

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΤΟΝ  
ΚΩΔΙΚΑ FISRACT ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΥΝΤΗΞΗΣ**

**MATERIALS ACTIVATION CALCULATIONS USING  
THE FISRACT CODE FOR APPLICATIONS IN FUSION  
TECHNOLOGY**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ του

**ΠΑΥΛΟΥ ΓΙΑΝΝΑΚΟΥ**

*Σπουδαστή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ*

**Επίβλεψη:**

- [1] Ν. Πετρόπουλος, *Επίκουρος Καθηγητής, ΕΜΠ*
- [2] Ι. Σταματελάτος, *Ερευνητής Α΄, ΙΠΡΕΤΕΑ, ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος*

ΑΘΗΝΑ 2019

## Αποποίηση τυχόν ευθυνών

Αυτό το κείμενο συντάχθηκε ως προϊόν φοιτητικής Διπλωματικής Εργασίας και δεν είναι το αποτέλεσμα επαγγελματικής μελέτης διπλωματούχου μηχανικού. Στο κείμενο αυτό περιέχονται επιστημονικές πληροφορίες και αποτελέσματα σε σχέση με το αντικείμενο που περιγράφεται στον τίτλο. Για το περιεχόμενο αυτό έχει δοθεί κατά το δυνατό η αναγκαία προσοχή ώστε να διασφαλισθεί η ποιότητά του κατά τη στιγμή της δημοσίευσης. Διευκρινίζεται ότι η δημοσίευση του κειμένου αυτού γίνεται χωρίς να υπάρχει άμεση ή έμμεση σύνδεση της συγγραφέως ή των επιβλεπόντων με σχετικά εμπορικά ή οικονομικά συμφέροντα. Ούτε ο συγγραφέας, ούτε οι επιβλέποντες του, ούτε το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο ούτε το ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος διατυπώνουν κάποια γραπτή εγγύηση, ρητή ή έμμεση, συμπεριλαμβανομένων των εγγυήσεων που αφορούν στην ασφάλεια και την προστασία ατόμων και υλικού και στην καταλληλότητα για χρήση των περιεχόμενων επιστημονικών πληροφοριών και αποτελεσμάτων για τους σκοπούς επαγγελματικών εφαρμογών του κώδικα FISPACT ή γενικότερα άλλου σχετικού ραδιολογικού επιστημονικού ή / και τεχνολογικού προβλήματος. Ούτε ο συγγραφέας, ούτε οι επιβλέποντες του ούτε το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο ούτε το ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος αποδέχονται κάποια νομική ή άλλη ευθύνη για την ποιότητα, την ακρίβεια, την πληρότητα, τη χρησιμότητα, τυχόν λάθη, τυχόν παραλείψεις στο περιεχόμενο του κειμένου ή για τις συνέπειες οποιασδήποτε απόφασης που θα ληφθεί με βάση το περιεχόμενο αυτό. Επίσης δεν αποδέχονται ειδικότερα και νομική ευθύνη για την απώλεια προσδοκώμενων κερδών ή για την δημιουργία συνακόλουθων ζημιών από τη χρήση του περιεχόμενου αυτού. Παρόλα αυτά, καταβλήθηκε σημαντική προσπάθεια ώστε η παραγωγή των περιεχόμενων αποτελεσμάτων να προκύψει ως αποτέλεσμα καλών πρακτικών επιστημονικής ανάλυσης. Ο συγγραφέας και οι επιβλέποντες είναι διαθέσιμοι για την παροχή συμβουλών σε ό,τι αφορά επιβεβαίωση των περιεχόμενων αποτελεσμάτων καθώς και για οδηγίες σχετικά με την ενδεδειγμένη χρήση τους

## Πνευματικά δικαιώματα και σχετικές ευθύνες

Οι αναγνώστες μπορούν να χρησιμοποιούν το μέρος του περιεχομένου που τους ενδιαφέρει για δική τους προσωπική και αποκλειστική χρήση αλλά όχι για δημοσίευση ή παρουσίασή του ως δικό τους ή χωρίς κατάλληλη αναφορά στην πηγή. Τυχόν παράλειψη της αναφοράς στην πηγή συνιστά το αδίκημα της λογοκλοπής. Οι αναγνώστες έχουν τη ρητή υποχρέωση να μην παραβιάζουν ή να μην ενθαρρύνουν / επιτρέπουν την παραβίαση των νομίμων πνευματικών δικαιωμάτων των σχετικών με το κείμενο αυτό χρησιμοποιώντας τα περιεχόμενα αποτελέσματα με ανάρμοστο τρόπο. Ούτε ο συγγραφέας, ούτε οι επιβλέποντες θα αποδεχθούν ποτέ όποια ευθύνη τυχόν προκύψει ως συνέπεια παραβιάσεων πνευματικών δικαιωμάτων. Τα φυσικά ή τα νομικά πρόσωπα, τα υπεύθυνα για τις παραβιάσεις αυτές θα είναι, ως εκ τούτου, τα μόνα υπόλογα για τυχόν ζημίες ή άλλες συνέπειες. Το κείμενο αυτό προστατεύεται σε ό,τι αφορά τα πνευματικά δικαιώματα από άδεια [Creative Commons License](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/) by Attribution / No Derivatives, βάσει της οποίας οι χρήστες επιτρέπεται κυρίως να αντιγράψουν, διανέμουν και να χρησιμοποιούν το περιεχόμενο του (αλλά να μην δημιουργούν παράγωγα από αυτό), υπό την προϋπόθεση ότι κάνουν την πρέπουσα αναφορά στην πηγή. Όσοι από εσάς γνωρίζετε την συμβολική γλώσσα της αντίστοιχης άδειας Creative Commons, η σχετική εικόνα σήμανσης έχει ως εξής:



### **Η συνιστώμενη αναφορά στην πηγή είναι:**

Giannakou, P., Materials Activation Calculations Using the FISPACT Code for Applications in Fusion Technology, Diploma Dissertation (in Greek), Nuclear Engineering Laboratory, National Technical University of Athens, Athens, 2019 available on-line (αναφέρατε διαδικτυακό σύνδεσμο και ημερομηνία ανάγνωσης). Σε περίπτωση που εντοπίσατε αυτό το κείμενο μέσω άλλης δημοσίευσης των συγγραφέων, παρακαλείσθε να αναφέρετε ως πηγή και αυτή τη δημοσίευση.

*Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια συνεργασίας του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ και του Ινστιτούτου Πυρηνικών και Ραδιολογικών Επιστημών, Τεχνολογίας και Ασφάλειας του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος».*

*Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή Ν. Πετρόπουλο και τον Ερευνητή Α' Ι. Σταματελάτο για την καθοδήγηση αλλά και την εμπιστοσύνη που έδειξαν σε εμένα σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της Διπλωματικής μου Εργασίας. Τους ευχαριστώ επίσης για τις γνώσεις που μου προσέφεραν, απαραίτητα εφόδια για τη μετέπειτα πορεία μου ως μηχανικός.*

*Ευχαριστώ επίσης τις διδάκτορες Μ. Σάββα και Δ. Βασιλοπούλου για την έμπρακτη βοήθεια και ουσιαστική συνεισφορά τους στην εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας.*

*Τέλος ευχαριστώ την οικογένεια και τους φίλους μου για την αγάπη και στήριξη που μου προσέφεραν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.*

*Πάυλος Γιαννακού*

*Αθήνα, Σεπτέμβριος 2019*

## Περίληψη

Η πυρηνική σύντηξη αποτελεί μια από τις υποψήφιες κύριες πηγές ενέργειας στο μέλλον, ως μια καθαρή από την άποψη εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα μορφή ενέργειας. Κατά τη σύντηξη δεν παράγονται ραδιενεργά κατάλοιπα υψηλής ραδιενέργειας (αλλιώς: ενεργότητας). Τα μόνα ζητήματα καταλοίπων προκύπτουν από την παραγωγή τριτίου και προϊόντων ενεργοποίησης των δομικών υλικών του αντιδραστήρα. Στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος έρευνας που γίνεται για την τεχνολογία πυρηνικής σύντηξης στο ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, μελετήθηκε η κατασκευή ανιχνευτή νετρονίων για χρήση σε περιβάλλον αντιδραστήρα σύντηξης. Η ανίχνευση νετρονίων εντός του αντιδραστήρα αποτελεί σημαντικό ζήτημα, καθώς παρέχει πληροφορίες ενεργοποίησης αλλά και απόδοσης της σύντηξης, ενώ σημειώνεται ότι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ακραίες συνθήκες που επικρατούν.

Ο ανιχνευτής αποτελείται από εννέα μεταλλικά ελάσματα σε κέλυφος από κεραμικό υλικό, τα οποία ακτινοβολούνται με νετρόνια φάσματος μέχρι 14 MeV. Με γ-φασματοσκοπία μελετάται η ενεργοποίησή του από τα νετρόνια και καταγράφεται η πειραματική μέτρηση της ενεργότητας για κάθε φωτοκορυφή. Μετά από στάθμιση των αποτελεσμάτων προκύπτουν οι πειραματικές τιμές για κάθε ισότοπο. Ο υπολογιστικός προσδιορισμός της ενεργότητας των ελασμάτων γίνεται με τον κώδικα FISPACT II 4.0. Η προσομοίωση της ακτινοβόλησης γίνεται για δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιείται ως βιβλιοθήκη δεδομένων ενεργών διατομών η EAF-2010 με φάσμα ενεργειακού διαμερισμού VITAMIN-J (175 ενεργειακών ομάδων), και στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιείται αντίστοιχα η TENDL-2017 με φάσμα ενεργειακού διαμερισμού CCFE (709 ενεργειακών ομάδων). Δοκιμάζεται επίσης η εντολή GRPCONVERT για τη μετατροπή φάσματος από 175 ενεργειακές ομάδες σε 709 ενεργειακές ομάδες, χρησιμοποιώντας και στις δύο περιπτώσεις την TENDL-2017.

Μέσω της σύγκρισης πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων γίνεται έλεγχος της στατιστικής συμφωνίας τους. Ελέγχεται έτσι η εγκυρότητα του κώδικα με χρήση των δύο προαναφερθέντων βιβλιοθηκών, συνυπολογίζοντας τις ενεργότητες και τις αβεβαιότητες που προκύπτουν στις δύο περιπτώσεις. Γίνεται επίσης σύγκριση των αποτελεσμάτων που δίνει ο κώδικας με το αρχικό και το φάσμα που έχει μετατραπεί με την εντολή GRPCONVERT. Τέλος από τις συγκρίσεις που έγιναν επιβεβαιώνεται η εγκυρότητα του FISPACT για την εκτίμηση της ενεργότητας των μεταλλικών στόχων του ανιχνευτή VERDI μετά από ακτινοβόληση σε πεδίο νετρονίων. Επομένως, ο κώδικας FISPACT II επιτρέπει προβλέψεις της απόκρισης του ανιχνευτή σε διαφορετικά περιβάλλοντα νετρονίων χωρίς την ανάγκη να εκτελούνται δύσκολες και χρονοβόρες πειραματικές δοκιμές.

## Abstract

Nuclear fusion is one of the most promising future energy sources, since it is carbon dioxide free. It does not produce highly radioactive waste products, whereas the only radioactive products are tritium and activation products of the reactor materials. As a part of the European fusion research program, a neutron activation detector was developed at NCSR Demokritos, for neutron measurements inside a fusion reactor. Neutron detection is an important issue for fusion, since it provides information about activation and fusion yield, under the harsh environment conditions encountered in a fusion plant.

The detector comprises of a ceramic material containing nine metallic foils, which are irradiated with neutron spectrum of 14 MeV. The experimental activation of each nuclide was measured by means of gamma spectrometry and by weighting the result of each photopeak. Version 4.0 of FISPACT code was used for the computational measurement of activation, for the first detector of the second VERDI project, in two different cases. In the first case EAF-2010 was used as a cross section data library with VITAMIN-J (175 energy groups spectrum), while in the second case TENDL-2017 was used with CCFE (709 energy groups spectrum). GRP CONVERT, which converts a group structure of 175 groups to 709 groups is also examined using in both cases TENDL-2017.

The experimental and computational results are then compared and their statistical agreement is checked. As a result, the validation of FISPACT is checked using both libraries, taking into account the activities and the uncertainties in each case. The results of original and converted with GRP CONVERT spectrum are also compared. In conclusion the validation of FISPACT II 4.0 is confirmed for calculations of the VERDI project. Therefore, FISPACT II code enables predictions of the detector response in different neutron environments without the need to perform difficult and time consuming experiments.

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
<b>Abstract.....</b>	<b>6</b>
<b>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....</b>	<b>9</b>
<b>Κεφάλαιο 2: Πυρηνική Σύντηξη - Ανίχνευση νετρονίων .....</b>	<b>11</b>
2.1 Η Πυρηνική Σύντηξη .....	11
2.2 Ο πειραματικός αντιδραστήρας σύντηξης τύπου TOKAMAK .....	13
2.3 Ανίχνευση νετρονίων σε αντιδραστήρα σύντηξης.....	15
2.4 Το πείραμα VERDI .....	16
2.5 Οι πειραματικές μετρήσεις .....	18
<b>Κεφάλαιο 3: Υπολογιστική μέθοδος.....</b>	<b>20</b>
3.1 Ο κώδικας FISPACT-II.....	20
3.1.1 Φυσικό και μαθηματικό υπόβαθρο (μοντέλο επίλυσης) .....	21
3.1.2 Αρχεία εισόδου .....	23
3.1.3 Αρχεία εξόδου .....	24
3.1.4 Βιβλιοθήκες δεδομένων.....	25
3.1.5 Ενεργειακοί διαμερισμοί.....	26
3.2 Ακτινοβολήση δειγμάτων – Υπολογιστική Μέθοδος.....	27
3.2.1 Δεδομένα εισόδου .....	27
3.2.2 Αρχείο file .....	31
3.3 Υπολογισμός Αβεβαιότητας των υπολογιστικών μετρήσεων.....	32
3.4 Εντολή GRPCONVERT .....	33
<b>Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα .....</b>	<b>35</b>
4.1 Αντιδράσεις παραγωγής ισοτόπων.....	35
4.2 Υπολογιστικά αποτελέσματα – συγκρίσεις.....	35
4.2.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων EAF-2010 και πειραματικών μετρήσεων.....	37
4.2.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων TENDL-2017 και πειραματικών .....	39
4.3 Αποτελέσματα για κάθε ισότοπο .....	41
4.4 Παρατηρήσεις .....	50
4.5 Αποτελέσματα χρήσης της εντολής GRPCONVERT .....	50
4.5.1 Περικοπή του κατώτατου ενεργειακού διαστήματος.....	51
4.5.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων κανονικού και μετατραπέζιου φάσματος.....	53
<b>Κεφάλαιο 5: Γενική Συζήτηση – Συμπεράσματα.....</b>	<b>55</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>61</b>

<b>Παράρτημα.....</b>	<b>64</b>
Παράρτημα Α': Κώδικες ακτινοβόλησης (αρχεία εισόδου).....	64
Α1 Ag με EAF-2010 και VITAMIN-J( 175).....	64
Α2 Ag με TENDL-2017 και CCFE (709).....	65
Παράρτημα Β': Ενεργειακοί διαμερισμοί .....	66
Β1: VITAMIN-J (175) .....	66
Β2: CCFE (709) .....	67
Παράρτημα Γ' : Διαγράμματα ενεργότητας για κάθε υλικό σε συνάρτηση με το χρόνο μετά το τέλος της ακτινοβόλησης. ....	71
Γ1: Υπολογισμοί με τον κώδικα FISPACT II με χρήση της βιβλιοθήκης διατομών EAF-2010 (175).....	71
Γ2: Υπολογισμοί με τον κώδικα FISPACT II με χρήση της βιβλιοθήκης διατομών TENDL-2017 (709).....	74
Παράρτημα Δ' : Πίνακες αποτελεσμάτων .....	77
Δ1: Πειραματικά αποτελέσματα από γ-φασματοσκοπία (Sanna et.al, 2018) .....	77
Δ2: Σταθμισμένα πειραματικά αποτελέσματα .....	79
Δ3: Υπολογιστικά αποτελέσματα με χρήση EAF-2010 και VITAMIN-J (175) .....	80
Δ4: Υπολογιστικά αποτελέσματα, με χρήση TENDL-2017 και CCFE (709).....	81
Παράρτημα Ε: Αποτελέσματα συγκρίσεων.....	82
Ε1: Σύγκριση αποτελεσμάτων EAF-2010 με πειραματικές μετρήσεις (C/E και U-test) ..	82
Ε2: Σύγκριση αποτελεσμάτων TENDL-2017 με πειραματικές μετρήσεις (C/E και U-test) .....	83
Ε3: Σύγκριση αποτελεσμάτων EAF-2010 και TENDL-2017 (E/T και U-test) .....	84
Παράρτημα ΣΤ' :Αποτελέσματα εντολής GRPCONVERT .....	85
ΣΤ1: Ισότοπα που παράγονται με αντιδράσεις (n,g) στο αυθεντικό φάσμα των 709 ....	85
ΣΤ2: Ισότοπα που παράγονται με αντιδράσεις (n,g) στο μετατραπέν φάσμα, με κάτω ενεργειακό όριο το $1 \times 10^{-2}$ eV.....	85
ΣΤ3: Ισότοπα που παράγονται με αντιδράσεις (n,g) στο μετατραπέν φάσμα, με κάτω ενεργειακό όριο το $1 \times 10^{-5}$ eV.....	85
ΣΤ4: Σύγκριση αποτελεσμάτων μετατραπέντος φάσματος με ενεργειακό όριο $1 \times 10^{-2}$ και $1 \times 10^{-5}$ eV (C/O και U-test).....	85
ΣΤ5: Αποτελέσματα κανονικού φάσματος.....	86
ΣΤ6: Αποτελέσματα μετατραπέντος φάσματος .....	87
ΣΤ7: Σύγκριση αποτελεσμάτων κανονικού και μετατραπέντος φάσματος (λόγοι C/O και U-test).....	88



## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Η πυρηνική σύντηξη αποτελεί δυνητικά μια από τις πηγές ενέργειας του μέλλοντος, όντας μια «καθαρή» πηγή ενέργειας με μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Πλεονεκτεί ως προς την πυρηνική σχάση, καθότι κατά τη σύντηξη δεν παράγονται κατάλοιπα υψηλής ραδιενέργειας, ενώ όσα παράγονται είναι βραχύβια (Barbarino, 2018). Ως εκ τούτου σημαντική ερευνητική προσπάθεια καταβάλλεται με σκοπό την ανάπτυξη της τεχνολογίας που θα επιτρέψει την παραγωγή ενέργειας μέσω της ελεγχόμενης θερμοπυρηνικής σύντηξης. Στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Προγράμματος έρευνας στην τεχνολογία σύντηξης που πραγματοποιείται στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών (ΕΚΕΦΕ) «Δημόκριτος», γίνεται προσπάθεια για την ανάπτυξη ανιχνευτή με τη δυνατότητα μέτρησης της ροής των νετρονίων με ακρίβεια καλύτερη από  $\pm 5\%$ , χωρίς να επηρεάζεται από την υψηλή θερμοκρασία, τα ισχυρά και μεταβαλλόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία και το ακραίο περιβάλλον που συναντάται στους αντιδραστήρες σύντηξης. Το πείραμα VERDI (noVEI neutRon Detector for fusIon) με τον πιο πάνω σκοπό, εξηγείται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 2.

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία έχει σκοπό την επιβεβαίωση υπολογισμών ενεργοποίησης ανιχνευτών VERDI που πραγματοποιήθηκαν μέσω του κώδικα FISPACT-II, ως προς πειραματικές τιμές. Προς επίτευξη του πιο πάνω σκοπού, πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί ενεργοποίησης του ανιχνευτή σε ακτινοβολία πεδίου νετρονίων 14 MeV, με χρήση διαφορετικών βιβλιοθηκών δεδομένων διατομών πυρηνικών αντιδράσεων. Συγκεκριμένα οι υπολογισμοί έγιναν με χρήση της βιβλιοθήκης EAF-2010 (με φάσμα 175 ενεργειακών ομάδων), καθώς και με χρήση της βιβλιοθήκης TENDL-2017 (με φάσμα 709 ενεργειακών ομάδων). Γίνεται επίσης δοκιμή μετατροπής φάσματος από 175 σε 709 ενεργειακές ομάδες με την εντολή GRPCONVERT και γίνονται συγκρίσεις προς επιβεβαίωση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων του μετατραπέντος φάσματος.

Το 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιλαμβάνει μια σύντομη περιγραφή της τεχνολογίας σύντηξης καθώς και της ανάγκης μέτρησης των νετρονίων σε περιβάλλον αντιδραστήρα σύντηξης. Πιο συγκεκριμένα γίνεται περιγραφή της λειτουργίας του αντιδραστήρα TOKAMAK και εξηγούνται οι συνθήκες εντός του αντιδραστήρα, που καθιστούν αναγκαία την παρακολούθηση των νετρονίων. Περιγράφεται επίσης εν συντομία το ερευνητικό έργο VERDI, με σκοπό την ανάπτυξη ανιχνευτή για χρήση σε περιβάλλον αντιδραστήρα σύντηξης. Τέλος εξηγείται η ανάγκη για χρήση και επιβεβαίωση των υπολογιστικών μεθόδων, ειδικότερα στην πυρηνική τεχνολογία.

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζεται λεπτομερώς η υπολογιστική μέθοδος που ακολουθήθηκε μέσω του FISPACT. Αρχικά γίνεται μια σύντομη αναφορά στην ακτινοβολία των υλικών με νετρόνια, την οποία προσομοιώνει ο κώδικας. Έπειτα περιλαμβάνεται μια περιγραφή των λειτουργιών του, των εντολών και των βημάτων

που ακολουθούνται. Παρουσιάζονται οι εισοδοι και οι έξοδοι του κώδικα, οι βιβλιοθήκες δεδομένων, οι ενεργειακές διαμερίσεις, το φυσικό και μαθηματικό υπόβαθρο πίσω από τον κώδικα, καθώς και τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από αυτόν. Παρουσιάζεται επίσης η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο δίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα και επεξηγούνται οι πυρηνικές αντιδράσεις που οδήγησαν στην παραγωγή των ισοτόπων που εξετάζονται. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα που εξάγονται με τον κώδικα FISPACT με χρήση των βιβλιοθηκών διατομών EAF-2010 και TENDL-2017. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών συγκρίνονται με τις πειραματικές τιμές. Γίνεται σχολιασμός των αριθμητικών αποτελεσμάτων ξεχωριστά για κάθε ισότοπο και επεξηγούνται τα αίτια τυχών μη αναμενόμενων τιμών. Εξετάζονται επίσης τα αποτελέσματα που δίνει η εντολή GRPCONVERT.

Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται μια συνολική συζήτηση επί των αποτελεσμάτων και εξετάζεται η επίτευξη του στόχου της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Συγκεκριμένα σχολιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης της κάθε βιβλιοθήκης με τα πειραματικά καθώς και τα αποτελέσματα κατά τον έλεγχο της εντολής GRPCONVERT. Επίσης συγκρίνονται οι βιβλιοθήκες διατομών EAF-2010 και TENDL-2017 ως προς τις τιμές ενεργότητας αλλά και τις αβεβαιότητες που δίνουν για κάθε ισότοπο. Τέλος δίνονται οι τελικές παρατηρήσεις και εξετάζεται η επίτευξη του στόχου της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

## Κεφάλαιο 2: Πυρηνική Σύντηξη - Ανίχνευση νετρονίων

Στο Κεφάλαιο αυτό περιγράφονται σύντομα οι αρχές της παραγωγής ενέργειας μέσω σύντηξης καθώς και η ανάγκη ανίχνευσης νετρονίων σε αντιδραστήρα σύντηξης τύπου TOKAMAK. Περιγράφεται επίσης το πείραμα VERDI καθώς και η αναγκαιότητα σύγκρισης υπολογιστικών και πειραματικών μεθόδων. Το Κεφάλαιο παρέχει το θεωρητικό υπόβαθρο της Διπλωματικής Εργασίας, τη βάση από την οποία αντλήθηκαν δεδομένα και στην οποία θα απευθύνονται τα τελικά συμπεράσματα.

### 2.1 Η Πυρηνική Σύντηξη

Πυρηνική σύντηξη είναι η συνένωση δύο πυρήνων ελαφρύτερων στοιχείων σε ένα πυρήνα βαρύτερου στοιχείου. Για πυρήνες ελαφρύτερους του  $^{56}\text{Fe}$  η συνένωση αυτή είναι εξώθερμη, ενώ για βαρύτερους του  $^{56}\text{Fe}$  πυρήνες είναι ενδόθερμη. Για την επίτευξη της σύντηξης πρέπει να υπερνικηθούν οι ισχυρές ηλεκτροστατικές απωστικές δυνάμεις μεταξύ των προς σύντηξη πυρήνων. Επομένως πρέπει να δοθεί αρκετή ενέργεια στα άτομα, ώστε να πλησιάσουν μεταξύ τους και να συντηχθούν. Όταν αυτό επιτευχθεί τότε σχηματίζεται το πλάσμα, η λεγόμενη «τέταρτη κατάσταση» της ύλης, η οποία περιλαμβάνει τα καύσιμα σε ένα νέφος ιόντων και ηλεκτρονίων. Το πλάσμα είναι ηλεκτρικά αγώγιμο, ενώ ελέγχεται υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου, εξαιτίας του διαχωρισμού των φορτίων του (τα ηλεκτρόνια διαχωρίζονται από τον πυρήνα).

Η πυρηνική σύντηξη είναι η διαδικασία με την οποία παράγεται η ενέργεια στα άστρα. Στον ήλιο επικρατούν θερμοκρασίες 10-15 εκατομμυρίων βαθμών Κελσίου και πιέσεις 300 εκατομμυρίων ατμοσφαιρών λόγω της τεράστιας βαρύτητας, κάτι που καθιστά εφικτή την επίτευξη συνθηκών που επιτρέπουν την θερμοπυρηνική σύντηξη. Στη γη η απουσία αυτής της βαρύτητας οδηγεί στην ανάγκη υψηλότερων θερμοκρασιών, της τάξης των 150 εκατομμυρίων βαθμών Κελσίου, οι οποίες είναι απαραίτητες για τη δημιουργία και συντήρηση του πλάσματος. Το βασικό τεχνολογικό πρόβλημα για την επίτευξη της σύντηξης στη γη είναι η δημιουργία ενός συστήματος που θα διατηρεί το πλάσμα περιορισμένο για αρκετό χρόνο στην απαραίτητη πυκνότητα και θερμοκρασία. Η υψηλή θερμοκρασία είναι απαραίτητη για να έχουμε συγκρούσεις υψηλής ενέργειας, ενώ η υψηλή πυκνότητα και ο χρόνος περιορισμού (retention time) αυξάνουν την πιθανότητα να συμβούν οι συγκρούσεις. Αυτό αποτελεί το λεγόμενο «τριπλό γινόμενο» που μεγιστοποιεί την πιθανότητα της πυρηνικής σύντηξης. Η εξίσωση 2.1 που είναι γνωστή σαν το κριτήριο του Lawson (Lawson J.D., 1955), παρουσιάζει το γινόμενο αυτό.

$$\rho \cdot T \cdot t_E = \max \quad (2.1)$$

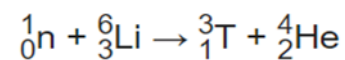
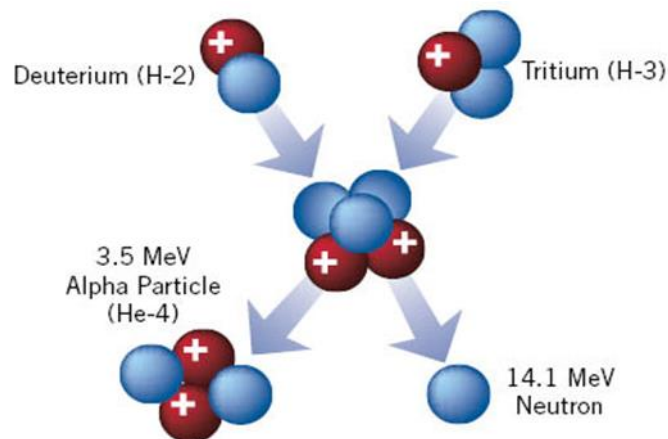
όπου

$\rho$  : η πυκνότητα του πλάσματος

$T$ : η θερμοκρασία

$t_E$ : ο χρόνος περιορισμού

Η πιο εύκολα πραγματοποιήσιμη πυρηνική αντίδραση σύντηξης είναι ο σχηματισμός πυρήνα ηλίου από τη σύντηξη μεταξύ δύο ισότοπων του υδρογόνου, του δευτερίου και του τριτίου. Το δευτέριο είναι ισότοπο του υδρογόνου, που διαθέτει ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο. Είναι ευρέως διαθέσιμο στη φύση αφού υπάρχει στο νερό σε αναλογία  $30\text{g/m}^3$ . Το τρίτιο, επίσης ισότοπο του υδρογόνου διαθέτει ένα πρωτόνιο και δύο νετρόνια (Hellasfusion, 2010). Παράγεται με νετρονική ενεργοποίηση του λιθίου, το οποίο είναι ένα ελαφρύ μέταλλο που υπάρχει στη φύση κυρίως στη μορφή ιοντικών ενώσεων. Τα δύο ισότοπα συντήκονται μεταξύ τους σχηματίζοντας ένα πυρήνα ηλίου (σωματίδιο-α) ενώ εκλύεται ένα νετρόνιο ενέργειας 14.1 MeV. Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η αντίδραση.

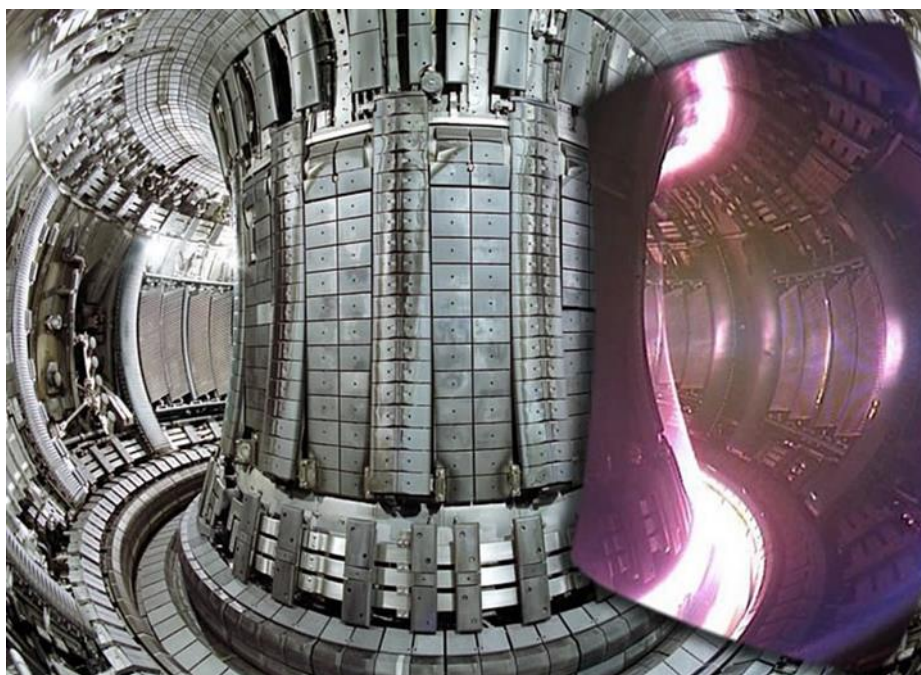


**Σχήμα 2.1** Η αντίδραση πυρηνικής σύντηξης DT (δεξιά κάτω)

## 2.2 Ο πειραματικός αντιδραστήρας σύντηξης τύπου ΤΟΚΑΜΑΚ

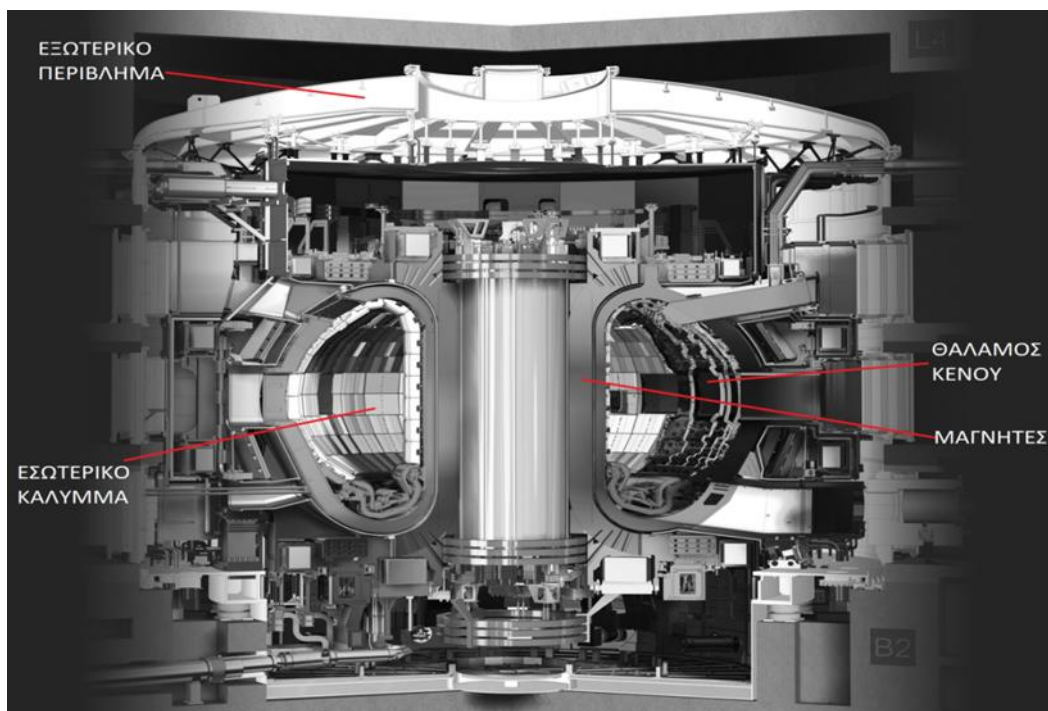
Ο πιο υποσχόμενος αντιδραστήρας σύντηξης είναι ο αντιδραστήρας τύπου «ΤΟΚΑΜΑΚ». Το όνομα ΤΟΚΑΜΑΚ είναι αρκτικόλεξο από τη ρωσική ονομασία του «δακτυλιοειδούς θαλάμου με μαγνητικά πεδία» και αναφερόταν στον πρώτο αντιδραστήρα σύντηξης που κατασκευάστηκε το 1968 στην πρώην Σοβιετική Ένωση. Εκ τότε έγιναν πολυάριθμες προσπάθειες λειτουργίας πειραματικών πυρηνικών αντιδραστήρων σύντηξης, όπως ο TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) στις ΗΠΑ (1982–1997), ο NSTX (National Spherical Torus Experiment) στις ΗΠΑ (1999 – σήμερα), ο ALCATOR C-Mod στις ΗΠΑ (1991 – 2016), ο TCV (Tokamak Configuration Variable) στην Ελβετία (1992 – σήμερα), ο DIII-D στις ΗΠΑ (1986 – σήμερα), ο ASDEX U (Axially Symmetric Divertor Experiment Upgrade) στη Γερμανία (1991 – σήμερα), ο JET (Joint European Torus) στην Αγγλία (1984 – σήμερα), ο JT 60 στην Ιαπωνία (1985 – σήμερα) και ο ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) στη Γαλλία (σε κατασκευή).

Στο κέντρο ενός τέτοιου αντιδραστήρα βρίσκεται ένας τοροειδής (δακτυλιοειδής από περιστροφή) θάλαμος κενού, εντός του οποίου συγκρατείται το πλάσμα. Τα ιόντα του πλάσματος περιορίζονται στο εσωτερικό του θαλάμου από ισχυρά μαγνητικά πεδία. Γύρω από το θάλαμο βρίσκεται το περίβλημα, που θωρακίζει την κατασκευή και τους μαγνήτες από τη θερμότητα και τα νετρόνια υψηλής ενέργειας. Στο σχήμα 2.2 φαίνεται το εσωτερικό του θαλάμου κενού όπου δημιουργείται το πλάσμα, στον πειραματικό αντιδραστήρα JET.



