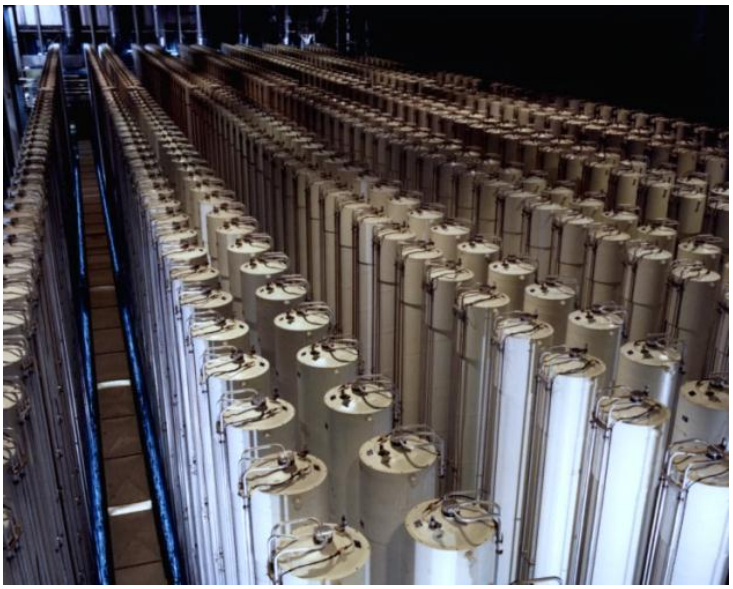
تخصيب اليورانيوم عالميا



۱- دورۀ الوقود النووی

مبدأ الرؤیۀ المستقبلیۀ لتطویر دورۀ الوقود النووی فی البلاد:

«فی اطار الرؤیۀ المستقبلیۀ لایران ما بعد عشرین عاما، باعتبارها بلدا متقدما مکتفیا ذاتیا فی مجال العلوم والتقنیات الخاصۀ بدورۀ الوقود النووی، ومتبوئا مرکزا تنافسیا مناسبا علی الساحۀ الدولیۀ، وقادرا علی تأمین ما تحتاج الیه مفاعلاته من الوقود النووی، لابل قادرا علی تصدیر المنتوجات والخدمات الفنیۀ فی هذا المجال وفق القوانین والقواعد والمقاییس الوطنیۀ والدولیۀ»، نقول:

الرؤیۀ المستقبلیۀ لقطاع تخصیب الیورانیوم فیما یتعلق بدورۀ الوقود النووی:

تشکل دورۀ الوقود النووی فی قطاع تخصیب الیورانیوم، العمود الفقری لهذه العملیۀ برمتها، حیث تمکن التقنیۀ المتطورۀ من انتاج الهکزافلورایدالیورانیوم المخصب اللازم لتأمین مختلف انواع الوقود النووی فی البلاد، بمقیاس صناعی – اقتصادی.

مهمۀ قطاع تخصیب الیورانیوم فی دورۀ الوقود النووی:

یقوم قطاع تخصیب الیورانیوم المستند الی العلم والتقنیات المتطورۀ والمستخدم للامکانیات الوطنیۀ والدولیۀ، بانتاج الهکزافلورایدالیورانیوم اللازم لوقود المفاعلات النوویۀ فی البلاد. وبهذا یکون القطاع المذکور مکلفا بمهمۀ المحافظۀ علی القیم الاساسیۀ الکفیلۀ بتحقیق تنمیۀ القوی البشریۀ، الی جانب تقدم البلاد ومنعتها.

یشکل اکتشاف مناجم الیورانیوم وتقییم کمیاتها وتحدید نفقات الاستخراج، الخطوۀ الاولی فی عملیۀ دورۀ الوقود النووی، لأن کمیۀ الیورانیوم فی الصخور المعدنیۀ لاتتجاوز بضع مئآت من الغرامات فی الطن. وعلیه لایتم استثمار المناجم الا بعد دراسۀ الجدوی الاقتصادیۀ والتأکد من معقولیۀ الاستخراج ومن ثم تکثیف الیورانیوم المستخرج واعداده للاستخدام.

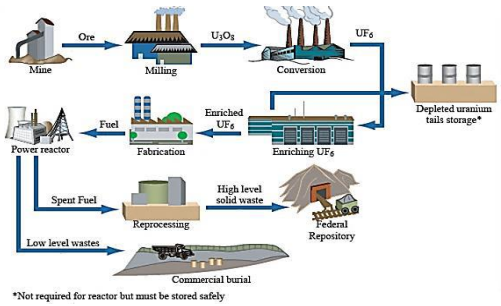
تأتی بعد ذلک مرحلۀ تصنیع الیورانیوم المستخرج، التی تشتمل علی التطهیر، والترسیب، والاستخراج بواسطۀ التبادل الیونی. وبعد العملیات المشار الیها اعلاه، ینتج مرکب صودیوم الدی اورانات او آمونیم الدی اورانات، الذی یسمی «الکعکۀ الصفراء»، التی تتحول فی النهایۀ الی U_{308}. ویتم نقل هذا المنتج الی مصنع التخلیص والاستحالۀ، لاستکمال العملیات الصناعیۀ.

وفی مصنع الاستحالۀ والتبدیل، تتم ازالۀ ما تبقی من شوائب کیمیائیۀ فی الکعکۀ الصفراء ویتم تحضیر الترکیبۀ المطلوبۀ من الیورانیوم لتحویلها الی المرحلۀ التالیۀ من مراحل دورۀ الوقود النووی. بعد ذلک واستنادا الی التخصیب، تتضح المسارات الکیمیائیۀ التی یجب سلوکها، فاذا کان الوقود المقصود بحاجۀ الی تخصیب، لابد من التوجه نحو الهکزافلورایدالیورانیوم، لأنه الطریقۀ الوحیدۀ الملائمۀ صناعیا. ولتطبیق هذه الطریقۀ، لابد من انتاج الهکزافلورایدالیورانیوم من خلال مزج دی اوکسید الیورانیوم بحامض الفلوریدریک، لانتاج تترا فلورایدالیورانیوم، بعد ذلک یعتمد علی غاز الفلوئور فی انتاج الهکزافلورایدالیورانیوم فی ظروف خاصۀ. وبعد طی هذه المراحل، یتم نقل المنتج المخصب – تحت رقابۀ مشددۀ – الی مصنع انتاج الوقود. إن الوحدۀ المستخدمۀ فی التخصیب هنا، تسمی «وحدۀ الفرز». إن کمیۀ المنتج تعتمد علی

حجر المنجم المستخدم فى العملية، ومقدار نقائة (عيار) ومايتبقى من اليورانيوم فى النفاية. ويشار الى الطاقة الانتاجية لكل وحدة انتاج بالكيلوغرام، بحروف «SWU» فى العالم، وبالنسبة للطاقة المستهلكة، يشار اليها بـKWH/kgSWU.

