

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ «ΝΕΟ» ΔΙΕΘΝΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΝΑΔΩΝ (SI). ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ, ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΥ

Χρήστος Μπαντής, Ευμορφία Κοκκίνη, Κωνσταντίνος Ζαχαρίας, Σάββας Σλαβάκης
Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας (ΕΙΜ) - Εθνικό Σύστημα Υποδομών Ποιότητας (ΕΣΥΠ),
ΒΙ.ΠΕ.Θ Σίνδου, Οικ. Τετ. 45, 57022 Θεσσαλονίκη
e-mail: bandis@eim.gr

Περίληψη

Από το 2019, όλες οι μονάδες μέτρησης του διεθνούς συστήματος μονάδων (SI) ορίζονται με έναν πιο αόριστο τρόπο, χωρίς αναφορά σε συγκεκριμένα πρότυπα και χωρίς άμεση σύνδεση με την πρακτική υλοποίηση αυτών, χάνοντας έτσι την απλότητα παλαιότερων ορισμών που χρησιμοποιούσαν υλικά πρότυπα.

Όλες οι μονάδες του SI ορίζονται από τον ακριβή καθορισμό των τιμών επτά φυσικών σταθερών όταν αυτές εκφράζονται στις μονάδες μέτρησης του SI. Οι σταθερές αυτές είναι η συχνότητα μετάπτωσης υπέρλεπτης υφής του ατόμου του καυσίου 133 στη θεμελιώδη του κατάσταση $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, η ταχύτητα του φωτός στο κενό c , η σταθερά του Planck h , το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο e , η σταθερά Boltzmann k , η σταθερά του Avogadro N_A , και η σταθερά της φωτεινής απόδοσης K_{cd} .

Στην εργασία αυτή θα παρουσιαστεί με όσο το δυνατό απλούστερους τεχνικούς όρους ο νέος ορισμός του SI, η αναγκαιότητα που οδήγησε σε αυτόν καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά του.

Λέξεις-Κλειδιά: Μονάδες μετρήσεων, διεθνές σύστημα μονάδων-νέος ορισμός, SI, φυσικό σύστημα μονάδων.

Abstract

Since 2019, all the measurement units of the international system of units (SI) are defined with an abstract and idealized formulation, separated conceptually from their realizations. In such a way there is no clear connection to the practical realization of the units losing the simplicity of the previous definitions which were using material prototypes.

The SI is now defined in terms of a set of seven defining constants. The complete system of units can be derived from the fixed values of these defining constants, expressed in the units of the SI. These defining constants are the hyperfine transition frequency of caesium $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, the speed of light in vacuum c , the Planck constant h , the elementary charge e , the Boltzmann constant k , the Avogadro constant N_A , and the luminous efficacy K_{cd} .

In the present paper we present with as simple as possible technical terms the “new” definition of SI, its advantages, disadvantages as well as the necessity for it.

Keywords: Measurement units, international system of units – new definition, SI, natural system of units.

Χ. Μπαντής, Ε. Κοκκίνη, Κ. Ζαχαρίας, Σ. Σλαβάκης, Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας (ΕΙΜ)
Εισαγωγή στο νέο διεθνές σύστημα μονάδων (SI). Αναγκαιότητα, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτού.

