

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ - ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΔΗΜΟΣΙΑ ΥΓΕΙΑ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΥΓΙΕΙΝΗ:

ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ & ΥΔΑΤΩΝ & ΔΗΜΟΣΙΑ  
ΥΓΕΙΑ



**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**<<Ο ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΣ ΩΣ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΣ ΡΥΠΟΣ: ΠΗΓΕΣ,  
ΔΙΑΔΡΟΜΕΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΕΠΠΤΩΣΕΙΣ  
ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ>>**

**Δήμητρα Ε. Κακάτσιου**

**Οικιακής Οικονομίας και Οικολογίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο**

**ΛΑΡΙΣΑ, 2015**

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ- ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΔΗΜΟΣΙΑ ΥΓΕΙΑ  
& ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΥΓΙΕΙΝΗ:**



**ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑ  
ΤΡΟΦΙΜΩΝ & ΥΔΑΤΩΝ & ΔΗΜΟΣΙΑ  
ΥΓΕΙΑ**



**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**<<Ο ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΣ ΩΣ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΣ ΡΥΠΟΣ: ΠΗΓΕΣ,  
ΔΙΑΔΡΟΜΕΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ  
ΥΓΕΙΑ>>**

**Δήμητρα Ε. Κακάτσιου**

**Οικιακής Οικονομίας και Οικολογίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο**

**ΛΑΡΙΣΑ, 2015**

Τριμελής επιτροπή:

- Τσακάλωφ Ανδρέας (επιβλέπων),

Επίκουρος καθηγητής Ιατρικής Χημείας, Τμήμα Ιατρικής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

- Χατζηχριστοδούλου Χρήστος,

Καθηγητής Υγιεινής και Επιδημιολογίας, Τμήμα Ιατρικής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

- Κουρέας Μιχαήλ,

Διδάκτωρ τμήματος Ιατρικής, Εργαστήριο Υγιεινής και Επιδημιολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο υδράργυρος και οι ενώσεις του είναι ιδιαίτερα τοξικές για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Ο υδράργυρος υπάρχει στη φύση ως θειούχος υδράργυρος (κινναβαρίτης), αλλά αποβάλλεται στο περιβάλλον σε μεγάλες ποσότητες και σε άλλες μορφές ως αποτέλεσμα των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Στο περιβάλλον μετασχηματίζεται σε διάφορες χημικές ενώσεις και εντοπίζεται σε όλα τα στρώματα της βιόσφαιρας. Η έκθεση στον υδράργυρο και τις ενώσεις του ελλοχεύει μία σειρά αρνητικών επιπτώσεων, τόσο για τον άνθρωπο, όσο και για τη χλωρίδα και την πανίδα.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση του παγκόσμιου προβλήματος του υδράργυρου, μελετώντας την διεθνή βιβλιογραφία των τελευταίων δέκα ετών. Αναζητούνται οι πηγές εκπομπής του υδράργυρου αλλά και η πορεία του στο περιβάλλον, καθώς και οι μετατροπές που μπορεί να υποστεί μετά την εκπομπή του. Διερευνώνται οι τρόποι έκθεσης των ανθρώπων, αλλά και οι επιπτώσεις στον οργανισμό από τις διάφορες μορφές του υδράργυρου, όπως επίσης και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον. Με την μελέτη αναμένεται να γίνει εκτίμηση των σημερινών διαστάσεων του προβλήματος της μόλυνσης του περιβάλλοντος από τον υδράργυρο και τις ενώσεις του παγκοσμίως και στην Ε.Ε. Επιπλέον, γίνεται ανασκόπηση των μέτρων που εφαρμόζονται ή προτείνονται για την αντιμετώπιση του προβλήματος, όπως και των νομοθετικών ρυθμίσεων της Ε.Ε.

Λέξεις κλειδιά : υδράργυρος, ενώσεις υδράργυρου, περιβάλλον, επιπτώσεις υγείας

## **ABSTRACT**

Mercury and its compounds are highly toxic to humans and to the environment. Mercury exists in nature mainly as mercury sulfide but it is also emitted into the environment as a result of the human industrial and agricultural activities. In the environment mercury transforms to various chemical species and is detected in all the layers of the biosphere. The exposure to mercury has many negative consequences for human health and the environment.

The purpose of this study is to investigate the global problem of mercury by reviewing the scientific literature of the last ten years. The main attention is to focus on the sources of mercury in our environment and also the fate and the transformations that can happen. We investigate the routes of human exposure and the negative consequences on human health described with the final goal. To estimate the current dimensions of the mercury pollution globally and in European Union and also, describe the protection measured accepted and approved by the E.U. legislative institutions.

**Key words:** mercury, mercury compounds, environment, health effects

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

<b>1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Τα χαρακτηριστικά του υδράργυρου και οι πηγές απελευθέρωσης του.....</b>	<b>1</b>
1.1. Εισαγωγή.....	1
1.2. Οι μορφές του υδράργυρου στο περιβάλλον.....	1
1.3. Οι χρήσεις του υδράργυρου και η έκθεση των ανθρώπων.....	3
1.4. Πηγές απελευθέρωσης του υδράργυρου στο περιβάλλον.....	4
1.4.1. Φυσικές πηγές απελευθέρωσης.....	5
1.4.2. Ανθρώπινες πηγές απελευθέρωσης.....	6
 <b>2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ – Η κίνηση του υδράργυρου στο περιβάλλον.....</b>	<b>10</b>
2.1. Ο κύκλος του υδράργυρου στο περιβάλλον.....	10
2.2. Αντιδράσεις μετατροπής του υδράργυρου από τη μία μορφή στην άλλη.....	12
2.3. Η μεταφορά του υδράργυρου στα περιβαλλοντικά μέσα.....	13
2.3.1. Μεταφορά στην ατμόσφαιρα.....	13
2.3.2. Μεταφορά στα χερσαία συστήματα.....	14
2.3.3. Μεταφορά στο νερό.....	15
2.3.3.1. Ο υδράργυρος στα γλυκά ύδατα.....	16
2.3.3.2. Ο υδράργυρος στα θαλάσσια συστήματα.....	17
 <b>3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ – Επιπτώσεις της έκθεσης σε υδράργυρο στην υγεία και το περιβάλλον.....</b>	<b>19</b>
3.1. Εισαγωγή.....	19
3.2. Τρόποι ανίχνευσης του υδράργυρου στον οργανισμό.....	20
3.3. Τοξικότητα και επιπτώσεις από την έκθεση σε υδράργυρο στην ανθρώπινη υγεία.....	20

3.3.1. Επιπτώσεις	από	
μεθυλνυδράργυρο.....		20
3.3.2. Επιπτώσεις από στοιχειακό υδράργυρο.....		21
3.3.3. Επιπτώσεις	από	ανόργανο
υδράργυρο.....		22
3.3.4. Γενικές επιπτώσεις στα συστήματα του οργανισμού.....		23
3.3.4.1. Κύτταρα.....		23
3.3.4.2. Καρδία-αίμα-πνεύμονες.....		23
3.3.4.3. Γαστρεντερικό και ουροποιητικό σύστημα.....		24
3.3.4.4. Ανοσοποιητικό σύστημα.....		24
3.3.4.5. Νευρικό σύστημα.....		25
3.4. Οι επιπτώσεις του υδράργυρου στο περιβάλλον.....		25

<b>4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ - Ευρωπαϊκή νομοθεσία και δράσεις αντιμετώπισης του προβλήματος του υδράργυρου.....</b>	<b>29</b>
4.1. Εισαγωγή.....	29
4.2. Η παγκόσμια κατάσταση σχετικά με το πρόβλημα του υδράργυρου.....	29
4.3. Ευρωπαϊκή ένωση.....	31
4.3.1. Τι έχει επιτευχθεί ως τώρα με την υπάρχουσα νομοθεσία για τον υδράργυρο στην Ευρωπαϊκή Ένωση.....	32
4.3.2. Τι προτείνει η Ευρωπαϊκή στρατηγική για την αντιμετώπιση του προβλήματος του υδράργυρου.....	33
4.3.3. Νομοθεσία στην Ευρωπαϊκή Ένωση σχετικά με τον υδράργυρο.....	34
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....</b>	<b>37</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>40</b>

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Καθηγητή κ. Ανδρέα Τσακάλωφ, για τη συνεχή καθοδήγηση και επίβλεψή του.

Επίσης, ευχαριστώ την οικογένεια μου και τον φίλο μου Βασίλη, για την υποστήριξη τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ ΚΑΙ ΟΙ ΠΗΓΕΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ ΤΟΥ

## 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο υδράργυρος ανήκει στα βαρέα μέταλλα και είναι τοξικό στοιχείο. Είναι το μοναδικό μέταλλο που σε θερμοκρασία περιβάλλοντος βρίσκεται σε υγρή κατάσταση και είναι ιδιαίτερα πτητικός. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις του στο περιβάλλον οφείλονται κυρίως σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες, που παράγουν περίπου 2600 τόνους υδράργυρου το χρόνο (π.χ. καύση ορυκτών καυσίμων), αλλά και σε φυσικά αίτια, όπως π.χ. η έκρηξη ηφαιστειών, όπου αποδεσμεύονται περίπου 1400 τόνοι. Ο Hg εισέρχεται στην ατμόσφαιρα σε κατάσταση ατμού και είναι στοιχειακός ( $Hg^0$ ), δηλ. χημικά, είναι ένα σταθερό, μονοατομικό αέριο που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα και μπορεί να μεταφερθεί σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από την πηγή εκπομπής του. Στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας οξειδώνεται, μετατρέπεται σε κατιόν ( $Hg^+$  ή  $Hg^{2+}$ ) και αποτίθεται στο έδαφος με τη βροχή.[17,23]

Ως στοιχείο, ο υδράργυρος είναι γνωστός εδώ και χιλιάδες χρόνια. Βρέθηκε σε Αιγυπτιακούς τάφους του 1500 π.Χ. Στην Κίνα και στο Θιβέτ θεωρούνταν ότι παρατείνει τη ζωή και διατηρεί την καλή υγεία. Οι αρχαίοι Έλληνες τον χρησιμοποιούσαν σε αλοιφές και οι αρχαίοι Αιγύπτιοι και Ρωμαίοι σε καλλυντικά. Μέχρι το 500 προ Χριστού χρησιμοποιούνταν σε αμαλγάματα με άλλα μέταλλα. Οι αλχημιστές θεωρούσαν τον υδράργυρο ως το κυρίαρχο υλικό από το οποίο μπορούσαν να παραχθούν όλα τα άλλα μέταλλα. Πίστευαν ότι διαφορετικά μέταλλα μπορούσαν να δημιουργηθούν, αλλάζοντας απλώς την ποιότητα και την ποσότητα του θείου που περιέχεται στον υδράργυρο.[23]

Η τοξικότητά του ήταν γνωστή από παλαιότερες εποχές, αλλά μόλις τον 20<sup>ο</sup> αιώνα έγινε πλήρως αντιληπτός ο κίνδυνος από τις δράσεις του. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα παρακάτω περιστατικά, τα οποία έστρεψαν το ενδιαφέρον των επιστημόνων στον υδράργυρο και τις ενώσεις του

- 1960, Μινιμάτα, Ιαπωνία, 2265 θύματα
- 1960, Σουηδία, μείωση στον πληθυσμό των πουλιών
- 1971, Ιράκ, 100 νεκροί, 1000 επηρεάστηκαν [1,2]

## 1.2 ΟΙ ΜΟΡΦΕΣ ΤΟΥ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Ο υδράργυρος ξεχωρίζει ανάμεσα στους παγκόσμιους περιβαλλοντικούς ρύπους συνεχούς ανησυχίας. Ειδικά τα τελευταία χρόνια, είναι ένα θέμα που απασχολεί την επιστημονική κοινότητα, τους πολιτικούς, τους νομοθέτες και τους πολίτες παγκοσμίως. Εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα, τόσο από φυσικές, όσο και από ανθρώπινες πηγές. Σε

αντίθεση με τα περισσότερα βαρέα μέταλλα, ο υδράργυρος και οι ενώσεις του συμπεριφέρονται διαφορετικά στο περιβάλλον εξαιτίας της μεταβλητότητάς τους και της ικανότητάς τους για μεθυλίωση.[22,23]

Η μεγάλης εμβέλειας μεταφορά του υδράργυρου στην ατμόσφαιρα, η μετατροπή του σε πιο τοξικές, οργανομεταλλικές ενώσεις και η βιοσυσσώρευση τους στην υδρόβια τροφική αλυσίδα, έχει κινητοποιήσει έντονη έρευνα για τον υδράργυρο ως ρύπος παγκόσμιας ανησυχίας. Ο υδράργυρος παίρνει μέρος σε αρκετούς σύνθετους κύκλους και ιδιαίτερα το ενδιαφέρον εστιάζεται στους υδατικούς-βιολογικούς κύκλους και στους ατμοσφαιρικούς. Η περιβαλλοντική κυκλικότητά του μπορεί να περιγραφεί σαν μία σειρά από διαδικασίες, όπου οι χημικές και φυσικές τροποποιήσεις είναι κυρίαρχοι παράγοντες για τη συνεισφορά του στο περιβάλλον. Υδράργυρος εμφανίζεται σε διάφορες φυσικές και χημικές μορφές, με ένα μεγάλο εύρος φυσικών, χημικών και τοξικολογικών ιδιοτήτων. [22, 23]

Η απόσταση μεταφοράς του και η τελική εναπόθεση του εξαρτάται από τη φυσική και χημική μορφή του υδράργυρου που εκπέμπεται. Έρευνες δείχνουν ότι ο χρόνος παραμονής του στοιχειακού υδράργυρου στην ατμόσφαιρα μπορεί να φτάσει τον ένα χρόνο πριν την τελική του εναπόθεση στη γη. Ο παραμονής του οξειδωμένου υδράργυρου στην ατμόσφαιρα είναι μόλις λίγες ημέρες. Αλλά ακόμη και μετά την απόθεση, ο υδράργυρος επανεκπέμπεται στην ατμόσφαιρα είτε με τη μορφή αερίου, είτε σε συνδυασμό με σωματίδια για να επανατοποθετηθεί κάπου αλλού. [1]

Ο στοιχειακός υδράργυρος  $Hg(0)$ , είναι η κύρια αρχική μορφή του υδράργυρου. Έχει υψηλή πτητικότητα και μικρή διαλυτότητα στο νερό. Οι ατμοί του είναι τοξικοί, άοσμοι και άχρωμοι γι αυτό και δεν γίνονται αντιληπτοί. Ο καθαρός υδράργυρος έχει σημείο πήξης  $-38.9^{\circ}C$ , σημείο βρασμού  $357^{\circ}C$  και τάση ατμών 0.002. Σε πρότυπες συνθήκες, το ειδικό βάρος του είναι  $13.6 \text{ gr/cm}^3$  και η πυκνότητα ατμών του 6.9. η διαλυτότητά του στο νερό είναι 0.006%. Ο υδράργυρος εξορύσσεται ως πέτρωμα που ονομάζεται κιννάβαρι και περιέχει θειούχο υδράργυρο. Η μεταλλική μορφή του λαμβάνεται με θέρμανση του θειούχου υδράργυρου στους  $540^{\circ}C$ . Ο υδράργυρος εξατμίζεται και οι ατμοί συλλέγονται και ψύχονται ώστε να προκύψει η υγρή μορφή του μεταλλικού υδράργυρου. Η μορφή αυτή, έχει ευρεία εφαρμογή στην παραγωγή αερίου χλωρίου και καυστικής σόδας, στην εξόρυξη χρυσού/αργύρου, στα θερμόμετρα, τα βαρόμετρα και τους ηλεκτρικούς λαμπτήρες.[1, 2, 3]

Ο δισθενής ανόργανος υδράργυρος  $Hg^{2+}$ , ο οποίος είναι περισσότερο διαλυτός και έχει την τάση να δημιουργεί ανόργανες ενώσεις με στοιχεία, όπως είναι το χλώριο, το θείο και το οξυγόνο. Οι ενώσεις αυτές ονομάζονται επίσης και άλατα υδράργυρου. Οι περισσότερες είναι σε μορφή άσπρης σκόνης ή κρυστάλλων, εκτός από τις θειούχες ενώσεις που είναι κόκκινες και γίνονται μαύρες μόλις έρθουν σε επαφή με το φως.

Τέλος, όταν ο υδράργυρος έρθει σε επαφή με τον άνθρακα, δημιουργούνται οι οργανικές ενώσεις του υδράργυρου, με πιο γνωστή τον μεθυλhydrάργυρο  $CH_3Hg^+$ , ο οποίος συσσωρεύεται στους ζωντανούς οργανισμούς. Εμφανίζεται με τη μορφή αλάτων και λευκών κρυστάλλων. [1, 2, 3]

Όντας ένα στοιχείο, ο υδράργυρος δεν καταστρέφεται ούτε υποβαθμίζεται σε λιγότερο τοξικές μορφές. Μέσα στον κύκλο του μπορεί να αλλάξει μορφή ή στάδιο, αλλά η απλούστερη μορφή του είναι ο στοιχειακός υδράργυρος, ο οποίος από μόνος του είναι επικίνδυνος για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Μόλις απελευθερωθεί από τα

μεταλλεύματα, τα ορυκτά καύσιμα και τα αποθέματα που είναι κρυμμένα στο έδαφος και περάσει στη βιόσφαιρα, κινείται ανάμεσα στην επιφάνεια της γης και της ατμόσφαιρας. Η επιφάνεια του εδάφους, τα υδάτινα σώματα και τα ιζήματα είναι οι πρώτες λεκάνες υποδοχής του υδράργυρου.[22]

### 1.3 ΟΙ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ ΚΑΙ Η ΕΚΘΕΣΗ ΤΩΝ ΑΝΘΡΩΠΩΝ

Οι άνθρωποι συνήθως εκτίθενται στον υδράργυρο χρόνια και σε χαμηλές δόσεις. Υψηλές δόσεις έκθεσης μπορεί να προκληθούν από βιομηχανικά ατυχήματα για πολύ μικρές περιόδους. Χιλιάδες χρόνια πριν, μία ανόργανη ένωση του υδράργυρου χρησιμοποιούνταν στην Κίνα για τη δημιουργία κόκκινης χρωστικής ουσίας. Στην Αίγυπτο επίσης, χρησιμοποιούνταν ανόργανες ενώσεις για εφαρμογές στην ιατρική. Στην μοντέρνα ιστορία, αυτές οι εφαρμογές έχουν εξαλειφτεί, όμως συστατικά του υδράργυρου χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή αλοιφών θεραπείας δερματικών παθήσεων και σε αρκετές χώρες για την θεραπεία των πληγών από τη σύφιλη. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν ως καθαρικά και ως πρόσθετα στις οδοντόπαστες και ως αντισηπτικά και συντηρητικά. Πρόσφατα, χρησιμοποιήθηκαν κρέμες προσώπου και καλλυντικά που περιείχαν ανόργανες ενώσεις υδράργυρου.[8,17,23]

Στην στοιχειώδη του μορφή, ο υδράργυρος είναι το μόνο υγρό μέταλλο σε θερμοκρασία δωματίου, γι αυτό και έχει τις εξής ιδιότητες : χαμηλό ιξώδες, υψηλή πυκνότητα, υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και ανακλαστική επιφάνεια, που επιτρέπει να χρησιμοποιείται ευρέως σε επιστημονικές συσκευές, ηλεκτρικό εξοπλισμό, στη βιομηχανία, σε μπαταρίες, θερμόμετρα και βαρόμετρα, σε ηλεκτρικούς λαμπτήρες, συγκολλητικά κράματα, σε ηλιακούς συλλέκτες, καταλύτες, συντηρητικά, επιμεταλλώσεις, φαρμακευτικά προϊόντα και χλωροαλκαλική παραγωγή.[22,23]

Ο υγρός υδράργυρος, διαμορφώνει σταθερά αμαλγάματα με το χρυσό και το ασήμι κι έτσι χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή ορυκτών στα ορυχεία. Οι ανθρακωρύχοι έρχονται σε επαφή με τον υδράργυρο εισπνέοντας τα αέρια που εξατμίζονται. Οι απελευθερώσεις από αυτές τις πρακτικές, μολύνουν το έδαφος, το υπέδαφος, τα ποτάμια και τις λίμνες και σταδιακά, συνεισφέρουν στη βιοσυσσώρευση του μεθυλϋδράργυρου μέσω της μεθυλίωσης και της τροφικής αλυσίδας. Περιστασιακά μπορεί να εκτεθούν μικρά παιδιά από τους γονείς τους που έρχονται σε επαφή με τον υδράργυρο μέσω των μολυσμένων ρούχων και παπουτσιών. Ο υδράργυρος επίσης χρησιμοποιήθηκε ευρέως στα οδοντιατρικά αμαλγάματα, εκθέτοντας οδοντιάτρους και ασθενείς σε κίνδυνο. [1,2,23]

Παρά την ενημέρωση για τους κινδύνους, ο υδράργυρος εξακολουθεί να χρησιμοποιείται σε ένα μεγάλο αριθμό προϊόντων και διαδικασιών. Υπάρχει ανταλλαγή υδράργυρου και προϊόντων που περιέχουν υδράργυρο, μερικά από τα οποία είναι παράνομα, ανεξέλεγκτα και χωρίς περιορισμούς. Η πιο σημαντική ροή υδράργυρου είναι μέσω του εμπορίου. Η ποσότητα υδράργυρου στην παγκόσμια αγορά προέρχεται από τα ορυχεία χρυσού και αργύρου, από τα αποθέματα και από τον ανακυκλωμένο υδράργυρο που επανακτάται από χρησιμοποιημένα προϊόντα και απόβλητα.[7,8]

Ακόμα και κάτω από κανονισμούς και περιορισμούς, οι μετακινήσεις του υδράργυρου εξακολουθούν να συμβαίνουν. Κατά συνέπεια, μέτρα για τη μείωση και τη διευθέτηση της χρήσης και του εμπορίου πρέπει να παρθούν σε τοπικό, εθνικό και διεθνές επίπεδο προκειμένου να προληφθεί και να ελαττωθεί η μελλοντική απελευθέρωση.[8]

