

Επίδραση του είδους ανιχνευτή στη μέτρηση του HVL στη μαστογραφία

Χ. Κουκοράβα, Γ. Σημαντηράκης, Μ. Καλαθάκη, Κ. Χουρδάκης
ΕΕΑΕ, Πατριάρχου Γρηγορίου & Νεαπόλεως, 15341 Αγία Παρασκευή, Αττική
e-mail: chkoukor@eeae.gr

Περίληψη

Ο υπολογισμός του πάχους υποδιπλασιασμού (Half Value Layer - HVL) σε συστήματα μαστογραφίας είναι απαραίτητος προκειμένου να υπολογιστεί η Μέση Δόση Αδένα (ΜΔΑ), μέγεθος που σχετίζεται με τη εκτίμηση της επικινδυνότητας κατά τις εξετάσεις μαστογραφίας. Η ΜΔΑ είναι επίσης ένα από τα μεγέθη τα οποία χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των Διαγνωστικών Επιπέδων Αναφοράς (ΔΕΑ) για τη μαστογραφία. Η παρούσα εργασία εστιάζεται στον υπολογισμό της ακρίβειας μέτρησης του HVL με τη χρήση διαφόρων μετρητικών οργάνων και μεθοδολογιών. Επιπλέον γίνεται εκτίμηση της επίπτωσης της διακύμανσης των μετρούμενων τιμών HVL στον υπολογισμό της ΜΔΑ.

Μετρήσεις HVL πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση ενός θαλάμου ιονισμού (θάλαμος αναφοράς) και τριών εμπορικά διαθέσιμων ανιχνευτών στερεάς κατάστασης. Οι μετρήσεις έγιναν σε συνήθεις συνδυασμούς ανόδου/φίλτρου (π.χ. Mo/Mo, Mo/Rh, Rh/Rh, W/Rh, W/Al, W/Ag) και σε διάφορες συνθήκες ακτινοβολήσης. Η παραπάνω μελέτη πραγματοποιήθηκε τόσο σε συστήματα μαστογραφίας που χρησιμοποιούνται κλινικά όσο και στο Εργαστήριο Βαθμονόμησης Οργάνων Ιοντιζουσών Ακτινοβολιών (ΕΒΟΙΑ) της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας.

Η διακύμανση των αποκλίσεων των τιμών HVL για τα υπό εξέταση μετρητικά συστήματα, σε σχέση με τις τιμές αναφοράς (θάλαμος ιονισμού), ήταν από -37% έως 26%, με αντίστοιχη ποσοστιαία επίπτωση (-33% έως 26%) στον υπολογισμό της ΜΔΑ για ένα μέσο μαστό. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι μετρήσεις τιμών HVL με τη χρήση μετρητικών συστημάτων στερεάς κατάστασης πρέπει να διερευνώνται, ενώ συστήνεται και σύγκριση της σχετικής απόκρισης αυτών με μέθοδο αναφοράς, σε διάφορες ποιότητες δέσμης (συνδυασμούς ανόδου/φίλτρου, kV_p).

Λέξεις κλειδιά: Μαστογράφος, μέτρηση HVL, σύγκριση μετρητικών συστημάτων, Μέση Δόση αδένα (ΜΔΑ)

Abstract

The measurement of Half Value Layer (HVL) in mammography is necessary in order to calculate the average glandular dose (AGD), quantity associated with the risk assessment. The Diagnostic Reference Levels (DRL) for mammography are also usually expressed in terms of AGD. The present study focuses on the measurement accuracy of the HVL of mammography systems using different measurement instruments and methodologies. In addition, the impact of the variation of HVL values obtained using different measurement systems and methodologies in calculating the AGD, is investigated.

HVL measurements were performed using an ionization chamber (reference chamber), and three commercially available solid state detectors. The measurements were performed on commonly used combinations of anode/filter (e.g. Mo/Mo, Mo/Rh, Rh/Rh, W/Rh, W/Al, W/Ag) and at various irradiation conditions. Measurements were performed at several mammography systems and at the Secondary Standard Dosimetry Laboratory (SSDL) of the Greek Atomic Energy Commission.

The maximum deviations of the HVL values obtained from different measurement systems compared to the reference values, ranged between -37% and 26%. The respective variations on the calculation of AGD ranged between -33% and 26% for an average breast. It is, therefore, recommended that HVL values measured with solid state detectors are investigated and compared with a reference method at different beam qualities (anode/filter combinations, kVp).