1. Εισαγωγή

Ιστορικά οι άνθρωποι δημιούργησαν και χρησιμοποίησαν πολλά διαφορετικά συστήματα μονάδων μέτρησης που βασίστηκαν σε αυθαιρέτους ορισμούς μονάδων αλλά και τρόπους υλοποίησης αυτών. Τα συστήματα μονάδων αυτά (π.χ. βαβυλωνιακό σύστημα, αιγυπτιακό σύστημα, ελληνικό, ρωμαϊκό, κινέζικο, βρετανικό και άλλα) συχνά δεν είχαν αρκετή ακρίβεια και ήταν αντιφατικά μεταξύ τους. Η ανάγκη για ένα σωστά ορισμένο σύστημα μονάδων που θα χρησιμοποιείται όχι μόνο για επιστημονικούς σκοπούς αλλά και για εμπορικούς γινόταν με το πέρασμα των αιώνων όλο και μεγαλύτερη, με αποτέλεσμα στα τέλη του 18^{ου} αιώνα η Γαλλική Ακαδημία Επιστημών να ξεκινήσει τις προσπάθειες για την δημιουργία ενός επιστημονικά τεκμηριωμένου μετρικού συστήματος μονάδων. Οι διαρκείς προσπάθειες των επιστημόνων σε διεθνές επίπεδο οδήγησε το 1960 στη δημιουργία του διεθνούς συστήματος μονάδων (Système international d'unités) γνωστό διεθνώς με τη συντομογραφία SI.

Οι μονάδες του συστήματος SI διαχωρίζονται σε ένα σετ επτά αποκαλούμενων θεμελιωδών μονάδων και σε όλες τις υπόλοιπες, τις αποκαλούμενες παραγόμενες μονάδες, οι οποίες προκύπτουν ως γινόμενα δυνάμεων των θεμελιωδών. Η επιλογή της ομάδας των θεμελιωδών μονάδων φυσικά δεν ήταν και δεν είναι μοναδική. Για τον ορισμό των θεμελιωδών μονάδων μέχρι και πρότινος διάφοροι τύποι ορισμών χρησιμοποιούνταν: παραδείγματος χάριν για τον ορισμό του χιλιόγραμμου, kg, χρησιμοποιούνταν το *πρωτότυπο* χιλιόγραμμο, κατασκευασμένο από ειδικό κράμα Pt-Ir που φυλάσσεται στο διεθνές γραφείο μέτρων και σταθμών (Bureau international des poids et mesures, BIPM), για τον ορισμό της μονάδας του kelvin χρησιμοποιούνταν μια συγκεκριμένη *φυσική κατάσταση*, αυτή του τριπλού σημείου του νερού, ενώ για το ορισμό του ampere χρησιμοποιούνταν μία *ιδεατή πειραματική διάταξη* με αγωγούς απείρου μήκους, αμελητέας κυκλικής διατομής. Τέλος για τον ορισμό του μέτρου χρησιμοποιούνταν μια *φυσική σταθερά* αυτή της ταχύτητας του φωτός.

Για να μπορούν οι μονάδες μέτρησης να χρησιμοποιηθούν σε όλες τις πιθανές εφαρμογές (επιστημονικές και εμπορικές) πρέπει όχι μόνο να είναι ξεκάθαρα ορισμένες, αλλά και να μπορούν να υλοποιηθούν με αξιοπιστία και ακρίβεια, ώστε η διάδοσή τους να μπορεί να γίνει με την απαιτούμενη αβεβαιότητα και ιχνηλάσιμο τρόπο. Στη περίπτωση του ορισμού με τη χρήση *πρωτότυπου*, ο ορισμός της μονάδας και η υλοποίησή της καθορίζεται ταυτόχρονα με τρόπο εύκολα αντιληπτό ακόμη και από μη ειδικούς. Παρόλα αυτά η χρήση του πρωτότυπου εγκυμονεί τους κίνδυνους της καταστροφής του, της αλλοίωσής του με το χρόνο κ.α. Οι άλλοι τρόποι ορισμού των θεμελιωδών μονάδων μέτρησης γίνονται διαδοχικά πιο δύσκολα κατανοητοί αλλά και αφηρημένοι.