Τόσο ο υδράργυρος όσο και οι ενώσεις του είναι εξαιρετικά τοξικά για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Μεγάλες ποσότητες μπορεί να είναι θανατηφόρες, αλλά ακόμα και μικρές δόσεις μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα στην υγεία, επηρεάζοντας κυρίως το νευρικό σύστημα. Ο μεθυλδράργυρος διαπερνά τον πλακούντα και μπορεί να εμποδίσει την διανοητική ανάπτυξη του παιδιού ακόμα και πριν τη γέννηση. Έρευνες έχουν δείξει ότι ο μεθυλδράργυρος στη διατροφή εγκύων γυναικών προκαλεί προβλήματα στην ανάπτυξη του παιδιού και η έκθεση ακόμα και σε μικρή ποσότητα επηρεάζει το καρδιαγγειακό σύστημα. Συσσωρεύεται στα ψάρια και τα θαλασσινά και καταλήγει στον άνθρωπο μέσω της διατροφής. Αν και η έκθεση στην Ευρώπη φαίνεται να είναι σε αποδεκτά όρια, υπάρχουν αποδείξεις πως οι κάτοικοι των περιοχών γύρω από τη Μεσόγειο και την Αρκτική εκτίθενται σε μεγαλύτερα ποσοστά.[22,23]

Ορισμένοι πληθυσμοί είναι ιδιαίτερα επιρρεπείς στην έκθεση σε υδράργυρο, όπως είναι τα έμβρυα, τα νεογνήτα και τα μικρά παιδιά εξαιτίας της ευαισθησίας του αναπτυσσόμενου νευρικού συστήματος. Επιπλέον, οι γονείς, οι έγκυες γυναίκες και οι γυναίκες που πρόκειται να μείνουν έγκυες πρέπει να είναι ιδιαίτερα προσεκτικοί. Η μέτρια κατανάλωση ψαριών δεν προκαλεί έκθεση έντονης ανησυχίας. Όμως, ιθαγενής πληθυσμοί και άλλοι που καταναλώνουν μεγάλη ποσότητα μολυσμένων ψαριών και θαλασσινών, καθώς και εργάτες που εκτίθενται στον υδράργυρο, όπως είναι οι εξορύκτες χρυσού και αργυρού, διατρέχουν αυξημένο κίνδυνο.[22,23]

Τα επίπεδά του στο περιβάλλον έχουν αυξηθεί από τη βιομηχανική εποχή. Πλέον είναι παρόν σε διάφορα περιβαλλοντικά μέσα και τρόφιμα σε ποσοστά που επηρεάζουν δυσμενώς τον άνθρωπο και τη φύση. Η εκτεταμένη έκθεση, εξαιτίας των ανθρωπογενών πηγών και οι προηγούμενες πρακτικές, έχουν αφήσει μία κληρονομία υδράργυρου στους χώρους υγειονομικής ταφής, στα ανενεργά ορυχεία, στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις, το έδαφος και τα ιζήματα. Ακόμα και περιοχές χωρίς σημαντικές απελευθερώσεις, όπως είναι η Αρκτική, επηρεάζονται αρνητικά εξαιτίας της διηπειρωτικής μετακίνησής του.[11,23]

#### **1.4 ΠΗΓΕΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**

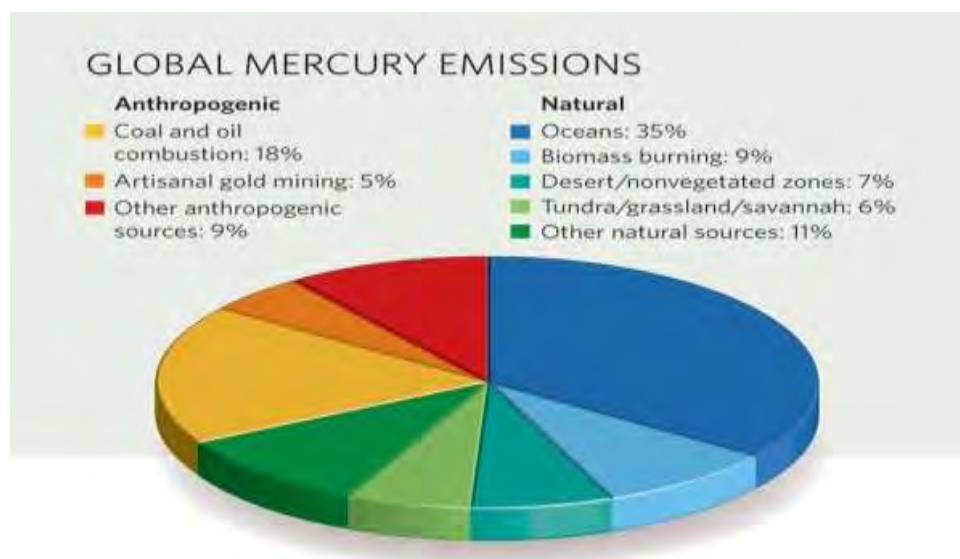
Οι απελευθερώσεις του υδράργυρου στην βιόσφαιρα μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τέσσερις κατηγορίες:

- Φυσικές πηγές-εκκλήσεις λόγω της κινητικότητας του φυσικά υπάρχοντος υδράργυρου στο φλοιό της γης, όπως είναι η ηφαιστειακή δραστηριότητα και η διάβρωση των πετρωμάτων
- Τρέχουσες ανθρωπογενής εκπομπές (συνδεδεμένες με την ανθρώπινη δραστηριότητα) από την κινητικότητα των προσμίξεων του υδράργυρου σε πρώτες ύλες όπως τα ορυκτά καύσιμα

- Τρέχουσες ανθρωπογενής εκπομπές ως αποτέλεσμα της χρήσης του υδράργυρου σε προϊόντα και διαδικασίες, εξαιτίας εκκλήσεων στην παραγωγή, διαρροών, εναποθέσεων ή αποτέφρωσης χρησιμοποιημένων προϊόντων
- Επανακινητοποίηση του αποθέματος του υδράργυρου που βρίσκεται στο έδαφος, τα ιζήματα, τους υδρόβιους οργανισμούς και σε απόβλητα.

Οι αποδέκτες των εκπομπών είναι η ατμόσφαιρα, τα υδάτινα και χερσαία περιβάλλοντα και υπάρχουν συνεχόμενες αλληλεπιδράσεις (ροές υδράργυρου) μεταξύ τους. Η μορφή του υδράργυρου εξαρτάται από την πηγή που τον απελευθεώνει. Κάθε μορφή έχει διαφορετική επίδραση στην υγεία των ανθρώπων και στο περιβάλλον εξαιτίας της διαφορετικής τοξικότητας που έχουν. [4,7,15,22,23]

Έχοντας ως δεδομένο τον κύκλο του υδράργυρου, καταλαβαίνουμε ότι οι νέες εκκλήσεις συμβάλλουν στο παγκόσμιο απόθεμα, το οποίο βρίσκεται σε διαρκή κινητικότητα και εναποτίθεται στο έδαφος και το νερό. Ο υδράργυρος είναι χημικό στοιχείο και επομένως δεν μπορεί να μετατραπεί σε λιγότερο χημική ουσία στο περιβάλλον. Ο μόνος τρόπος για να απομακρυνθεί από τη βιόσφαιρα είναι η εναπόθεσή του στα ωκεάνια ιζήματα και σε χώρους ελεγχόμενης ταφής όπου διατίθεται σε σταθεροποιημένη μορφή. Αυτό σημαίνει ότι ακόμη και αν οι ανθρώπινες εκπομπές βαθμιαία εξαλειφθούν, η μείωση στις συγκεντρώσεις του υδραργύρου συμβεί πολύ αργά, ίσως μετά από δεκαετίες ή και περισσότερο. [4,7,15,22,23]



#### 1.4.1 ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ

Οι φυσικές πηγές περιλαμβάνουν τα ηφαίστεια, την εξάτμιση από το έδαφος και τα ύδατα, τις δασικές πυρκαγιές και τη διάβρωση των ορυκτών. Οι φυσικές εκπομπές υδράργυρου είναι κάτι που δεν μπορούμε να ελέγξουμε και πρέπει να τις θεωρούμε μέρος του περιβάλλοντος, αλλά παρ' όλα αυτά συμβάλλουν στην αύξηση των επιπέδων του. [4,7,15,22,23]

Η συνεισφορά των ηφαιστειών διαφέρει και εξαρτάται από το αν το ηφαίστειο είναι στη φάση της απαέρωσης ή της έκρηξης. Κατά μέσο όρο, τα ηφαίστεια και οι γεωθερμικές δραστηριότητες, απελευθερώνουν 90Mg το χρόνο στην ατμόσφαιρα, δηλαδή περίπου το 2% της συνολικής συνεισφοράς από φυσικές πηγές. [4,7,15,22,23]

Πολλές μελέτες υποστηρίζουν ότι η διαφυγή στοιχειώδους υδράργυρου από επιφανειακά νερά, κατά κύριο λόγο γίνεται, πρώτον από τη διαβάθμιση της συγκέντρωσης του υδράργυρου ανάμεσα στην επιφανειακή στοιβάδα του νερού και του αέρα πάνω από τη επιφάνεια του νερού, δεύτερον, την ηλιακή ακτινοβολία και τρίτον από τη θερμοκρασία στην επιφανειακή στοιβάδα νερού και του αέρα πάνω από τη επιφάνεια του νερού. Η εξάτμιση υδράργυρου από την επιφάνεια λιμνών είναι γενικά μεγαλύτερη από ότι είναι στη θάλασσα. Σε γενικές γραμμές η συνεισφορά από τους ωκεανούς και τις λίμνες στην ατμόσφαιρα φτάνει στα 2778 Mg το χρόνο, δηλαδή συμβάλλουν κατά 37% στο παγκόσμιο απόθεμα. [4,7,15,22,23]

Η διαφυγή υδράργυρου από το επιφανειακό στρώμα εδάφους και από τη βλάστηση, είναι φανερό ότι επηρεάζεται από τις μετεωρολογικές συνθήκες, το απόθεμα της ατμόσφαιρας και το είδος της βλάστησης και του χώματος. Οι εκκλήσεις υδράργυρου από τα φυτά εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι η πρόσληψη από την ατμόσφαιρα, η ατμοσφαιρική εναπόθεση στα φυλλώματα και η πρόσληψη από τις ρίζες. Η εγγύτητα της βλάστησης στις φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές αυξάνει την περιεκτικότητα της. Σε γενικές γραμμές η ολική συνεισφορά του εδάφους και της βλάστησης στο παγκόσμιο απόθεμα είναι 1464 Mg το χρόνο. [4,7,15,22,23]

Η απελευθέρωση από την καύση της βιομάζας, τελευταία έχει ληφθεί υπόψη σε τοπικό και παγκόσμιο επίπεδο. Πρόσφατες έρευνες δείχνουν ότι η έκκληση στην ατμόσφαιρα υπολογίζεται σε 675 Mg το χρόνο , δηλαδή το 13% της παγκόσμιας συνεισφοράς. Οι περιοχές που συμβάλουν περισσότερο είναι η ισημερινή και αρκτική Ασία και η Αμερική στο νότιο ημισφαίριο. [4,7,15,22,23]

Οι τρέχουσες μετρήσεις εκπομπών υδράργυρου από φυσικές πηγές (πρωτογενής και επανεκπομπές) υπολογίζεται στα 5207Mg το χρόνο, δηλαδή αντιπροσωπεύει σχεδόν το 70% του παγκόσμιου αποθέματος. Οι ωκεανοί είναι η πιο σημαντική πηγή συμβάλλοντας κατά 36%, ακολουθείται από την καύση της βιομάζας (9%), οι έρημοι, οι μεταλλούχες ζώνες και οι ζώνες χωρίς βλάστηση με 7%, η τούνδρα και οι λειμώνες στη συνέχεια με 6%, τα δάση (5%) και τέλος η διαφυγή μετά από συμβάντα εξάντλησης του υδράργυρου. [4,7,15,22,23]

#### **1.4.2 ΑΝΘΡΩΠΙΝΕΣ ΠΗΓΕΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ**

Ένα μεγάλο μέρος του υπάρχοντος υδράργυρου στην ατμόσφαιρα, είναι αποτέλεσμα των πολυετών απελευθερώσεων εξαιτίας των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Οι πιο σημαντικές πηγές απελευθέρωσης είναι:

- ❖ Απελευθερώσεις από κινητοποίηση των προσμίξεων του υδράργυρου
  - Παραγωγή ενέργειας με καύση του άνθρακα
  - Παραγωγή τσιμέντου

- Εξόρυξη και άλλες μεταλλευτικές δραστηριότητες που περιλαμβάνουν εξαγωγή και επεξεργασία παρθένων και ανακυκλωμένων μεταλλικών στοιχείων
  - Σίδηρος και χάλυβα
  - Σιδηρομαγγάνιο
  - Ψευδάργυρος
  - Χρυσός
- ❖ Απελευθερώσεις από σκόπιμη εξαγωγή και χρήση του υδράργυρου
  - Εξόρυξη υδράργυρου
  - Εξόρυξη χρυσού και αργύρου μικρής κλίμακας
  - Χλωροαλκαλική παραγωγή
  - Χρήση λαμπτήρων φθορισμού, διαφόρων οργάνων και οδοντικών αμαλγαμάτων
  - Κατασκευή προϊόντων που περιέχουν υδράργυρο
    - Θερμόμετρα
    - Μανόμετρα και άλλα όργανα
    - Ηλεκτρικοί και ηλεκτρονικοί διακόπτες
- ❖ Απελευθερώσεις από επεξεργασία αποβλήτων και κρεματόρια
  - Αποτέφρωση αποβλήτων (δημοτικά, ιατρικά και επικίνδυνα απόβλητα)
  - Υγειονομική ταφή
  - Καύση νεκρών
  - Νεκροταφεία (απελευθέρωση στο χώμα)

Η καύση των ορυκτών καυσίμων είναι η μεγαλύτερη πηγή απελευθέρωσης υδράργυρου στην ατμόσφαιρα, συμβάλλοντας σημαντικά στο παγκόσμιο απόθεμα. Η καύση του άνθρακα είναι η μεγαλύτερη πηγή ενέργειας παγκοσμίως και η συγκέντρωση του υδράργυρου είναι αρκετά υψηλή. Σε αρκετές αναπτυσσόμενες χώρες ως καύσιμη υλη χρησιμοποιείται το ξύλο, τόσο στη βιομηχανία όσο και ως πηγή θερμότητας στις οικίες, χωρίς τεχνολογία ελέγχου εκπομπών. Τα δεδομένα όμως που διαθέτουμε για τη συγκέντρωση υδράργυρου στο ξύλο, δεν είναι επαρκή για να προσδιοριστεί η συνεισφορά στην ατμόσφαιρα. Η απελευθέρωση από την καύση πετρελαίου, ως μέρος της κατηγορίας των ορυκτών καυσίμων, παρουσιάζει μικρή συνεισφορά στο παγκόσμιο απόθεμα σε σχέση με τον άνθρακα. Μεγάλος όγκος από αποσταγμένα και υπολειμματικά πετρέλαια καίγονται κάθε χρόνο και χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, στους καυστήρες των βιομηχανιών και των κατοικιών. Όσο μεγαλύτερη είναι η διύλιση του πετρελαίου, τόσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα σε υδράργυρο. [4,7,15,22,23]

Οι εκπομπές από την καύση των ορυκτών καυσίμων και την καύση των απορριμμάτων υπολογίζονται περίπου στον 70% των ανθρώπινων εκπομπών. Καθώς η χρήση των ορυκτών καυσίμων ολοένα και μεγαλώνει για να ικανοποιήσει τις αυξανόμενες ανάγκες ενέργειας των αναπτυγμένων και αναπτυσσόμενων εθνών, είναι αναμενόμενο ότι και οι εκπομπές του υδράργυρου θα αυξάνονται λόγω της έλλειψης τεχνολογίας ελέγχου ή εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Η τεχνολογία ελέγχου που αναπτύχθηκε για την καύση των καυσίμων και των απορριμμάτων, αρχικά είχε σκοπό την αντιμετώπιση των όξινων ουσιών και των αιωρούμενων σωματιδίων. Τέτοιας μορφής τεχνολογίες, μπορεί να παρέχουν κάποιο επίπεδο ελέγχου για τον υδράργυρο, αλλά σε παγκόσμιο επίπεδο, ο έλεγχος αυτός μεταφράζεται σε μία μικρή μείωση από αυτές τις πηγές. Πολλές μορφές τεχνολογίας είναι σημαντικά, λιγότερο αποτελεσματικές στην μείωση του στοιχειώδους υδράργυρου σε σχέση με άλλα είδη. [4,7,15,22,23]

Το φυσικό αέριο μπορεί να περιέχει μικρή ποσότητα υδράργυρου, η οποία όμως απομακρύνεται από το ακατέργαστο αέριο κατά την ανάκτηση των υγρών συστατικών



και κατά την αφαίρεση του θειούχου υδρογόνου. Επιπλέον, οι εκπομπές υδράργυρου από την καύση του φυσικού αερίου είναι ασήμαντες σε σχέση με αυτές από άλλες πηγές. [4,7,15,22,23]

Οι εκπομπές από τις εγκαταστάσεις στάσιμης καύσης επηρεάζονται από το είδος και την αποδοτικότητα του εξοπλισμού ελέγχου, όπως είναι οι ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές και τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται κυρίως ως μέτρα μείωσης. Επίσης, καπνοδόχοι αποθείωσης χρησιμοποιούνται για τη μείωση των εκπομπών, αλλά δεν είναι πολύ συχνή η χρήση τους, ειδικά σε χώρες με οικονομία σε μεταβατικό στάδιο. Η καύση των ορυκτών καυσίμων σε εγκαταστάσεις στάσιμης καύσης, αντιπροσωπεύουν την πιο σημαντική ανθρωπογενή πηγή απελευθέρωσης υδράργυρου στην ατμόσφαιρα (35% των συνολικών εκπομπών) φτάνοντας τα 810 Mg το χρόνο. [4,7,15,22,23]

Ο υδράργυρος εμφανίζεται ως πρόσμιξη στα μεταλλεύματα χαλκού, ψευδάργυρου, νικελίου, μόλυβδου και χρυσού. Οι διεργασίες τήξης που γίνονται για την ανάκτηση αυτών των μετάλλων, είναι γνωστό πως αποτελούν τεράστιες πηγές απελευθέρωσης υδράργυρου στην ατμόσφαιρα, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες. Οι θερμοκρασίες στους βραστήρες και τους φούρνους, είναι παράμετροι που επηρεάζουν την ποσότητα του υδράργυρου που απελευθερώνεται, αν και η χημική μορφή, η τεχνολογία ελέγχου και η κατανομή μεγέθους σωματιδίων παίζουν σημαντικό ρόλο. Είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η μέση περιεκτικότητα υδράργυρου στα μεταλλεύματα καθώς δεν υπάρχουν επαρκείς πληροφορίες στη βιβλιογραφία. Όσον αφορά την απελευθέρωση από τα ορυχεία χρυσού, αποτελεί ένα πολύ κρίσιμο θέμα περιβαλλοντικής ανησυχίας. Υπολογίζεται ότι εκλύονται ετησίως γύρω στα 400Mg. [4,7,15,22,23]

Στους κλιβάνους τσιμέντου, η ανάφλεξη του άνθρακα είναι σημαντική πηγή εκπομπών. Τα μέτρα ελέγχου στα καπναέρια είναι μηδαμινά, αν και η ανάπτυξη της τεχνολογίας μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις εκπομπές. Υπολογίζεται ότι η απελευθέρωση από τη συγκεκριμένη πηγή φτάνει τα 236 Mg ετησίως. [4,7,15,22,23]

Η πρωτογενής παραγωγή υδράργυρου είναι μία άλλη σημαντική πηγή απελευθέρωσης στην ατμόσφαιρα. Επίσημα δεδομένα για την εξόρυξη υδράργυρου δεν υπάρχουν καθώς οι περισσότερες χώρες δεν την αναφέρουν στις στατιστικές επετηρίδες. Σήμερα υπάρχουν ενεργά ορυχεία εξόρυξης στην Αλγερία, στην Κίνα, στο Κιργιστάν και στην Ισπανία, ενώ η Ιταλία, το Μεξικό, η Σλοβακία, η Σλοβενία και η Τουρκία διατηρούν σημαντικά αποθέματα από προηγούμενες εξορυκτικές δραστηριότητες. [4,7,15,22,23]

Τα απόβλητα είναι άλλη μία σημαντική πηγή απελευθέρωσης υδράργυρου. Η ποσότητά του στα στερεά απόβλητα, εξαρτάται από την περιεκτικότητα στα προϊόντα, την διάρκεια ζωής των προϊόντων και τους μηχανισμούς διάθεσης. Η γνώση της ποσότητας υδράργυρου στα είδη αποβλήτων είναι ελλιπής γι' αυτό και η εκτίμηση των εκπομπών από τις διάφορες τεχνικές διάθεσης είναι ασαφής. Όσον αφορά τα βιομηχανικά απόβλητα, η μεγαλύτερη ποσότητα υδράργυρου προέρχεται από την απομάκρυνση του από την παραγωγική διαδικασία και από την περιεχόμενη ποσότητα σε κάποια προϊόντα. Σημαντική πηγή είναι η βιομηχανία χλωριου-αλκαλίων, όπως επίσης και η χύτευση των μετάλλων. Ο υδράργυρος στα δημοτικά απόβλητα, σχετίζεται κυρίως με τα καταναλωτικά προϊόντα. Υπάρχει στις μπαταρίες, σε οδοντιατρικές εφαρμογές, σε ηλεκτρονικές συσκευές, στου λαμπτήρες και άλλες συσκευές. Υπάρχει επίσης στα ιατρικά απόβλητα, χωρίς να έχει εκτιμηθεί ακριβώς η συνεισφορά του. Γενικά, υπολογίζεται ότι από την αποτέφρωση των αποβλήτων απελευθερώνονται περίπου 187Mg το χρόνο. [4,7,15,22,23]