Keywords: Mammography, HVL measurement, comparison of detectors, Average Glandular Dose (AGD)

1. Εισαγωγή

Ένα από τα μετρούμενα μεγέθη στα συστήματα μαστογραφίας είναι το πάχος υποδιπλασιασμού (Half Value Layer - HVL), το οποίο περιγράφει την ποιότητα δέσμης (φάσμα ακτίνων – X) και εξαρτάται κυρίως από την υψηλή τάση (kV) και το φίλτρο της λυχνίας. Ο υπολογισμός του HVL είναι απαραίτητος προκειμένου να υπολογιστεί η Μέση Δόση Αδένα (ΜΔΑ), μέγεθος που σχετίζεται με τη εκτίμηση της επικινδυνότητας κατά τις εξετάσεις μαστογραφίας. Η ΜΔΑ είναι επίσης ένα από τα μεγέθη τα οποία χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των Διαγνωστικών Επιπέδων Αναφοράς (ΔΕΑ) για τη μαστογραφία.

Λόγω της πληθώρας των παραμέτρων που απαιτείται να ελέγχονται στα ακτινολογικά συστήματα, τα μετρητικά όργανα με τη μορφή πολύμετρων, βασισμένα συνήθως σε ανιχνευτές στερεάς κατάστασης, χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο για δοσιμετρία και ποιοτικούς ελέγχους. Ωστόσο, η ακρίβεια της μέτρησης του HVL με τη χρήση ανιχνευτών στερεάς κατάστασης έχει αμφισβητηθεί, κυρίως λόγω της ενεργειακής εξάρτησης που παρουσιάζει η απόκρισή τους (Abramova et al. 2008). Η παρούσα εργασία εστιάζεται στον υπολογισμό της ακρίβειας μέτρησης του HVL με τη χρήση διαφόρων μετρητικών οργάνων και μεθοδολογιών. Επιπλέον γίνεται εκτίμηση της επίπτωσης της διακύμανσης των μετρούμενων τιμών HVL στον υπολογισμό της ΜΔΑ.

2. Υλικά και μεθοδολογία

2.1 Μέτρηση HVL

Τα μετρητικά συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη ήταν το Xi της εταιρείας Unfors, και δύο Piranha (A: v. 1.3/firmware 3.3A, B: v 3.1/firmware 3.3B) της εταιρείας RTI. Και τα τρία πολύμετρα λειτουργούν με διατάξεις διόδων πυριτίου (Si) και φίλτρα Cu. Το Xi και το Piranha-B δίνουν αυτόματα ένδειξη του HVL με μία ακτινοβολία, ενώ με το Piranha-A η μέτρηση του HVL γίνεται με τη χρήση φίλτρων Al. Η εκτίμηση των τιμών HVL έγινε σε διάφορους συνδυασμούς ανόδου/φίλτρου: Mo/Mo, Mo/Rh, Rh/Rh, W/Rh, W/Ag τόσο σε συστήματα μαστογραφίας όσο και στο EBOIA. Επιπλέον στο EBOIA τα πολύμετρα ακτινοβολήθηκαν και σε δέσμες W/Al. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε πέντε μαστογράφους (GE Senographe Essential και DMR+, Fuji Amulet, Hologic Lorad και IMS Giotto) ώστε να καλυφθούν όλοι οι παραπάνω συνδυασμοί ανόδου/φίλτρου, αλλά και πιθανόν διαφορετικά χαρακτηριστικά στους ίδιους συνδυασμούς (π.χ. διαφορετικό πάχος φίλτρου – Fuji W/Rh (50μm), Hologic W/Rh (60μm)).

Ο υπολογισμός του HVL αναφοράς για διάφορες ποιότητες δεσμών που χρησιμοποιούνται στη μαστογραφία έγινε με την «κλασσική» μέθοδο (καμπύλη εξασθένισης ακτινοβολίας) που περιγράφεται αναλυτικά στο πρωτόκολλο του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (IAEA) TRS 457 (2007), με τη χρήση κατάλληλου θαλάμου ιονισμού (Radcal 9095 στους μαστογράφους, Magna Standard Imaging Ref 92650 στο Εργαστήριο Βαθμονόμησης Οργάνων Ιονιζουσών Ακτινοβολιών της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας - EBOIA) και φίλτρων Al καθαρότητας 99.95%. Το σφάλμα στη μέτρηση του HVL με τη μέθοδο αυτή υπολογίζεται στο 3%.