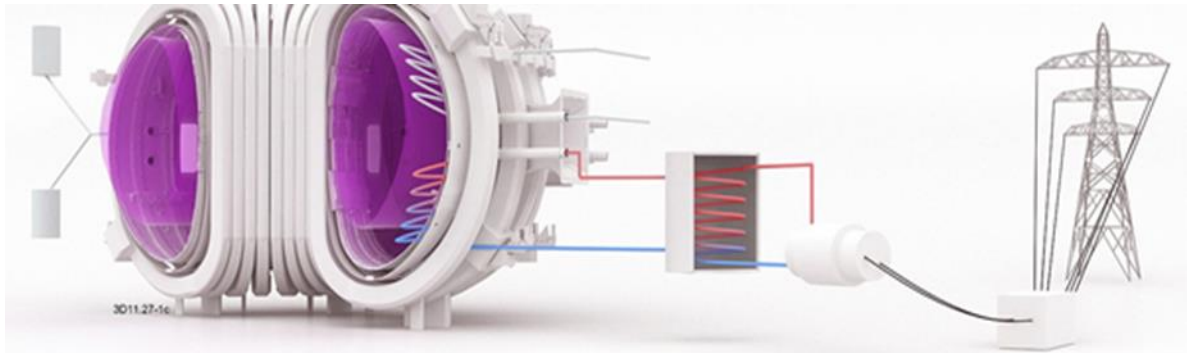
**Σχήμα 2.2:** Ο ερευνητικός αντιδραστήρας σύντηξης JET (EUROfusion, 2019)

Κατά τη διαδικασία, δημιουργείται στο εσωτερικό του θαλάμου υψηλό κενό. Έπειτα τίθενται σε λειτουργία τα μαγνητικά συστήματα και εισάγονται τα αέρια καύσιμα (για παράδειγμα δευτέριο και τρίτιο). Με τη χρήση ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου, τα καύσιμα ιονίζονται, τα φορτία διαχωρίζονται και σχηματίζεται το πλάσμα. Με τη χρήση βοηθητικών μεθόδων όπως οι δέσμες ουδέτερων σωματιδίων και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα επιτυγχάνεται η αύξηση της θερμοκρασίας στα απαραίτητα για τη σύντηξη επίπεδα. Το νετρόνιο, όντας ηλεκτρικά ουδέτερο, διαφεύγει, αλληλεπιδρά και τελικά απορροφάται από το εσωτερικό κάλυμμα και η κινητική του ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα. Στο ITER (ITER, 2019) τα νετρόνια θα απορροφώνται από ένα στρώμα λιθίου (breeding blanket), με το οποίο αντιδρούν παράγοντας τρίτιο, σωματίο-α και θερμότητα. Η θερμότητα απάγεται από κύκλωμα νερού, το μετατρέπει σε ατμό και τροφοδοτεί στρόβιλο. Το τρίτιο ανατροφοδοτείται στο θάλαμο με τα καύσιμα. Στο σχήμα 2.3 φαίνονται τα κύρια μέρη του πειραματικού αντιδραστήρα ITER και στο σχήμα 2.4 ο τρόπος εκμετάλλευσης της ενέργειας του μελλοντικού αντιδραστήρα σύντηξης DEMO, ο οποίος θα έχει σαν σκοπό την επίδειξη της δυνατότητας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και παροχής της προς το ηλεκτρικό δίκτυο.



**Σχήμα 2.3** Ο πειραματικός αντιδραστήρας σύντηξης ITER (ITER, 2019)





**Σχήμα 2.4** Ο DEMO – η ενεργειακή αξιοποίηση του ITER ( EUROfusion, 2019)

### 2.3 Ανίχνευση νετρονίων σε αντιδραστήρα σύντηξης

Για τους μελλοντικούς αντιδραστήρες σύντηξης καθίσταται αναγκαία η χρήση ανιχνευτών που θα παρακολουθούν τα νετρόνια, κάτω από τις ακραίες συνθήκες που συναντώνται στο περιβάλλον της σύντηξης. Ιδιαίτερη σημασία έχει η παρακολούθηση της παραγωγής νετρονίων ενέργειας 14 MeV που εκπέμπονται κατά την αντίδραση DT.

Η μέτρηση της ροής και της ενέργειας των νετρονίων επιτρέπει τον προσδιορισμό της απόδοσης της σύντηξης, διότι τα νετρόνια μεταφέρουν το 80% της ενέργειας που απελευθερώνεται κατά την αντίδραση DT. Επιπλέον το ανιχνευόμενο φάσμα των νετρονίων παρέχει πληροφορίες που αφορούν την κατάσταση του πλάσματος, όπως τη θερμοκρασία του και το λόγο των ιόντων στο καύσιμο. Επίσης, η ακριβής μέτρηση της ροής και ο προσδιορισμός του ενεργειακού φάσματος των νετρονίων επιτρέπει την αξιολόγηση και επικύρωση των υπολογιστικών μεθόδων καθώς και τη βαθμονόμηση άλλων πειραματικών μεθόδων παρακολούθησης του πλάσματος. Επιπλέον, η μέτρηση της ροής των νετρονίων στο στρώμα λιθίου (breeding blanket) επιτρέπει την παρακολούθηση της αναπαραγωγής του τριτίου.

Η αλληλεπίδραση των νετρονίων με τους πυρήνες των δομικών υλικών του αντιδραστήρα σύντηξης έχει ως αποτέλεσμα την ενεργοποίησή τους. Επομένως μεγάλο μέρος της έρευνας στη τεχνολογία σύντηξης δίνει βάρος στη διερεύνηση υλικών χαμηλής νετρονικής ενεργοποίησης, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η παραγωγή ραδιενεργών καταλοίπων (Lengar, 2005).

Λόγω της φύσης των αντιδραστήρων σύντηξης υπάρχουν ιδιαιτερότητες που πρέπει να ληφθούν υπόψη ώστε να επιτευχθεί η ανίχνευση των νετρονίων με την απαιτούμενη ακρίβεια (Packer et al., 2017). Η υψηλή και μεταβαλλόμενη ροή νετρονίων καθώς και η μεγάλη χωρική διακύμανση της στον τοροειδή θάλαμο είναι ένα πρώτο πρόβλημα. Για παράδειγμα στο JET εκπέμπονται παλμοί  $10^{20}$  νετρονίων σε χρόνο 1-5 sec καθιστώντας τους περισσότερους τύπους ανιχνευτών νετρονίων μη ικανούς να ανταποκριθούν στον ρυθμό καταμέτρησης. Επιπλέον, τα

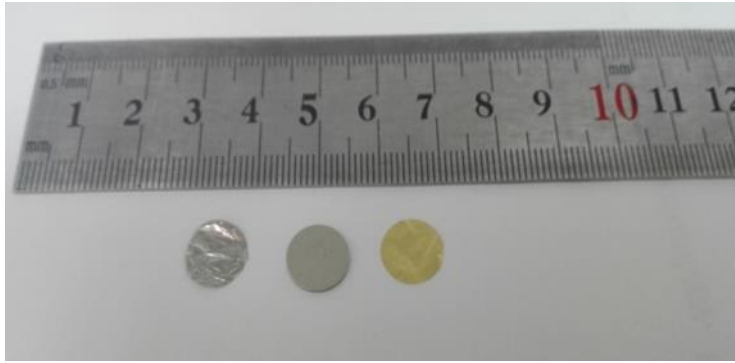
ισχυρά μαγνητικά πεδία, η υψηλή και μεταβαλλόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες θέτουν ιδιαίτερα ζητήματα δυσκολίας στην μέτρηση της ροής των νετρονίων. Για παράδειγμα στο JET η θερμοκρασία κοντά στα τοιχώματα του θαλάμου μπορεί να φτάσει τους 800 °C. Επίσης σημαντικό είναι να ληφθούν υπόψη οι βλάβες που προκαλεί στα υλικά η ακτινοβολία νετρονίων, αλλά και η περιορισμένη πρόσβαση λόγω των υψηλών επιπέδων ακτινοβολίας και των άλλων ακραίων συνθηκών που συναντώνται στον tokamak.

Μία από τις τεχνικές ανίχνευσης νετρονίων είναι και αυτή της νετρονικής ενεργοποίησης (Vasilopoulou et al., 2019) Κατά τη νετρονική ενεργοποίηση, τα νετρόνια αλληλεπιδρούν με τον πυρήνα ατόμων (στόχων), με αποτέλεσμα την παραγωγή ραδιενεργών ισοτόπων που εκπέμπουν γ-ακτινοβολία. Έπειτα ανιχνεύονται οι εκπεμπόμενες ακτίνες-γ με τη χρήση κατάλληλων ανιχνευτικών διατάξεων, όπως για παράδειγμα με συστήματα γ-φασματοσκοπίας με ανιχνευτή γερμανίου και μελετώνται τα ισότοπα που παράγονται και προσδιορίζονται οι ενεργότητες τους. Αυτή η διαδικασία ακολουθείται και στο πείραμα VERDI, στο οποίο βασίζεται η παρούσα Διπλωματική Εργασία.

## 2.4 Το πείραμα VERDI

Το πείραμα VERDI έχει σκοπό την ανάπτυξη ανιχνευτή για χρήση σε περιβάλλον αντιδραστήρα σύντηξης (Nobs et al., 2019), (Sanna et al., 2019), (Stamatelatos et al., 2017). Ο ανιχνευτής αποτελείται από εννέα μεταλλικά ελάσματα, σε κέλυφος από κεραμικό υλικό (σχήμα 2.5). Χρησιμοποιήθηκαν υλικά με κριτήριο την ενεργό διατομή τους, ώστε να επιτυγχάνονται τόσο πυρηνικές αντιδράσεις σύλληψης αργών νετρονίων όσο και οι αντιδράσεις νετρονίων με κατώφλι ενέργειας (threshold reactions). Κριτήρια επίσης ήταν και ο χρόνος ημιζωής των παραγόμενων ισοτόπων τους (μεγαλύτερος των 20 λεπτών), το σημείο τήξης των υλικών (μεγαλύτερο των 400 °C για πειράματα που θα πραγματοποιηθούν στη γεννήτρια νετρονίων ENEA - FNG και μεγαλύτερο των 800 °C για πλάσμα), την ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας-γ (μεγαλύτερη του 10%), οι αλληλοεπικαλύψεις των φωτοκορυφών της εκπεμπόμενης γ-ακτινοβολίας, καθώς και το κόστος τους. Τα μεταλλικά ελάσματα που ακτινοβολήθηκαν στο πείραμα VERDI, ήταν διαμέτρου 10.0 mm, και αποτελούνταν κατά σειρά από Μαγγάνιο (Mn)-88%/Νικέλιο (Ni)-12%, Τιτάνιο (Ti), Ψευδάργυρο (Zn), Ύτριο (Y), Ρόδιο (Rh), Νικέλιο (Ni), Χρυσό (Au), Άργυρο (Ag) και Νιόβιο (Nb). Το περίβλημα αποτελούνταν είτε από γραφίτη (διαμέτρου 13 mm και 99,997% καθαρότητας), είτε από υλικό CMC (SiC ενισχυμένο με ίνες C, διαμέτρου 17,5 mm).

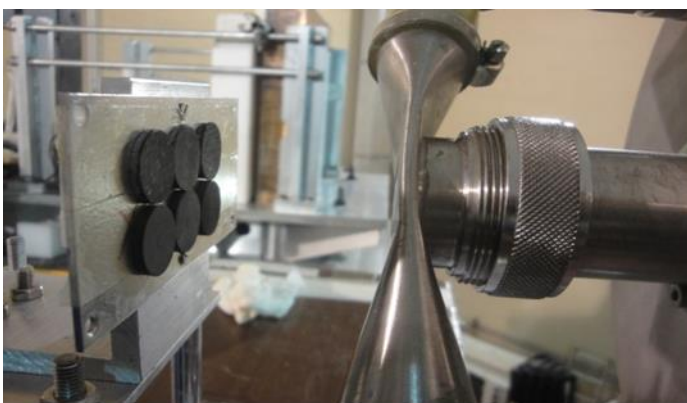




Σχήμα 2.5 Ελάσματα του VERDI project

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία βασίζεται στο δεύτερο πείραμα αξιολόγησης του ανιχνευτή VERDI (Sanna et.al, 2018). Στο πείραμα αυτό κατασκευάστηκαν έξι διαφορετικοί ανιχνευτές, με δύο διαφορετικούς τύπους περιβλήματος (CMC και γραφίτης). Η ακτινοβόλησή έγινε στο Frascati Neutron Generator (FNG) της Ente per le Nuove tecnologie l'Energia e l'Ambiente (ENEA) στην Ιταλία.

Ο επιταχυντής FNG χρησιμοποιεί την αντίδραση σύντηξης δευτερίου-τριτίου για να παράγει  $5.0 \times 10^{11}$  n/s ενέργειας 14 MeV (Martone et al., 1994). Συγκεκριμένα μια δέσμη πυρήνων δευτερίου επιταχύνεται μέσω ενός ηλεκτροστατικού σωλήνα στα 300 KeV, και κατευθύνεται σε ένα στόχο τριτίου-τιτανίου που περιέχει  $37 \times 10^{10}$  Bq τριτίου. Κατά την ακτινοβόληση, οι ανιχνευτές τοποθετήθηκαν σε ένα φύλλο αλουμινίου 1,5 mm. Η ακτινοβόληση έγινε για 4.506 h σε απόσταση 5.41 cm, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.6. Η ροή των νετρονίων στον ανιχνευτή εκτιμήθηκε με τον κώδικα MCNP (Monte Carlo N-Particle) σε  $1.2068E+08$  n/(cm<sup>2</sup>s).



Σχήμα 2.6 Ο επιταχυντής FNG και ο ανιχνευτής HPGe

Τα παραγόμενα ισότοπα καθώς και η ενεργότητα τους προσδιορίστηκαν με γ-φασματοσκοπία των μεταλλικών ελασμάτων που έχουν ακτινοβοληθεί. Έγινε αρχικά μια πρώτη μέτρηση στην ENEA αμέσως μετά την ακτινοβόληση (για τον ανιχνευτή 1 στις 26/03/2018 16:44), με σκοπό την ανίχνευση των βραχύβιων

ισοτόπων. Έπειτα οι ανιχνευτές μεταφέρθηκαν στο ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», όπου έγινε μια δεύτερη μέτρηση (για τον ανιχνευτή 1 στις 02/04/2018 10:09). Ισότοπα με σχετικά μικρό χρόνο ημιζωής δεν ανιχνεύθηκαν στη μέτρηση αυτή. Στη παρούσα Διπλωματική Εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις, που λήφθηκαν στο ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», ανηγμένες στο τέλος της ακτινοβολήσης, για τον πρώτο από τους έξι ανιχνευτές που ακτινοβολήθηκαν κατά τη διάρκεια του συγκεκριμένου πειράματος. Η ανάλυση έγινε χρησιμοποιώντας ανιχνευτή HPGe (σχήμα 2.6).

## 2.5 Οι πειραματικές μετρήσεις

Τα πειραματικά αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 2.7 και προέρχονται από τη  $\gamma$  – φασματοσκοπική ανάλυση, όπως φαίνονται στο Παράρτημα Δ1 (Chu et. al, 1999), (KAERI, Nuclear Data Center). Προκύπτουν μετά από στάθμιση των φωτοκορυφών, με κριτήριο τις αβεβαιότητες των τιμών, για να προκύψει έτσι η σταθμισμένη μέση τιμή της ενεργότητας για κάθε ισότοπο που δίνεται από τη σχέση 2.2. (Gilmore, 2008).

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i w_i}{\sum w_i} \quad (2.2)$$

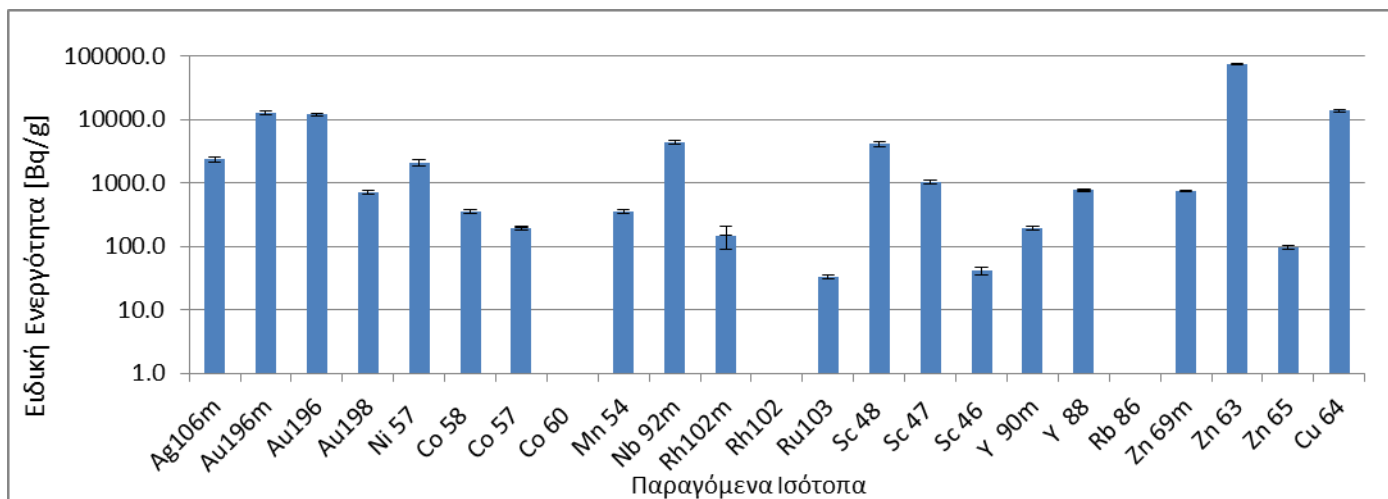
όπου  $w_i = \frac{1}{s^2}$  και  $s$  είναι η αβεβαιότητα κάθε τιμής.

Ως αβεβαιότητα της σταθμισμένης μέσης τιμής λαμβάνεται για κάθε περίπτωση η μέγιστη της εσωτερικής ( $unc_{int}$ ) και εξωτερικής ( $unc_{ext}$ ) αβεβαιότητας. Όπου:

$$unc_{int} = \sqrt{\frac{1}{\sum w_i}} \quad (2.3)$$

και

$$unc_{ext} = \sqrt{\frac{\sum (\alpha_i - \bar{\alpha}) w_i}{\sum w_i}} \quad (2.4)$$



**Σχήμα 2.7** Η πειραματική ειδική ενεργότητα των παραγομένων ισότοπων

Ανάμεσα στα εξεταζόμενα ισότοπα το  $^{63}\text{Zn}$  φαίνεται να έχει πολύ μεγαλύτερη ενεργότητα από τα υπόλοιπα ισότοπα, με διαφορά τάξης μεγέθους με αρκετά από αυτά.

Τα αποτελέσματα (Παράρτημα Δ2), που δίνουν την πειραματικά προσδιορισθείσα ειδική ενεργότητα για τα μεταλλικά ελάσματα που περιέχονται στον ανιχνευτή VERDI θα αποτελέσουν τις τιμές αναφοράς, ως προς τις οποίες θα συγκριθούν τα αποτελέσματα των υπολογισμών του κώδικα FISPACT.

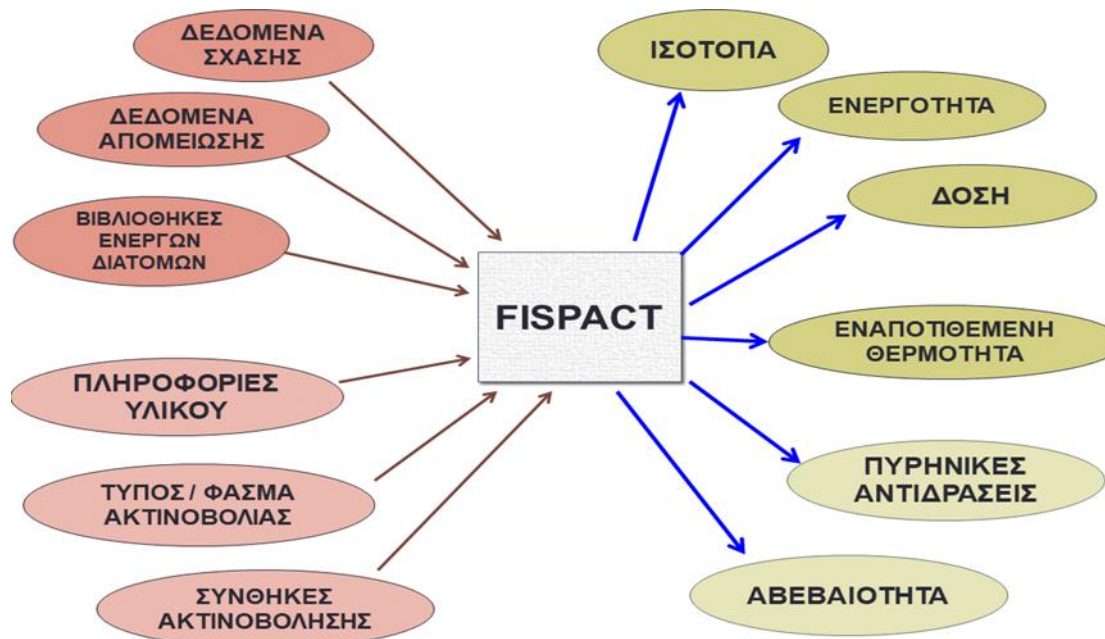
## Κεφάλαιο 3: Υπολογιστική μέθοδος

Στην παρούσα Εργασία έγιναν υπολογισμοί ενεργοποίησης υλικών με χρήση του κώδικα FISPACT II έκδοση 4.0 (Fleming et al., 2018), (Sublet et al., 2017), (UKAEA, “FISPACT II keywords”), (Sublet, 2014). Ο κώδικας υπολογίζει την επαγόμενη ενεργότητα σε συνάρτηση με τον χρόνο, για υλικά που εκτίθενται σε πεδία νετρονίων. Συγκεκριμένα προσομοιώθηκε η ακτινοβόληση του πρώτου ανιχνευτή του πειράματος VERDI και εξάγονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα με τις δύο βιβλιοθήκες διατομών και διαφορετικούς ενεργειακούς διαμερισμούς του φάσματος των νετρονίων.

### 3.1 Ο κώδικας FISPACT-II

Ο κώδικας αυτός αναπτύχθηκε από την Υπηρεσία Ατομικής Ενέργειας του Ηνωμένου Βασιλείου (UKAEA). Είναι ένας κώδικας προσομοίωσης της ακτινοβόλησης ενός υλικού και παροχής πληροφοριών για τη μεταβολή στο χρόνο της ισοτοπικής σύστασης του υλικού καθώς και άλλων ραδιολογικών παραμέτρων. Περιέχει διάφορες βιβλιοθήκες από τις οποίες αντλεί τα αναγκαία για τη λειτουργία του δεδομένα. Ο κώδικας δίδει τη δυνατότητα ακτινοβόλησης με νετρόνια (default), πρωτόνια, πυρήνες δευτερίου, σωματίδια-α και ακτίνες-γ, ενώ προσομοιώνει τη συνεχή ακτινοβόληση για μια χρονική περίοδο, απλού παλμού ή πολλαπλών παλμών. Προσφέρεται η δυνατότητα μεταβολής της έντασης, του φάσματος ενεργειών και των ενεργών διατομών. Υπάρχουν συγκεκριμένοι ενεργειακοί διαμερισμοί σύμφωνα με τους οποίους δομείται το φάσμα της ακτινοβόλησης, έτσι ώστε να δίνεται η δυνατότητα της βέλτιστης προσαρμογής του φάσματος στα επιθυμητά ενεργειακά όρια.

Στον κώδικα εισάγονται από τις βιβλιοθήκες τα δεδομένα ενεργών διατομών, τα δεδομένα σταθερών διασπάσεως και τα δεδομένα σχάσης. Εισάγονται από τον χρήστη οι πληροφορίες που αφορούν το υλικό, οι πληροφορίες που αφορούν την ακτινοβολία, καθώς και οι συνθήκες στις οποίες γίνεται η ακτινοβόληση. Ο κώδικας παρέχει αποτελέσματα για τη μεταβολή στο χρόνο των ισοτόπων και παραμέτρων όπως η ενεργότητα, η δόση και η εναποτιθέμενη θερμότητα. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα παρουσίασης των πυρηνικών αντιδράσεων που έλαβαν χώρα, καθώς και των αβεβαιοτήτων των διάφορων παραμέτρων. Στο σχήμα 3.1 φαίνονται οι είσοδοι και οι έξοδοι του FISPACT.

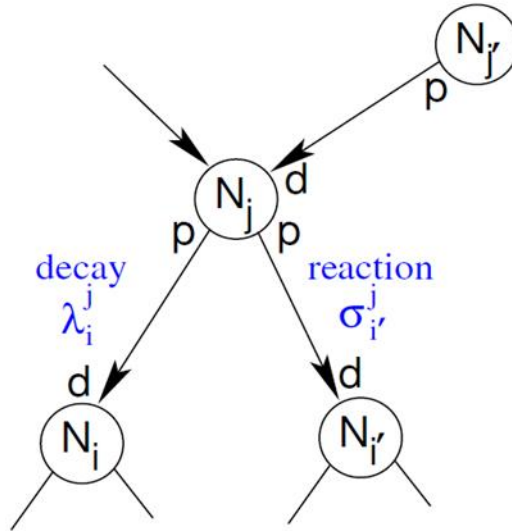


**Σχήμα 3.1** Είσοδοι και έξοδοι του FISPACT

### 3.1.1 Φυσικό και μαθηματικό υπόβαθρο (μοντέλο επίλυσης)

Το μοντέλο επίλυσης του κώδικα περιλαμβάνει τις εξισώσεις ενεργοποίησης και διάσπασης, καθώς και τις εξισώσεις σύμπτυξης των δεδομένων των βιβλιοθηκών. Λαμβάνονται υπόψη η διάσπαση και τα δεδομένα σχάσης, ενώ εκτελούνται αντιδράσεις νετρονίων και άλλες αντιδράσεις. Γίνονται εκτιμήσεις για τη δόση από την ακτινοβολία-γ, ανάλυση ευαισθησίας και εκτίμηση της αβεβαιότητας.

Η καταγραφή των ισοτόπων εξελίσσεται στο χρόνο, ακολουθώντας τους νόμους της διάσπασης και της ενεργοποίησης από τη ροή σωματιδίων. Η εξίσωση (3.1) και το σχήμα 3.2 παρουσιάζουν την παραγωγή των ισοτόπων  $i$  από διασπάσεις και ενεργοποιήσεις των ισοτόπων  $j$ .



**Σχήμα 3.2** Παραγωγή ισοτόπων

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_j [\lambda_i^j + \sigma_i^j \varphi^{int}(t)] N_j \quad (3.1)$$

όπου:

$N_i$  ο αριθμός των ισοτόπων  $i$  σε χρόνο  $t$

$N_j$  ο αριθμός των ισοτόπων  $j$  σε χρόνο  $t$

$\varphi^{int}$  η ροή σωματιδίων [ $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ]

$\lambda_i^j$  η σταθερά διάσπασης του ισοτόπου  $j$ , που παράγει  $i$  [ $\text{s}^{-1}$ ], και

$\sigma_i^j$  η ενεργός διατομή για τις αντιδράσεις των  $j$ , που παράγουν  $i$  [ $\text{cm}^{-2}$ ]

Μια σημαντική λειτουργία του κώδικα είναι η σύμπτυξη των δεδομένων των ενεργών διατομών. Οι ενεργές διατομές που χρησιμοποιούνται σε κάθε αντίδραση εξαρτώνται από την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και την πηγή των δεδομένων (δηλαδή τη βιβλιοθήκη), η οποία δίδει τα δεδομένα για τις επιθυμητές ενεργειακές ομάδες. Με τη σύμπτυξη των δεδομένων ουσιαστικά ο κώδικας υπολογίζει τη «μέση» τιμή των δεδομένων των ενεργών διατομών από κάθε ενεργειακή ομάδα. Για τη σύμπτυξη των ενεργών διατομών ο κώδικας χρησιμοποιεί την πιο κάτω εξίσωση (3.2) που δίδει τις συνεπτυγμένες ενεργές διατομές.

$$\sigma_i^j = \frac{\sum_k \tilde{\sigma}_i^j(E_k) \varphi_n(E_k)}{\sum_k \varphi_n(E_k)} \quad (3.2)$$

όπου:

$\tilde{\sigma}_i^j(E_k)$  η ενεργός διατομή στην ενεργειακή ομάδα  $k$

$\varphi_n(E_k)$  η ροή σωματιδίων στην ενεργειακή ομάδα  $k$



### 3.1.2 Αρχεία εισόδου

Το πρώτο αρχείο εισόδου είναι το αρχείο με επέκταση .i, το οποίο δομείται σε τέσσερα στάδια. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τη βιβλιοθήκη από την οποία θα αντλήσει τα δεδομένα διατομών ο κώδικας. Το δεύτερο μέρος περιέχει πληροφορίες σχετικά με το υλικό, όπως η μάζα, η σύσταση και η πυκνότητα. Εισάγονται επίσης από το χρήστη τα επιθυμητά δεδομένα εξόδου, όπως είναι τα διαγράμματα χρονικής εξέλιξης των διαφόρων ραδιολογικών παραμέτρων, αλλά και άλλες επιλογές όπως η επιθυμητή προέλευση των αβεβαιοτήτων και η ακρίβεια των μετρήσεων. Το τρίτο μέρος του αρχείου εισόδου περιγράφει τη φάση της ακτινοβόλησης. Εκεί ορίζεται η ροή, ο χρόνος της ακτινοβόλησης καθώς και οι χρονικές στιγμές στις οποίες επιθυμείται η λήψη δεδομένων κατά τη φάση της ακτινοβόλησης. Το τέταρτο μέρος περιγράφει τη φάση της ραδιενεργού ψύξεως (cooling), όπου ορίζεται μηδενική η ροή και γίνεται επιλογή των χρονικών βημάτων στα οποία επιθυμείται η λήψη δεδομένων κατά τη φάση αυτή. Παράδειγμα του αρχείου input δίδεται στο Παράρτημα Α.

```
# index of nuclides to be included
ind_nuc ../../nuclear_data/TENDL2017data/tendl17_decay12_index

# Library cross section data
xs_endf ../../nuclear_data/TENDL2017data/tal2017-n/gxs-709

# Library probability tables for self-shielding
prob_tab ../../nuclear_data/TENDL2017data/tal2017-n/tp-709-294

#fluxes
fluxes fluxes

# Library decay data
dk_endf ../../nuclear_data/decay/decay_2012

# Library fission data
fy_endf ../../nuclear_data/GEFY61data/gefy61_nfy
sf_endf ../../nuclear_data/GEFY61data/gefy61_sfy

# Library regulatory data
hazards ../../nuclear_data/decay/hazards_2012
clear ../../nuclear_data/decay/clear_2012
a2data ../../nuclear_data/decay/a2_2012

# gamma attenuation data
absorp ../../nuclear_data/decay/abs_2012

# collapsed cross section data (in and out)
collapxi COLLAPX
collapxo COLLAPX

# condensed decay and fission data (in and out)
arrayx ARRAYX
```

Σχήμα 3.3 Αρχείο file

Το δεύτερο αρχείο εισόδου του κώδικα είναι το αρχείο file, όπου παρέχονται πληροφορίες για τη θέση στη μνήμη των εισόδων που χρειάζεται ο κώδικας. Ορίζονται οι θέσεις στη μνήμη των δεδομένων των ενεργών διατομών, των δεδομένων απορρόφησης νετρονίων από το ίδιο το δείγμα, της ροής, των δεδομένων ψύξεως, των δεδομένων σχάσης, των δεδομένων ακτινοπροστασίας, των δεδομένων εξασθένησης της γ-ακτινοβολίας. Παρέχονται επίσης οι θέσεις στη

μνήμη για την ανάκτηση συνεπτυγμένων δεδομένων ενεργών διατομών καθώς και των δεδομένων ψύξεως και σχάσης. Παράδειγμα ενός αρχείου file φαίνεται στο σχήμα 3.3.

Το τρίτο αρχείο εισόδου είναι το αρχείο fluxes, που περιέχει το φάσμα της ακτινοβολίας και τη ροή σε  $[n/(cm^2 s)]$  ταξινομημένη κατά σειρά φθίνουσας ενέργειας. Το αρχείο είναι δομημένο ανάλογα με τις ενεργειακές ομάδες που έχουν επιλεγθεί.

### 3.1.3 Αρχεία εξόδου

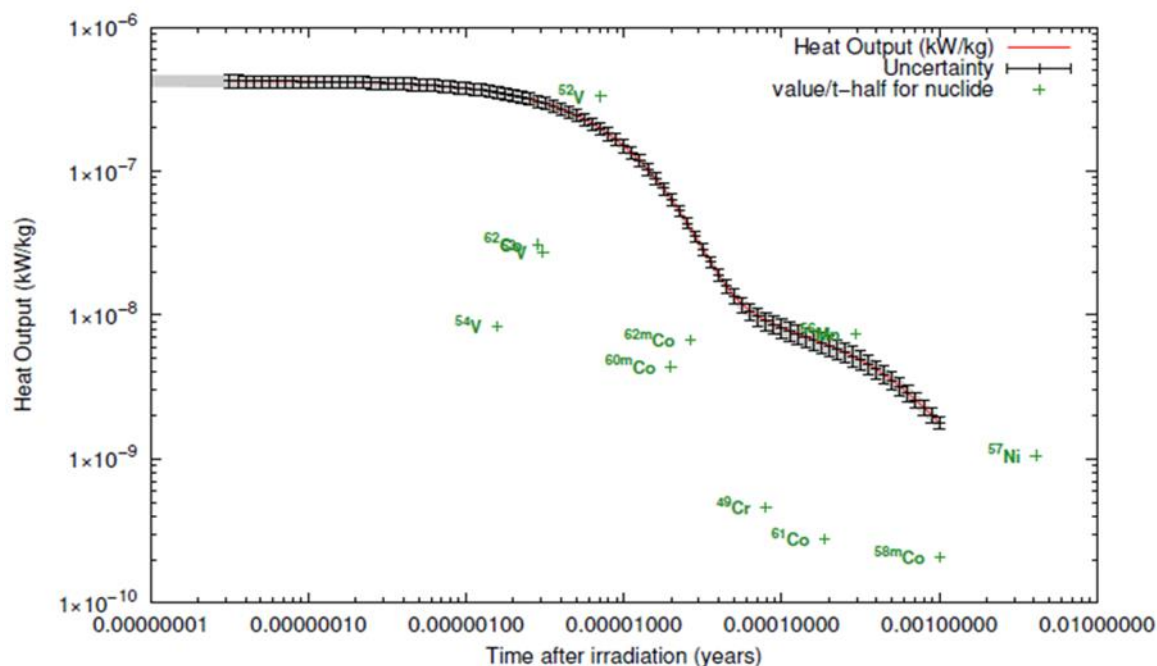
Το πρώτο αρχείο εξόδου είναι το αρχείο με επέκταση .out, το οποίο περιλαμβάνει μια λεπτομερή καταγραφή των ισοτόπων και των ραδιολογικών τους πληροφοριών, τις αντιδράσεις από τις οποίες παράγονται και τις αβεβαιότητες των αποτελεσμάτων. Γίνεται καταγραφή των αποτελεσμάτων μετά από κάθε χρονικό βήμα, όπως έχει ζητηθεί στο πρώτο αρχείο εισόδου. Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζεται ένα μέρος του αρχείου .out, το οποίο δείχνει τα κύρια ισότοπα σε μια χρονική στιγμή και τις ραδιολογικές παραμέτρους κάθε ισοτόπου, μετά από ακτινοβολία Νιόβιου (Nb) με νετρόνια ροής  $1.33 \times 10^8 n/(cm^2s)$  για 2.96 ώρες.