Σχήμα 1 : Οι φυσικές και ανθρώπινες πηγές υδράργυρου  
<http://www.pemptousia.gr/2011/06/varia-ke-toxika-metalla/>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Η ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

### 2.1 Ο ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

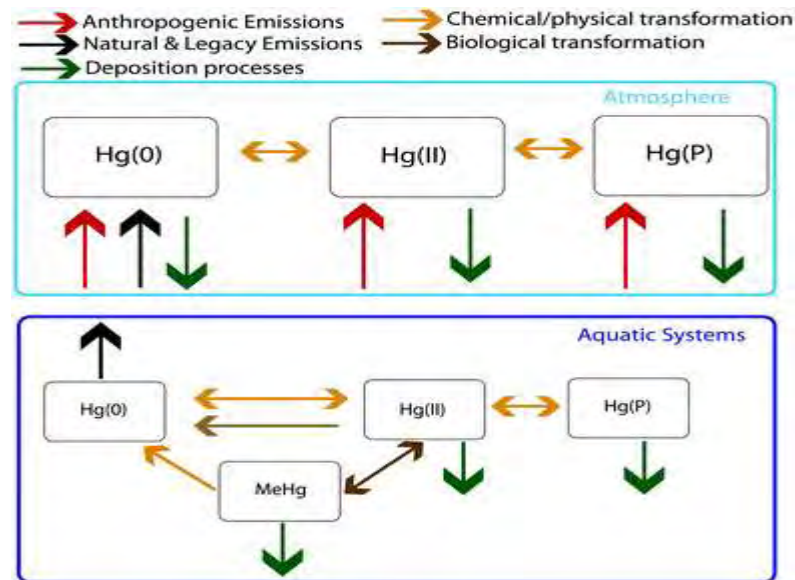
Ο υδράργυρος είναι ένας ιδιαίτερα δυναμικός ρύπος, εξαιτίας των μοναδικών φυσικών, χημικών και βιοσυσσωρευτικών ιδιοτήτων του. Η μεταβλητότητά του και η ικανότητα του να σχηματίζει ενώσεις, σε συνδυασμό με την ικανότητα του για χημικές μετατροπές κάτω από συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες, κάνουν τον υδράργυρο εύκολα ανταλλάξιμο ανάμεσα στα περιβαλλοντικά μέσα, συμπεριλαμβανομένης της βιόσφαιρας. Μετά την απελευθέρωση του στο περιβάλλον, ο υδράργυρος εισέρχεται σε έναν βιοχημικό κύκλο, όπου παραμένει χημικά, βιολογικά και περιβαλλοντικά ενεργός για παρατεταμένο χρονικό διάστημα.[7]

Οι 3 βασικές φάσεις του κύκλου του υδραργύρου είναι: 1. Η απελευθέρωση του υδραργύρου από τις πηγές και η απαέρωση του από το έδαφος και τα επιφανειακά νερά, 2. Η μεταφορά και απόθεσή του, 3. Η βιολογική μετατροπή και απορρόφησή του από διάφορους οργανισμούς και η προσρόφησή του στα ιζήματα. Το ποσοστό του υδραργύρου που αποτίθεται στο έδαφος και την ατμόσφαιρα, κατά ένα μέρος του επανεκπέμπεται στην ατμόσφαιρα ως στοιχειακός υδράργυρος και ένα άλλο μέρος βιοσυσσωρεύεται στην τροφική αλυσίδα. Ως τελικός αποδέκτης του υδραργύρου θεωρείται ο πυθμένας των ωκεανών, όπου και αποθηκεύεται υπό μορφή μη διαλυτών υδραργυρικών σουλφιδίων. Και η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται. Η εκπομπή, εναπόθεση και εξαέρωση του υδράργυρου, δημιουργεί δυσκολίες στο να εντοπιστεί η κίνηση του στις πηγές του.[14,20,24]

Δύο τύποι εναπόθεσης του υδράργυρου συμβαίνουν, η ξηρή και η υγρή εναπόθεση. Ξηρή εναπόθεση είναι η διαδικασία με την οποία τα ατμοσφαιρικά σωματίδια μεταφέρονται με τις κινήσεις του αέρα στην επιφάνεια της γης. Η υγρή εναπόθεση αναφέρεται στις φυσικές διαδικασίες, κατά τη διάρκεια των οποίων τα στοιχεία της ατμόσφαιρας παρασύρονται από τα ατμοσφαιρικά υδρομετέωρα (σταγόνες ομίχλης, βροχή, χιόνι) και στη συνέχεια εναποτίθενται στην επιφάνεια της γης.[27]

Στην ατμόσφαιρα, ο υδράργυρος εισέρχεται υπό στοιχειακή μορφή ( $\text{Hg}(0)$ ), που είναι και η επικρατούσα στον αέρα μορφή του με ποσοστό που φτάνει το 95%, καθώς και υπό ανόργανη ( $\text{Hg}(\text{II})$ ) ή σωματιδιακή μορφή ( $\text{Hg}(\text{P})$  particulate-bound mercury). Η χημική μορφή παίζει καθοριστικό ρόλο στην περαιτέρω 'κίνηση' του υδραργύρου, όπως φαίνεται και από όσα παρατίθενται στη συνέχεια. Η ανόργανη και η σωματιδιακή μορφή είναι περισσότερο υδροδιαλυτές, με αποτέλεσμα να παραμένουν στην ατμόσφαιρα για μικρό χρονικό διάστημα (ημέρες - εβδομάδες) και να αποτίθενται, συνήθως, σχετικά κοντά στην περιοχή εκπομπής τους. Μέσω της υγρής (βροχόπτωση, χιόνι) και ξηρής απόθεσης, ο υδράργυρος καταλήγει είτε απευθείας στην επιφάνεια της θάλασσας είτε στα εδαφικά και υδατικά οικοσυστήματα της χέρσου, όπου και πάλι αργά ή γρήγορα καταλήγει στη θάλασσα μεταφερόμενος μέσω των ποταμών, της απόπλυσης

της χέρσου, των υπόγειων υδάτων και της παράκτιας διάβρωσης. Αντίθετα, ο Hg(0) παραμένει για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα στην ατμόσφαιρα (της τάξης του 0,5-1 χρόνου) πριν εισέλθει στα υπόλοιπα στάδια του κύκλου και διασπείρεται (μοριακή και τυρβώδης διάχυση, οριζόντια και κατακόρυφη μεταφορά) σε μεγάλες αποστάσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η παρουσία υδραργύρου στην Αρκτική, σε μια περιοχή δηλ. στην οποία δε θα περίμενε κανείς να υπάρχει τέτοιο πρόβλημα ρύπανσης.[14,25]



**Σχήμα 2 : Κύκλος και βασικές μορφές υδραργύρου στην ατμόσφαιρα και υδατόσφαιρα. ([pubs.rsc.org](https://pubs.rsc.org))**

Η συμβολή των ποταμών στην επιβάρυνση των θαλασσών (αλλά και των υδάτινων μαζών γενικότερα) με υδράργυρο θεωρείται καθοριστική και εξαρτάται τόσο από την παρουσία αποθέσεων στη λεκάνη απορροής, όσο και από τη διέλευση του ποταμού από αστικά ή βιομηχανικά κέντρα. Οι εκβολές δρουν ως φίλτρα του διερχόμενου νερού παγιδεύοντας μέρος του υδραργύρου μέσω της προσρόφησης αυτού στη σωματιδιακή ύλη, η οποία στη συνέχεια καθιζάνει στον πυθμένα. Από τη στιγμή που θα φτάσει ο υδράργυρος στη θάλασσα, η μετέπειτα τύχη του εξαρτάται από μια σειρά διεργασιών: τη διάλυση, τη διασπορά, την καταβύθιση, την προσρόφηση και την απορρόφηση.[20]

Η διάλυση και η διασπορά είναι φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα όταν τα βαρέα μέταλλα εισέρχονται στο θαλασσίνο νερό και διαλύονται σε αυτό, ενώ ταυτόχρονα, λόγω των ρευμάτων και της διάχυσης, μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις. Σε σημαντικό ποσοστό, ο Hg προσροφάται στη σωματιδιακή ύλη, καθιζάνει και εναποτίθεται στο ιζήμα. Με την πάροδο του χρόνου υφίσταται ανάμιξη ή επαναιώρηση του ιζήματος από τα ρεύματα και τους βενθικούς οργανισμούς(Με τον όρο Βένθος χαρακτηρίζεται το σύνολο των έμβιων οργανισμών, που ζουν και αναπτύσσονται στο βυθό των ωκεανών και των θαλασσών ή και των λιμνών και κατά τελευταίο ακόμη προσδιορισμό από το σημείο που παρατηρείται παλίρροια μέχρι τις πλέον βαθιές υποθαλάσσιες τάφρους) , μερική αποδόμηση της οργανικής ύλης από τους μικροοργανισμούς, διάλυση και επανακαθίζηση του. [1,14]

Ο βιοχημικός κύκλος του υδράργυρου δεν εξαρτάται μόνο από τις συγκεντρώσεις στις διάφορες δεξαμενές, αλλά και από τις θερμοδυναμικές ιδιότητες των ενώσεων του. Η πίεση του ατμού, η διαλυτότητα, το σημείο ισορροπίας, η κατανομή στον αέρα και το νερό είναι σημαντικές πληροφορίες για την ερμηνεία της πορείας του υδράργυρου. Επιπλέον, κινητικά δεδομένα για τις χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι απαραίτητα προκειμένου να υπολογιστούν σωστά οι ροές. [24]

Μέρος του υδράργυρου που είναι αποθηκευμένο στο έδαφος και το νερό, μπορεί αργά να μετατραπεί σε πτητικές μορφές που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα. Αυτές οι εκπομπές από τις ηπείρους και τους ωκεανούς προέρχονται κυρίως από τον στοιχειακό υδράργυρο και δυμεθυλο-υδράργυρο, οι οποίοι μπορούν να σχηματιστούν από βιοχημικές διαδικασίες. Οι δύο αυτές μορφές υδράργυρου χαρακτηρίζονται πτητικές εξαιτίας της σχετικά υψηλής τάσης ατμών τους.[16,22,23]

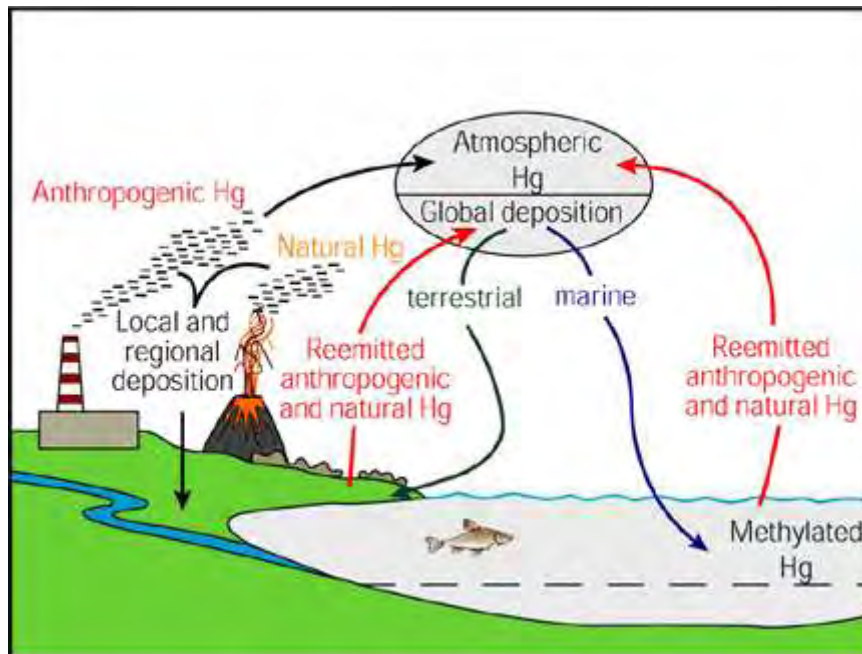
## 2.2 ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ ΑΠΟ ΤΗ ΜΙΑ ΜΟΡΦΗ ΣΤΗΝ ΑΛΛΗ

Σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν και οι αντιδράσεις μετατροπής από τη μια μορφή στην άλλη, όπως είναι η οξείδωση. Η οξείδωση του στοιχειακού υδράργυρου  $Hg^0$  στην ατμόσφαιρα, είναι ένα σημαντικός μηχανισμός που περιλαμβάνεται στην απόθεση του υδράργυρου στο έδαφος και το νερό. Η στοιχειακή μορφή, εξατμίζεται σχετικά εύκολα και εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα, όπου μπορεί να μεταφέρεται με τα ρεύματα του αέρα για περισσότερο από ένα χρόνο και να επανατοποθετηθεί στο περιβάλλον για περαιτέρω κυκλικότητα. Σε αντίθεση, η μορφή  $Hg^{2+}$  έχει ατμοσφαιρικό χρόνο παραμονής μικρότερο από δύο εβδομάδες, εξαιτίας της διαλυτότητας στο νερό, της χαμηλής μεταβλητότητας και των αντιδραστικών ιδιοτήτων. Ως εκ τούτου, όταν ο  $Hg^0$  μετατρέπεται σε  $Hg^{2+}$  απομακρύνεται γρήγορα από το νερό της βροχής, το χιόνι ή δεσμεύεται σε μεγάλα σωματίδια και εναποτίθεται στο έδαφος.[1,20,27]

Ο υδράργυρος μπορεί να υπάρξει σε τρεις οξειδωτικές καταστάσεις, 0, +1 και +2, σχηματίζοντας στοιχειακό υδράργυρο με μηδενικό σθένος, και υδραργυρούχες και υδραργυρικές ενώσεις με σθένος +1 και +2. Στο υδάτινο περιβάλλον, το μεγαλύτερο μέρος του υδράργυρου είναι σε ανόργανη και οργανική μορφή ( $Hg^{2+}$ ,  $CH_3Hg$ ), με τον  $Hg(0)$  να είναι σημαντικό κλάσμα του διαλυμένου υδράργυρου στο νερό. [1]

Η σημαντικότερη, από τοξικολογική άποψη, διεργασία, η οποία λαμβάνει χώρα στους υδάτινους αποδέκτες είναι η μεθυλίωση και, η αντίστροφη της διαδικασία, η απομεθυλίωση. Υπό ανοξικές συνθήκες ως επί το πλείστον (δηλ. υπό συνθήκες έλλειψης οξυγόνου), συγκεκριμένα είδη βακτηρίων που βρίσκονται κυρίως στο έδαφος και στα θαλάσσια-ποτάμια-λιμναία ιζήματα 'αναλαμβάνουν' τη μετατροπή του ανόργανου υδραργύρου σε μεθυλοϋδράργυρο, μια ιδιαίτεως τοξική ένωση που, όντας λιποδιαλυτή, έχει την ικανότητα να διαπερνά τις βιολογικές μεμβράνες και να συσσωρεύεται στα κύτταρα συμπλεκόμενο με απαραίτητες πρωτεΐνες, ένζυμα και νουκλεϊνικά οξέα. Πολλοί είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν τη μεθυλίωση: η διαθεσιμότητα ανόργανου υδραργύρου ( $Hg^{2+}$ ), η συγκέντρωση του οξυγόνου, το pH, το δυναμικό οξειδοαναγωγής, η παρουσία θεικών και θειούχων αλάτων, ο τύπος και η

συγκέντρωση των ανόργανων και οργανικών συμπλοκοποιητών, η αλκαλικότητα και η οργανική ύλη.[14,27]



Σχήμα 3 : ο κύκλος του υδράργυρου (<http://stepwilh.blogspot.gr/2010/06/global-mercury-cycle.html>)

## 2.3 Η ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΤΟΥ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ ΣΤΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΜΕΣΑ

### 2.3.1 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Η μεταφορά του υδράργυρου στην ατμόσφαιρα είναι γρήγορη σε σύγκριση με άλλες περιβαλλοντικές δεξαμενές, επιτρέποντας τον διασκορπισμό και την ανταλλαγή του στο παγκόσμιο περιβάλλον. Η κλίμακα του χρόνου για την ανάμιξη του υδράργυρου στην τροπόσφαιρα, είναι περίπου ένα χρόνο, και περιορίζεται κατά κύριο λόγο στην ανταλλαγή αέρα ανάμεσα στα δύο ημισφαίρια. Η μετρήσεις του επιφανειακού αέρα για τον ολικό αέριο υδράργυρο, δείχνει μικρή διακύμανση και υψηλότερες συγκεντρώσεις στο βόριο ημισφαίριο κατά 30%. [13,14,20,22]

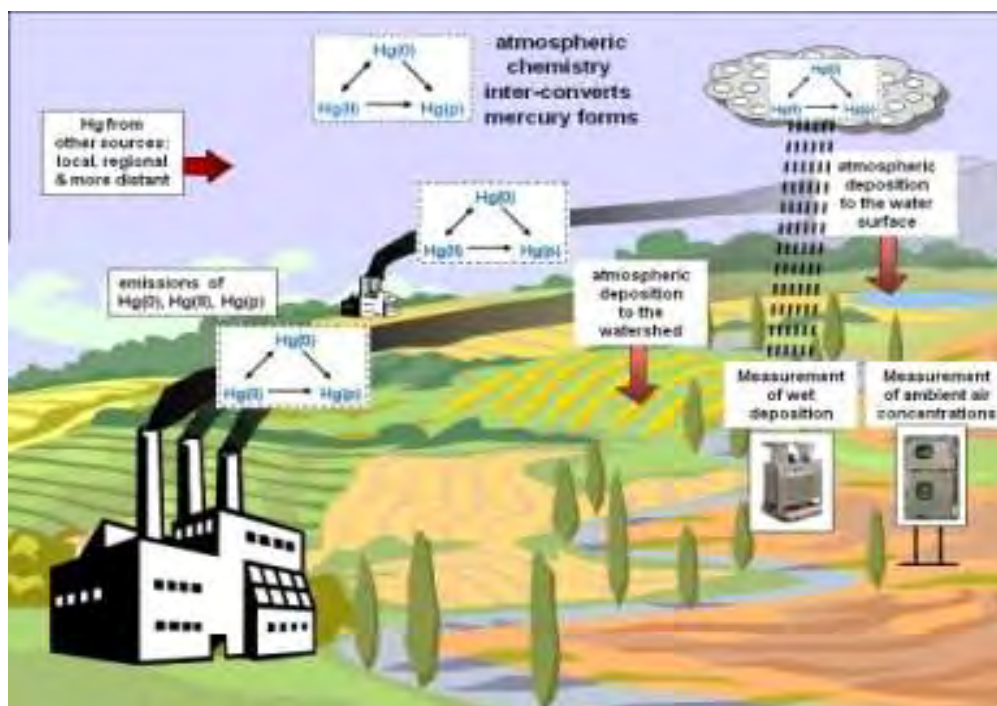
Η ατμόσφαιρα είναι η πιο σημαντική παροδική δεξαμενή για τις εκπομπές του υδράργυρου. Μόλις απελευθερωθεί, ο υδράργυρος αρχικά υφίσταται σε τρεις ανόργανους τύπους: 1) οι ατμοί του στοιχειώδους υδράργυρου  $\text{Hg}(0)$ , οι ανόργανες

δραστικές μορφές του υδράργυρου σε αέρια φάση (reactive gaseous mercury RGM, κυρίως Hg(II)) που αντιπροσωπεύει ένα μίγμα από αέριες υδραργυρικές ενώσεις, 3) και τέλος, τον σωματιδιακό υδράργυρο (PHg), που υποδηλώνει τα είδη του υδράργυρου, κυρίως τα δισθενή, που είναι δεσμευμένα σε αιωρούμενα σωματίδια. Ο RGM και ο PHg είναι λειτουργικά καθορισμένες μορφές υδράργυρου, των οποίων η χημική σύνθεση δεν είναι πλήρως κατανοητή αν και τα υδραργυρικά οξείδια και αλογονίδια είναι κυρίαρχα είδη. Περισσότερο από το 95% του υδράργυρου που υπάρχει στην ατμόσφαιρα βρίσκεται στη μορφή του στοιχειακού υδράργυρου εξαιτίας της σχετικά χαμηλής ταχύτητας εναπόθεσης και υψηλή πίεση ατμών σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι άλλες δύο μορφές συμβάλλουν σε ποσοστό μικρότερο από 5%, αν και οι συγκεντρώσεις τους μπορούν να αυξηθούν σημαντικά σε περιπτώσεις εξάντλησης των αποθεμάτων του ατμοσφαιρικού υδράργυρου. Η παρουσία μεθυλιωμένου υδράργυρου έχει επίσης παρατηρηθεί σε τοποθεσίες κοντά στις πηγές, όπως είναι οι χώροι υγειονομικής ταφής και η θαλάσσια συνοριακή στοιβάδα. Η παρουσία Hg(I) θεωρείται αμελητέα καθώς τείνει να μετατρέπεται σε στοιχειακό ή δισθενή υδράργυρο εξαιτίας της μεγάλης αστάθειας του. [13,14,20,22]

Στην ατμόσφαιρα ο υδράργυρος κατανέμεται μεταξύ αέριας, υγρής και στερεής φάσης. Στην αέρια φάση, οι χημικές διαδικασίες που κυριαρχούν είναι οι οξειδωτικές αντιδράσεις που μετατρέπουν τον Hg(0) σε RGM και PHg. Τα επικρατέστερα οξειδωτικά είναι το όζον, η υδροξυλομάδα, τα αντιδραστικά αλογόνα είδη, το υπεροξείδιο του υδρογόνου και η νιτρική ρίζα. Ο στοιχειακός υδράργυρος και ο RGM απορροφούνται στην ατμοσφαιρική σωματιδιακή ύλη. [13,14,20,22]