Για κάθε ποιότητα δέσμης (kV, άνοδο/φίλτρο λυχνίας) και λυχνία πραγματοποιούνταν μετρήσεις με όλους τους ανιχνευτές. Οι μετρητές τοποθετούνταν 4 cm από το άκρο του

απεικονιστικού συστήματος (bucky), κάθετα στην κατεύθυνση ανόδου καθόδου για την αποφυγή της επίδρασης του heel effect. Η μέτρηση γινόταν παρουσία του συστήματος συμπίεσης του μαστού (compression paddle) λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική ρύθμιση για την παρουσία του στα μετρητικά συστήματα.

Οι ακτινοβολήσεις στο ΕΒΟΙΑ πραγματοποιήθηκαν σε δέσμες με άνοδο W και φίλτρα Rh (50 μm), Ag (75 μm) και Al (0.5 mm) σε λυχνία PANTAK HF225. Τα χαρακτηριστικά των δεσμών περιγράφονται στον πίνακα 1. Για τεχνικούς λόγους οι ποιότητες δέσμης με άνοδο Mo και Rh δεν ήταν διαθέσιμες στο ΕΒΟΙΑ οπότε μετρήσεις στις δέσμες αυτές πραγματοποιήθηκαν μόνο σε μαστογράφους ακτινολογικών εργαστηρίων.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά πεδίων ακτινοβολίας W/Rh, W/Ag, W/Al του ΕΒΟΙΑ

	Πάχος φίλτρου	kV	HVL (mm Al)
W/Rh	50 μm Rh	25	0.470
		28	0.480
		30	0.500
		35	0.540
W/Ag	75 μm Ag	25	0.504
		28	0.610
		30	0.650
		35	0.710
W/Al	0.5 mm Al	25	0.350
		28	0.400
		30	0.450
		35	0.510

2.2 Υπολογισμός μέσης δόσης αδένα (ΜΔΑ-ΑΓΔ)

Στη βιβλιογραφία προτείνονται διάφοροι τρόποι για τον υπολογισμό της ΜΔΑ βασισμένοι κυρίως στους παράγοντες μετατροπής που προτείνονται από τη μελέτη των Dance et al. (2000). Έτσι με βάση το πρωτόκολλο IAEA TRS 457 (2007) η ΜΔΑ για ένα μέσο μαστό πάχους 50 mm, μαζικού αδένα 50% από μέτρηση του incident Air Kerma σε ομοίωμα 45 mm PMMA υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$AGD_{TRS} = K_i \cdot C_{DG50} \cdot s \quad (1)$$

όπου K_i το incident Air Kerma (χωρίς οπισθοσκέδαση), C_{DG50} ο παράγοντας που αντιστοιχεί σε μαστό μαζικού αδένα 50% (glandularity) και s ο παράγοντας που διορθώνει για τους διαφορετικούς συνδυασμούς ανόδου/φίλτρου. Για τον υπολογισμό της ΜΔΑ σε μαστό διαφορετικού πάχους και για πυκνότητες μαστού διαφορετικές από 50% μαζικού αδένα προτείνονται επιπλέον παράγοντες.

Αντίστοιχα, με βάση το Ευρωπαϊκό Πρωτόκολλο (European Guidelines-Fourth Edition 2006) η μέση δόση αδένα υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$AGD_{EC} = K_i \cdot g \cdot c \cdot s \quad (2)$$

όπου K_i το incident Air Kerma (χωρίς οπισθοσκέδαση), g ο παράγοντας που αντιστοιχεί σε μαστό μαζικού αδένα 50% (glandularity), c ο παράγοντας που διορθώνει για