DOMINANT NUCLIDES								
NUCLIDE	ACTIVITY	PERCENT	NUCLIDE	HEAT	PERCENT	NUCLIDE	DOSE RATE	PERCENT
	(Bq)	ACTIVITY		(kW)	HEAT		(Sv/hr)	DOSE RATE
Total	9.5774E+03		Total	1.0293E-12		Total	1.0377E-09	
1 Nb 92m	3.0666E+03	32.02E+00	Nb 92m	4.7993E-13	46.63E+00	Nb 92m	5.3918E-10	51.96E+00
2 Nb 94m	2.3324E+03	24.35E+00	Y 89m	2.6973E-13	26.21E+00	Y 89m	2.1741E-10	20.95E+00
3 Y 90m	2.1265E+03	22.20E+00	Y 90m	2.3225E-13	22.56E+00	Y 90m	1.8836E-10	18.15E+00
4 Y 89m	1.8528E+03	19.35E+00	Y 90	2.9661E-14	28.82E-01	Nb 94m	9.2767E-11	89.39E-01
5 Y 90	1.9832E+02	20.71E-01	Nb 94m	1.7698E-14	17.19E-01	Nb 93m	7.9393E-15	76.51E-05
6 Nb 93m	8.0120E-01	83.65E-04	Nb 93m	3.9666E-18	38.54E-05	Y 91m	2.3808E-16	22.94E-06
7 Y 91m	3.2495E-03	33.93E-06	Y 91m	2.8871E-19	28.05E-06	Nb 94	9.0968E-18	87.66E-08
8 H 3	2.7465E-03	28.68E-06	Y 92	1.7260E-20	16.77E-07	Y 92	2.0401E-18	19.66E-08
9 Y 92	6.3800E-05	66.61E-08	Nb 94	1.2315E-20	11.96E-07	Nb 92	9.3162E-19	89.78E-09
10 Nb 94	4.4179E-05	46.13E-08	H 3	2.5115E-21	24.40E-08	Y 90	5.1241E-19	49.38E-09
11 Sr 89	2.2214E-05	23.19E-08	Sr 89	2.0810E-21	20.22E-08	Y 91	3.0472E-21	29.36E-11
12 Y 91	7.7906E-06	81.34E-09	Nb 92	9.1324E-22	88.73E-09	Sr 89	2.5135E-22	24.22E-12
13 Zr 93	6.1343E-06	64.05E-09	Y 91	7.6025E-22	73.86E-09		0.0000E+00	00.00E+00
14 Nb 92	3.7717E-06	39.38E-09	Zr 93	1.8850E-23	18.31E-10		0.0000E+00	00.00E+00

**Πίνακας 3.1** Τα κύρια ισότοπα σε ακτινοβολία Nb (αρχείο .out)

Το δεύτερο αρχείο είναι το αρχείο με επέκταση .gra ή .plt, στο οποίο παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις της χρονικής εξέλιξης των ραδιολογικών παραμέτρων που ζητήθηκαν. Στο σχήμα 3.5 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της εναποτιθέμενης θερμότητας μετά την ακτινοβολία Inconel-600 (κράμα Ni, Cr) με νετρόνια ροής  $1.12 \times 10^{10} (n/cm^2s)$  για 5 λεπτά. Στο σχήμα 3.4 φαίνεται και η αβεβαιότητα της μέτρησης καθώς και τα κυρίαρχα ισότοπα σε κάθε περίοδο.





**Σχήμα 3.4** Διάγραμμα εξόδου από ακτινοβόληση Inconel-600 (αρχείο .gra/.plt)

Το τρίτο αρχείο εξόδου είναι το αρχείο με επέκταση .log, στο οποίο παρατίθενται και επεξηγούνται τυχόν σφάλματα κατά την εκτέλεση του κώδικα. Γίνεται λεπτομερής καταγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε και όλων των αρχείων που έλαβαν μέρος σε αυτήν. Γίνεται ακόμα καταγραφή, αρίθμηση και επεξήγηση των σφαλμάτων.

```

Log : nuc_no =      3347
Log : nuclide name = Rn214
00001: Warning: nuclide_m:nuclide_collapse_fissyld: 1:
      cross-section data for fission (mt=18) not found, it is either
      missing from endf data or pruned by xs_threshold
Log : nuc_no =      3348
Log : nuclide name = Rn215
00002: Warning: nuclide_m:nuclide_collapse_fissyld: 1:
      cross-section data for fission (mt=18) not found, it is either
      missing from endf data or pruned by xs_threshold

```

**Σχήμα 3.5** Ένα αρχείο .log

### 3.1.4 Βιβλιοθήκες δεδομένων

Για την εκτέλεση του κώδικα απαιτούνται δεδομένα ενεργών διατομών, δεδομένα σχάσης, δεδομένα αντιδράσεων νετρονίων, δεδομένα διάσπασης και άλλα δεδομένα ραδιολογικού ενδιαφέροντος.

Η πρώτη βιβλιοθήκη δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για τον κώδικα στην παρούσα Διπλωματική Εργασία είναι η EAF-2010 (European Activation File) (Sublet et.al, 2011), (Sublet and Packer, 2010), (Sublet et al., 2010). Πρόκειται για τη

συνιστώμενη από τους κατασκευαστές του κώδικα βιβλιοθήκη για την παλαιότερη έκδοση 3.0 του FISPACT. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ακτινοβόληση με νετρόνια, πρωτόνια, πυρήνες δευτερίου, σωματίδια-α και ακτίνες-γ. Περιλαμβάνει πληροφορίες για 816 ισότοπα, για ενέργειες από  $10^{-5}$  MeV μέχρι και 60 MeV. Η EAF-2010 αποτελεί εξέλιξη της EAF-2007, με προσθήκη και τροποποιήσεις δεδομένων βάση νέων πηγών πληροφοριών αλλά και πειραματικά δεδομένα. Η βιβλιοθήκη περιέχει ένα σύνολο 66256 αντιδράσεων νετρονίων, εκ των οποίων για τις 63530 χρησιμοποιεί δεδομένα από τη βιβλιοθήκη TALYS-6 –TENDL-2009.

Η δεύτερη βιβλιοθήκη που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα Διπλωματική Εργασία είναι η TENDL-2017 (TALYS based Evaluated Nuclear Data Libraries) (Rochman et al., 2016), (Sublet et al., 2015), (Sublet et al., 2017). Πρόκειται για τη συνιστώμενη βιβλιοθήκη, για την έκδοση 4.0 του FISPACT. Είναι η πηγή δεδομένων που προτείνεται από την UKAEA για χρήση σε οποιαδήποτε τεχνολογική εφαρμογή. Έχει μεγάλη χωρητικότητα δεδομένων παρέχοντας πληροφορίες για 2804 ισότοπα και έχει άνω ενεργειακό όριο τα 200 MeV. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ακτινοβόληση με νετρόνια, πρωτόνια, πυρήνες δευτερίου, σωματίδια-α και ακτίνες-γ. Σημειώνεται ότι η βιβλιοθήκη TENDL-2017 βρίσκεται ήδη στην ένατη έκδοσή της.

Η έκδοση II 4.0 του FISPACT μπορεί να χρησιμοποιεί δεδομένα εισόδου τόσο από τις βιβλιοθήκες TENDL, καθώς και από παλαιότερες βιβλιοθήκες όπως η EAF. Παρόλο που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οποιεσδήποτε βιβλιοθήκες του τύπου ENDF (GEFY-6.1, HEIR-0.1, JEFF-3.3, JENDL-4.0, ENDF/B-VII.1, CENDL-3.1), η εξέλιξη του κώδικα τα τελευταία χρόνια έγινε παράλληλα με την ανάπτυξη των βιβλιοθηκών TENDL και ως εκ τούτου αυτές είναι οι συνιστώμενες από την UKAEA πηγές δεδομένων ενεργών διατομών. Η χρήση του κώδικα σε συνδυασμό με τα δεδομένα των TENDL αποτελεί το πιο ολοκληρωμένο πακέτο για όλες τις πιθανές χρήσεις του κώδικα (πυρηνική σχάση και σύντηξη, κύκλος πυρηνικού καυσίμου, φυσική των επιταχυντών, παραγωγή ισοτόπων, χαρακτηρισμός υλικών κ.α.).

### 3.1.5 Ενεργειακοί διαμερισμοί

Ενεργειακός διαμερισμός είναι ο συγκεκριμένος αριθμός ενεργειακών διαστημάτων ή ομάδων, εντός του οποίου προσαρμόζεται το φάσμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η επιλογή του ενεργειακού διαμερισμού εξαρτάται από την περίπτωση που εξετάζεται. Οι βιβλιοθήκες μπορούν να προσαρμόσουν τα δεδομένα τους σε συγκεκριμένες ενεργειακές ομάδες, ανάλογα με την περίπτωση. Μερικοί από τους χρησιμοποιούμενους ενεργειακούς διαμερισμούς είναι ο LANL (66), ο WIMS (69), ο GAM-II (100), CCFE (142), ο XMAS (172), ο VITAMIN-J (175), ο VITAMINJ+(211), ο TRIPOLI (315), ο TRIPOLI+ (351), ο LLNL (616), ο CCFE (709). Ο EAF-2010 μπορεί να παρέχει τα δεδομένα σε ενέργειες των 66, 69, 100, 172, 175, 211, 315, 351 και 616 ενεργειακών ομάδων. Ο ENDF δύναται να παρέχει τα δεδομένα σε ενέργειες των 162, 386, 616, 709 και 1102 ομάδων. Οι ενεργειακοί

διαμερισμοί LANL (66), WIMS (69), XMAS (172) και TRIPOLI (315) είναι κατάλληλοι για εφαρμογές σχάσης, ενώ αντίστοιχα οι GAM-II (100), VITAMIN-J (175) και TRIPOLI (315) είναι κατάλληλοι για εφαρμογές σύντηξης. Οι διαμερισμοί VITAMIN-J+ (211) και TRIPOLI+ (351) είναι κατάλληλοι για περιπτώσεις όπου η νετρονική ροή μπορεί να φτάσει τα 55 MeV. Ο LLNL (616) έχει άνω ενεργειακό όριο τα 20 MeV ενώ ο CCFE (709) τα 1 GeV. Ο ενεργειακός διαμερισμός CCFE (162) είναι κατάλληλος για ακτινοβόληση από φορτισμένα σωματίδια (πυρήνες δευτερίου, πρωτόνιο, α-σωματίδιο) και ακτινοβολία-γ μέχρι και το 1GeV.

### 3.2 Ακτινοβόληση δειγμάτων – Υπολογιστική Μέθοδος

Στην παράγραφο αυτή επεξηγείται η προετοιμασία των αρχείων εισόδου του κώδικα FISPACT για την περιγραφή των εννέα ελασμάτων του ανιχνευτή VERDI. Ενδεικτικά παρουσιάζονται οι δύο κώδικες για την ακτινοβόληση του ελάσματος Αργύρου (Ag). Τα ολοκληρωμένα αρχεία εισόδου χρησιμοποιώντας την βιβλιοθήκη EAF-2010 με φάσμα VITAMIN-J (175 ενεργειακών ομάδων) και έπειτα ο αντίστοιχος κώδικας χρησιμοποιώντας την TENDL-2017 με φάσμα CCFE (709 ενεργειακών ομάδων) δίνονται στο Παράρτημα Α.

#### 3.2.1 Δεδομένα εισόδου

Τα αρχεία εισόδου όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω χωρίζονται σε 4 μέρη. Επεξηγούνται λεπτομερώς οι επιλογές που έγιναν κατά τη σύνταξη του κώδικα και στις δύο διαφορετικές περιπτώσεις (βιβλιοθήκη EAF και βιβλιοθήκη TENDL)

##### i. Επιλογές βιβλιοθήκης ("get nuclear data")

<pre>&lt;&lt; -----get nuclear data----- &gt;&gt; CLOBBER MONITOR 0 LIBVERSION 0 GETXS 1 175 GETDECAY 1 FISPACT</pre>	<pre>&lt;&lt; -----get nuclear data----- &gt;&gt; CLOBBER MONITOR 0 GETXS 1 709 GETDECAY 1 FISPACT</pre>
---	--

**Σχήμα 3.6** Επιλογές βιβλιοθήκης

Με την εντολή CLOBBER ο κώδικας επιτρέπει χωρίς την εξαγωγή σφάλματος να ξαναγράφονται τα δεδομένα σε αρχεία εξόδου που προϋπάρχουν με το ίδιο όνομα. Επίσης με την εντολή MONITOR 0 δηλώνεται η επιθυμία του χρήστη να μην εκτυπώνονται οι λέξεις κλειδιά και οι ενέργειές τους. Παρόλα αυτά συνεχίζουν αυτά να εκτυπώνονται στο αρχείο .log. Η εντολή LIBVERSION, η οποία χρησιμοποιείται για να ζητήσει τις βιβλιοθήκες που θα χρησιμοποιηθούν λαμβάνει τιμή 0 για την EAF-2010. Η LIBVERSION δεν χρησιμοποιείται αν είναι να ζητηθεί η βιβλιοθήκη TENDL (βλ. σχήμα 3.6 αριστερά και δεξιά). Με την εντολή GETXS ορίζονται οι ενεργειακές ομάδες που θα χρησιμοποιηθούν σε κάθε περίπτωση (175 αριστερά, 709 δεξιά), ενώ πριν από τον αριθμό των ενεργειακών ομάδων η τιμή 1 ορίζει τη μη

προϋπαρξη έτοιμων συνεπτυγμένων δεδομένων (αρχείο COLLAPX). Η εντολή GETDECAY με παράμετρο 1, ορίζει τη μη άντληση δεδομένων διάσπασης από προϋπάρχον αρχείο (αρχείο ARRAYX), ενώ η εντολή FISPACT χρησιμοποιείται για να διαχωρίσει τα δεδομένα βιβλιοθήκης από τα αρχικά δεδομένα και για να σηματοδοτήσει την έναρξη των εκτελέσιμων εντολών.

ii. **Αρχικές πληροφορίες ("set initial conditions")**

```
* IRRADIATION OF SILVER
<< -----set initial conditions----- >>
<< material Ag >>
MASS 3.3E-6 1
Ag 100.0
MIND 1.0
GRAPH 5 2 1 1 2 3 4 5
UNCERTAINTY 2
DOSE 2 1.0
```

**Σχήμα 3.7** Αρχικές πληροφορίες

Με την εντολή MASS ορίζεται η μάζα του ελάσματος το οποίο πρόκειται να ακτινοβοληθεί σε kg, καθώς και ο αριθμός των υλικών που βρίσκονται στο έλασμα. Έπειτα δηλώνονται τα υλικά του ελάσματος και το ποσοστό συμμετοχής τους στο έλασμα (στο σχήμα 3.7 εννοείται έλασμα ενός υλικού από άργυρο 100%). Για τον ανιχνευτή που μελετάται χρησιμοποιήθηκαν τα υλικά του πειράματος VERDI με τις συγκεκριμένες μάζες που φαίνονται στον πιο κάτω πίνακα 3.2, με 100% σύσταση για κάθε υλικό.

Υλικό	Μάζα (g)
Mn88/Ni12	0.0077
Ti	0.0890
Zn	0.0829
Y	0.0457
Rh	0.0239
Ni	0.0044
Au	0.0068
Ag	0.0033
Nb	0.0007

**Πίνακας 3.2** Τα ελάσματα που ακτινοβολήθηκαν

Με την εντολή MIND ορίζεται ο ελάχιστος αριθμός ατόμων των ισotόπων που θα ληφθούν υπόψη στην εκτύπωση των αποτελεσμάτων, ενώ με την εντολή GRAPH επιλέγουμε τις ραδιολογικές παραμέτρους τις οποίες επιθυμείται να παρέχει ο κώδικας σε διαγράμματα συναρτήσεως του χρόνου.

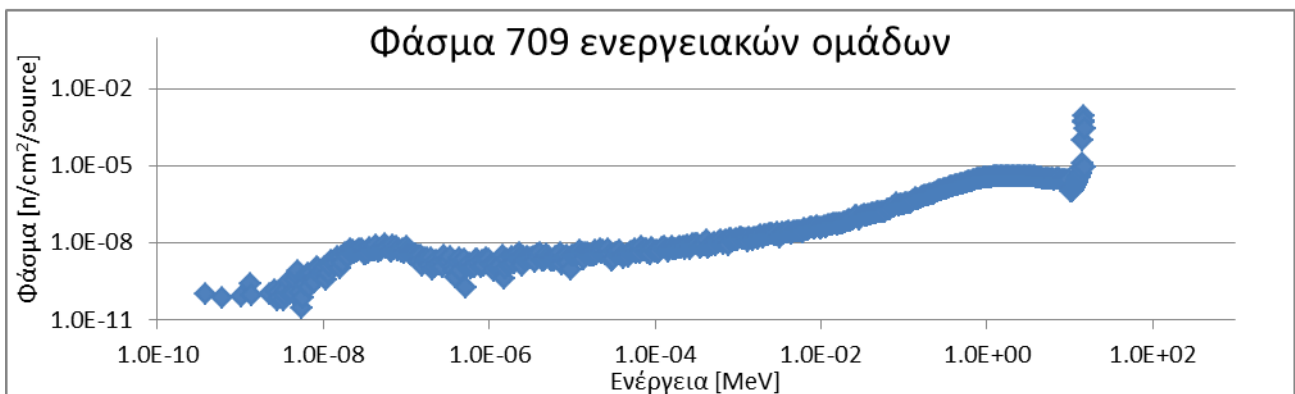
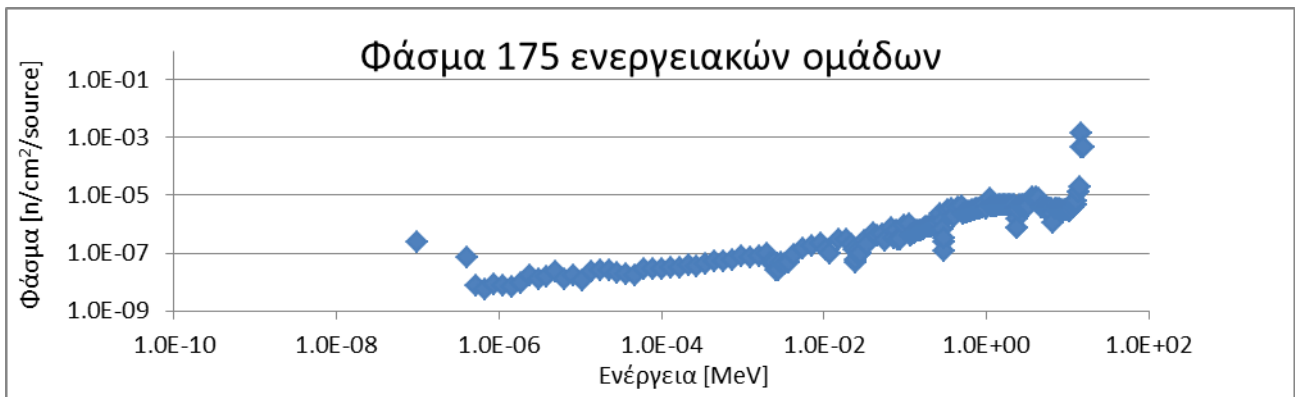
Η πρώτη τιμή που ακολουθεί την εντολή δηλώνει την ποσότητα των παραμέτρων που ζητούνται, η δεύτερη τιμή ισούται με 2 και χαρακτηρίζει την παραγωγή αρχείου εξόδου σε μορφή κατάλληλη για το ελεύθερα διαθέσιμο λογισμικό γραφικών παραστάσεων gnuplot, η τρίτη τιμή όταν ισούται με 1 εκτυπώνει και την αβεβαιότητα στα αποτελέσματα εξόδου, ενώ έπειτα ακολουθούν οι παράμετροι που ζητά ο χρήστης. Με την εντολή UNCERTAINTY 2 ζητείται η εκτύπωση στην έξοδο τόσο της αβεβαιότητας όσο και των καναλιών παραγωγής ισοτόπων σε κάθε χρονικό βήμα. Η εντολή DOSE με την πρώτη τιμή ίση με 2 και τη δεύτερη ίση με 1.0 εμφανίζει τη δόση θεωρώντας σημειακή πηγή μάζας 1g, σε απόσταση 1m.

iii. **Φάση ακτινοβόλησης ("irradiation phase at FNG DT")**

```
<< --irradiation phase--in FNG DT-- >>
FLUX 1.2068E+08
TOLERANCE 0 1.0 1.0e-3
TOLERANCE 1 1.0 1.0e-3
TIME 4.506 HOURS
ATOMS
```

**Σχήμα 3.8** Φάση ακτινοβόλησης

Μετά την εντολή FLUX τοποθετείται η τιμή της ροής νετρονίων (βλ. σχήμα 3.8). Χρησιμοποιήθηκε και στις δύο περιπτώσεις το φάσμα του FNG (του FRASCATI) ροής  $1.2068E+08$  n/(cm<sup>2</sup>s), (από αντίδραση DT με νετρόνια 14 MeV), το οποίο υπολογίστηκε με κώδικα MCNP, με διαφορετικό όμως ενεργειακό διαμερισμό κάθε φορά (175 και 709 ενεργειακές ομάδες). Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι στο αρχείο fluxes του FISPACT το φάσμα τοποθετείται ταξινομημένο σύμφωνα με αύξουσα ταξινόμηση των αντίστοιχων ενεργειών. Στο σχήμα 3.9 φαίνεται το φάσμα των νετρονίων με τους δύο διαφορετικούς ενεργειακούς διαμερισμούς που χρησιμοποιήθηκαν. Έπειτα με τις εντολές TOLERANCE επιτυγχάνεται η σύγκλιση των λύσεων, τόσο των κύριων αποτελεσμάτων εξόδου όσο και των πληροφοριών για τις εξισώσεις παραγωγής ισοτόπων. Οι τιμές ανάλογα με την περίπτωση ενδέχεται να διαφέρουν και προσαρμόζονται έτσι ώστε οι λύσεις να συγκλίνουν σωστά και χωρίς σφάλματα. Με την εντολή TIME ορίζεται ο χρόνος ακτινοβόλησης, ενώ με την εντολή ATOMS παρέχεται η καταγραφή των ισοτόπων.



Σχήμα 3.9 Το φάσμα ακτινοβολήσης στη γεννήτρια FNG (FRASKATI) σε ενεργειακό διαμερισμό των 175 και 709 ομάδων

iv. Φάση ραδιενεργού ψύξης ("cooling phase")

```

<< -----cooling phase----- >>
FLUX 0.
ZERO
TIME 1 SECS ATOMS
TIME 56 SECS ATOMS
TIME 59 SECS ATOMS
TIME 2 MINS ATOMS
TIME 2 MINS ATOMS
TIME 2 MINS ATOMS
TIME 55 MINS ATOMS <<-----enea metrisi----->>
TIME 4 SECS ATOMS
TIME 22 MINS ATOMS
TIME 16 HOURS ATOMS
TIME 6 DAYS ATOMS <<-----dimokritos metrisi----->>
TIME 3 DAYS ATOMS
TIME 20 DAYS ATOMS
TIME 30 DAYS ATOMS
TIME 30 DAYS ATOMS
TIME 90 DAYS ATOMS
TIME 90 DAYS ATOMS
END
* END

```

Σχήμα 3.10 Η φάση της ραδιενεργού ψύξης



Στη φάση της ψύξης ορίζεται μετά την εντολή FLUX τιμή μηδενικής ροής. Με την εντολή ZERO μηδενίζεται ο χρόνος μετά την ακτινοβόληση. Έπειτα με τις εντολές TIME και ATOMS ορίζονται οι χρονικές στιγμές στις οποίες ζητούνται αποτελέσματα από τον κώδικα, οι οποίες ακολουθούν αθροιστική σειρά. Η ακτινοβόληση του δείγματος έγινε στις 26/03/2018, ξεκίνησε στις 10:55:00 και τελείωσε στις 15:41:04. Η μέτρηση στην ΕΝΕΑ έγινε στις 26/03/2018 στις 16:44:00, ενώ στο ΙΠΡΕΤΕΑ του «Δημόκριτου» στις 02/04/2018 στις 10:09:00. Στο πιο πάνω σχήμα φαίνονται και οι χρονικές στιγμές στις οποίες γίνονται οι μετρήσεις στα δύο ινστιτούτα. Υπενθυμίζεται ότι στην παρούσα Διπλωματική Εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι υπολογιστικές μετρήσεις 1 δευτερόλεπτο μετά την ακτινοβόληση, καθότι τα πειραματικά μας αποτελέσματα έχουν αναχθεί στη στιγμή εκείνη. Η εντολή END σηματοδοτεί το τέλος του κώδικα.

### 3.2.2 Αρχείο file

Οι εντολές που εισάγονται στο αρχείο file, στο οποίο φαίνονται οι τοποθεσίες στη μνήμη του υπολογιστή από όπου αντλούνται τα δεδομένα της EAF-2010, φαίνονται στο σχήμα 3.11.

```
# gamma attenuation data
absorp C:\FISPACT\nuclear_data/EAF2010data/eaf_abs_20100

# index of nuclides to be included
ind_nuc C:\FISPACT\nuclear_data/EAF2010data/eaf_index_20100

# Library cross section data
crosssec C:\FISPACT\nuclear_data/EAF2010data/eaf_n_gxs_175_fus_20100
crossunc C:\FISPACT\nuclear_data/EAF2010data/eaf_un_20100

#fluxes
fluxes FLUXES

# Library decay data
decay C:\FISPACT\nuclear_data/EAF2010data/eaf_dec_20100.001

# Library fission data
asscfy C:\FISPACT\nuclear_data/EAF2010data/eaf_n_asscfy_20100
fissyld C:\FISPACT\nuclear_data/EAF2010data/eaf_n_fis_20100

# Library regulatory data
hazards C:\FISPACT\nuclear_data/EAF2010data/eaf_haz_20100
clear C:\FISPACT\nuclear_data/EAF2010data/eaf_clear_20100
a2data C:\FISPACT\nuclear_data/EAF2010data/eaf_a2_20100

# collapsed cross section data (in and out)
collapxi COLLAPX
collapxo COLLAPX

# condensed decay and fission data (in and out)
arrayx ARRAYX
```

Σχήμα 3.11 Αρχείο file για βιβλιοθήκη EAF-2010

Αντίστοιχα για τη δεύτερη βιβλιοθήκη που χρησιμοποιήθηκε την TENDL-2017 το αρχείο file, φαίνεται στο σχήμα 3.12.

```
# gamma attenuation data
absorp C:\fisfact\nuclear_data/decay/abs_2012

# index of nuclides to be included
ind_nuc C:\fisfact\nuclear_data/TENDL2017data/tendl17_decay12_index

# Library cross section data
xs_endf C:\fisfact\nuclear_data/TENDL2017data/tal2017-n/gxs-709

# Library probability tables for self-shielding
prob_tab C:\fisfact\nuclear_data/TENDL2017data/tal2017-n/tp-709-294

# fluxes
fluxes FLUXES

# Library decay data
dk_endf C:\fisfact\nuclear_data/decay/decay_2012

# Library fission data
fy_endf C:\fisfact\nuclear_data/GEFY61data/gefy61_nfy
sf_endf C:\fisfact\nuclear_data/GEFY61data/gefy61_sfy

# Library regulatory data
hazards C:\fisfact\nuclear_data/decay/hazards_2012
clear C:\fisfact\nuclear_data/decay/clear_2012
a2data C:\fisfact\nuclear_data/decay/a2_2012

# collapsed cross section data (in and out)
collapxi COLLAPX
collapxo COLLAPX

# condensed decay and fission data (in and out)
arrayx ARRAYX
```

Σχήμα 3.12 Αρχείο file για βιβλιοθήκη TENDL-2017

### 3.3 Υπολογισμός Αβεβαιότητας των υπολογιστικών μετρήσεων

Οι σχετικές αλλά και οι απόλυτες αβεβαιότητες της ενεργότητας δίδονται στο αρχείο εξόδου του κώδικα σε συνάρτηση με το χρόνο. Προέρχονται από τις αβεβαιότητες στις τιμές των ενεργών διατομών καθώς και στα δεδομένα των ραδιενεργών διασπάσεων. Η απόλυτη αβεβαιότητα μιας ραδιολογικής παραμέτρου  $Q$ , όπως είναι η ενεργότητα στην περίπτωση που εξετάζεται, δίδεται από την εξίσωση 3.3.

$$\Delta Q = \sqrt{\sum S_t \left(\frac{\Delta N_t}{N_t}\right)^2 \cdot q_t^2} \quad (3.3)$$

με



$$Q = \sum q_t \quad (3.4)$$

όπου:

$S_t$  : μια ομάδα ισotόπων στην οποία αναφέρεται το σύνολο της ραδιολογικής παραμέτρου  $Q$

$N_t$  : ο αριθμός των ατόμων των ισotόπων στην αρχική καταγραφή

$\Delta N_t$  : το σφάλμα του  $N_t$

Οι σχετικές αβεβαιότητες λαμβάνονται από το αρχείο εξόδου του κώδικα. Αυτές δεν εξαρτώνται από τη μάζα του δείγματος. Οι απόλυτες αβεβαιότητες υπολογίζονται γνωρίζοντας ότι:

$$unc_{απόλυτη} = unc_{σχετική} [\%] \cdot τιμή \quad (3.5)$$

### 3.4 Εντολή GRPCONVERT

Η εντολή αυτή επιτρέπει την αλλαγή του ενεργειακού διαμερισμού ενός φάσματος, μετατρέποντάς το σε φάσμα με μια εκ των επιτρεπτών διαμερισμών του κώδικα, ο οποίος να διαθέτει περισσότερες ενεργειακές ομάδες από τον αρχικό. Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία η εντολή χρησιμοποιήθηκε για τη μετατροπή του φάσματος FNG από 175 ενεργειακές ομάδες σε 709 ομάδες. Σκοπός ήταν η σύγκριση των αποτελεσμάτων που δίδει ο κώδικας, όταν χρησιμοποιηθεί το κανονικό και το φάσμα που έχει μετατραπεί. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η αλλαγή πλήθους ενεργειακών ομάδων με αυτόν τον τρόπο δεν «προσθέτει» νέα πληροφορία στον κώδικα και οι οποιοδήποτε περιορισμοί ή ιδιαιτερότητες του φάσματος εισόδου παραμένουν και μετά τη μετατροπή. Υπάρχει πάντως συχνά η ανάγκη τέτοιας μετατροπής του ενεργειακού διαμερισμού του φάσματος, ώστε αυτό να μπορεί να αποτελέσει είσοδο ενός κώδικα που θα χρησιμοποιεί βιβλιοθήκη που δεν υποστηρίζει τον αρχικό διαμερισμό (όπως είναι στην εδώ περίπτωση η TENDL). Τονίζεται, ωστόσο, ότι η τεχνητή αλλαγή του ενεργειακού διαμερισμού του φάσματος των νετρονίων μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την αλλοίωση φυσικών χαρακτηριστικών του φάσματος και επομένως να επηρεάσει την ακρίβεια των υπολογισμών. Αν ωστόσο οι υπολογισμοί του φάσματος νετρονίων που χρησιμοποιείται ως είσοδος, γίνονται με κώδικες Monte Carlo, η αύξηση των ενεργειακών ομάδων με κώδικα και όχι με αλγόριθμο αύξησης σημαίνει και αύξηση του υπολογιστικού χρόνου.

Για την εκτέλεση της εντολής τοποθετούνται σε ένα φάκελο τέσσερα αρχεία. Το πρώτο είναι το αρχείο εισόδου convert.i, το οποίο περιέχει τις εντολές μετατροπής του φάσματος (σχήμα 3.13). Το δεύτερο αρχείο είναι το αρχείο files.convert, το οποίο περιέχει τις τοποθεσίες στη μνήμη των δεδομένων που χρειάζονται (σχήμα 3.14). Το τρίτο αρχείο είναι το αρχείο arb\_flux, το οποίο αρχικά περιέχει τα ενεργειακά όρια του αρχικού φάσματος (σε eV) και έπειτα τη ροή σε

κάθε ενεργειακή ομάδα. Το τέταρτο αρχείο είναι το αρχείο fluxes, όπου εκτυπώνεται το νέο από μετατροπή φάσμα.

```
<< convert flux to 709 group structure>>
CLOBBER
GRP_CONVERT 175 709
FISPACT
* SPECTRAL MODIFICATION
END
* END
```

**Σχήμα 3.13** Το αρχείο convert.i

```
# index of nuclides to be included
ind_nuc C:\fispact\nuclear_data/TENDL2017data/tendl17_decay12_index

# fluxes
fluxes fluxes
arb_flux arb_flux
```

**Σχήμα 3.14** Το αρχείο files.convert

Η εφαρμογή του κώδικα οδηγεί στην εξαγωγή των υπολογιστικών αποτελεσμάτων του μετατραπέντος φάσματος με τη χρήση και των δύο βιβλιοθηκών EAF και TENDL. Ο κώδικας τρέχει εννέα φορές για κάθε περίπτωση, όσα και τα ελάσματα δηλαδή που ακτινοβολούνται. Τα αποτελέσματα δίνονται με τη μορφή γραφικών παραστάσεων στο επόμενο Κεφάλαιο.

## Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα

Με την εκτέλεση του κώδικα, υπολογίζονται οι ειδικές ενεργότητες. Τα αποτελέσματα λαμβάνονται για τη χρονική στιγμή του πέρατος της ακτινοβόλησης, ούτως ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία είναι ανηγμένα σε εκείνη τη χρονική στιγμή. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα παρουσιάζονται χρησιμοποιώντας την EAF-2010 με VITAMIN-J (175 ενεργειακές ομάδες) και την TENDL-2017 με CCFE (709 ενεργειακές ομάδες). Έπειτα γίνονται συγκρίσεις των αποτελεσμάτων και στατιστικός έλεγχος, για να επιβεβαιωθεί ή όχι η σύγκλιση των υπολογισμών με τις μετρήσεις. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που έδωσε το φάσμα, για το οποίο αυξήθηκε ο ενεργειακός διαμερισμός με την εντολή GRPCONVERT και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που έδωσε το αρχικό φάσμα, χρησιμοποιώντας και στις δύο περιπτώσεις τη βιβλιοθήκη TENDL-2017.

### 4.1 Αντιδράσεις παραγωγής ισοτόπων

Τα ισότοπα που θα εξεταστούν παράγονται μέσω διαφόρων αντιδράσεων με τα νετρόνια. Στον πίνακα 4.1 φαίνονται τα παραγόμενα ισότοπα και οι αντιδράσεις παραγωγής τους.

### 4.2 Υπολογιστικά αποτελέσματα – συγκρίσεις

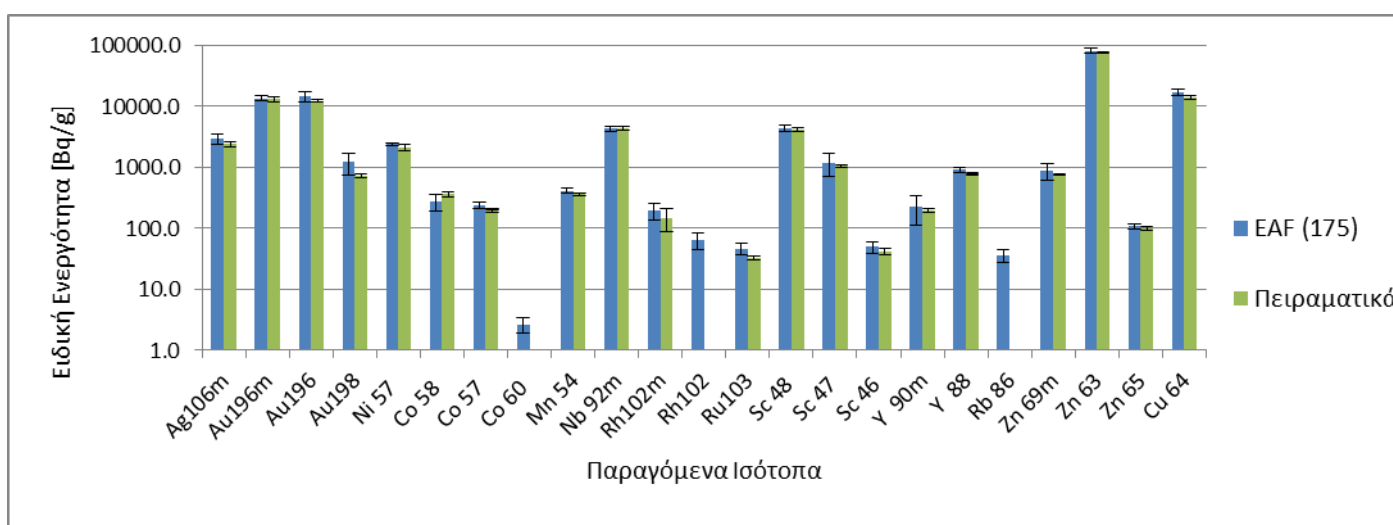
Στο Παράρτημα Γ δίδονται οι γραφικές παραστάσεις της χρονικής εξέλιξης της ενεργότητας των ισοτόπων που παράγονται, κατά την ακτινοβόληση των ελασμάτων. Στα γραφήματα φαίνονται τα κυρίαρχα ισότοπα σε κάθε περίοδο καθώς και οι ενεργότητές τους. Παρουσιάζεται επίσης και η χρονική εξέλιξη της αβεβαιότητας που έχει η συνολική μέτρηση της ενεργότητας. Παρατηρείται ότι με την πάροδο του χρόνου η ενεργότητα των ισοτόπων και ως εκ τούτου και η συνολική ενεργότητα των ελασμάτων μειώνεται, σύμφωνα με το νόμο της ραδιενεργούς διάσπασης. Στο Παράρτημα Γ1 φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις όταν χρησιμοποιείται η EAF-2010 με VITAMIN-J (175), ενώ στο Παράρτημα Γ2 αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις όταν χρησιμοποιείται η TENDL-2017 με CCFE (709).