Μόλις οξειδωθεί, το 60% του ατμοσφαιρικού υδράργυρου εναποτίθεται στο έδαφος και το 40% στο νερό. Στα νερά των ωκεανών, αφού υποβληθεί σε μία σειρά από πολύπλοκες χημικές και βιολογικές μετατροπές, το μεγαλύτερο μέρος του Hg(II) γίνεται Hg<sup>0</sup> και επιστρέφει στην ατμόσφαιρα και μόνο ένα μικρό κλάσμα μένει μόνιμα στα πετρώματα. Έτσι, τα αποθέματα υδράργυρου στην ατμόσφαιρα και τα επιφανειακά θαλάσσια ύδατα είναι στενά συνδεδεμένα, σε ένα αποτελεσματικό κύκλο κατακρήμνισης/εξάτμισης που καθοδηγείται από οξειδωτικές/αναγωγικές αντιδράσεις. Στις λίμνες, οι κύριοι μηχανισμοί απώλειας υδράργυρου είναι η καθίζηση και η αέρια διαφυγή. Παρόμοιες διαδικασίες ισχύουν και στο έδαφος, οδηγώντας σε μικρότερη επιστροφή στην ατμόσφαιρα και μόνιμη ταφή στο χώμα. [13,14,20,22]





### 2.3.2 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΣΤΑ ΧΕΡΣΑΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑ

Η επιστροφή του υδράργυρου από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης, συμβαίνει κατά κύριο λόγο με την υγρή κατακρήμνιση διαλυμένου  $\text{Hg(II)}$ . Η απορρόφηση υδράργυρου στα αεροζόλ, όπως είναι η αιθάλη, προωθεί την εναπόθεση, ιδιαίτερα στο έδαφος όπου τα αεροζόλ είναι σε αφθονία. Επειδή ο στοιχειακός υδράργυρος οξειδώνεται σχετικά αργά στο  $\text{Hg(II)}$ , ο χρόνος παραμονής στην ατμόσφαιρα, είναι περίπου ένα χρόνο, επαρκές διάστημα για τον ατμοσφαιρικό υδράργυρο να διανεμηθεί σε ολόκληρο τον πλανήτη πριν επιστραφεί στο έδαφος, τις λίμνες, τη θάλασσα και τον πάγο. Συνεπώς, ενώ οι βασικές εκπομπές υδράργυρου συγκεντρώνονται σε βιομηχανικές περιοχές, η μόλυνση του είναι παγκόσμια, επηρεάζοντας και τις πιο απομακρυσμένες περιοχές του πλανήτη. [22,23]

Ο πρόσφατα τοποθετημένος υδράργυρος, φαίνεται ότι επαναπτητικοποιείται επιλεκτικά, σε ένα φαινόμενο που καλείται άμεση κυκλικότητα. Στοιχεία για αυτό το φαινόμενο έχουμε από το πείραμα METALICUS, που έγινε στον Ανατολικό Καναδά, τα οποία δείχνουν ότι ο προσφάτως τοποθετημένος υδράργυρος, έχει περισσότερες πιθανότητες για αναγωγή και μετέπειτα εκπομπή ως  $\text{Hg(0)}$ , από τον υδράργυρο που βρίσκεται ήδη στο σύστημα. [13]

Ισοτοπικές μετρήσεις, έδειξαν ότι οι καινούριες εναποθέσεις, πριν επανεξατμιστούν, σχετίζονται με τη βλάστηση. Στη χερσαία βλάστηση, ο υπέργειος υδράργυρος προέρχεται από την ατμόσφαιρα, ενώ στις ρίζες προέρχεται από το χώμα. Η μορφή  $\text{Hg(II)}$  εναποτίθεται στα φύλλα, μέσω κατακρήμνισης και ξηρής εναπόθεσης. Η



πρόσληψη  $\text{Hg}(0)$ , γίνεται στο εσωτερικό του φύλλου, μέσω ανταλλαγής αέρα στα στόματα.[5]

Το μεγαλύτερο μέρος του υδραργύρου στα χερσαία συστήματα, δηλαδή περισσότερο από 90%, διαμένει στο έδαφος και συνδέεται με οργανική ύλη και δεσμεύεται από ομάδες θείου. Μετρήσεις έχουν εκτιμήσει ότι το παγκόσμιο φορτίο υδραργύρου στο έδαφος είναι  $10^6$  Mg για τα πρώτα 15 εκατοστά εδάφους και ότι οι ανθρώπινες δραστηριότητες αυξάνουν αυτό το φορτίο κατά 15%. Ο απορροφημένος υδράργυρος παραμένει στο έδαφος, ενώ ο διαλυμένος μπορεί να μεθυλικοωθεί ή να καταλήξει σε λεκάνες απορροής. Οι παράγοντες που καθορίζουν την απορρόφηση και την εκρόφηση είναι ο τύπος του εδάφους και τα διαλυμένα είδη, όπως είναι  $\text{S}^-$ ,  $\text{Cl}^-$  και ο διαλυμένος οργανικός άνθρακας.[16,19]

Ο υδράργυρος επιστρέφει στην ατμόσφαιρα από το έδαφος μέσω αναγωγής σε  $\text{Hg}(0)$  και μετέπειτα διάχυση ή μαζική μεταφορά μέσω εδάφους. Οι συνολικές εκπομπές από το έδαφος, εκτιμώνται στα 1.700 Mg το χρόνο, με επιπρόσθετη συνεισφορά 600Mg το χρόνο από την καύση της βιομάζας. Η συνεισφορά από τη βλάστηση είναι ανάμεσα σε 1.400 με 3.200Mg το χρόνο.[23]

Η αναγωγή του υδραργύρου και η μετέπειτα εκπομπές από το έδαφος, θεωρούνται ως επί το πλείστον φυσικές διαδικασίες, αν και πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι η ειδογένεση και η εκπομπή υδραργύρου από το έδαφος, μπορεί να ελέγχεται από βιοτικές διαδικασίες. Τα αναγωγικά μέσα του υδραργύρου στο έδαφος μπορεί να είναι είδη όπως,  $\text{Fe}^{2+}$  και χουμικές και φουλβικές ενώσεις. Οι διαδικασίες αυτές ενισχύονται από την θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία. Σε μερικά ξηρά οικοσυστήματα, η αυξημένη υγρασία προωθεί την εξάτμιση.[24,25]

Ο υδράργυρος, μπορεί επίσης να απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα όταν η οργανική ύλη στην οποία είναι προσκολλημένος καίγεται. Οι εκπομπές από την καύση της βιομάζας υπολογίζονται στα  $670 \pm 330$  Mg το χρόνο.[20]

### 2.3.3. ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΣΤΟ ΝΕΡΟ

Οι ανησυχίες του ανθρώπου για τον υδράργυρο είναι μεγάλες εξαιτίας των κινδύνων από τη μόλυνση με μεθυλο-υδράργυρο. Το κύριο μονοπάτι έκθεσης του ανθρώπου στον μέθυλο-υδράργυρο είναι η διατροφική αλυσίδα και κυρίως τα μολυσμένα ψάρια. Για το λόγο αυτό η κατανόηση του κύκλου στα υδάτινα συστήματα είναι απαραίτητη για την ανάλυση κινδύνου. Και τα γλυκά ύδατα και τα θαλάσσια προκαλούν ανησυχία, αν και ο κύκλος του υδραργύρου διαφέρει στα δύο αυτά περιβάλλοντα.[22]

Τα φυσικά νερά είναι συνήθως υπερκορεσμένα σε υδράργυρο σε σύγκριση με τον από πάνω αέρα και έτσι η πτητικοποίηση έχει ως αποτέλεσμα μία ροή υδραργύρου από το νερό στην ατμόσφαιρα. Ο υπερκορεσμός είναι μέγιστος κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, όταν η φωτοαναγωγή του υδραργύρου στα επιφανειακά νερά είναι στο ψηλότερο σημείο της. Στην ατμόσφαιρα, όπου περίπου το 95% του συνολικού υδραργύρου είναι στην στοιχειακή μορφή, οξειδώνεται αργά σε  $\text{Hg}(\text{II})$ . Το μεγαλύτερο

μέρος της οξείδωσης γίνεται στο σημείο επαφής νερού-ξηράς, στις σταγόνες και την ομίχλη. Το όζον είναι πιθανόν ο κύριος οξειδωτής της διαδικασίας, με το  $\text{HClO}$ ,  $\text{HSO}_3$  και  $\text{OH}$  να είναι επίσης σημαντικά.[7]

Περισσότερο από 97% του διαλυμένου, αέριου υδράργυρου που βρίσκεται στα επιφανειακά νερά, είναι μεταλλικός υδράργυρος. Οι πτητικές μορφές αναμένεται να εξατμίζονται στην ατμόσφαιρα, ενώ οι στερεές μορφές να οδηγούνται προς τα ιζήματα. Η εξατμίσση από το έδαφος, ελέγχεται από τη θερμοκρασία, με τις εκπομπές από τη μολυσμένη γη να είναι μεγαλύτερες όταν ο καιρός είναι ζεστός και η μικροβιακή μείωση του  $\text{Hg}^{2+}$  σε πιο πτητική μορφή είναι μέγιστη.[22,25]

### **2.3.3.1 Ο ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΣ ΣΤΑ ΓΛΥΚΑ ΥΔΑΤΑ**

Σε περιοχές, μακριά από τις πηγές, ο ατμοσφαιρικός υδράργυρος φτάνει στα γλυκά ύδατα με απευθείας απόθεση στην επιφάνεια των λιμνών και μέσω απορροών από λεκάνες. Η υγρή και ξηρή εναπόθεση στις λεκάνες απορροής και την επιφάνεια των λιμνών, όπως και χερσαία συστήματα, έτσι κι εδώ, επικρατεί για τον  $\text{Hg(II)}$ . Η μορφή αυτή μπορεί να μετατραπεί σε  $\text{Hg(0)}$  που στη συνέχεια εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα. Ένα του  $\text{Hg(II)}$  μετατρέπεται στην πιο τοξική μορφή του μεθυλο-υδραργύρου  $\text{CH}_3\text{Hg}$ . Η μεθυλίωση του υδραργύρου, είναι μία βιολογική διαδικασία που διευκολύνεται από μερικά θειικά και σιδηροαναγωγικά βακτήρια. Οι υγρότοποι και τα πετρώματα των λιμνών είναι σημαντικά περιβάλλοντα για τη μεθυλίωση. Ο μεθυλο-υδράργυρος, μπορεί να βιοσυσσωρευτεί σε ζωντανούς οργανισμούς και στη συνέχεια να βιομεγεθυνθεί στην τροφική αλυσίδα, καθώς τα αρπακτικά ζώα τρώνε μολυσμένη λεία.[20,22,23]

Στα υδάτινα πετρώματα, τα μικρόβια μετατρέπουν ένα μικρό μέρος του ανόργανου υδράργυρου  $\text{Hg(II)}$  σε μεθυλιδράργυρο. Το θείο, ο οργανικός υδράργυρος, η δομή των πετρωμάτων και η σύνθεση, επηρεάζουν την παραγωγή  $\text{CH}_3\text{Hg}$ , μεταβάλλοντας βιοδιαθεσιμότητα του ανόργανου υδράργυρου και διεγείροντας την μικροβιακή δραστηριότητα. Στα παράκτια πετρώματα, τα θειικά βακτήρια είναι ο κύριος παράγοντας για την παραγωγή μεθυλιδραργύρου. Αυτά τα μικρόβια αναπτύσσονται στη γεωχημική επιφάνεια, ανάμεσα σε οξικές και ανοξικές συνθήκες. Μια σειρά από περιβαλλοντικούς παράγοντες, επηρεάζουν το επίπεδο σχηματισμού του  $\text{CH}_3\text{Hg}$ , επιδρώντας στην παροχή  $\text{Hg(II)}$ , και στη δραστηριότητα των μικροβίων. Πέραν του  $\text{Hg(II)}$ , δείκτες για την παραγωγή μεθυλιδραργύρου είναι οι συγκεντρώσεις θείου, ο συνολικός οργανικός άνθρακας και το οξειδοαναγωγικό δυναμικό. Η παραγωγή του έχει επίσης παρατηρηθεί σε υδάτινες στήλες σε λίμνες και σε ανοξικά παράκτια ύδατα.[20,22]

### **2.3.3.2 Ο ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΣ ΣΤΑ ΘΑΛΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**

Οι μορφές του υδραργύρου στους ωκεανούς είναι ο στοιχειακός υδράργυρος, ο ανόργανος υδράργυρος, ο μεθυλδράργυρος, ο διμεθυλδρράργυρος και ο σωματιδιακός και κολλοειδής υδράργυρος. Οι συγκεντρώσεις του συνολικού υδραργύρου διαφέρουν στους παγκόσμιους ωκεανούς. Η μέση συγκέντρωση είναι περίπου 1,5 pikoMolar (pM) αν και έχουν παρατηρηθεί υψηλότερες συγκεντρώσεις στη Μεσόγειο και τον Βόρειο Ατλαντικό και χαμηλότερες στον Ειρηνικό. Πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι οι συγκεντρώσεις στις περισσότερες ωκεάνιες λεκάνες δεν είναι σταθερές και πιθανόν να συνεχίσουν να αυξάνονται τις επόμενες δεκαετίες. [6,7,14]

Ένα σημαντικό θέμα στη βιβλιογραφία είναι οι διαφορετικές διαδικασίες μεθυλίωσης και οι τοποθετήσεις στους ωκεανούς. Ιστορικά, τα είδη του υδραργύρου ήταν δύσκολο να μετρηθούν λόγω αναλυτικών περιορισμών. Οι αναφερόμενες συγκεντρώσεις του μεθυλο-υδραργύρου κυμαίνονται μεταξύ 2 με 35% του συνολικού υδραργύρου στους ωκεανούς. [6]

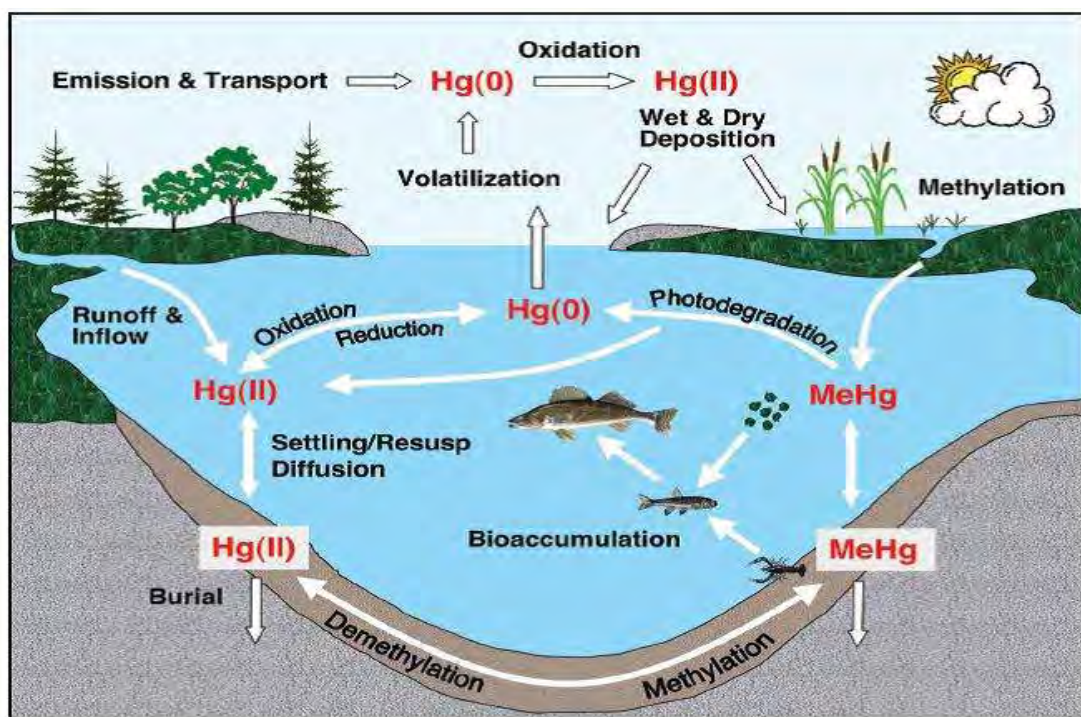
Η ανταλλαγή υδραργύρου στην επιφάνεια του ωκεανού είναι γρήγορη και επεκτείνει τη διάρκεια ζωής του. Ο Hg(II) μπορεί να τοποθετηθεί στους ωκεανούς με υγρή και ξηρή εναπόθεση και ο Hg(0) με ξηρή. Ο Hg(II) μπορεί να μετατραπεί σε Hg(0) και να απορροφηθεί από τα σωματίδια ή να μεθυλιωθεί. Η αναγωγή του Hg(II) σε Hg(0) μπορεί να είναι βιολογική ή φωτοχημική και οξειδωτικές διαδικασίες μπορεί να είναι επίσης σημαντικές. [7]

Ο υδράργυρος τόσο από φυσικές, όσο και από ανθρωπογενείς πηγές εισέρχεται στο θαλάσσιο περιβάλλον είτε από την ατμόσφαιρα, είτε από τους ποταμούς. Στα νερά των ποταμών, ο υδράργυρος ενώνεται με σωματιδιακή ύλη οργανικής ή ανόργανης προελεύσεως και ευρέως φάσματος μεγεθών, με ιδιαίτερη προτίμηση στα πολύ μικρά σωματίδια. Τα σωματίδια αυτά έχουν δυσανάλογο του βάρους τους ρόλο, δεδομένου ότι η ικανότητα που έχουν να δεσμεύουν υδράργυρο είναι ανάλογη της ενεργού επιφάνειάς τους. Τα σωματίδια πλούσια σε υδράργυρο που εισέρχονται στο θαλάσσιο περιβάλλον σχηματίζουν διαλυτά τετραχλωροσύνπλοκα με αποτέλεσμα την αποβολή του υδραργύρου που προσροφήθηκε σε ποσοστό περίπου 90%. Διευκρινίζεται ότι η αποπροσρόφηση παρατηρείται κατά κύριο λόγο σε ανόργανα σωματίδια όπως στις αργίλους, ενώ ο οργανικά ενωμένος υδράργυρος συνήθως διατηρείται υπό μορφή σταθερών συμπλόκων, τα οποία ακολουθούν διαφορετική πορεία από τα ανόργανα σύνπλοκα ανάλογα πάντα με τις συνθήκες που επικρατούν. Η βιομεθυλίωση του υδραργύρου λαμβάνει χώρα ως διεργασία αποτοξίνωσης των μικροοργανισμών που καταναλώνουν κατά κύριο λόγο οργανική ύλη και συμπτωματικά έρχονται σε επαφή με ιόντα υδραργύρου. Όταν η οργανική σωματιδιακή ύλη καταβυθιστεί, συμπαρασύρει και σημαντικές ποσότητες υδραργύρου στα ιζήματα των παράκτιων κυρίως περιοχών. Όταν στα ιζήματα αυτά αναπτυχθούν αναερόβιες συνθήκες κατά τη διάσπαση της οργανικής ύλης, σχηματίζεται θειούχος υδράργυρος, ο οποίος παραμένει δεσμευμένος. Εάν στην παράκτια ζώνη απορρίπτονται απόβλητα τα οποία είναι πλούσια σε μεθυλδράργυρο, ή σε περίπτωση που ιζήματα τα οποία είναι πλούσια σε οργανικές ενώσεις υδραργύρου εκτίθενται παροδικά σε μεγάλες συγκεντρώσεις οξυγόνου (γεγονός το οποίο λαμβάνει χώρα σε ζώνες ισχυρής παλίρροιας), τότε στους θαλάσσιους οργανισμούς παρατηρούνται υψηλά επίπεδα μεθυλδραργύρου (>10 ppm). Ο υδράργυρος που φτάνει το ανώτερο στρώμα αναμίξεως των ανοιχτών ωκεανών, αφομοιώνεται σταδιακά από τους διάφορους οργανισμούς, με τα προϊόντα αποσυνθέσεως ή μεταβολισμού των οποίων μετακινείται κάθετα προς τα βαθύτερα στρώματα της υδατικής στήλης. Από εκεί, είτε συνδέεται με διάφορα αυθυγενή ορυκτά και παραμένει στις αποθέσεις των

πυθμένων, είτε μεταφέρεται σε διαλυτή μορφή και ακολουθεί την κίνηση των ανοδικών ρευμάτων, με αποτέλεσμα να φθάσει πάλι στα επιφανειακά στρώματα. Όσον αφορά τις πτητικές μορφές του υδραργύρου, όπως είναι ο στοιχειακός ή ο διμεθυλυδράργυρος, αυτές απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα. Ο τελευταίος παρουσιάζει ιδιαίτερη αστάθεια στην υπεριώδη ακτινοβολία και διασπάται σε στοιχειακό υδράργυρο, ενώ σε περίπτωση που βρεθεί σε όξινο περιβάλλον μετατρέπεται σε υδατοδιαλυτό μονομεθυλυδράργυρο. Και οι δύο προαναφερθείσες μορφές, με την απόπλυση της ατμόσφαιρας, μεταφέρονται μέσω της βροχής στη θάλασσα. [6,7,22,23]

Μία εκτίμηση της συσσωρευτικής δράσης των ιστορικών ανθρωπογενών εκπομπών από τον προηγούμενο αιώνα, δείχνει μία αύξηση στην συγκέντρωση υδράργυρου στην επιφάνεια του ωκεανού και στα νερά κάτω από την επιφάνεια. Σε αντίθεση, η επίδραση των ιστορικών εκπομπών στα βάθη των ωκεανών είναι μικρή και περιορισμένη στα προσφάτως σχηματισμένα νερά.[6]

Περισσότερο από 80% του υδράργυρου που εναποτίθεται στα θαλάσσια οικοσυστήματα επανεκπέμπεται στην ατμόσφαιρα, αυξάνοντας το χρόνο παραμονής του υδραργυρικού κύκλου στις δεξαμενές τις βιόσφαιρας.[22]