أما فى مصنع الانتاج، يتم اولا، اعداد مركب الهكزافلورايد اليورانيوم بالشكل المطلوب، ثم تجرى عليه كل الاعمال المطلوبه لتحويله الى وقود. وفى المفاعلات العاملة بالماء الخفيف، مثل مفاعل بوشهر، الذى يستخدم فيه دى اوكسيد اليورانيوم لاغراض الوقود، فيجرى اولا، تحويل دى اوكسيد اليورانيوم الى مسحوق، ثم الى اقراص مضغوطة وبعد انتاج الاقراص يتم نقلها، ضمن معدات اخرى، مثل الغطاء الاسفل وقرص الآلومين والسستة والغطاء العلوى، الى داخل قضبان الوقود وبعد تزريق غاز الهليوم واجراء عملية اللحام، توضع القضبان فى مواضعها داخل المفاعل ليتم استخدامها كوقود.

وكما اشير اعلاه، فأن تأمين الوقود النووى يستلزم بالضرورة استخراج اليورانيوم، والقيام بتصنيعه واعداده وتخصيبه وفى النهاية تحويله الى قضبان وقود تستخدم فى المفاعلات النووية.وتسمى هذا العملية بمجملها، النصف الاول من دورة الوقود النووى.أما النصف الثانى،يتعلق بادارة النفايات المشعة الناتجة عن عملية دورة الوقود النووى، التى تتضمن ازالة المنشآت النووية، والتخزين، واجراء المزيد من الاعمال الصناعية على المنتوجات النووية، والاحتفاظ بالوقود المنضب او دفنه ومن المعلوم أن كل مرحلة من مراحل دورة الوقود النووى، لها مخلفاتها ونفاياتها وإن كانت درجة الاشعاع لكل من هذه المراحل، متفاوتة. وتبين الصورة رقم ١، دورة الوقود النووى:



الرسم العام لدورة الوقود النووى

٢- صناعة التخصيب فى العالم:

فى مفاعلات الانشطار النووى، يستخدم الانشطار النووى لانتاج الطاقة من الحرارة الناجمة عن الانشطار. ولهذا الغرض، يجرى تبريد الحرارة بآليات امتصاص، ثم يجرى تحويل الحرارة الى طاقة ميكانيكية بواسطة توربين وفى نهاية المطاف يتم تحويلها الى طاقة كهربائية، بواسطة محول كهربائى (جنراتور).ونظرا لما تحتوية مادة اليورانيوم أو سائر مركبات هذه المادة، من قدرة على جذب النيوترون والانشطار النووى، فإن اليورانيوم يستخدم فى تصنيع الوقود للمفاعلات النووية، غالبا.

إن نظيرة (ايزوتوب) ^{235}U تعتبر اهم نظيرة يورانيوم، من حيث قابليتها للانشطار، وبما أن كثافة هذه النظيرة فى اليورانيوم الطبيعى، متدنية، لذا لابد من تخصيب اليورانيوم، لتأمين الهدف. وبالنظر الى أن وقود معظم المفاعلات العاملة بالانشطار النووى يعتمد على اليورانيوم المخصب، فقد اصبح تخصيب اليورانيوم، جزءا اساسيا ومحوريا فى دورة الوقود النووى.

وعلى هذا الاساس يعتبر اليورانيوم المخصب، مادة استراتيجية ولاشک أن عملية التخصيب بدورها تحتاج الى تقنية ومعرفة معقدة، كما أن تصنيع الاجهزة المستخدمة فى هذا المجال، بحاجة الى تقنيات عالية المستوى جدا، بحيث لاتتوفر هذه التقنيات فى الوقت الراهن الا لعدد محدود من البلدان، ولا توجد آلية لنقل هذه المعرفة لسائر البلدان.

۲-۱- نبذة تأريخية عن التخصيب فى العالم:

بعد اكتشاف الاشعاع، وفى بدايات القرن العشرين،تم اكتشاف النظائر المشعة. لقد تم استخدام مصطلح النظائر (جميع النظيرة) فى عام ۱۹۱۳ من قبل سادى، العالم البريطانى. و فى عام ۱۹۱۹ اقترح العالمان، استون وليندمن، اربعة اساليب لفرز النظائر المشعة، هى التقطير، والديفيوجن، والغرافيتى (أو الجاذبية والطرد المركزى)، والالكترومغناطيس. وبين الاعوام ۱۹۲۰ حتى ۱۹۳۰ اجريت الدراسات والاختبارات على مختلف اساليب فرز النظائر المشعة. فقد استخدم استون فى العام ۱۹۲۰، اسلوب الديفيوجن لفرز نظائر النيون. وأما الديفيوجن الحرارى فقد اجريت عليه الدراسات المخبرية لاول مرة، عام ۱۹۳۰ وقد اشيد اول برج حرارى فى المانيا، عام ۱۹۳۸، كما تم تصنيع أول جهاز طرد مركزى يعمل بالغاز، عام ۱۹۳۴.

إن البداية التأريخية لتخصيب اليورانيوم تعود الى الحرب العالمية الثانية (تخصيب حتى نسبة ۹۰٪)، وذلک من اجل انتاج السلاح النووى. ففى ذلک الوقت بذلت امريكا وبريطانيا والمانيا جهودا جبارة للتوصل الى طريقة ملائمة لفرز نظائر اليورانيوم، تمهيدا لانتاج القنبلة النووية.

إن اليورانيوم المتوفر فى الطبيعة، والذى يسمى اليورانيوم الطبيعى، يتكون عادة من ثلاثة انواع من النظائر، هى ^{234}U و^{235}U و^{238}U فى الجدول رقم ۱ تلاحظ كثافة انواع نظائر اليورانيوم المتواجدة فى حجر منجم اليورانيوم، كما يشار الى عدد البروتونات والنيوترونات والعمر النصفى لها، فى هذا الجدول.

الجدول رقم ۱: مواصفات نظائر اليورانيوم

اسم النظيزة	نسبة تراكم النظيرة فى اليورانيوم الطبيعى	عدد البروتونات	عدد النيوترونات	العمر النصفى
اليورانيوم ^{238}U	٪99.284	۹۲	۱۴۶	۴/۴۶ مليارسنة
اليورانيوم ^{235}U	٪۰/۷۱۱	۹۲	۱۴۳	۷۰۴ مليون سنة
اليورانيوم^{234}U	٪۰/۰۰۵۵	۹۲	۱۴۲	۲۴۵۰۰۰سنة

۲-۲- الاستخدامات وضرورات التخصيب

إن المفاعلات العاملة بالماء الخفيف، المستخدمة فى محطات الكهرباء النووية، منها العاملة تحت الضغط وكذلک المفاعلات العاملة بالماء المغلى، تحتاج الى يورانيم من نوعية 2-5%^{235}U والتى يسمى ايضا LEU^{2}. وكل ماكان التخصيب المطلوب، اكثر، يكون حجم المفاعل المستخدم، اصغر.