Παραγόμενο Ισότοπο	Ισότοπο στόχος	Αντίδραση	Ποσοστό παραγωγής [%]
<sup>106m</sup> Ag	<sup>107</sup> Ag	(n,2n)	100,00
<sup>196m</sup> Au	<sup>197</sup> Au	(n,2n)	99,97
<sup>196</sup> Au	<sup>197</sup> Au	(n,2n)	92,91
	<sup>197</sup> Au /	(n,2n) / (IT) του <sup>196m</sup> Au	6,07
	<sup>197</sup> Au	(n,2n) / (IT) του <sup>96n</sup> Au / (IT) του / <sup>196m</sup> Au	1,01
<sup>54</sup> Mn	<sup>55</sup> Mn	(n,2n)	100,00
<sup>57</sup> Ni	<sup>58</sup> Ni	(n,2n)	100,00
<sup>58</sup> Co	<sup>58</sup> Ni	(n,p)	88,25
	<sup>58</sup> Ni	(n,p) / (IT) του <sup>58m</sup> Co	11,78
<sup>57</sup> Co	<sup>58</sup> Ni	97,07% (n,np) / 2,93% (n/d)	99,76
<sup>60</sup> Co	<sup>60</sup> Ni	(n,p) / (IT) του <sup>60m</sup> Co	50,28
	<sup>60</sup> Ni	(n,p)	48,80
	<sup>61</sup> Ni	88,86% (n,np) / 11,14% (n,d)	0,52
<sup>92m</sup> Nb	<sup>93</sup> Nb	(n,2n)	100,00
<sup>102m</sup> Rh	<sup>103</sup> Rh	(n,2n)	100,00
<sup>102</sup> Rh	<sup>103</sup> Rh	(n,2n)	100,00
<sup>103</sup> Ru	<sup>103</sup> Rh	(n,p)	100,00
<sup>48</sup> Sc	<sup>48</sup> Ti	(n,p)	99,24
	<sup>49</sup> Ti	61,53% (n,np) / 38,47% (n,d)	0,77
	<sup>47</sup> Ti	(n,p)	46,92
<sup>46</sup> Sc	<sup>48</sup> Ti	58,80% (n,np) / 41,20% (n,d)	53,05
	<sup>46</sup> Ti	(n,p)	66,05
	<sup>46</sup> Ti	(n,p) / (IT) του <sup>46m</sup> Sc	17,13
<sup>46</sup> Sc	<sup>47</sup> Ti	89,49% (n,np) / 10,51% (n,d)	14,26
	<sup>47</sup> Ti	83,89% (n,np) / 16,11% (n,d) / (IT) του <sup>46m</sup> Sc	2,56
	<sup>47</sup> Ti		
<sup>90m</sup> γ	<sup>89</sup> γ	(n,g)	99,64
<sup>88</sup> γ	<sup>89</sup> γ	(n,2n)	100,00
<sup>86</sup> Rb	<sup>89</sup> γ	(n,a)	71,12
	<sup>89</sup> γ	(n,a) / (IT) του <sup>86m</sup> Rb	28,88
<sup>69m</sup> Zn	<sup>68</sup> Zn	(n,g)	2,17
	<sup>70</sup> Zn	(n,2n)	97,82
<sup>63</sup> Zn	<sup>64</sup> Zn	(n,2n)	99,40
<sup>65</sup> Zn	<sup>64</sup> Zn	(n,g)	0,54
	<sup>66</sup> Zn	(n,2n)	99,47
<sup>64</sup> Cu	<sup>64</sup> Zn	(n,p)	99,97

Πίνακας 4.1 Αντιδράσεις παραγωγής ισotόπων

### 4.2.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων EAF-2010 και πειραματικών μετρήσεων

Σε αυτή την παράγραφο γίνεται σύγκριση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων που λήφθηκαν από τον κώδικα FISPACT, χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη EAF-2010 και προσομοιώνοντας ακτινοβολήση με φάσμα νετρονίων ενεργειακού διαμερισμού 175 ομάδων τη χρονική στιγμή αμέσως μετά το τέλος της ακτινοβολήσης. Στο σχήμα 4.1 φαίνονται οι ειδικές ενεργότητες σε Bq/g όλων των παραγόμενων ισοτόπων, ενώ παρουσιάζονται επίσης τα διαστήματα σφάλματος για την κάθε περίπτωση. Οι πλήρεις πίνακες αποτελεσμάτων που δίνει η EAF-2010 αλλά και οι συγκρίσεις φαίνονται στα Παραρτήματα Δ5 και Ε1 αντίστοιχα.



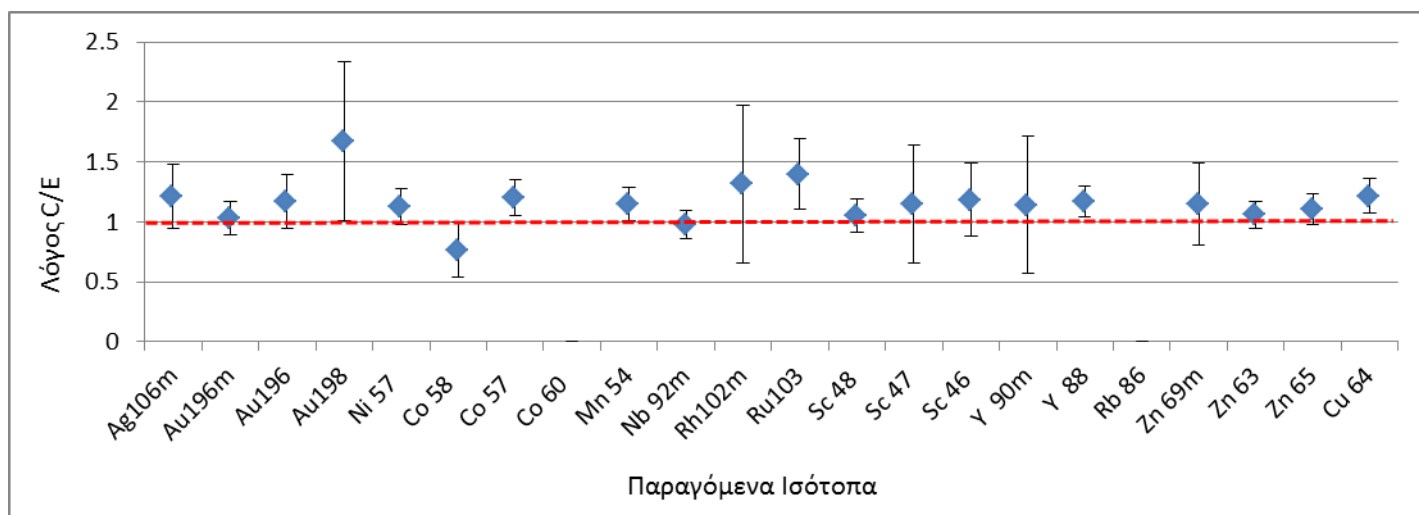
**Σχήμα 4.1** Σύγκριση ειδικών ενεργοτήτων EAF-2010 και πειραματικών τιμών

Υπολογίζεται επίσης ο λόγος  $\frac{C}{E}$ , δηλαδή το κλάσμα των υπολογιστικά προσδιορισμένων ενεργοτήτων προς τις αντίστοιχες πειραματικές. Ιδανικά αναμένεται ο λόγος να ταυτίζεται με τη μονάδα. Σημαντικό επίσης είναι να υπολογιστεί και η αβεβαιότητα του λόγου, η οποία δίδεται από τη σχέση 4.1.

$$unc_{rel} \frac{C}{E} = \sqrt{(unc_{rel} C)^2 + (unc_{rel} E)^2} \quad (4.1)$$

Όπου  $unc_{rel} C$  και  $unc_{rel} E$  οι σχετικές αβεβαιότητες [%] των υπολογιστικών και πειραματικών ειδικών ενεργοτήτων αντίστοιχα.

Στο σχήμα 4.2 φαίνεται ο λόγος των υπολογιστικά προσδιοριζόμενων ενεργοτήτων προς τις πειραματικές για κάθε ισότοπο.



**Σχήμα 4.2** Λόγοι υπολογιστικών (με EAF-2010) προς πειραματικά αποτελέσματα

Επίσης, για να προσδιοριστεί η στατιστική εγκυρότητα των υπολογιστικών μετρήσεων σε σχέση με τις πειραματικές είναι αναγκαίο να γίνει ένα στατιστικό τεστ. Επιλέγεται να γίνει ένα U-test, όπου εάν  $U < 1.96$  τότε βρισκόμαστε στην περιοχή «αποδοχής» και επομένως τα αποτελέσματα δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. Εάν έχουμε  $U > 2.58$  τότε έχουμε στατιστική ασυμφωνία των αποτελεσμάτων, ενώ οποιαδήποτε τιμή του U αναμεταξύ των δύο αυτών τιμών, οδηγεί σε αδυναμία στατιστικού συμπεράσματος.

$$U = \frac{(A_1 - A_2)}{\sqrt{(unc_1^2 + unc_2^2)}} \quad (4.2)$$

όπου:

$A_1$  : Η ειδική ενεργότητα της υπολογιστικής τιμής

$A_2$  : Η ειδική ενεργότητα της πειραματικής τιμής

$unc_1$  : Η απόλυτη αβεβαιότητα της υπολογιστικής τιμής

$unc_2$  : Η απόλυτη αβεβαιότητα της πειραματικής τιμής

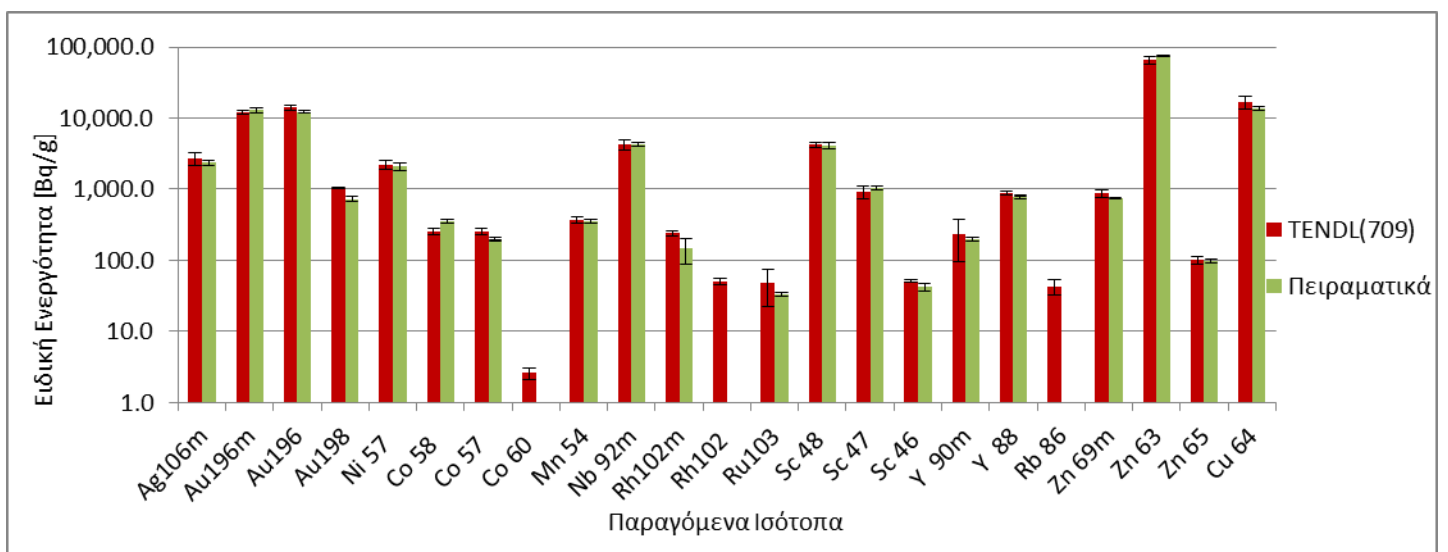
Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζονται οι τιμές του U για κάθε παραγόμενο ισότοπο.



**Σχήμα 4.3** U-test για στατιστική σύγκριση των αποτελεσμάτων της EAF-2010 με τα πειραματικά.

#### 4.2.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων TENDL-2017 και πειραματικών

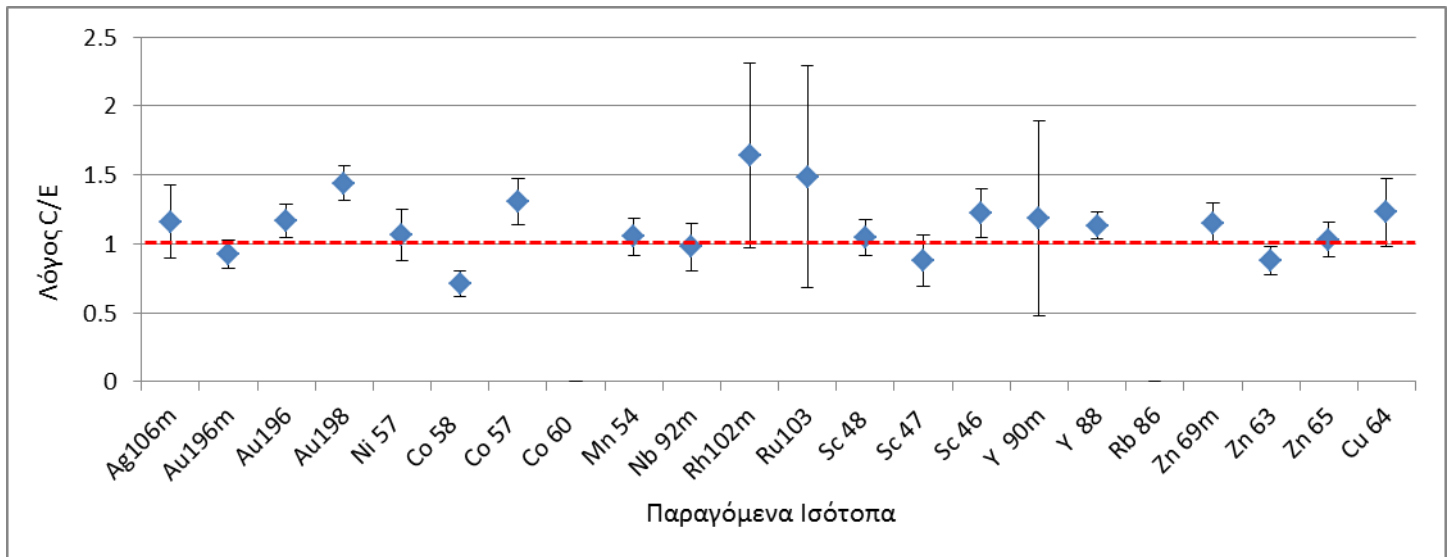
Σε αυτή την παράγραφο γίνεται μια σύγκριση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων που λήφθηκαν από τον κώδικα FISPACT, χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη TENDL-2017 και προσομοιώνοντας ακτινοβόληση με φάσμα νετρονίων ενεργειακού διαμερισμού 709 ομάδων, τη χρονική στιγμή αμέσως μετά το τέλος της ακτινοβόλησης. Στο σχήμα 4.5 φαίνονται οι ειδικές ενεργότητες σε [Bq/g] όλων των παραγόμενων ισοτόπων, ενώ παρουσιάζονται επίσης οι στήλες σφάλματος για την κάθε περίπτωση. Οι πίνακες αριθμητικών αποτελεσμάτων που δίνει η TENDL-2017 αλλά και οι συγκρίσεις φαίνονται στο παράρτημα Δ5 και Ε2 αντίστοιχα.



**Σχήμα 4.5** Σύγκριση ειδικών ενεργοτήτων TENDL-2017 και πειραματικών τιμών

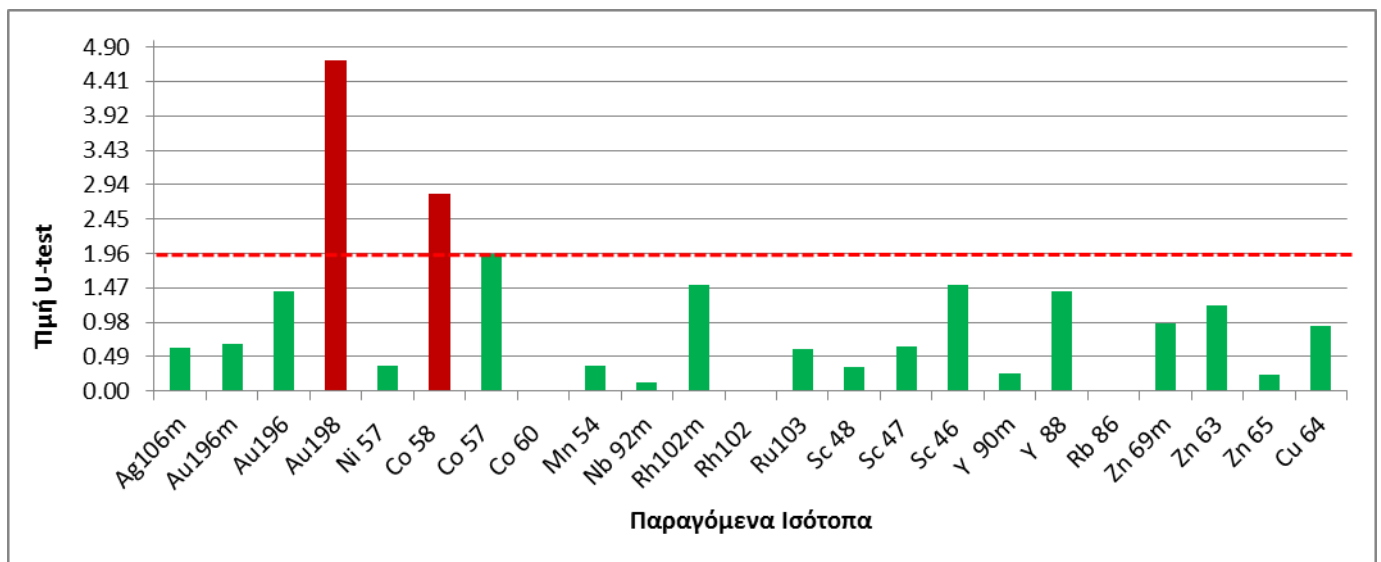
Υπολογίζεται επίσης και εδώ ο λόγος  $\frac{C}{E}$ , δηλαδή το κλάσμα των υπολογιστικά προσδιορισμένων ενεργοτήτων προς τις αντίστοιχες πειραματικές, καθώς και οι αβεβαιότητες όπως ορίστηκε πιο πάνω.

Στο σχήμα 4.5 φαίνεται ο λόγος  $\frac{C}{E}$ .



**Σχήμα 4.5** Λόγοι υπολογιστικών (με TENDL-2017) προς πειραματικά αποτελέσματα

Στο σχήμα 4.6 φαίνονται οι τιμές του U-test που έγινε μεταξύ των μετρήσεων και αποτελεσμάτων.



**Σχήμα 4.6** U-test για στατιστική σύγκριση των αποτελεσμάτων της TENDL-2017 με τα πειραματικά.



### 4.3 Αποτελέσματα για κάθε ισότοπο

Ακολουθεί ανάλυση των αριθμητικών αποτελεσμάτων για κάθε ισότοπο και το πόρισμα του στατιστικού τεστ για την εγκυρότητα του κώδικα στον υπολογισμό της ενεργότητας κάθε ισότοπου, χρησιμοποιώντας τις δύο διαφορετικές βιβλιοθήκες.

#### <sup>106m</sup>Ag

Χρησιμοποιώντας την EAF-2010 ο λόγος  $\frac{C}{E}$  ισούται με  $1,21 \pm 0,27$ . Παρατηρείται στατιστική συμφωνία της πειραματικής μέτρησης ( $2371,7 \pm 9,1\%$  Bq/g) και της υπολογιστικά προσδιοριζόμενης τιμής ( $2880,1 \pm 20,0\%$  Bq/g), με την τιμή του U-test να ισούται με 0,83 (<1,96). Με τη χρήση της TENDL-2017 ο λόγος  $\frac{C}{E}$  λαμβάνει τιμή ίση με  $1,16 \pm 0,26$ . Όμοια και σε αυτή την περίπτωση υπάρχει στατιστική συμφωνία πειραματικής και υπολογιζόμενης τιμής ( $2751,1 \pm 20,8\%$  Bq/g), με το U-test να δίνει αποτέλεσμα ίσο με 0,62 (<1,96). Και οι δύο βιβλιοθήκες θεωρούνται κατάλληλες για τον προσδιορισμό της ενεργότητας του συγκεκριμένου ισότοπου. Σημειώνεται επίσης η εγγύτητα μεταξύ των αβεβαιοτήτων των υπολογιστικών αποτελεσμάτων και με τις δύο βιβλιοθήκες.

#### <sup>196m</sup>Au

Ο κώδικας με τη χρήση της EAF-2010 δίνει λόγο  $\frac{C}{E}$  ίσο με  $1,03 \pm 0,14$ , ενώ σημειώνεται στατιστική συμφωνία μεταξύ της πειραματικής μέτρησης ( $12873,9 \pm 9,1\%$  Bq/g) και της υπολογιστικής τιμής ( $13276,9 \pm 10,0\%$  Bq/g), με την τιμή του U-test να ισούται με 0,23 (<1,96). Στην περίπτωση της TENDL-2017 ο λόγος  $\frac{C}{E}$  είναι ίσος με  $0,93 \pm 0,10$ , ενώ η τιμή του στατιστικού τεστ ισούται με 0,67 (<1,96) σημειώνοντας στατιστική συμφωνία της πειραματικής και της υπολογιζόμενης τιμής ( $11920,1 \pm 6,8\%$  Bq/g). Ως εκ τούτου και οι δύο βιβλιοθήκες θεωρούνται κατάλληλες για τον προσδιορισμό της ενεργότητας του ισότοπου. Αναφέρεται επίσης ότι η αβεβαιότητα στον υπολογισμό της EAF-2010 είναι λίγο υψηλότερη από την αντίστοιχη της TENDL-2017.

#### <sup>196</sup>Au

Με τη χρήση της EAF-2010 υπολογίζεται λόγος  $\frac{C}{E}$  ίσος με  $1,17 \pm 0,22$ , ενώ η τιμή του στατιστικού τεστ είναι 0,76 δείχνοντας στατιστική συμφωνία της πειραματικής ( $12126,1 \pm 4,2\%$ ) και της υπολογιστικής ( $14168,1 \pm 18,6\%$ ) τιμής. Με την TENDL-2017 τα αποτελέσματα δίνουν λόγο  $\frac{C}{E}$  ίσο με  $1,17 \pm 0,22$ , με την υπολογιστική τιμή να ισούται με  $14132,2 \pm 9,4\%$ . Στην περίπτωση αυτή, η τιμή του στατιστικού τεστ είναι 1,42 (<1,96), επιβεβαιώνοντας τη στατιστική συμφωνία των αποτελεσμάτων. Συμπεραίνεται ότι αμφότερες οι βιβλιοθήκες είναι κατάλληλες για τον

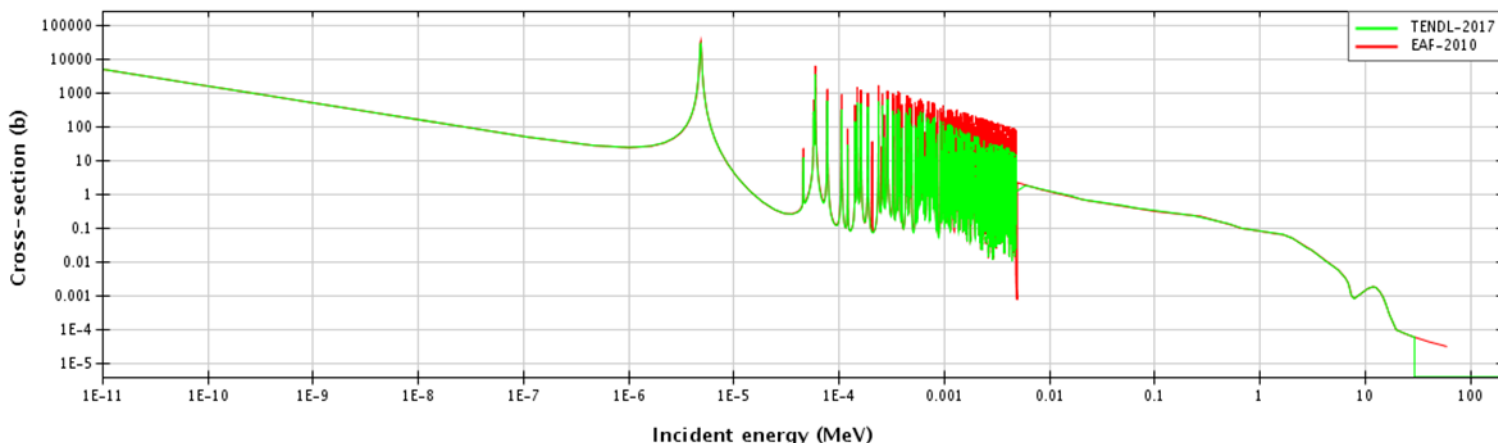
προσδιορισμό της ενεργότητας του εν λόγω ισότοπου. Στην περίπτωση της EAF-2010 υπάρχει μεγαλύτερη αβεβαιότητα στην υπολογιστικά προσδιοριζόμενη τιμή.

### <sup>198</sup>Au

Με χρήση της EAF-2010 η τιμή του λόγου  $\frac{C}{E}$  ισούται με  $1,67 \pm 0,66$ , δηλώνοντας μια σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο τιμών. Συγκεκριμένα η υπολογιστική τιμή ισούται με  $1206.1 \pm 38,7\%$  Bq/g, ενώ η πειραματική μέτρηση ισούται με  $721.0 \pm 8,1\%$  Bq/g. Παρόλα αυτά εάν συνυπολογιστεί η μεγάλη αβεβαιότητα της μέτρησης του λόγου του εν λόγω ισότοπου, η οποία οφείλεται κυρίως στη μεγάλη αβεβαιότητα της υπολογιστικής τιμής δεν μπορούμε να πούμε πως οι δύο τιμές στατιστικά διαφέρουν σημαντικά. Αυτό επιβεβαιώνεται και με το U-test, που για τον εν λόγω ισότοπο δίδει τιμή 1,03. Αντίθετα όμως με τη χρήση της TENDL-2017 παρατηρείται ότι το U-test δίδει τιμή 4.70 (>2.58), επομένως υπάρχει στατιστική ασυμφωνία μεταξύ των δύο τιμών. Αυτό συμβαίνει παρόλο που ο λόγος  $\frac{C}{E}$  είναι στην περίπτωση αυτή μικρότερος, ίσως με  $1,44 \pm 0,13$ , εξαιτίας της μικρής αβεβαιότητας της υπολογιζόμενης τιμής ( $1037.2 \pm 3,2\%$  Bq/g), η οποία είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη που λαμβάνεται με χρήση της EAF-2010. Επομένως τα αποτελέσματα της παρούσας Εργασίας υποδεικνύουν ότι η EAF-2010 είναι καταλληλότερη για τον υπολογιστικό προσδιορισμό της ενεργότητας του <sup>198</sup>Au με τον κώδικα FISPACT.

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο Κεφάλαιο ο <sup>198</sup>Au παράγεται με αντίδραση (n,γ) από τον <sup>197</sup>Au. Η διαφορά των δύο υπολογιστικών αποτελεσμάτων οφείλεται στη διαφορά στις ενεργές διατομές τους μεταξύ των δύο βιβλιοθηκών. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7, κυρίως στο διάστημα  $1 \times 10^{-4}$  MeV μέχρι  $1 \times 10^{-3}$  MeV, που κυριαρχείται από αιχμές συντονισμού, οι ενεργές διατομές του <sup>197</sup>Au της EAF-2010 είναι συστηματικά υψηλότερες από τις αντίστοιχες της TENDL-2017. Ωστόσο, η αβεβαιότητα στις τιμές που υπολογίστηκαν με την EAF-2010 είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη στους υπολογισμούς με την TENDL-2017.

Incident neutron data / / Au197 / MT=102 : (z,γ) / Cross section



**Σχήμα 4.7** Οι ενεργές διατομές του  $^{197}\text{Au}$  στην EAF-2010 και την TENDL-2017

### $^{57}\text{Ni}$

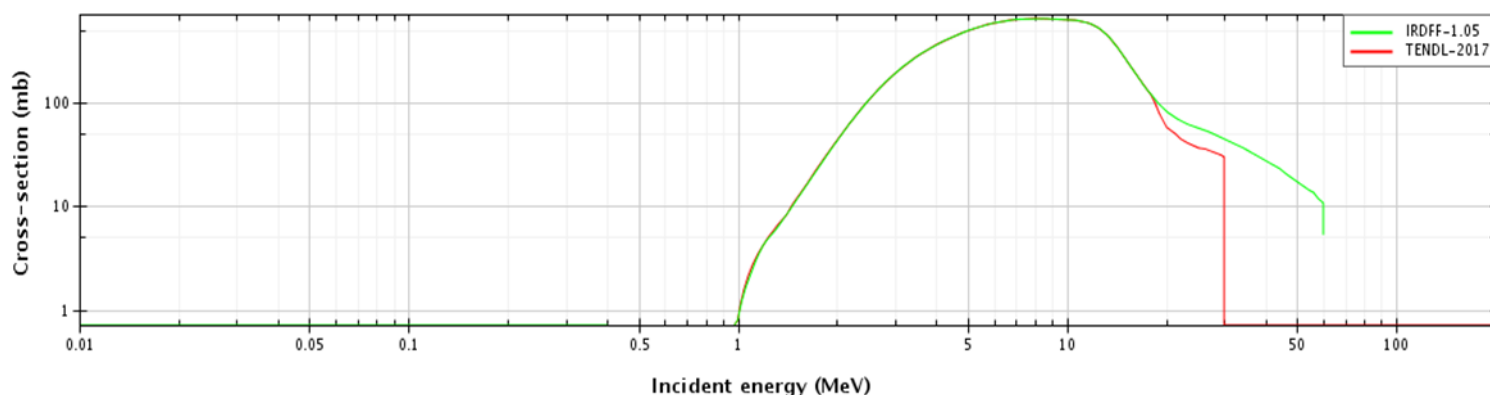
Με τη χρήση της EAF-2010, τα αποτελέσματα του κώδικα δίνουν λόγο  $\frac{C}{E}$  ίσο με  $1,13 \pm 0,15$ , με την τιμή του στατιστικού τεστ  $0,98 (<1,96)$  να επιβεβαιώνει τη συμφωνία των πειραματικών ( $2089,7 \pm 12,1\%$ ) μετρήσεων με τις υπολογιστικές τιμές ( $2361,9 \pm 5,0\%$ ). Παρομοίως με τη χρήση της TENDL-2017 λαμβάνεται λόγος  $\frac{C}{E}$  ίσος με  $1,06 \pm 0,19$ , με την υπολογιστική τιμή να ισούται με  $2223,9 \pm 12,9\%$ . Στην περίπτωση αυτή η τιμή του στατιστικού τεστ είναι  $0,35$ , επιβεβαιώνοντας την εγκυρότητα του κώδικα. Επομένως και οι δύο βιβλιοθήκες παρέχουν έγκυρα αποτελέσματα. Όσο αφορά τις αβεβαιότητες των υπολογιστικών τιμών, παρατηρείται υψηλότερη αβεβαιότητα κατά τη χρήση της TENDL-2017.

### $^{58}\text{Co}$

Χρησιμοποιώντας την EAF-2010 το ισότοπο έχει λόγο  $\frac{C}{E}$  ίσο με  $0,76 \pm 0,23$ , ο οποίος βρίσκεται αισθητά κάτω από τη μονάδα, δηλώνοντας σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο τιμών. Συγκεκριμένα η υπολογιστική τιμή ισούται με  $271,7 \pm 29,2\%$  Bq/g και η πειραματική μέτρηση είναι μεγαλύτερη ίση με  $355,3 \pm 7,5\%$  Bq/g. Παρόλα αυτά η τιμή που δίνει το U-test είναι  $1,00$ , και ως εκ τούτου επιβεβαιώνεται στατιστικά η συμφωνία μεταξύ των δύο. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της μεγάλης αβεβαιότητας που παρουσιάζει η υπολογιστικά προσδιοριζόμενη τιμή. Χρησιμοποιώντας την TENDL-2017, το ισότοπο παρουσιάζει λόγο  $\frac{C}{E}$  ίσο με  $0,71 \pm 0,09$ , με μεγαλύτερη την πειραματική από την υπολογιστική τιμή ( $252,4 \pm 10,0\%$  Bq/g). Αντίθετα όμως με πριν, το U-test σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζει τιμή  $2.81 (>2.58)$  επομένως απορρίπτεται η στατιστική συμφωνία με την πειραματική μέτρηση. Το ισότοπο προέρχεται με αντίδραση (n,p) από το  $^{58}\text{Ni}$  και όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8 η IRDFF (την οποία χρησιμοποιεί η EAF-2010) έχει υψηλότερες

διατομές για την αντίδραση στο διάστημα 20-30 MeV, ωστόσο έχουν παρόμοιες τιμές στο ενεργειακό διάστημα 1-14 MeV.

Incident neutron data / / Ni58 / MT=103 : (z,p) / Cross section

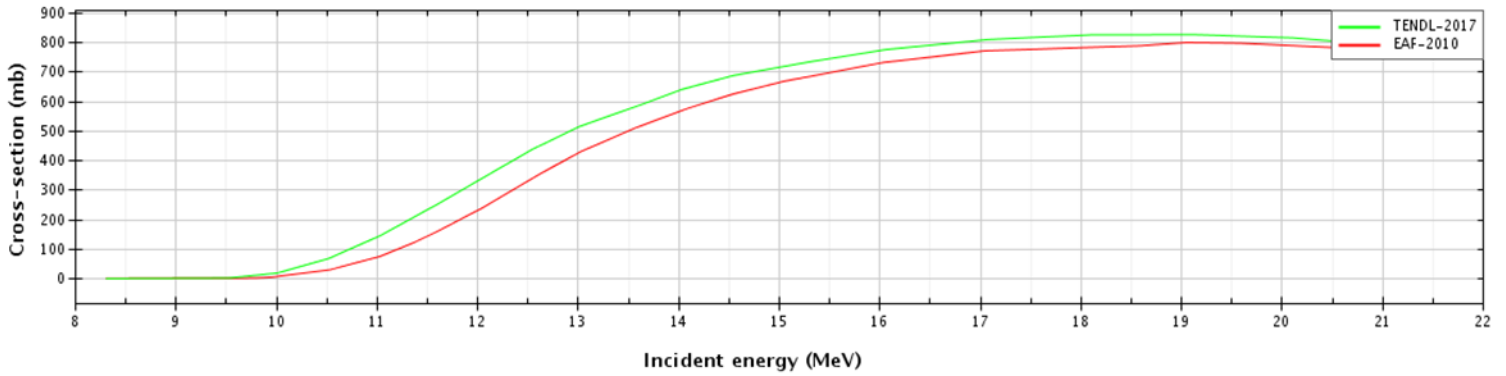


Σχήμα 4.8 Οι ενεργές διατομές του  $^{58}\text{Ni}$  στην EAF-2010 και την TENDL-2017

### $^{57}\text{Co}$

Τα αποτελέσματα του κώδικα με τη χρήση της EAF-2010 δίνουν λόγο  $\frac{C}{E}$  ίσο με  $1,20 \pm 0,15$ , με πειραματική τιμή ίση με  $196,5 \pm 6,4\%$  Bq/g και υπολογιστική τιμή ίση με  $236,7 \pm 10,6\%$  Bq/g. Το στατιστικό τεστ επιβεβαιώνει συμφωνία των δύο αποτελεσμάτων, παρουσιάζοντας τιμή ίση με 1,44 (<1,96). Με χρήση της TENDL-2017 η τιμή U-test για το ισότοπο ισούται με 1,95, βρίσκεται δηλαδή οριακά εντός της περιοχής αποδοχής της στατιστικής συμφωνίας με την πειραματική, ενώ ο λόγος  $\frac{C}{E}$  προκύπτει ίσος με  $1,31 \pm 0,17$ . Ειδικότερα η υπολογιστική τιμή ισούται με  $256,8 \pm 11,0\%$  Bq/g, ενώ η αβεβαιότητά της δεν διαφέρει σημαντικά με την αντίστοιχη της EAF-2010. Επομένως και οι δύο βιβλιοθήκες θεωρούνται κατάλληλες για το  $^{57}\text{Co}$ . Το  $^{57}\text{Co}$  προέρχεται από αντίδραση (n,np) ή (n,d) του  $^{58}\text{Ni}$ . Μελετώντας τις ενεργές διατομές του  $^{58}\text{Ni}$  για την κύρια αντίδραση (n,np), με ποσοστό 97,07%, η υψηλότερη υπολογιστική τιμή της TENDL-2017 η οποία οδηγεί σε οριακό στατιστικό πόρισμα, οφείλεται στις μεγαλύτερες ενεργές διατομές του  $^{58}\text{Ni}$  από τις αντίστοιχες της EAF-2010, όπως φαίνονται στο σχήμα 4.9.

