

## Calculation of the Fission Barrier for a Nucleus ${}_{147}^{239}\text{U}_{92}$ , by Two-center Shell Model with Woods-Saxon Potential

Dr. Amir TFIHA \*

(Received 8 / 2 / 2022. Accepted 17 / 7 / 2022)

### □ ABSTRACT □

The set of equations describing the motion of nucleons and their approach and distance between the two fragments has been solved. The calculations were carried out for the nucleus  ${}_{147}^{239}\text{U}_{92}$ , and we got a good value compared to the experimental results of the fission barrier, and the other value was not good because the integration had to be done on the five deformation moderators, the energy value corresponding to each level of protons and neutrons was calculated according to the shell model with Woods-Saxon potential, calculations for the five dimensions of deformation must be performed using this software, and can be used to estimate the value of the fission barrier.

**Keywords:** Woods - Saxon - fission - fragmentation - shell model.

---

\* Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Sciences, Tishreen University, Lattakia, Syria.  
adarwish@tishreen.edu.sy

## حساب حاجز الانشطار لنواة $^{239}_{147}\text{U}_{92}$ بالنموذج الطبقي بمركزين مع كمون وودز-ساكسون

د. أمير تفيحة\*

(تاريخ الإيداع 8 / 2 / 2022. قُبل للنشر في 17 / 7 / 2022)

### □ ملخص □

تم حل جملة المعادلات التي تصف حركة النكليونات واقتربها وابتعادها بين الشظيتين. أُجريت الحسابات من أجل النواة  $^{239}_{147}\text{U}_{92}$  وحصلنا على قيمة جيدة بالمقارنة مع النتائج التجريبية لحاجز الانشطار ، والقيمة الأخرى لم تكن جيدة لأن التكامل كان يجب أن يتم على الوسطاء الخمسة للتشوه، حسبت قيمة الطاقة المقابلة لكل سوية للبروتونات و النوترونات بحسب النموذج الطبقي مع كمون وودز ساكسون ، يجب إجراء الحسابات من أجل أبعاد التشوه الخمسة باستخدام هذا البرنامج، ويمكن استخدامه لتقدير قيمة حاجز الانشطار.

**الكلمات المفتاحية:** وودز- ساكسون - انشطار - شظية - النموذج الطبقي.

\* أستاذ مساعد - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية [adarwish@tishreen.edu.sy](mailto:adarwish@tishreen.edu.sy)

**مقدمة:**

تعددت النماذج النووية التي تحاول الحصول على أفضل وصف للنواة، وسعى الباحثون إلى إيجاد نموذج يستطيع وصف عملية الانشطار النووي [1]. تم تعميم نموذج نلسون إلى حالة نموذج بمركزين، وتم وصف الحركات الدورانية المختلفة للنواة المتناظرة المشوهة، وطبق نموذج نلسون مع كمون الجسيم المفرد في حالة النواة المشوهة والمتناظرة محورياً [2]. فيما بعد تم تعديل هذا النموذج باستخدام كمون وودز-ساكسون وهو الكمون الذي يقع بين الهزاز التوافقي والبئر الكموني المربع [3]، وحيث أن كمون وودز ساكسون مبني على أن يكون قسمه القطري متقارباً مع قيم توزع النكليونات في النواة [4,5] فإن علاقته يكون لها الشكل التالي:

$V^{w.s}(r) = - \frac{V_0^{N,Z}}{1 + \exp\left[\left(\frac{1}{a}\right)(r - R_0)\right]}$	(1)
$V(\ell.s) = -f \frac{1}{r} \frac{dV(r)}{dr} \ell.s$	

تسمح فكرة نموذج نووي بمركزين مع كمون مشوه لكل مركز بوصف شظيتين على بعد كبير وهو يجعله ناجحاً في وصف عملية الانشطار.

تمثل عملية الانشطار كمنافسة بين قوة التناثر الكولونية في النواة والتي تحاول تقسيم النواة مع قوة التوتر السطحي للنواة التي تبقي النكليونات معاً. هذه المنافسة هي ما يحدد هل يمكن أن يحدث انشطار أم لا، وبالطبع حدوث مثل هذا الانشطار سيتوافق مع حدوث تشوه كبير للنواة، وبالتالي سيكون من المناسب اختيار معاملات للتشوه تناسب وصف عملية الانشطار [6]. وجود مثل هذه المعاملات في نموذج القطرة السائلة أدى إلى نجاحه في وصف عملية الانشطار [7].

