناقص لأنه معدل استهلاك، من ناحية أخرى، فإن مصدر بخار الماء يكون بإشارة موجبة لأنه معدل إنتاج.

يتم نقل كتلة بخار الماء عن طريق الانتشار و الحمل الحراري في المصعد، تعطى معادلة انحفاظ كتلة الماء من خلال:

بخار الماء الناتج عن التفاعل الكهروكيميائي لإنتاج الماء في المصعد.

أما في المهبط يتم نقل كتلة أنواع الأكسجين عن طريق الانتشار و الحمل الحراري.

أما معادلة الاستمرارية فتكتب:

$$\frac{\partial p_j}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_j \vec{u}_j) = m_j'' \quad (5)$$

حيث يمكن كتابة المؤثر ∇ في الإحداثيات الإسطوانية كالتالي:

من أجل متغير شعاعي الأشعة فان:

$$\vec{\nabla} A = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial A_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \quad (6)$$

من أجل المتغير السلمي فان:

$$\vec{\nabla} \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \vec{e}_\theta + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{e}_z \quad (7)$$

الفصل الثالث: نمذجة استهلاك وإنتاج الغازات في خلايا SOFC الأنوبوية

من خلال هذه العلاقات تسهل كتابة المعادلات أعلاه في الإحداثيات الاسطوانية.

III-6 النموذج العددي:

نظرا لصعوبة الحل التحليلي للمعادلات التفاضلية نلجأ الى جملة المعادلات المتحكممة في الظاهرة بالطرق العددية، التي يمكن أن تعطي الصيغ الرياضية للمقادير الفيزيائية التي نحن بصدد حسابها و المتمثل في كمية الغازات عند كل نقطة من الفضاء، كطريقة العناصر المنتهية، الفروق المنتهية، طريقة الحجم المنتهية و هي الطريقة المستعملة في بحثنا هذا.

تمر طريقة الحجم المنتهية بمرحلتين أساسيتين [44]:

• تجزئة مجال المحاكاة:

في هذه المرحلة يتم تقسيم مجال المحاكاة إلى عدد كبير ومنته من الحجم العنصرية. في هذه الدراسة تكون الحجم العنصرية متساوية، أي أن التقسيم منتظم.

• مكاملة المعادلات:

يتم فيها مكاملة المعادلات في كل حجم من هذه الحجم العنصرية.

III-6-1 تجزئة مجال المحاكاة:

نذكر أن مجال الدراسة في هذه الحالة عبارة عن شكل اسطواني، و باعتباره متناظرا اسطوانيا فإن التقسيم يكون في البعدين

(r, z)، حيث يعطي عددا منتهيا من عناصر السطح كما هو موضح في الشكل (III-3).

✓ تشير i للتقسيم وفق المحور r الذي يجرى إلى i_{max} نقطة، حيث تعرف بخطوة الانتقال من نقطة لأخرى.

$$\partial r = \frac{R}{i_{max} - 1} \quad (8)$$

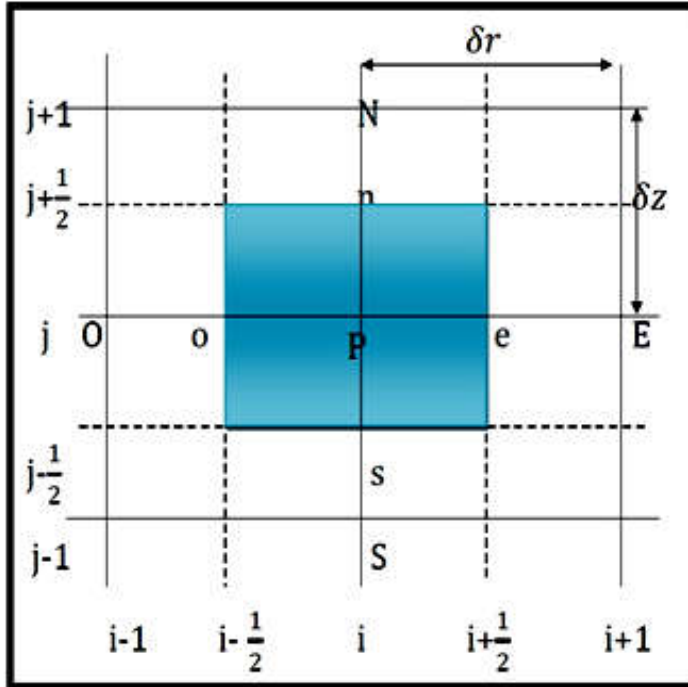
$$r(i) = (i - 1) \partial r \quad (9)$$

✓ تشير j للتقسيم وفق المحور z الذي يجرى إلى j_{max} نقطة، و تعرف بخطوة الانتقال من نقطة لأخرى.

الفصل الثالث: نمذجة استهلاك وإنتاج الغازات في خلايا SOFC الأنبوبية

$$\partial z = \frac{H}{j_{max} - 1} \quad (10)$$

$$z(j) = (j - 1)\partial z \quad (11)$$



الشكل (3-III): رسم تخطيطي لتجزئة مجال المحاكاة [44]

الفصل الثالث: نمذجة استهلاك وإنتاج الغازات في خلايا SOFC الأنبوبية

III-6-2 مكاملة المعادلات في المجالات العنصرية:

نعرف عنصر الحجم في الإحداثيات الاسطوانية كما يلي:

$$dV = drdzd\theta \quad (12)$$

و قبل البداية في تطبيق طريقة الحجم المنتهية سنتطرق لتعريف المشتقات و الدوال الأصلية بواسطة هذه الطريقة و التي تعطى

كما يلي :

$$\int_p \frac{a}{ar} \left(r \frac{af}{ar} \right) dr = \left[r \frac{af}{ar} \right]_0^e$$

$$\int_p \frac{a}{az} \left(f \frac{ag}{az} \right) dz = \left[f \frac{ag}{az} \right]_s^n = \left[f \left| n \frac{ag}{az} \right|_n - f \left| s \frac{ag}{az} \right|_s \right] \int_p \left(\frac{af}{az} \right) dz = [f]_s^n$$

$$\int_p \left(\frac{a^2 f}{az^2} \right) dz = \left[\frac{af}{az} \right]_s^n$$

$$\int_p f \frac{ag}{az} dz = f_p \left(\frac{gN - gs}{2\delta z} \right)$$

$$\left[r \frac{af}{ar} \right]_0^e = \left[r \frac{af}{ar} \right]_e - \left[r \frac{af}{ar} \right]_0$$