وفى اسطول النقل البحرى، يستخدم يورانيم مخصب بنسبة $^{235}U\%10$. أما الغواصات النووية والاقمار الصناعية ومفاعلات الابحاث، صغيرة الحجم، فيتم تزويدها غالبا بيورانيم مخصب من نوع $^{235}U\%90$ وربما بنسبة اعلى. وتجدر الاشارة الى أنه بعد اقتراح الولايات المتحدة، عام ١٩٧٨ فى اطار برنامج خفض نسبة تخصيب اليورانيوم المستخدم فى مفاعلات الابحاث (RERTR)، وعرض استخدام مادة LEUبدلا عن HEU، وبعد دعم الوكالة الدولية للطاقة الذرية لهذا الاقتراح، اصبح معظم مفاعلات الابحاث يستخدم يورانيم مخصب بنسبة دون ٢٠٪، ولايوجد فى الوقت الراهن الاعددا محدودا من المفاعلات العاملة بنسبة اعلى من ٢٠٪.

وبما أن فرز نظائر اليورانيوم بالاساليب الكيميائية غير محبذ، وذلك بالنظر الى شح التكنولوجيا، أو عدم توفر الجدوى الاقتصادية، تبقى الاساليب الالفيزيائية، الطريقة الوحيدة لاجراء عملية الفرز. وفى الغالب فإن اساليب الفرز تعتمد اساسا على كمية أو وزن النظائر فى جزيئات UF6. فبناء على نظرية سينية الغازات، يوجد فى كل جزئية، متوسط طاقة حركية. لذا فإن الجزيئات الخفيفة الوزن، تكون اكثر سرعة،وبالطبع فإن الثقيل منها، يتحرك بسرعة اقل. وفى فرز النظائر وفق اساليب اخرى من التخصيب، يؤخذ فى الاعتبار، فارق امتصاص اشعة الليزر بواسطة مستويات الطاقة المتوفرة فى احد النيوكلايدات الخاصة، أو الاختلاف الكمى فى المردود الكيميائى التعادلى.

لقد اتجه الالمان نحو اسلوب استخدام جهاز الطرد المركزى منذ عام ١٩٤١، وفى بريطانيا كان التركيز على اسلوب الديفيوجن الغازى، على مستوى واسع. واعتبارا من اواخر عام ١٩٤٣ انشأ الامريكان والبريطانيون، بالتعاون، مصنعا لهذا الغرض، داخل الاراضى الامريكية.

فى امريكا وفى اطار مشروع منهاتن، تم استخدام الاساليب الاربعة، الديفيوجن الغازى، الديفيوجن الحرارى، والالكترومغناطيس، وجهاز الطرد المركزى. وفى عام ١٩٤٤ توقف العمل بجهاز الطرد المركزى، بعد أن برزت العيوب التقنية لهذا الجهاز، آنذاك، لكن الاختبارات على اجهزة الطرد المركزى، والعمل على تحسين المواد المستخدمة فى تصنيعها وزيادة سرعة دورانها، قد استمرت وكانت النتيجة انه منذ عام ١٩٧٠ استطاعت اجهزة الطرد المركزى، منافسة اسلوب الديفيوجن الغازى، لابل احتلال مكانته فى عملية الفرز والتخصيب.

٢-٣- الاساليب المستخدمة فى تخصيب اليورانيوم

لقد تم استخدام اساليب مختلفة لتخصيب اليورانيوم، من اهمها، الديفيوجن (البخاخ) الغازىَ، الطرد المركزى، والفرز بواسطة الليزر، والتبادل اليونى وغيرها. ويوضح الجدول رقم ٢ انواع عمليات تخصيب اليورانيوم، التى جرى استخدامها حتى الآن، صناعيا أو مخبريا.

الجدول رقم ٢: الاساليب المستخدمة فى تخصيب اليورانيوم

مبدأ الفرز	النماذج
طنجرة (راديان) الضغط	جهاز الطرد المركزى الغازى
	نازل الفرز
	عملية اليوكور، جنوب افريقيا
النفوذ	الديفيوجن (البخاخ) الغازى
	البخاخ الجرمى
	البخاخ الحرارى
التبادل الكيميائى	الاستخراج بالحلال
	التبادل اليونى

التحريک النورى	فرز النظائر بواسطة ليزر البخار الذرى
	فرز النظائر بواسطة ليزر الجزيئى
	فرز النظائر بواسطة التحريک الليزرى
الالکترومغناطيس	عزل النظائر بواسطة الالکترومغناطيس
	عزل النظائر بواسطة البلازما

۲-۳-۱- البلدان الناشطة فى مجال الفرز على الطريقة الايروديناميكية

- **المانيا:**

لقد بدأ العلماء الالمان ابحاثهم فى هذا المجال، اعتبارا من عام ۱۹۵۰. وفى عام ۱۹۶۷ بدأ احد المختبرات، على نازل جهاز الفرز. وفى عام ۱۹۷۶ وقعت آلمانيا والبرازيل على اتفاقية من اجل العمل المشترک على تطوير هذا الاسلوب. وفى نفس العام، بدأ اول معمل (شبه صناعى) العمل فى هذا المجال. وقد نقل المعمل الى البرازيل، عام ۱۹۸۰. وفى عام ۱۹۸۹، توقفت جميع الابحاث الخاصة بهذا الاسلوب، فى المانيا.

- **البرازيل:**

بعد التوقيع على اتفاقية التعاون بين البرازيل والمانيا، بدأت البرازيل، العمل على انشاء اول مصنع للتخصيب. وبعد نقل المعمل المشترک من المانيا، عام ۱۹۸۰، بدأت البرازيل باكمال مشروعها، حتى اكتمل المعمل تماما، عام ۱۹۸۵. وفى عام ۱۹۹۴، توقف عملا المعمل، بسبب ارتفاع تكاليف الانتاج ونشوب بعض المشاكل التقنية.

- **جنوب افريقيا:**

بدأت الابحاث فى جنوب افريقيا على الفرز الايروديناميكى، اعتبارا من عام ۱۹۶۰. وفى عام ۱۹۶۷ تم تأسيس مصنع بحجم مخبرى. وفى عام ۱۹۷۴ تم انجاز مصنع بمستوى نصف صناعى. ولكن هذا المصنع قد توقف عن العمل لاسباب تقنية، وذلک فى عام ۱۹۷۹. وبعد اعادة البناء وازالة النواقص، استؤنف العمل فيه، اعتبارا من عام ۱۹۸۱. وفى عام ۱۹۸۸ تم تنفيذ اول مشروع صناعى فى هذا البلد. ولكن ولسبب ارتفاع تكاليف تأمين الطاقة الاستهلاكية، لم يستطع المصنع، الاستمرار وتوقف عن العمل، فى عام ۱۹۹۵.