Incident neutron data / / Ni58 / MT=28 : (z,n+p) / Cross section



**Σχήμα 4.9** Οι ενεργές διατομές του  $^{58}\text{Ni}$  στην EAF-2010 και την TENDL-2017

### $^{54}\text{Mn}$

Με τη χρήση της EAF-2010 ο λόγος  $\frac{C}{E}$  προκύπτει ίσος με  $1,15 \pm 0,14$  με την πειραματική τιμή να ισούται με  $355,6 \pm 7,1\%$  Bq/g και την υπολογιστική τιμή με  $409,0 \pm 10,0\%$  Bq/g. Προκύπτει τιμή του στατιστικού τεστ 1,11 (<1,96) που επιβεβαιώνει την εγκυρότητα του υπολογισμού ως προς την πειραματική τιμή. Όμοια με την TENDL-2017 προκύπτει λόγος  $\frac{C}{E}$  ίσος με  $1,05 \pm 0,14$  με την υπολογιστική τιμή να ισούται στην περίπτωση αυτή με  $373,4 \pm 11,1\%$  Bq/g. Η τιμή του U-test είναι 0,37 (<1,96) επιβεβαιώνοντας και στην περίπτωση αυτή την εγκυρότητα της μέτρησης. Έτσι αμφότερες οι βιβλιοθήκες θεωρούνται πως παρέχουν έγκυρα αποτελέσματα στον κώδικα. Η αβεβαιότητα των υπολογιστικών τιμών με χρήση των δύο βιβλιοθηκών δεν διαφέρει σημαντικά.

### $^{92m}\text{Nb}$

Στην περίπτωση της EAF-2010 λαμβάνεται λόγος  $\frac{C}{E}$  ίσος με  $0,98 \pm 0,12$  με την πειραματική μέτρηση να ισούται με  $4320,9 \pm 6,7\%$  Bq/g και την υπολογιστική τιμή με  $4223,6 \pm 10,0\%$  Bq/g. Η τιμή του στατιστικού τεστ ισούται με 0,19 (<1,96) επιβεβαιώνει τη συμφωνία πειραματικής και υπολογιστικής τιμής. Με τη χρήση της TENDL-2017 ο λόγος  $\frac{C}{E}$  προκύπτει επίσης ίσος με  $0,98 \pm 0,17$  με την υπολογιστική τιμή να ισούται στην περίπτωση αυτή με  $4228,9 \pm 16,2\%$  Bq/g. Η τιμή του U-test είναι 0,12 (<1,96) και έτσι επιβεβαιώνεται η εγκυρότητα του υπολογισμού. Και οι δύο βιβλιοθήκες δίνουν έγκυρα αποτελέσματα για το ισότοπο, ενώ η τιμή στην περίπτωση της TENDL-2017 παρουσιάζει ελαφρώς μεγαλύτερη αβεβαιότητα από την αντίστοιχη της EAF-2010.

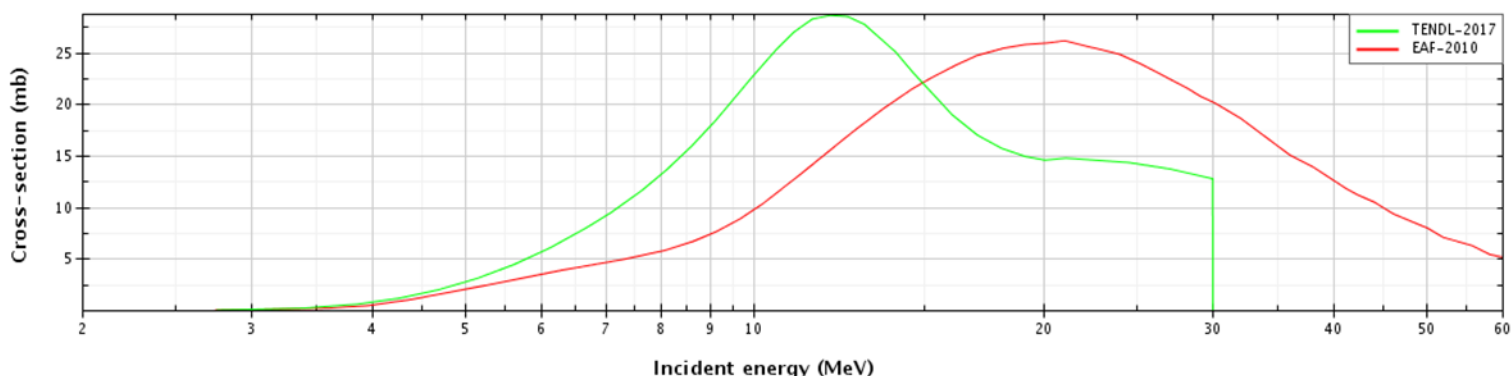
### <sup>102m</sup>Rh

Με την EAF-2010 ο κώδικας δίνει λόγο  $\frac{C}{E}$  ίσο με  $1,32 \pm 0,66$  με πειραματική μέτρηση  $146,9 \pm 40,0\%$  Bq/g και υπολογιστική τιμή  $193,5 \pm 30,0\%$  Bq/g. Η τιμή του στατιστικού τεστ είναι 0,56 δείχνοντας την εγκυρότητα του υπολογισμού. Με την TENDL-2017 προκύπτει ο λόγος  $\frac{C}{E}$  ίσος με  $1,64 \pm 0,67$ , με την υπολογιστική τιμή να είναι  $240,9 \pm 8,5\%$  Bq/g. Το στατιστικό τεστ δίνει αποτέλεσμα ίσο με 1,51, επιβεβαιώνοντας τη συμφωνία μεταξύ των δύο τιμών. Ιδιαίτερα στην περίπτωση της TENDL-2017 η υπολογιστική τιμή διαφέρει σημαντικά από την πειραματική. Εξαιτίας όμως της μεγάλης αβεβαιότητας της πειραματικής μέτρησης, στατιστικά οι τιμές φαίνονται να συμφωνούν. Έτσι για τον υπολογισμό με τον κώδικα της ενεργότητας του <sup>102m</sup>Rh θεωρούνται και οι δύο βιβλιοθήκες έγκυρες. Η αβεβαιότητα στη μέτρησή της EAF-2010 όμως είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της TENDL-2017.

### <sup>103</sup>Ru

Χρησιμοποιώντας την EAF-2010 προκύπτει αρκετά υψηλός λόγος  $\frac{C}{E}$  ίσος με  $1,40 \pm 0,30$  με πειραματική μέτρηση ίση με  $32,8 \pm 7,0\%$  Bq/g και υπολογιστική τιμή ίση με  $45,9 \pm 20,0\%$  Bq/g. Το στατιστικό τεστ παρόλα αυτά δίδει τιμή 1,38 (<1,96) επιβεβαιώνοντας τη στατιστική συμφωνία των δύο αποτελεσμάτων. Ακόμα μεγαλύτερος λόγος  $\frac{C}{E}$  ίσος με  $1,48 \pm 0,80$ , λαμβάνεται από τα αποτελέσματα της TENDL-2017 όπου η υπολογιστική τιμή είναι  $48,7 \pm 53,7\%$  Bq/g. Η αβεβαιότητα της τιμής είναι ιδιαίτερα υψηλή, υψηλότερη από εκείνη της EAF-2010, και λόγω αυτού το στατιστικό τεστ με τιμή 0,61 επιβεβαιώνει την εγκυρότητα του κώδικα. Και οι δύο βιβλιοθήκες δίνουν στατιστικά ορθά αποτελέσματα συγκρινόμενα προς τα πειραματικά. Οι πολύ ψηλές αβεβαιότητες, κυρίως στην περίπτωση της TENDL-2017, οφείλονται στις μεγάλες διακυμάνσεις των ενεργών διατομών του <sup>103</sup>Ru (σχήμα 4.10), από το οποίο προέρχεται με αντίδραση (n,p) το ισότοπο.

Incident neutron data // Rh103 / MT=103 : (z,p) / Cross section



**Σχήμα 4.10** Οι ενεργές διατομές του  $^{103}\text{Rh}$  στην EAF-2010 και την TENDL-2017

**$^{48}\text{Sc}$**

Με την EAF-2010 προκύπτει λόγος  $\frac{C}{E}$  πολύ κοντά στη μονάδα, ίσος με  $1,05 \pm 0,14$  με πειραματική μέτρηση ίση με  $4104,1 \pm 9,1\%$  Bq/g και υπολογιστική ίση με  $4317,2 \pm 10,0\%$  Bq/g. Επιβεβαιώνεται η εγκυρότητα της υπολογιστικής τιμής με το στατιστικό τεστ που δίνει αποτέλεσμα 0,37. Με την TENDL-2017 ο λόγος  $\frac{C}{E}$  ισούται με  $1,04 \pm 0,13$ , ευρισκόμενος επίσης πολύ κοντά στη μονάδα, ενώ η υπολογιστική τιμή σε αυτή την περίπτωση ισούται με  $4281,7 \pm 8,4\%$  Bq/g. Και οι δύο βιβλιοθήκες δίνουν τιμές πολύ κοντά στις πειραματικές, ενώ οι αβεβαιότητές τους για το συγκεκριμένο ισότοπο δεν διαφέρουν σημαντικά.

**$^{47}\text{Sc}$**

Χρησιμοποιώντας την EAF-2010 προκύπτει λόγος  $\frac{C}{E}$  ίσος με  $1,15 \pm 0,49$  με πειραματική μέτρηση ίση με  $1032,2 \pm 5,6\%$  Bq/g και υπολογιστική τιμή ίση με  $1189,8 \pm 42,4\%$  Bq/g. Το στατιστικό τεστ δίνει πολύ χαμηλή τιμή ίση με 0,31 (<1,96) επιβεβαιώνοντας τη συμφωνία μεταξύ των δύο αποτελεσμάτων. Με την TENDL-2017 προκύπτει τιμή του λόγου  $\frac{C}{E}$  ίση με  $0,88 \pm 0,19$ , δείχνοντας μια αντίθετη τάση από εκείνη της EAF-2010, με υπολογιστική τιμή μικρότερη της πειραματικής μέτρησης και ίση με  $908,7 \pm 20,6\%$  Bq/g. Το στατιστικό τεστ και σε αυτή την περίπτωση δίνει χαμηλή τιμή ίση με 0,63 (<1,96). Επομένως και οι δύο βιβλιοθήκες επιβεβαιώνουν την στατιστική συμφωνία υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων. Σημειώνεται η ιδιαίτερα ψηλή τιμή της αβεβαιότητας της τιμής με τη χρήση της EAF-2010, στην οποία ενδεχομένως να οφείλεται και η διαφορά με την μέτρηση της TENDL-2017.



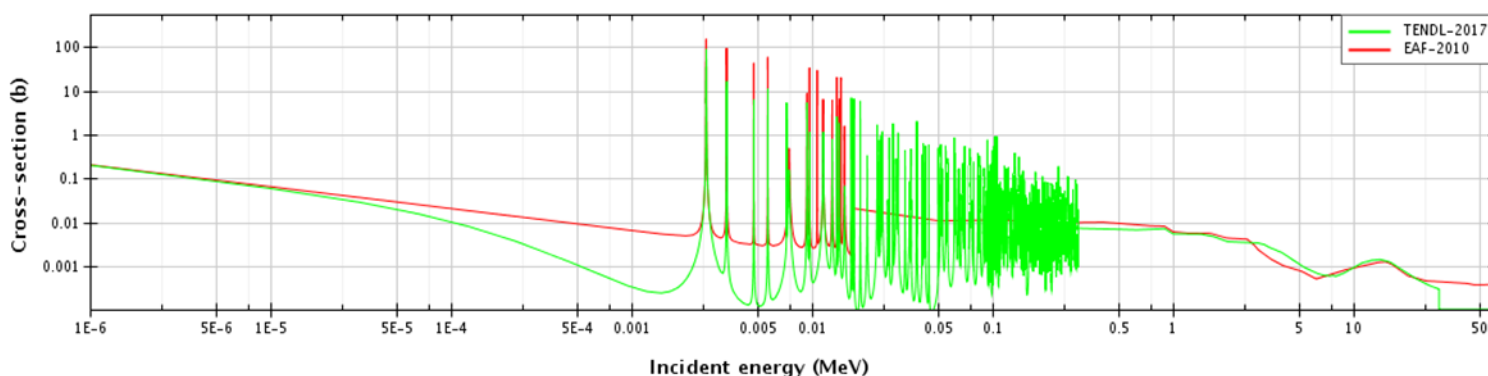
## <sup>46</sup>Sc

Με τη χρήση της EAF-2010 προκύπτει λόγος  $\frac{C}{E}$  ίσος με  $1,19 \pm 0,30$  με πειραματική μέτρηση ίση με  $41,7 \pm 13,2\%$  Bq/g και υπολογιστική τιμή ίση με  $49,4 \pm 21,7\%$  Bq/g. Η τιμή του στατιστικού τεστ είναι  $0,64 (<1,96)$  επιβεβαιώνοντας τη συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων. Στην περίπτωση της TENDL-2017 ο λόγος  $\frac{C}{E}$  ισούται με  $1,22 \pm 0,17$ , με υπολογιστική τιμή  $51,0 \pm 5,4\%$  Bq/g. Το στατιστικό τεστ δίνει τιμή σχετικά υψηλή ίση με  $1,51 (<1,96)$ , που επιβεβαιώνει παρόλα αυτά τη συμφωνία των δύο αποτελεσμάτων. Επομένως και οι δύο βιβλιοθήκες αποδεικνύουν την εγκυρότητα του κώδικα. Επίσης η αβεβαιότητα της υπολογιστικής τιμής της EAF-2010 είναι αρκετά υψηλότερη από την αντίστοιχη της TENDL-2017.

## <sup>90m</sup>Y

Χρησιμοποιώντας την EAF-2010 ο λόγος  $\frac{C}{E}$  λαμβάνει τιμή  $1,14 \pm 0,57$ , όπου η πειραματική μέτρηση ισούται με  $197,7 \pm 7,3\%$  Bq/g και υπολογιστική τιμή ίση με  $226,0 \pm 49,7\%$  Bq/g. Το στατιστικό τεστ επιβεβαιώνει τη συμφωνία των αποτελεσμάτων λαμβάνοντας τιμή ιδιαίτερα χαμηλή ίση με  $0,25$ . Με τη χρήση της TENDL-2017 ο λόγος  $\frac{C}{E}$  λαμβάνει τιμή  $1,18 \pm 0,71$ , με υπολογιστική τιμή ίση με  $233,8 \pm 59,5\%$  Bq/g. Το στατιστικό τεστ επιβεβαιώνει τη συμφωνία των αποτελεσμάτων επίσης με πολύ χαμηλή τιμή ίση με  $0,26$ . Επομένως ο κώδικας με αμφότερες τις βιβλιοθήκες δίνει έγκυρα αποτελέσματα. Οι αβεβαιότητες και των δύο υπολογιστικών τιμών είναι ιδιαίτερα υψηλές, λόγω των μεγάλων διακυμάνσεων των ενεργών διατομών του <sup>89</sup>Y από το οποίο προέρχεται το <sup>90m</sup>Y, με αντίδραση (n,g), όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.11.

Incident neutron data / / Y89 / MT=102 : (z,y) / Cross section



Σχήμα 4.11 Οι ενεργές διατομές του <sup>89</sup>Y στην EAF-2010 και την TENDL-2017

### <sup>88</sup>γ

Με την EAF-2010 προκύπτει λόγος  $\frac{C}{E}$  ίσος με  $1,17 \pm 0,13$ , όπου η πειραματική μέτρηση ισούται με  $779,1 \pm 4,4\%$  Bq/g και η υπολογιστική τιμή μεγαλύτερη ίση με  $914,5 \pm 10,0\%$  Bq/g. Το στατιστικό τεστ έχει τιμή 1,39 (<1,96) επιβεβαιώνοντας τη συμφωνία των αποτελεσμάτων. Χρησιμοποιώντας την TENDL-2017 προκύπτει λόγος  $\frac{C}{E}$  ίσος με  $1,13 \pm 0,10$ , με υπολογιστική τιμή ίση με  $881,9 \pm 7,2\%$  Bq/g. Η τιμή του στατιστικού τεστ 1,43 (<1,96) επιβεβαιώνει και στην περίπτωση αυτή τη συμφωνία των αποτελεσμάτων. Επομένως ο κώδικας και με τις δύο βιβλιοθήκες δίνει έγκυρα αποτελέσματα. Οι αβεβαιότητες των τιμών και των δύο βιβλιοθηκών είναι ιδιαίτερα χαμηλές και χωρίς σημαντική διαφορά μεταξύ τους.

### <sup>69m</sup>Zn

Χρησιμοποιώντας την EAF-2010 ο λόγος  $\frac{C}{E}$  ισούται με  $1,15 \pm 0,34$ , όπου η πειραματική μέτρηση ισούται με  $755,4 \pm 1,7\%$  Bq/g και η υπολογιστική τιμή μεγαλύτερη ίση με  $866,6 \pm 29,5\%$  Bq/g. Η τιμή του στατιστικού τεστ είναι 0,43 (<1,96) επιβεβαιώνοντας τη συμφωνία των αποτελεσμάτων. Με την TENDL-2017 ο λόγος  $\frac{C}{E}$  ισούται με  $1,14 \pm 0,15$ , με την υπολογιστική τιμή ίση με  $863,7 \pm 12,9\%$  Bq/g. Το στατιστικό τεστ με τιμή 0,96 (<1,96) επιβεβαιώνει και στην περίπτωση αυτή τη συμφωνία των αποτελεσμάτων. Επομένως ο κώδικας παράγει έγκυρα αποτελέσματα και με τις δύο βιβλιοθήκες. Η αβεβαιότητα των τιμών της EAF-2010 είναι υψηλότερη των αντίστοιχων της TENDL-2017.

### <sup>63</sup>Zn

Με την EAF-2010 ο λόγος  $\frac{C}{E}$  παρουσιάζει τιμή ίση με  $1,06 \pm 0,11$ , όπου η πειραματική μέτρηση ισούται με  $75205,8 \pm 2,7\%$  Bq/g και η υπολογιστική τιμή μεγαλύτερη ίση με  $79739,4 \pm 9,9\%$  Bq/g. Το στατιστικό τεστ δίνει τιμή 0,55 (<1,96) επιβεβαιώνοντας τη συμφωνία των αποτελεσμάτων. Με την TENDL-2017 ο λόγος  $\frac{C}{E}$  ισούται με  $0,88 \pm 0,10$ , με την υπολογιστική τιμή ίση με  $65858,9 \pm 11,2\%$  Bq/g μικρότερη της πειραματικής, ακολουθώντας αντίθετη τάση από εκείνη της EAF-2010. Το στατιστικό τεστ με τιμή 1,23 (<1,96) επιβεβαιώνει όμως και στην περίπτωση αυτή τη συμφωνία των δύο τιμών. Επομένως ο κώδικας παράγει έγκυρα αποτελέσματα και με τις δύο βιβλιοθήκες. Οι αβεβαιότητες των τιμών των δύο βιβλιοθηκών είναι σχετικά χαμηλές και δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους.

### <sup>65</sup>Zn

Χρησιμοποιώντας την EAF-2010 ο λόγος  $\frac{C}{E}$  παρουσιάζει τιμή ίση με  $1,10 \pm 0,13$ , όπου η πειραματική μέτρηση ισούται με  $97,4 \pm 6,4\%$  Bq/g και η υπολογιστική τιμή

μεγαλύτερη ίση με  $107,4 \pm 9,9\%$  Bq/g. Το στατιστικό τεστ δίνει τιμή ίση με 0,81 (<1,96) επιβεβαιώνοντας τη συμφωνία των αποτελεσμάτων. Με την TENDL-2017 ο λόγος  $\frac{C}{E}$  παρουσιάζει τιμή ίση με  $1,03 \pm 0,13$ , με την υπολογιστική τιμή ίση με  $100,3 \pm 10,6\%$  Bq/g. Το στατιστικό τεστ με χαμηλότερη τιμή ίση με 0,23 (<1,96) επιβεβαιώνει και στην περίπτωση αυτή τη συμφωνία των δύο τιμών. Επομένως ο κώδικας παράγει έγκυρα αποτελέσματα και με τις δύο βιβλιοθήκες. Οι αβεβαιότητες των τιμών των δύο βιβλιοθηκών είναι σχετικά χαμηλές και δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους.

#### **$^{64}\text{Cu}$**

Χρησιμοποιώντας την EAF-2010 ο λόγος  $\frac{C}{E}$  παρουσιάζει τιμή ίση με  $1,22 \pm 0,14$ , όπου η πειραματική μέτρηση ισούται με  $13804,9 \pm 6,2\%$  Bq/g και η υπολογιστική τιμή μεγαλύτερη ίση με  $16790,1 \pm 10,0\%$  Bq/g. Το στατιστικό τεστ δίνει τιμή ίση με 1,58 (<1,96) επιβεβαιώνοντας τη συμφωνία των αποτελεσμάτων. Με την TENDL-2017 ο λόγος  $\frac{C}{E}$  παρουσιάζει τιμή ίση με  $1,23 \pm 0,25$ , με την υπολογιστική τιμή ίση με  $16937,3 \pm 19,5\%$  Bq/g. Το στατιστικό τεστ με χαμηλότερη τιμή ίση με 0,92 (<1,96) επιβεβαιώνει και στην περίπτωση αυτή τη συμφωνία των δύο τιμών. Επομένως ο κώδικας παράγει έγκυρα αποτελέσματα και με τις δύο βιβλιοθήκες. Η αβεβαιότητα των τιμών της EAF-2010 είναι χαμηλότερη των αντίστοιχων της TENDL-2017.

## **4.4 Παρατηρήσεις**

### **Το $^{60}\text{Co}$ και το $^{86}\text{Rb}$**

Αυτά δεν είναι αξιοποιήσιμα στην Εργασία αυτή διότι δεν ανιχνεύονται στις πειραματικές μετρήσεις λόγω του ότι η ενεργότητα τους βρίσκεται κάτω από το ελάχιστο όριο ανίχνευσης.

### **Το $^{102}\text{Rh}$**

Το ισότοπο αυτό δεν είναι επίσης αξιοποιήσιμο για τη σύγκριση με υπολογιστικά δεδομένα, καθότι εκπέμπει φωτόνια ακριβώς στις ίδιες ενέργειες με το  $^{102m}\text{Rh}$  (εκτός από τη φωτοκορυφή των 648,58 KeV στην οποία εκπέμπει μόνο το  $^{102m}\text{Rh}$ ).

## **4.5 Αποτελέσματα χρήσης της εντολής GRPCONVERT**

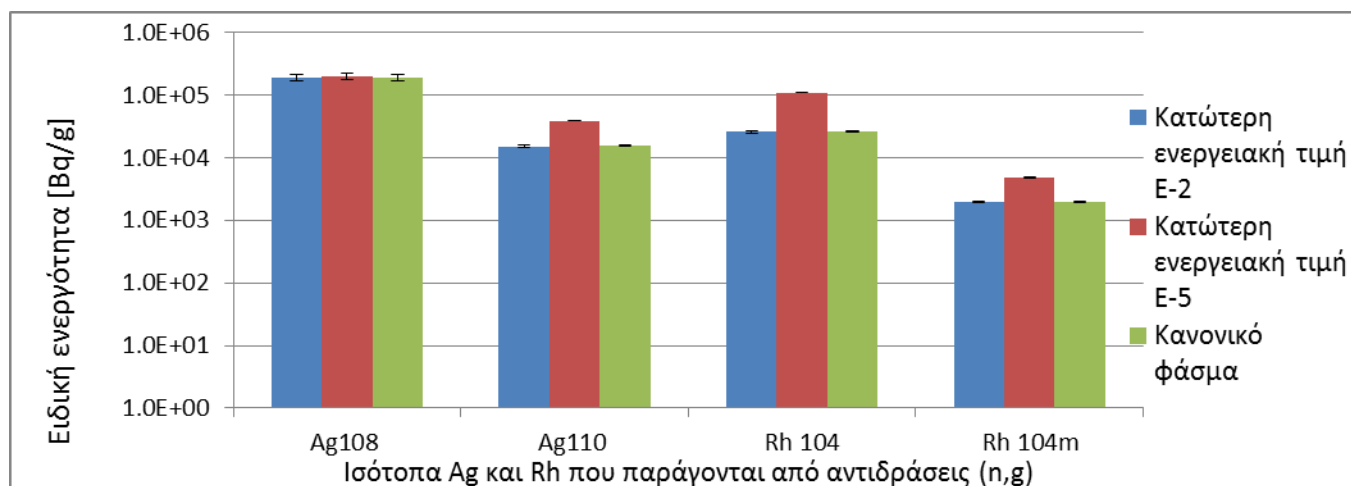
Πραγματοποιήθηκε στη συνέχεια σύγκριση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων που δίδει το ενεργειακό φάσμα νετρονίων το οποίο έχει μετατραπεί από 175 σε 709 ενεργειακές ομάδες μέσω της εντολής GRPCONVERT, με τα υπολογιστικά αποτελέσματα που λαμβάνονται χρησιμοποιώντας ενεργειακό φάσμα με διαμερισμό 709 ενεργειακών ομάδων. Σκοπός της σύγκρισης είναι η επιβεβαίωση της εγκυρότητας αυτής της μετατροπής, η στατιστική συμφωνία δηλαδή των αποτελεσμάτων που δίδει ο κώδικας και στις δύο περιπτώσεις. Η

σύγκριση γίνεται για τα κυριότερα ισότοπα που παράγονται κατά την ακτινοβόληση των ελασμάτων.

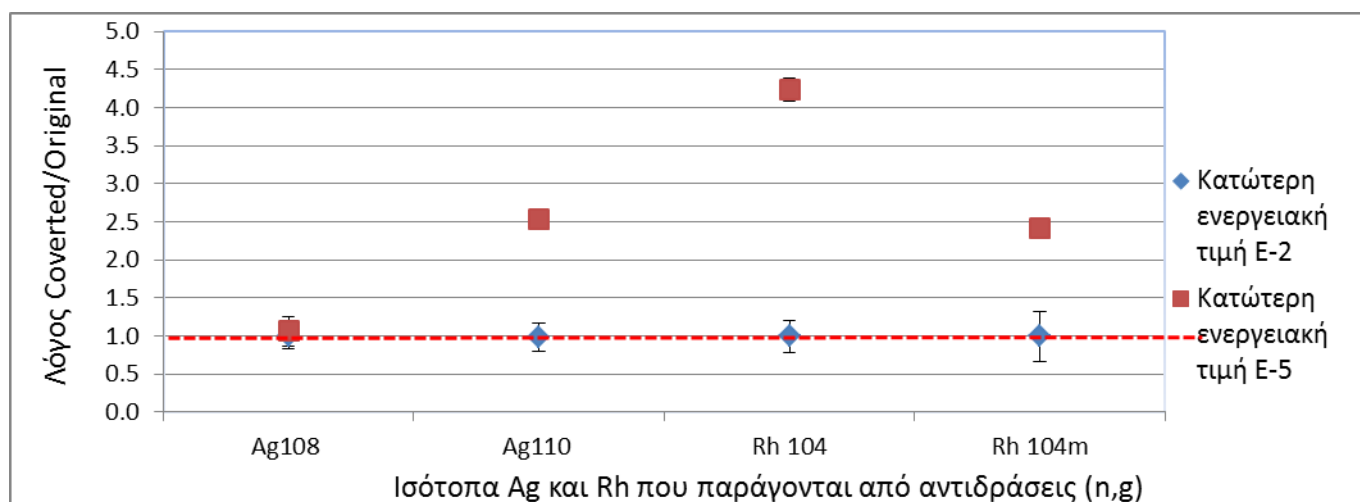
#### 4.5.1 Περικοπή του κατώτατου ενεργειακού διαστήματος

Το κατώτερο ενεργειακό όριο του διαμερισμού σε 175 ενεργειακές ομάδες είναι ίσο με  $1 \times 10^{-5}$  eV και το αμέσως επόμενο όριο ισούται με  $1 \times 10^{-1}$  eV. Ως εκ τούτου δημιουργείται ένα πολύ μεγάλο ενεργειακό διάστημα, το οποίο με τη μετατροπή του φάσματος σε 709 ενεργειακές ομάδες πρόκειται να δώσει αποτελέσματα που θα απέχουν από την πραγματική κατανομή νετρονίων στην περιοχή αυτή (στο διάστημα αυτό δημιουργούνται 197 νέα ενεργειακά διαστήματα). Αυτό θα έχει μεγαλύτερη σημασία στους υπολογισμούς των ισωτόπων που παράγονται μέσω αντιδράσεων ενσωμάτωσης θερμικών νετρονίων (δηλαδή σε χαμηλές ενέργειες). Για τον λόγο αυτό συνίσταται να τεθεί ως κατώτερο ενεργειακό όριο του φάσματος το  $1 \times 10^{-2}$  eV (βλ. Spectra Conversion, <https://fisfact.ukaea.uk>).

Με σκοπό τη διερεύνηση του ιδανικού κατώτερου ορίου ενέργειας, έγινε δοκιμή εκτέλεσης του κώδικα για τα ελάσματα αργύρου (Ag) και ροδίου (Rh), χρησιμοποιώντας κατά την εκτέλεση της εντολής GRPCONVERT ως είσοδο, το φάσμα των 175 ομάδων με κάτω ενεργειακό όριο το  $1 \times 10^{-5}$  eV στην πρώτη περίπτωση και το  $1 \times 10^{-2}$  eV στη δεύτερη περίπτωση. Έπειτα έγινε σύγκριση των πιο πάνω αποτελεσμάτων με τα πειραματικά. Επιλέχθηκε να γίνει σύγκριση για συγκεκριμένα ισότοπα που προέρχονται από αντιδράσεις (n,γ), που λαμβάνουν χώρα με νετρόνια σε χαμηλές ενέργειες και έτσι επηρεάζονται σημαντικά από την αλλαγή που γίνεται στην κατώτερη ενεργειακή ομάδα. Έτσι επιλέχθηκαν προς σύγκριση τα ισότοπα  $^{108}\text{Ag}$  (8.2% από n,γ),  $^{110}\text{Ag}$  (100% από n,γ),  $^{104}\text{Rh}$  (100% από n,γ) και  $^{104\text{m}}\text{Rh}$  (100% από n,γ). Λεπτομερή αποτελέσματα για κάθε περίπτωση αλλά και για τις συγκρίσεις φαίνονται στα Παραρτήματα ΣΤ1, ΣΤ2, ΣΤ3, ΣΤ4 (βλ. σχήμα 4.12).



**Σχήμα 4.12** Σύγκριση ειδικών ενεργοτήτων μεταξύ κανονικού φάσματος και μετατραπέντων φασμάτων με κατώτερες ενεργειακές τιμές  $1 \times 10^{-2}$  και  $1 \times 10^{-5}$  eV.

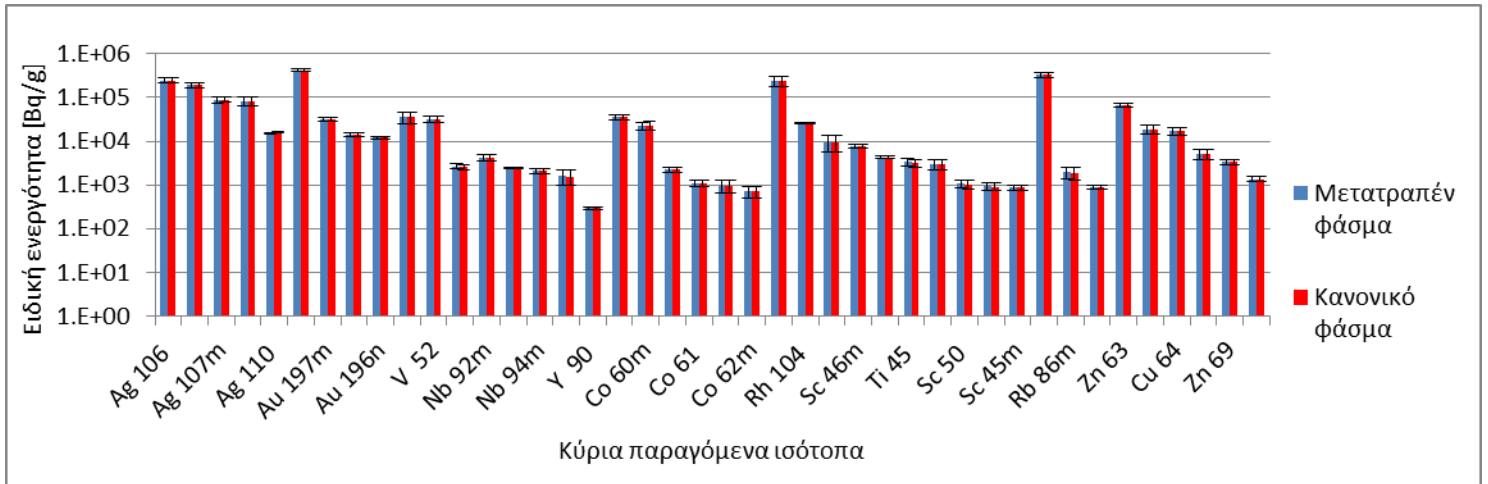


**Σχήμα 4.13** Λόγοι ειδικών ενεργοτήτων μεταξύ κανονικού φάσματος, και μετατραπέντων με κατώτερες ενεργειακές τιμές  $1 \times 10^{-2}$  και  $1 \times 10^{-5}$  eV.

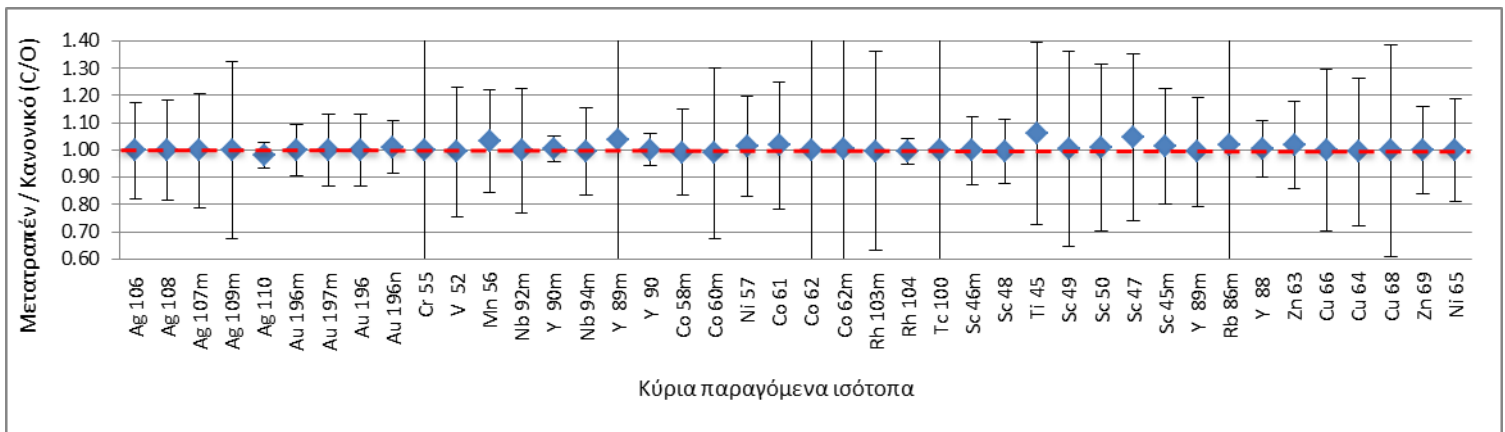
Στα σχήματα 4.12 και 4.13 παρατηρείται συμφωνία μεταξύ των τιμών που δίνει το κανονικό φάσμα με τις τιμές του μετατραπέντος φάσματος με κατώτατο ενεργειακό όριο ίσο με  $1 \times 10^{-2}$  eV. Συγκεκριμένα για τα ισότοπα  $^{110}\text{Ag}$ ,  $^{104}\text{Rh}$  και  $^{104\text{m}}\text{Rh}$  υπάρχει σημαντικό σφάλμα στα αποτελέσματα που δίνει το φάσμα που έχει μετατραπεί με κατώτατο ενεργειακό όριο το  $1 \times 10^{-5}$  eV. Αυτό επιβεβαιώνει την πρόταση για χρήση του  $1 \times 10^{-2}$  eV ως κατώτατο ενεργειακό όριο και όχι του  $1 \times 10^{-5}$  eV. Επομένως μπορούν να ακολουθήσουν στην επόμενη παράγραφο διαγράμματα για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που δίνει το κανονικό φάσμα με τα αποτελέσματα που δίνει το φάσμα που έχει μετατραπεί με κατώτατο ενεργειακό όριο το  $1 \times 10^{-2}$  eV.

