

Φορητές συσκευές μέτρησης της αρτηριακής πίεσης – Νέες προοπτικές διαχείρισης της αρτηριακής υπέρτασης στην ψηφιακή εποχή

Δ. Κωνσταντινίδης¹
Φ. Τατάκης¹
Σ. Δρογκάρης¹
Κ. Χαλμούκου¹
Κ. Δημητριάδης¹
Κ. Τσιούφης¹

Π. Ηλιάκης¹
Ε. Σιάφης¹
Δ. Πολύζος¹
Ι. Ανδρικού¹
Κ. Θωμόπουλος²

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μέτρηση της αρτηριακής πίεσης εκτός ιατρείου αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της διάγνωσης και της διαχείρισης της υπέρτασης. Διανύοντας την εποχή της προηγμένης ψηφιακής τεχνολογίας, έχουν αναπτυχθεί μικρές, φορητές συσκευές παρακολούθησης της αρτηριακής πίεσης. Αυτές οι συσκευές επιτρέπουν συχνές μετρήσεις της αρτηριακής πίεσης με ελάχιστη ενόχληση για τον ασθενή και αναμένεται να βελτιώσουν σημαντικά την ποιότητα ανίχνευσης αλλά και διαχείρισης των υπερτασικών ατόμων, αυξάνοντας τον αριθμό των μετρήσεων σε διαφορετικές καταστάσεις, καθώς και επιτρέποντας την ακριβή ανίχνευση φαινοτύπων που έχουν αρνητικό αντίκτυπο στην καρδιαγγειακή πρόγνωση, όπως η συγκαθυμμένη υπέρταση και η παθολογική μεταβλητότητα της αρτηριακής πίεσης. Οι συχνές μετρήσεις της αρτηριακής πίεσης και η προσθήκη νέων χαρακτηριστικών μεταβλητότητας της αρτηριακής πίεσης, επιτρέπουν την ερμηνεία των δεδομένων της αρτηριακής πίεσης στο ευρύτερο πλαίσιο του καθημερινού στρες και των ενίοτε διαφορετικών καταστάσεων στις οποίες εκτίθεται συχνά ο υπερτασικός ασθενής. Στο άρθρο αυτό γίνεται ανασκόπηση των διαφορετικών τεχνολογιών και τύπων φορητών συσκευών μέτρησης της ΑΠ.

 **Λέξεις-κλειδιά:** Φορητές συσκευές μέτρησης της αρτηριακής πίεσης, μεταβλητότητα αρτηριακής πίεσης

Η αρτηριακή υπέρταση (ΑΥ) είναι ο πιο διαδεδομένος παράγοντας κινδύνου για καρδιαγγειακές παθήσεις, καθώς αφορά περίπου ένα δισεκατομμύριο ανθρώπους παγκοσμίως και ο επιπολασμός της προβλέπεται να αγγίξει το 1,5 δις. το 2025¹. Έχει αναγνωριστεί ως ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες κινδύνου για την ολική θνησιμότητα, αλλά και η βασικότερη αιτία καρδιαγγεια-

κής θνησιμότητας, νοσηρότητας και αναπηρίας παγκοσμίως. Η καρδιαγγειακή θνητότητα — σε πρόσφατα δεδομένα — ήταν η κύρια αιτία θανάτου στην Ιταλία και την Κίνα, ακόμα και κατά τη διάρκεια της νέας πανδημίας του κοροναϊού 2019 (COVID-19)^{2,3}.

Ο έλεγχος της αρτηριακής πίεσης (ΑΠ) με τιμές εντός των στόχων θεωρείται σημαντικός για τη βελ-

¹ Μονάδα Υπέρτασης, 1η Πανεπιστημιακή Καρδιολογική Κλινική, ΓΝΑ «Ιπποκράτειο» ² Καρδιολογικό Τμήμα, ΓΝΑ «Ελένα Βενιζέλου»

✉ **Αλληλογραφία:** Δ. Κωνσταντινίδης, Βασ. Σοφίας 108, ΤΚ: 11527 • Τηλ.: 213-2088386 • Φαξ: 213-2089522

• Email: kon_dimitris@hotmail.com

τίωση της καρδιαγγειακής πρόγνωσης⁴. Η επιτυχής θεραπεία, όπως άλλωστε και σε όλες τις χρόνιες παθήσεις, απαιτεί δύο βασικά στοιχεία: (1) την έγκαιρη διάγνωση και χορήγηση της κατάλληλης αγωγής και υγιεινοδιαιτητικών συστάσεων από τους θεράποντες ιατρούς και (2) τη συμμόρφωση στο θεραπευτικό σχήμα και στις ιατρικές συστάσεις από τους ασθενείς. Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί πολλά ασφαλή και αποτελεσματικά φάρμακα, η ΑΥ συνεχίζει να αποτελεί μαζί με το κάπνισμα τον βασικότερο παράγοντα καρδιαγγειακής νοσηρότητας και θνησιμότητας στον κόσμο, συμπεριλαμβανομένων τόσο των ανεπτυγμένων όσο και των αναπτυσσόμενων χωρών. Αυτό εν μέρει αποδίδεται στην καθυστερημένη πολλές φορές διάγνωση, αλλά και τους περιορισμούς των διαγνωστικών και θεραπευτικών προσεγγίσεων που εφαρμόστηκαν μέχρι σήμερα, σηματοδοτώντας την επιτακτική ανάγκη για νέες στρατηγικές βελτιστοποίησης της διαχείρισης της υπέρτασης.

Τα τελευταία χρόνια οι μετρήσεις ΑΠ εκτός ιατρείου έχουν σημαντικό ρόλο στη ρύθμιση της ΑΥ και αυτό καταδεικνύεται και στις πρόσφατες κατευθυντήριες οδηγίες που συνιστούν αυξημένη χρήση των μετρήσεων εκτός ιατρείου για βελτιστοποίηση της διαχείρισης των υπεртаσικών ατόμων^{4,5}. Η 24ωρη περιπατητική καταγραφή της ΑΠ (ABPM) και οι μετρήσεις της ΑΠ στο σπίτι (HBPM) είναι δυο αποδεκτές μέθοδοι εκτίμησης του αιμοδυναμικού φορτίου εκτός ιατρείου, που είναι διαθέσιμες στην καθ' ημέρα κλινική πράξη. Ωστόσο, ο αριθμός των μετρήσεων που μπορούν να συλλεχθούν με αυτές τις δύο μεθόδους είναι περιορισμένος. Επιπλέον, η περιπατητική καταγραφή πολλές φορές δεν είναι καλά ανεκτή από τους ασθενείς, ενώ οι μετρήσεις στο σπίτι εγκυμονούν τον κίνδυνο της περιορισμένης αξιοπιστίας. Μια φορητή συσκευή παρακολούθησης της ΑΠ που θα μπορούσε να μετρήσει τα επίπεδα ΑΠ τόσο εντός όσο και εκτός ιατρείου, θα ήταν πολύτιμη για τη μακροπρόθεσμη διαχείριση της υπέρτασης, ιδιαίτερα στην εποχή της ψηφιακής επανάστασης των τηλεπικοινωνιών.