۲-۳-۲- البلدان الناشطة فى مجال التخصيب على طريقة البخاخ (ديفيوجن) الغازى:

- **الولايات المتحدة الامريكية:**

لقد انشأت امريكا ثلاثة مصانع للتخصيب على طريقة البخاخ الغازى (ديفيوجن) قبل عام ۱۹۵۴. وقد تكفلت هذه المصانع الثلاث بتأمين ما يناهز ۹۰٪ من اليورانيوم المطلوب للغرب، حتى عام ۱۹۷۶. ولكن بسبب العوامل التى اشير اليها اعلاه، لايعمل فى الوقت الراهن، الا مصنعا واحدا يعمل على طريقة البخاخ الغازى.

- **الاتحاد السوفيتى السابق:**

يعود تأريخ انشاء اول مصنع للتخصيب على طريقة البخاخ الغازى، الى العام ١٩٤٦. بعد ذلک تم تأسيس ثلاثة مصانع فى الفترة الواقعة بين عامى ١٩٤٩ و١٩٦٤. ولكن وبسبب استهلاک كميات هائلة من الطاقة، ونظرا لتصنيع اجهزة الطرد المركزى، ذات المردودية العالية، فقد توقف التخصيب على طريقة البخاخ الغازى فى عام ١٩٩١.

- **بريطانيا:**

لقد بدأت بريطانيا تأسيس اول مصنع لها للتخصيب على طريقة البخاخ الغازى فى عام ١٩٥٠ وقد نجحت فى انتاج LEU فى عام ١٩٥٢. ولكن هذا المصنع قد توقف عن العمل، عام ١٩٨٢، بسبب العوامل التى اشير الى بعضها اعلاه.

- **الصين:**

اشترت الصين، الاجهزة اللازمة للتخصيب على طريقة البخاخ الغازى من الاتحاد السوفيتى السابق. وبدأت بتأسيس اول مصنع لها، عام ١٩٥٨ وقد انتهى العمل ودشن المصنع فى عام ١٩٦١

- **فرنسا:**

بدأ العمل بتإسيس اول مصنع على طريقة البخاخ الغازى فى فرنسا، وذلک للاغراض العسكرية – فى عام ١٩٦٠ وقد انتهت المرحلة النهائية لهذا المصنع فى عام ١٩٦٧. وكان اول انتاج لمادة LEU لهذا المصنع، فى عام ١٩٦٤. وإن اول مصنع للتخصيب على طريقة البخاخ الغازى، بمقياس صناعى، قد بدأ العمل بانشائه عام ١٩٧٤ وانتهى العمل فى عام ١٩٧٩.

- **الارجنتين:**

بدأت الارجنتين العمل السرى بانشاء اول مصنع على طريقة البخاخ الغازى، عام ١٩٧٩. وقد دخل المصنع طور الخدمة، عام ١٩٨٧. وقد توقف المصنع عن العمل، ثم تم اصلاحه عام ١٩٩٤ ليستأنف العمل، ولكن المصنع خرج عن النشاط، نهائيا فى عام ١٩٩٧. وقد عادت الارجنتين من جديد الى التخصيب على طريقة البخاخ الغازى عام ٢٠١١.

٢-٣-٣- البلدان الناشطة فى مجال التخصيب على الطريقة التبادل اليونى والكيميائى

- **فرنسا:**

بعد اكتشاف طريقة كيميائية جديدة لتخصيب اليورانيوم، بواسطة علماء فرنسيين، بدأت الابحاث فى فرنسا عام ١٩٦٨ فى مجال التخصيب على طريقة التبادل اليونى والكيميائى.وقد تم انشاء مصنعين، حتى عام ١٩٧٤، بمستوى مخبرى. وفى عام ١٩٨٤، تم تأسيس اول معمل، نصف صناعى لهذا الغرض. ولكن فى العام ١٩٨٧ قررت فرنسا ايقاف الابحاث فى هذا المجال وتوجيه الابحاث نحو التخصيب بواسطة الليزر.

- **اليابان:**

لقد بدأ اليابان ابحاثه فى عام ١٩٧٢. وفى عام ١٩٧٩ اكمل اليابانيون اول مصنع صغير لهم والذى نجح فى عام ١٩٨٢ بانتاج يورانيوم مخصب، بنسبة ٢/٢٪. وفى عام ١٩٨٤ وبعد تحسين اداء هذه الطريقة، استطاعوا تخصيب اليورانيوم فى مصنع اكبر، بنسبة ٣/٢٪. وكان فى وارد امرهم، تأسيس مصنع لانتاج اليورانيوم المخصب، بمستوى صناعى، لكن السلطات اليابانية قررت فى عام ١٩٩٢ ايقاف العمل على هذه الطريقة.

- **امريكا:**

اضافة الى فرنسا واليابان، فإن امريكا ايضا عملت على هذه الطريقة، فقد عمل الامريكيون على استخراج السائل – السائل والتبادل بين محاليل UF6 وNOUF6 لغرض تخصيب اليورانيوم.

- **العراق:**

لقد قام العراق بجمع المعلومات عن الاجهزة فرنسية واليابانية، بصورة سرية. وادعى فى العام ١٩٩١ بانه قد حصل فعلا على التقنيتين. ولكنه لم ينجح قط فى التخصيب على هذه الطريقة.

٢-٣-٤- البلدان الناشطة فى مجال التخصيب بواسطة الليزر:

يعرف الجدول التالى، البلدان الناشطة فى مجال هذه التقنية

الجدول رقم ٣: قائمة البلدان الناشطة فى مجال التخصيب بواسطة الليزر

اسم البلد	التقنية المستخدمة	الفترة الزمنية للاستخدام	سبب التوقف عن العمل
استراليا	SILEX	من ١٩٨٢ حتى الآن	-
بريطانيا	MLIS	١٩٨٣-١٩٩٤	ايقاف الميزانية
فرنسا	SILVA	١٩٨٤-١٩٩٦	الانتقال الىMLIS
فرنسا/ جنوب افريقيا	MLIS	١٩٩٦-١٩٩٧	انسحاب فرنسا
اليابان	AVLIS	١٩٨٢-٢٠٠١	الغاء المشروع من قبل وزارة الاقتصاد اليابانية
الولايات المتحدة الامريكية	AVLIS	١٩٨٤-١٩٩٩	ايقاف الميزانية
الولايات المتحدة/ استراليا	SILEX	من ١٩٩٧ حتى الآن	-

٢-٣-٥- البلدان الناشطة فى مجال التخصيب بواسطة الالكترومغناطيس

- **الولايات المتحدة الامريكية:**

لقد استخدمت امريكا هذه الطريقة فى عام ١٩٤٤ لانتاج اول قنبلة ذرية. ففى مشروع اوك ريج (Oak Ridge) تم استخدام نموذجين من الكالوترونات لانتاج مادة HEU، النموذج الاول، أو α عبارة عن يورانيوم مخصب على طريقة البخاخ الغازى بنسبة 8%U^{235}، تم رفع نسبة تخصيبه الى 12-20%U^{235} والنموذج الثانى، أو β، عبارة عن رفع درجة تخصيب منتوج α الى 90%U^{235}.وقد توقف العمل بهذه الطريقة بعد أن احتل البخاخ (ديفيوجن) الغازى مكانتها.