$$\frac{af}{ar} \Big|_e = \frac{f|_E - f|_p}{\delta r}$$

$$f|_e = \frac{f|_p + f|_s}{2}$$

$$\frac{af}{az} \Big|_n = \frac{f|_N + f|_P}{\delta Z}$$

$$\frac{af}{az} \Big|_s = \frac{f|_P + f|_S}{\delta Z}$$

الفصل الثالث: نمذجة استهلاك وإنتاج الغازات في خلايا SOFC الأنبوبية

$$f|_n = \frac{f|_N + f|_P}{2}$$

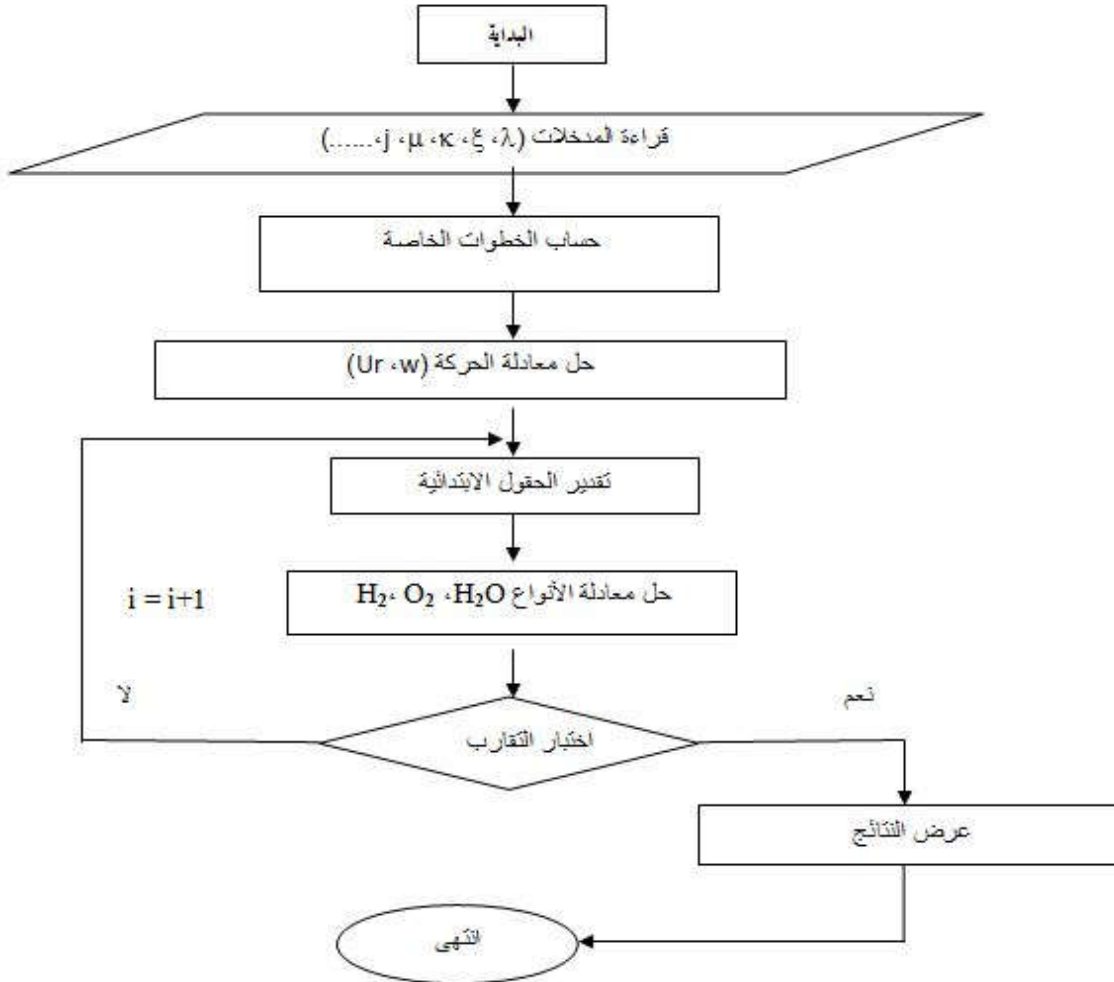
حيث النقاط P, e, o, n, s, E, O, N ممثلة في الشكل (3-III)

بعد تجزئة مجال المحاكاة و اختيار الحجم العنصري مباشر في معاملة معادلات السابقة.

7-III برنامج الحساب:

حتى نسهل الحسابات علينا اخترنا استعمال بيئة التطوير ماتلاب للبرمجة، و المخطط الانسيابي أدناه يقدم رؤية خاصة

بالبرنامج.



الشكل (4-III) يمثل أهم جزء من برنامج الحساب المستخدم في هذه الدراسة.

الفصل الرابع:

تحليل و مناقشة نتائج النمذجة

1-IV المقدمة:

بعد التطرق لمراحل نمذجة استهلاك و إنتاج الغازات في خلايا وقود الأكسيد الصلب ، فيما سبق نتطرق في الفصل الأخير من عملنا هذا للاطلاع على النتائج و تفسيرها. هذه النتائج بالإمكان الحصول عليها في أبعاد مختلفة، اكتفينا هنا بحالة أحادية البعد وثنائية البعد. حيث في البعد الواحد نود أن تبين هذه النتائج مدى تأثير تغيير بعض المعاملات على ظاهرة نقل الكتلة في قلب الخلية، من بين هذه المعاملات تدفق الغازات المتمثلة في الوقود و الهواء، و كذلك خواص المكونات الخلية الأساسية المتمثلة في العنصر المدعم، مسامية الأقطاب و نفايتها. أما في حالة البعدين اكتفينا بعرض النتائج الخاصة بالمستوي العمودي على اتجاه تدفق الغازات، و من جهة أخرى اكتفينا في هذه الحالة بتغيير عنصر الدعم و تدفق الغازات نحو الخلية.