Ο «νέος» ορισμός του SI, ο οποίος τέθηκε σε ισχύ στις 20 Μαΐου 2019 (BIPM 2019), προσπαθεί να εκμεταλλευτεί τις τεράστιες προόδους που έγιναν σε επιστημονικό και τεχνολογικό επίπεδο στην ατομική και κβαντική φυσική αλλά και στο χώρο της ειδικής και γενικής θεωρίας της σχετικότητας (Taylor 2009, Gläser et al. 2010, Foster 2010, Zwinkels 2010). Εισάγει δε μία νέα προσέγγιση για την επιλογή και δημιουργία των ορισμών των επτά θεμελιωδών μονάδων, αυτή του ορισμού των τιμών επτά «καθοριστικών» φυσικών σταθερών. Με τον τρόπο αυτό η υλοποίηση των μονάδων διαχωρίζεται από τους ορισμούς, έτσι ώστε να μπορεί να πραγματοποιείται ανεξάρτητα σε οποιοδήποτε μέρος και σε οποιοδήποτε τόπο και να μπορεί να εκμεταλλεύεται οποιαδήποτε μελλοντική τεχνολογική πρόοδο χωρίς αυτή να εισάγει και την ανάγκη για αλλαγή των ορισμών.

X. Μπαντής, Ε. Κοκκίνη, Κ. Ζαχαρίας, Σ. Σλαβάκης, Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας (EIM)
Εισαγωγή στο νέο διεθνές σύστημα μονάδων (SI). Αναγκαιότητα, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτού.

2. Ορισμός του SI (BIPM 2019):

Το διεθνές σύστημα μονάδων, το SI, είναι το σύστημα των μονάδων στο οποίο

- η συχνότητα μετάπτωσης της υπέρλεπτης υφής του ατόμου του καισίου 133 στην αδιατάραχτη θεμελιώδη του κατάσταση, $\Delta\nu_{Cs}$, είναι 9 192 631 770 Hz,
- η ταχύτητα του φωτός στο κενό, c , είναι 299 792 458 m/s,
- η σταθερά του Planck, h , είναι $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J s,
- το στοιχειώδες φορτίο, e , είναι $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C,
- η σταθερά του Boltzmann, k , είναι $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ J/K,
- η σταθερά το Avogadro, N_A , είναι $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ mol⁻¹,
- η φωτεινή απόδοση της μονοχρωματικής ακτινοβολίας συχνότητας 540×10^{12} Hz, K_{cd} , είναι 683 lm/W,

όπου το hertz, joule, coulomb, lumen, και watt με σύμβολα μονάδων Hz, J, C, lm, και W, αντίστοιχα, σχετίζονται με τις μονάδες second, meter, kilogram, ampere, kelvin, mole, και candela, με σύμβολα μονάδων s, m, kg, A, K, mol, και cd, αντίστοιχα, σύμφωνα με $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$, $\text{J} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$, $\text{C} = \text{A s}$, $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$, και $\text{W} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$.

Οι τιμές των παραπάνω σταθερών έχουν επιλεγεί έτσι ώστε να διασφαλιστεί κατά το δυνατόν η ιστορική συνέχεια του συστήματος SI με προηγούμενους ορισμούς.

Με άλλα λόγια με το παραπάνω ορισμό ουσιαστικά ορίζονται απευθείας:

- η μονάδα συχνότητας, το hertz (Hz),
- η μονάδα ταχύτητας, το metre per second (m/s),
- η μονάδα της στροφορμής και της δράσης, το joule-second (J·s),
- η μονάδα του στοιχειώδους φορτίου, το coulomb (C),
- η μονάδα της εντροπίας και της θερμοχωρητικότητας, joule per kelvin (J/K),
- η σταθερά μετατροπής μεταξύ της ποσότητας της ύλης και του αριθμού στοιχειωδών σωματιδίων που εμπεριέχει, σωματίδια ανά mole
- και η σταθερά μετατροπής μεταξύ της ισχύος που μεταφέρει η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και της οπτικής αίσθησης που προκαλεί στους ανθρώπους lumen ανά watt.