طور الباحثون النموذج الطبقي الذي استطاع تفسير وجود النوى السحرية عبر إضافة كمون وودز-ساكسون إلى الهاملتوني وذلك لدراسة عملية الانشطار [8].

استخدم كمون وودز-ساكسون لوصف التفاعل النووي  $^{40}\text{Ca} + ^{16}\text{O}$ ، وفي دراسة أخرى قام *Nuhn & Scheid* [9]. بدراسة التهام نواة  $^{13}\text{C}$  بالنواة الهدف  $^{16}\text{O}$  عبر استخدام النموذج الطبقي مع كمون غوصي مشوه. تقنية أخرى في دراسة الانشطار اقترحت من قبل *Revai* [10,11] الذي استخدم تقنية فصل الكون عبر نشره بالتوافقيات الكروية.

**أهمية البحث وأهدافه:**

يهدف هذا البحث لحساب حاجز الانشطار لنواة  $^{239}_{147}\text{U}_92$  النموذج الطبقي بمركزين مع كمون وودز-ساكسون، وإيجاد قيمة هذا الحاجز بتغير البعد بين الشظيتين.

### طرائق البحث ومواده:

يستخدم هذا البحث تقنيات حاسوبية وهي برنامج الفورتزان (99) ، وتم تشغيل برامج حاسوبية للقيام بعملية الاستيفاء لحساب وسائط الكمون و استخدم برنامج Nusol لحساب قيم الطاقة.

### النموذج الطبقي بمركزين:

يعبر عن الكمون لكل شظية من شظايا الانتشار من العلاقة (1) حيث يكتب الكمون بالشكل:

$V_i = V_i(r) + V_i(\ell.s)$	(2)
$f = \frac{1}{2} \lambda_i \left( \frac{\hbar}{m_0 c} \right)^2 V_{0i}$	

يتم اختيار الكمون من أجل البروتونات التي تخضع لتفاعلات كولونية بحيث يكون هذا الكمون لكرة متجانسة لها الشحنة Ze ، حيث Z شحنة كل شظية، وبدلاً من  $R_0$  نستخدم  $R_i$  وهو موضع الكمون في مركز عطالة الجملة لكل شظية ، وتكون العلاقة المعبرة عن كمون ثنائي المركز [11]:

$V = e^{-iR_1 k} V_1 e^{iR_1 k} + e^{-iR_2 k} V_2 e^{iR_2 k}$	(3)
$k$ مؤثر العدد الموجي	

يمكننا تمثيل كمون وودز-ساكسون بحدود منشور الكمون:

$V \approx \sum_{ij}^N  i\rangle V_{ij}  j\rangle \equiv V_{sep}$	(4)
---	-----

وبالتالي فإن الكمون  $V_{sep}$  مع الكموني العلاقة (3) يقرب ليعبر عنه في الهزاز التوافقي [11]:

$ v\rangle, v = 1, 2, \dots, N$	(5)
$v =  n\ell jm\rangle = g_{n\ell}(k) \left\{ i^{-1} Y_{\ell}(k) \otimes \chi_{\frac{1}{2}}(s) \right\}_m^i$	

يعبر  $\chi_{\frac{1}{2}}(s)$  عن سبين أعلى وأسفل.

يكتب الجزء القطري من التابع الموجي بالشكل [11,12]

$\langle r   n\ell \rangle = h_{osc}^{-\frac{3}{2}} \varphi_{n\ell}(\xi)$	(6)
---	-----

ويعطى التابع الموجي  $\varphi_{n\ell}(\xi)$  بالعلاقة:

$\varphi_{n\ell}(\xi) = \sqrt{\frac{2n!}{\Gamma\left(n + \ell + \frac{1}{2}\right)}} \xi^{\ell} e^{-\frac{\xi^2}{2}} L_n^{\ell + \frac{1}{2}}(\xi^2)$	(7)
---	-----

$L_n^{\ell + \frac{1}{2}}(\xi^2)$  كثيرة حدود لاغير

وتعطى  $h_{osc}^i$  بالعلاقة:

$h_{osc}^i = 0.84 R_0^i A_i^{-\frac{1}{6}}$	(8)
---	-----

## النتائج والمناقشة:

لوصف عملية اندماج أو انشطار نواتين نقوم بعملية استيفاء *interpolation* بين قيم وسطاء الكمون للنوى المنفصلة والنواة المركبة لنحصل على قيم الوسطاء التي تصف الكمون ويتم الحساب بالاستعانة بشرط انحفاظ الحجم، يكون الهاملتوني المعبر عن الجملة التي سنتشطر أو تندمج :

$$H = H_{SM} + V_{WS} + f(r) \quad (10)$$

$$f(r) = \begin{cases} \frac{ze^2}{2R} \left( 3 - \frac{r^2}{R_e^2} \right) & r \leq R_e \\ \frac{ze^2}{R} & r > R_e \end{cases}$$

$H_{SM}$  و  $V_{WS}$  كمون وودز-ساكسون وهاملتوني النموذج الطبقي

من أجل السويات المرتبطة يكون الحل لمعادلة شرودنغر له الشكل التالي [12]

$$|\varphi\rangle = G_0(E)V|\varphi\rangle \quad (10)$$

$$G_0(E) = \left( E - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_0} \right)^{-1}$$

$G$  تابع غرين

وبإدخال العلاقتين (3) و (4) نحصل على العلاقة [11]:

$$\sum_{\mu=1}^N \sum_{i=1}^2 [\delta_{ii'} \delta_{\mu\mu'} - \sum_{v=1}^N \langle i\mu | G_0(E) e^{i(R_i - R_{i'})k} | i'v \rangle V_{v\mu'}^{i'}] A_{i\mu'} = 0 \quad (11)$$

حل هذه الجملة من المعادلات هو القيم التي تجعل معين المصفوفة لهذه الجملة معدوماً ، تم استخدام البرنامج *Nusol* [14] لإيجاد الحلول لهذه الجملة من المعادلات بعد تركيب المصفوفة من أجل كل سوية للبروتونات والنيوترونات أجريت الحسابات من أجل النواة  ${}_{14}^{39}\text{U}_{92}$  فحصلنا على قيمة الطاقة من أجل  $V_0 = -45\text{MeV}$ . الشكل (1).

وحسبنا قيمة الطاقة المقابلة لكل سوية للبروتونات و النيوترونات بحسب النموذج الطبقي مع كمون وودز ساكسون في الجدول (1)

السوية	الطاقة	MeV الطاقة		السوية	MeV الطاقة	الطاقة	
	نيوترون N	بروتون P	الرقم		نيوترون N	بروتون P	الرقم
9/2 -	-6.34	0.50	69	1/2 +	-41.60	-33.75	1
7/2 +	-6.23	0.69	70	1/2 -	-38.28	-31.14	2
7/2 -	-6.11	1.41	71	3/2 -	-37.68	-30.43	3
9/2 +	-6.00	1.44	72	1/2 -	-37.36	-29.97	4
3/2 +	-5.95	1.57	73	3/2 +	-34.27	-27.67	5
11/2 -	-5.93	1.60	74	1/2 +	-34.10	-27.42	6
1/2 +	-5.54	1.66	75	1/2 +	-32.95	-26.05	7
3/2 +	-5.42	1.88	76	5/2 +	-32.92	-25.67	8
5/2 -	-5.39	2.09	77	3/2 +	-31.99	-24.76	9
1/2 +	-5.23	2.90	78	1/2 +	-31.04	-23.30	10
3/2 -	-4.65	2.96	79	3/2 -	-29.43	-23.14	11