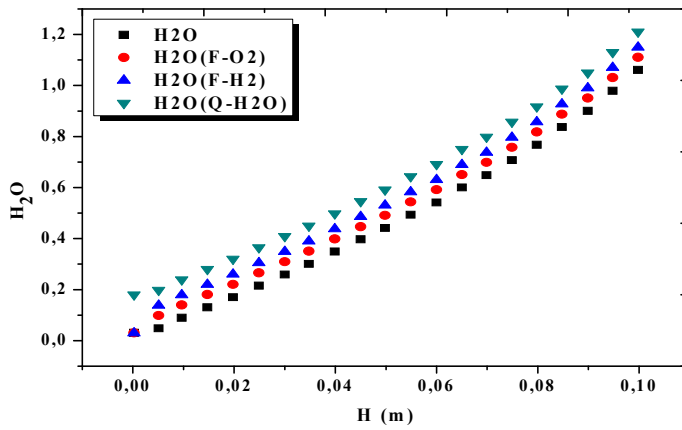
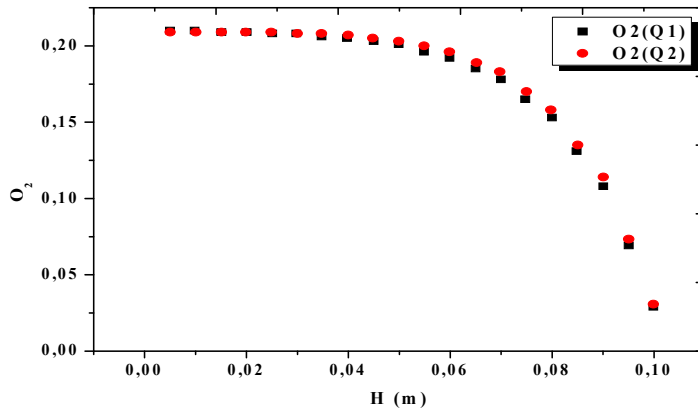
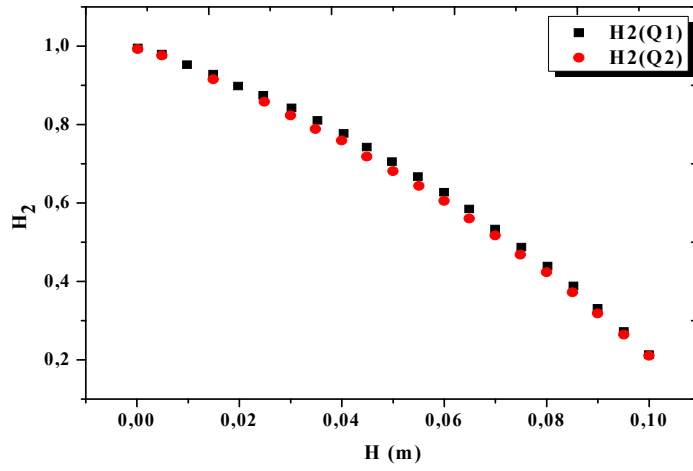
2-IV دراسة النمذجة أحادية البعد:

1-2-IV تأثير التدفق و نسبة بخار الماء في مسام المصعد:

يمثل الشكل (1-IV) تغير كمية كل من غاز الهيدروجين، الأكسجين و بخار الماء على طول قنوات الوقود، الهواء و المصعد على التوالي عند تغير تدفق الوقود و الأكسدة. و التي من خلالها نلاحظ أن:

- كلما ارتفع تدفق الوقود، يكون معدل استهلاك H_2 و إنتاج الماء كبيراً.
- بالنسبة للهواء، كلما زاد تدفق الأكسدة، كان معدل استهلاك O_2 كبيراً مع إنتاج الماء بمقدار أقل من زيادة تدفق الوقود.
- بالنسبة لبخار الماء، كلما زاد كميته في مسام المصعد زاد إنتاج الماء فقط.

الفصل الرابع: تحليل و مناقشة نتائج النمذجة



الشكل (1-IV): تغير كمية كل من غاز الهيدروجين، الأوكسجين وبخار الماء على طول قنوات الوقود، الهواء و المصعد على التوالي عند تغير تدفق الوقود و المؤكسد و زيادة نسبة بخار الماء في مسام المصعد.

الفصل الرابع: تحليل و مناقشة نتائج النمذجة

2-2-IV تأثير المسامية:

يمثل الشكل (2-IV) تغير كمية كل من غاز الهيدروجين، الأكسجين و بخار الماء على طول قنوات الوقود، الهواء و المصعد

على التوالي عند تغير مسامية المصعد و المهبط. و التي من خلالها نلاحظ أن:

- من أجل مصعد أكثر مسامية، يكون معدل استهلاك H_2 و إنتاج الماء كبيراً.

- من أجل مهبط أكثر مسامية، يكون معدل استهلاك O_2 و إنتاج الماء كبيراً.

3-2-IV تأثير النفاذية:

يمثل الشكل (3-IV) تغير كمية كل من غاز الهيدروجين، الأكسجين و بخار الماء على طول قنوات الوقود، الهواء و المصعد

على التوالي عند تغير النفاذية. و التي من خلالها نلاحظ أن:

- من أجل مصعد أكثر نفاذية، يكون معدل استهلاك H_2 كبيراً و إنتاج الماء كبيراً.

- من أجل مهبط أكثر نفاذية، يبقى معدل استهلاك O_2 ثابت دون تغير و كذلك إنتاج الماء.

4-2-IV تأثير العنصر المدعوم:

يمثل الشكل (4-IV) تغير كمية كل من غاز الهيدروجين، الأكسجين و بخار الماء على طول قنوات الوقود، الهواء و المصعد

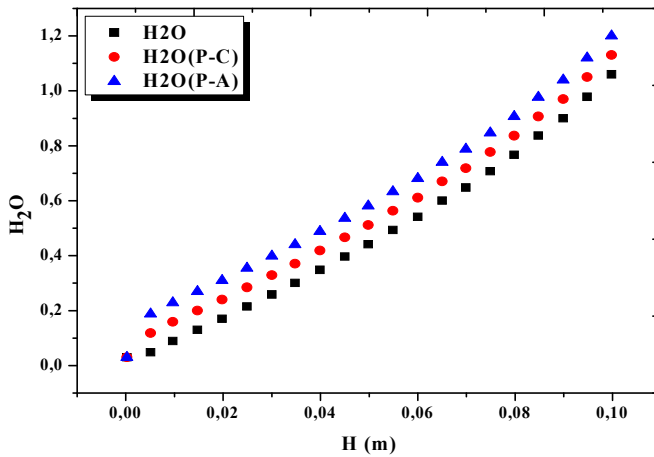
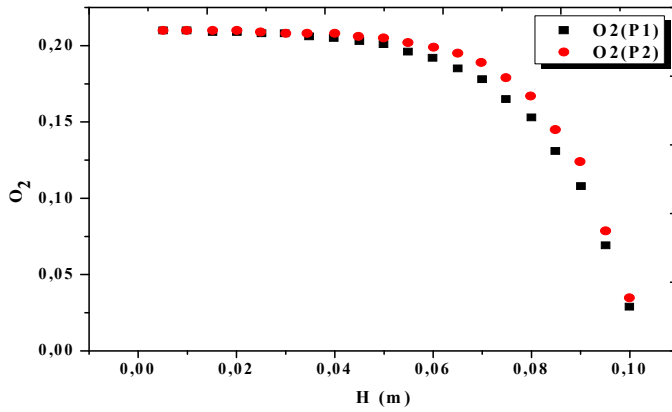
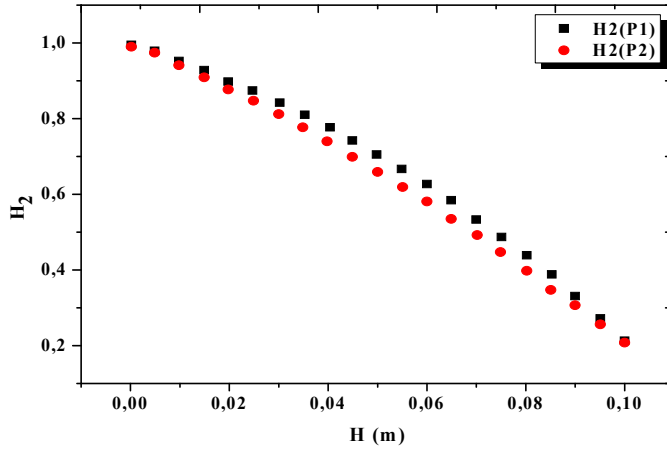
على التوالي عند تغير العنصر المدعوم. و التي من خلالها نلاحظ أن:

- من أجل مصعد مدعوم، يكون معدل استهلاك H_2 و إنتاج الماء كبيراً..