#### 4.5.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων κανονικού και μετατραπέντος φάσματος

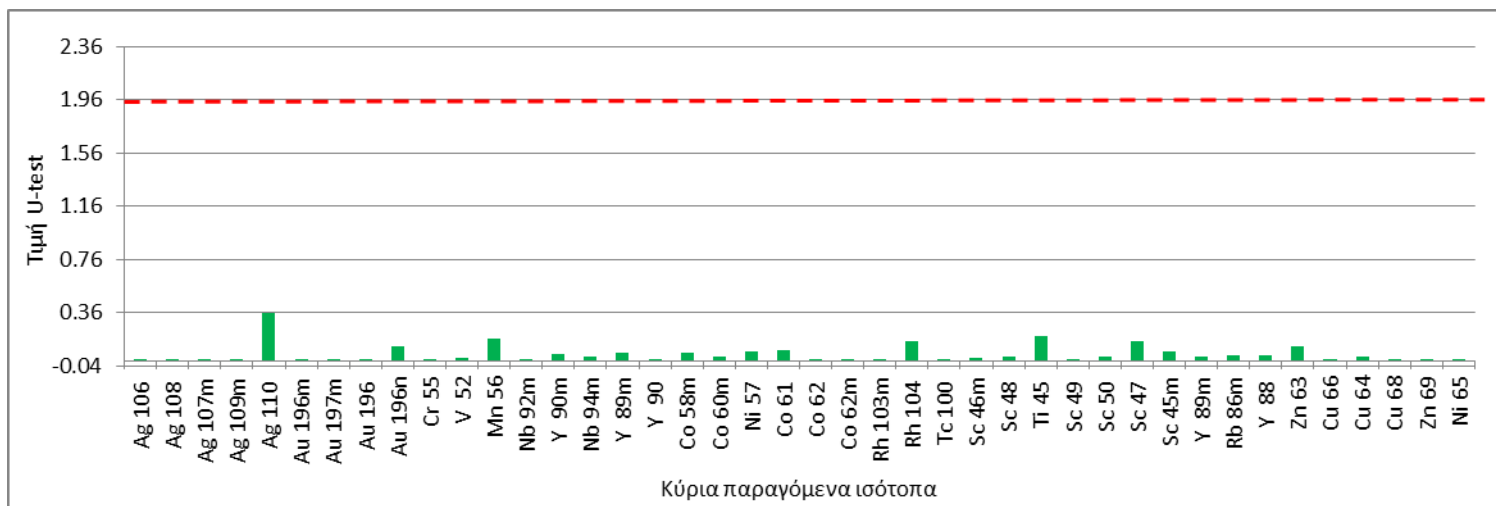
Στο σχήμα 4.14 παρατίθενται οι ειδικές ενεργότητες των κύριων παραγόμενων ισοτόπων για το μετατραπέν και το αυθεντικό φάσμα. Έπειτα δίνεται στο σχήμα 4.15 ο λόγος  $\frac{C}{O}$  (C – Converted, O – Original) και τέλος στο σχήμα 4.16 παρουσιάζονται οι τιμές του U-test που έγινε. Είναι εμφανές από όλα τα διαγράμματα ότι οι τιμές που δίνει ο κώδικας με τα δύο φάσματα είναι στατιστικά όμοιες. Λεπτομερή αποτελέσματα φαίνονται στα Παραρτήματα ΣΤ5, ΣΤ6, ΣΤ7.



**Σχήμα 4.14** Σύγκριση ειδικών ενεργοτήτων μεταξύ κανονικού και μετατραπέντος φάσματος



**Σχήμα 4.15** Λόγοι ειδικών ενεργοτήτων μεταξύ κανονικού και μετατραπέντος φάσματος



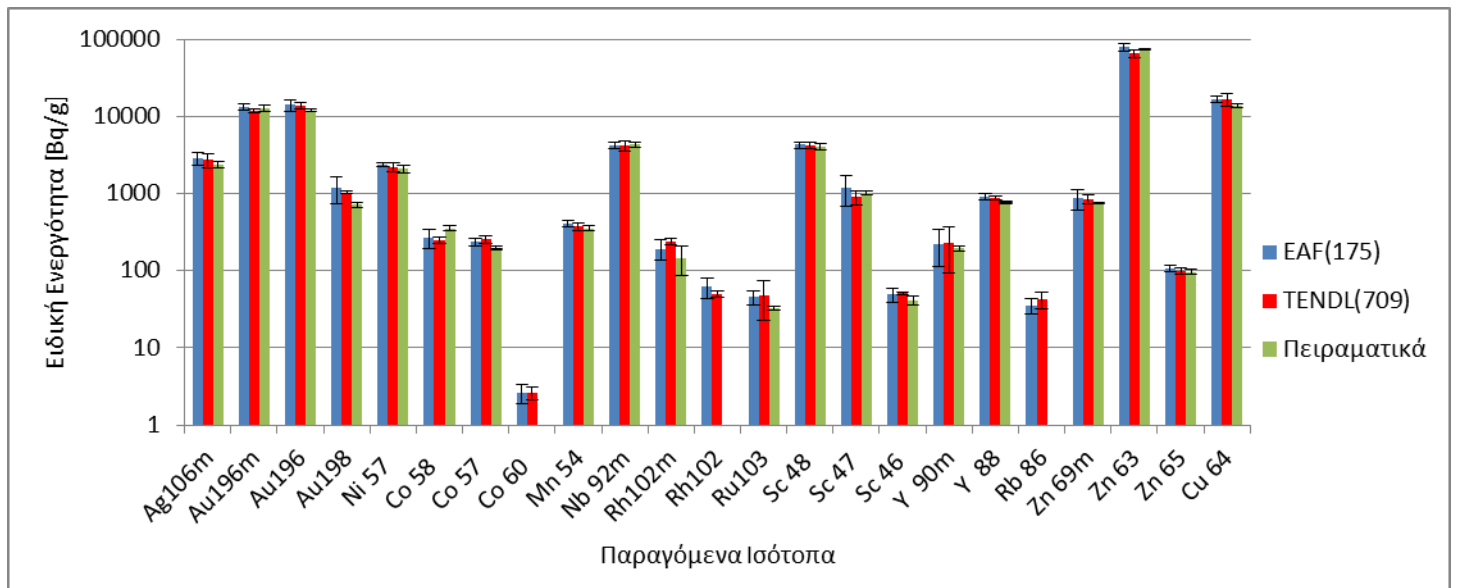
**Σχήμα 4.16** U-test για σύγκριση των ειδικών ενεργοτήτων μεταξύ κανονικού και μετατραπέντος φάσματος

Παρατηρείται αρχικά πολύ καλή προσέγγιση μεταξύ των δύο αποτελεσμάτων. Οι περισσότεροι λόγοι  $\frac{C}{O}$  βρίσκονται πολύ κοντά στη μονάδα, με τον μεγαλύτερο να είναι αυτός του  $^{45}\text{Ti}$  ίσος με  $1,06 \pm 31,4\%$  και τον μικρότερο αυτόν του  $^{110}\text{Ag}$  ίσο με  $0,98 \pm 4,8\%$ .

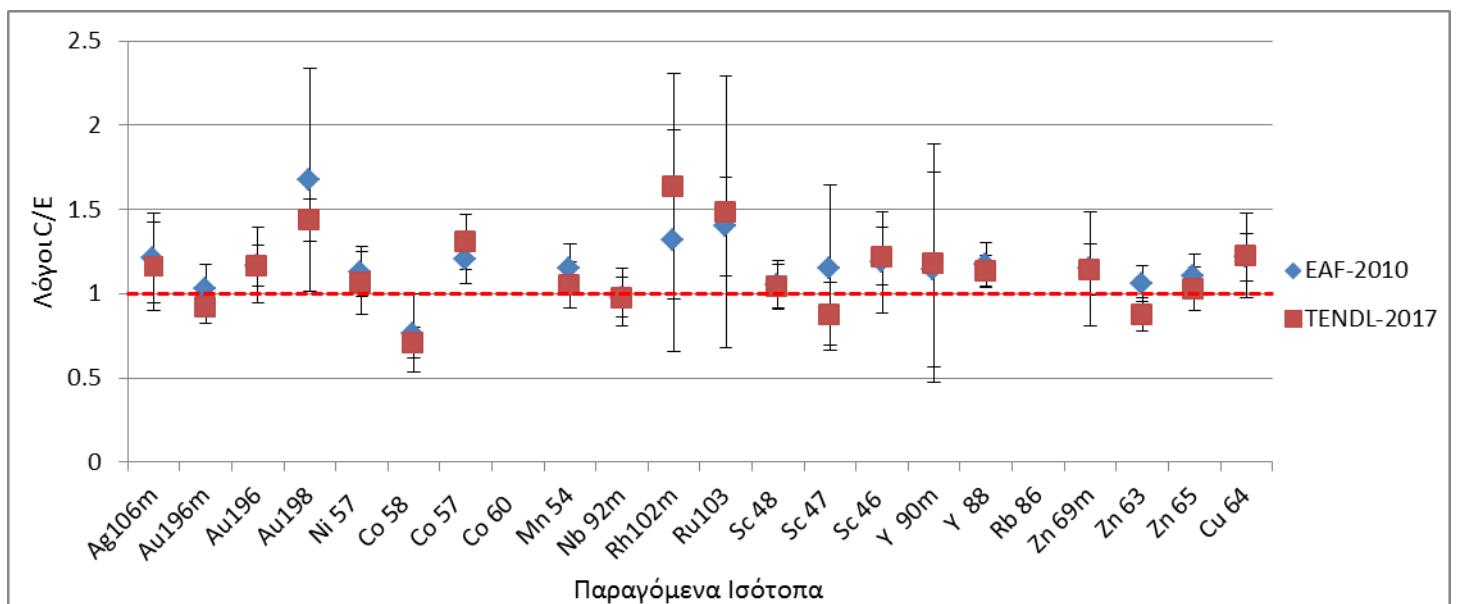


## Κεφάλαιο 5: Γενική Συζήτηση – Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από τις συγκρίσεις πειραματικών και υπολογιστικών τιμών, αλλά και των αποτελεσμάτων που λήφθηκαν κατά τον έλεγχο της εντολής GRPCONVERT. Τέλος αναφέρονται οι δυνατότητες περαιτέρω αξιοποίησης του κώδικα και εν γένει η χρησιμότητα έγκυρων υπολογιστικών μεθόδων στην τεχνολογία σύντηξης. Στα σχήματα 5.1 και 5.2 δίδονται συνολικά οι συγκρίσεις των δύο βιβλιοθηκών με τα πειραματικά αποτελέσματα.



**Σχήμα 5.1** Σύγκριση ειδικών ενεργοτήτων της EAF-2010, της TENDL-2017 και των πειραματικών τιμών.



**Σχήμα 5.2** Λόγοι ειδικών ενεργοτήτων της EAF-2010 και της TENDL-2017 ως προς των πειραματικών τιμών

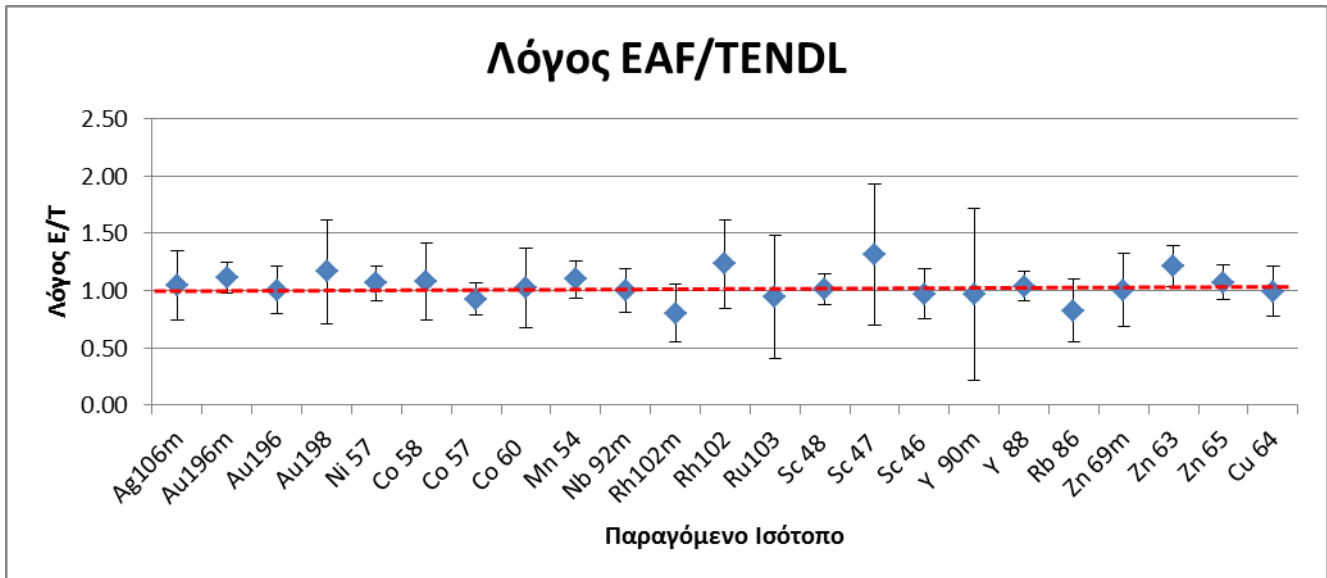
Διαπιστώνεται πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων που δίνει η EAF-2010. Οι περισσότεροι από τους λόγους  $\frac{C}{E}$  είναι κοντά στη μονάδα, κάτι που οδηγεί σε ένα πρώτο ποιοτικό πόρισμα για τη σύγκλιση των μετρήσεων με τους υπολογισμούς. Ειδικότερα η κύμανση των λόγων είναι  $0.76 < \frac{C}{E} < 1.67$ , ενώ παρατηρείται μια τάση των περισσότερων λόγων να υπερβαίνουν τη μονάδα, κάτι που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο κώδικας χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη EAF-2010 υπερεκτιμά συστηματικά το αποτέλεσμα. Αυτή η πιθανή υπερεκτίμηση ενδεχομένως να οφείλεται στο γεγονός ότι ο κώδικας δεν συνυπολογίζει την αυτοαπορρόφηση (self-shielding) νετρονίων από το ίδιο το δείγμα, καθότι προσομοιώνει ακτινοβολήση σημειακού στόχου. Ωστόσο οι τιμές του U-test βρίσκονται εντός της περιοχής αποδοχής, δηλαδή κάτω του 1,96. Συγκεκριμένα κυμαίνονται μεταξύ  $0.19 < U < 1.58$ . Επομένως για κάθε ισότοπο υπάρχει στατιστική συμφωνία της πειραματικής και της υπολογιστικής μέτρησης με τη βιβλιοθήκη EAF-2010, με ενεργειακή κατανομή φάσματος VITAMIN-J (175 ενεργειακών ομάδων).

Διαπιστώνεται επίσης συμφωνία μεταξύ των υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων, για τα περισσότερα από τα ισότοπα που εξετάστηκαν, όταν χρησιμοποιείται η TENDL-2017. Παρόλα αυτά στο σχήμα 5.2 παρατηρείται μια πιο ευρεία διακύμανση των λόγων γύρω από τη μονάδα ( $0.71 < \frac{C}{E} < 1.64$ ). Παρόλο το γεγονός ότι οι λόγοι  $\frac{C}{E}$  είναι κοντά στη μονάδα, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η τιμή του λόγου απομακρύνεται αρκετά από τα επιθυμητά πλαίσια, για λόγους οι οποίοι εξηγήθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Παρατηρείται επίσης όπως και στην περίπτωση της EAF-2010, η τάση ο λόγος να είναι μεγαλύτερος της μονάδας στις περισσότερες περιπτώσεις, δηλαδή η υπολογιστική τιμή της ενεργότητας να είναι συστηματικά μεγαλύτερη της πειραματικής, για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Οι τιμές του U-test για τα περισσότερα ισότοπα καταδεικνύουν πως οι υπολογιστικές και πειραματικές ενεργότητες των ισοτόπων δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά, αφού κυμαίνονται από 0.12 η μικρότερη μέχρι 1.51 η μεγαλύτερη. Εξαιρέσεις αποτελούν τα  $^{198}\text{Au}$  με τιμή 4,70 και το  $^{58}\text{Co}$  με τιμή 2,81, κυρίως λόγω των εκτιμήσεων των ενεργών διατομών των ισοτόπων από τα οποία προέρχονται. Ξεχωριστά αναφέρεται και το  $^{57}\text{Co}$  με τιμή 1,95 βρίσκεται οριακά εντός της περιοχής αποδοχής της στατιστικής συμφωνίας των δύο μετρήσεων.

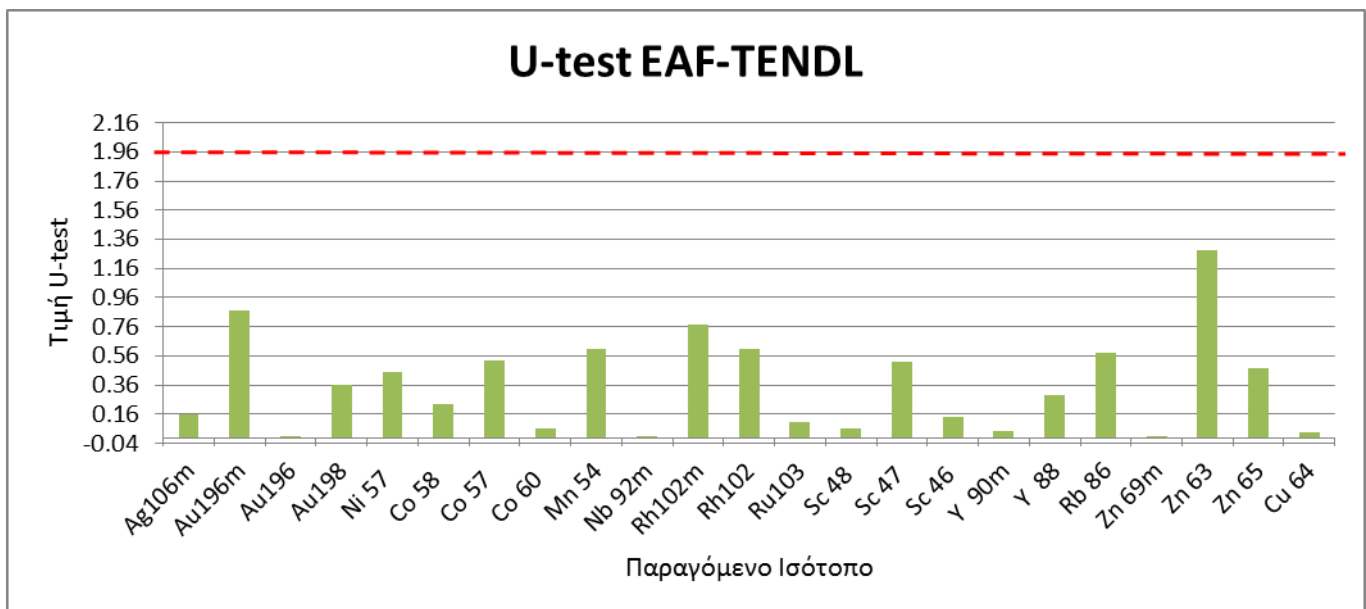
Σημειώνεται ότι λόγοι της βιβλιοθήκης EAF-2010 παρουσιάζουν μικρότερη κύμανση και βρίσκονται σταθερότερα κοντά στην επιθυμητή τιμή που είναι η μονάδα. Από την ανάλυση που έγινε στο Κεφάλαιο 4, προκύπτει ότι ο κώδικας με τη χρήση της EAF-2010 δίνει έγκυρα αποτελέσματα για όλα τα εξεταζόμενα ισότοπα του πειράματος VERDI, ενώ με χρήση της TENDL-2017 δίνει έγκυρα αποτελέσματα

εκτός των δύο περιπτώσεων (του  $^{198}\text{Au}$  και του  $^{58}\text{Co}$ ). Παρόλα αυτά συνολικά παρατηρείται καλή συμφωνία των μετρήσεων με τις πειραματικές.

Ακολουθεί σύγκριση των ενεργοτήτων της EAF-2010 (με φάσμα 175 ενεργειακών ομάδων) και της TENDL-2017 (με φάσμα 709 ενεργειακών ομάδων), χρησιμοποιώντας τον λόγο  $\frac{E}{T}$ . Τα πιο πάνω φαίνονται στα σχήματα 5.3 και 5.4.

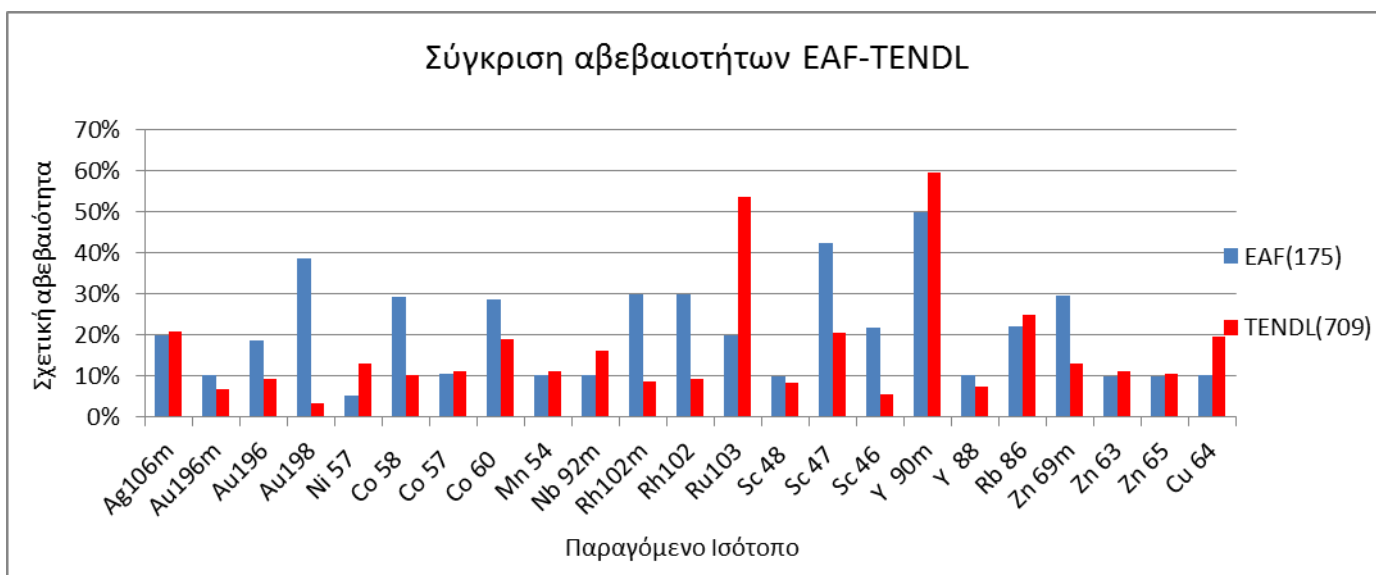


**Σχήμα 5.3** Λόγοι ειδικών ενεργοτήτων με χρήση της EAF-2010 και της TENDL-2017.



**Σχήμα 5.4** U-test για σύγκριση των ειδικών ενεργοτήτων με χρήση της EAF-2010 και της TENDL-2017.

Παρατηρείται διακύμανση γύρω από τη μονάδα ( $0.82 < \frac{E}{T} < 1.23$ ), κάτι που καταδεικνύει την συμφωνία μεταξύ των δύο βιβλιοθηκών, ως προς τις υπολογιστικές τιμές της ενεργότητας, για τα εξεταζόμενα ισότοπα (σχήμα 5.3). Στο στατιστικό U-test (σχήμα 5.4) επιβεβαιώνεται γενικά η στατιστική συμφωνία των αποτελεσμάτων που δίνουν οι δύο βιβλιοθήκες. Οι τιμές του U να κυμαίνονται από 0.01 μέχρι 1.28. Όπως έχει αναφερθεί και πρωτύτερα, ο κώδικας με χρήση της TENDL-2017 παρουσιάζει απόκλιση στην εκτίμηση της ενεργότητας δύο από τα εξεταζόμενα ισότοπα σε σύγκριση με την πειραματική τιμή, την ώρα που η εκτίμηση με χρήση της EAF-2010 στα ίδια ισότοπα είναι καλύτερη. Αυτό οφείλεται στις διαφορετικές ενεργές διατομές ισοτόπων που περιέχουν οι βιβλιοθήκες, κάτι που αποτυπώνεται και στην αβεβαιότητα των μετρήσεων. Στο σχήμα 5.5 φαίνονται οι αβεβαιότητες των δύο βιβλιοθηκών, κατά την εκτίμηση της υπολογιστικής τιμής της ενεργότητας. Παρατηρείται ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις αβεβαιότητες μεταξύ των δύο βιβλιοθηκών, κάτι που όπως αναφέρθηκε είναι αναμενόμενο εξαιτίας των διαφορετικών δεδομένων ενεργών διατομών που εμπεριέχουν.



**Σχήμα 5.5** Σχετικές αβεβαιότητες στις μετρήσεις των ειδικών ενεργοτήτων με χρήση της EAF-2010 και της TENDL-2017

Από τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 4 συμπεραίνεται επιπλέον στατιστική ταύτιση των αποτελεσμάτων που δίνει το αυθεντικό και το μετατραπέν φάσμα. Παρατηρείται μεγάλη εγγύτητα στα αποτελέσματα, αφού οι λόγοι στο σχήμα 4.15 παρουσιάζουν τιμές πολύ κοντά στη μονάδα (κυμαίνονται μεταξύ  $0.98 < \frac{C}{O} < 1.06$ ). Ειδικότερα εάν ληφθεί υπόψη και το εύρος του σφάλματος, το οποίο σε αρκετές περιπτώσεις είναι μεγάλο σε σχέση με την όλη διακύμανση των λόγων, στατιστικά μπορούμε να πούμε ότι οι τιμές στις δύο περιπτώσεις δεν διαφέρουν. Αυτό επιβεβαιώνεται από τις τιμές των U για κάθε ισότοπο, οι οποίες βρίσκονται όπως αναμέναμε αρκετά κάτω του ορίου του 1.96, εντός της περιοχής στατιστικής

συμφωνίας των ειδικών ενεργοτήτων των δύο περιπτώσεων. Το στατιστικό τεστ με τιμές  $0,0005 < U < 0,3602$ , καταδεικνύει ξεκάθαρα το πιο πάνω. Επομένως συμπεραίνεται η εγκυρότητα της εντολής GRPCONVERT του κώδικα, ώστε να είναι εφικτή η αλλαγή των ενεργειακών ομάδων ενός φάσματος, χωρίς να επηρεάζονται τα τελικά αποτελέσματα.

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία με σκοπό την επιβεβαίωση της υπολογιστικής μεθόδου του κώδικα FISPACT (έκδοση II 4.0) επιτυγχάνει σε μεγάλο βαθμό το σκοπό της, δίνοντας αποτελέσματα που συμφωνούν με τα πειραματικά χρησιμοποιώντας δύο από τις κύριες βιβλιοθήκες που παρέχει ο κώδικας, την EAF-2010 με φάσμα ενεργειακού διαμερισμού VITAMIN-J(175) και την TENDL-2017 με φάσμα ενεργειακού διαμερισμού CCFE(709). Επιβεβαιώθηκε επίσης η εγκυρότητα της εντολής GRPCONVERT για την μετατροπή φάσματος 175 σε φάσμα 709 ενεργειακών ομάδων.

Προτείνεται ως αντικείμενο μελλοντικής έρευνας η συμπερίληψη της διόρθωσης των αποτελεσμάτων λόγω της αυτοαπορρόφησης νετρονίων και φωτονίων στο δείγμα, με σκοπό την απαλοιφή του συστηματικού σφάλματος που παρατηρήθηκε με τις τιμές των λόγων  $\frac{C}{E}$  να υπερβαίνουν τη μονάδα. Προτείνεται επίσης να εξετασθεί το  $^{58}\text{Co}$  στο 2ο πείραμα VERDI για να ελεγχθεί εάν η διαφορά που παρατηρείται μεταξύ πειραματικής και υπολογιζόμενης τιμής είναι συστηματική.

Τα αποτελέσματα της παρούσας Εργασίας επιβεβαιώνουν τη δυνατότητα εφαρμογής του υπολογιστικού κώδικα FISPACT για την εκτίμηση της ενεργότητας των απλών και ανθεκτικών ανιχνευτών VERDI προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς στην τεχνολογία σύντηξης η πραγματοποίηση πειραμάτων παρουσιάζει πρακτικές δυσκολίες, σχετικές με τις συνθήκες που επικρατούν. Ο περιορισμός της έκθεσης σε ραδιενέργεια, η δυνατότητα πολλαπλής επανάληψης της διαδικασίας, καθώς και η πληθώρα των τρόπων αναπαράστασης των αποτελεσμάτων είναι μερικά από τα πλεονεκτήματα του κώδικα FISPACT έναντι των συμβατικών πειραματικών μεθόδων.

Μέσω του κώδικα προσφέρεται η δυνατότητα προσομοίωσης της ακτινοβολίας συγκεκριμένων υλικών με νετρόνια και μελέτη των ραδιολογικών παραμέτρων που παρουσιάζουν. Στην τεχνολογία σύντηξης υπάρχει ανάγκη για υλικά χαμηλής νετρονικής ενεργοποίησης, των οποίων η απόρριψη και ανακύκλωσή τους θα καθίσταται εφικτή σε σύντομο χρονικό διάστημα. Η κατάλληλη επιλογή των δομικών στοιχείων των αντιδραστήρων περιορίζει στο ελάχιστο τη ραδιενέργεια των μελλοντικών αποβλήτων της σύντηξης και καθίσταται σημαντική για τη βιωσιμότητα, την ασφάλεια καθώς και το οικονομικό μέρος στην τεχνολογία σύντηξης. Ο FISPACT και γενικότερα οι υπολογιστικές μέθοδοι προσομοίωσης,

μπορούν να προσφέρουν σημαντική βοήθεια στην έρευνα που γίνεται για τον προσδιορισμό της καλύτερης σύνθεσης των δομικών στοιχείων και επομένως για την ανάπτυξη της σύντηξης ως την πηγή ενέργειας του μέλλοντος. Η ασφάλεια και η καθαρότητα της σύντηξης ως προς τους παραγόμενους ρύπους, όπως και η αφθονία των καυσίμων σε παγκόσμια κλίμακα, πιστεύεται ότι θα παρέχει μακροπρόθεσμα μια πρακτικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας για τον πλανήτη.

## Βιβλιογραφία

- Barbarino M., (2018). “Fusion Energy in the 21st Century: Status and the way Forward”, IAEA Department of Nuclear Sciences and Applications. [online], Available from <<https://www.iaea.org/newscenter/news/fusion-energy-in-the-21st-century-status-and-the-way-forward>>
- Chu S.Y.F., Ekstrom L.P., Firestone R.B. (1999). “The Lund/LBNL Nuclear Data Search”, [online] Available from <<http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/>>
- EUROfusion, (2019). “JET – EUROfusion’s flagship device” [online] Available from <<https://www.euro-fusion.org/devices/jet/>>
- Fleming M., Stainer T., Gillbert M. (2018). “The FISPACT-II User Manual”, UKAEA-R(18)001, UK Atomic Energy Authority, Culham Science Centre, Abingdon, U.K.
- Gilmore G., (2008). “Practical Gamma-ray Spectrometry”, 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, Ltd , 104-114
- Hellasfusion, (2010). “The advantages of fusion” [online] Available from <[https://hellasfusion.gr/index.php?option=com\\_content&view=article&id=49%3Athe-advantages-of-fusion&catid=41%3A2010-11-30-10-30-31&Itemid=64&lang=en](https://hellasfusion.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=49%3Athe-advantages-of-fusion&catid=41%3A2010-11-30-10-30-31&Itemid=64&lang=en)>
- ITER, (2019). “What is a TOAKAMAK” [online] Available from <<https://www.iter.org/mach/tokamak>>
- KAERI, Nuclear Data Center. [online] Available from <<http://atom.kaeri.re.kr/nuchart/>>
- Lawson J.D. (1955) – “Some criteria for a useful thermonuclear reactor” (Technical Report,) Atomic Energy Research Establishment, Harwell, Berkshire, U.K.
- Lengar I., Zagar T., Ravnik M. (2005) “Comparison of Activation in Fission and Fusion Spectrum Neutron Beams”, Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe 2005, 130.1-130.6
- Martone M., Angelone M., Pillon M. (1994) “The 14 MeV Frascati Neutron Generator”, Journal of Nuclear Materials, 212–215, Part B, 1661-1664
- Nobs C.R., Packer L.W., Batistoni P., Colling B., Ghani Z., Gilbert M.R., Loreti S., Mergia K., Messoloras S., Michelakaki I., Pillon M., Savva M.I., Stamatelatos I.E., Triantou K., Vasilopoulou T., (2019) “Neutron spectrum unfolding for the development of a novel neutron detector for fusion”, Fusion Engineering and Design, in press



- Packer L. et al., (2017) "Neutron detection technologies and measurement challenges at JET", International Atomic Energy Agency, Technical Meeting on Modern Neutron Detection, IAEA, Vienna, 4-8 Sept. 2017
- Rochman D., Koning A.J., Sublet J.Ch., Fleming M., et al., "The TENDL library: hope, reality and future" (2016) Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Bruges, Belgium
- Savva M.I., Vasilopoulou T., Nobs C.R., Batistoni P., Colling B., Ghani Z., Gilbert M.R., Loreti S., Mergia K., Messoloras S., Michelakaki I., Packer L.W., Pillon M., Stamatelatos I.E., Triantou K., (2019), "VERDI detector benchmark experiment at the ENEA 14 MeV Frascati Neutron Generator, Fusion Engineering and Design", in press
- Stamatelatos I.E.,(2017) "Progress on development of a Novel Neutron Detector for Fusion, International Atomic Energy Agency, Technical Meeting on Modern Neutron Detection", IAEA, Vienna
- Sublet J.C., Packer L., Kopecky J., Forrest R.A. (2011), "Recent Progress in Neutron-, Proton- and Deuteron Induced Reaction Nuclear Data for EAF-2010 and the European Activation System", Journal of the Korean Physical Society, 59, 1100-1103
- Sublet J.C., Koning A.J., Rochman D., Fleming M. and Gilbert M., "TENDL-2015: Delivering Both Completeness and Robustness", Advances in Nuclear Nonproliferation Technology and Policy Conference, Sept. 25-30, Santa Fe, NM, USA
- Sublet J.C. et al, (2017). "TENDL-2017" [online] Available from <[https://tendl.web.psi.ch/tendl\\_2017/tendl2017.html](https://tendl.web.psi.ch/tendl_2017/tendl2017.html)>
- Sublet J.C., Packer L., (2010). "EAF-2010, EAF-2010, ENDF-6 formatted activation-transmutation library", Nuclear Energy Agency (NEA), Nuclear Data Services, [online] Available from <[https://www.oecd-nea.org/dbforms/data/eva/evatapes/eaf\\_2010/](https://www.oecd-nea.org/dbforms/data/eva/evatapes/eaf_2010/)>
- Sublet J.C. et al. (2010) "The European Activation File: EAF-2010 neutron-induced cross section library", CCFE-R (10) 05, EUROATOM/CCFE Fusion Association
- Sublet J.C. et al.(2014) "EASY-II(12): a system for modelling of n, d, p,  $\gamma$ ,  $\alpha$  activation and transmutation processes", Proceedings Shielding Aspects of accelerators, targets and irradiation facilities (SATIF-11), NEA No. 7157 , 99-106

- Sublet J.C., Eastwood J., Morgan J.G., Gilbert, M.R., Fleming M., Arter W. (2017) “FISPACT-II: an advanced simulation platform for inventory and nuclear observables”, Nuclear Data Sheets, 139, 77-137
- UKAEA, “FISPACT II keywords”, [online] Available from <[https://fispact.ukaea.uk/wiki/FISPACT-II\\_keywords](https://fispact.ukaea.uk/wiki/FISPACT-II_keywords)>
- Vasilopoulou T., Stamatelatos I.E., Batistoni P., Colangeli A., Flammini D., Fonnesu N., Loreti S., Obryk B., Pillon M., Villari R., (2019) “Improved neutron activation dosimetry for fusion”, Fusion Engineering and Design, 139:109-114