Μέθοδοι μέτρησης της ΑΠ

Ο Norman Kaplan είχε πει: «Η μέτρηση της αρτηριακής πίεσης είναι πιθανώς η κλινική εξέταση με τη μεγαλύτερη σημασία που πραγματοποιείται με τον πιο πρόχειρο τρόπο»⁶. Προς το παρόν, οι κοινές

μη επεμβατικές μέθοδοι εκτίμησης της ΑΠ περιλαμβάνουν ακουστικές και αυτοματοποιημένες μετρήσεις βασισμένες στη χρήση περιχειρίδας (αεροθαλάμου). Ωστόσο, υπάρχουν σημαντικά μειονεκτήματα σε αυτές τις μεθόδους. Πιο συγκεκριμένα, οι προσεγγίσεις με τη χρήση αεροθαλάμου δεν μπορούν να παρέχουν συνεχείς μετρήσεις της ΑΠ, καθώς απαιτείται 1 έως 2 λεπτών παύση τόσο για την αιμοδυναμική ανάκτηση όσο και για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων μέτρησης⁷. Ένας άλλος περιορισμός είναι ότι η μέτρηση της ΑΠ εξαρτάται από την επαρκή διόγκωση του αεροθαλάμου και τη συμπίεση του άκρου, κάτι που είναι ενεργοβόρο και δύσκολο ανεκτό από τον ασθενή. Ιδανικά, η συνεχής παρακολούθηση της ΑΠ αποτελεί βασική παράμετρο για την ανίχνευση, τον έλεγχο και τη θεραπεία αιμοδυναμικών παθήσεων όπως η υπέρταση⁸, παρά το γεγονός ότι η δυνατότητα μέτρησης της ΑΠ με αυτόν τον τρόπο είναι, προς το παρόν τουλάχιστον, περιορισμένη. Ο αρτηριακός καθετηριασμός είναι μια κοινή μέθοδος συνεχούς παρακολούθησης της ΑΠ, αλλά αυτή η προσέγγιση είναι επεμβατική, δαπανηρή και χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά στις μονάδες εντατικής θεραπείας. Έτσι, απαιτείται η υιοθέτηση μιας νέας στρατηγικής για τη μέτρηση της ΑΠ τόσο συνεχώς όσο και μη επεμβατικά.

Στην εποχή της προηγμένης ψηφιακής τεχνολογίας πληροφοριών υγείας, η προσέγγιση για την επίτευξη αυτού του σκοπού μετατοπίζεται από τις παραδοσιακές μεθόδους (περιπατητική και παρακολούθηση της ΑΠ με μετρήσεις στο σπίτι), σε φορητές συσκευές και τεχνολογίες. Οι φορητές συσκευές παρακολούθησης της αρτηριακής πίεσης επιτρέπουν συχνές μετρήσεις της αρτηριακής πίεσης (ιδανικά συνεχής παρακολούθηση της πίεσης) με ελάχιστη ενόχληση στον ασθενή. Αναμένεται ότι θα αλλάξουν ριζικά τον τρόπο και την ποιότητα της ανίχνευσης και της διαχείρισης της υπέρτασης, παρέχοντας τεράστιο όγκο μετρήσεων σε διαφορετικές καταστάσεις, επιτρέποντας την ακριβή διάγνωση φαινοτύπων που έχουν αρνητικό αντίκτυπο στην καρδιαγγειακή πρόγνωση, όπως η συγκαλυμμένη υπέρταση και η παθολογική μεταβλητότητα της αρτηριακής πίεσης. Οι συχνές μετρήσεις της αρτηριακής πίεσης και η προσθήκη νέων χαρακτηριστικών, όπως η παρακολούθηση των περιβαλλοντικών συνθηκών, επιτρέπουν την ερμηνεία των δεδομένων της ΑΠ στα πλαίσια των καθημερινών στρεσογόνων

καταστάσεων καθώς και άλλων συνθηκών. Αυτή η νέα ψηφιακή προσέγγιση της υπέρτασης αναμένεται να συμβάλει στην προληπτική ιατρική, η οποία εστιάζει στις στρατηγικές που έχουν σχεδιαστεί για την πρόβλεψη εμφάνισης καρδιαγγειακών συμβαμάτων και τον εντοπισμό ασθενών αυξημένου καρδιαγγειακού κινδύνου, με βάση μια σειρά δεδομένων που συλλέγονται με την πάροδο του χρόνου, επιτρέποντας έτσι καθοριστικές παρεμβάσεις με σκοπό τη μείωση του συνακόλουθου καρδιαγγειακού κινδύνου⁹.

Μεταβλητότητα της ΑΠ

Η θεωρία του συνεργιστικού συντονισμού προτείνει ότι κάθε μορφή μεταβλητότητας της ΑΠ (από σφυγμό σε σφυγμό, 24ωρη, από μέρα σε μέρα, εποχική, ετήσια) έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει δυναμικές αυξήσεις στην ΑΠ, οι οποίες θα μπορούσαν να συμπίπτουν με αιχμές της ΑΠ σε διαφορετικούς εξωτερικούς πυροδότες (π.χ., θερμοκρασία, ψυχικό στρες, άπνοια ύπνου, άσκηση) προκαλώντας την εμφάνιση καρδιαγγειακών επεισοδίων, ειδικά σε ασθενείς με αρτηριακή σκληρία, που έχουν μειωμένη δυνατότητα να απορροφήσουν τις αιμοδυναμικές διακυμάνσεις στις περιφερικές αρτηρίες¹⁰. Επομένως, υπάρχει μια πληθώρα παραγόντων που συμβάλλουν στο 24ωρο προφίλ της ΑΠ, δημιουργώντας μια διακύμανση της ΑΠ κατά τη διάρκεια της ημέρας και σε στρεσογόνες καταστάσεις, που είναι ξεχωριστή για κάθε άτομο¹¹. Επιπλέον, στους υπερτασικούς ασθενείς, η μεταβλητότητα της ΑΠ εμφανίζει εποχική διακύμανση, με μεγαλύτερες αιχμές κατά τη διάρκεια της άσκησης τον χειμώνα σε σύγκριση με το καλοκαίρι¹².