- من أجل مهبط مدعوم، يكون معدل استهلاك O_2 كبيراً مع إنتاج الماء أقل من أجل مصعد مدعوم

- من أجل إلكتروليت مدعوم، لا يظهر تأثير لزيادة إنتاج الماء.

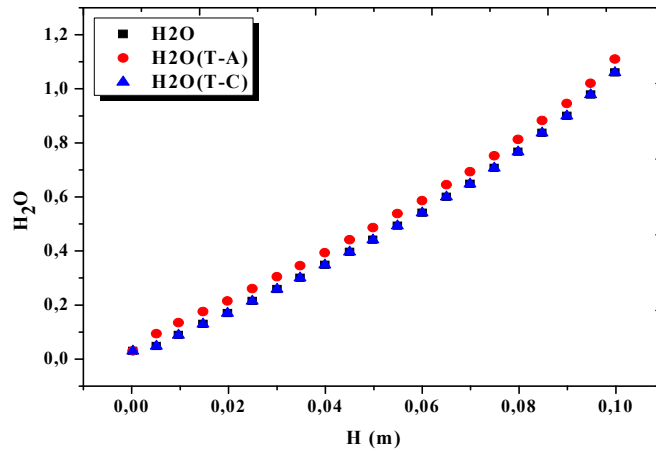
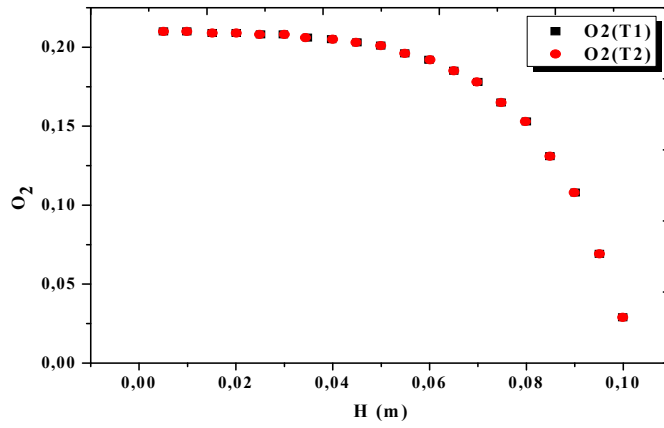
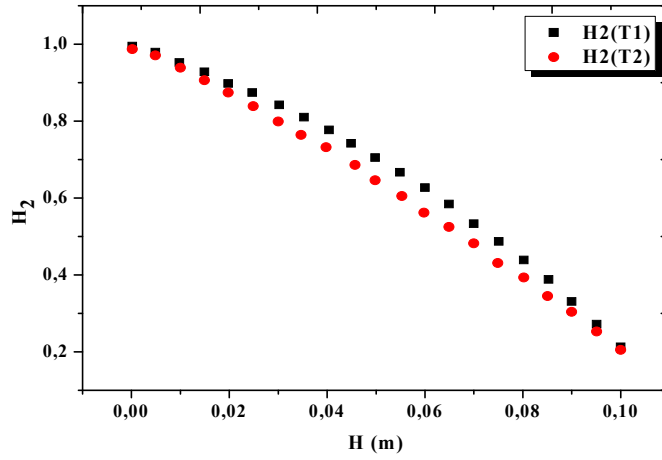
الفصل الرابع: تحليل و مناقشة نتائج النمذجة



الشكل (2-IV): تغير كمية كل من غاز الهيدروجين، الأكسجين و بخار الماء على طول قنوات الوقود، الهواء و المصعد

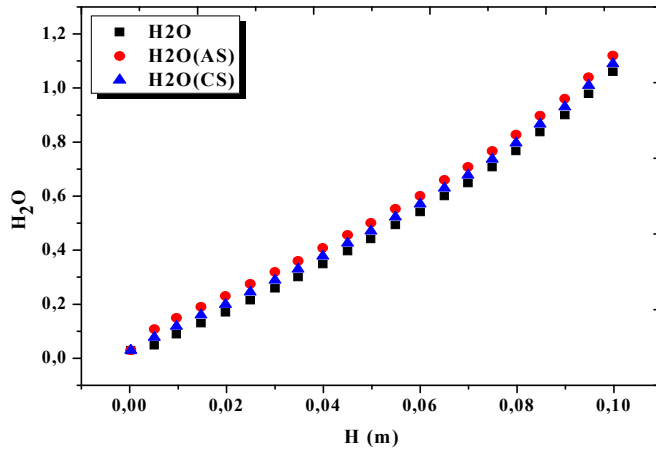
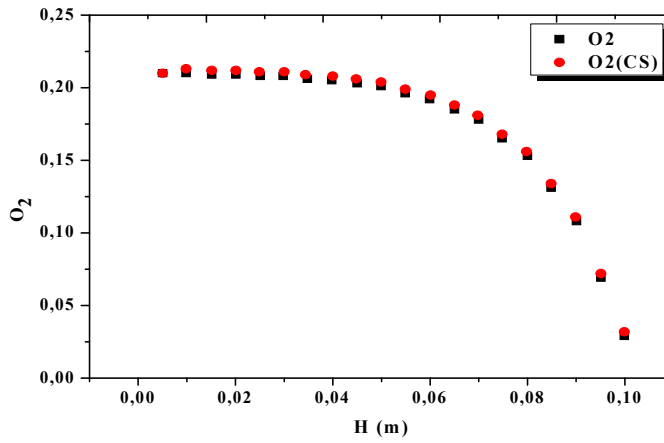
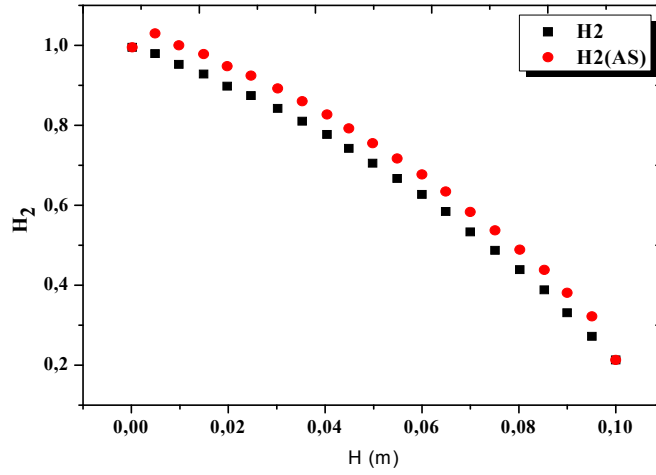
على التوالي عند تغير المسامية.