13/2 -	-4.49	3.03	80	5/2 -	-29.42	-23.01	12
1/2 -	-4.08	3.04	81	1/2 -	-29.07	-22.47	13
3/2 +	-3.84	4.75	82	3/2 -	-27.96	-21.06	14
5/2 +	-3.57	4.91	83	7/2 -	-27.51	-20.86	15
1/2 +	-3.23	5.12	84	1/2 -	-27.24	-20.04	16
9/2 +	-3.08	5.51	85	1/2 -	-26.41	-18.91	17
1/2 +	-2.77	5.69	86	5/2 -	-25.60	-18.35	18
5/2 -	-1.83	5.70	87	3/2 -	-24.36	-18.16	19
11/2 +	-1.71	5.87	88	5/2 +	-24.35	-17.82	20
7/2 -	-1.52	6.09	89	3/2 +	-23.99	-17.66	21
3/2 -	-1.33	6.35	90	7/2 +	-23.92	-16.89	22
15/2 -	-1.11	6.44	91	1/2 -	-23.72	-16.60	23
5/2 +	-1.03	6.78	92	1/2 +	-23.42	-15.78	24
1/2 -	-0.99	6.92	93	9/2 +	-21.56	-15.03	25
1/2 +	-0.25	7.13	94	3/2 +	-21.55	-14.62	26
9/2 -	-0.14	7.15	95	5/2 +	-21.51	-14.44	27
7/2 +	0.22	7.54	96	1/2 +	-21.15	-13.79	28
3/2 +	0.24	7.56	97	3/2 +	-20.49	-13.19	29
3/2 -	0.25	8.03	98	1/2 +	-19.85	-12.67	30
9/2 +	0.38	8.54	99	1/2 +	-18.76	-12.46	31
11/2 +	0.49	8.84	100	7/2 -	-18.70	-12.41	32
7/2 -	0.55	8.96	101	5/2 -	-18.56	-11.88	33
1/2 -E	0.62	9.15	102	7/2 +	-18.32	-11.63	34
5/2 -	0.88	9.20	103	3/2 -	-17.96	-10.89	35
7/2 +	1.03	9.37	104	9/2 -	-17.88	-10.87	36
13/2 +	1.06	9.44	105	5/2 +	-17.38	-10.81	37
9/2 -	1.35	9.68	106	1/2 -	-17.37	-9.59	38
5/2 -E	1.50	10.01	107	3/2 +	-15.84	-8.65	39
1/2 -E	1.54	10.07	108	1/2 +	-15.67	-8.04	40
5/2 +E	1.67	10.40	109	5/2 -	-15.16	-7.68	41
3/2 -E	2.03	10.44	110	11/2 -	-15.13	-7.36	42
3/2 +E	2.46	10.50	111	3/2 -	-14.70	-7.35	43
3/2 -E	2.54	10.64	112	1/2 -	-14.24	-7.03	44
11/2 -	2.56	11.01	113	7/2 -	-14.13	-6.84	45
15/2 +	2.73	11.47	114	3/2 -	-13.99	-6.61	46
1/2 -E	2.76	11.79	115	5/2 -	-13.48	-6.59	47
1/2 +E	2.96	11.96	116	1/2 -	-13.34	-6.57	48
5/2 -E	3.30	12.66	117	7/2 +	-12.68	-6.09	49
1/2 -E	3.36	12.71	118	9/2 +	-12.53	-5.98	50
3/2 -E	3.44	12.78	119	5/2 +	-12.21	-5.60	51
1/2 -E	3.66	12.80	120	3/2 -	-11.66	-5.39	52
7/2 -E	3.66	13.19	121	1/2 -	-11.59	-4.99	53
11/2 -	3.79	13.26	122	3/2 +	-11.47	-4.23	54
5/2 +E	4.26	13.31	123	11/2 +	-11.38	-3.69	55

3/2 -E	4.32	13.36	124	1/2 +	-10.91	-3.54	56
7/2 +E	4.33	13.44	125	1/2 -	-10.73	-2.63	57
1/2 -E	4.38	13.57	126	9/2 -	-10.29	-2.40	58
7/2 -E	4.55	13.81	127	7/2 -	-10.23	-2.33	59
1/2 +E	4.57	13.85	128	13/2 +	-8.29	-1.79	60
3/2 +E	4.65	13.85	129	5/2 +	-8.26	-0.90	61
3/2 +E	4.81	13.92	130	3/2 +	-8.08	-0.61	62
1/2 +E	4.93	13.97	131	3/2 -	-7.97	-0.50	63
5/2 -E	5.03	14.64	132	7/2 +	-7.81	-0.18	64
9/2 +E	5.14	14.89	133	5/2 -	-7.68	-0.02	65
5/2 +E	5.61	14.93	134	1/2 +	-7.54	0.05	66
1/2 +E	5.74	15.06	135	1/2 -	-7.19	0.14	67
1/2 +E	6.19	15.07	136	5/2 +	-7.11	0.39	68