- **الاتحاد السوفيتى:**

صنع الاتحاد السوفيتى اول كالوترون له فى عام ١٩٣٤ لكى ينتج مادة PU^{239}. وفى عام ١٩٤٦ بدأ الاتحاد السوفيتى بتصنيع الكالوترونات المماثلة للكالوترونات الامريكية، ولم تكن التجربة ناجحة. وفى عام ١٩٥٠، انشأ الاتحاد السوفيتى اول مصنع له يعمل بطريقة البخاخ (ديفيوجن) الغازى، عندها توقف العمل على الطريقة EMIS فى هذا البلد.

- **العراق:**

بدأ العراق ابحاثه على طريقة الالكترومغناطيس، عام ١٩٧٩. وفى عام ١٩٨٢ بدأ العمل بانشاء اول مصنع لهذا الغرض. واستمرت المشاكل التقنية لانتاج اليورانيوم، عالقة. وقبل التخلص من تلك المشاكل، دمر المصنع بالكامل.

٢-٣-٦- البلدان الناشطة فى مجال التخصيب بواسطة البلازما

تعتبر فرنسا وامريكا البلدان الناشطان فى هذا المجال. وقد اوقفت امريكا، ابحاثها بهذا الصدد فى عام ١٩٨٢ وثم جاء الدور على فرنسا لكى توقف هى الاخرى ابحاثها فى عام ١٩٩٠.

٢-٤- الاساليب المتداولة فى التخصيب بالمستوى الصناعى

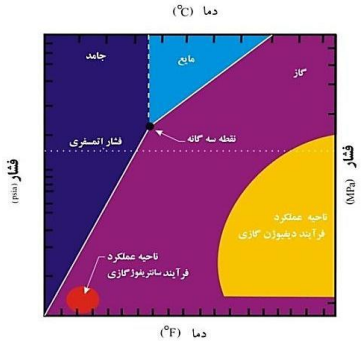
من بين كل اساليب التخصيب التى تم الحديث عنها فى هذا المقال، لم يستخدم الا اسلوبان لانتاج اليورانيوم المخصب بالمستوى الصناعى، هما اجهزة الطرد المركزى والبخاخ (ديفيوجن) الغازى. وفى العمليتين يتم استخدام اليورانيوم على شكل غاز UF6 ليجرى تخصيبه لاحقا. وأما UF6 فهى مادة جامدة فى درجة حرارة الغرفة (العادية) وتحمل جرما جزئيا عاليا. وكما يلاحظ فى الصورة التالية، فإن حرارة UF6 فى مرحلة التصعيد، ادنى منها عند النقطة الثلاثية (triple point). وأما الحرارة التصعيدية، فهى الحرارة التى يكون فيها ضغط البخار الجامد، مساويا للضغط الجوى. وعندما يكون الـ UF6 فى حالة متوازنة تحت الضغط الجوى، يتحول الـ UF6 الجامد الى بخار (اى بلغ مرحلة التصعيد) دون المرور بمرحلة الذوبان. وحتى يكون لدينا UF6 سائل (أو مذاب)، نحتاج الى ضغط يتجاوز 0/15MPa وحرارة تتجاوز 65 °C. المواصفات الفيزيائية وظروف تغير اطوار الـ UF6 مبينة فى الجدولين التاليين:

الجدول رقم ۴: المواصفات الفيزيائية وظروف تغير اطوار الـ UF6

الوضع الفيزيائى	الشكل الظاهرى	الدانسيته
جامد	ابيض	5/09 g/cm^3 فى 20°C
سائل	شفاف	3/4 g/cm^3 فى 100°C
غاز	بلالون	

الجدول رقم ۵: وظروف تغير طور الـ UF6

نقطة تصعيد	56/4°C فى ضغط 0/101 ميغاباسكال
النقطة الثلاثية	64/02°C فى ضغط 0/152 ميغاباسكال
نقطة الازمة	230/2°C فى ضغط 4/56 ميغاباسكال



الجدول التالى يتضمن مقارنة بين اسلوبى الطرد المركزى والبخاخ الغازى

الجدول رقم ۶: مقارنة جهاز الطرد المركزى والبخاخ الغازى

الخصوصية	البخاخ الغازى	جهاز الطرد المركزى
كمية التخصيب فى مرحلة واحدة	قليلة	كثيرة
مقدار التيار فى مرحلة واحدة	كثير	قليل
الضغط العام	متوسط	قليل
رصيد المواد فى البرج	كبير	صغير
المبرد اللازم	كبير	صغير

الطاقة المستهلكة	كثيرة جدا	قليلة
مسهلات العمل المطلوبة	كثيرة	قليلة جدا
الصيانة وقطع الغيار البديلة	قليلة	كثيرة
القوى البشرية المطلوبة	قليلة	كثيرة

واستنادا الى المقارنة المدرجة اعلاه بين جهاز الطرد المركزى والبخاخ الغازى، يمكن استخلاص النتائج التالية:

١- الافضلية الاساسية لجهاز الطرد المركزى على البخاخ الغازى، كونه يستهلك من الطاقة ما نسبته ٢٥ أو ٥٠ضعف اقل من البخاخ الغازى، حيث يكون استهلاك البخاخ الغازى من الطاقة يساوى 2400 ~3000 kwh/swu بينما فى جهاز الطرد المركزى يساوى 50~100kwh/swu. وعليه فإذا ما تم التخصيب بطريقة البخاخ الغازى، سوف يستهلك ٣ الى ٤ فى المائة من الكهرباء المنتجة فى عملية التخصيب، بينما استخدام جهاز الطرد المركزى سوف يقلص هذه النسبة الى 0/1٪.

٢- إن استهلاك الطاقة فى المعامل العاملة بالبخاخ الغازى، ليس بسبب تعدد الكومبروسورات الكثيرة فحسب، بل بسبب احتكاك الغاز داخل الانابيب، يتسبب فى العديد من المشاكل، منها على سبيل المثال، أن ٥٪ من الكهرباء المنتجة بواسطة المفاعلات العاملة بالماء الخفيف، يتم استهلاكها من قبل المعمل ذاته.

٣- الانفاق على الكهرباء المستهلكة فى المصانع العاملة بالبخاخ الغازى، يشكل ٦٠٪ من اجمالى نفقات المصنع، بينما هذا العنصر لايتجاوز الـ ٦٪ أو ٧٪ بالنسبة للمصانع العاملة بجهاز الطرد المركزى.