الفصل الرابع: تحليل و مناقشة نتائج النمذجة



الشكل (3-IV): تغير كمية كل من غاز الهيدروجين، الأوكسجين وبخار الماء على طول قنوات الوقود، الهواء و المصعد على التوالي عند تغير النفاذية.

الفصل الرابع: تحليل و مناقشة نتائج النمذجة



الشكل (4-IV): تغير كمية كل من غاز الهيدروجين، الأكسجين وبخار الماء على طول قنوات الوقود، الهواء و المصعد على التوالي عند تغير العنصر المدعوم.

الفصل الرابع: تحليل و مناقشة نتائج النمذجة

3-IV النمذجة ثنائية الأبعاد:

هذه النمذجة تزيد توضيح شكل انتقال المادة فقط، حيث نتائجها لا تختلف عن تلك الخاصة بالبعد الأحادي. و هي النمذجة الخاصة بالمستوي العمودي على تدفق الوقود و الأكسدة.

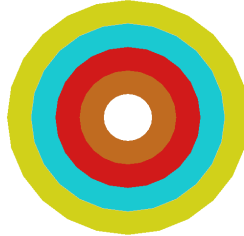
النتائج التي تم الحصول عليها أدناه و الممثلة في الأشكال (5-IV) إلى (12-IV) تظهر الاختلافات في النسب الكتلية للأشكال في قنواتها، عموماً:

من الواضح أن كميات الهيدروجين و مقدار الأوكسجين تتلاشى في قنواتها كلما زاد العمق، في حين أن كميات بخار الماء تزداد. و لكن الاختلاف يتعلق حتماً بتغير المعاملات و التي تم التطرق لأغلبها في النمذجة السابقة أي أحادية البعد، حيث لم نتطرق هنا لتغير كل من المسامية و نفاذية الأقطاب.

كما نلاحظ أن انخفاض نسبة الأوكسجين و الهيدروجين عند حواف الأقطاب يكون كبير بسبب توغل جزئياتها نحو هذه الأقطاب، و يزداد ذلك كلما اتجهنا الى الأعماق داخل الخلية.

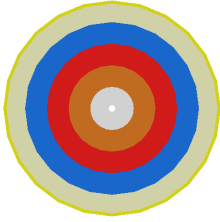
و تقدم النتائج كالتالي حيث الشكل (5-IV) يمثل المقطع الابتدائي و الذي يكون عند بداية الخلية أي عندما $H = 0 \text{ cm}$.

أما الأشكال من (6-IV) إلى (9-IV) فهي تمثل المقاطع الداخلية من $H = 2.5 \text{ cm}$ إلى $H = 10 \text{ cm}$ في كل شكل، يمثل الشكل الأول الخلية المثالية والأشكال الثلاث الموالية تمثل تغير كل من تدفق الوقود والمؤكسد وأخيراً نسبة بخار الماء في مسام المصعد.

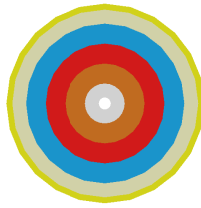


الشكل (5-IV): يمثل المقطع الابتدائي و الذي يكون عند بداية الخلية أي عندما $H = 0 \text{ cm}$.

الفصل الرابع: تحليل و مناقشة نتائج النمذجة



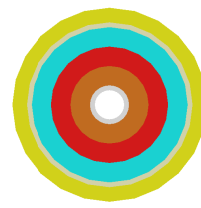
H = 10 cm



H = 7.5 cm



H = 5 cm



H = 2.5 cm

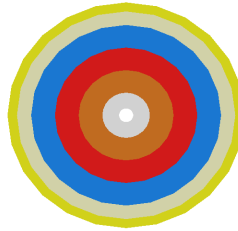
الشكل (6-IV): يمثل المقاطع الداخلية الخاصة بالخلية المثالية.



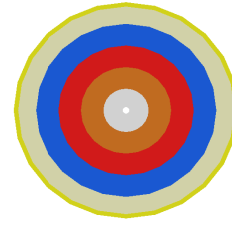
H = 2.5 cm



H = 5 cm



H = 7.5 cm



H = 10 cm

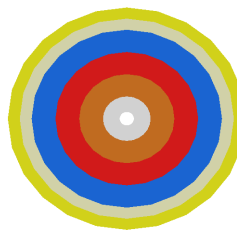
الشكل (7-IV): يمثل المقاطع الداخلية الخاصة بالخلية عند زيادة تدفق الوقود.



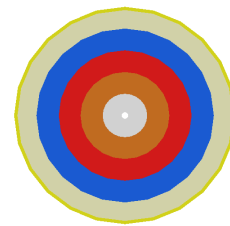
H = 2.5 cm



H = 5 cm



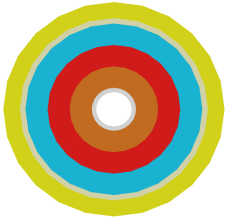
H = 7.5 cm



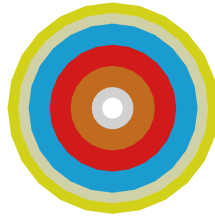
H = 10 cm

الشكل (8-IV): يمثل المقاطع الداخلية الخاصة بالخلية عند زيادة تدفق المؤكسد.

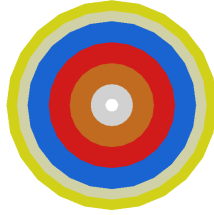
الفصل الرابع: تحليل و مناقشة نتائج النمذجة



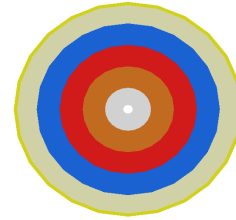
H = 2.5 cm



H = 5 cm



H = 7.5 cm



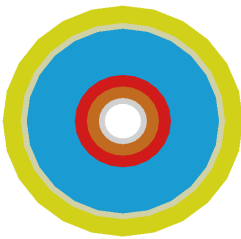
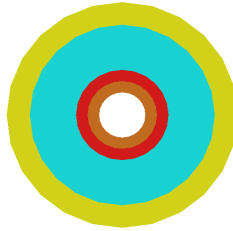
H = 10 cm

الشكل (9-IV): يمثل المقاطع الداخلية الخاصة بالخلية عند زيادة بخار الماء في مسام المصعد.

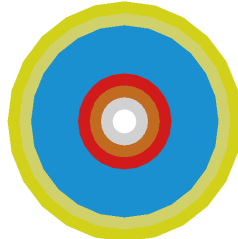
أما الأشكال أدناه فتقدم تغيرات الغازات المستهلكة و المنتجة في مقاطع الخلية في نفس المستوي السابق، وهذا عند تغير

العنصر المدعوم.