Σχήμα 4 : Ο κύκλος του υδράργυρου στο νερό  
[\(https://11and4tht.wordpress.com/2013/11/14/mercury-in-fish-a-pictorial-description-of-the-mercury-cycle-in-lakes/\)](https://11and4tht.wordpress.com/2013/11/14/mercury-in-fish-a-pictorial-description-of-the-mercury-cycle-in-lakes/)

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΣΕ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**

### **3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η τοξικότητα του υδράργυρου εξαρτάται από τη χημική μορφή του κι επομένως τα συμπτώματα από την έκθεση διαφέρουν ανάλογα με την περίπτωση. Η πηγή της έκθεσης είναι επίσης σημαντικά διαφορετική για τις μορφές του υδράργυρου. Για τις αλκυλο-υδραργυρικές ενώσεις, από τις οποίες πιο σημαντική είναι ο μεθυλδράργυρος, η πιο σημαντική πηγή έκθεσης είναι η διατροφή και συγκεκριμένα τα ψάρια και τα θαλασσινά. Για τους ατμούς του στοιχειακού υδράργυρου, η πιο σημαντική πηγή στο γενικό πληθυσμό είναι τα οδοντιατρικά αμαλγάματα, αλλά η έκθεση στο χώρο εργασίας σε πολλές περιπτώσεις την υπερβαίνει. Για τις ενώσεις ανόργανου υδράργυρου, η διατροφή είναι η πιο σημαντική πηγή για την πλειοψηφία των ανθρώπων. [18]

Η παρατεταμένη έκθεση σε σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις υδραργύρου στον αέρα μπορεί να προκαλέσει βλάβη στο νευρικό σύστημα και τα νεφρά, αλλά σπάνια προκαλεί τον θάνατο. Ωστόσο, έχουν αναφερθεί θανατηφόρα συμβάντα μετά από τυχαία έκθεση. Η εισπνοή μέτριων ποσοτήτων υδραργύρου για μεγάλα χρονικά διαστήματα μπορεί να προκαλέσει επίσης προβλήματα στο ΚΝΣ και τα νεφρά. Η χημική μορφή του υδραργύρου είναι σημαντική για τον προσδιορισμό της πραγματικής τοξικής του επίδρασης. Για παράδειγμα, ο στοιχειακός υδράργυρος και ο ανλργανος υδράργυρος δεν διαπερνούν τον αιματοεγκεφαλικό φραγμό συνεπώς έχουν περιορισμένη δράση στον εγκέφαλο αλλά επιδρούν άμεσα στα νεφρά και το γαστρεντερικό σύστημα αντίστοιχα. Αντίθετα, οι οργανικές μορφές του υδραργύρου, διαπερνούν εύκολα τον

αιμοτοεγκεφαλικό φραγμό και μπορούν να προκαλέσουν εκτός από νεφρική και εγκεφαλική βλάβη. [22,23]

Η έκθεση γίνεται άμεσα μέσω της εισπνοής ατμών, ή έμμεσα από την βρώση ψαριών μολυσμένων με υδράργυρο. Ο μεθυλϋδράργυρος είναι αρκετά πιο επικίνδυνος από τον ανόργανο και τις μεταλλικές του μορφές. Οι χαμηλές συγκεντρώσεις υδραργύρου φαίνεται πως δεν έχουν επιπτώσεις στην υγεία. Έτσι τα σημάδια της τοξικότητας γίνονται αισθητά με τη διαρκή έκθεση σε αυτόν. Υπάρχει μια περίοδος λανθάνουσας κατάστασης μεταξύ της έκθεσης στον υδράργυρο και της εμφάνισης των κλινικών εκδηλώσεων της δηλητηρίασης. Η καθυστέρηση αυτή, οδηγεί στην μη έγκαιρη διάγνωση της βλάβης, και την καθυστερημένη ως εκ τούτου, εφαρμογή της θεραπείας. Η επακριβής δόση των ανόργανων ενώσεων του υδραργύρου που προκαλεί δηλητηρίαση δεν είναι γνωστή, οι δε αναφερόμενες τοξικές δόσεις από τους διάφορους συγγραφείς διαφέρουν σημαντικά. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, προτείνεται σαν ανεκτή εβδομαδιαία πρόσληψη τα 0,3μg Hg ανά άτομο από τα οποία μόνο τα 0,02μg μπορούν να είναι μεθυλικός υδράργυρος ή πρόσληψη 0,005μg ολικού υδραργύρου/kgg σωματικού βάρους την εβδομάδα, από τα οποία τα 0,0033μg/kgg σωματικού βάρους μπορεί να είναι μεθυλϋδράργυρος. Γενικά τα άλατα του Hg<sup>2+</sup> είναι κατά πολύ τοξικότερα αυτών του Hg<sup>+</sup>. Ο διχλωριούχος υδράργυρος (καλομέλας) σε δόση 0,15-0,20g μπορεί να προκαλέσει οξεία δηλητηρίαση και σε δόση 1g να επιφέρει το θάνατο. Ο ιωδιούχος υδράργυρος είναι τοξικός στις ίδιες περίπου δόσεις με το διχλωριούχο. Αντίθετα, ο χλωριούχος υφϋδράργυρος (Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>) ενεργεί τοξικά σε μεγάλες δόσεις, έτσι ώστε η ποσότητα που μπορεί να προκαλέσει το θάνατο να υπολογίζεται σε 10-15g. Η LD<sub>50</sub> (μέση θανατηφόρος δόση) του κυανιούχου υδραργύρου έχει υπολογισθεί σε 0,15-0,20g (λήψη από το στόμα). [12,18,23,32]

### 3.2. ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ ΣΤΟΝ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟ

Η έκθεση στον υδράργυρο σχετίζεται με πάνω από 250 συμπτώματα γι' αυτό και είναι δύσκολη και είναι δύσκολη η ακριβής διάγνωση. Η διαφορική διάγνωση ξεκινά με το ιστορικό του ασθενούς και τη συσχέτιση του με έκθεση στον υδράργυρο. Οι εργαστηριακές εξετάσεις, συνήθως περιλαμβάνουν ανάλυση αίματος, ανάλυση ούρων, ανάλυση μαλλιών και βιοψία ιστών. Επειδή ο υδράργυρος απομακρύνεται γρήγορα από το αίμα, κατανέμεται και απομονώνεται σε διαφορετικούς ιστούς, δεν υπάρχει ακριβής συσχέτιση ανάμεσα στα επίπεδα υδράργυρου στο αίμα και της σοβαρότητας της μόλυνσης. Αμέσως μετά την είσοδο του στο σώμα, δεσμεύεται στον εγκέφαλο, στην σπονδυλική στήλη, στα γάγγλια και τους περιφερειακούς κινητικούς νευρώνες. Παρ' όλα αυτά, αν και το νευρικό σύστημα είναι η πρώτη αποθήκη για τον υδράργυρο, η παροδικότητα και η κατανομή του, έχουν σαν αποτέλεσμα την πιθανή εμφάνιση συμπτωμάτων σε διάφορα όργανα. Έρευνες έχουν δείξει ότι το γενετικό υπόβαθρο του ατόμου, ίσως παίζει ρόλο στην τοξικοκινητική του υδράργυρου.[12]

### 3.3. ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΠΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΚΘΕΣΗ ΣΕ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟ

#### 3.3.1 ΕΠΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΜΕΘΥΛΥΔΡΑΡΓΥΡΟ

Από τις οργανικές ενώσεις του υδράργυρου, ο μεθυλδράργυρος κατέχει την πιο σημαντική θέση, εξαιτίας της τοξικότητά του. Ο μεθυλδράργυρος συσσωρεύεται στην υδάτινη αλυσίδα τροφίμων. Οι άνθρωποι εκτίθενται κυρίως μέσω της κατανάλωσης ψαριών. Μεγάλης κλίμακας δηλητηριάσεις από τον υδράργυρο έστρεψαν το ενδιαφέρον των επιστημόνων στους κινδύνους του μεθυλδράργυρου. Στην Μινιμάτα της Ιαπωνίας, το 1950, άνθρωποι οι οποίοι κατανάλωσαν μολυσμένα ψάρια από μεθυλδράργυρο, παρουσίασαν νευρολογικές διαταραχές και συγκεκριμένα οπτικές, ακουστικές και αισθητηριακές ζημιές, μούδιασμα και δυσκολία στο περπάτημα. Όσοι εκτέθηκαν ενδομήτρια, παρουσίασαν πιο σοβαρά προβλήματα, όπως διανοητική καθυστέρηση, εγκεφαλική παράλυση, τύφλωση και κώφωση. Στο Ιράκ, το 1970, άνθρωποι εκτέθηκαν σε υψηλά επίπεδα μεθυλδράργυρου, τρώγοντας ψωμί φτιαγμένο με σιτηρά στα οποία είχαν χορηγηθεί μυκητοκτόνα που περιείχαν υδράργυρο. Τα συμπτώματα που παρουσιάστηκαν ήταν μούδιασμα, προβλήματα στην όραση, την ομιλία και την ακοή, καθώς επίσης και θάνατοι ενηλίκων και σοβαρά νευρολογικά προβλήματα στους απογόνους εγκύων γυναικών. [6,8]

Η ημιπερίοδος ζωής των ενώσεων του  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  στον άνθρωπο είναι περίπου 70 ημέρες και είναι πολύ μεγαλύτερη απ' αυτή των αλάτων του  $\text{Hg}^{2+}$  (ο βιολογικός χρόνος ημιζωής των ανόργανων ενώσεων του Hg ανέρχεται σε 40-60 ημέρες). Συνεπώς, ο  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  μπορεί να συσσωρεύεται στο σώμα σε μια πολύ υψηλότερη μόνιμη συγκέντρωση, ακόμη και αν ένα άτομο καταναλώνει σε καθημερινή βάση δόσεις που η κάθε μία ανεξάρτητα δεν θα ήταν επικίνδυνη. [6,7,8,11]

Οι οργανικές ενώσεις υδραργύρου απορροφώνται σχεδόν πλήρως από το γαστρεντερικό. Ο μεθυλδράργυρος σε ποσοστό περίπου (90-95)%, ενώ σε μικρότερο ποσοστό απορροφάται ο φαινυλδράργυρος. Ο μεθυλδράργυρος βρίσκεται σε υψηλότερες συγκεντρώσεις στο αίμα και τον εγκέφαλο από ότι οι ανόργανες ενώσεις του Hg. Μαζί με τον στοιχειακό υδράργυρο προκαλούν βλάβες στο ΚΝΣ, αλλοιώσεις στον αιματοεγκεφαλικό φραγμό, εξαγγείωση των πρωτεϊνών του πλάσματος, καθώς επίσης και εκφυλιστικές αλλοιώσεις των αισθητικών νεύρων σε μεγαλύτερο βαθμό από αυτές των κινητικών, πιθανόν λόγω διαταραχής του κυτταρικού μεταβολισμού. Εκτός όμως από την ανωμαλία του ΚΝΣ και τη βλάβη στις εγκεφαλικές λειτουργίες, η παρουσία Hg στον οργανισμό είναι υπεύθυνη, για βλάβη στο DNA και χρωμοσωμικές ανωμαλίες, αλλεργικές αντιδράσεις, αρνητικές επιδράσεις στην αναπαραγωγή, όπως βλάβη του σπέρματος, γενετικές ανωμαλίες και αποβολές. Η κυρία οδός απέκκρισης του μεθυλδραργύρου είναι η χολή, μέσω της οποίας μεταφέρεται στο έντερο, σημείο από το οποίο και επαναπορροφάται, σχεδόν εξ ολοκλήρου, μέσω της εντεροηπατικής κυκλοφορίας. [6,7,8,11,18]

### 3.3.2. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΣΤΟΙΧΕΙΑΚΟ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟ

Η εισπνοή είναι η βασική οδός έκθεσης στον στοιχειακό υδράργυρο, με τη μορφή υδραργυρικών ατμών. Οι εισπνεόμενοι ατμοί, άμεσα απορροφούνται σε ποσοστό περίπου 80% στους πνεύμονες και γρήγορα διαλύονται στο αίμα και κατανέμονται σε όλα τα όργανα του σώματος. Κατακρατείται, πρωτίστως στα νεφρά και το νευρικό ιστό, και έπειτα στο ήπαρ και στην καρδιά. Μετά από κάποιο διάστημα, το μεγαλύτερο ποσοστό του φορτίου του υδράργυρου βρίσκεται στα νεφρά, όπως συμβαίνει και με την κατάποση ανόργανων ενώσεων του υδράργυρου. Τα ούρα και τα κόπρανα είναι οι βασικοί τρόποι εξόδου από τον οργανισμό, αν και μικρή ποσότητα επίσης αποβάλλεται από την αναπνοή, τον ιδρώτα και τη σίελο. Η απέκκριση του μεταλλικού υδράργυρου αρχικά είναι γρήγορη και στη συνέχεια πιο αργή. Ο βιολογικός χρόνος ημιζωής του υδράργυρου στον οργανισμό υπολογίζεται περίπου 30 με 60 ημέρες. Στον εγκέφαλο είναι περίπου 20 χρόνια. Ο στοιχειώδης υδράργυρος δεσμεύεται στον εγκέφαλο από το σελήνιο μετά την οξείδωσή του, το οποίο ίσως συμβάλλει στο να παραμένει για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Ο στοιχειακός υδράργυρος από κατάποση, δύσκολα απορροφάται στον γαστρεντερικό σωλήνα, σε ποσοστό μικρότερο του 0,01% της προσλαμβανόμενης δόσης. Σε περίπτωση ακούσιας κατάποσης, όπως για παράδειγμα από θραύση θερμομέτρου, η τοξικότητα είναι σπάνια και γενικά δεν αναμένεται, όμως μπορεί να επηρεαστεί ο βλεννογόνος του σωλήνα. Η δερματική απορρόφηση επίσης είναι περιορισμένη.

Στον άνθρωπο, τα αναπνευστικά προβλήματα είναι τα πιο συχνά που εμφανίζονται μετά από μια οξεία και μεγάλης διάρκειας έκθεση, σε υψηλά επίπεδα ατμών υδράργυρου. Κύρια χαρακτηριστικά είναι ο βήχας, η δύσπνοια, το σφίξιμο και το κάψιμο στο στήθος. Ακτινογραφίες έχουν δείξει διάχυτες διηθήσεις και πνευμονία. Η πνευμονική λειτουργία επίσης μπορεί να επηρεαστεί. Απόφραξη των αεραγωγών και περιορισμένη ζωτική χωρητικότητα έχουν σημειωθεί. Σε πιο σοβαρές περιπτώσεις, αναπνευστική δυσφορία, πνευμονικό οίδημα, λοβώδης πνευμονία, ίνωση και απολέπιση του βρογχικού επιθηλίου έχουν παρατηρηθεί. Σε αρκετές περιπτώσεις ο ασθενής καταλήγει σε θάνατο.

Η τυχαία έκθεση σε υψηλή συγκέντρωση υδράργυρου αλλά και η μακροχρόνια έκθεση, έχει αποδειχτεί ότι προκαλεί αρνητικές επιδράσεις στις γνωστικές, αισθητήριες και τις κινητικές λειτουργίες. Σε γενικές γραμμές τα συμπτώματα υποχωρούν μετά την απομάκρυνση από την πηγή έκθεσης. Όμως, επίμονα συμπτώματα, όπως τρέμουλο και γνωστικά ελλείμματα έχουν παρατηρηθεί, ακόμα και 30 χρόνια μετά την έκθεση. [12, 18]

### 3.3.3. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΑΝΟΡΓΑΝΟ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟ

Ο βιολογικός χρόνος ημιζωής των ανόργανων ενώσεων του Hg ανέρχεται σε 40-60 ημέρες. Η χρόνια δηλητηρίαση με ατμούς υδραργύρου είναι ουσιαστικά ισοδύναμη με την αντίστοιχη δηλητηρίαση από τις οργανοϋδραργυρικές ενώσεις. Τα ιόντα Hg



δεσμεύουν τις σουλφυδρυλικές, τις φωσφορικές, τις καρβοξυλικές, τις αμιδικές, και τις αμινομάδες των ενζύμων και πρωτεϊνών. Προκαλούν καθίζηση των πρωτεϊνών των κυττάρων και αναστολή της ενζυμικής δραστηριότητας διαφόρων ενζυμικών συστημάτων όπως των μιτοχονδρίων και των μικροσωματιδίων, οδηγώντας έτσι το κύτταρο σε νέκρωση. Τα ιόντα  $Hg^{+}$  οξειδώνονται προς  $Hg^{+2}$  τα οποία έχουν την τάση να ενώνονται με σουλφυδρυλικές ομάδες (-SH) που βρίσκονται σε πρωτεΐνες και ένζυμα. Έτσι, κατανέμονται κυρίως σε όργανα εμπλουτισμένα με τις ουσίες αυτές, όπως τα νεφρά, το ήπαρ, το σπλήν και τον εγκέφαλο. Οι ενώσεις  $Hg$  δεν δρουν εκλεκτικά σε ορισμένα ένζυμα. Στόχο της δράσης τους αποτελεί η κυτταρική μεμβράνη, λόγω των σουλφυδρυλομάδων που συμμετέχουν στη δομή της. Η επίδραση του  $Hg$  στο σύστημα  $Na^{+}$  - $K^{+}$  -ΑΤΡασης προκαλεί μεταβολές στην εξωκυττάριο και ενδοκυττάριο συγκέντρωση των ιόντων.

Περίπου 7 με 15% της προσλαμβανόμενης ποσότητας ανόργανου υδράργυρου απορροφάται από το πεπτικό σύστημα. Η δερματική απορρόφηση πετυχαίνεται μέσω της εφαρμογής στο δέρμα προϊόντος που περιέχει ανόργανα άλατα ή μπορεί να γίνει μέσω του ιδρώτα, των σμηγματογόνων αδένων και των θυλάκων των τριχών. Τα υδραργυρικά άλατα είναι συνήθως μη πτητικά γι' αυτό και η εισπνοή τους είναι σπάνια. Τα υδραργυρούχα χλωρίδια, απορροφούνται πιο αργά λόγω της χαμηλής διαλυτότητά τους, σε σχέση με τα υδραργυρικά. Η κατανομή του ιστού και στις δύο ενώσεις εμφανίζεται παρόμοια.

Τα ανόργανα υδραργυρικά άλατα δεν είναι λιποδιαλυτά. Ως εκ τούτου δεν διαπερνούν εύκολα τον αιματοεγκεφαλικό φραγμό και τον πλακούντα. Αποβάλλονται από το σώμα μέσω των ούρων και των κοπράνων. Το ποσοστό αποβολής είναι διφασικό και δοσοεξαρτώμενο, με μία αρχικά γρήγορη φάση αποβολής που ακολουθείται από μία πιο αργή.

Η τοξικότητα των υδραργυρικών αλάτων εξαρτάται από την διαλυτότητά τους. Η έκθεση σε υδραργυρικά άλατα από στόματος, προκαλεί πιο οξεία προβλήματα σε σχέση με το μεταλλικό υδράργυρο. Σχεδόν 1 με 4 γραμμάρια υδραργυρικών χλωριδίων είναι θανατηφόρα για έναν ενήλικα. Τα υδραργυρικά άλατα είναι πιο διαβρωτικά και ενισχύουν την γαστρεντερική διαπερατότητα και απορρόφηση. Μία οξεία έκθεση σε υψηλή δόση, αρχικά προκαλεί κάψιμο στο στήθος, αποχρωματισμό του βλεννογόνου και σοβαρά γαστρεντερικά συμπτώματα, στοματίτιδα και διαταραγμένη νεφρική λειτουργία. Τα υδραργυρικά άλατα είναι γενικά ερεθιστικά για το δέρμα και προκαλούν δερματίτιδες, αποχρωματισμό των νυχιών και χημικά εγκαύματα.

Η χρόνια δηλητηρίαση από ανόργανες ενώσεις υδράργυρου είναι σπάνια και συμβαίνει μόνο με καθαρές μορφές ανόργανων αλάτων. Το όργανο που κυρίως επηρεάζεται είναι τα νεφρά και τα κλινικά συμπτώματα της δηλητηρίασης είναι η πολουρία και η πρωτεϊνουρία, που σε σοβαρές περιπτώσεις μπορεί να εξελιχθούν σε νεφρικό σύνδρομο με αιματουρία και ανουρία. [13, 18, 22, 23]

### **3.3.4. ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ**

### **3.3.4.1. ΚΥΤΤΑΡΑ**

Σε κυτταρικό επίπεδο, η έκθεση σε υδράργυρο σχετίζεται με αλλοιώσεις στην διαπερατότητα των μεμβρανών, αλλαγές στην μακρομοριακή δομή και καταστροφή του DNA. Ο υδράργυρος επίσης φαίνεται να προκαλεί οξειδωτικό στρες και μιτοχονδριακή δυσλειτουργία, που μπορεί να οδηγήσουν σε μεταβολή στην ομοιόσταση του ασβεστίου και αυξημένη λιπιδική υπεροξείδωση.[12,13,18,26,33]

### **3.3.4.2. ΚΑΡΔΙΑ-ΑΙΜΑ-ΠΝΕΥΜΟΝΕΣ**

Η συσσώρευση του υδραργύρου στην καρδιά, θεωρείται ότι συμβάλει στην καρδιομυοπάθεια. Πράγματι, στους ιστούς της καρδιάς ατόμων που πέθαναν από ιδιοπαθή διατακτική καρδιοπάθεια, βρέθηκαν επίπεδα υδραργύρου, περίπου 22.000 φορές μεγαλύτερα σε σχέση με άτομα που πέθαναν από άλλες μορφές καρδιαγγειακών παθήσεων. Η δηλητηρίαση από υδράργυρο, μπορεί επίσης να προκαλέσει πόνο στο στήθος ή στηθάγχη, ιδιαίτερα σε άτομα κάτω των 45 ετών. Υπάρχουν επίσης, ενδείξεις που σχετίζουν τον υδράργυρο με την αναιμία, καθώς ανταγωνίζεται το σίδηρο για τη δέσμευση με την αιμοσφαιρίνη, οδηγώντας σε διαταραγμένο σχηματισμό. Μαζί με την αναιμία, στοιχεία δείχνουν ότι ο υδράργυρος, μπορεί να είναι αιτιολογικός παράγοντας για την μονοπυρήνωση και να σχετίζεται με τη λευχαιμία και με λέμφωμα Hodgins.