Ξεκινώντας από τον ορισμό του SI με τον καθορισμό των επτά σταθερών, οι ορισμοί των επτά θεμελιωδών μονάδων συνεπάγονται χρησιμοποιώντας μία ή περισσότερες κατάλληλες σταθερές και έχουν ως εξής:

Το second (δευτερόλεπτο)

Το second, με σύμβολο το s, είναι η μονάδα χρόνου του SI. Ορίζεται από την απαίτηση η αριθμητική τιμή της συχνότητας μετάπτωσης, $\Delta\nu_{Cs}$, της υπέρλεπτης υφής του ατόμου του καισίου 133 στην αδιατάραχτη θεμελιώδη του κατάσταση να είναι εξ ορισμού 9 192 631 770 όταν αυτή εκφράζεται στη μονάδα Hz, το οποίο ισούται με s⁻¹.

Ο ορισμός αυτός καθορίζει επακριβώς την σχέση $\Delta\nu_{Cs} = 9\ 192\ 631\ 770$ Hz ή

$$1\ \text{Hz} = \frac{\Delta\nu_{Cs}}{9\ 192\ 631\ 770} \quad \text{ή} \quad 1\ \text{s} = \frac{9\ 192\ 631\ 770}{\Delta\nu_{Cs}}$$

Χ. Μπαντής, Ε. Κοκκίνη, Κ. Ζαχαρίας, Σ. Σλαβάκης, Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας (EIM)
Εισαγωγή στο νέο διεθνές σύστημα μονάδων (SI). Αναγκαιότητα, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτού.

Συνέπεια του ορισμού είναι ότι η χρονική διάρκεια του ενός second ισούται ακριβώς με 9 192 631 770 περιόδους της ακτινοβολίας μετάπτωσης μεταξύ των δύο ενεργειακών σταθμών της υπέρλεπτης υφής του ατόμου του καυσίου 133 στην αδιατάρακτη θεμελιώδη του κατάσταση.

Η αναφορά σε αδιατάρακτη κατάσταση γίνεται ώστε να είναι ξεκάθαρο ότι ο ορισμός βασίζεται σε άτομο απομονωμένο από κάθε εξωτερικό πεδίο ή διαταραχή όπως η ακτινοβολία μέλανος σώματος από το περιβάλλον.

Τέλος πρέπει να αναφέρουμε ότι το second όπως ορίζεται είναι η μονάδα του ιδιοχρόνου (proper time) όταν κανείς αναφέρεται στο πλαίσιο της γενικής θεωρίας της σχετικότητας και επομένως για την χρήση ή την σύγκριση ρολογιών σε διαφορετικές τοποθεσίες είναι επιβεβλημένο να γίνονται όλες οι σχετικιστικές διορθώσεις στις συχνότητες

To meter (μέτρο)

Το meter, με σύμβολο το m, είναι η μονάδα μήκους του SI. Ορίζεται από την απαίτηση η αριθμητική τιμή της ταχύτητας του φωτός στο κενό, c , να είναι εξ ορισμού 299 792 458 όταν αυτή εκφράζεται στις μονάδες m s^{-1} , όπου το second ορίζεται σα συνάρτηση της συχνότητας του καυσίου $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Ο ορισμός αυτός καθορίζει επακριβώς την σχέση $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$ ή

$$1 \text{ m} = \left(\frac{c}{299\,792\,458} \right) \text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{299\,792\,458} \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}} \approx 30,663\,319 \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}$$

Συνέπεια του ορισμού είναι ότι ένα μέτρο είναι το μήκος του διαστήματος που διανύει το φως στο κενό σε χρόνο ίσο με $1 / 299\,792\,458$ του second.

To kilogram (χιλιόγραμμα)

Το kilogram, με σύμβολο το kg, είναι η μονάδα μάζας του SI. Ορίζεται από την απαίτηση η αριθμητική τιμή της σταθεράς του Planck, h , να είναι εξ ορισμού $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ όταν αυτή εκφράζεται στις μονάδες J s, που ισούνται με $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$, όπου το meter και το second ορίζονται σα συνάρτηση του c και του $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Ο ορισμός αυτός καθορίζει επακριβώς την σχέση $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$ ή

$$1 \text{ kg} = \left(\frac{h}{6,626\,070\,15 \times 10^{-34}} \right) \text{ m}^{-2} \text{ s}$$
$$1 \text{ kg} = \frac{(299\,792\,458)^2}{(6,626\,070\,15 \times 10^{-34})(9\,192\,631\,770)} \frac{h \Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2} \approx 1,475\,5214 \times 10^{40} \frac{h \Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2}$$