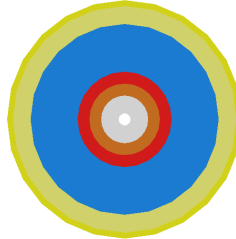
H = 0 cm



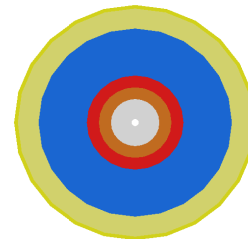
H = 2.5 cm



H = 5 cm

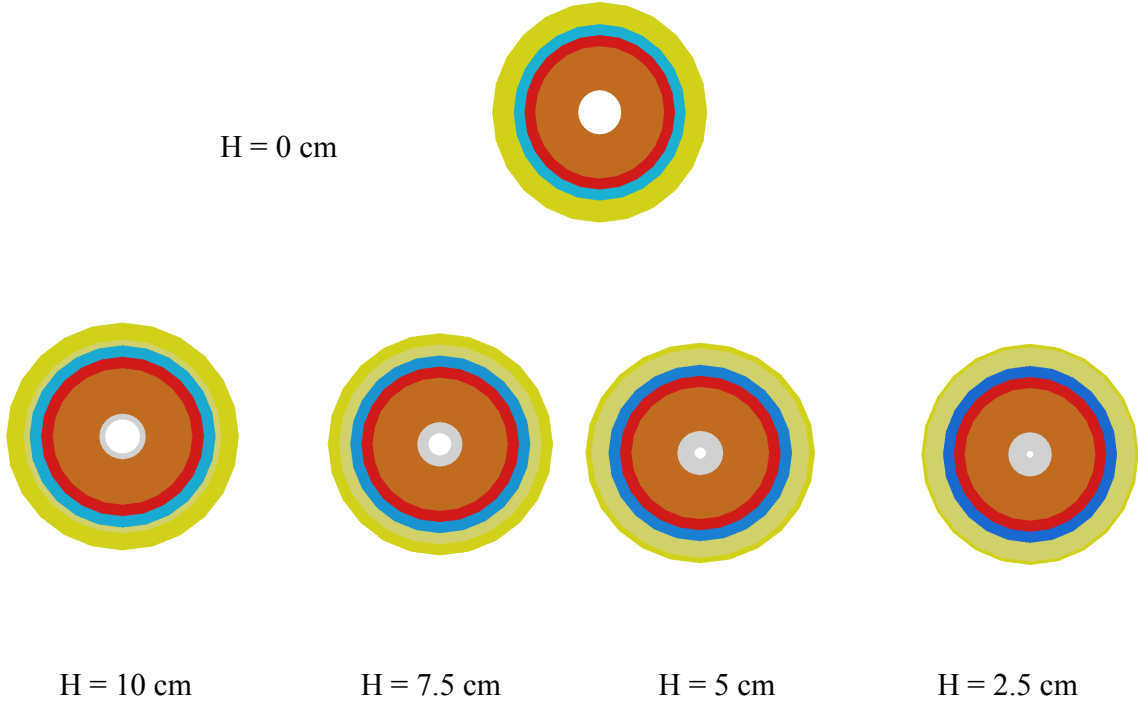


H = 7.5 cm

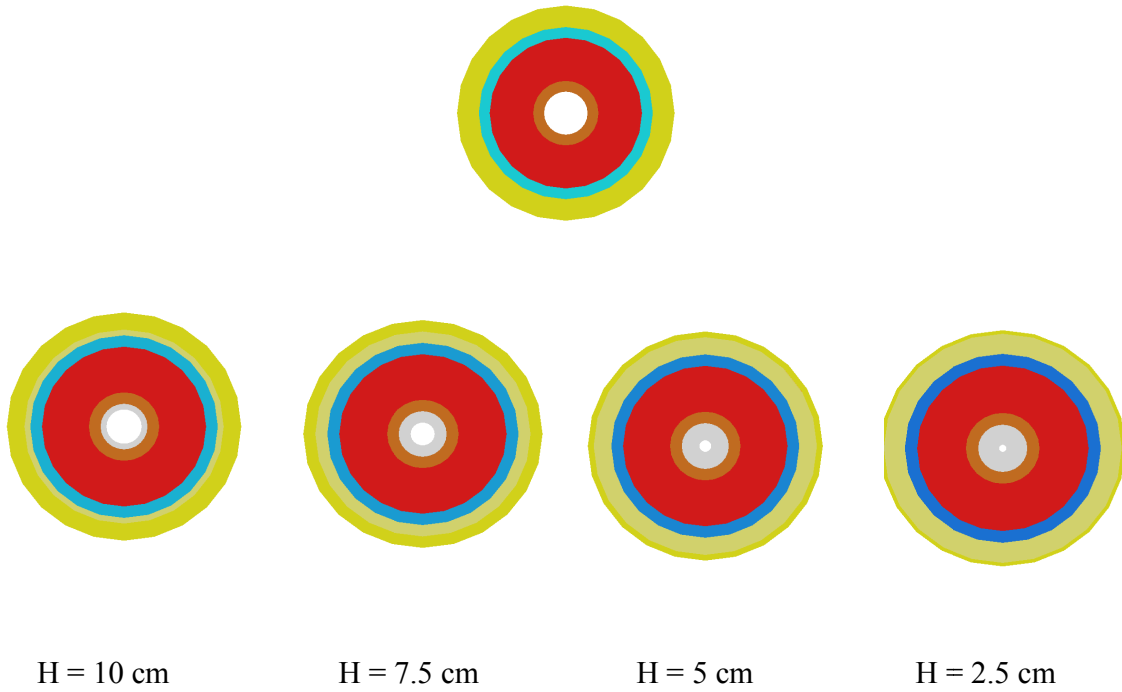


H = 10 cm

الشكل (10-IV): يمثل المقاطع الداخلية الخاصة بالخلية ذات المصعد المدعوم.



الشكل (11-IV): يمثل المقاطع الداخلية الخاصة بالخلية ذات المهبط المدعوم.



الشكل (12-IV): يمثل المقاطع الداخلية الخاصة بالخلية ذات الإلكتروليت المدعوم.

الفصل الرابع: تحليل و مناقشة نتائج النمذجة

الملاحظات:

الألوان المستخدمة هنا نحاول من خلالها وصف ما يحدث، لذا قمنا باختيارها بتقريب نوعا ما مناسب حيث:

- اللون الأخضر يمثل قناة تمرير الوقود.

- اللون الأزرق الفاتح يمثل المصعد لوجود بخار الماء في مسامه.

- اللون الأحمر يمثل الإلكتروليت.

- اللون البني يمثل المهبط.