Η μεταβλητότητα της ΑΠ, όπως έχει καταδειχτεί μέσα από σειρά μελετών, σχετίζεται με καρδιαγγειακά συμβάματα. Η υπερβολική αύξηση της πρωινής ΑΠ έχει συσχετιστεί με αυξημένο κίνδυνο αγγειακού εγκεφαλικού επεισοδίου, εγκεφαλικής αιμορραγίας και μια ποικιλία άλλων βλαβών στα όργανα-στόχους^{13,14}. Επιπλέον, τόσο η νυκτερινή υπέρταση όσο και η μη ικανοποιητική πτώση της ΑΠ κατά τη νύχτα (non-dipping) έχουν αποδειχθεί ότι αυξάνουν τον κίνδυνο βλάβης οργάνων-στόχων και καρδιαγγειακών επεισοδίων τόσο σε υπερτασικούς όσο και νορμοτασικούς ασθενείς¹⁵. Αυτό σημαίνει ότι η ακριβής ανίχνευση των διαταραχών στο προφίλ της ΑΠ ως απάντηση σε οποιονδήποτε εξωτερικό παράγοντα είναι σημαντική για τη μείωση του

καρδιαγγειακού κινδύνου. Οι φορητές συσκευές με συνεχή παρακολούθηση της ΑΠ και αισθητήρες για τον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών συνθηκών είναι ιδανικές για την εκπλήρωση αυτού του ρόλου ως μέρος της συνολικής διαχείρισης των ασθενών με υπέρταση.

Φορητές συσκευές μέτρησης της ΑΠ

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει αυξημένο ενδιαφέρον από την επιστημονική κοινότητα αλλά και από τη βιομηχανία για την κατασκευή μικρών, φορητών ιατρικών συσκευών για τη μέτρηση πληθώρας βιολογικών παραμέτρων, ενώ γίνεται ήδη μια μεγάλη προσπάθεια για την ανάπτυξη νέων συσκευών για τη μέτρηση της ΑΠ. Αυτές χρησιμοποιούν μια ποικιλία διαφορετικών προσεγγίσεων και τεχνολογιών για τον προσδιορισμό της ΑΠ, ενώ μερικές από αυτές έχουν πρόσφατα λάβει πιστοποίηση.

Ταλαντωσιμετρική μέτρηση στον καρπό

Η ιδέα πίσω από αυτήν τη μέθοδο είναι ότι, όταν οι ταλαντώσεις της πίεσης σε μια περιχειρίδα σφυγμομανόμετρου καταγράφονται κατά τη σταδιακή αποσυμπίεση, το σημείο της μέγιστης ταλάντωσης αντιστοιχεί στη μέση ενδο-αρτηριακή πίεση¹⁶. Οι ταλαντώσεις ξεκινούν περίπου στη συστολική πίεση και συνεχίζονται και κάτω από τη διαστολική, επομένως η συστολική και η διαστολική πίεση μπορούν να εκτιμηθούν έμμεσα μόνο σύμφωνα με κάποιο εμπειρικό αλγόριθμο. Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν υπάρχει ανάγκη τοποθέτησης μορφοτροπέα πάνω από τη βραχιόνια αρτηρία και είναι λιγότερο ευαίσθητη σε εξωτερικό θόρυβο (αλλά όχι σε μηχανικές δονήσεις χαμηλής συχνότητας). Το κύριο μειονέκτημα είναι ότι τέτοιες συσκευές καταγραφής δεν λειτουργούν αξιόπιστα κατά τη διάρκεια της σωματικής δραστηριότητας, όπου συνήθως υπάρχουν σημαντικά παράσιτα κίνησης. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται ευρέως στις υπάρχουσες συσκευές μέτρησης της ΑΠ σε επίπεδο βραχίονα στο ιατρείο, στο σπίτι, καθώς και στην περιπατητική καταγραφή¹⁷.

Οι νέες συσκευές που αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια με μανσέτα καρπού, χρησιμοποιούν την ίδια τεχνική, αλλά αναμένεται πως προκαλούν μικρότερη συμπίεση των μυών και μικρότερη ενόχληση στον ασθενή από τις παραδοσιακές μανσέτες βραχίονα. Μια πρόσφατη μελέτη¹⁸ πιστοποίησε μια συσκευή καρπού σε μέγεθος ρολογιού για τη μέ-

τρηση της ΑΠ βάσει του πρωτοκόλλου American National Standards Institute, Inc / Association for the Advancement of Medical Instrumentation / International Organization for Standardization (ANSI/AAMI/ISO) 81060-2: οδηγίες 2013. Πρόκειται για τη συσκευή Omron HEM 6410T (HeartGuide – Omron Healthcare Co., Ltd) η οποία έχει μια εξαιρετικά άκαμπτη ζώνη που φουσκώνει για να κάνει μια ταλαντωσιμετρική μέτρηση με τον ίδιο τρόπο όπως μια κανονική περιχειρίδα πιεσομέτρου και είναι διαθέσιμη σε δυο μεγέθη (ZM και ZL), ανάλογα με το μέγεθος του καρπού. Το μικρό μέγεθος της συσκευής και η εμφάνιση ρολογιού, το καθιστούν κατάλληλο για καθημερινή χρήση, παρέχοντας πολλαπλές μετρήσεις σε εργασιακό περιβάλλον, σε καταστάσεις στρες, αλλά ακόμα και κατά τη διάρκεια του ύπνου. Λαμβάνει μετρήσεις κατ'επίκληση, αλλά μπορεί, επίσης, να προγραμματιστεί για συγκεκριμένες μετρήσεις ακόμα και κατά τη διάρκεια του ύπνου. Η μπαταρία του ανάλογα με τη χρήση διαρκεί από 10 έως 14 ημέρες με μία φόρτιση, το οποίο διευκολύνει τη χρήση από ηλικιωμένους ασθενείς. Υπάρχει βέβαια ο περιορισμός ότι οι ασθενείς πρέπει να τοποθετήσουν τον καρπό τους στο επίπεδο της καρδιάς για ακριβή μέτρηση, ενώ η πιστοποίηση έγινε μόνο σε καθιστή θέση και όχι σε κλινήρη ή όρθια. Μελέτες έχουν δείξει ότι η ΑΠ αποκλίνει κατά 7 mmHg εάν η διαφορά μεταξύ του ύψους της καρδιάς και της θέσης της μανσέτας είναι 10 cm, λόγω της υδροστατικής πίεσης¹⁹. Επομένως, θα χρειαστεί μια μελλοντική μελέτη που θα αξιολογήσει την ακρίβεια της συσκευής τύπου ρολογιού υπό πραγματικές συνθήκες τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και της νύχτας, καθώς και τον τρόπο ερμηνείας των μετρήσεων.

Σε πρόσφατη μελέτη συγκρίθηκε για πρώτη φορά αυτή η φορητή ταλαντωσιμετρική συσκευή καρπού (HEM6410T, HeartGuide – OmronHealthcare Co., Ltd.) με συσκευή 24ωρης παρακολούθησης της ΑΠ²⁰. Οι ερευνητές διενεργώντας συνεχείς μετρήσεις τόσο σε συνθήκες ιατρείου όσο και εκτός ιατρείου σε 50 ασθενείς κατέδειξαν συγκρίσιμες τιμές. Η συσκευή HeartGuide παρουσίασε μόνο ήπιες αποκλίσεις στις εκτός ιατρείου μετρήσεις κατά $3,2 \pm 17,0$ mmHg ($P < 0,001$) στη συστολική ΑΠ (ΣΑΠ) και $3,2 \pm 11,3$ mmHg στη διαστολική ΑΠ (ΔΑΠ) ($P < 0,001$) που αποδόθηκαν κυρίως στη χαμηλότερη θέση του καρπού. Το ποσοστό των διαφορών

που ήταν εντός του εύρους ± 10 mmHg ήταν 58,7% στο ιατρείο και 47,2% εκτός ιατρείου.