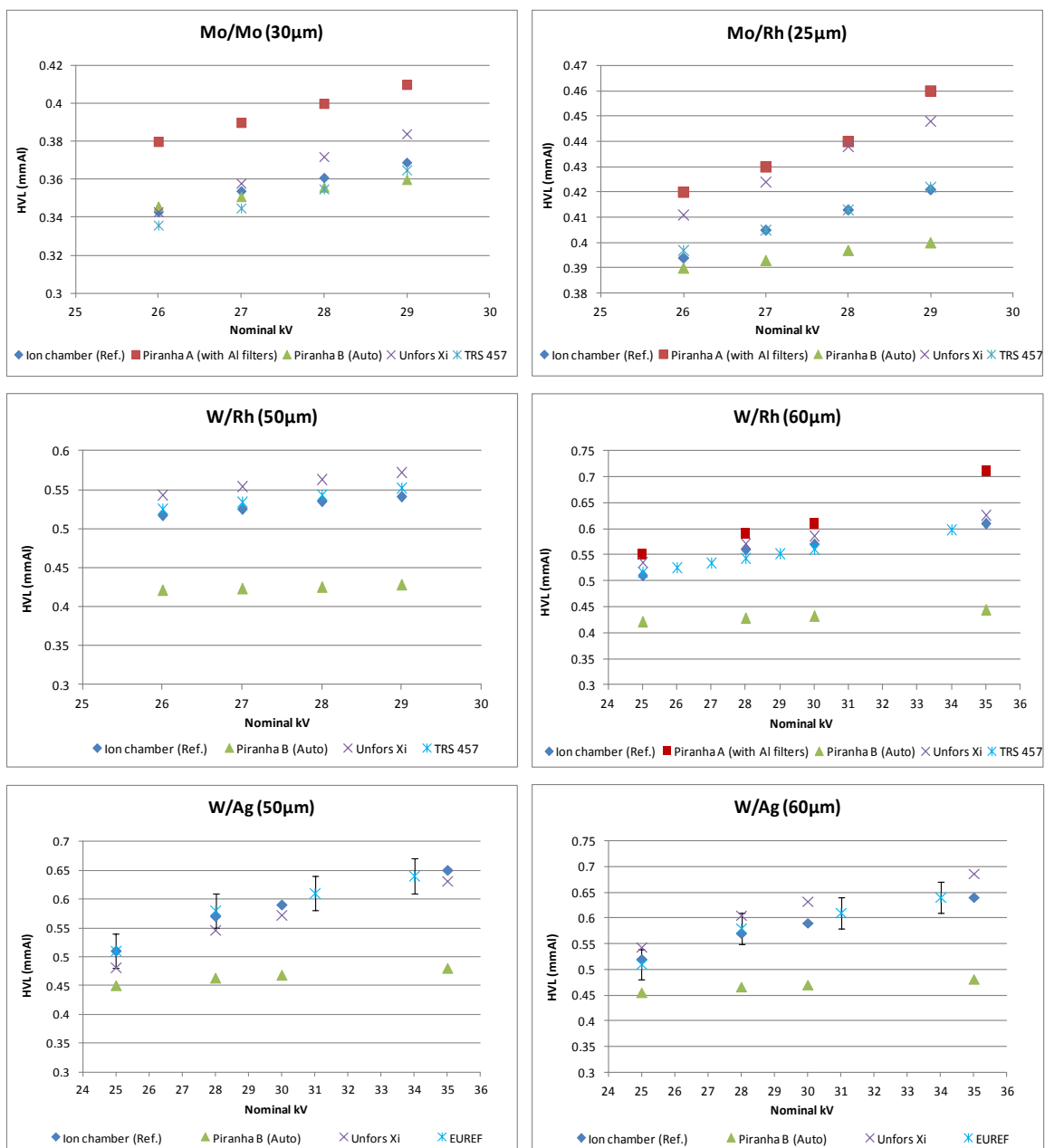
πυκνότητες μαστού διαφορετικές από 50% μαζικού αδένα και ο παράγοντας που διορθώνει για την ποιότητα δέσμης.

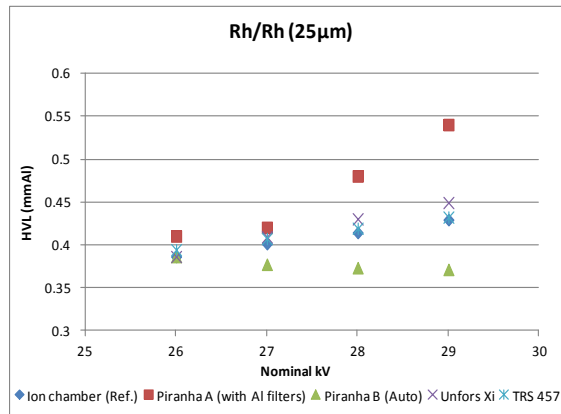
Τέλος στο πιο πρόσφατο πρωτόκολλο IAEA HHS No17 (2011) προτείνεται ο ίδιος τύπος που αναφέρεται και στο Ευρωπαϊκό Πρωτόκολλο, δίνοντας σε έναν πίνακα το γινόμενο των παραγόντων g,c.