## Παραρτήματα

### Παράρτημα Α: Κώδικες ακτινοβολήσης (αρχεία εισόδου)

#### A1 Ag με EAF-2010 και VITAMIN-J( 175)

```
<< -----get nuclear data----- >>
CLOBBER
MONITOR 0
LIBVERSION 0
GETXS 1 175
GETDECAY 1
FISPACT
* IRRADIATION OF SILVER
<< -----set initial conditions----- >>
<< material Ag >>
MASS 3.3E-6 1
Ag 100.0
MIND 1.0
GRAPH 5 2 1 1 2 3 4 5
UNCERTAINTY 2
DOSE 2 1.0
<< --irradiation phase--in FNG DT-- >>
FLUX 1.2068E+08
TOLERANCE 0 1.0 1.0e-3
TOLERANCE 1 1.0 1.0e-3
TIME 4.506 HOURS
ATOMS
<< -----cooling phase----- >>
FLUX 0.
ZERO
TIME 1 SECS ATOMS
TIME 56 SECS ATOMS
TIME 59 SECS ATOMS
TIME 2 MINS ATOMS
TIME 2 MINS ATOMS
TIME 2 MINS ATOMS
TIME 55 MINS ATOMS <<---enea metrisi--->>
TIME 4 SECS ATOMS
TIME 22 MINS ATOMS
TIME 16 HOURS ATOMS
TIME 6 DAYS ATOMS <<---dimokritos metrisi--->>
TIME 3 DAYS ATOMS
TIME 20 DAYS ATOMS
TIME 30 DAYS ATOMS
TIME 30 DAYS ATOMS
TIME 90 DAYS ATOMS
TIME 90 DAYS ATOMS
END
* END
```

## A2 Ag με TENDL-2017 και CCFE (709)

```
<< -----get nuclear data----- >>
CLOBBER
MONITOR 0
GETXS 1 709
GETDECAY 1
FISPACT
* IRRADIATION OF SILVER
<< -----set initial conditions----- >>
<< material Ag >>
MASS 3.3E-6 1
Ag 100.0
MIND 1.0
GRAPH 5 2 1 1 2 3 4 5
UNCERTAINTY 2
DOSE 2 1.0
<< --irradiation phase--in FNG DT-- >>
FLUX 1.2068E+08
TOLERANCE 0 1.0 1.0e-3
TOLERANCE 1 1.0 1.0e-3
TIME 4.506 HOURS
ATOMS
<< -----cooling phase----- >>
FLUX 0.
ZERO
TIME 1 SECS ATOMS
TIME 56 SECS ATOMS
TIME 59 SECS ATOMS
TIME 2 MINS ATOMS
TIME 2 MINS ATOMS
TIME 2 MINS ATOMS
TIME 55 MINS ATOMS <<---enea metrisi--->>
TIME 4 SECS ATOMS
TIME 22 MINS ATOMS
TIME 16 HOURS ATOMS
TIME 6 DAYS ATOMS <<---dimokritos metrisi--->>
TIME 3 DAYS ATOMS
TIME 20 DAYS ATOMS
TIME 30 DAYS ATOMS
TIME 30 DAYS ATOMS
TIME 90 DAYS ATOMS
TIME 90 DAYS ATOMS
END
* END
```

## Παράρτημα Β': Ενεργειακοί διαμερισμοί

### B1: VITAMIN-J (175)

'VITAMIN-J '

175

1.96403E7, 1.73325E7, 1.69046E7, 1.64872E7, 1.56831E7, 1.49182E7, 1.45499E7,  
1.41907E7, 1.38403E7, 1.34986E7, 1.28403E7, 1.25232E7, 1.22140E7, 1.16183E7,  
1.10517E7, 1.05127E7, 1.00000E7, 9.51229E6, 9.04837E6, 8.60708E6, 8.18731E6,  
7.78801E6, 7.40818E6, 7.04688E6, 6.70320E6, 6.59241E6, 6.37628E6, 6.06531E6,  
5.76950E6, 5.48812E6, 5.22046E6, 4.96585E6, 4.72367E6, 4.49329E6, 4.06570E6,  
3.67879E6, 3.32871E6, 3.16637E6, 3.01194E6, 2.86505E6, 2.72532E6, 2.59240E6,  
2.46597E6, 2.38513E6, 2.36533E6, 2.34570E6, 2.30693E6, 2.23130E6, 2.12248E6,  
2.01897E6, 1.92050E6, 1.82684E6, 1.73774E6, 1.65299E6, 1.57237E6, 1.49569E6,  
1.42274E6, 1.35335E6, 1.28735E6, 1.22456E6, 1.16484E6, 1.10803E6, 1.00259E6,  
9.61672E5, 9.07180E5, 8.62936E5, 8.20850E5, 7.80817E5, 7.42736E5, 7.06512E5,  
6.72055E5, 6.39279E5, 6.08101E5, 5.78443E5, 5.50232E5, 5.23397E5, 4.97871E5,  
4.50492E5, 4.07622E5, 3.87742E5, 3.68832E5, 3.33733E5, 3.01974E5, 2.98491E5,  
2.97211E5, 2.94518E5, 2.87246E5, 2.73237E5, 2.47235E5, 2.35177E5, 2.23708E5,  
2.12797E5, 2.02419E5, 1.92547E5, 1.83156E5, 1.74224E5, 1.65727E5, 1.57644E5,  
1.49956E5, 1.42642E5, 1.35686E5, 1.29068E5, 1.22773E5, 1.16786E5, 1.11090E5,  
9.80365E4, 8.65170E4, 8.25034E4, 7.94987E4, 7.20245E4, 6.73795E4, 5.65622E4,  
5.24752E4, 4.63092E4, 4.08677E4, 3.43067E4, 3.18278E4, 2.85011E4, 2.70001E4,  
2.60584E4, 2.47875E4, 2.41755E4, 2.35786E4, 2.18749E4, 1.93045E4, 1.50344E4,  
1.17088E4, 1.05946E4, 9.11882E3, 7.10174E3, 5.53084E3, 4.30742E3, 3.70744E3,  
3.35463E3, 3.03539E3, 2.74654E3, 2.61259E3, 2.48517E3, 2.24867E3, 2.03468E3,  
1.58461E3, 1.23410E3, 9.61117E2, 7.48518E2, 5.82947E2, 4.53999E2, 3.53575E2,  
2.75364E2, 2.14454E2, 1.67017E2, 1.30073E2, 1.01301E2, 7.88932E1, 6.14421E1,  
4.78512E1, 3.72665E1, 2.90232E1, 2.26033E1, 1.76035E1, 1.37096E1, 1.06770E1,  
8.31529 , 6.47595 , 5.04348 , 3.92786 , 3.05902 , 2.38237 , 1.85539 ,  
1.44498 , 1.12535 , 8.76425E-1, 6.82560E-1, 5.31579E-1, 4.13994E-1, 1.00001E-1,  
1.0E-5

B2: CCFE (709)

CCFE 709 group structure							
grp	energy(eV)	grp	energy(eV)	grp	energy(eV)	grp	energy(eV)
1	1.0000E+9	179	4.1687E+5	357	1.1482E+2	535	3.1623E-2
2	9.6000E+8	180	3.9811E+5	358	1.0965E+2	536	3.0200E-2
3	9.2000E+8	181	3.8019E+5	359	1.0471E+2	537	2.8840E-2
4	8.8000E+8	182	3.6308E+5	360	1.0000E+2	538	2.7542E-2
5	8.4000E+8	183	3.4674E+5	361	9.5499E+1	539	2.6303E-2
6	8.0000E+8	184	3.3113E+5	362	9.1201E+1	540	2.5119E-2
7	7.6000E+8	185	3.1623E+5	363	8.7096E+1	541	2.3988E-2
8	7.2000E+8	186	3.0200E+5	364	8.3176E+1	542	2.2909E-2
9	6.8000E+8	187	2.8840E+5	365	7.9433E+1	543	2.1878E-2
10	6.4000E+8	188	2.7542E+5	366	7.5858E+1	544	2.0893E-2
11	6.0000E+8	189	2.6303E+5	367	7.2444E+1	545	1.9953E-2
12	5.6000E+8	190	2.5119E+5	368	6.9183E+1	546	1.9055E-2
13	5.2000E+8	191	2.3988E+5	369	6.6069E+1	547	1.8197E-2
14	4.8000E+8	192	2.2909E+5	370	6.3096E+1	548	1.7378E-2
15	4.4000E+8	193	2.1878E+5	371	6.0256E+1	549	1.6596E-2
16	4.0000E+8	194	2.0893E+5	372	5.7544E+1	550	1.5849E-2
17	3.6000E+8	195	1.9953E+5	373	5.4954E+1	551	1.5136E-2
18	3.2000E+8	196	1.9055E+5	374	5.2481E+1	552	1.4454E-2
19	2.8000E+8	197	1.8197E+5	375	5.0119E+1	553	1.3804E-2
20	2.4000E+8	198	1.7378E+5	376	4.7863E+1	554	1.3183E-2
21	2.0000E+8	199	1.6596E+5	377	4.5709E+1	555	1.2589E-2
22	1.8000E+8	200	1.5849E+5	378	4.3652E+1	556	1.2023E-2
23	1.6000E+8	201	1.5136E+5	379	4.1687E+1	557	1.1482E-2
24	1.5000E+8	202	1.4454E+5	380	3.9811E+1	558	1.0965E-2
25	1.4000E+8	203	1.3804E+5	381	3.8019E+1	559	1.0471E-2
26	1.3000E+8	204	1.3183E+5	382	3.6308E+1	560	1.0000E-2
27	1.2000E+8	205	1.2589E+5	383	3.4674E+1	561	9.5499E-3
28	1.1000E+8	206	1.2023E+5	384	3.3113E+1	562	9.1201E-3
29	1.0000E+8	207	1.1482E+5	385	3.1623E+1	563	8.7096E-3
30	9.0000E+7	208	1.0965E+5	386	3.0200E+1	564	8.3176E-3
31	8.0000E+7	209	1.0471E+5	387	2.8840E+1	565	7.9433E-3
32	7.5000E+7	210	1.0000E+5	388	2.7542E+1	566	7.5858E-3
33	7.0000E+7	211	9.5499E+4	389	2.6303E+1	567	7.2444E-3
34	6.5000E+7	212	9.1201E+4	390	2.5119E+1	568	6.9183E-3
35	6.0000E+7	213	8.7096E+4	391	2.3988E+1	569	6.6069E-3
36	5.8000E+7	214	8.3176E+4	392	2.2909E+1	570	6.3096E-3
37	5.6000E+7	215	7.9433E+4	393	2.1878E+1	571	6.0256E-3
38	5.4000E+7	216	7.5858E+4	394	2.0893E+1	572	5.7544E-3
39	5.2000E+7	217	7.2444E+4	395	1.9953E+1	573	5.4954E-3
40	5.0000E+7	218	6.9183E+4	396	1.9055E+1	574	5.2481E-3
41	4.8000E+7	219	6.6069E+4	397	1.8197E+1	575	5.0119E-3
42	4.6000E+7	220	6.3096E+4	398	1.7378E+1	576	4.7863E-3
43	4.4000E+7	221	6.0256E+4	399	1.6596E+1	577	4.5709E-3
44	4.2000E+7	222	5.7544E+4	400	1.5849E+1	578	4.3652E-3
45	4.0000E+7	223	5.4954E+4	401	1.5136E+1	579	4.1687E-3
46	3.8000E+7	224	5.2481E+4	402	1.4454E+1	580	3.9811E-3
47	3.6000E+7	225	5.0119E+4	403	1.3804E+1	581	3.8019E-3



48	3.4000E+7	226	4.7863E+4	404	1.3183E+1	582	3.6308E-3
49	3.2000E+7	227	4.5709E+4	405	1.2589E+1	583	3.4674E-3
50	3.0000E+7	228	4.3652E+4	406	1.2023E+1	584	3.3113E-3
51	2.9000E+7	229	4.1687E+4	407	1.1482E+1	585	3.1623E-3
52	2.8000E+7	230	3.9811E+4	408	1.0965E+1	586	3.0200E-3
53	2.7000E+7	231	3.8019E+4	409	1.0471E+1	587	2.8840E-3
54	2.6000E+7	232	3.6308E+4	410	1.0000E+1	588	2.7542E-3
55	2.5000E+7	233	3.4674E+4	411	9.5499E+0	589	2.6303E-3
56	2.4000E+7	234	3.3113E+4	412	9.1201E+0	590	2.5119E-3
57	2.3000E+7	235	3.1623E+4	413	8.7096E+0	591	2.3988E-3
58	2.2000E+7	236	3.0200E+4	414	8.3176E+0	592	2.2909E-3
59	2.1000E+7	237	2.8840E+4	415	7.9433E+0	593	2.1878E-3
60	2.0000E+7	238	2.7542E+4	416	7.5858E+0	594	2.0893E-3
61	1.9800E+7	239	2.6303E+4	417	7.2444E+0	595	1.9953E-3
62	1.9600E+7	240	2.5119E+4	418	6.9183E+0	596	1.9055E-3
63	1.9400E+7	241	2.3988E+4	419	6.6069E+0	597	1.8197E-3
64	1.9200E+7	242	2.2909E+4	420	6.3096E+0	598	1.7378E-3
65	1.9000E+7	243	2.1878E+4	421	6.0256E+0	599	1.6596E-3
66	1.8800E+7	244	2.0893E+4	422	5.7544E+0	600	1.5849E-3
67	1.8600E+7	245	1.9953E+4	423	5.4954E+0	601	1.5136E-3
68	1.8400E+7	246	1.9055E+4	424	5.2481E+0	602	1.4454E-3
69	1.8200E+7	247	1.8197E+4	425	5.0119E+0	603	1.3804E-3
70	1.8000E+7	248	1.7378E+4	426	4.7863E+0	604	1.3183E-3
71	1.7800E+7	249	1.6596E+4	427	4.5709E+0	605	1.2589E-3
72	1.7600E+7	250	1.5849E+4	428	4.3652E+0	606	1.2023E-3
73	1.7400E+7	251	1.5136E+4	429	4.1687E+0	607	1.1482E-3
74	1.7200E+7	252	1.4454E+4	430	3.9811E+0	608	1.0965E-3
75	1.7000E+7	253	1.3804E+4	431	3.8019E+0	609	1.0471E-3
76	1.6800E+7	254	1.3183E+4	432	3.6308E+0	610	1.0000E-3
77	1.6600E+7	255	1.2589E+4	433	3.4674E+0	611	9.5499E-4
78	1.6400E+7	256	1.2023E+4	434	3.3113E+0	612	9.1201E-4
79	1.6200E+7	257	1.1482E+4	435	3.1623E+0	613	8.7096E-4
80	1.6000E+7	258	1.0965E+4	436	3.0200E+0	614	8.3176E-4
81	1.5800E+7	259	1.0471E+4	437	2.8840E+0	615	7.9433E-4
82	1.5600E+7	260	1.0000E+4	438	2.7542E+0	616	7.5858E-4
83	1.5400E+7	261	9.5499E+3	439	2.6303E+0	617	7.2444E-4
84	1.5200E+7	262	9.1201E+3	440	2.5119E+0	618	6.9183E-4
85	1.5000E+7	263	8.7096E+3	441	2.3988E+0	619	6.6069E-4
86	1.4800E+7	264	8.3176E+3	442	2.2909E+0	620	6.3096E-4
87	1.4600E+7	265	7.9433E+3	443	2.1878E+0	621	6.0256E-4
88	1.4400E+7	266	7.5858E+3	444	2.0893E+0	622	5.7544E-4
89	1.4200E+7	267	7.2444E+3	445	1.9953E+0	623	5.4954E-4
90	1.4000E+7	268	6.9183E+3	446	1.9055E+0	624	5.2481E-4
91	1.3800E+7	269	6.6069E+3	447	1.8197E+0	625	5.0119E-4
92	1.3600E+7	270	6.3096E+3	448	1.7378E+0	626	4.7863E-4
93	1.3400E+7	271	6.0256E+3	449	1.6596E+0	627	4.5709E-4
94	1.3200E+7	272	5.7544E+3	450	1.5849E+0	628	4.3652E-4
95	1.3000E+7	273	5.4954E+3	451	1.5136E+0	629	4.1687E-4
96	1.2800E+7	274	5.2481E+3	452	1.4454E+0	630	3.9811E-4
97	1.2600E+7	275	5.0119E+3	453	1.3804E+0	631	3.8019E-4
98	1.2400E+7	276	4.7863E+3	454	1.3183E+0	632	3.6308E-4
99	1.2200E+7	277	4.5709E+3	455	1.2589E+0	633	3.4674E-4
100	1.2000E+7	278	4.3652E+3	456	1.2023E+0	634	3.3113E-4
101	1.1800E+7	279	4.1687E+3	457	1.1482E+0	635	3.1623E-4

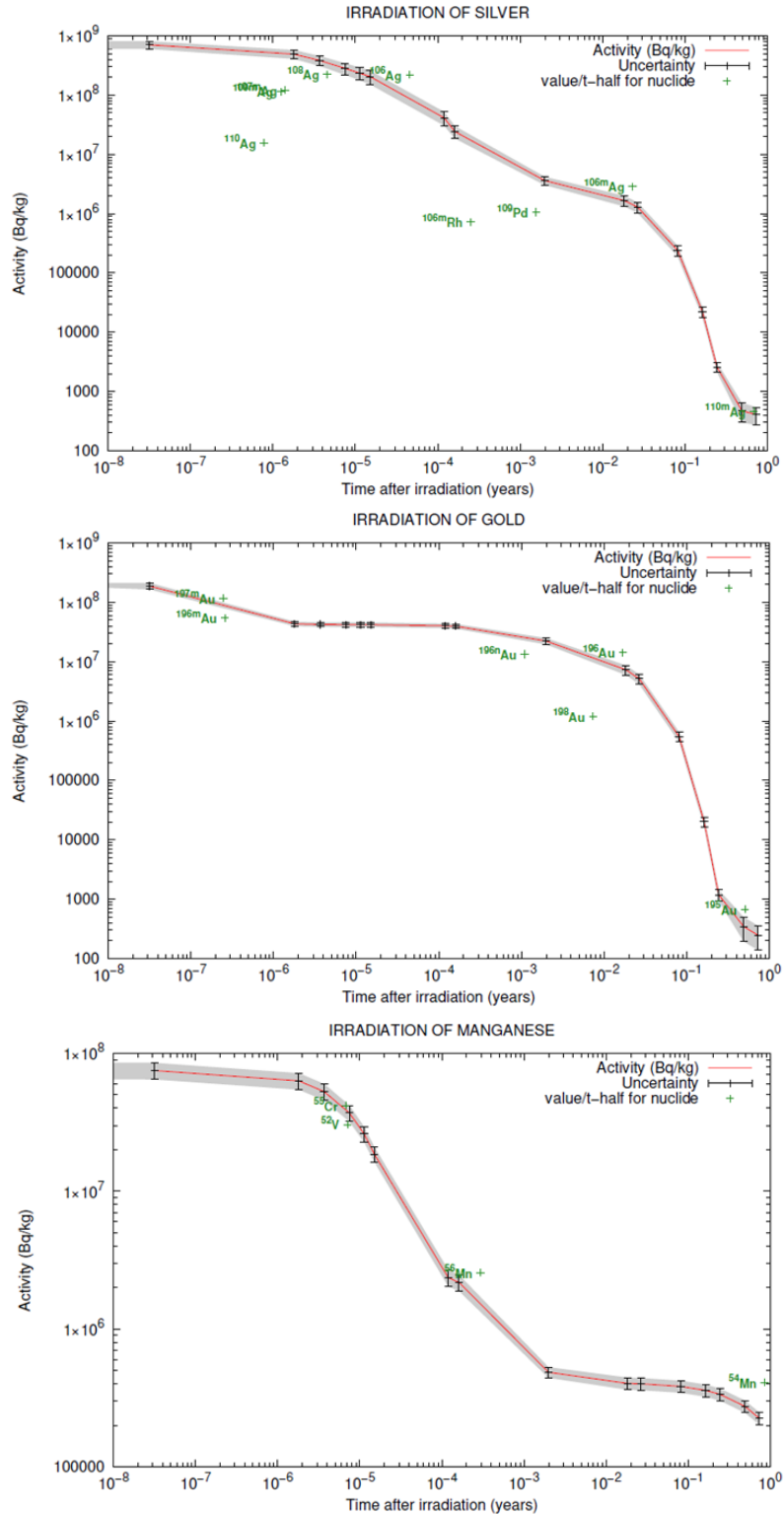


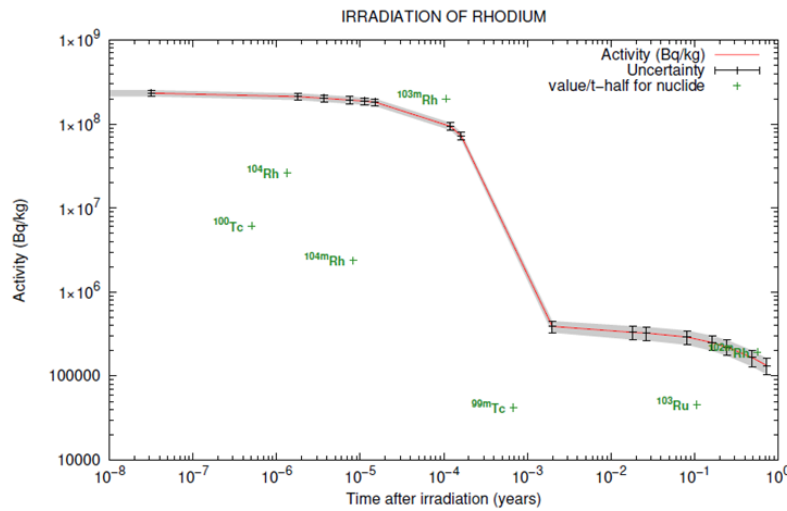
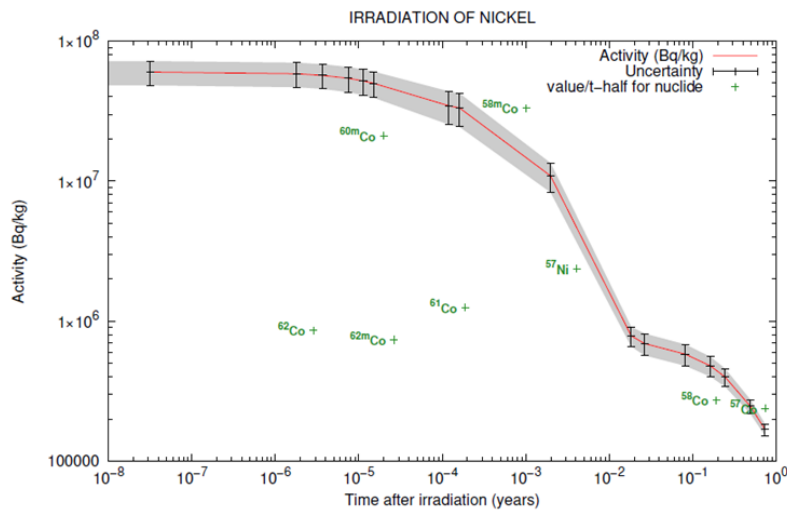
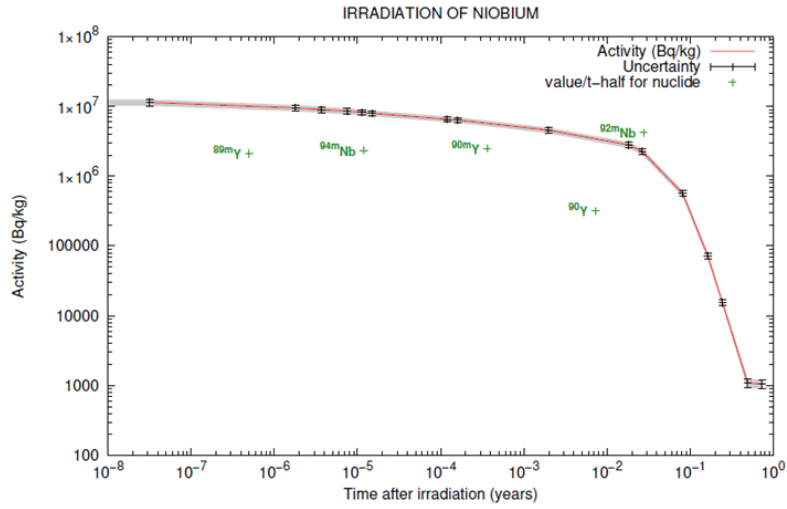
102	1.1600E+7	280	3.9811E+3	458	1.0965E+0	636	3.0200E-4
103	1.1400E+7	281	3.8019E+3	459	1.0471E+0	637	2.8840E-4
104	1.1200E+7	282	3.6308E+3	460	1.0000E+0	638	2.7542E-4
105	1.1000E+7	283	3.4674E+3	461	9.5499E-1	639	2.6303E-4
106	1.0800E+7	284	3.3113E+3	462	9.1201E-1	640	2.5119E-4
107	1.0600E+7	285	3.1623E+3	463	8.7096E-1	641	2.3988E-4
108	1.0400E+7	286	3.0200E+3	464	8.3176E-1	642	2.2909E-4
109	1.0200E+7	287	2.8840E+3	465	7.9433E-1	643	2.1878E-4
110	1.0000E+7	288	2.7542E+3	466	7.5858E-1	644	2.0893E-4
111	9.5499E+6	289	2.6303E+3	467	7.2444E-1	645	1.9953E-4
112	9.1201E+6	290	2.5119E+3	468	6.9183E-1	646	1.9055E-4
113	8.7096E+6	291	2.3988E+3	469	6.6069E-1	647	1.8197E-4
114	8.3176E+6	292	2.2909E+3	470	6.3096E-1	648	1.7378E-4
115	7.9433E+6	293	2.1878E+3	471	6.0256E-1	649	1.6596E-4
116	7.5858E+6	294	2.0893E+3	472	5.7544E-1	650	1.5849E-4
117	7.2444E+6	295	1.9953E+3	473	5.4954E-1	651	1.5136E-4
118	6.9183E+6	296	1.9055E+3	474	5.2481E-1	652	1.4454E-4
119	6.6069E+6	297	1.8197E+3	475	5.0119E-1	653	1.3804E-4
120	6.3096E+6	298	1.7378E+3	476	4.7863E-1	654	1.3183E-4
121	6.0256E+6	299	1.6596E+3	477	4.5709E-1	655	1.2589E-4
122	5.7544E+6	300	1.5849E+3	478	4.3652E-1	656	1.2023E-4
123	5.4954E+6	301	1.5136E+3	479	4.1687E-1	657	1.1482E-4
124	5.2481E+6	302	1.4454E+3	480	3.9811E-1	658	1.0965E-4
125	5.0119E+6	303	1.3804E+3	481	3.8019E-1	659	1.0471E-4
126	4.7863E+6	304	1.3183E+3	482	3.6308E-1	660	1.0000E-4
127	4.5709E+6	305	1.2589E+3	483	3.4674E-1	661	9.5499E-5
128	4.3652E+6	306	1.2023E+3	484	3.3113E-1	662	9.1201E-5
129	4.1687E+6	307	1.1482E+3	485	3.1623E-1	663	8.7096E-5
130	3.9811E+6	308	1.0965E+3	486	3.0200E-1	664	8.3176E-5
131	3.8019E+6	309	1.0471E+3	487	2.8840E-1	665	7.9433E-5
132	3.6308E+6	310	1.0000E+3	488	2.7542E-1	666	7.5858E-5
133	3.4674E+6	311	9.5499E+2	489	2.6303E-1	667	7.2444E-5
134	3.3113E+6	312	9.1201E+2	490	2.5119E-1	668	6.9183E-5
135	3.1623E+6	313	8.7096E+2	491	2.3988E-1	669	6.6069E-5
136	3.0200E+6	314	8.3176E+2	492	2.2909E-1	670	6.3096E-5
137	2.8840E+6	315	7.9433E+2	493	2.1878E-1	671	6.0256E-5
138	2.7542E+6	316	7.5858E+2	494	2.0893E-1	672	5.7544E-5
139	2.6303E+6	317	7.2444E+2	495	1.9953E-1	673	5.4954E-5
140	2.5119E+6	318	6.9183E+2	496	1.9055E-1	674	5.2481E-5
141	2.3988E+6	319	6.6069E+2	497	1.8197E-1	675	5.0119E-5
142	2.2909E+6	320	6.3096E+2	498	1.7378E-1	676	4.7863E-5
143	2.1878E+6	321	6.0256E+2	499	1.6596E-1	677	4.5709E-5
144	2.0893E+6	322	5.7544E+2	500	1.5849E-1	678	4.3652E-5
145	1.9953E+6	323	5.4954E+2	501	1.5136E-1	679	4.1687E-5
146	1.9055E+6	324	5.2481E+2	502	1.4454E-1	680	3.9811E-5
147	1.8197E+6	325	5.0119E+2	503	1.3804E-1	681	3.8019E-5
148	1.7378E+6	326	4.7863E+2	504	1.3183E-1	682	3.6308E-5
149	1.6596E+6	327	4.5709E+2	505	1.2589E-1	683	3.4674E-5
150	1.5849E+6	328	4.3652E+2	506	1.2023E-1	684	3.3113E-5
151	1.5136E+6	329	4.1687E+2	507	1.1482E-1	685	3.1623E-5

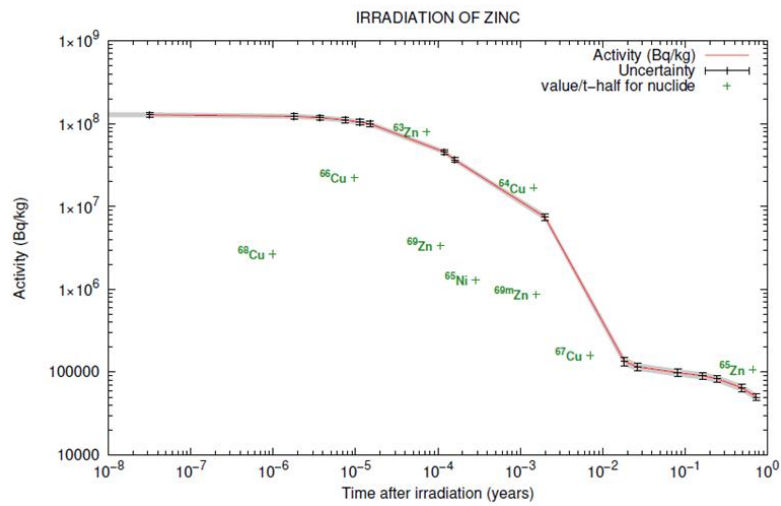
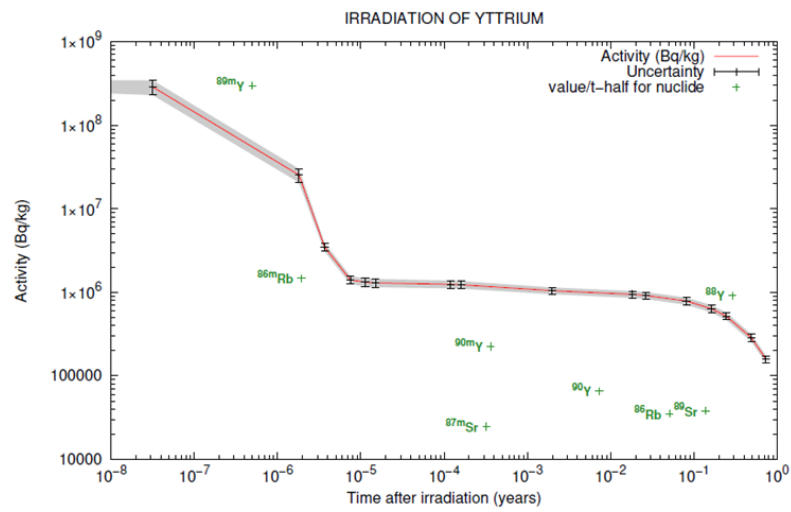
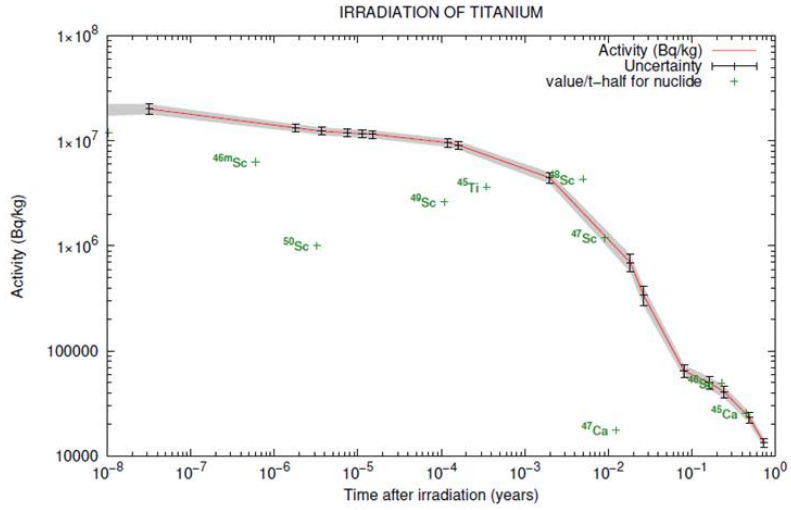
152	1.4454E+6	330	3.9811E+2	508	1.0965E-1	686	3.0200E-5
153	1.3804E+6	331	3.8019E+2	509	1.0471E-1	687	2.8840E-5
154	1.3183E+6	332	3.6308E+2	510	1.0000E-1	688	2.7542E-5
155	1.2589E+6	333	3.4674E+2	511	9.5499E-2	689	2.6303E-5
156	1.2023E+6	334	3.3113E+2	512	9.1201E-2	690	2.5119E-5
157	1.1482E+6	335	3.1623E+2	513	8.7096E-2	691	2.3988E-5
158	1.0965E+6	336	3.0200E+2	514	8.3176E-2	692	2.2909E-5
159	1.0471E+6	337	2.8840E+2	515	7.9433E-2	693	2.1878E-5
160	1.0000E+6	338	2.7542E+2	516	7.5858E-2	694	2.0893E-5
161	9.5499E+5	339	2.6303E+2	517	7.2444E-2	695	1.9953E-5
162	9.1201E+5	340	2.5119E+2	518	6.9183E-2	696	1.9055E-5
163	8.7096E+5	341	2.3988E+2	519	6.6069E-2	697	1.8197E-5
164	8.3176E+5	342	2.2909E+2	520	6.3096E-2	698	1.7378E-5
165	7.9433E+5	343	2.1878E+2	521	6.0256E-2	699	1.6596E-5
166	7.5858E+5	344	2.0893E+2	522	5.7544E-2	700	1.5849E-5
167	7.2444E+5	345	1.9953E+2	523	5.4954E-2	701	1.5136E-5
168	6.9183E+5	346	1.9055E+2	524	5.2481E-2	702	1.4454E-5
169	6.6069E+5	347	1.8197E+2	525	5.0119E-2	703	1.3804E-5
170	6.3096E+5	348	1.7378E+2	526	4.7863E-2	704	1.3183E-5
171	6.0256E+5	349	1.6596E+2	527	4.5709E-2	705	1.2589E-5
172	5.7544E+5	350	1.5849E+2	528	4.3652E-2	706	1.2023E-5
173	5.4954E+5	351	1.5136E+2	529	4.1687E-2	707	1.1482E-5
174	5.2481E+5	352	1.4454E+2	530	3.9811E-2	708	1.0965E-5
175	5.0119E+5	353	1.3804E+2	531	3.8019E-2	709	1.0471E-5
176	4.7863E+5	354	1.3183E+2	532	3.6308E-2		
177	4.5709E+5	355	1.2589E+2	533	3.4674E-2		