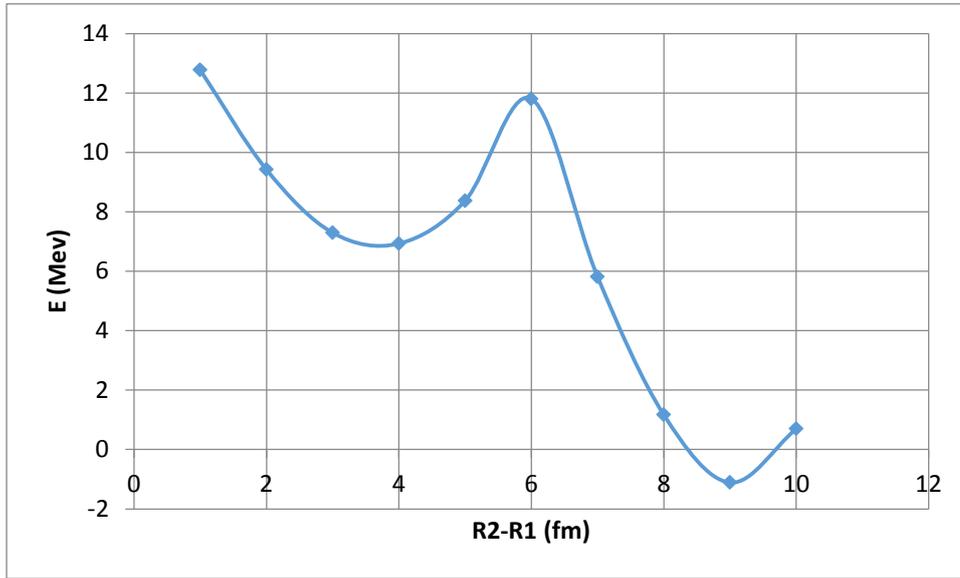
السوية	الطاقة	الطاقة MeV		السوية	الطاقة MeV	الطاقة	
	N نيوترون	P بروتون	الرقم		N نيوترون	P بروتون	الرقم
7/2 +	12.9731	22.41	205	1/2 +	6.23	15.27	137
3/2 +	13.0004	22.48	206	11/2 +	6.34	15.29	138
17/2 +	13.0749	22.51	207	1/2 -	6.70	15.32	139
5/2 +	13.1086	22.51	208	5/2 +	6.71	15.32	140
1/2 +	13.1617	22.59	209	1/2 +	6.71	15.72	141
9/2 -	13.2152	22.69	210	5/2 -	6.71	15.79	142
7/2 +	13.2635	23.26	211	3/2 +	6.83	16.39	143
11/2 +	13.4176	23.32	212	5/2 -	6.83	16.45	144
5/2 +	13.4862	23.34	213	17/2 -	7.04	16.70	145
3/2 +	13.5886	23.52	214	7/2 +	7.05	16.75	146
1/2 +	13.606	23.64	215	1/2 +	7.14	16.86	147
3/2 +	13.8003	23.89	216	3/2 -	7.27	16.89	148
1/2 +	13.816	23.95	217	13/2 -	7.37	17.05	149
9/2 +	13.8933	23.97	218	1/2 -	7.51	17.19	150
15/2 -	14.1143	24.32	219	9/2 +	7.51	17.20	151
7/2 -	14.2059	24.33	220	7/2 +	7.61	17.29	152
5/2 +	14.2154	24.33	221	5/2 +	7.82	17.55	153
9/2 -	14.2514	24.35	222	3/2 +	7.87	17.60	154
5/2 -	14.4173	24.51	223	1/2 +	7.89	17.61	155
3/2 -	14.5441	24.65	224	3/2 -	7.90	17.73	156
1/2 -	14.6895	24.71	225	9/2 -	7.91	17.85	157
19/2 +	14.8303	24.79	226	1/2 -	8.14	17.88	158
11/2 +	14.8501	24.82	227	5/2 +	8.32	17.90	159
3/2 +	15.1044	24.83	228	5/2 -	8.34	18.07	160
1/2 +	15.2601	24.83	229	11/2 +	8.47	18.23	161
11/2 -	15.4358	24.96	230	1/2 -	8.62	18.34	162
7/2 +	15.5833	25.02	231	7/2 -	8.63	18.39	163
5/2 +	15.7677	25.08	232	1/2 +	8.73	18.41	164