٤- وعن عيوب جهاز الطرد المركزى، يمكن القول أن ضئالة الانتاج التخصيبى لكل جهاز، تشكل العيب الاساسى فى هذا المضمار. وتجدر الاشارة الى أن عنصر الفرز فى اجهزة الطرد المركزى يعتمد على الفوارق الموجودة فى جرم جزئيات النظائر، بينما فى البخاخ الغازى، يعتمد على تناسبها.

٥- إذا كانت الطاقة الاستيعابية لجهاز الطرد المركزى – فى مرحلة واحدة – اقل منها فى البخاخ الغازى، فإن الطرد المركزى يتفوق على البخاخ الغازى فى ميدان فرز النظائر.

٦- إن الفضاء الذى تشغله معدات الطرد المركزى، اقل من البخاخ الغازى، وعليه يمكن توسيع المعمل الفاعل بالطرد المركزى فى فضاء اصغر.

٧- بصورة عامة، يعتبر العمل باجهزة الطرد المركزى اصعب كثيرا، والسبب فى ذلك، سرعتها الفائقة وحجمها الكبير، الذى يجعل دوزنتها، امرا صعبا.

٨- إن تصنيع وصيانة الاغشية المناسبة فى العمل بطريقة البخاخ الغازى، يعتبر امرا ملفتا.

٩- فى العمل بطريقة البخاخ الغازى، تتراكم كميات كبيرة من المواد فى خط الانتاج، فعلى سبيل المثال، لانتاج مول واحد من الـ UF6 بنسبة تخصيبية تساوى ٩٠٪ لابد من حشد ٤٢ مليون مول من المواد الاولية فى خط الانتاج.

١٠-من اجل انتاج ١٠ ملايين SWU فى مصنع يعمل باجهزة الطرد المركزى، تكون النفيات اقل منها فى حالة استخدام مصنع يعمل بالبخاخ الغازى،بنسبة ٢٥٪ الى ٣٠٪.

الصورة المدرجة ادناه وهى لموقع جورج بيسه للتخصِب فى فرنسا، والتى تعمل بالبخاخ الغازى ،يظهر فى الجزء الامامى من الصورة اربعة مفاعلات نووية بطاقة انتاجية تتجاوز الـ٣٠٠٠ ميغاواط، لتلبية حاجة الموقع للطاقة.

الصورة رقم ٣: موقع التخصيب الكبير، جورج بيسه فى فرنسا، العامل بالبخاخ الغازى

الجدول التالى يصف منشآت التخصيب على طريقة البخاخ الغازى، الموجودة فى العالم والطاقة الانتاجية لكل واحدة منها.

الجدول رقم ٧: منشآت التخصيب الهامة، العاملة بالبخاخ الغازى، فى العالم

الشركة المصنعة	المنشآت	البلد	تأريخ الاستثمار التجارى	الطاقة المسجلة (SWU/Yr)	الطاقة الحقيقية (SWU/Yr)
USEC	Paducah GDP	امريكا	اواسط الستينات حتى مايو ٢٠١٣	٣/١١ مليون	٦ مليون
USEC	Portsmouth GDP	امريكا	١٩٥٤ حتى ٢٠٠١	٤/٧ مليون	٩/٥ مليون
AREVA	Georges-Besse I	فرنسا	١٩٧٩ حتى منتصف ٢٠١٢	٨/١٠ مليون	٥/٨ مليون
CNNC	Lanzhou	الصين	١٩٨٠ حتى ١٩٩٧	–	١/١ مليون
TENEX	ECP, UEIP, etc.	روسيا	عقد الاربعينات حتى عقد الثمانينات	–	–
U.K.	Capehurst	بريطانيا	عقد الستينات حتى ١٩٨٢	–	٣٢٥٠٠٠
Argentina	Pilcaniyeu	الارجنتين	١٩٨٣ حتى ١٩٨٩ ٢٠١١ حتى الآن	٣ مليون	٢٠٠٠٠

إن الاستثمار التجارى لاخر معمل صناعى للتخصِب بطريقة البخاخ الغازى فى العالم (USEC/Paducah – 11.3 millionSWU/yr) توقف فى مايو ٢٠١٣ (يستمر العمل فى هذا المعمل طيلة عام ٢٠١٤، بغية ادارة المخزون وتسليم البضائع المباعة للزبائن حصرا).

من جانب آخر فقد استأنفت الارجنتين نشاط مصنعها للتخصِب العامل بطريقة البخاخ الغازى، فى عام ٢٠١١ بعد توقف استمر اكثر من ٢٠ عاما (CNEA/Pilcaniyeu-20,000 SWU/yr).

٢-٥- اسلوب جهاز الطرد المركزى

طرح موضوع فرز النظائر المشعة بواسطة جهاز الطرد المركزى لاول مرة فى عام ١٩١٩ من قبل العالمين، ليندمن واستون. وكانت التجربة العملية الناجحة الاولى، قد تحققت على يد جيمز وزملائه فى عام ١٩٣٨، حيث استخدموا اجهزة طرد مركزى تحت فراغية لفرز (أو تفكيك) النظائر المشعة لمادة الكلورفى تركيبة التتراكلريد الكربون (CCL_4).

وأما النظائر المشعة لليورانيوم وعملية فرزها بواسطة جهاز الطرد المركزى، لم تتحقق للمرة الاولى الا بحلول عام ١٩٤١، بواسطة بيمز وزملائه بجامعة فرجينيا. فقد تمكن هؤلاء من انتاج ١/٢ غرام من اليورانيوم المخصب بنسبة ٤٪. وكان اسرع جهاز طرد مركزى فى ذلك الوقت، يدور بسرعة ٢٠٦ متر فى ثانية، ويستطيع تخصيب كيلوغرام واحد SWU فى العام. وبانتهاء الحرب العالمية الثانية، وبعد التأكد من نجاعة تقنية البخاخ الغازى، توقف العمل باجهزة الطرد المركزى فى امريكا.

ولكن التخصيب بواسطة اجهزة الطرد المركزى تطور فى روسيا على يد العلماء النمساويين والالمان الذين وقعوا فى الاسر. وقد نقل قائد هذه المجموعة من الاسرى، التقنية ذاتها الى الولايات المتحدة واوروبا، بعد اطلاق سراحه من الاسر. وقد استمرت الابحاث حتى عقد الستينات، حين اصبحت تقنية اجهزة الطرد المركزى، منافسة لتقنية البخاخ الغازى. أما فى الوقت الراهن، فإن تقنية اجهزة الطرد المركزى هى التقنية السائدة فى اوروبا الغربية وروسيا واليابان.