Ο αριθμός της σταθεράς του Planck επιλέχθηκε στον ορισμό αυτό έτσι ώστε το 1 kg να είναι ίσο με την μάζα του διεθνούς πρωτότυπου $m(\mathcal{K}) = 1 \text{ kg}$ με σχετική τυπική αβεβαιότητα 1×10^{-8} , η οποία ήταν η τυπική αβεβαιότητα όλων των καλύτερων εκτιμήσεων της τιμής της σταθεράς του Planck τότε.

To Ampere

Χ. Μπαντής, Ε. Κοκκίνη, Κ. Ζαχαρίας, Σ. Σλαβάκης, Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας (EIM)
Εισαγωγή στο νέο διεθνές σύστημα μονάδων (SI). Αναγκαιότητα, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτού.

Το Ampere, με σύμβολο το A, είναι η μονάδα του ηλεκτρικού ρεύματος του SI. Ορίζεται από την απαίτηση η αριθμητική τιμή του στοιχειώδους φορτίου, e , να είναι εξ ορισμού $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ όταν αυτό εκφράζεται στη μονάδα C, που ισούται με A s, όπου το second ορίζεται σα συνάρτηση του $\Delta\nu_{Cs}$.

Ο ορισμός αυτός καθορίζει επακριβώς την σχέση $e = 1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ A s ή

$$1\ \text{A} = \left(\frac{e}{1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}} \right) s^{-1}$$

$$1\ \text{A} = \left(\frac{1}{(9\ 192\ 631\ 770)(1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19})} \right) \Delta\nu_{Cs} e \approx 6,789\ 6868\ \Delta\nu_{Cs} e$$

Συνέπεια του ορισμού είναι ότι ένα Ampere είναι το ηλεκτρικό ρεύμα που αντιστοιχεί στη ροή $1 / (1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19})$ στοιχειωδών φορτίων ανά δευτερόλεπτο.

To kelvin

Το kelvin, με σύμβολο το K, είναι η μονάδα της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας του SI. Ορίζεται από την απαίτηση η αριθμητική τιμή της σταθεράς του Boltzmann k , να είναι εξ ορισμού $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ όταν αυτή εκφράζεται στις μονάδες J K^{-1} , που ισούνται με $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$, όπου το kilogram, το meter και το second ορίζονται σα συνάρτηση του h , c και του $\Delta\nu_{Cs}$.

Ο ορισμός αυτός καθορίζει επακριβώς την σχέση $k = 1,380\ 649 \times 10^{-23}$ $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ ή

$$1\ \text{K} = \left(\frac{1,380\ 649 \times 10^{-23}}{k} \right) \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$$

$$1\ \text{K} = \left(\frac{1,380\ 649 \times 10^{-23}}{(6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34})(9\ 192\ 631\ 770)} \right) \frac{\Delta\nu_{Cs} h}{k} \approx 2,266\ 6653 \frac{\Delta\nu_{Cs} h}{k}$$

Συνέπεια του ορισμού είναι ότι ένα kelvin ισούται με αλλαγή της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας που έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της θερμικής ενέργειας kT κατά $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ J.

To mole

Το mole, με σύμβολο το mol, είναι η μονάδα της ποσότητας μίας ουσίας του SI. Ένα mol περιέχει ακριβώς $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ στοιχειώδεις οντότητες. Ο αριθμός αυτός είναι η εξ ορισμού αριθμητική τιμή της σταθεράς του Avogadro, N_A , όταν αυτή εκφράζεται στη μονάδα mol^{-1} και ονομάζεται ο αριθμός Avogadro.