Οι ατμοί που σχηματίζονται από την καύση υλικών που περιέχουν υδράργυρο, μπορούν να εισέλθουν στο αναπνευστικό σύστημα και να περάσουν γρήγορα στην κυκλοφορία. Η χρόνια εισπνοή υδραργύρου, ακόμη και μικρών συγκεντρώσεων, μπορεί να προκαλέσει τρέμουλο, διαταραχές ύπνου και μειωμένες γνωστικές δυνατότητες. Η δηλητηρίαση από υδράργυρο, σχετίζεται με πολλές πνευμονικές παθήσεις, όπως είναι το σύνδρομο Yaung, η βρογχίτιδα και η πνευμονική ίωση. [12,13,18,26,33]

### **3.3.4.3. ΓΑΣΤΡΕΝΤΕΡΙΚΟ ΚΑΙ ΟΥΡΟΠΟΙΗΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ**

Ο υδράργυρος απορροφάται από τα επιθηλιακά κύτταρα με την κατάποση. Αυτή η απορρόφηση μπορεί να προκαλέσει διάφορες γαστρεντερικές διαταραχές, καθώς μπορεί να εμποδίσει την παραγωγή της θρυψίνης, της χυμοθρυψίνης και της πεψίνης μαζί με τη λειτουργία της οξειδάσης ξανθίνης και της διπεπτιδυλικής πεπτιδάσης. Οι επιδράσεις του υδραργύρου στο γαστρεντερικό, συνήθως εμφανίζονται ως κοιλιακός πόνος, δυσπεψία, φλεγμονή στο έντερο, έλκη και αιματηρή διάρροια. Μπορεί επίσης, να σχετίζεται με την καταστροφή της εντερικής χλωρίδας, το οποίο μπορεί να αυξήσει την ποσότητα των άπεπτων συστατικών της τροφής, προκαλώντας αντιδράσεις στο ανοσοποιητικό σύστημα και μειωμένη αντίσταση σε παθογενείς μολύνσεις.

Ο υδράργυρος μπορεί να προκαλέσει καταστροφή στους νεφρούς και απόδειξη αυτού συνιστά η σύνδεση ανάμεσα στην έκθεση σε αυτόν και στην οξεία σωληναριακή νέκρωση, την σπειρονεφρίτιδα, την χρόνια νεφρική νόσο, τον καρκίνο του νεφρού και το νεφρωσικό σύνδρομο. [12,13,18,26,33]

#### **3.3.4.4. ΑΝΟΣΟΠΟΙΗΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ**

Είναι γνωστό εδώ και πολλά χρόνια ότι ο υδράργυρος βλάπτει τη λειτουργία του ανοσοποιητικού συστήματος, κυρίως μέσω των επιβλαβών επιπτώσεων στα πολυμορφοπύρρηνα λευκοκύτταρα. Επηρεάζει τη διέγερση τους και την ικανότητα τους να καταστρέφουν ξένους οργανισμούς. Τα άτομα με ευαισθησία στον υδράργυρο είναι πιο πιθανό να έχουν αλλεργίες, άσθμα και συμπτώματα αυτοάνοσων νοσημάτων όπως τα ρευματοειδή.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει πως η κατάποση υδράργυρου, συχνά σχετίζεται με αυξημένα επίπεδα ζυμών και βακτηρίων, τα οποία λειτουργούν προστατευτικά στην υπερβολική απορρόφηση από το σώμα. Η καταστροφή των παθογενών από τα αντιβιοτικά, μπορεί να προκαλέσει ξαφνική απελευθέρωση μεγάλης ποσότητας τοξικών μετάλλων στον οργανισμό, κάτι το οποίο είναι πολύ επικίνδυνο. Το φορτίο του υδράργυρου στον οργανισμό σχετίζεται με πολυάριθμα συμπτώματα, αλλεργικές αντιδράσεις, αρθρίτιδα, επιληψία, αυτισμό, έκζεμα, σκληροδερμία κ.α. [12,13,18,26,33]

#### **3.3.4.5. ΝΕΥΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ**

Είναι φανερό ότι ο υδράργυρος συσσωρεύεται στα νευρικά κύτταρα σε όλο το σώμα. Η πιο καταστροφική επίδραση στον νευρικό σύστημα, είναι η παρεμβολή στην παραγωγή ενέργειας, το οποίο μπορεί να βλάψει τη διαδικασία αποτοξίνωσης, προκαλώντας στα κύτταρα είτε θάνατο είτε χρόνιο υποσιτισμό. Ο υδράργυρος σχετίζεται με αυξημένη οξειδωτική ζημιά στους ιστούς. Στο περιφερειακό νευρικό σύστημα, ο υδράργυρος μπορεί να ληφθεί από τις νευρικές απολήξεις, όπου μπορεί να βλάψει τη σύνθεση της τουμπουλίνης και της ακτίνης, οι οποίες είναι σημαντικές συνιστώσες στη δομή των νευρώνων και της αποτοξινωτικής διαδικασίας.

Στο κεντρικό νευρικό σύστημα, ο υδράργυρος μπορεί να καταστρέψει το εμπόδιο αίματος-εγκεφάλου και να επιτρέψει την είσοδο στον εγκέφαλο, τοξικών μετάλλων και ουσιών. Τα συμπτώματα της δηλητηρίασης περιλαμβάνουν κατάθλιψη, παράνοια, υπερβολική ευερεθιστικότητα, ψευδαισθήσεις, απώλεια συγκέντρωσης, απώλεια μνήμης, τρέμουλο, απώλεια κιλών, συνεχώς χαμηλή θερμοκρασία σώματος, υπνηλία, πονοκέφαλο, αυπνία και κούραση. Εκτός από το νευρικό σύστημα, ο υδράργυρος επηρεάζει και τις αισθήσεις, προκαλώντας τυφλότητα, ρετινοπάθεια, οπτική νευροπάθεια, απώλεια ακοής, μειωμένη αίσθηση της όσφρησης και ασυνήθη αφή.

Ο αυτισμός είναι ένα σύνδρομο που χαρακτηρίζεται από διαταραχές στην κοινωνική συνάφεια, μη συνηθισμένες κινήσεις και αισθητηριακή δυσλειτουργία. Ο υδράργυρος μπορεί να προκαλέσει συμπτώματα παρόμοια με τον αυτισμό, οδηγώντας κάποιους στο συμπέρασμα ότι αρκετές περιπτώσεις αυτισμού, ίσως είναι μορφές υδραργυρικής δηλητηρίασης. [12,13,18,26,33]

### **3.4. ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**

Ο υδράργυρος είναι γνωστό ότι έχει υψηλή τάση ατμών σε κανονικές θερμοκρασίες. Μικρές ποσότητες υδραργύρου στο περιβάλλον εξατμίζονται ταχύτατα και οι ατμοί είναι επικίνδυνοι. Το ανώτατο επιτρεπόμενο όριο των 0,05 mg/m<sup>3</sup> έχει καθορισθεί για επαγγελματικές συνθήκες. Η διαλυτότητα του υδραργύρου στο νερό είναι ελάχιστη, αλλά η διαλυτότητα αυξάνεται στις αλογονομένες ενώσεις. Οι οργανικές ενώσεις του υδραργύρου είναι γενικά πιο τοξικές από τις ανόργανες. Οι ανόργανες ενώσεις του υδραργύρου γίνονται επικίνδυνες για τα υδρόβια οικοσυστήματα καθώς μετατρέπονται σε μεθυλο-υδραργυρικές ή οργανικές ενώσεις μέσω βακτηριακής μεθυλίωσης. Για τον λόγο αυτό, ακόμη και μικρές ποσότητες υδραργύρου στο νερό, τα ιζήματα και το έδαφος μπορούν να μετατραπούν σε αυξημένες συγκεντρώσεις στους ιστούς των ψαριών. Η προσρόφιση του υδραργύρου στο έδαφος είναι πιθανόν η κυριότερη διεργασία διάχυσης και ρύπανσης του χερσαίου περιβάλλοντος. Διάφοροι παράγοντες, το pH, οι τύποι κατιόντων, οι ανόργανες και οργανικές ενώσεις του εδάφους, παίζουν ρόλο στην προσρόφιση του υδραργύρου. Ένα ποσοστό του υδραργύρου εξατμίζεται στον αέρα και παραλαμβάνεται από τα φυτά, ένα σημαντικό τμήμα αντιδρά με οργανικές ενώσεις ή απορροφάται από αργιλικά πετρώματα. Ο υδράργυρος και ενώσεις του βρίσκονται σε φυσική κατάσταση σε πετρώματα και βράχους. Σε διάφορες περιοχές υπάρχουν σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα, όταν ο υδράργυρος εκπλύνεται με το νερό της βροχής και συσσωρεύεται σε υδρόβιους οργανισμούς, ιδιαίτερα τα λιπόφιλα συστατικά των ιστών ψαριών. Οι συγκεντρώσεις υδραργύρου στα επιφανειακά νερά είναι δύσκολο να μετρηθούν. Συνήθως τα καθαρά νερά έχουν συγκεντρώσεις 0,01-0,05 μg/. Έχει παρατηρηθεί ότι οι συγκεντρώσεις αυξάνονται ανάλογα με τις ποσότητες διαλυμένου οργανικού άνθρακα. Σε περιπτώσεις ρύπανσης από βιομηχανικά απόβλητα έχουν μετρηθεί συγκεντρώσεις 190-370 ng/L. [5,21,22,23,25]

Ο υδράργυρος που βρίσκεται στον αέρα, εγκαθίσταται στα υδάτινα σώματα και επηρεάζει την ποιότητα του νερού. Μπορεί να φτάσει στο έδαφος μέσω της βροχής, της σκόνης ή απλώς λόγω της βαρύτητας. Μετά την πτώση του, ο υδράργυρος μπορεί να καταλήξει σε ρεύματα, λίμνες και εκβολές ποταμών, όπου μέσω μικροβιακής δραστηριότητας μπορεί να μετατραπεί σε μεθυλο-υδράργυρο. Ένα σημαντικός παράγοντας στην επίδραση του υδράργυρου στο περιβάλλον, είναι η ικανότητα του να συγκεντρώνεται στους οργανισμούς και να μεταφέρεται μέσω της τροφικής αλυσίδας. Μολονότι όλες η μορφές του υδράργυρου μπορούν να συσσωρεύονται, ο μεθυλιδράργυρος απορροφάται και βιοσυσσωρεύεται σε μεγαλύτερο βαθμό. Οι ανόργανες ενώσεις μπορούν επίσης να απορροφηθούν, αλλά σε γενικές γραμμές, προσλαμβάνονται με βραδύτερο ρυθμό και χαμηλότερη αποτελεσματικότητα. Τα ψάρια φαίνεται να δεσμεύουν έντονα τον μεθυλιδράργυρο. Το μεγαλύτερο μέρος του

μεθυλιδράργυρου στους ιστούς των ψαριών είναι ομοιοπολικά δεσμευμένο με πρωτεϊνικές σουλφυδρικές ομάδες. Αυτή η σύνδεση έχει ως αποτέλεσμα μεγάλη περίοδο ημιζωής μέχρι τη αποβολή από τον οργανισμό, περίπου δύο χρόνια. Κατά συνέπεια, ο μεθυλιδράργυρος εμπλουτίζεται καθώς ανεβαίνουμε επίπεδο στην τροφική αλυσίδα. Σε αντίθεση με άλλες ενώσεις του υδράργυρου, η εξάλειψη του μεθυλιδράργυρου από τα ψάρια είναι πολύ αργή. Επιπλέον, τα γηραιότερα ψάρια έχουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις υδράργυρου στους ιστούς τους από τα νεότερα του ίδιου είδους. [5,21,22,23,25]

Η εναπόθεση του υδράργυρου σε μια περιοχή, εξαρτάται από το αν η πηγή έκλυσης είναι τοπική, περιφερειακή, εθνική ή διεθνής. Η ποσότητα υδράργυρου στα ψάρια σε διαφορετικά υδάτινα σώματα, είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων, συμπεριλαμβανομένων την ποσότητα του υδράργυρου που εναποτίθεται από την ατμόσφαιρα, τις τοπικές, μη ατμοσφαιρικές πηγές, τον φυσικά απαντώμενο υδράργυρο στο έδαφος, τις φυσικές, βιολογικές και χημικές ιδιότητες του υδατινίου σώματος και τέλος, την ηλικία, το μέγεθος και το είδος της τροφής που καταναλώνουν τα ψάρια. Τα πουλιά και τα θηλαστικά που τρέφονται με ψάρια, είναι πιο εκτεθειμένα. Η επιπτώσεις από την έκθεση της άγριας ζωής στον μεθυλο-υδράργυρο είναι θνησιμότητα, μείωση της γονιμότητας, καθυστερημένη ανάπτυξη και ανωμαλίες στη συμπεριφορά. [5,21,22,23,25]

Ο μεθυλιδράργυρος είναι μία τοξίνη του νευρικού συστήματος και τα νεφρά είναι τα πρώτα όργανα που επηρεάζονται από την έκθεση σε ανόργανο υδράργυρο. Σοβαρές νευρολογικές επιπτώσεις στα ζώα είχαν παρατηρηθεί, στην περιβόητη υπόθεση Μινιμάτα, στην Ιαπωνία, προτού καν αναγνωριστούν οι επιπτώσεις στον άνθρωπο, όπου πουλιά παρουσίασαν δυσκολία στο πέταγμα και μη φυσιολογική συμπεριφορά. [5,21,22,23,25]

Πτηνά που εκτίθενται σε ανόργανες ενώσεις υδραργύρου δείχνουν φαινόμενα ανορεξίας, ελάττωσης της ανάπτυξης και αναπαραγωγικά προβλήματα. Η LC50 για χλωριούχο υδράργυρο σε ορισμένα είδη πουλιών που έχουν μελετηθεί είναι πάνω από 3.000 mg/Kg, ενώ για οργανικές ενώσεις που είναι πιο τοξικές είναι περίπου 45 mg/Kg. Διάφορες άλλες μελέτες με πτηνά έδειξαν ότι οι ενώσεις υδραργύρου προκαλούν νευρολογικά συμπτώματα, αδυναμία των άκρων, παρεμπόδιση του συντονισμού και κίνησης των μυώνων, αλλοιώσεις στο ήπαρ και επιπτώσεις στην ανάπτυξη νεαρών πτηνών. Τα επίπεδα του υδράργυρου στις αρκτικές φώκιες και τις φάλαινες beluga έχουν αυξηθεί 2 με 4 φορές τα τελευταία 25 χρόνια. Σε μια έρευνα που έγινε στο Hong Kong σε πληθυσμό δελφινιών, βρέθηκε ότι ο υδράργυρος είναι πιο επικίνδυνος για την υγεία τους σε σχέση με άλλα βαρέα μέταλλα. [5,21,22,23,25]

Πρόσφατα στοιχεία δείχνουν ότι ο υδράργυρος είναι υπεύθυνος για τη μείωση της δράσης μικροοργανισμών στο έδαφος, που είναι ζωτικής σημασίας για την τροφική αλυσίδα. Τα κρίσιμα όρια που έχουν οριστεί για την πρόληψη αρνητικών επιπτώσεων είναι από 0,07 έως 0,3 mg/kg της συνολικής περιεκτικότητας του εδάφους σε υδράργυρο. [5,21,22,23,25]

Σε παγκόσμια κλίμακα, η Αρκτική ήταν στο επίκεντρο της ανησυχίας πρόσφατα, εξαιτίας της μεγάλης εμβέλειας μεταφοράς του υδράργυρου. Ωστόσο, οι επιπτώσεις σε καμία περίπτωση δεν περιορίζονται εκεί. Σε πολλές περιοχές έχουν υπάρξει ευρήματα σχετικά με τη μόλυνση της τροφής από τον υδράργυρο, ειδικά σε περιοχές όπου τα ψάρια είναι η βάση της διατροφής. Η άνοδος της στάθμης του νερού, που οφείλεται στις

κλιματικές αλλαγές, μπορεί να έχει επιπτώσεις στη μεθυλίωση του υδράργυρου και τη συσσώρευση στα ψάρια. Για παράδειγμα, υπάρχουν ενδείξεις για αυξημένο σχηματισμό σε μικρές, θερμές λίμνες και σε πρόσφατα πλημμυρισμένες περιοχές. [5,21,22,23,25]

Όπως και στα γλυκά νερά, έτσι και στα ψάρια του ωκεανού η συγκέντρωση μεθυλο υδράργυρου ανιχνεύει την τροφική θέση και την ηλικία, αλλά σημαντικές διαφορές είναι εμφανής στις συγκεντρώσεις του ίδιου είδους, σε διαφορετικές λεκάνες. [5,21,22,23,25]

Η τοποθεσία και το βάθος σίτισης είναι σημαντικοί παράγοντες. Πολλά εμπορικά και μη είδη ψαριών που τρέφονται στα 600 μέτρα κάτω από την επιφάνεια, έχουν υψηλότερα επίπεδα μεθυλιδράργυρου από είδη με παρόμοια κατάσταση σίτισης στην επιφάνεια. Θετικές συσχετίσεις έχουν βρεθεί ανάμεσα σε συγκεντρώσεις μεθυλο υδράργυρου σε ψάρια που τρέφονται με άλλα ψάρια και θαλάσσια πουλιά και το βάθος σίτισης τους ή το βάθος της λείας τους. [5,21,22,23,25]

Στα φυτά, σε κυτταρικό επίπεδο, οι μηχανισμοί που μπορούν να καταστρέψουν τα βαρέα μέταλλα, περιλαμβάνουν τον αποκλεισμό σημαντικών μορίων, τη μεταφορά απαραίτητων ιόντων, εκτόπιση ή αντικατάσταση μεταλλικών ιόντων από τα μόρια, μετουσίωση ή αδρανοποίηση των πρωτεϊνών και διάσπαση των μεμβρανών. Σχετικά με τον υδράργυρο, οι πιθανοί μηχανισμοί για τη φυτοτοξικότητά του, μπορεί να είναι μέσω της αλλαγής της διαπερατότητας των μεμβρανών, της αντίδρασης με τις σουλφιδικές ομάδες, της αντίδρασης με το φώσφορο και της αντικατάστασης των ιόντων. Ο υδράργυρος είναι γνωστό ότι επηρεάζει το αντιοξειδωτικό, αμυντικό σύστημα, παρεμβαίνοντας στην διαμόρφωση διαφόρων ουσιών. [5,21,22,23,25]

Πολλές μορφές υδράργυρου, σχετίζονται με τραυματισμούς στους σπόρους και μειωμένη βιωσιμότητα. Επίσης, η έκθεση σε αυτόν προκαλεί μειωμένη φωτοσύνθεση, διαπνοή, πρόσληψη νερού και σύνθεση χλωροφύλλης. Και ο οργανικός και ο ανόργανος υδράργυρος, φαίνεται πως προκαλούν απώλεια καλίου, μαγνησίου, μαγγανίου και σιδήρου κι έτσι εξηγείται η διαπερατότητα. Η μορφή  $Hg^{2+}$  επηρεάζει το πλάσμα των μεμβρανών και προκαλεί τοξικότητα στα αέρια μέρη του φυτού. [5,21,22,23,25]

Μέσα στα κύτταρα, τα ιόντα υδράργυρου τείνουν να σχηματίζουν ομοιοπολικούς δεσμούς, εξαιτίας του εύκολα παραμορφώσιμου εξωτερικού περιβλήματος. Μία σειρά από πιθανούς συνδυασμούς υπάρχουν στο dna και εξαρτώνται από την ιοντική ισχύ, την παρουσία αναγωνιστικών ιόντων και τη βάση της σύνθεσης. Η δέσμευση του υδράργυρου στο dna, προκαλεί μίτωση, συγγενή ανταλλαγή χρωματιδίων χρωμοσωμικές αλλοιώσεις και αλλαγές στην άτρακτο. [5,21,22,23,25]

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΕΥΡΩΠΑΙΚΗ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΚΑΙ ΔΡΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ**

### **4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Οι κοινωνικοοικονομικές συνέπειες της μόλυνσης από υδράργυρο και η έκθεση των ανθρώπων και της άγριας φύσης στο μεθυλϋδράργυρο, έχει οδηγήσει σε πολιτικές και κανονισμούς προκειμένου να περιοριστούν οι απελευθερώσεις από τις ανθρώπινες δραστηριότητες και να ελεγχθεί η μεταφορά ανάμεσα στην ατμόσφαιρα, τα γλυκά ύδατα, τη λιθόσφαιρα και τους ωκεανούς, σε τοπικό, εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο.[1]

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναγνωριστεί οι κίνδυνοι για τον άνθρωπο και το περιβάλλον που προέρχονται από την έκθεση στον υδράργυρο. Για την αντιμετώπιση των κινδύνων αυτών έχει ξεκινήσει μία διεθνής εκστρατεία με στόχο τον περιορισμό και την ελαχιστοποίηση της χρήσης του. Ως ένα από τα πρώτα μέτρα που λαμβάνονται από τις 3 Απριλίου του 2009, σε ευρωπαϊκό επίπεδο, είναι η κατάργηση των υδραργυρικών θερμομέτρων. Η Ευρωπαϊκή Ένωση αποφάσισε, λόγω της υψηλής επικινδυνότητας του υδράργυρου, να σταματήσει τη διάθεση τους στην αγορά, μετά από 300 και πλέον χρόνια χρήσης. Σε διεθνές επίπεδο, γίνεται μία συντονισμένη προσπάθεια μέσω των Ηνωμένων Εθνών για υιοθέτηση κοινής στρατηγικής που θα περιορίζει τη χρήση υδράργυρου.[29]