Ταλαντωσιμετρική μέτρηση στο δάκτυλο (Μέθοδος του Penaz)

Η αρτηριακή παλμικότητα στο δάκτυλο ανιχνεύεται από έναν φωτοπληθυσμογράφο κάτω από μια μανσέτα πίεσης. Η έξοδος του πληθυσμογράφου χρησιμοποιείται για να καθοδηγεί μια αντλία, η οποία αλλάζει γρήγορα την πίεση της μανσέτας ώστε η αρτηρία να διατηρείται σε μερικώς ανοιχτή κατάσταση. Οι ταλαντώσεις της πίεσης στη μανσέτα μετρώνται και έχει αποδειχτεί ότι μοιάζουν με το ενδο-αρτηριακό κύμα πίεσης στα περισσότερα άτομα. Αυτή η μέθοδος δίνει μια ακριβή εκτίμηση των μεταβολών της συστολικής και διαστολικής πίεσης σε σύγκριση με τις πιέσεις της βραχιόνιου αρτηρίας²¹. Η μανσέτα μπορεί να διατηρηθεί φουσκωμένη για έως και 2 ώρες. Διατίθεται στο εμπόριο ως καταγραφείς Finometer και Portapres και έχει πιστοποιηθεί σε αρκετές μελέτες σύγκρισης με την ενδο-αρτηριακή πίεση^{22,23}. Η συσκευή Portapres επιτρέπει επιπλέον την 24ωρη περιπατητική καταγραφή, αν και παρουσιάζει δυσκολίες στην κλινική πράξη λόγω του όγκου και της πολυπλοκότητάς της²⁴.

Τονομετρία – Applanation tonometry

Η τονομετρική μέθοδος για τη συνεχή καταγραφή της ΑΠ χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1963²⁵. Μπορεί να εφαρμοστεί σε μια επιφανειακή αρτηρία που βρίσκεται σε στενή επαφή με μια σταθερή οστική δομή. Η κερκιδική αρτηρία είναι αυτή που χρησιμοποιείται συνήθως λόγω της μεγάλης διαμέτρου και της εύκολης προσβασιμότητας. Ο αισθητήρας συμπίεζεται πάνω στην αρτηρία μέσω της πίεσης ενός ημισφαιρικού αεροθαλάμου. Η βέλτιστη πίεση συμπίεσης δίνεται αυτόματα για να επιτεδώσει (αλλά όχι να αποφράξει) ένα τμήμα του αρτηριακού τοιχώματος και να μεγιστοποιήσει την πίεση παλμού που μετράται από μορφοτροπείς πίεσης, που βρίσκονται σε επαφή με την αρτηρία. Η ενδο-αρτηριακή πίεση μπορεί να μετρηθεί από τον μορφοτροπέα πίεσης που επικεντρώνεται πάνω από το επίπεδο του αρτηριακού τοιχώματος, επειδή η διατοιχωματική τάση του αρτηριακού τοιχώματος μετά την επιτέδωση θεωρείται αμελητέα. Η παλμομετρική μέτρηση των συστολικών και διαστολικών τιμών γίνεται με συνεχή αποσυμπίεση του αεροθαλάμου²⁶.

Η ακρίβεια της μεθόδου είναι αμφιλεγόμενη, καθώς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θέση της αρτηρίας και τις αλλαγές στη δύναμη επαφής που απαιτούνται για τη διατήρηση της αρτηρίας σε κατάσταση μερικής συμπίεσης. Ο αισθητήρας θα πρέπει να είναι καλά τοποθετημένος έτσι ώστε να βρίσκεται σε σταθερή θέση πάνω από την αρτηρία και να μην μετακινείται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Συσκευές που χρησιμοποιούν αυτή την τεχνολογία έχουν πιστοποιηθεί βάσει του πρωτοκόλλου ESH και AAMI (Association for the Advancement of Medical Instrumentation) standard. Η συσκευή της HealthSTATS International (Singapore) έχει δείξει ικανοποιητικά αποτελέσματα, υπερεκτιμώντας τη ΣΑΠ κατά $\leq 1,3$ mmHg και υποτιμώντας τη ΔΑΠ κατά $\leq 4,6$ mmHg. Ωστόσο, οι μετρήσεις ήταν πιο αξιόπιστες σε καθιστή και κλινήρη θέση σε σχέση με την όρθια θέση²⁷. Αυτό αποτυπώνεται στη μειωμένη ακρίβεια των μετρήσεων σε επίπεδο περιπατητικής καταγραφής²⁸, ιδιαίτερα σε ασθενείς με αγγεία με αυξημένο φορτίο ασβεστίου όπως οι νεφροπαθείς²⁹. Ένας άλλος περιορισμός είναι ότι η σχέση της θέσης μεταξύ της καρδιάς και του σημείου μέτρησης ποικίλλει, γεγονός που εισάγει την επίδραση των εναλλαγών της υδροστατικής πίεσης.

Συσκευές που εφαρμόζουν τη μέθοδο της τονομετρίας έχουν χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της νυχτερινής ΑΠ και την ανίχνευση των υπερτασικών αιχμών που είναι συχνές σε ασθενείς με σύνδρομο άπνοιας ύπνου³⁰. Έχει αναπτυχθεί ένας αλγόριθμος για την ανίχνευση των παθολογικών αιχμών της ΑΠ (διάρκειας δευτερολέπτων) βάσει των μετρήσεων beat-to-beat της ΑΠ κατά τη διάρκεια της νύχτας³¹.

Φωτοπληθυσμογραφία

Η φωτοπληθυσμογραφία (PPG) εμφανίστηκε το 1930 και είναι μια μη επεμβατική τεχνική μέσω της οποίας σε επιλεγμένα σημεία του σώματος εντοπίζονται αλλαγές στη ροή του αίματος κατά τον καρδιακό κύκλο. Οι κλινικές εφαρμογές της τεχνικής απαντούν στην εκτίμηση της ΑΠ, του καρδιακού ρυθμού και του κορεσμού αίματος σε οξυγόνο, αλλά και στον εντοπισμό περιφερικών φλεβικών παθήσεων.