Η ποσότητα της ουσίας, με σύμβολο n , ενός συστήματος είναι ένα μέτρο του αριθμού των καθορισμένων στοιχειωδών οντοτήτων που περιέχει. Στοιχειώδης οντότητα μπορεί να είναι ένα άτομο, ένα μόριο, ένα ιόν, ένα ηλεκτρόνιο, ένα οποιοδήποτε άλλο σωματίδιο ή καθορισμένη ομάδα σωματιδίων.

Ο ορισμός αυτός καθορίζει επακριβώς την σχέση $N_A = 6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ mol^{-1} ή

Χ. Μπαντής, Ε. Κοκκίνη, Κ. Ζαχαρίας, Σ. Σλαβάκης, Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας (EIM)
Εισαγωγή στο νέο διεθνές σύστημα μονάδων (SI). Αναγκαιότητα, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτού.

$$1 \text{ mol} = \left(\frac{6,022\,140\,76 \times 10^{23}}{N_A} \right)$$

Συνέπεια του ορισμού είναι ότι ένα mole είναι η ποσότητα της ουσίας ενός συστήματος που περιέχει $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ καθορισμένες στοιχειώδεις οντότητες.

Στη πράξη η λέξη ουσία στον όρο «ποσότητα ουσίας» αντικαθίσταται από το όνομα της ουσίας για παράδειγμα «ποσότητα ατόμων οξυγόνου».

Η candela

Η candela, με σύμβολο cd, είναι η μονάδα της φωτεινής έντασης σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση του SI. Ορίζεται από την απαίτηση η αριθμητική τιμή της φωτεινής απόδοσης της μονοχρωματικής ακτινοβολίας συχνότητας 540×10^{12} Hz, K_{cd} , να είναι εξ ορισμού 683 όταν αυτή εκφράζεται στις μονάδες lm W^{-1} , που ισούται με cd sr W^{-1} ή $\text{cd sr kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3$, όπου το kilogram, το meter και το second ορίζονται σα συνάρτηση του h , c και του $\Delta\nu_{Cs}$.

Ο ορισμός αυτός καθορίζει επακριβώς την σχέση $K_{cd} = 683 \text{ cd sr kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3$ για την μονοχρωματική ακτινοβολία συχνότητας $\nu = 540 \times 10^{12}$ Hz, ή

$$\begin{aligned} 1 \text{ cd} &= \left(\frac{K_{cd}}{683} \right) \text{ cd sr kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3 \\ &= \frac{1}{(6,626\,070\,15 \times 10^{-34}) (9\,192\,631\,770)^2 683} (\Delta\nu_{Cs})^2 h K_{cd} \approx \\ &\approx 2,614\,8305 \times 10^{10} (\Delta\nu_{Cs})^2 h K_{cd} \end{aligned}$$

Το αποτέλεσμα του ορισμού είναι ότι μία candela είναι η φωτεινή ένταση, σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση, πηγής μονοχρωματικής ακτινοβολίας συχνότητας 540×10^{12} Hz και έντασης ακτινοβολίας στην κατεύθυνση αυτή ίση με $(1/683) \text{ W sr}^{-1}$.

3. Υλοποίηση των μονάδων του SI.

Οι πειραματικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση των μονάδων στο πιο υψηλό επίπεδο με χρήση εξισώσεων φυσικής είναι γνωστές ως θεμελιώδεις μέθοδοι υλοποίησης των μονάδων. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι επιτρέπουν την μέτρηση μίας ποσότητας στη συγκεκριμένη μονάδα χρησιμοποιώντας μόνο μετρήσεις ποσοτήτων που δεν αφορούν τη μονάδα αυτή.