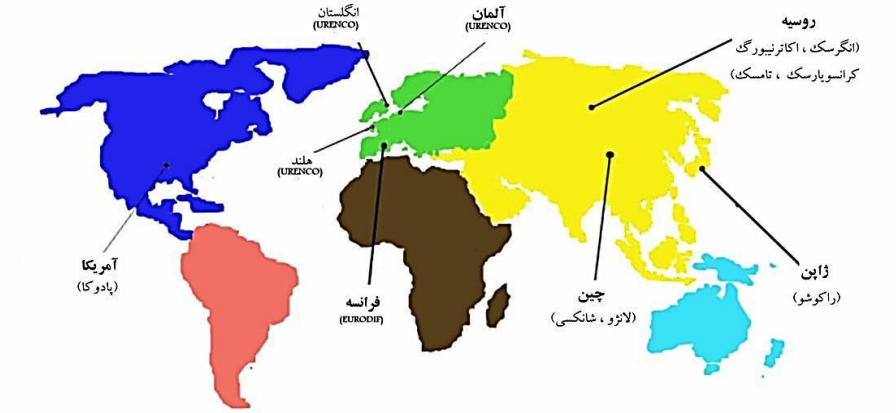
٢-٦- التعرف على المنظمات والبلدان الناشطة فى مجال تخصيب اليورانيوم

فى الوقت الراهن تجرى عمليات التخصيب على نطاق واسع، فى البلدان التالية: روسيا، فرنسا، امريكا، بريطانيا، المانيا، هولندا،اليابان، الصين والشركات العاملة فى هذه البلدان وهى: CNNC،AREVA، Minatom، URENCO،JNFL وUSEC.

- CNNC الشركة الذرية الوطنية فى الصين ولديها مصنعان يعملان باجهزة الطرد المركزى، وبطاقة اجمالية تساوى مليون SWU/year فى العام.
- AREVA ، فى فرنسا لديها مصنع واحد يعمل بالبخاخ الغازى فى منطقة تريكاستين الفرنسية، وينتج ١٠/٨ مليون SWU/year سنويا، بالاضافة الى موقع جورج بيسه (GBII).
- Minatom وهو جهاز الاتحاد الروسى، الذى يدير مصانع تخصيب على طريقة الطرد المركزى فى انغرسك واكاترينبورغ وكراسنويارسك وتامسك.

- USEC لدیها مصنع یعمل بالبخاخ الغازی فی ولایهٔ کنتاکی (بادوکا) الامریکیهٔ، بطاقهٔ اجمالیهٔ تساوی ۱۱/۳ ملیون SWU/year فی العام.
- JNFL منظمهٔ الوقود النووی للیابان، لدیها مصنع بطاقهٔ انتاجیهٔ تساوی ۱/۱ ملیون SWU/year، منذ عام ۱۹۹۲.
- URENCO، مجموعهٔ شرکات المانیهٔ وهولندیهٔ وبریطانیهٔ ولدیها مصانع فی المانیا وهولندا وبریطانیا وامریکا، کلها تعمل بطریقهٔ الطرد المرکزی.

الصورهٔ التالیهٔ، تبین مواقع التخصیب بالمقیاس التجاری فی العالم:

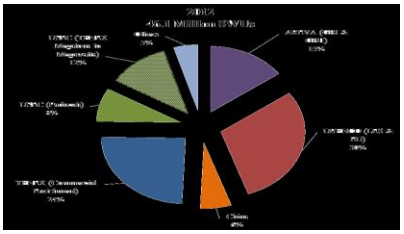


الصورهٔ رقم ۴: مواقع مصانع التخصیب فی العالم

جدیر بالذکر أن حصهٔ الصین والیابان من السوق العاملیهٔ للتخصیب، مقارنهٔ بسائر البلدان المذکورهٔ اعلاه، ضئیلهٔ، تکاد تکون کافیهٔ لتلبیهٔ الاحتیاجات المحلیهٔ. کما تجدر الاشارهٔ الی أن المنظمات الاربعهٔ التالیهٔ، قامت بتخصیب اکثر من ۹۰٪ من الیورانیوم المخصب فی العالم، عام ۲۰۱۲:

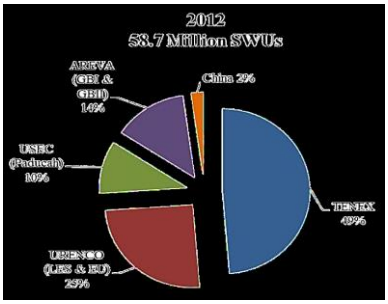
- AREVA
- TENEX
- URENCO
- USEC

وتبین الصورهٔ المدرجهٔ ادناه، حصهٔ کل منظمهٔ من المنظمات المذکورهٔ اعلاه فی السوق العالمیهٔ لتخصیب الیورانیوم فی العام ۲۰۱۲(علما بأن هذه الحصهٔ، تشیر الی الانتاج الزائد عن الحاجات المحلیهٔ). ورغم ما یبدو من استقلال المنظمات الاربعهٔ المذکورهٔ اعلاه عن بعضها البعض، فإن منظمتی URENCO وAREVA بعد مشارکتهما فی مشروع ETC، تبین انضمامهما لبعضهما البعض.



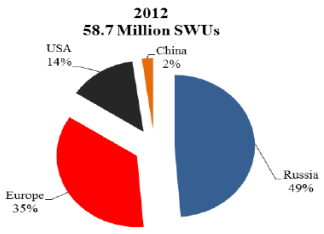
الصورة رقم ٥: حصة المنظمات العاملة فى مجال تخصيب اليورانيوم فى السوق العالمية، فى عام ٢٠١٢

كما يلاحظ فى الصورة اعلاه، فأن اكبر حصة تعود لـURENCO ، التى تساوى ٣٠٪ من كل السوق العالمية. بعدها تأتى حصة TENEX ، ٢٤٪. كذلك تبين الصورة المدرجة ادناه، حاجة العالم التخمينية للتخصيب – من وجهة نظر المنتجين فى العام ٢٠١٢:



الصورة رقم ٦: الحصة التخمينية لحاجة العالم من وجهة نظر المنتجين، فى العام ٢٠١٢

هذا وتستطيع الشركات العاملة فى مجال التخصيب فى الوقت الراهن، زيادة الانتاج فى وقت قصير تقريبا (مثلا فى غضون عام واحد)، وذلك من خلال رفع الطاقة الانتاجية لمصانعها. وتبين الصورة المدرجة ادناه الحصة التقريبية للمنتجين الاساسيين فى صناعة التخصيب، من حيث الموقع الجغرافى:



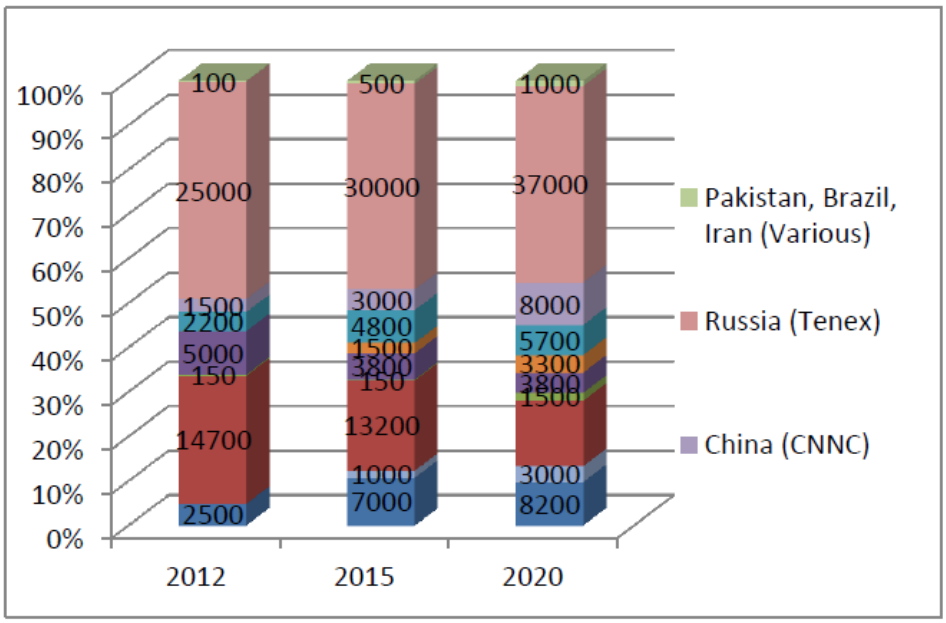
الصورة رقم ٧: الحصة التقريبية للمناطق الجغرافية من التخصيب فى عام ٢٠١٢

كما يلاحظ فى الصورة اعلاه، فإن التخصيب لايجرى الا فى عدد محدود من البلدان، اما بقية البلدان، فليس امامها الا شراء ما تحتاجه من يورانيوم مخصب من الشركات والمؤسسات العاملة فى مجال تخصيب اليورانيوم.

إن الطاقة الفعلية والتقديرات المطروحة لمصانع التخصيب بطريقة الطرد المركزى بالمستوى الصناعى، وحصة البلدان الحائزة لهذه التقنية مبينة فى الجدول التالى:

الجدول رقم ٨: الطاقة الفعلية والتقديرات المطروحة لمصانع التخصيب بطريقة الطرد المركزى بالمستوى الصناعى 1000 SWU/yr

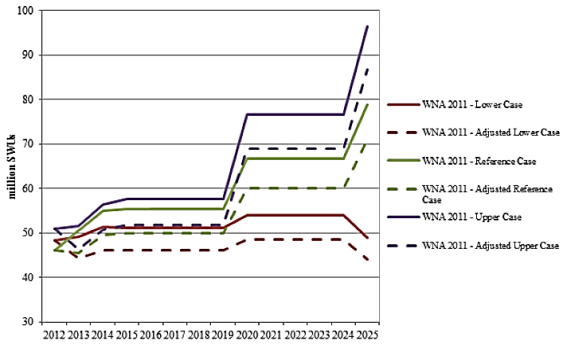
اسم البلد	الشركات والمنشآت العاملة	عام ٢٠١٢	عام ٢٠١٥	عام ٢٠٢٠
روسيا	Tenex: Anfarsk, Novouralsk, Zelenogorsk, Seversk	٢٥٠٠٠	٣٠٠٠٠	٣٧٠٠٠
فرنسا	AREVA, Georges Bess II	٢٥٠٠	٧٠٠٠	٧٥٠٠
امريكا	URENCO, New Mexico AREVA, Idaho Falls	٢٢٠٠ ٠	٤٨٠٠ ١٥٠٠	٥٧٠٠ ٣٣٠٠
اليابان	JNFL, Rokkaasho	١٥٠	١٥٠	١٥٠٠
الصين	CNNC: Hanzhun & Lanzhou	١٥٠٠	٣٠٠٠	٨٠٠٠
بريطانيا المانيا هولندا	URENCO: Capenhurst, Gronau, Almelo	١٤٧٠٠	١٣٢٠٠	



الصورة رقم ٨: تطوير منشآت تخصيب اليورانيوم حتى عام ٢٠٢٠، على مقياس 1000 SWU/yr

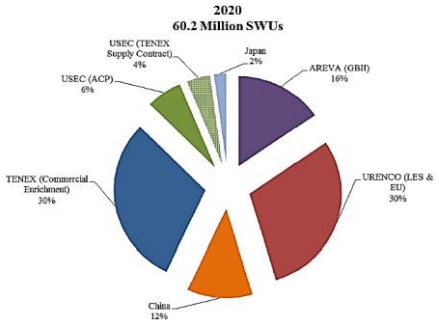
إن الدافع الرئيسى للتخصيب، هو الطلب عليه لتأمين الوقود النووى لمحطات الكهرباء النووية. وعليه فإن دراسة عدد المحطات النووية ومعرفة الطاقة الانتاجية لكل منها والتعرف على ظروف هذه المحطات العاملة والفترة الزمنية المقررة لها لكى تكون فى الخدمة، تعطى صورة واضحة

لمدى الحاجة للتخصيب واداوته. ويمكن أن تشمل هذه الدراسة، المحطات التى جرى التخطيط لانشائها، أو تلك التى خاضعة لعمليات التطوير والتوسعة، أو ما يجرى العمل فى بنائها فى الوقت الراهن. وتبين الصورة التالية، التقديرات المعمولة لحاجات التخصيب حتى عام ٢٠٢٥:



الصورة رقم ٩: الطلب العالمى على التخصيب من ٢٠١٢ حتى ٢٠٢٥

استنادا الى الاحصائيات المنشورة حتى عام ٢٠١٢، هناك ٤٣٦ محطة كهرباء نووية عاملة فى العالم. ومن المتوقع أن تصل ٥٥٠ محطة كهرباء نووية الى طور الانتاج خلال الـ١٥ سنة القادمة. تبين الصورة التالية حجم التخصيب فى العام ٢٠٢٠:



الصورة رقم١٠: الحجم التقريبى للتخصيب فى العام ٢٠٢٠

٣- المصادر:

[1] J. M. Whitaker, "Uranium Enrichment Plant Characteristics - A Training Manual for the IAEA", May 2005

[2] Allan S. Krass, Peter Boskma, Boelie Elzen, Wim A.Smith, "Uranium Enrichment and Nuclear Weapon Proliferation", Taylor & Francis Ltd, London and New York, 1983

[3] "DOE Handbook"-Chapter 3, April 1998

[4] Alexander Glaser, "Life in a Nuclear Powered Crowd (The Problem of Uranium Enrichment)", June 2005

[5] US Nuclear Fuel Cycle, World Nuclear Association, February 2014

[6] Kenneth R. Czerwinski; Martin F. Polz, “Uranium Enrichment Using Microorganisms”, 2004

[7] ACP & World Enrichment Market - USEC, 2013

[8] Nuclear Technology Review 2013 – IAEA

[9] URENCO Annual Report And Accounts 2013