1/2 +	15.7726	25.20	233	3/2 +	8.82	18.48	165
3/2 +	15.8141	25.49	234	3/2 -	9.00	18.63	166
1/2 +	15.9587	25.80	235	9/2 +	9.14	18.82	167
7/2 +	16.0783	25.83	236	13/2 +	9.20	18.84	168
5/2 -	16.1416	25.89	237	1/2 -	9.24	18.97	169
13/2 -	16.1709	25.94	238	5/2 +	9.34	19.09	170
3/2 -	16.297	26.02	239	5/2 -	9.34	19.12	171
9/2 +	16.364	26.02	240	9/2 -	9.42	19.17	172
7/2 -	16.3788	26.03	241	7/2 +	9.59	19.70	173
5/2 +	16.4327	26.09	242	3/2 -	9.65	19.73	174
7/2 +	16.4351	26.15	243	1/2 -	9.69	19.77	175
11/2 -	16.497	26.16	244	3/2 +	9.87	20.10	176
1/2 -	16.5495	26.20	245	13/2 +	10.06	20.14	177
3/2 +	16.6083	26.23	246	11/2 -	10.18	20.17	178
9/2 -	16.6786	26.24	247	7/2 -	10.23	20.33	179
13/2 +	16.6966	26.24	248	5/2 -	10.30	20.45	180
11/2 +	16.7718	26.25	249	3/2 -	10.32	20.54	181
1/2 +	16.8131	26.47	250	1/2 -	10.36	20.62	182
13/2 -	16.8568	26.57	251	7/2 +	10.47	20.64	183
3/2 +	16.8891	26.64	252	7/2 -	10.48	20.65	184
13/2 +	17.0316	26.72	253	5/2 +	10.57	20.70	185
9/2 +	17.1484	26.93	254	3/2 -	10.64	20.77	186
1/2 +	17.1744	26.93	255	1/2 +	10.79	20.82	187
9/2 -	17.1917	26.97	256	5/2 -	10.91	20.83	188
15/2 +	17.1994	27.01	257	15/2 +	10.94	20.94	189
5/2 +	17.4439	27.03	258	1/2 -	10.99	20.97	190
9/2 +	17.444	27.24	259	9/2 -	11.01	20.99	191
5/2 -	17.5528	27.39	260	3/2 +	11.07	21.07	192
7/2 -	17.6603	27.39	261	9/2 +	11.28	21.14	193
3/2 -	17.7181	27.41	262	11/2 +	11.30	21.15	194
15/2 -	17.7965	27.52	263	3/2 -	11.32	21.18	195
11/2 -	17.8023	27.58	264	19/2 -	11.48	21.19	196
1/2 -	17.868	27.64	265	7/2 -	11.62	21.30	197
15/2 +	17.8685	27.69	266	1/2 +	11.69	21.51	198
5/2 +	17.914	27.96	267	1/2 -	11.81	21.57	199
7/2 -	17.9509	27.96	268	11/2 -	11.98	21.60	200
1/2 -	17.9548	28.32	269	9/2 +	12.23	21.83	201
3/2 -	17.9624	28.39	270	13/2 -	12.65	21.94	202
				13/2 +	12.68	22.01	203
				5/2 -	12.85	22.03	204

الجدول (I) الطاقة المقابلة لكل سوية للبروتونات و النترونات

نلاحظ التغير الذي يحدث لقيم الطاقة للبروتون عند السوية  $\frac{+1}{2}$  عند الرقم 66

وللنيوترونات عند السوية  $\frac{+7}{2}$  عند الرقم 96  
رسمنا في الشكل قيم الطاقة



نلاحظ أن هناك نهاية محلية صغيرة عند القيمة  $6.931 \text{ MeV}$  وهو حاجز الانشطار الأول وهناك نهاية محلية صغيرة أخرى عند القيمة  $-1.11 \text{ MeV}$  ، الحاجز الثاني . القيم التجريبية [ 15 ] تظهر أن هناك نهايتين محليتين لهذه النواة عند  $6.55$  و  $6.3$  كما أن الحسابات التي أجراها Mira وزملاؤه [16] أن هناك حاجز انشطار عند  $7.72$  و  $5.987$  ، وتعود الفروق بين القيم المحسوبة بهذا البحث والمحسوبة لدى Mira وزملاؤه [16] إلى أنهم قاموا بالتكامل من أجل ثلاثة أبعاد من وسطاء التشوه الخمسة المعروفة في نموذج بور وموتلسون الدوراني بينما استطعنا ببحثنا الحصول على حاجز الطاقة بإجراء تغير الطاقة للجملة بتغير البعد بين الشظيتين وحصلنا على قيمة أفضل بالنسبة للحاجز الأول.