3. Αποτελέσματα - Συμπεράσματα

3.1. Μετρήσεις HVL

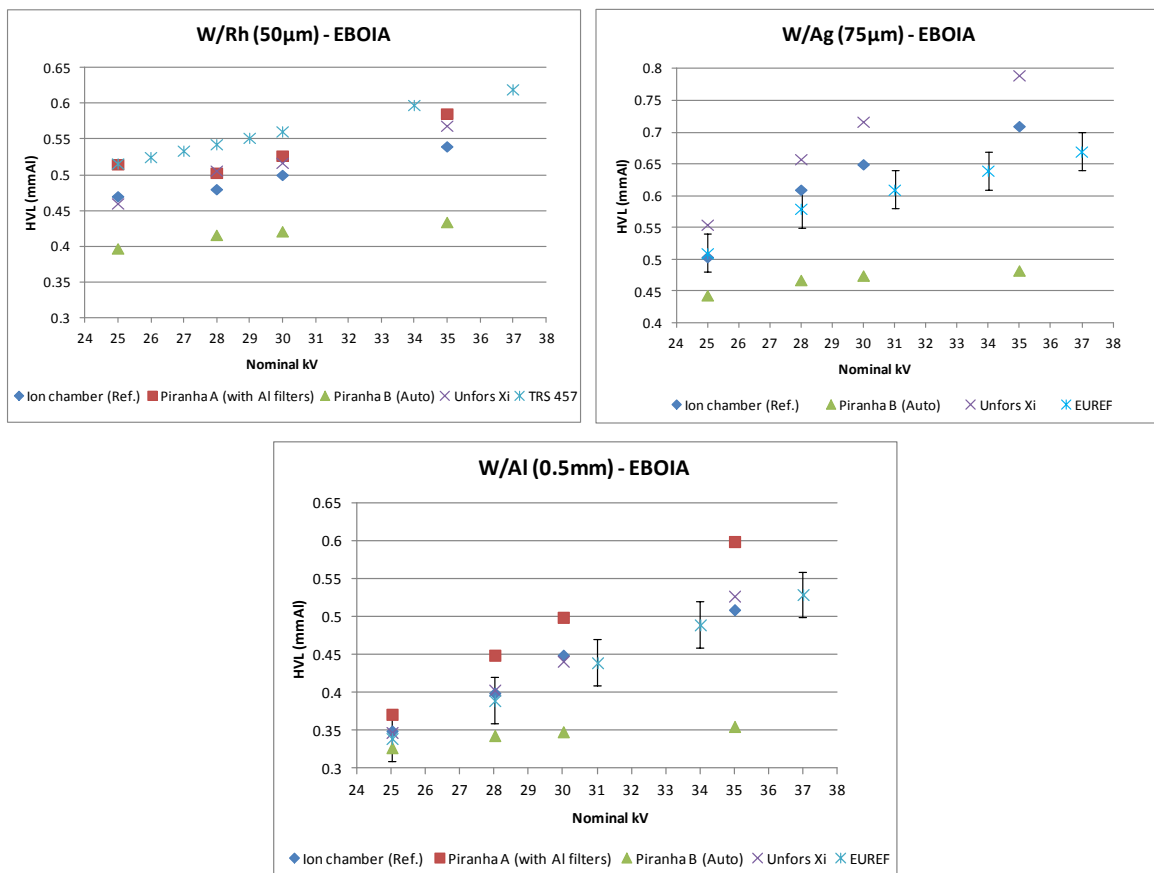
Τα αποτελέσματα των τιμών αναφοράς και των μετρήσεων HVL που πραγματοποιήθηκαν σε συστήματα μαστογραφίας με τους διάφορους μετρητές παρουσιάζονται στα παρακάτω γραφήματα. Επιπλέον δίνονται και οι ενδεικτικές τιμές HVL που αναφέρονται στο πρωτόκολλο της IAEA (TRS 457) ή στο Ευρωπαϊκό Πρωτόκολλο (EUREF).