Την προηγούμενη δεκαετία, η σπουδαιότητα των περιβαλλοντικών θεμάτων που σχετίζονται με την απελευθέρωση υδράργυρου στην ατμόσφαιρα, έχει αποκτήσει αυξανόμενο ενδιαφέρον για τις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το οικοσύστημα. Σε αυτό το πλαίσιο, ξεκίνησε το 2002 το πρόγραμμα UNEP, μία διαδικασία για να εκτιμηθεί η έκταση της μόλυνσης, από τις ανθρωπογενείς και φυσικές πηγές. Μία σειρά από συντονισμένες πρωτοβουλίες αναλήφθηκαν παγκοσμίως, για να εκτιμηθεί η γνώση μας σχετικά με τις ατμοσφαιρικές εκπομπές, τη μετακίνηση, την εναπόθεση και τη διαφυγή από τα χερσαία και τα υδάτινα οικοσυστήματα.[22,23]

### **4.2. Η ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΟΥ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ**

Ο υδράργυρος ως ρύπος, μπορεί εύκολα να περάσει τα διεθνή σύνορα, γι' αυτό και είναι ένα ζήτημα παγκόσμιας σημασίας και απαιτεί τις συντονισμένες προσπάθειες των κρατών. Ένα μεγάλο μέρος της ανθρώπινης έκθεσης, είναι φανερό στις κοινότητες της Αρκτικής, εξαιτίας της συσσώρευσης του υδράργυρου στα ψάρια, που είναι η βάση της διατροφής τους. [8, 9, 10, 11, 29, 30]

Σε άλλες περιοχές του κόσμου, επίσης υπάρχουν αυξημένα επίπεδα έκθεσης. Ενώ στην Ευρώπη οι εκπομπές μειώνονται, παγκόσμια οι εκπομπές αυξάνονται ως αποτέλεσμα της αύξησης της καύσης άνθρακα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε χώρες όπως η Κίνα, η Ινδία και άλλες αναπτυσσόμενες χώρες. Μία ιδιαίτερα προβληματική δραστηριότητα που περιλαμβάνει τη χρήση υδράργυρου είναι τα μικρές κλίμακας ορυχεία χρυσού, κυρίως στη Αφρική, την Ασία και τη Νότια Αμερική. Υπολογίζεται σε περισσότερο από 1000 τόνους υδράργυρου το χρόνο αποβάλλονται στο περιβάλλον. [8, 9, 10, 11, 29, 30]

Εντός πλαισίου της συμφωνίας της UNECE, για την μεγάλης εμβέλειας διασυνοριακής αέριας μόλυνσης, υιοθετήθηκε το 2003 πρωτόκολλο για τα βαρέα μέταλλα και αναθεωρήθηκε το 2012. Σκοπός του είναι ο περιορισμός των αέριων εκπομπών που περιέχουν υδράργυρο, κάδμιο και μόλυβδο από την Ευρώπη και τη Νότια Αμερική. [8, 9, 10, 11, 29, 30]

Σε παγκόσμιο επίπεδο, το 2001 ξεκίνησε με πρωτοβουλία του προγράμματος του ΟΗΕ για το περιβάλλον (UNEP) μία μελέτη σχετικά με την παρουσία και τις επιπτώσεις του υδραργύρου, η οποία κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι ενδείξεις σοβαρών επιπτώσεων στο περιβάλλον και την υγεία του ανθρώπου, απαιτούν την ανάληψη διεθνούς δράσης. Τον Φεβρουάριο του 2008, οι κυβερνήσεις χωρών από όλον τον κόσμο αποφάσισαν, στο διοικητικό συμβούλιο του UNEP, να αναπτύξουν νομικώς δεσμευτική συνθήκη για τον υδράργυρο έως το 2013. Το Περιβαλλοντικό Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών (UNEP), καθιέρωσε ένα ειδικό πρόγραμμα για τον υδράργυρο το 2003, για να ενθαρρύνει όλες τις χώρες να υιοθετήσουν στόχους, να αναγνωρίσουν τους ευαίσθητους πληθυσμούς, να ελαχιστοποιήσουν την έκθεση και να μειώσουν τις ανθρωπογενείς εκπομπές. Τον 2009, ο ίδιος οργανισμός, άρχισε να διαπραγματεύεται ένα παγκόσμιο νομικό σχέδιο για τον υδράργυρο. Οι διαπραγματεύσεις έληξαν τον Ιανουάριο του 2013 και η Ε.Ε. υπέγραψε τη νέα Σύμβαση Μινιμάτα στην πόλη Kumamoto της Ιαπωνίας, στις 10/10/2013. [8, 9, 10, 11, 29, 30]

Η **Σύμβαση της Μινιμάτα** πήρε το όνομά της από την ομώνυμη πόλη, στην οποία το 1950 δεκάδες χιλιάδες κάτοικοι δηλητηριάστηκαν από την κατανάλωση ψαριών και οστρακοειδών που αλιεύτηκαν από νερά μολυσμένα με υδράργυρο από απόβλητα εργοστασίου της περιοχής. Στα μέσα της δεκαετίας ένας γιατρός με ασθενείς οι οποίοι παρουσίαζαν προβλήματα στο νευρικό και ανοσοποιητικό σύστημα, καθώς επίσης και στον εγκέφαλο, υπέδειξε ως πιθανή αιτία των προβλημάτων τη βιομηχανική ρύπανση. Ωστόσο, το εργοστάσιο συνέχισε να απορρίπτει τα απόβλητά του στη θάλασσα ως το **1968**, δηλητηριάζοντας τη θαλάσσια ζωή και τους ανθρώπους.

Οι κυριότερες ρυθμίσεις της Σύμβασης της Μινιμάτα αφορούν:

- Στην προμήθεια και την εμπορία υδράργυρου.
- Στη χρήση του υδράργυρου σε προϊόντα και βιομηχανικές διαδικασίες.
- Στα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για τη μείωση των εκπομπών υδραργύρου κατά τις εξορύξεις
- Στα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για τη μείωση των εκπομπών από τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής και τα εργοστάσια παραγωγής μετάλλων.



Μεταξύ άλλων η σύμβαση προβλέπει την κατάργηση μιας σειράς προϊόντων, μεταξύ των οποίων και τα θερμόμετρα υδραργύρου, ως το 2020, ενώ δίνει στις κυβερνήσεις περιθώριο 15 ετών για να σταματήσουν τις εξορύξεις υδραργύρου.

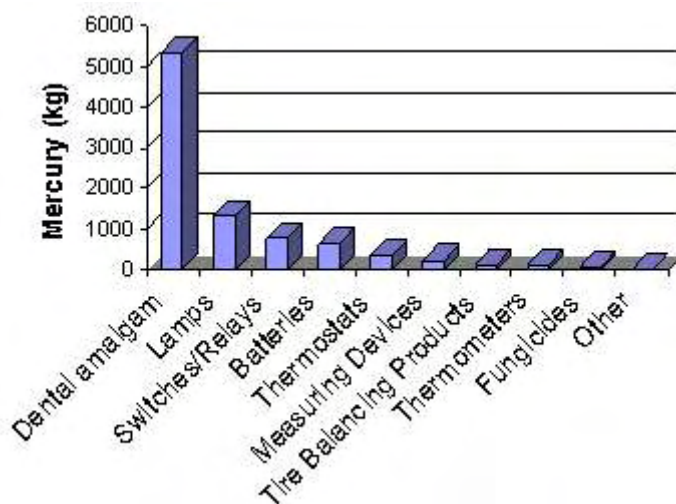
Η σύμβαση καλύπτει όλο τον κύκλο του υδράργυρου, από την παραγωγή έως τη διάθεση των απορριμμάτων και περιέχει συγκεκριμένα νομικά δεσμευτικά μέτρα και όχι μόνο δηλώσεις πρόθεσης. Πολλές πτυχές της σύμβασης είναι επηρεασμένες από τη νομοθεσία της Ε.Ε., συμπεριλαμβανομένων της απαγόρευσης εξόρυξης, της λίστας με τα προϊόντα στα οποία προστίθεται υδράργυρος, τις βιομηχανικές διαδικασίες που σιγά σιγά θα καταργηθούν και τις καλύτερες βιομηχανικές πρακτικές (BAT) που εμποδίζουν και ελέγχουν τις άσκοπες βιομηχανικές εκπομπές υδράργυρου στον αέρα. Το σύνολο των μέτρων που εμπεριέχονται στην Σύμβαση, θα ανατρέψουν την υπάρχουσα αυξανόμενη τάση απελευθέρωσης υδράργυρου στο περιβάλλον και την μόλυνση της τροφικής αλυσίδας. [8, 9, 10, 11, 29, 30]

#### **4.3. ΕΥΡΩΠΑΙΚΗ ΕΝΩΣΗ**

Παραδοσιακά η Ευρωπαϊκή Ένωση είναι σημαντικός εξαγωγέας υδράργυρου, παρέχοντας περίπου το 25% του συνολικού υδράργυρου παγκοσμίως, δηλαδή περίπου 3000 τόνους το χρόνο. Ο περισσότερος από τον ευρωπαϊκό υδράργυρο παραγόταν στο Άλμπαντεν της Ισπανίας, όπου από τους Ρωμαϊκούς χρόνους υπήρχαν ορυχεία κινναβαρίου (θειούχος υδράργυρος). Η παραγωγή σταμάτησε το 2003 και οι εξαγωγές υδράργυρου έχουν μειωθεί σημαντικά από τότε. Η εξαγωγή του υδράργυρου και συγκεκριμένων ενώσεων του από την Ε.Ε. έχει απαγορευτεί από τις 15/3/2011. Εκτός της Ε.Ε, οι χώρες που ακόμη παράγουν υδράργυρο από το κιννάβαρι είναι το Κιργιστάν και η Κίνα. [8, 9, 10, 11, 29, 30]

Ο υδράργυρος επίσης παράγεται από την ανακύκλωση των σκουπιδιών, όπως τα οδοντιατρικά αμαλγάματα και οι παλιές λάμπες φθορισμού. Μερικές φορές ο υδράργυρος παράγεται σαν δευτερεύον προϊόν μαζί με την παραγωγή κάποιου άλλου υλικού, όπως είναι ο ψευδάργυρος και ο κασσίτερος. Ενώ η δευτερεύουσα παραγωγή ακόμη λαμβάνει χώρα σε μεγάλο αριθμό χωρών της Ε.Ε, η παραγωγή υδράργυρου από τέτοιες διαδικασίες θεωρείται ως απόβλητο από την ευρωπαϊκή νομοθεσία και πρέπει να διατεθεί. [8, 9, 10, 11, 29, 30]

Ο υδράργυρος ακόμη, χρησιμοποιείται σε μία ποικιλία εφαρμογών (σχήμα 1). Το 2007, η ζήτηση υδράργυρου στις τότε 27 χώρες-μέλη, εκτιμούνταν σε περισσότερο από 320 τόνους. Οι χρήσεις περιλάμβαναν οδοντιατρικά αμαλγάματα, εξοπλισμό μέτρησης και ελέγχου και λάμπες οικονομίας. Ο υδράργυρος ήταν επίσης, μέρος του χλωρο-αλκαλικού τομέα, στην παραγωγή χλωρίνης και καυστικής σόδας, αν και αυτή η χρήση, έχει ξεφτίσει. Εκτός από αυτές τις σκόπιμες χρήσεις, υπάρχουν και ακούσιες εκπομπές υδράργυρου στον αέρα, από έναν αριθμό δραστηριοτήτων που χρησιμοποιούν καύσιμα ή πρώτες ύλες που περιέχουν υδράργυρο, οι πιο σημαντικές από τις οποίες είναι η καύση άνθρακα, η παραγωγή τσιμέντου, η παραγωγή μη σιδηρούχων μετάλλων και η αποτέφρωση των αποβλήτων. [8, 9, 10, 11, 29, 30]



σχήμα 5.καθημερινές χρήσεις του Hg , (<http://www.ec.gc.ca>)

#### 4.3.1. ΤΙ ΕΧΕΙ ΕΠΙΤΕΥΧΘΕΙ ΩΣ ΤΩΡΑ ΜΕ ΤΗΝ ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟ ΣΤΗΝ Ε.Ε

Οι πολυάριθμες πτυχές του προβλήματος του υδράργυρου, διευθετούνται μέσω του ολοκληρωμένου σώματος της Ευρωπαϊκής και Εθνικής νομοθεσίας. Οι κύριες περιοχές που καλύπτονται είναι οι εκπομπές και η χρήση. Εξαιτίας αυτών των μέτρων και διαφόρων άλλων πρακτικών π.χ. αλλάζοντας των άνθρακα με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι ευρωπαϊκές εκπομπές στον αέρα έχουν μειωθεί σημαντικά, κατά 60% από το 1990 έως του 2000.[2,10,11,30]

Οι εκπομπές υδράργυρου από σημαντικές βιομηχανικές πηγές, υπόκεινται στην Οδηγία IPPC (Integrated Pollution Prevention and Control), απαιτώντας όλες οι εγκαταστάσεις να εφαρμόζουν τις καλύτερες διαθέσιμες τεχνικές (BAT) από το 2007. Τα έγγραφα αναφοράς που υιοθετήθηκαν από την Commission καθιέρωσαν τις BAT. Πλέον έχουν αντικατασταθεί από την Οδηγία για τις βιομηχανικές εκπομπές (IED). Και οι δύο οδηγίες καλύπτουν τη βιομηχανία χλωροαλκάλων της Ε.Ε. Οι εκπομπές του υδράργυρου έχουν επίσης μειωθεί ως αποτέλεσμα της εφαρμογής οδηγιών για τις μεγάλες εγκαταστάσεις καύσης και την αποτέφρωση των αποβλήτων. Κάποιες χώρες έχουν εισάγει επιπλέον έλεγχο, για παράδειγμα στην καύση των νεκρών. Η ευρωπαϊκή νομοθεσία, επίσης περιορίζει τη χρήση του υδράργυρου σε μπαταρίες, ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό, φυτοφάρμακα και βιοκτόνα, καλλυντικά, συντηρητικά ξύλου, προϊόντα επεξεργασίας υφασμάτων, βαφές πλοίων, διακόπτες οχημάτων και μη ηλεκτρονικές συσκευές μέτρησης για οικιακή και ιατρική χρήση. Επιπλέον, θέτει προϋποθέσεις για τη διαχείριση αποβλήτων που περιέχουν υδράργυρο. Όρια επίσης υπάρχουν και για την περιεκτικότητα υδράργυρου στο πόσιμο νερό και τα προϊόντα αλιείας. [2,10,11,30]

Μέχρι την υιοθέτηση της Κοινοτικής Στρατηγικής που αφορά τον Υδράργυρο τον Ιανουάριο του 2005, οι νομοθέτες της Ε.Ε. είχαν υιοθετήσει την Οδηγία 2007/51/EC σχετικά με τον περιορισμό στην αγορά συγκεκριμένων συσκευών μέτρησης που περιέχουν υδράργυρο. Τον Σεπτέμβριο του 2008, εγκρίθηκε βασική νομοθεσία που απαγορεύει τις εξαγωγές υδράργυρου από την Ε.Ε. από τις 15 Μαρτίου 2011 και έπειτα, και απαιτεί την ασφαλή αποθήκευση μεταλλικού υδράργυρου από κύριες πηγές. [2,10,11,30]

#### **4.3.2. ΤΙ ΠΡΟΤΕΙΝΗ Η ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ**

- Παγκόσμια δράση: η Ε.Ε. θα παρέχει προτάσεις για διεθνής δραστηριότητες και συνεργασία με άλλες χώρες, για τη διευθέτηση του προβλήματος του υδράργυρου. Η στρατηγική προτείνει μία διεθνή πρωτοβουλία για τη μείωση της παροχής υδράργυρου και την κατάργηση νέας παραγωγής από κιννάβαρι. Η στρατηγική περιλαμβάνει επίσης, δράσεις για βοήθεια σε άλλες χώρες ώστε να μειώσουν τις εκπομπές τους και υποστήριξη στον UNEP.
- Μείωση της Ευρωπαϊκής Παροχής: ως προληπτικό μέτρο, προτείνεται η εξάλειψη των εξαγωγών από την Ε.Ε.. Η δράση, επιπλέον, μειώνει την παγκόσμια παροχή, υποστηρίζει τις προσπάθειες μείωσης της ζήτησης και δήλωση των δεσμεύσεων για διευθέτηση του παγκόσμιου προβλήματος. Η υιοθέτηση του Κανονισμού αρ.1102/2008 ανταποκρίνεται σε αυτήν την πρόταση.
- Μείωση της Ευρωπαϊκής ζήτησης: η χρήση συσκευών που περιέχουν υδράργυρο έχει απαγορευτεί. Οι ελάχιστες χρήσεις που έχουν παραμείνει ερευνώνται και θα ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα όπου κρίνεται απαραίτητο.
- Μείωση των εκπομπών στην Ε.Ε.: υπάρχει ήδη σημαντική νομοθεσία προς αυτήν την κατεύθυνση. Οι νόμοι συνεχώς αναθεωρούνται και προσαρμόζονται.
- Προστασία απέναντι στην έκθεση: η Ευρωπαϊκή Αρχή για την Ασφάλεια Τροφίμων, έχει ήδη εξετάσει την διαιτητική έκθεση στον υδράργυρο των γυναικών σε αναπαραγωγική ηλικία και των παιδιών που είναι οι πιο ευάλωτες ομάδες. Το 2008 η Επιτροπή εισήγαγε ενημερωτικές σημειώσεις στις χώρες μέλη σχετικά με τον μεθυλϋδράργυρο στα προϊόντα αλιείας και την μέγιστη ποσότητα συγκεκριμένων βαρέων μετάλλων που μπορούν να καταναλώνουν οι ευπαθείς ομάδες. [8]

#### **4.3.3. ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΙΚΗ ΕΝΩΣΗ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΟΝ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟ [1,9,10,30]**

1. Οδηγία 75/442/ΕΟΚ/15.7.1975 Περί των στερεών αποβλήτων
2. Οδηγία 76/769/ΕΟΚ Σχετικά με περιορισμούς κυκλοφορίας στην αγορά ορισμένων οργάνων μέτρησης που περιέχουν υδράργυρο
3. Οδηγία 76/464/ΕΟΚ/ 18.5.1976 Περί ρυπάνσεως που προκαλείται από ορισμένες επικίνδυνες ουσίες που εκχέονται στο υδάτινο περιβάλλον της Κοινότητας
4. Οδηγία 76/764/ΕΟΚ/27.7.1976 Σχετικά με τα ιατρικά θερμομέτρα υδραργύρου εξ υάλου
5. Οδηγία 80/68/ΕΟΚ/17.12.1980 Περί προστασίας των υπογείων υδάτων από τη ρύπανση που προέρχεται από ορισμένες επικίνδυνες ουσίες
6. Οδηγία 82/176/ΕΟΚ/22.3.1982 Περί των οριακών τιμών και των ποιοτικών στόχων για τις απορρίψεις υδραργύρου από το βιομηχανικό τομέα της ηλεκτρόλυσης των χλωριούχων αλάτων αλκαλίων
7. Οδηγία 84/156/ΕΟΚ/8.3.1984 Σχετικά με τις οριακές τιμές και τους ποιοτικούς στόχους για τις απορρίψεις υδραργύρου σε τομείς άλλους εκτός του τομέα της ηλεκτρόλυσης των χλωριούχων αλάτων των αλκαλίων
8. Οδηγία 86/278/ΕΟΚ/12.6.1986 Σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος και ιδιαίτερα του εδάφους κατά τη χρησιμοποίηση της ιλύος καθαρισμού λυμάτων στη γεωργία
9. Οδηγία 91/157/ΕΟΚ/18.3.1991 Για τις ηλεκτρικές στήλες και τους συσσωρευτές που περιέχουν ορισμένες επικίνδυνες ουσίες
10. Οδηγία 91/689/ΕΟΚ/12.12.1991 Για τα επικίνδυνα απόβλητα
11. Οδηγία 93/42/ΕΟΚ/14.6.1993 Περί των ιατροτεχνολογικών προϊόντων
12. Οδηγία 93/86/ΕΟΚ/4.10.1993 Περί προσαρμογής στην τεχνική πρόοδο της Οδηγίας 91/157/ΕΟΚ του Συμβουλίου για τις ηλεκτρικές στήλες και τους συσσωρευτές που περιέχουν ορισμένες επικίνδυνες ουσίες
13. Οδηγία 96/61/ΕΚ/24.9.1996 (IPPC) Σχετικά με την ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχο της ρύπανσης
14. Οδηγία 96/62/ΕΚ/27.9.1996 Εκτίμηση και διαχείριση της ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος
15. Οδηγία 98/24/ΕΚ/7.4.1998 Περί της προστασίας της υγείας και ασφαλείας των εργαζομένων κατά την εργασία από κινδύνους οφειλόμενους σε χημικούς παράγοντες