### الاستنتاجات والتوصيات:

تم حل جملة المعادلات التي تصف حركة النكليونات واقتربها وابتعادها بين الشظيتين استخدم البرنامج *Nusol* لإيجاد الحلول لهذه الجملة . أجريت الحسابات من أجل النواة  ${}_{147}^{239}\text{U}_{92}$  وحصلنا على قيمة الطاقة  $6.931 \text{ MeV}$  وهي قيمة جيدة بالمقارنة مع النتائج التجريبية لحاجز الانشطار ، والقيمة الأخرى لم تكن جيدة لأن التكامل كان يجب أن يتم على الوسطاء الخمسة للتشوه، حسبت قيمة الطاقة المقابلة لكل سوية للبروتونات و النوترونات بحسب النموذج الطبقي مع كمون وودز ساكسون ، يجب إجراء الحسابات من أجل أبعاد التشوه الخمسة باستخدام هذا البرنامج، ويمكن استخدامه لتقدير قيمة حاجز الانشطار.

## References:

- [1] HOLZER, Peter; MOSEL, Ulrich; GREINER, Walter. Double-centre oscillator and its application to fission. *Nuclear Physics A*, 1969, 138.2: 241-252
- [2] EISENBERG, Judah M.; GREINER, Walter. Nuclear Theory. Excitation mechanisms of the nucleus. Vol. 2. 1976.
- [3] IRVINE, J. M. Nuclear structure theory. *Physics Bulletin*, 1970, 21.4: 149
- [4] WONG, Samuel SM. Introductory Nuclear Physics. Printice-hall,1990.
- [5] Solovev, V. G., Theory of complex nuclei, Pergamon Press, 1976,
- [6] COHEN, Stanley; SWIATECKI, Wladyslaw J. The deformation energy of a charged drop: Part v: Results of electronic computer studies. *Annals of Physics*, 1963, 22.3: 406-437.
- [7] STRUTINSKY, V. M. Shell effects in nuclear masses and deformation energies. *Nuclear Physics A*, 1967, 95.2: 420-442.
- [8] PRUESS, K.; LICHTNER, P. Calculations of single-particle polarization using a realistic two-center shell model. *Nuclear Physics A*, 1977, 291.2: 475-509.
- [9] NUHN, Gerhard; SCHEID, Werner; PARK, Jae Young. Two-center shell model for deformed and arbitrarily orientated nuclei. *Physical Review C*, 1987, 35.6: 2146.
- [10] Revai, J. JiNR, E4-9429, Dubna, 1974.
- [11] DIAZ-TORRES, Alexis; SCHEID, Werner. Two center shell model with Woods–Saxon potentials: adiabatic and diabatic states in fusion. *Nuclear Physics A*, 2005, 757.3-4: 373-389.
- [12] MILEK, B.; REIF, R.; REVAI, J. Three-body model for nucleon transfer and emission in heavy-ion collisions. *Physics Letters B*, 1985, 150.1-3: 65-70.
- [13] GYARMATI, B.; KRUPPA, A. T. The potential separable expansion as applied to calculating orbitals in a deformed potential. *Nuclear Physics A*, 1982, 378.3: 407-417
- [14] GRAEN, Timo; GRUBMÜLLER, Helmut. NuSol—Numerical solver for the 3D stationary nuclear Schrödinger equation. *Computer Physics Communications*, 2016, 198: 169-178.
- [15] OHSAWA, Takaaki, et al. Systematic analysis of fission cross sections of actinides by means of double-humped barrier model. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1984, 21.12: 887-906.
- [16] MIREA, Mihail; TASSAN-GOT, Laurent. Th and U fission barriers. *Central European Journal of Physics*, 2011, 9.1: 116-122.