Σχήμα 1: Αποτελέσματα μετρήσεων HVL σε συστήματα μαστογραφίας με τη χρήση διαφόρων μετρητικών συστημάτων, σε διάφορους συνδυασμούς ανόδου/φίλτρου.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των τιμών HVL που πραγματοποιήθηκαν στο EBOIA με τους διάφορους μετρητές παρουσιάζονται στα παρακάτω γραφήματα.



Σχήμα 2: Αποτελέσματα μετρήσεων HVL σε ποιότητες δεσμών που χρησιμοποιούνται στη μαστογραφία του EBOIA με τη χρήση διαφόρων μετρητικών συστημάτων.

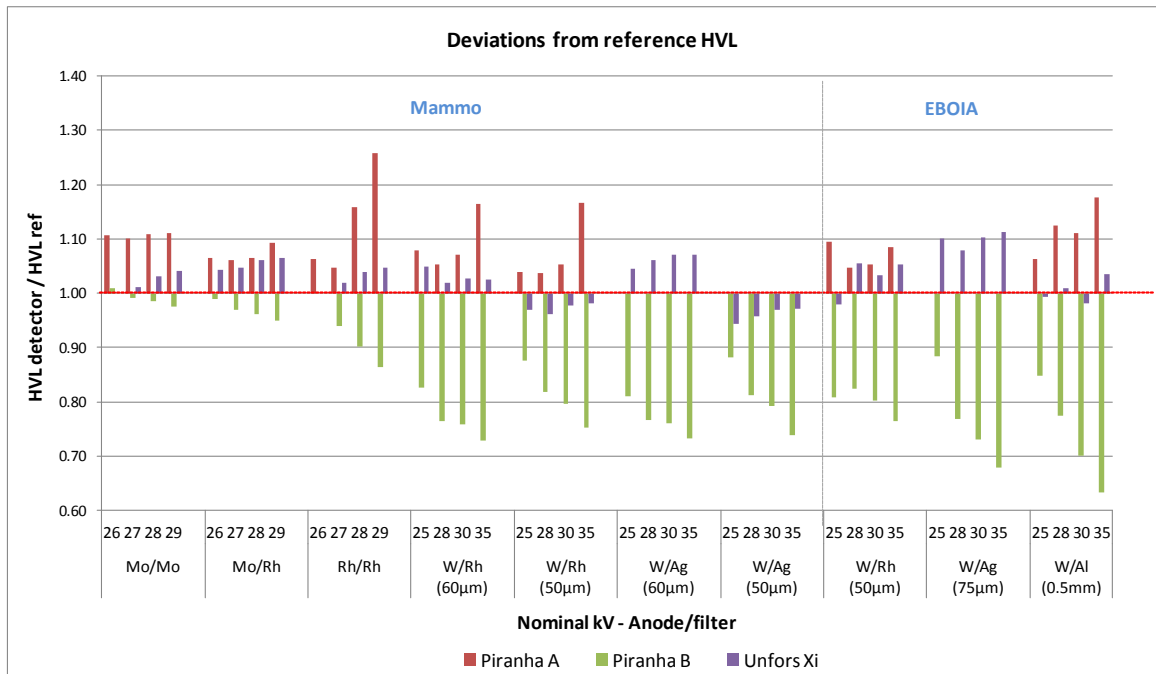
Οι αποκλίσεις των τιμών HVL όπως μετρήθηκαν και υπολογίστηκαν με τα διάφορα μετρητικά συστήματα στερεάς κατάστασης σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές αναφοράς παρουσιάζονται στο σχήμα 3.

Το Piranha-A δε μετρά απευθείας το HVL κι επομένως ο υπολογισμός του πραγματοποιήθηκε με την «κλασική» μέθοδο (καμπύλη εξασθένισης) με χρήση φίλτρων

ΑΙ. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι τιμές HVL που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο αυτή γενικά υπερεκτιμούν την τιμή HVL. Σε δέσμες με άνοδο Mo οι αποκλίσεις ήταν της τάξης του 9% κατά μέσο όρο. Σε δέσμη Rh/Rh η απόκλιση έφτανε μέχρι και το 26% στα 29 kV. Για το σύνολο των δεσμών η μέση απόκλιση ήταν της τάξης του 10%. Πραγματοποίηση μετρήσεων σε δέσμη W/Ag δεν ήταν δυνατή με το συγκεκριμένο σύστημα.