## Παράρτημα Γ' : Διαγράμματα ενεργότητας για κάθε υλικό σε συνάρτηση με το χρόνο μετά το τέλος της ακτινοβόλησης.

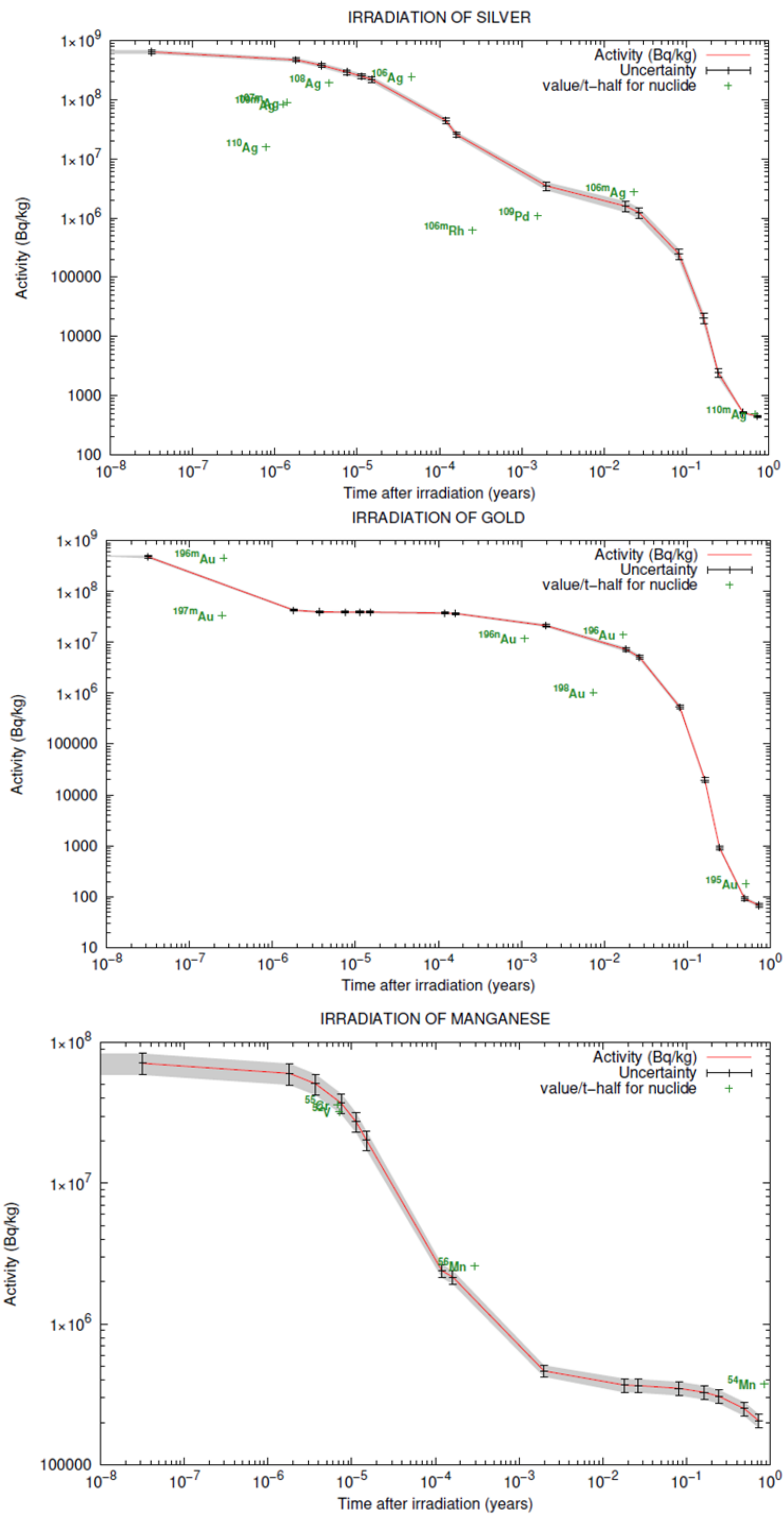
Γ1: Υπολογισμοί με τον κώδικα FISPACT II με χρήση της βιβλιοθήκης διατομών EAF-2010 (175)

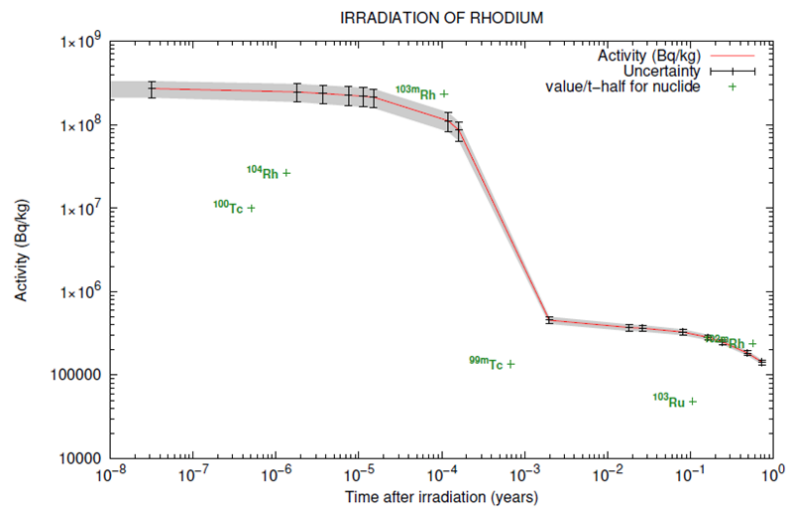
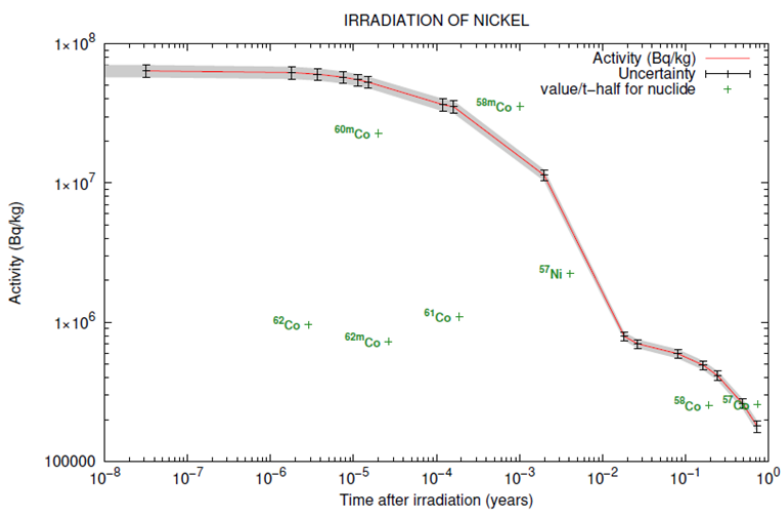
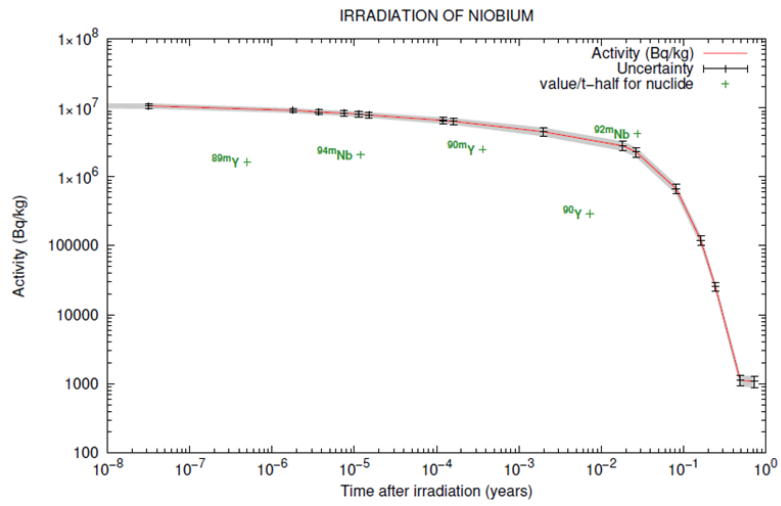




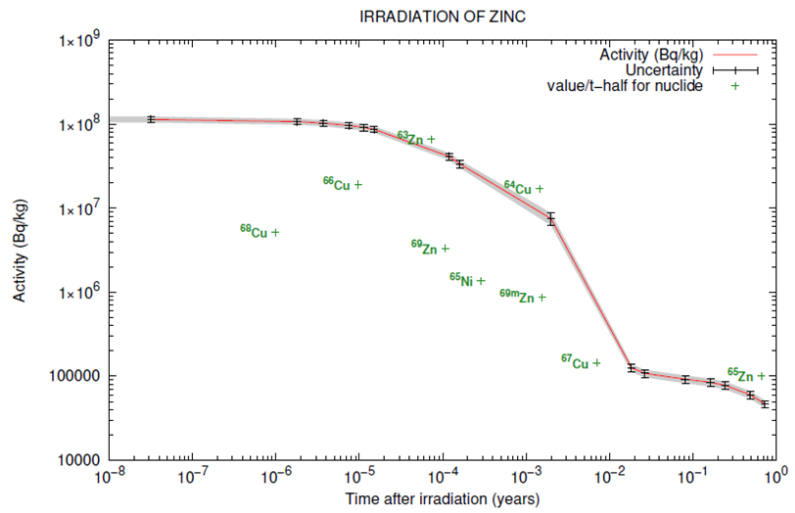
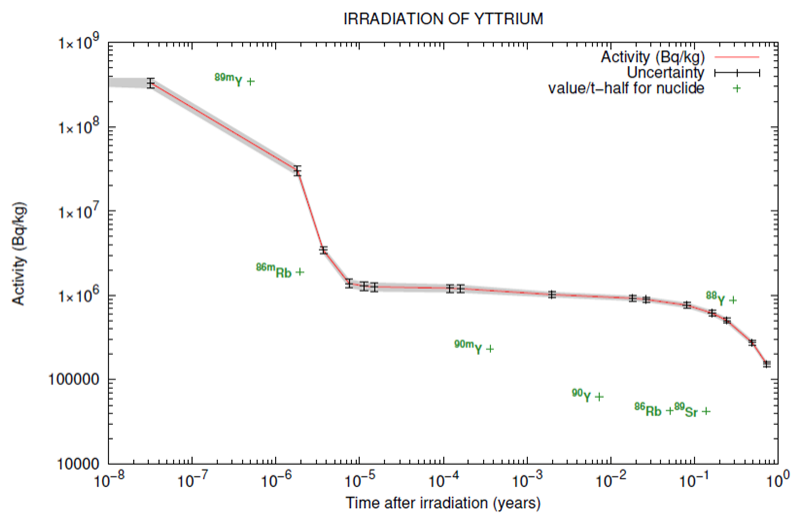
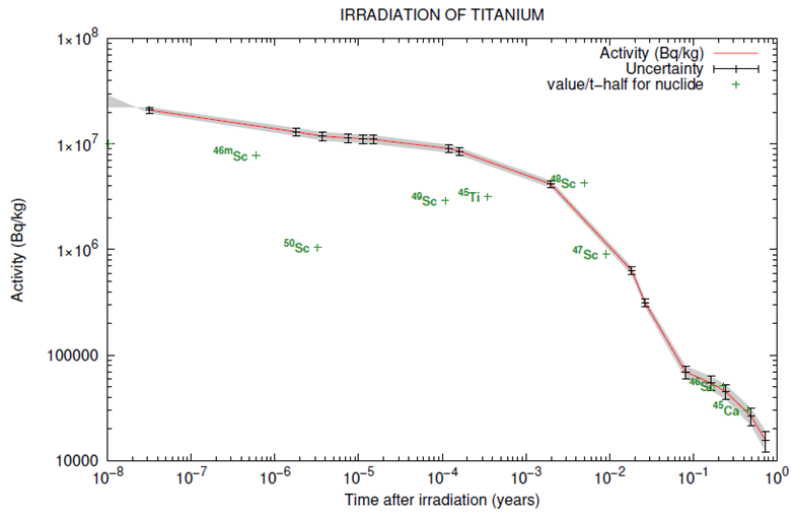


## Γ2: Υπολογισμοί με τον κώδικα FISPACT II με χρήση της βιβλιοθήκης διατομών TENDL-2017 (709)









## Παράρτημα Δ': Πίνακες αποτελεσμάτων

Δ1: Πειραματικά αποτελέσματα από γ-φασματοσκοπία (Sanna et.al, 2018)

Έλασμα	Παραγόμενο Ισότοπο	Χρόνος Ημιζωής [d]	Ενέργεια Φωτοκορυφής [keV]	Yield (%)	Ειδική Ενεργότητα [Bq/g]	Απόλυτη αβεβαιότητα [Bq/g]
Ni	<sup>57</sup> Co	271.79	122.06	85.60	196.5	12.5
Ni	<sup>57</sup> Ni	1.48	127.16	16.67	1902.9	200.8
Ni	<sup>57</sup> Co	271.79	136.47	10.68		
Au	<sup>196n</sup> Au	0.40	147.81	43.50	12080.4	389.0
Ti	<sup>47</sup> Sc	3.35	159.38	68.30	1032.2	57.3
Ti	<sup>48</sup> Sc	1.82	175.36	7.48	4984.5	366.5
Au	<sup>196n</sup> Au	0.40	188.27	30.02	14592.1	572.4
Y	<sup>90m</sup> Y	0.13	202.53	97.25	197.8	22.3
Ag	<sup>106m</sup> Ag	8.28	221.70	6.58	2519.8	270.0
Au	<sup>196</sup> Au	6.17	333.03	24.59	12283.4	706.3
Au	<sup>196</sup> Au	6.17	355.73	93.50	11954.8	736.9
Ag	<sup>106m</sup> Ag	8.28	406.18	13.24	2205.3	218.3
Au	<sup>198</sup> Au	2.70	411.80	95.62	721.0	58.4
Ag	<sup>106m</sup> Ag	8.28	429.64	13.16	2091.7	262.5
Zn	<sup>69m</sup> Zn	0.57	438.63	94.88	755.4	12.8
Ag	<sup>106m</sup> Ag	8.28	450.98	28.24	2617.1	163.1
Rh	<sup>102m</sup> Rh	207	468.58	3.71	146.9	58.7
Rh	<sup>102</sup> Rh	207	475.10	58.88	150.4	9.2
Y	<sup>90m</sup> Y	0.13	479.51	90.74	197.7	19.1
Rh	<sup>103</sup> Ru	39.26	497.08	91.00	32.8	2.3
Ag	<sup>106m</sup> Ag	8.28	616.17	21.57	2468.1	178.2
Rh	<sup>102</sup> Rh	207	628.05	5.76	16.5	1.9
Zn	<sup>63</sup> Zn	0.03	669.62	8.20	73648.7	2382.0
Ag	<sup>106m</sup> Ag	8.28	717.34	28.94	2499.6	208.4
Ag	<sup>106m</sup> Ag	8.28	748.36	20.61	2314.3	175.3
Ag	<sup>106m</sup> Ag	8.28	793.17	5.88	3258.2	749.4
Ag	<sup>106m</sup> Ag	8.28	804.28	12.37	2015.6	351.7
Ni	<sup>58</sup> Co	70.86	810.78	99.45	355.3	26.5
Ag	<sup>106m</sup> Ag	8.28	824.69	15.35	2511.0	321.5
Mn	<sup>54</sup> Mn	312.2	834.85	99.98	355.6	25.4
Ti	<sup>46</sup> Sc	83.79	889.28	99.98	41.7	5.5
Y	<sup>88</sup> Y	106.65	898.06	93.70	772.8	49.4
Nb	<sup>92m</sup> Nb	10.15	934.46	99.15	4320.9	291.3
Zn	<sup>63</sup> Zn	0.027	962.06	6.48	77949.7	3162.1
Ti	<sup>48</sup> Sc	1.82	983.52	100.11	3940.2	250.5
Ti	<sup>48</sup> Sc	1.82	1037.60	97.61	3941.8	239.4
Ag	<sup>106m</sup> Ag	8.28	1045.83	29.55	2807.7	428.8
Y	<sup>86</sup> Rb	18.63	1076.64	8.64		
Rh	<sup>102</sup> Rh	207	1103.16	3.71		
Zn	<sup>65</sup> Zn	244.26	1115.55	50.04	97.4	6.2
Ag	<sup>106m</sup> Ag	8.28	1128.02	11.75	2124.4	348.1
Ni	<sup>60</sup> Co	1925.1	1173.24	99.97		
Ag	<sup>106m</sup> Ag	8.28	1199.39	11.23	2262.1	243.6

Ti	<sup>48</sup> Sc	1.82	1212.88	2.38	4096.4	377.9
Ag	<sup>106m</sup> Ag	8.28	1222.88	7.02	1954.5	280.0
Ti	<sup>48</sup> Sc	1.82	1312.10	100.11	4038.3	249.2
Ni	<sup>60</sup> Co	1925.1	1332.50	99.98		
Zn	<sup>64</sup> Cu	0.53	1345.84	0.47	13804.9	854.8
Ag	<sup>106m</sup> Ag	8.28	1527.65	16.31	2356.8	250.9
Ag	<sup>106m</sup> Ag	8.28	1572.35	6.58	2138.8	547.0
Y	<sup>88</sup> Y	106.65	1836.00	99.40	785.0	48.0
Ni	<sup>57</sup> Ni	1.48	1919.52	12.26	2431.9	271.8

## Δ2: Σταθμισμένα πειραματικά αποτελέσματα

Έλασμα	Παραγόμενο Ισότοπο	Ειδική ενεργότητα [Bq/g]	Σχετική Αβεβαιότητα [%]	Απόλυτη Αβεβαιότητα [Bq/g]
<b>Ag</b>	Ag106m	2371.7	9.1	214.9
<b>Au</b>	Au196m	12873.9	9.1	1167.7
	Au196	12126.1	4.2	509.9
	Au198	721.0	8.1	58.4
<b>Ni</b>	Ni 57	2089.7	12.1	252.8
	Co 58	355.3	7.5	26.5
	Co 57	196.5	6.4	12.5
	Co 60	--	--	--
<b>Mn</b>	Mn 54	355.6	7.1	25.4
<b>Nb</b>	Nb 92m	4320.9	6.7	291.3
<b>Rh</b>	Rh102m	146.9	40.0	58.7
	Rh102	--	--	--
	Ru103	32.8	7.0	2.3
<b>Ti</b>	Sc 48	4104.1	9.1	373.1
	Sc 47	1032.2	5.6	57.3
	Sc 46	41.7	13.2	5.5
<b>Y</b>	Y 90m	197.7	7.3	14.5
	Y 88	779.1	4.4	34.4
	Rb 86	--	--	--
<b>Zn</b>	Zn 69m	755.4	1.7	12.8
	Zn 63	75205.8	2.7	2067.0
	Zn 65	97.4	6.4	6.2
	Cu 64	13804.9	6.2	854.8

### Δ3: Υπολογιστικά αποτελέσματα με χρήση EAF-2010 και VITAMIN-J (175)

Έλασμα	Παραγόμενο Ισότοπο	Ειδική Ενεργότητα [Bq/g]	Σχετική Αβεβαιότητα [%]	Απόλυτη Αβεβαιότητα [Bq/g]
<b>Ag</b>	Ag 106m	2880.1	20.0	576.0
<b>Au</b>	Au 196m	13276.9	10.0	1327.3
	Au 196	14168.8	18.6	2638.2
	Au 198	1206.1	38.7	467.1
<b>Ni</b>	Ni 57	2361.9	5.0	118.1
	Co 58	271.7	29.2	79.3
	Co 57	236.7	10.6	25.0
	Co 60	2.6	28.7	0.8
<b>Mn</b>	Mn 54	409.0	10.0	40.9
<b>Nb</b>	Nb 92m	4223.6	10.0	422.8
<b>Rh</b>	Rh102m	193.5	30.0	58.0
	Rh102	62.4	30.0	18.7
	Ru103	45.9	20.0	9.2
<b>Ti</b>	Sc 48	4317.2	10.0	429.7
	Sc 47	1189.8	42.4	504.2
	Sc 46	49.4	21.7	10.7
<b>Y</b>	Y 90m	226.0	49.7	112.4
	Y 88	914.5	10.0	91.5
	Rb 86	35.4	22.1	7.8
<b>Zn</b>	Zn 69m	866.6	29.5	255.6
	Zn 63	79739.4	9.9	7926.1
	Zn 65	107.4	9.9	10.7
	Cu 64	16790.1	10.0	1678.5

#### Δ4: Υπολογιστικά αποτελέσματα, με χρήση TENDL-2017 και CCFE (709)

Έλασμα	Παραγόμενο Ισότοπο	Ειδική Ενεργότητα [Bq/g]	Σχετική Αβεβαιότητα [%]	Απόλυτη Αβεβαιότητα [Bq/g]
<b>Ag</b>	Ag106m	2751.1	20.8	570.9
<b>Au</b>	Au196m	11920.1	6.8	805.3
	Au196	14132.2	9.4	1321.4
	Au198	1037.2	3.2	33.3
<b>Ni</b>	Ni 57	2223.9	12.9	286.7
	Co 58	252.4	10.0	25.3
	Co 57	256.8	11.0	28.4
	Co 60	2.6	18.9	0.5
<b>Mn</b>	Mn 54	373.4	11.1	41.4
<b>Nb</b>	Nb 92m	4228.9	16.2	685.5
<b>Rh</b>	Rh102m	240.9	8.5	20.5
	Rh102	50.7	9.2	4.7
	Ru103	48.7	53.7	26.1
<b>Ti</b>	Sc 48	4281.7	8.4	360.9
	Sc 47	908.7	20.6	186.7
	Sc 46	51.0	5.4	2.8
<b>Y</b>	Y 90m	233.8	59.5	139.1
	Y 88	881.9	7.2	63.4
	Rb 86	43.1	24.8	10.7
<b>Zn</b>	Zn 69m	863.7	12.9	111.6
	Zn 63	65858.9	11.2	7343.3
	Zn 65	100.3	10.6	10.6
	Cu 64	16937.3	19.5	3296.0

## Παράρτημα Ε: Αποτελέσματα συγκρίσεων

Ε1: Σύγκριση αποτελεσμάτων EAF-2010 με πειραματικές μετρήσεις (C/E και U-test)

Έλασμα	Παραγόμενο Ισότοπο	C/E	Σχετική Αβεβαιότητα του C/E [%]	Απόλυτη Αβεβαιότητα του C/E	Τιμή U-test
<b>Ag</b>	Ag106m	1.21	22.0	0.27	0.83
<b>Au</b>	Au196m	1.03	13.5	0.14	0.23
	Au196	1.17	19.1	0.22	0.76
	Au198	1.67	39.6	0.66	1.03
<b>Ni</b>	Ni 57	1.13	13.1	0.15	0.98
	Co 58	0.76	30.1	0.23	1.00
	Co 57	1.20	12.3	0.15	1.44
	Co 60	--	--	--	--
<b>Mn</b>	Mn 54	1.15	12.3	0.14	1.11
<b>Nb</b>	Nb 92m	0.98	12.1	0.12	0.19
<b>Rh</b>	Rh102m	1.32	50.0	0.66	0.56
	Rh102	1.54	27.7	0.43	
	Ru103	1.40	21.2	0.30	1.38
<b>Ti</b>	Sc 48	1.05	13.5	0.14	0.37
	Sc 47	1.15	42.7	0.49	0.31
	Sc 46	1.19	25.4	0.30	0.64
<b>Y</b>	Y 90m	1.14	50.3	0.57	0.25
	Y 88	1.17	10.9	0.13	1.39
	Rb 86	--	--	--	--
<b>Zn</b>	Zn 69m	1.15	29.5	0.34	0.43
	Zn 63	1.06	10.3	0.11	0.55
	Zn 65	1.10	11.8	0.13	0.81
	Cu 64	1.22	11.8	0.14	1.58



**E2: Σύγκριση αποτελεσμάτων TENDL-2017 με πειραματικές μετρήσεις (C/E και U-test)**

Έλασμα	Παραγόμενο Ισότοπο	C/E	Σχετική Αβεβαιότητα του C/E [%]	Απόλυτη Αβεβαιότητα του C/E	Τιμή U-test
Ag	Ag106m	1.16	22.6	0.26	0.62
Au	Au196m	0.93	11.3	0.10	0.67
	Au196	1.17	10.3	0.12	1.42
	Au198	1.44	8.7	0.13	4.70
Ni	Ni 57	1.06	17.7	0.19	0.35
	Co 58	0.71	12.5	0.09	2.81
	Co 57	1.31	12.7	0.17	1.95
	Co 60	--	--	--	
Mn	Mn 54	1.05	13.2	0.14	0.37
Nb	Nb 92m	0.98	17.6	0.17	0.12
Rh	Rh102m	1.64	40.9	0.67	1.51
	Rh102	1.60	9.2	0.15	
	Ru103	1.48	54.1	0.80	0.61
Ti	Sc 48	1.04	12.4	0.13	0.34
	Sc 47	0.88	21.3	0.19	0.63
	Sc 46	1.22	14.3	0.17	1.51
Y	Y 90m	1.18	60.0	0.71	0.26
	Y 88	1.13	8.4	0.10	1.43
	Rb 86	--	--	--	
Zn	Zn 69m	1.14	13.0	0.15	0.96
	Zn 63	0.88	11.5	0.10	1.23
	Zn 65	1.03	12.3	0.13	0.23
	Cu 64	1.23	20.4	0.25	0.92

### E3: Σύγκριση αποτελεσμάτων EAF-2010 και TENDL-2017 (E/T και U-test)

Έλασμα	Παραγόμενο Ισότοπο	E/T	Σχετική αβεβαιότητα του E/T [%]	Απόλυτη αβεβαιότητα του E/T	Τιμή U-test
Ag	Ag106m	1.05	29,0	0.30	0.16
Au	Au196m	1.11	12,0	0.13	0.87
	Au196	1.00	21,0	0.21	0.01
	Au198	1.16	39,0	0.45	0.36
Ni	Ni 57	1.06	14,0	0.15	0.45
	Co 58	1.08	31,0	0.33	0.23
	Co 57	0.92	15,0	0.14	0.53
	Co 60	1.02	34,0	0.35	0.06
Mn	Mn 54	1.10	15,0	0.16	0.61
Nb	Nb 92m	1.00	19,0	0.19	0.01
Rh	Rh102m	0.80	31,0	0.25	0.77
	Rh102	1.23	31,0	0.39	0.61
	Ru103	0.94	57,0	0.54	0.10
Ti	Sc 48	1.01	13,0	0.13	0.06
	Sc 47	1.31	47,0	0.62	0.52
	Sc 46	0.97	22,0	0.22	0.14
Y	Y 90m	0.97	78,0	0.75	0.04
	Y 88	1.04	12,0	0.13	0.29
	Rb 86	0.82	33,0	0.27	0.58
Zn	Zn 69m	1.00	32,0	0.32	0.01
	Zn 63	1.21	15,0	0.18	1.28
	Zn 65	1.07	15,0	0.16	0.47
	Cu 64	0.99	22,0	0.22	0.04

## Παράρτημα ΣΤ' :Αποτελέσματα εντολής GRPCONVERT

ΣΤ1: Ισότοπα που παράγονται με αντιδράσεις (n,g) στο αυθεντικό φάσμα των 709

Παραγόμενα Ισότοπα	Ειδική ενεργότητα [Bq/g]	Σχετική Αβεβαιότητα [%]	Απόλυτη Αβεβαιότητα [Bq/g]
Ag108	192809.1	13.0	25045.9
Ag110	15525.8	3.4	522.1
Rh 104	26000.0	3.4	877.0
Rh 104m	1975.3	3.5	69.2

ΣΤ2: Ισότοπα που παράγονται με αντιδράσεις (n,g) στο μετατραπέν φάσμα, με κάτω ενεργειακό όριο το  $1 \times 10^{-2}$  eV

Παραγόμενα Ισότοπα	Ειδική ενεργότητα [Bq/g]	Σχετική Αβεβαιότητα [%]	Απόλυτη Αβεβαιότητα [Bq/g]
Ag108	192739.4	13.0	24998.3
Ag110	15260.0	3.4	521.3
Rh 104	25814.6	3.4	875.4
Rh 104m	1965.3	3.5	69.3

ΣΤ3: Ισότοπα που παράγονται με αντιδράσεις (n,g) στο μετατραπέν φάσμα, με κάτω ενεργειακό όριο το  $1 \times 10^{-5}$  eV

Παραγόμενα Ισότοπα	Ειδική ενεργότητα [Bq/g]	Σχετική Αβεβαιότητα [%]	Απόλυτη Αβεβαιότητα [Bq/g]
Ag108	204018.2	12.3	25012.6
Ag110	39209.1	1.8	694.0
Rh 104	110000.0	1.2	1324.4
Rh 104m	4782.4	1.1	54.4

ΣΤ4: Σύγκριση αποτελεσμάτων μετατραπέντος φάσματος με ενεργειακό όριο  $1 \times 10^{-2}$  και  $1 \times 10^{-5}$  eV (C/O και U-test)

Ισότοπα	C/O (1E-2)	Σχετική Αβεβαιότητα (1E-2) [%]	Απόλυτη Αβεβαιότητα (1E-2)	U-TEST (1E-2)	C/O (1E-5)	Σχετική Αβεβαιότητα (1E-5) [%]	Απόλυτη Αβεβαιότητα (1E-5)	U-TEST (1E-5)
Ag108	1.00	18.36	0.18	0.00	1.05	17.86	0.18	0.32
Ag110	0.98	4.79	0.04	0.36	2.52	3.80	0.09	27.27
Rh 104	0.99	4.78	0.04	0.15	4.23	3.58	0.15	52.88
Rh 104m	0.99	4.97	0.04	0.10	2.42	3.68	0.08	31.89

### ΣΤ5: Αποτελέσματα κανονικού φάσματος

Έλασμα	Παραγόμενο Ισότοπο	Ειδική ενεργότητα [Bq/g]	Σχετική Αβεβαιότητα [%]	Απόλυτη Αβεβαιότητα [Bq/g]
Ag	Ag 106	242966.7	12.5	30273.6
	Ag 108	192809.1	13.0	25045.9
	Ag 107m	89160.6	14.9	13311.7
	Ag 109m	82606.1	23.1	19065.5
	Ag 110	15525.8	3.4	522.1
Au	Au 196m	417147.1	6.7	28065.7
	Au 197m	30945.6	9.4	2903.6
	Au 196	14132.2	9.4	1321.4
	Au 196n	11920.1	6.8	805.3
Mn	Cr 55	36063.2	30.7	11060.6
	V 52	32011.8	17.0	5426.0
	Mn 56	2581.6	13.0	336.4
Nb	Nb 92m	4228.9	16.2	685.5
	Y 90m	2500.9	3.4	83.9
	Nb 94m	2067.9	11.4	235.5
	Y 89m	1565.7	38.5	602.5
	Y 90	291.8	4.2	12.1
Ni	Co 58m	35328.7	11.3	3974.5
	Co 60m	22573.3	22.4	5054.2
	Ni 57	2223.9	12.9	286.7
	Co 61	1088.5	16.0	173.9
	Co 62	947.5	33.2	314.5
	Co 62m	721.7	30.1	217.2
Rh	Rh 103m	234075.3	26.0	60953.2
	Rh 104	26000.0	3.4	877.0
	Tc 100	9612.6	41.0	3937.3
Ti	Sc 46m	7576.9	8.9	676.3
	Sc 48	4281.7	8.4	360.9
	Ti 45	3164.6	22.2	701.9
	Sc 49	2918.0	25.3	737.4
	Sc 50	1041.4	21.4	222.3
	Sc 47	908.7	20.6	186.7
	Sc 45m	863.5	14.8	128.1
Y	Y 89m	330131.3	14.3	47340.8
	Rb 86m	1891.3	30.9	585.0
	Y 88	881.9	7.2	63.4
Zn	Zn 63	65858.9	11.2	7343.3
	Cu 66	18946.9	21.0	3975.1
	Cu 64	16937.3	19.5	3296.0
	Cu 68	5053.0	27.5	1391.6
	Zn 69	3319.5	11.5	380.1
	Ni 65	1364.7	13.4	183.1

## ΣΤ6: Αποτελέσματα μετατραπέντος φάσματος

Έλασμα	Παραγόμενο Ισότοπο	Ειδική ενεργότητα [Bq/g]	Σχετική Αβεβαιότητα [%]	Απόλυτη Αβεβαιότητα [Bq/g]
Ag	Ag 106	242545.5	12.5	30221.2
	Ag 108	192739.4	13.0	24998.3
	Ag 107m	88912.1	14.9	13274.6
	Ag 109m	82451.5	23.1	19021.6
	Ag 110	15260.0	3.4	521.3
Au	Au 196m	417294.1	6.7	28079.7
	Au 197m	30892.6	9.4	2895.3
	Au 196	14113.8	9.3	1319.5
	Au 196n	12049.4	6.8	813.7
Mn	Cr 55	36013.2	30.7	11045.3
	V 52	31808.8	17.0	5391.6
	Mn 56	2662.8	12.7	336.8
Nb	Nb 92m	4225.0	16.2	684.9
	Y 90m	2507.4	3.4	84.0
	Nb 94m	2056.1	11.5	236.3
	Y 89m	1621.4	38.5	623.9
	Y 90	292.0	4.2	12.1
Ni	Co 58m	35001.9	11.2	3934.2
	Co 60m	22342.2	22.4	5000.2
	Ni 57	2253.4	12.9	290.5
	Co 61	1107.5	16.5	182.5
	Co 62	947.2	33.2	314.4
	Co 62m	724.2	30.1	217.9
Rh	Rh 103m	233397.5	26.0	60730.0
	Rh 104	25814.6	3.4	875.4
	Tc 100	9615.1	41.0	3938.3
Ti	Sc 46m	7560.0	8.9	673.4
	Sc 48	4264.4	8.4	359.3
	Ti 45	3357.5	22.2	744.7
	Sc 49	2934.7	25.2	738.1
	Sc 50	1050.7	21.3	224.1
	Sc 47	949.2	21.0	199.1
	Sc 45m	876.3	14.9	130.5
Y	Y 89m	327943.1	14.3	46994.2
	Rb 86m	1927.2	30.9	596.1
	Y 88	885.6	7.2	63.6
Zn	Zn 63	66972.3	11.2	7467.4
	Cu 66	18919.2	21.0	3965.5
	Cu 64	16810.6	19.5	3269.7
	Cu 68	5038.6	27.5	1385.6
	Zn 69	3319.2	11.5	380.0
	Ni 65	1363.7	13.4	183.0

**ΣΤ7: Σύγκριση αποτελεσμάτων κανονικού και μετατραπέντος φάσματος  
(λόγοι C/O και U-test)**

Έλασμα	Παραγόμενο Ισότοπο	C/O	Σχετική Αβεβαιότητα [%]	Απόλυτη Αβεβαιότητα	Τιμή U-TEST
Ag	Ag 106	0.998	17.62	0.176	0.010
	Ag 108	1.000	18.36	0.183	0.002
	Ag 107m	0.997	21.11	0.211	0.013
	Ag 109m	0.998	32.63	0.326	0.006
	Ag 110	0.983	4.79	0.047	0.360
Au	Au 196m	1.000	9.52	0.095	0.004
	Au 197m	0.998	13.26	0.132	0.013
	Au 196	0.999	13.22	0.132	0.010
	Au 196n	1.011	9.55	0.097	0.113
Mn	Cr 55	0.999	43.37	0.433	0.003
	V 52	0.994	23.97	0.238	0.027
	Mn 56	1.031	18.16	0.187	0.171
Nb	Nb 92m	0.999	22.92	0.229	0.004
	Y 90m	1.003	4.74	0.048	0.055
	Nb 94m	0.994	16.18	0.161	0.035
	Y 89m	1.036	54.42	0.564	0.064
	Y 90	1.001	5.88	0.059	0.010
Ni	Co 58m	0.991	15.90	0.158	0.058
	Co 60m	0.990	31.66	0.313	0.032
	Ni 57	1.013	18.23	0.185	0.072
	Co 61	1.017	22.96	0.234	0.076
	Co 62	1.000	46.94	0.469	0.001
	Co 62m	1.003	42.56	0.427	0.008
Rh	Rh 103m	0.997	36.81	0.367	0.008
	Rh 104	0.993	4.78	0.047	0.150
	Tc 100	1.000	57.93	0.579	0.000
Ti	Sc 46m	0.998	12.61	0.126	0.018
	Sc 48	0.996	11.92	0.119	0.034
	Ti 45	1.061	31.37	0.333	0.189
	Sc 49	1.006	35.65	0.359	0.016
	Sc 50	1.009	30.18	0.304	0.029
	Sc 47	1.045	29.36	0.307	0.148
	Sc 45m	1.015	21.02	0.213	0.070
Y	Y 89m	0.993	20.27	0.201	0.033
	Rb 86m	1.019	43.74	0.446	0.043
	Y 88	1.004	10.16	0.102	0.042
Zn	Zn 63	1.017	15.77	0.160	0.106
	Cu 66	0.999	29.66	0.296	0.005
	Cu 64	0.993	27.51	0.273	0.027
	Cu 68	0.997	38.92	0.388	0.007
	Zn 69	1.000	16.19	0.162	0.001
	Ni 65	0.999	18.98	0.190	0.004