Ο χρόνος διέλευσης παλμών (PTT), που δηλώνει τον χρόνο που χρειάζεται ένα σφυγμικό κύμα για να διαδοθεί σε όλο το μήκος του αρτηριακού δέντρου, παρέχει ένα μέσο για τη μέτρηση της αρτη-

ριακής πίεσης. Αυτή η κυματομορφή πίεσης παλμού εμφανίζεται όταν το αίμα εξωθείται από την αριστερή κοιλία και η ώση που μεταφέρεται στο αρτηριακό τοίχωμα κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα από την κίνηση του ίδιου του αίματος. Εκτός από τη μέτρηση της ΑΠ, ο PTT αποτελεί μέσο εκτίμησης της αρτηριακής σκληρότητας. Ο PTT μπορεί να προκύψει από υπολογισμούς σε σήματα από το ηλεκτροκαρδιογράφημα (ΗΚΓ) και τη φωτοπληθυσμογραφία (PPG) και βασίζεται σε ανυψωμένα χαρακτηριστικά του σχήματος των παλμικών κυμάτων πίεσης στα αιμοφόρα αγγεία.

Τα δεδομένα του ΗΚΓ χρησιμοποιούνται ως βάση για τον υπολογισμό του χρόνου, ενώ η PPG παρέχει μια οπτική μέτρηση της ογκομετρικής αλλαγής του αίματος στον ιστό κατά τη διάρκεια του καρδιακού κύκλου. Οπτικοί αισθητήρες PPG και ΗΚΓ χρησιμοποιούνται ήδη σε φορητές συσκευές για τη μέτρηση του καρδιακού ρυθμού. Η μέτρηση του PTT περιλαμβάνει τον υπολογισμό του χρόνου μεταξύ του κύματος R στο ΗΚΓ και ενός σημείου αναφοράς στο παλμικό κύμα πίεσης που μετράται χρησιμοποιώντας PPG και μπορεί να δώσει δεδομένα για τα επίπεδα της ΑΠ³². Ωστόσο, η εκτίμηση της αρτηριακής πίεσης με βάση το PTT μπορεί να μην είναι αρκετά ακριβής, επειδή η ρύθμιση της ΑΠ είναι μια πολύπλοκη πολυπαραγοντική διαδικασία. Μελέτες έχουν δείξει ότι η μέτρηση μόνο του PTT δεν είναι αρκετή όσον αφορά στην αξιοπιστία των μετρήσεων. Η ενσωμάτωση στο PTT του καρδιακού ρυθμού και μιας πρόσφατης συμβατικής μέτρησης της αρτηριακής πίεσης έχει ως αποτέλεσμα μια πιο αξιόπιστη μέτρηση της ΑΠ³³.

Πρόσφατα έχουν αναπτυχθεί συσκευές μέτρησης της ΑΠ που χρησιμοποιούν πολλαπλούς αισθητήρες φωτοπληθυσμογραφίας χωρίς να είναι απαραίτητη η ενσωμάτωση του PTT. Μια τέτοια συσκευή που φοριέται στον καρπό (smartwatch, CareUp®) και περιλαμβάνει 2 αισθητήρες φωτοπληθυσμογραφίας αποδείχθηκε ότι έχει καλή ακρίβεια σε σύγκριση με τις κλασικές συσκευές που βασίζονται σε ταλαντωσιμετρία, χωρίς ωστόσο να καταφέρει να λάβει πιστοποίηση βάσει του πρωτοκόλλου AAMI³⁴. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει 2 βασικούς περιορισμούς. Πρώτον, η σταθερότητα του σήματος PPG επηρεάζεται από τις κινήσεις, περιορίζοντας τη χρήση της σε κατάσταση περιπατητικής καταγραφής. Δεύτερος περιορισμός είναι η ανάγκη βαθμονόμησης της συσκευής. Η αρχική βαθμονόμηση

μπορεί γίνει στο ιατρείο, όμως στο μοντέλο αυτό θεωρείται ότι η καρδιακή συχνότητα δεν αλλάζει με την πάροδο του χρόνου, λαμβάνοντας υπόψη μια μέση καρδιακή συχνότητα για το μοντέλο. Ωστόσο, σε ασθενείς με υπέρταση, επειδή η καρδιακή συχνότητα παρουσιάζει υψηλή μεταβλητότητα, απαιτείται συνεχής βαθμονόμηση της συσκευής.

Μια συστηματική ανασκόπηση και μετα-ανάλυση κατέληξε στο συμπέρασμα ότι, παρ' όλο που πολλές μελέτες έχουν διερευνήσει τη χρήση τεχνολογιών πολλαπλών αισθητήρων που βασίζονται στη φωτοπληθυσμογραφία για την παρακολούθηση της ΑΠ, δεν υπάρχουν ακόμη αρκετά δεδομένα για να δημιουργηθεί μια ισχυρή και στατιστικά σημαντική συμβολή στην αξιόπιστη μη επεμβατική μέτρηση της ΑΠ³⁵.

Ενσωμάτωση της φωτοπληθυσμογραφίας σε εφαρμογές κινητών τηλεφώνων (smartphones)

Πρόσφατα έχουν διενεργηθεί μελέτες για τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της εκτίμησης της ΑΠ χρησιμοποιώντας σήματα PPG μέσω κάμερας smartphone ή ενσωματωμένα σε φορητό ανιχνευτή συνδεδεμένο σε smartphone. Σε μια μελέτη του 2018 συλλέχθηκαν μεμονωμένα σήματα PPG από 205 συμμετέχοντες χρησιμοποιώντας τον αισθητήρα καρδιακής συχνότητας του κινητού Samsung Galaxy S6³⁶. Επιπρόσθετα αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος βασισμένος στα δημογραφικά χαρακτηριστικά των ασθενών που βελτίωσε την ακρίβεια των μετρήσεων κατά 11,5% στη ΣΑΠ και 18% στη ΔΑΠ. Συνολικά, με αυτή την τεχνική επιτεύχθηκαν μετρήσεις με μέσο απόλυτο σφάλμα 7 mmHg για τη ΣΑΠ και 5 mmHg στη ΔΑΠ.

Σε μια άλλη μελέτη ενσωματώθηκε ένας αισθητήρας πίεσης στον αισθητήρα PPG μιας συσκευής smartphone³⁷. Σε 2 από τα 30 άτομα της μελέτης δεν επιτεύχθηκε μέτρηση της ΑΠ, ενώ συνολικά το 60% των μετρήσεων δεν ήταν επιτυχές. Στην ανάλυση της ακρίβειας των μετρήσεων σε σύγκριση με την κλασική ταλαντωσιμετρική μέθοδο μέτρησης της ΑΠ στον βραχίονα αναδείχθηκε ένα μέσο σφάλμα ακρίβειας 8,8 mmHg για τη ΣΑΠ και 7,7 mmHg για τη ΔΑΠ.