Το Piranha-B φαίνεται γενικά να υποεκτιμά την τιμή HVL. Στις δέσμες με άνοδο Mo είναι αρκετά ακριβές με αποκλίσεις μικρότερες του 5%. Αντίθετα στις δέσμες με άνοδο Rh και W οι αποκλίσεις ξεπερνούν το 10% με τις μέγιστες αποκλίσεις να φτάνουν το 32% σε δέσμη W/Ag και το 37% σε δέσμη W/Al στα 35 kV. Για το σύνολο των δεσμών η μέση απόκλιση ήταν της τάξης του 13%. Παρατηρήθηκε επίσης ότι οι αποκλίσεις τείνουν να αυξάνουν με αύξηση των kV. Επιπρόσθετα, για το συγκεκριμένο μετρητή παρατηρήθηκε ότι σε φάσμα Rh/Rh η ένδειξη του HVL μειωνόταν με αύξηση των kV γεγονός που αποτελεί προφανώς σφάλμα στους παράγοντες βαθμονόμησης του μετρητικού συστήματος.

Οι μετρήσεις με το Χί δείχνουν ότι, με εξαίρεση τις δέσμες W/Ag για τις οποίες οι αποκλίσεις ήταν κατά μέσο όρο 7% (μέγιστη απόκλιση 11%), οι αποκλίσεις δεν ξεπερνούσαν το 6.5% με μέσο όρο το 2.9% για το σύνολο των υπόλοιπων δεσμών. Επισημαίνεται ότι σε δέσμη W/Ag το όργανο δε μετρούσε kV γεγονός που πιθανόν να εξηγεί και τις αποκλίσεις στη μέτρηση του HVL, καθώς δεν υπάρχει η πληροφορία ώστε να γίνει διόρθωση για την ενεργειακή εξάρτηση των ανιχνευτών. Παρατηρήθηκε επίσης ότι η απόκριση του οργάνου είναι διαφορετική στον ίδιο συνδυασμό υλικών ανόδου/φίλτρου όταν αλλάζει το πάχος του φίλτρου της λυχνίας. Σημειώνεται ότι σχετική ρύθμιση του πάχους του φίλτρου για τις δέσμες αυτές δεν ήταν διαθέσιμη στο συγκεκριμένο όργανο.



Σχήμα 3: Αποκλίσεις τιμών HVL μετρούμενων με συστήματα στερεάς κατάστασης από τιμές αναφοράς, σε διάφορες μαστογραφικές δέσμες. (Το Piranha A δεν έδινε τη δυνατότητα μέτρησης σε δέσμη W/Ag)

Τέλος παρατηρήθηκε ότι η επιλογή συνδυασμού ανόδου/φίλτρου στο μετρητικό σύστημα, ακόμη και η επιλογή του πάχους του φίλτρου (στο Piranha), είχε σημαντική επίδραση στο αποτέλεσμα της μέτρησης του HVL αλλά και των kV. Μεταβολές παρατηρήθηκαν και στην επιλογή ή μη της ύπαρξης πιέστρου. Συγκεκριμένα για το Piranha άλλαζαν και τα kV και το HVL (εκτός από τη δέσμη W/Ag όπου το HVL παρέμενε το ίδιο ανεξαρτήτως επιλογής του πιέστρου), ενώ για το Xi το HVL παρέμενε το ίδιο και άλλαζαν τα kV (για δέσμες με άνοδο W δεν υπήρχε επιλογή ύπαρξης πιέστρου).

3.2. Μέση Δόση Αδένα

Η μέτρηση του HVL της δέσμης επηρεάζει τον υπολογισμό της ΜΔΑ μέσω των παραγόντων C_{DGg} , g , και $g \cdot c$ που χρησιμοποιούνται στα πρωτόκολλα TRS 457, European Guidelines και HHS 17 αντίστοιχα. Οι τιμές των παραγόντων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ΜΔΑ αντιστοιχούν σε μαστό μέσου πάχους (50 mm), μαζικού αδένα 50%. Στον πίνακα 2 δίνονται οι μέγιστες αποκλίσεις στον υπολογισμό της ΜΔΑ που αντιστοιχούν στις μέγιστες αποκλίσεις των τιμών HVL. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι αποκλίσεις στην εκτίμηση της ΜΔΑ είναι παρόμοιες με τις αποκλίσεις στη μέτρηση του HVL. Για τις συνθήκες ακτινοβολήσης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία οι μέγιστες αποκλίσεις στην τιμή HVL ανά μετρητικό σύστημα ήταν 26% για το Piranha A, -37% για το Piranha B και 11% για το Xi, με αποκλίσεις στην εκτίμηση της ΜΔΑ της τάξης του 26%, -33% και 10% αντίστοιχα.