- اللون الأبيض يمثل قناة تمرير الهواء.

الخلاصة العامة:

خلايا الوقود باعتبارها واحدة من أنظف أنظمة توليد الطاقة و المستخدمة تطبيقات متعددة، و التي هي عبارة عن جهاز كهروكيميائي يقوم بتحويل الطاقة الكيميائية مباشرة إلى الطاقة الكهربائية مع إطلاق الحرارة و الماء. لذلك اهتم عملنا بمحاكاة استهلاك و إنتاج الغازات المختلفة في نوع منها و هو خلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC أنبوية التصميم، مع فرض العديد من الفرضيات المبسطة و تغيير عدد من المتغيرات تخص خصائص المكونات الأساسية للخلية أو تدفقات الوقود و الهواء نحوها. لذلك تم تصميم المعادلات التفاضلية المتحكممة في الظاهرة، حيث تم اختيار طريقة الحجوم المنتهية لحلها مع استخدام بيئة التطوير ماتلاب للبرمجة. سمحت لنا نتائج هذه الدراسة باكتساب معرفة جيدة عن ظاهرة نقل الكتلة التي تحدث في قلب الخلية، هذه النتائج تم تقديمها في حالتين: أحادية البعد و ذات بعدين و التي ملخصها كالتالي:

من اجل الحالة أحادية البعد فإن:

- زيادة تدفق الوقود أو زيادة مسامية المصعد أو من أجله كعنصر مدعم تؤدي كلها إلى زيادة في استهلاك الهيدروجين، مع إنتاج أكثر للماء من زيادة تدفق الهواء أو زيادة مسامية المهبط أو من أجله كعنصر مدعم التي تؤدي كذلك لزيادة استهلاك الأكسجين.

- الزيادة في النفاذية يؤدي هي أيضا إلى نفس الناتج إذا كانت في المصعد سواء بالنسبة لاستهلاك الهيدروجين أو إنتاج الماء، بينما إذا كانت في المهبط فإنها لا تؤثر تماما على استهلاك الأكسجين و بالتالي إنتاج الماء.

من اجل الحالة ثنائية البعد في الاتجاه العمودي على اتجاه تدفق الوقود و الهواء، التي من المؤكد تقدمها لنفس الناتج، إلا أنها توضح أكثر انتقال الكتلة عند حواف الأقطاب.

أي التصميم الأنبوبي لهذه الخلايا مع أقطاب مدعمة و مسامية نفاذية الجيدتين بالأخص إن توفرا على مستوى المصعد يوفر مساحة و إمكانية التفاعل بين الهيدروجين و الأكسجين.

وفقا للنتائج التي تم الحصول عليها نقترح:

- تدعيم هذه الدراسة بمقارنة نتائجها بدراسات أخرى بالخص المشابهة إن وجدت.
- تدعيم هذه الدراسة العددية على المستوي موازي لاتجاه التدفق.
- الاطلاع أكثر على نقل الكتلة إذا تأثرت بدرجة الحرارة، بالأخص أنما عالية في هذه الخلايا كما هو معروف.
- دراسة تأثير هذا الانتقال على كل من كثافة التيار، جهد الخلية و مردوديتها بالأخص إن عمم على بطارية كاملة.
- دراسة الظواهر التي تأخذ في الاعتبار نقل الإشعاع.

المراجع:

- [1] Basu S. Fuel cell science and technology: Springer; 2007.
- [2] Lamy C, Léger J-M. Les piles à combustible: application au véhicule électrique. Le Journal de Physique IV. 1994;4:C1-253-C1-81.
- [3] Lanz A, Heffel J, Messer C. Hydrogen fuel cell engines and related technologies: College of the Desert, Energy Technology Training Center; 2001.
- [4] Zenith F. Control of fuel cells. 2007.
- [5] Belatel M, Aissous F, Ferhat F. Contribution à l'étude d'une pile à combustible de type PEMFC utilisée pour la production d'énergie électrique verte. Revue des Energies Renouvelables. 2012;15:13-28.
- [6] دراسة خواص خلايا الوقود من نوع PEM و ديناميكية تشغيلها المنتهية. موسوي, حسين سم.
- [7] Touahir A. Simulation Numérique de Transfert de Chaleur dans une Pile SOFC sous L'effet des Différents Paramètres de Fonctionnement et des Caractéristiques Physiques, 2008.
- [8] INEZARENE S. Modélisation d'Une Cellule de Piles à Combustible à Oxyde Solide «Simulation Numérique du Transfert Thermique: Université de Batna 2; 2014.
- [9] Seneviratne K. A Novel solid oxide fuel cell anode substrate: performance and lifetime studies: Universitetet i Agder/University of Agder; 2013.
- [10] Minh NQ. Solid oxide fuel cell technology—features and applications. Solid State Ionics. 2004;174:271-7.
- [11] An K. Mechanical properties and electrochemical durability of solid oxide fuel cells: Virginia Tech; 2003.
- [12] Pasaogullari U, Wang C-Y. Computational fluid dynamics modeling of solid oxide fuel cells. Proceedings of the SOFC-VIII. 2003;7:1403-12.
- [13] Singhal SC, Kendall K. High-temperature solid oxide fuel cells: fundamentals, design and applications: Elsevier; 2003.
- [14] Campanari S, Iora P. Definition and sensitivity analysis of a finite volume SOFC model for a tubular cell geometry. Journal of Power Sources. 2004;132:113-26.
- [15] Jörger MB. CuO-CGO anodes for solid oxide fuel cells: ETH Zurich; 2004.

- [16] Stiller C. Design, operation and control modelling of SOFC/GT hybrid systems: Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi; 2006.
- [17] Asano K. Mass transfer: from fundamentals to modern industrial applications: John Wiley & Sons; 2007.
- [18] Hussain M, Li X, Dincer I. Mathematical modeling of transport phenomena in porous SOFC anodes. *International Journal of Thermal Sciences*. 2007;46:48-56.
- [19] Janardhanan VM, Deutschmann O. Numerical study of mass and heat transport in solid-oxide fuel cells running on humidified methane. *Chemical Engineering Science*. 2007;62:5473-86.
- [20] Calise F, d'Accadia MD, Palombo A, Vanoli L. A detailed one dimensional finite-volume simulation model of a tubular SOFC and a pre-reformer. *International Journal of Thermodynamics*. 2007;10:87-96.
- [21] Bove R, Ubertini S. Modeling solid oxide fuel cells: methods, procedures and techniques: Springer Science & Business Media; 2008.
- [22] Ho TX, Kosinski P, Hoffmann AC, Vik A. Numerical modeling of solid oxide fuel cells. *Chemical Engineering Science*. 2008;63:5356-65.
- [23] Laurencin J. Fonctionnement sous méthane d'une pile à combustible" SOFC"(Solid Oxide Fuel Cell): optimisation des performances et de la durabilité: Grenoble INPG; 2008.
- [24] Andersson M, Yuan J, Sundén B. SOFC modeling considering internal reforming by a global kinetics approach. *ECS Transactions*. 2009;25:1201-10.
- [25] Peters C. Grain-size effects in nanoscaled electrolyte and cathode thin films for solid oxide fuel cells (SOFC): KIT Scientific Publishing; 2009.
- [26] Wereszczak A, Lara-Curzio E, Bansal NP. Advances in solid oxide fuel cells II: John Wiley & Sons; 2009.
- [27] Miklis TS. Solid oxide fuel cell system control: modeling and control study of a catalytic partial oxidation (CPOX) reactor 2010.
- [28] Sahèi M. Etude de la production d'hydrogène par électrolyse et pile à combustible. 2010.
- [29] Chao C-C, Hsu C-M, Cui Y, Prinz FB. Improved solid oxide fuel cell performance with nanostructured electrolytes. *ACS nano*. 2011;5:5692-6.