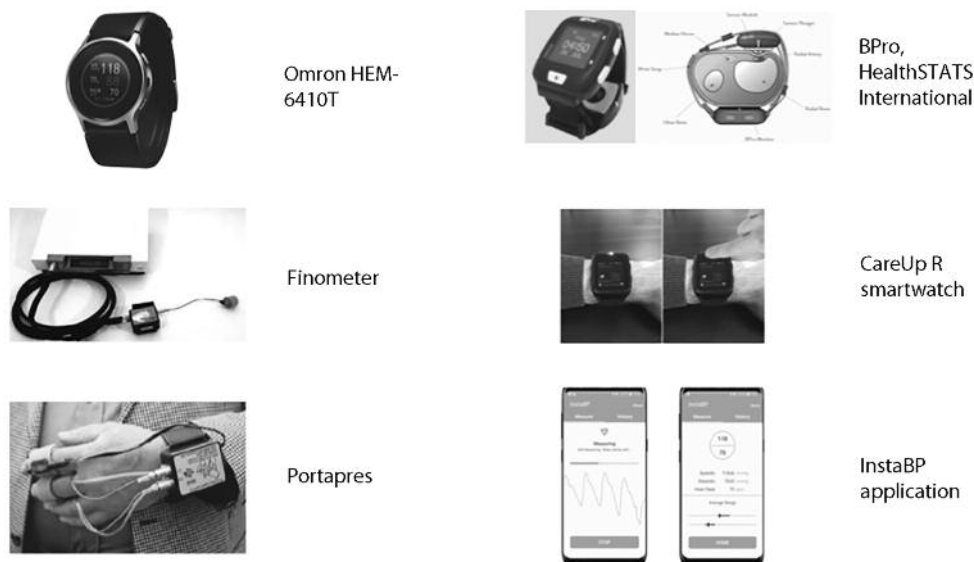
Αίσθηση προκάλεσε η πρόσφατη proof-of-concept μελέτη που αξιοποίησε τη φωτοπληθυσμογραφία —χωρίς όμως φυσική επαφή— απεικονίζοντας την αιματική ροή από βίντεο του προσώ-

που³⁸. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν την τεχνολογία της διαδερμικής οπτικής απεικόνισης από την κάμερα ενός κινητού τηλεφώνου για να αποκαλύψουν το προφίλ της αιματικής ροής και ακολούθως με έναν αλγόριθμο που αναπτύχθηκε να υπολογίσουν τα επίπεδα της ΑΠ νορμοτασικών ατόμων. Με αυτή την τεχνολογία υπολογίστηκε η ΣΑΠ με μια ακρίβεια 94,8% και η ΔΑΠ με 95,7%. Υπάρχουν βέβαια σοβαροί περιορισμοί στη μελέτη, η οποία χρησιμοποίησε δεδομένα μόνο από νορμοτασικά άτομα ασιατικής φυλής και σε συνθήκες εργαστηρίου υπό ειδικό φωτισμό. Η ακρίβεια των μετρήσεων σε κλινικές συνθήκες μπορεί να ποικίλλει λόγω διαφορών στον περιβαλλοντικό φωτισμό, τη γωνία της κάμερας, την απόσταση της κάμερας, το χρώμα του δέρματος των ατόμων, αλλά και τα χαρακτηριστικά του προσώπου των ατόμων.

Κατευθύνσεις για το μέλλον

Για να ξεπεραστούν τα ζητήματα που σχετίζονται με την επέκταση της χρήσης πρωτοκόλλων πιστοποίησης που αναπτύχθηκαν για συσκευές με χρήση περιχειρίδας στην επικύρωση της νέας γενιάς συσκευών μέτρησης της ΑΠ, το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) πρότεινε ένα πρωτόκολλο πιστοποίησης ειδικό για αυτές τις συσκευές³⁹. Αυτό το πρωτόκολλο απαιτεί την ίδια πιστότητα και ακρίβεια με το πρότυπο AAMI για τις κλασικές συσκευές. Το πρωτόκολλο IEEE διαφέρει από τα πρωτόκολλα AAMI / ESH στο ότι περιλαμβάνει μετρήσεις ακόμα και μετά από προκλητές μεταβολές της ΑΠ στα υπό μελέτη άτομα, μετά την αρχική βαθμονόμηση, προκειμένου να διασφαλιστεί η ακρίβεια των μετρήσεων σε ένα ευρύ φάσμα τιμών ΑΠ. Επιπλέον, το πρωτόκολλο IEEE περιλαμβάνει μετρήσεις που λαμβάνονται σε μια εκτεταμένη χρονική περίοδο (εβδομάδες έως μήνες) μετά από την αρχική βαθμονόμηση, για τη διερεύνηση της ακεραιότητας της βαθμονόμησης σε βάθος χρόνου.

Συγχρόνως, με την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και συστημάτων τηλεπικοινωνίας, οι μετρήσεις εκτός ιατρείου μπορούν να συνδυαστούν με ειδικά προγράμματα για την απομακρυσμένη παρακολούθηση της ΑΠ, προωθώντας έτσι μια πιο αποτελεσματική σχέση μεταξύ ασθενών και ιατρών. Αυτή η στρατηγική της τηλεπαρακολούθησης έδειξε ότι είναι αποτελεσματική στη μείωση των τιμών της ΑΠ και στην καταπολέμηση τόσο της αδράνειας των ια-



Εικόνα 1. Φορητές συσκευές μέτρησης της ΑΠ.

τρών όσο και της φτωχής συμμόρφωσης των ασθενών⁴⁰, ενώ εάν συνδυαστεί με τις αναπτυσσόμενες νέες τεχνικές συνεχούς παρακολούθησης της ΑΠ, θα δώσει μια νέα διάσταση στη διαχείριση των υπερτασικών ατόμων.

Αυτή τη στιγμή η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών μέτρησης της ΑΠ είναι ένας ιδιαίτερα ενεργός τομέας έρευνας και πολλές ομάδες έχουν αναπτύξει μεθόδους που μπορούν να συνδράμουν στη βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων. Ωστόσο, ακόμα και εάν στο μέλλον αναπτυχθούν ακριβείς και φιλικές προς τον χρήστη εφαρμογές smartphone ή φορητές συσκευές χωρίς μανσέτα, υπάρχουν αρκετά ακόμα βήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη προτού εφαρμοστούν στην κλινική πρακτική παρακολούθησης της ΑΠ. Πρώτον, εφόσον αξιοποιηθούν για την τηλεπαρακολούθηση των υπερτασικών ατόμων, θα πρέπει να αναπτυχθεί ασφαλής και αποτελεσματική αποθήκευση των δεδομένων, η οποία θα είναι εναρμονισμένη με τη σύγχρονη νομοθεσία των προσωπικών δεδομένων και θα είναι εύκολη στην πρόσβαση για τους παρόχους υγείας. Στη συνέχεια, θα πρέπει να διεξαχθούν μεγάλης κλίμακας προοπτικές κλινικές μελέτες για να εκτιμηθεί ποιες τιμές ΑΠ είναι πραγματικά φυσιολογικές όταν χρησιμοποιούνται πολλαπλές μετρήσεις στην καθημερινή ζωή των ατόμων και ποιες τιμές συνδέονται τελικά με δυσμενή αποτελέσματα. Εάν και εφόσον η τηλεπαρακολούθηση των ασθενών με μετρήσεις χωρίς μανσέτα εφαρμοστεί στη διαχείριση της υπέρτασης

και στην πρόληψη των καρδιαγγειακών επεισοδίων, κρίνεται οπωσδήποτε απαραίτητη η ανάπτυξη κατάλληλων τρόπων αποζημίωσης από τους παρόχους υγείας, προκειμένου να καταστεί δυνατή η de facto εφαρμογή της τηλεπαρακολούθησης στην ιατρική κοινότητα.