Πίνακας 2: Μέγιστες αποκλίσεις τιμών HVL και ΜΔΑ

Όργανο	HVL μέγιστες αποκλίσεις %	Συνθήκες ακτινοβολήσης	ΜΔΑ μέγιστες αποκλίσεις %		
			TRS No 457	European Guidelines	HHS No17
Piranha A	25.9	Rh/Rh, 29 kV	25.6	26.5	25.6
Piranha B	-36.7	W/Al, 35 kV	-33.1	-34.1	-33.3
Unfors Xi	11.3	W/Ag, 35 kV	9.8	10.6	10.3

Σημειώνεται επίσης ότι οι παραπάνω αποκλίσεις στον υπολογισμό της ΜΔΑ αφορούν μόνο στην ανακρίβεια της μέτρησης του HVL. Οι πηγές σφαλμάτων κατά τον υπολογισμό της ΜΔΑ είναι πολλαπλές και πρέπει να εκτιμώνται κατά περίπτωση.

4. Συμπεράσματα

Τα διάφορα μετρητικά συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν παρουσίαζαν συχνά μεγάλες αποκλίσεις από τις τιμές αναφοράς στον υπολογισμό του HVL, καθώς επίσης η απόκρισή τους άλλαζε σημαντικά με τις συνθήκες ακτινοβολήσης και τις σχετικές ρυθμίσεις του μετρητικού συστήματος. Η απόκλιση αυτή έχει άμεση επίδραση στην ορθότητα του υπολογισμού της μέσης δόσης αδένα, καθώς και στην εκτίμηση των Διαγνωστικών Επιπέδων Αναφοράς. Σε παρόμοια μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε δέσμες με άνοδο Mo με μετρητικά συστήματα στερεάς κατάστασης αναφέρεται ότι οι τιμές HVL που μετρήθηκαν, χωρίς διόρθωση για την ενεργειακή εξάρτηση των ανιχνευτών, ήταν 17% υψηλότερες από αυτές που μετρήθηκαν με θάλαμο ιονισμό, με αντίστοιχη υπερεκτίμηση και στον υπολογισμό της ΜΔΑ (Abramova et al. 2008).

Συνεπώς, τα αποτελέσματα μετρήσεων με τη χρήση τέτοιων μετρητικών συστημάτων πρέπει να διερευνώνται, ενώ συστήνεται και σύγκριση της σχετικής απόκρισης αυτών με μέθοδο αναφοράς, σε διάφορες ποιότητες δέσμης (συνδυασμούς ανόδου/φίλτρου, kV_p).

5. Βιβλιογραφία

Avramova-Cholakova S., Vassileva J., Borisova R. and Atanasova I. “*An Estimate of the Influence of the Measurement Procedure on Patient and Phantom Doses in Breast Imaging*”, Radiat Prot Dosimetry, 2008.

Dance D. R. “*Monte Carlo calculation of conversion factors for the estimation of mean glandular breast dose*”, Phys Med Biol 35 1211-1219, 1990.

Dance D. R., Young K C and van Engen R E. *Further factors for the estimation of mean glandular dose using the United Kingdom, European and IAEA dosimetry protocols*. Phys Med Biol 54 4361-4372, 2009.

Dance D.R., Skinner, C.L., Young, K.C., Beckett, J.R., Kotre, C.J. “*Additional factors for the estimation of mean glandular breast dose using the UK mammography dosimetry protocol*”, Phys Med Biol 45 3225–3240, 2000.

European guidelines for quality assurance in breast cancer screening and diagnosis (Fourth Edition), EC 2006.

Hourdakis C.J., Boziari A. and Koumbouli E. “*The effect of compression paddle on energy response, calibration and measurement with mammography dosimeters using ionization chambers and solid state detectors*”, Phys Med Biol 54(4): 1047-1059, 2009.

Human Health Series No.17, “*Quality Assurance Programme for Digital Mammography*”, IAEA, Vienna, 2011.

Technical Reports Series No. 457, “*Dosimetry in Diagnostic Radiology: An International Code of Practice*”, IAEA, Vienna, 2007.