Έτσι αντί για κάθε ορισμό να ορίζουμε μία συγκεκριμένη φυσική κατάσταση ή μέθοδο, από την οποία εξαρτάται και η ακρίβεια της υλοποίησης, ο χρήστης τώρα είναι ελεύθερος να επιλέγει οποιαδήποτε εξίσωση της φυσικής που συνδέει τις φυσικές σταθερές του ορισμού του SI με το προς μέτρηση μέγεθος. Είναι προφανές ότι ο τρόπος αυτός ορισμού του SI είναι πολύ πιο γενικός και δεν περιορίζεται από τις σημερινές επιστημονικές μεθόδους και τεχνολογικές δυνατότητες. Με αυτό τον τρόπο, θεωρητικά, δεν υπάρχει όριο στην ακρίβεια με την οποία μπορεί να υλοποιηθεί μία μονάδα. Μόνη εξαίρεση αποτελεί το second, για το οποίο εξακολουθεί να χρησιμοποιείται η μικροκομματική μετάπτωση του καισίου.

4. Συμπεράσματα

Χ. Μπαντής, Ε. Κοκκίνη, Κ. Ζαχαρίας, Σ. Σλαβάκης, Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας (EIM)
Εισαγωγή στο νέο διεθνές σύστημα μονάδων (SI). Αναγκαιότητα, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτού.

Ο «νέος» ορισμός του SI εκμεταλλεύεται τις τεράστιες προόδους που έγιναν σε επιστημονικό και τεχνολογικό επίπεδο στην ατομική και κβαντική φυσική αλλά και στο χώρο της ειδικής και γενικής θεωρίας της σχετικότητας. Εισάγοντας μία νέα προσέγγιση για την επιλογή και δημιουργία των ορισμών των επτά θεμελιωδών μονάδων, ο νέος ορισμός διαχωρίζει τους ορισμούς από την υλοποίηση των μονάδων. Έτσι οι ορισμοί δεν χρειάζονται τροποποιήσεις κάθε φορά που νέες επιστημονικές και τεχνολογικές δυνατότητες γίνονται διαθέσιμες, ούτε εξαρτώνται από φθαρτά πρωτότυπα. Ο χρήστης τώρα είναι ελεύθερος να επιλέγει οποιαδήποτε εξίσωση της φυσικής που συνδέει τις φυσικές σταθερές του ορισμού του SI με το προς μέτρηση μέγεθος, με μοναδικό στόχο την καλύτερη ακρίβεια υλοποίησης των μονάδων.

Το μοναδικό μειονέκτημα των νέων πιο αφηρημένων ορισμών είναι ότι γίνονται πιο δύσκολα κατανοητοί ειδικά από το γενικό πληθυσμό και τους μαθητές. Προς αυτή την κατεύθυνση, κατά τη γνώμη μας, υπάρχει πολύς χώρος ώστε να βρεθούν τρόποι που παρουσιάζουν και εξηγούν το σημερινό ορισμό του SI (Chao *et al.* 2017), καθώς και τους ορισμούς όλων των θεμελιωδών μονάδων σε μη ειδικούς.

5. Βιβλιογραφία

BIPM - Bureau International des Poids et Mesures, “*The International System of Units (SI)*”, 9th edition, 2019.

Chao, L. S. et al. “*A LEGO Watt balance: An apparatus to determine a mass based on the new SI.*” *Am. J. Phys.* 83, 913–922 (2015).

Gläser, M., Borys, M., Ratschko, D. & Schwartz, R. “*Redefinition of the kilogram and the impact on its future dissemination*”, *Metrologia* 47, 419–428 (2010).

Foster, M. P. “*The next 50 years of the SI: a review of the opportunities for the e-Science age*”. *Metrologia* 47, R41–R51 (2010).

Zwinkels, J. C., Ikonen, E., Fox, N. P., Ulm, G. & Rastello, M. L. “*Photometry, radiometry and ‘the candela’: evolution in the classical and quantum world*”. *Metrologia* 47, R15–R32 (2010).

Χ. Μπαντής, Ε. Κοκκίνη, Κ. Ζαχαρίας, Σ. Σλαβάκης, Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας (ΕΙΜ)
Εισαγωγή στο νέο διεθνές σύστημα μονάδων (SI). Αναγκαιότητα, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτού.

8^ο Συνέδριο Μετρολογίας
Θεσσαλονίκη, 1-2 Ιουλίου 2022