Συμπεράσματα

Τα διαθέσιμα δεδομένα δείχνουν ότι η ψηφιακή διαχείριση της υπέρτασης και οι φορητές συσκευές παρακολούθησης της ΑΠ είναι η τεχνολογία του μέλλοντος. Αυτές οι προσεγγίσεις καθιστούν τον στόχο της μείωσης ή ακόμη και της εξάλειψης των καρδιαγγειακών συμβαμάτων στους υπερτασικούς ασθενείς μια ρεαλιστική προοπτική. Η διαθεσιμότητα απλών και προσιτών συσκευών αξιόπιστης μέτρησης της ΑΠ χωρίς μανσέτα, έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύσει σε πρωιμότερα στάδια άτομα με υπέρταση, να βελτιώσει τη ρύθμιση των υπερτασικών ασθενών στην καθημερινότητά τους, αλλά και να αυξήσει σημαντικά τη χρήση της τηλεπαρακολούθησης στη διαχείριση της υπέρτασης. Παρά τις πολλά υποσχόμενες εξελίξεις και τα προκαταρκτικά ενθαρρυντικά αποτελέσματα, οι περισσότερες από τις τρέχουσες φορητές συσκευές μέτρησης της ΑΠ δεν διαθέτουν ακόμα πιστοποίηση και έχουν περιορισμένη χρήση στην κλινική πράξη, λόγω των προβλημάτων της συχνής βαθμονόμησης που απαιτείται και των αξιόπιστων μετρήσεων μόνο σε συγκεκριμένη θέση σώματος. Καθώς το πεδίο της βιοτεχνο-

λογίας συνεχίζει να επεκτείνεται, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τη βελτίωση των σημερινών τεχνολογιών μέτρησης της ΑΠ μέσω φορητών συσκευών χωρίς μανσέτα. Το επόμενο σημαντικό ερώτημα είναι πώς είναι καλύτερο να ενσωματώσουμε τις νέες τεχνολογίες στην κλινική πρακτική τόσο για τους ιατρούς όσο και για τους ασθενείς.

SUMMARY

Konstantinidis D, Iliakis P, Tatakis F, Siafi E, Droghkaris S, Polizos D, Halmoukou K, Andrikou I, Dimitriadis K, Thomopoulos K, Tsioufis K.

Wearable devices for blood pressure measurement – New perspectives on managing hypertension in the digital age

Arterial Hypertension 2021; 30: 60-68.

Out of office blood pressure measurement is an integral part of the diagnosis and management of hypertension. In the age of advanced digital technology, wearable devices for blood pressure measurement have been developed. These devices allow frequent measurements of blood pressure with minimal discomfort to the patient and are expected to significantly change the quality of detection and management of hypertensive individuals by increasing the number of measurements in different situations and by allowing accurate detection of phenotypes that have a negative impact on the cardiovascular system, such as masked hypertension and abnormal blood pressure variability. Frequent blood pressure measurements and the addition of new characteristics of blood pressure variability, allow the interpretation of blood pressure data in the context of daily stress and different situations. This article reviews the different technologies and types of mobile devices for measuring BP.

Key-words: Wearable devices for blood pressure measurement, blood pressure variability

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Egan BM, Zhao Y, Axon RN: US trends in prevalence, awareness, treatment, and control of hypertension, 1988-2008. *JAMA* 2010; 303: 2043-2050.
- COVID-19 Surveillance Group Characteristics of COVID-19 Patients dying in Italy Report Based on Available Data on 24 March 2020; The Italian National Health Service: Rome, Italy, 27 March 2020.
- World Health Organization (WHO)-China Joint Mission. Report of the WHO-China Joint Mission on Coronavirus Disease 2019 (COVID-19); World Health Organization (WHO): Geneva, Switzerland, 28 February 2020.
- Williams B, Mancia G, Spiering W, et al. 2018 ESC/ESH Guidelines for the management of arterial hypertension. *Eur Heart J* 2018; 2018(39): 3021-3104.
- Whelton PK, Carey RM, Aronow WS, et al. 2017 ACC/AHA/AAPA/ABC/ACPM/AGS/APhA/ASH/ASPC/NMA/PCNA Guideline for the Prevention, Detection, Evaluation, and Management of High Blood Pressure in Adults: Executive Summary: A Report of the American College of Cardiology / American Heart Association Task Force on Clinical Practice Guidelines. *Hypertension* 2017; 00: e000-e000.
- Kaplan NM (1998) Commentary on the sixth report of the Joint National Committee (JNC-6). *Am J Hypertens* 11: 134-136.
- Choi YM, Leopold D, Campbell K, Mulligan J, Grudic GZ, Moulton SL. Noninvasive monitoring of physiologic compromise in acute appendicitis: New insight into an old disease. *J Pediatr Surg* 2018 Feb; 53(2): 241-246.
- Ding XR, Zhao N, Yang GZ, Pettigrew RI, Lo B, Miao F, Li Y, Liu J, Zhang YT. Continuous Blood Pressure Measurement From Invasive to Unobtrusive: Celebration of 200th Birth Anniversary of Carl Ludwig. *IEEE J Biomed Health Inform* 2016 Nov; 20(6): 1455-1465.
- Kario K. Management of Hypertension in the Digital Era: Small Wearable Monitoring Devices for Remote Blood Pressure Monitoring. *Hypertension* 2020; 76(3): 640-650.
- Kario K. New insight of morning blood pressure surge into the triggers of cardiovascular disease-synergistic resonance of blood pressure variability. *Am J Hypertens* 2016; 29: 14-16.
- Kario K, Chirinos JA, Townsend RR, Weber MA, Scuteri A, Avolio A, Hoshida S, Kabutoya T, Tomiyama H, Node K, et al. Systemic hemodynamic atherothrombotic syndrome (SHATS) – coupling vascular disease and blood pressure variability: proposed concept from pulse of Asia. *Prog Cardiovasc Dis* 2020; 63: 22-32.
- Kario K, Tomitani N, Kanegae H, Yasui N, Nishizawa M, Fujiwara T, Shigezumi T, Nagai R, Harada H. Development of a new ICT-based multisensory blood pressure monitoring system for use in hemodynamic biomarker-initiated anticipation medicine for cardiovascular disease: the National IMPACT Program Project. *Prog Cardiovasc Dis* 2017; 60: 435-449.
- Kuwajima I, Mitani K, Miyao M, Suzuki Y, Kuramoto K, Ozawa T. Cardiac implications of the morning surge in blood pressure in elderly hypertensive patients: relation to arising time. *Am J Hypertens* 1995; 8: 29-33.
- Yano Y, Hoshida S, Inokuchi T, Kanemaru Y, Shimada K, Kario K. Association between morning blood pressure surge and cardiovascular remodeling in treated elderly hypertensive subjects. *Am J Hypertens* 2009; 22: 1177-1182.
- Ohkubo T, Hozawa A, Yamaguchi J, Kikuya M, Ohmori K, Michimata M, Matsubara M, Hashimoto J, Hoshi H, Araki T, et al. Prognostic significance of the nocturnal decline in blood pressure in individuals with and without high 24-h blood pressure: the Ohasama study. *J Hypertens* 2002; 20: 2183-2189.
- Mauck GW, Smith CR, Geddes LA, Bourland JD. The meaning of the point of maximum oscillations in cuff pressure in the indirect measurement of blood pressure – part ii. *J Biomech Eng* 1980 Feb; 102(1): 28-33.
- Arakawa T. Recent Research and Developing Trends of Wearable Sensors for Detecting Blood Pressure. *Sensors (Basel)* 2018 Aug 23; 18(9): 2772.
- Kuwabara M, Harada K, Hishiki Y, Kario K. Validation