- [30] Hajimolana SA, Hussain MA, Daud WAW, Soroush M, Shamiri A. Mathematical modeling of solid oxide fuel cells: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011;15:1893-917.
- [31] Jaroslaw M, Konrad S, Massimo S, Pierluigi L. *Advanced methods of solid oxide fuel cell modeling*. D Springer-Verlag London Limited. 2011.
- [32] Ni M. The effect of electrolyte type on performance of solid oxide fuel cells running on hydrocarbon fuels. *international journal of hydrogen energy*. 2013;38:2846-58.
- [33] Buvat G. Réalisation et performances d'une cellule de pile à combustible SOFC avec l'électrolyte BaIn_{0.3}Ti_{0.7}O_{2.85} et la forme réduite amorphe de La₂Mo₂O₉ comme matériau d'anode: Nantes; 2014.
- [34] Fu Y. *Theoretical and experimental study of solid oxide fuel cell (SOFC) using impedance spectra*: Massachusetts Institute of Technology; 2014.
- [35] Mahcene H, Meddour N, Bechki D, Bouguettaia H, Moussa HB. Radiation phenomenon in electrodes/electrolyte interface of solid oxide fuel cells. *Energy Procedia*. 2014;50:229-36.
- [36] Gao F, Simoes MG, Blunier B, Miraoui A. Development of a quasi 2-D modeling of tubular solid-oxide fuel cell for real-time control. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2014;29:9-19.
- [37] Costamagna P, Grosso S, Travis R, Magistri L. Integrated Planar Solid Oxide Fuel Cell: Steady-State Model of a Bundle and Validation through Single Tube Experimental Data. *Energies*. 2015;8:13231-54.
- [38] Etemadi A, Ghorbani S, Masoumpour M, Dadkhah M, Atashkari K. The Numerical analysis of an anode-supported high temperature DIR-PSOFC operating conditions with considering the maximum allowable temperature difference. *Journal of Heat and Mass Transfer Research (JHMTR)*. 2015;2:15-25.
- [39] Fergus J, Hui R, Li X, Wilkinson DP, Zhang J. *Solid oxide fuel cells: materials properties and performance*: CRC press; 2016.
- [40] Novaresio V, Izquierdo S, Asinaria P, Fueyob N, Novaresio V, Izquierdo S, Fueyo AN. Manuscript Title: Numerical Modeling of Mass-Transport in Solid-Oxide Fuel Cells: an Open Source Library.
- [41] Daïan J-F. *Equilibre et transferts en milieux poreux*. 2013.

- [42] Bousri A, Bouhaded K, Etude numérique du transfert de chaleur et de masse dans un cylindre rempli d'un milieu poreux réactif. 2007: Publisher.
- [43] Benkhedda M. Transferts thermiques dans un conduit cylindrique annulaire muni d'ailettes. 2010.
- [44] دراسة في ثلاث أبعاد للمقادير الكهربائية في جهاز الرش المهبطي المغنطروني باستخدام طريقة الحجم. عبيد, سعيدة.

الملخص:

اهتمنا في دراستنا بخلايا وقود الأكسيد الصلب SOFC أنبوبية التصميم، من أجل محاكاة استهلاك وإنتاج الغازات المختلفة. و انطلاقا من العديد من الفرضيات المبسطة صممت المعادلات التفاضلية المتحكممة في الظاهرة، و التي حلها تم اختيار طريقة الهجوم المنتهية مع استخدام بيئة التطوير ماتلاب للبرمجة. و بتغيير عدد من المعاملات تخص خصائص المكونات الأساسية للخلية أو تدفقات الوقود و الهواء نحوها، سمحت لنا نتائج هذه الدراسة باكتساب معرفة جيدة عن ظاهرة نقل الكتلة التي تحدث في قلب الخلية، هذه النتائج تم تقديمها في حالتين: أحادية البعد و ذات بعدين، و هي النتائج المؤكدة أن زيادة مسامية و نفاذية المصعد المدعم تؤدي إلى استهلاك أكثر للوقود مع إنتاج كبير للماء أكثر من أي حالة ممكنة.

الكلمات المفتاحية: خلية الوقود، الهيدروجين، الأكسجين، بخار الماء، الكهرباء.

Résumé:

Dans notre étude, en est intéressé par les piles à combustible SOFC de conception d'oxyde solide tubulaire, afin de simuler la consommation et la production de différents gaz. Et de nombreuses hypothèses visant le contrôle simplifié sur le phénomène des équations différentielles, qui a été choisie pour résoudre les volumes fini avec l'utilisation de l'environnement de programmation de développement Matlab. Et changer le nombre de transactions liées aux composants de base des caractéristiques de cellules ou les flux de carburant et de l'air vers cette cellule, les résultats de cette étude nous a permis pour avoir une bonne connaissance sur le phénomène de transfert de masse qui se produit au cœur de la cellule, ces résultats ont été présentés dans deux cas: une dimension et à deux dimensions, et les résultats ont confirmé que l'augmentation de la porosité et de la perméabilité de l'ascenseur supporté conduire à une consommation de carburant plus grande avec une production de plus de toute condition possible de l'eau .

Les mots clés: pile à combustible, hydrogène, oxygène, vapeur d'eau, électricité.

Abstract:

In our study, we have been interested in SOFC fuel cells of tubular solid oxide design, to simulate the consumption and production of different gases. And starting by many simplified assumptions a differential equations were designed to control over the phenomenon, which to solve the ended volumes method was chosen with the use of Matlab development programming environment .And by changing the number of transactions related to the basic components of cell or fuel and air flows to this cell, the results of this study allowed us to have a good knowledge about the mass transfer phenomenon that occurs at the heart of this cell, these results were presented in two cases: one-dimensional and two-dimensional, and this results confirm that increasing the porosity and permeability of the supported elevator lead to greater fuel consumption with a production of water more than any possible condition. **Key words:** fuel cell, hydrogen, oxygen, water vapor, electricity.