16. Οδηγία 98/83/EK/3.11.1998 Σχετικά με την ποιότητα νερού ανθρώπινης κατανάλωσης
17. Οδηγία 98/101/EK/22.12.1998 Σχετικά με τον περιορισμό κυκλοφορίας στην αγορά ηλεκτρικών στηλών και συσσωρευτών με περιεκτικότητα σε υδράργυρο μεγαλύτερη του 0,0005% κατά βάρος
18. Οδηγία 1999/30/EK/ 22.4.1999 Σχετικά με τις οριακές τιμές διοξειδίου του θείου, διοξειδίου του αζώτου και οξειδίων του αζώτου, σωματιδίων και μμόλυβδου, στον αέρα του περιβάλλοντος
19. Οδηγία 1999/31/EK/26.4.1999 Περί υγειονομικής ταφής των αποβλήτων
20. Απόφαση 2000/479/EK Περί της υιοθέτησης ενός ευρωπαϊκού μητρώου ρυπογόνων εκπομπών (EPER – European Pollutant Emission Register)
21. Οδηγία 2000/69/EK/16.10.2000 Περί οριακών τιμών βενζολίου και μονοξειδίου του άνθρακα στον αέρα του περιβάλλοντος
22. Οδηγία 2000/60/EK/23.10.2000 Σχετικά με τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων
23. Οδηγία 2000/76/EK/4.12.2000 Για την αποτέφρωση
24. Κανονισμός αριθ. 466/2001 /EK/8.3.2001 Σχετικά με τον καθορισμό μέγιστων τιμών ανοχής για ορισμένες προσμίξεις στα τρόφιμα
25. Οδηγία 2001/80/EK/23.10.2001 Σχετικά με εθνικά ανώτατα όρια εκπομπών για ορισμένους ατμοσφαιρικούς ρύπους
26. Στρατηγική COM/2001/0245 Σχετικά με την ποιότητα του αέρα (CAFÉ- Clean Air For Europe)
27. Οδηγία 2002/96/EK/27.1.2003 Σχετικά με τα απόβλητα ειδών ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ)
28. Οδηγία 2002/3/EK/12.2.2002 Σχετικά με το όζον στον ατμοσφαιρικό αέρα
29. Στρατηγική COM/2002/0539 Σχετικά με τη διατήρηση και προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος
30. Στρατηγική COM/2002/0179 Σχετικά με την προστασία του εδάφους
31. Οδηγία 2002/95/EK/27.1.2002 Σχετικά με τον περιορισμό της χρήσης ορισμένων επικίνδυνων ουσιών σε είδη ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού
32. Κανονισμός αριθ. 304/2003 /EK/28.1.2003 Σχετικά με τις εισαγωγές και εξαγωγές επικίνδυνων χημικών προϊόντων
33. Οδηγία 2004/107/EK/15.12.2004 Σχετικά με το αρσενικό, το κάδμιο, τον υδράργυρο, το νικέλιο και τους πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες στον ατμοσφαιρικό αέρα

34. Απόφαση 2003/33/EK/19.12.2003 Για τον καθορισμό κριτηρίων και διαδικασιών αποδοχής των αποβλήτων στους χώρους υγειονομικής ταφής

35. Στρατηγική SEC(2004) 729 Περί της σχέσης περιβάλλοντος και υγείας

36. Πρόταση SEC(2006)1369,SEC(2006)1370 Σχετικά με την απαγόρευση των εξαγωγών μμεταλλικού υδραργύρου και την ασφαλή αποθήκευσή του

37. Οδηγία 2006/11/EK Σχετικά με τη ρύπανση που προκαλείται από ορισμένες επικίνδυνες ουσίες που εκχέονται στο υδάτινο περιβάλλον της Κοινότητας

38. Οδηγία 2006/139/ΕΟΚ/20.12.2006 Για την τροποποίηση της Οδηγίας 76/769/ΕΟΚ που σχετίζεται με τους περιορισμούς κυκλοφορίας στην αγορά και χρήση ενώσεων αρσενικού με σκοπό την προσαρμογή του παραρτήματος 1 της Οδηγίας στην τεχνική πρόοδο

Υπάρχουν αυστηροί περιορισμοί στη χρήση του υδράργυρου στα προϊόντα στην Ε.Ε. Οι περιορισμοί καλύπτουν [

- Μπαταρίες και συσσωρευτές Οδηγία 2008/12/EC σε συνδυασμό με την Οδηγία 2006/66/EC
- Ηλεκτρικός και ηλεκτρονικός εξοπλισμός Οδηγία 2006/95/EC
- Συσκευές μέτρησης που περιέχουν υδράργυρο Κανονισμός αρ.1907/2006
- Κανονισμός αρ.847/2012 που περιορίζει τη χρήση υδράργυρου σε συσκευές μέτρησης για βιομηχανική και επαγγελματική χρήση από τις 10/4/2014
- Κανονισμός αρ.848/2012 που απαγορεύει την κατασκευή, χρήση και τοποθέτηση στην αγορά, πέντε ενώσεων του φενυλϋδράργυρου από τις 10/10/2017

## ΣΥΖΗΤΗΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο υδράργυρος και οι ενώσεις του είναι ιδιαίτερα τοξικές για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Ο υδράργυρος υπάρχει στη φύση, αλλά αποβάλλεται στο περιβάλλον σε μεγάλες ποσότητες και ως αποτέλεσμα των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Στο περιβάλλον μετασχηματίζεται σε διάφορες χημικές ενώσεις και εντοπίζεται σε όλα τα στρώματα της βιόσφαιρας. Η έκθεση στον υδράργυρο και τις ενώσεις του ελλοχεύει μία σειρά αρνητικών επιπτώσεων, τόσο για τον άνθρωπο, όσο και για τη χλωρίδα και την πανίδα.

Οι πηγές έκλυσης του υδράργυρου στο περιβάλλον, είναι φυσικές και ανθρωπογενείς. Οι φυσικές πηγές ρύπανσης περιλαμβάνουν τη φυσική εμφάνιση του υδράργυρου στα πετρώματα, την ηφαιστειακή δραστηριότητα και τις δασικές πυρκαγιές. Οι ανθρωπογενείς μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις ευρείες κατηγορίες. Στην πρώτη περιλαμβάνονται ο ιατρικός και εργαστηριακός εξοπλισμός, στη δεύτερη οι διαδικασίες καύσης, στην τρίτη η εξόρυξη του υδραργύρου και η εξόρυξη χρυσού, όπου εμφανίζεται ως απόβλητο και τέλος, διάφορες βιομηχανικές διαδικασίες και προϊόντα. Η ανθρωπογενής συνιστώσα, ξεπερνά κατά πολύ αυτή των φυσικών πηγών, συμβάλλοντας αθροιστικά στο παγκόσμιο απόθεμα υδραργύρου, το οποίο διαρκώς κινητοποιείται και ανακυκλώνεται μεταξύ αέρα, νερού, ιζημάτων και εδάφους.

Από τη στιγμή που ο υδράργυρος εκλύεται στο περιβάλλον από οποιαδήποτε χρήση του, αποκτά κινητικότητα και ακολουθεί μια κυκλική πορεία η οποία ξεκινά από την ατμόσφαιρα και καταλήγει στην επιφάνεια της γης. Ο υδράργυρος χαρακτηρίζεται από την ικανότητα που έχει να μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις μέσα στην ατμόσφαιρα, να εξατμίζεται από τους ωκεανούς, να απελευθερώνεται ή να προσροφάται από τα δέντρα και τα φυτά και να βιοσυσσωρεύεται στα ψάρια, τα ζώα και κατ' επέκταση τους ανθρώπους. Τελικοί αποδέκτες του κύκλου του υδραργύρου είναι τα επιφανειακά εδάφη, οι υδατικές επιφάνειες και τα θαλάσσια ιζήματα. Οι 3 βασικές φάσεις του κύκλου του υδραργύρου είναι η απελευθέρωση του υδραργύρου από τις πηγές έκλυσης του, η μεταφορά και απόθεσή του και η βιολογική μετατροπή και απορρόφησή του από διάφορους οργανισμούς.

Στα διάφορα μέσα, ο υδράργυρος μπορεί να μετατραπεί σε διάφορες μορφές, άλλες λιγότερο και άλλες περισσότερο τοξικές για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Ο στοιχειώδης υδράργυρος αναδίδει ατμούς που είναι εξαιρετικά δηλητηριώδεις. Στη μορφή των ανόργανων ενώσεων, ο υδράργυρος παρουσιάζει την τυπική τοξικότητα των ενώσεων των βαρέων μετάλλων. Οι οργανικές ενώσεις παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον από άποψη επικινδυνότητας για τον ανθρώπινο οργανισμό, με κυριότερη ένωση τον μεθυλδράργυρο, στον οποίο ο άνθρωπος εκτίθεται μέσω της διατροφής.

Ο υδράργυρος και οι ενώσεις του έχουν αποδεδειγμένα ιδιαίτερα τοξική δράση για τον άνθρωπο, την πανίδα και τη χλωρίδα. Η έκθεση σε υψηλές δόσεις μπορεί να αποβεί θανατηφόρα για τον άνθρωπο, ενώ ακόμα και σε σχετικά μικρές δόσεις μπορεί να

προκληθούν σοβαρές βλάβες στο νευρικό σύστημα, συνδέεται δε, με πιθανές δυσμενείς επιπτώσεις στο καρδιαγγειακό, ανοσοποιητικό και αναπαραγωγικό σύστημα. Ο άνθρωπος λαμβάνει υδράργυρο, κυρίως, μέσω της κατανάλωσης ψαριών και θαλασσινών, ενώ δευτερευόντως μέσω της εισπνοής, μέσω έκθεσης λόγω διαρροών (π.χ. σπάσιμο θερμομέτρων υδραργύρου), επαγγέλματος, γειτνίασης του τόπου διαμονής με εγκαταστάσεις που απελευθερώνουν υδράργυρο, έκθεση σε χρώματα, μικροβιοκτόνα ή μυκητοκτόνα που περιέχουν υδράργυρο, χρήση σαπουνιών, καλλυντικών και, γενικότερα, ουσιών που εφαρμόζονται απευθείας στο δέρμα.

Όλοι οι άνθρωποι εκτίθενται σε χαμηλές ποσότητες υδραργύρου, κάτι αναμενόμενο αφού αποτελεί, ούτως ή άλλως, φυσικό συστατικό του περιβάλλοντός μας. Οι παράγοντες που καθορίζουν την εμφάνιση ή μη δυσμενών επιπτώσεων στην υγεία, καθώς και τη σοβαρότητα αυτών είναι: η δόση, η ηλικία ή στάδιο ανάπτυξης, η διάρκεια της έκθεσης, ο τρόπος έκθεσης –εισπνοή, κατάποση, δερματική επαφή.

Η χημική μορφή του υδραργύρου είναι σημαντική για τον προσδιορισμό της τοξικής επίδρασης. Ο στοιχειακός υδράργυρος μπορεί εύκολα να εισπνευστεί και να προκαλέσει διάφορα συμπτώματα. Ο ανόργανος υδράργυρος επηρεάζει κυρίως το γαστρεντερικό σωλήνα και τα νεφρά. Ο οργανικός υδράργυρος, κυρίως στη μορφή του μεθυλιδραργύρου, βλάπτει το νευρικό σύστημα.

Τα κυριότερα προβλήματα από τις εκπομπές του υδραργύρου μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Είναι τοξικός και προκαλεί σοβαρά προβλήματα υγείας ακόμη και σε μικρές ποσότητες
- Η πλέον τοξική μορφή του, ο μεθυλιδραργύρος, μεταφέρεται στον άνθρωπο μέσω της διατροφής του, με αποτέλεσμα να καθιστά ιδιαίτερα ευπαθείς ομάδες του παγκόσμιου πληθυσμού που τρέφονται σε μεγάλο βαθμό με ψάρια και θαλασσινά
- Ο υδράργυρος μπορεί να μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις κι αυτό τον καθιστά έναν διασυννοριακό ρύπο, παγκόσμιας ανησυχίας

Για όλους αυτούς τους λόγους, δημιουργήθηκαν οδηγίες για τον υδράργυρο, στις οποίες εμπεριέχεται προτροπή προς όλες τις χώρες να αναλάβουν δράση και να λάβουν τα κατάλληλα μέτρα προκειμένου να εντοπιστούν οι πληθυσμοί υψηλού κινδύνου, να μειωθεί η έκθεση στον υδράργυρο και να μειωθούν οι εκπομπές του μετάλλου από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Με πρωτοβουλία του ΟΗΕ από το 2001, γίνεται μελέτη σχετικά με την παρουσία και τις επιπτώσεις του υδραργύρου και ενθάρρυνση όλων των χωρών για συμμετοχή. Από το 2008, οι κυβερνήσεις όλων των χωρών αποφάσισαν να αναπτύξουν νομικές δεσμεύσεις για τον υδράργυρο.

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση υπάρχει σημαντική νομοθεσία που αποβλέπει στην μείωση των εκπομπών του υδραργύρου. Καλύπτει τις βιομηχανικές πηγές, απαιτώντας όλες οι βιομηχανίες να εφαρμόζουν τεχνικές μείωσης των εκπομπών τους. Επιπλέον, περιορίζει τη χρήση του υδραργύρου σε προϊόντα καθημερινής χρήσης και θέτει προϋποθέσεις για την διαχείριση των αποβλήτων. Εφαρμόζοντας όλες αυτές τις πρακτικές οι ευρωπαϊκές εκπομπές έχουν μειωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Η Ελλάδα, ως μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, εφαρμόζει τις συγκεκριμένες διατάξεις.



Σε γενικές γραμμές, τα επίπεδα υδραργύρου έχουν αυξηθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων 150 ετών λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Δεν υπάρχει άμεση λύση του προβλήματος. Ακόμα και αν οι χρήσεις και οι εκπομπές του υδραργύρου σταματήσουν αμέσως, το πρόβλημα θα λυθεί σταδιακά καθώς το παγκόσμιο απόθεμα στην κοινωνία υπάρχει ήδη. Ένα σημαντικό μέρος του υδραργύρου που είναι απελευθερωμένο στο περιβάλλον μπορεί να επανακυκλοφορήσει ξανά και ξανά μέχρι που τελικά θα καταλήξει στον τελικό αποδέκτη.

Πέρα από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση, οι παγκόσμιες εκπομπές υδραργύρου σημειώνουν σταθερή άνοδο λόγω της αυξανόμενης ζήτησης για ηλεκτρική ενέργεια στις αναπτυσσόμενες χώρες. Η συνολική χρήση υδραργύρου παραμένει επίσης αρκετά υψηλή. Μια δραστηριότητα ιδιαίτερα προβληματική στις μέρες μας είναι η χρήση υδραργύρου στην μικρής κλίμακας εξόρυξη χρυσού στην Αφρική, στην Ασία και στην Ν. Αμερική. Ο υδράργυρος που χρησιμοποιείται σε αυτήν την δραστηριότητα είναι η μεγαλύτερη ποσότητα που διαχέεται στο περιβάλλον. Έτσι εκτός από τις εθνικές δράσεις θεωρείται απαραίτητη η συμμετοχή και συνεισφορά σε παγκόσμιες δραστηριότητες και η εντατικοποίηση των προσπαθειών για επιβολή παγκόσμιων νομοθετικών πλαισίων αντιμετώπισης του προβλήματος.

Κλείνοντας, είναι φανερό ότι οι διακριτικές συνεργασίες όλων των χωρών είναι απαραίτητες για την αντιμετώπιση του προβλήματος του υδράργυρου. Η ρύπανση από τον υδράργυρο είναι παγκόσμια και διασυννοριακή, καθώς μετά την έκλυση του, ο υδράργυρος παραμένει στην ατμόσφαιρα για μεγάλο χρονικό διάστημα και έχει την ικανότητα να ταξιδεύει μακριά από την πηγή του. Έτσι, ακόμη και σε περιοχές με ελάχιστες απελευθερώσεις υδράργυρου, μπορεί να παρουσιαστούν υψηλές συγκεντρώσεις. Επομένως, μία κοινή στρατηγική από όλες τις κυβερνήσεις θα φέρει θετικά αποτελέσματα.

Η έλλειψη στοιχείων είναι το πρώτο εμπόδιο που πρέπει να αντιμετωπιστεί. Ένα μελλοντικό βήμα, θα μπορούσε να είναι μία οργανωμένη βάση δεδομένων όπου θα συγκεντρώνονται πληροφορίες για τις πηγές έκλυσης του υδράργυρου και τις χρήσεις του στην καθημερινή ζωή. Αυτή η κίνηση θα βοηθούσε στην λήψη αποφάσεων και την διαχείριση του προβλήματος.

Ένα ακόμη σημαντικό κομμάτι είναι η πληροφόρηση των πολιτών. Εάν οι καταναλωτές είναι απληροφόρητοι ότι μεγάλες ποσότητες υδραργύρου είναι ακόμα σε χρήση, δεν θα είναι σε θέση να αλλάξουν τις καταναλωτικές πρακτικές τους και να συμμετέχουν αποτελεσματικά σε κυβερνητικές αποφάσεις. Συνεπώς απαιτείται εκτενής ενημέρωση του κοινού για τους κινδύνους που σχετίζονται με τον υδράργυρο και τις πρακτικές που μπορούν να εφαρμοσθούν για τη μείωση και τη σταδιακή εξάλειψη του προβλήματος.

Οι χώροι τελικής διάθεσης των απορριμμάτων, αποτελούν τον τελικό αποδέκτη των προϊόντων που περιέχουν υδράργυρο. Οι αυστηροί κανονισμοί, η καλύτερη διαχείριση των αποβλήτων, ο διαχωρισμός των επικίνδυνων και τοξικών ουσιών πριν την τελική διάθεση και η ασφαλής αποθήκευση, θα οδηγήσουν στην μείωση των επιπέδων υδράργυρου στις περιοχές αυτές και στον περιορισμό της διαφυγής του στην ατμόσφαιρα.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Κουϊμτζή Θ., Φυτιάνου Κ., Σαμαρά – Κωνσταντίνου Κ., 1998, Χημεία Περιβάλλοντος, Εκδόσεις Επιστημονικών βιβλίων και περιοδικών University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
2. Κουτσελίνη Αν., 1997, Τοξικολογία , Εκδόσεις Παρισιάνος, Αθήνα.
3. Μαυροβίτης Γεώργιος, Διπλωματική Εργασία, Το παγκόσμιο πρόβλημα του υδράργυρου: διαχειριστικά εργαλεία και στρατηγική αντιμετώπισης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2007
4. Arun B. Mukherjee, Ron Zevenhoven, Jens Brodersen, Lars D. Hylander, Prosun Bhattacharya: Mercury in waste in the European Union: sources, disposal methods and risks, 2004
5. Azevedo R., Rodriguez E., Phytotoxicity of mercury in plants: A Review, Journal of Botany, Volume 2012 (2012), Article ID 848614, 6 pages
6. Batrakova N. et al, Chemical and Physical transformations of Mercury in the ocean: a review, Ocean Science, 2014, 10:1047-1063
7. Charles T. Driscoll, Robert P. Mason, Hing Man Chan, Daniel J. Jacob, and Nicola Pirrone, Mercury as a Global Pollutant: Sources, Pathways, and Effects , Environmental science and technology, 2013, 47, 4967–4983
8. European Commission, Questions and Answers on EU Mercury Policy, Memo, Brussels, 2013
9. European Commission: Commission Staff Working Document, Annex to the Proposal for a Directive Of The European Parliament And Of The Council amending Council Directive 76/769/EEC relating to restrictions on the marketing of certain 184 measuring devices containing mercury Impact Assessment Form, {COM(2006) 69 final}, Brussels, SEC(2006) 194

10. European Commission-DG Environment: Achievements and Obstacles in the implementation of Council Directive 76/464/EEC on Aquatic Pollution Control of Dangerous Substances (1976-2002), Part of the Project “Transitional Provisions for Council Directive 76/464/EEC and Related Directives to the Water Framework Directive 2000/60/EC”, England, December 2003
11. European Environmental Bureau, European Public Health Alliance Environment Network, Health Care Without Harm Europe, Ban Mercury Working Group /Mercury Policy Project: ZERO MERCURY, Key issues and policy recommendations for the EU Strategy on Mercury, UK, December 2005
12. Jung-Duck Park, Wei Zheng, Human exposure and health effects of inorganic and elemental mercury, *Journal of preventive medicine and public health*, 2012, 45:344-352
13. Kim M., Zoh K., Fate and Transport of Mercury in environmental Media and human exposure, *Journal of Preventive Medicine & Public Health*, 2012, 45:335-343
14. Morel F. et al, The chemical cycle and bioaccumulation of mercury, *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 1998, 29:543-66
15. N. Pirrone, S. Cinnirella, X. Feng, R. B. Finkelman, H. R. Friedli, J. Leaner, R. Mason, A. B. Mukherjee, G. B. Stracher, D. G. Streets, and K. Telmer, Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources, *Atmospheric chemistry and physics*, 10, 5951-5964, 2010
16. Noel E. Selin, Global Biochemical Cycling of Mercury: A Review, *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 2009, 34:43-63
17. Questions & Answers on the EU Mercury Strategy, Brussels, 2008
18. Rice K. et al, Environmental mercury and its toxic effects, *Journal of preventive medicine and public health*, 2014, 47:74-83
19. Sai Liang, Yafei Wang, Sergio Cinnirella, and Nicola Pirrone, Atmospheric mercury footprints of nations, *environmental science and technology*, 2015, 49, 3566–3574
20. Selin N., Global Biogeochemical Cycling of Mercury: A Review, *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 2009, 34:43-63

21. Sklyberg U, Bloom PR, Qian J, Lin CM, Bleam WF, 2006, Complexation of mercury (II) in soil organic matter: EXAFS evidence for linear two- coordination with reduced sulfur groups. Environmental Science & Technology 40: 4174-4180
22. UNEP, Global Mercury Assessment, Sources, Emissions, Releases and Environmental Transport, 2013
23. UNEP: Global Mercury Assessment, UNEP Chemicals, Geneva, Switzerland, December 2002
24. Vetriani et al, Mercury Adaptation among Bacteria from a Deep-Sea Hydrothermal Vent, Applied and environmental microbiology, 2005, 71:220-226
25. Wangberg I. et al, Mercury cycling in the environment-Effects of climate change, Swedish Environmental Research Institute, 2010
26. <http://www.env-health.org/>  
<http://www.ec.gc.ca/mercure-mercury/>
28. <http://www.state.nj.us/dep/dsr/>
29. <http://www.mlsi.gov.cy/>
30. [http://ec.europa.eu/environment/chemicals/mercury/restriction\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/chemicals/mercury/restriction_en.htm)
31. <http://www.mercuryconvention.org/>
32. [www.who.int](http://www.who.int)
33. <http://www.epa.gov/mercury/eco.htm>