- of two watch-type wearable blood pressure monitors according to the ANSI/AAMI/ISO81060-2:2013 guidelines: Omron HEM-6410T-ZM and HEM-6410T-ZL. *J Clin Hypertens* (Greenwich) 2019; 21(6): 853-858.
19. Kikuya M, Chonan K, Imai Y, Goto E, Ishii M. Research group to assess the validity of automated blood pressure measurement devices in Japan. Accuracy and reliability of wrist cuff devices for self measurement of blood pressure. *J Hypertens* 2002; 20: 629-638.
 20. Kario K, Shimbo D, Tomitani N, Kanegae H, Schwartz JE, Williams B. The first study comparing a wearable watch-type blood pressure monitor with a conventional ambulatory blood pressure monitor on in-office and out-of-office settings. *J Clin Hypertens* (Greenwich) 2020; 22(2): 135-141.
 21. Penaz J. Photo-electric measurement of blood pressure, volume and flow in the finger. In Proceedings of the Digest of Tenth International Conference on Medical Biological Engineering, Dresden, Germany, 13-17 August 1973.
 22. Parati G, Casadei R, Groppelli A, Di Rienzo M, Mancia G. Comparison of finger and intra-arterial blood pressure monitoring at rest and during laboratory testing. *Hypertension* 1989 Jun; 13(6 Pt 1): 647-55.
 23. van Egmond J, Hasenbos M, Crul JF. Invasive v. non-invasive measurement of arterial pressure. Comparison of two automatic methods and simultaneously measured direct intra-arterial pressure. *Br J Anaesth* 1985 Apr; 57(4): 434-44.
 24. Imholz BP, Langewouters GJ, van Montfrans GA, Parati G, van Goudoever J, Wesseling KH, Wieling W, Mancia G. Feasibility of ambulatory, continuous 24-hour finger arterial pressure recording. *Hypertension* 1993 Jan; 21(1): 65-73.
 25. Pressman GL, Newgard PM: A transducer for the external measurement of arterial blood pressure. *IEEE Trans Biomed Eng* 1963 Apr; 10: 73-81.
 26. Sato T, Nishinaga M, Kawamoto A, Ozawa T, Takatsuji H. Accuracy of a continuous blood pressure monitor based on arterial tonometry. *Hypertension* 1993 Jun; 21(6 Pt 1): 866-74.
 27. Nair D, Tan SY, Gan HW, Lim SF, Tan J, Zhu M, Gao H, Chua NH, Peh WL, Mak KH. The use of ambulatory tonometric radial arterial wave capture to measure ambulatory blood pressure: the validation of a novel wrist-bound device in adults. *J Hum Hypertens* 2008; 22: 220-222.
 28. Komori T, Eguchi K, Hoshida S, Williams B, Kario K. Comparison of wrist-type and arm-type 24-h blood pressure monitoring devices for ambulatory use. *Blood Press Monit* 2013; 18: 57-62.
 29. Hornstrup BG, Rosenb k JB, Bech JN. Comparison of Ambulatory Tonometric and Oscillometric Blood Pressure Monitoring in Hypertensive Patients. *Integr Blood Press Control* 2020 Mar 30; 13: 41-47.
 30. Kario K. Evidence and perspectives on the 24-hour management of hypertension: hemodynamic biomarker-initiated ‘anticipation medicine’ for zero cardiovascular event. *Prog Cardiovasc Dis* 2016; 59: 262-281.
 31. Kokubo A, Kuwabara M, Nakajima H, Tomitani N, Yamashita S, Shiga T, Kario K. Automatic detection algorithm for establishing standard to identify “surge blood pressure”. *Med Biol Eng Comput* 2020 Jun; 58(6): 1393-1404.
 32. van Velzen MHN, Loeve AJ, Niehof SP, Mik EG. Increasing accuracy of pulse transit time measurements by automated elimination of distorted photoplethysmography waves. *Med Biol Eng Comput* 2017 Nov; 55(11): 1989-2000.
 33. Wang R, Jia W, Mao ZH, Sciabassi RJ, Sun M. Cuff-Free Blood Pressure Estimation Using Pulse Transit Time and Heart Rate. *Int Conf Signal Process Proc* 2014; 2014: 115-118.
 34. Lazazzera R, Belhaj Y, Carrault G. A new wearable device for blood pressure estimation using photoplethysmogram. *Sensors* (Basel) 2019; 19: 2557.
 35. Chan G, Cooper R, Hosanee M, et al. Multi-site photoplethysmography technology for blood pressure assessment: challenges and recommendations. *J Clin Med* 2019; 8: 1827.
 36. Dey J, Gaurav A, Tiwari VN. Insta BP: Cuff-less Blood Pressure Monitoring on Smartphone using Single PPG Sensor. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc* 2018 Jul; 2018: 5002-5005.
 37. Chandrasekhar A, Kim CS, Naji M, Natarajan K, Hahn JO, Mulkamala R. Smartphone-based blood pressure monitoring via the oscillometric finger-pressing method. *Sci Transl Med* 2018 Mar 7; 10(431): eaap8674.
 38. Luo H, Yang D, Barszczyk A, Vempala N, Wei J, Wu SJ, Zheng PP, Fu G, LeeK, Feng ZP. Smartphone-Based Blood Pressure Measurement Using Transdermal Optical Imaging Technology. *Circ Cardiovasc Imaging* 2019 Aug; 12(8): e008857.
 39. IEEE 1708-2014 - IEEE Standard for Wearable Cuffless Blood Pressure Measuring Devices. Availableonlineat: <https://standards.ieee.org/findstds/standard/1708-2014.html>
 40. Omboni S, Gazzola T, Carabelli G, Parati G. Clinical usefulness and cost effectiveness of home blood pressure telemonitoring: meta-analysis of randomized controlled studies. *J Hypertens* 2013 Mar; 31(3): 455-67; discussion 467-8.