



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΝΔΥΣΕΩΝ
ΓΕΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑΣ
ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑΣ



1η Προκήρυξη Ερευνητικών Έργων ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. για την ενίσχυση των μελών ΔΕΠ και Ερευνητών/τριών και την Προμήθεια Ερευνητικού Εξοπλισμού Μεγάλης Αξίας

1st Call for H.F.R.I. Research Projects for the Support of Faculty Members and Researchers and the Procurement of high-cost Research Equipment

Εκτεταμένη σύνοψη της τελικής έκθεσης
Extended synopsis of the Final Project Report

ΤΙΤΛΟΣ ΕΡΓΟΥ - Βελτιωμένη εξόρυξη πετρελαίου με νανοσωματίδια επικαλυμμένα με πολυμερή
PROJECT TITLE - Enhanced oil recovery by polymer-coated nanoparticles

ΑΚΡΩΝΥΜΙΟ ΕΡΓΟΥ – EOR-PNP

ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΡΓΟΥ – HFRI-FM17-361

Εκτεταμένη σύνοψη της τελικής έκθεσης (στα ελληνικά).

1. Περιγραφή του έργου

<http://eorpn.iceht.forth.gr/>

Κύριοι Στόχοι. Η συνολική ανάκτηση πετρελαίου κατά την πρωτογενή και δευτερογενή εξόρυξη κυμαίνεται από 35% έως 45%, ενώ μια τριτοβάθμια μέθοδος εξόρυξης που μπορεί να ενισχύσει τον συντελεστή ανάκτησης κατά 10-30% θα μπορούσε να συμβάλει περαιτέρω στον ενεργειακό εφοδιασμό. Η χρήση νανοσωματιδίων στις διεργασίες βελτιωμένης ανάκτησης πετρελαίου (EOR) αποτελεί μια αναδυόμενη και πολύ ελπιδοφόρα προσέγγιση. Ο γενικός στόχος του EOR-PNP είναι να βελτιστοποιήσει τις ιδιότητες των επικαλυμμένων με πολυμερή νανοσωματιδίων (PNPs) προς την κινητοποίηση υπολειπόμενου πετρελαίου από πορώδεις ταμιευτήρες υδρογονανθράκων. Οι επί μέρους στόχοι περιλαμβάνουν: (1) Σύνθεση νανοσωματιδίων επικαλυμμένων με πολυμερή (PNP) και σταθεροποίηση τους σε υδατικά μέσα με σύσταση παρόμοια με εκείνη της άλμης των κοιτασμάτων υδρογονανθράκων (π.χ. υψηλή αλατότητα). (2) Βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων των αιωρημάτων στη κατεύθυνση της κινητοποίησης υπολειπόμενων και παγιδευμένων γαγγλίων πετρελαίου από τον πορώδη χώρο. (3) Ανάπτυξη και χαρακτηρισμός σταθερών Pickering γαλακτωμάτων και αφρών και η δοκιμή τους ως μέσων χημικής πλημμύρας σε μοντέλα πορώδη μέσα (δίκτυα πόρων χαραγμένα σε γυαλί και κλίνες άμμου) και πυρήνες πετρωμάτων. (4) Προσαρμογή της σύνθεσης και των ιδιοτήτων των «έξυπνων ρευστών» που βασίζονται στα PNPs με χρήση των αποτελεσμάτων των EOR δοκιμών και επιλογή των πιο αποδοτικών ρευστών από τεχνική και οικονομική άποψη. (5) Ανάπτυξη αριθμητικού εξομοιωτή της πολυφασικής ροής των «έξυπνων ρευστών» σε δίκτυα πόρων, ανακατασκευασμένα από 3D εικόνες υπολογιστικής μικρο-τομογραφίας πετρωμάτων κοιτασμάτων.

Βασικές δραστηριότητες. Συντέθηκαν αρκετές κατηγορίες γραμμικών και τύπου χτένας τρι-πολυμερών με πολυμερισμό ελεύθερης ρίζας, ενώ αναπτύχθηκαν με χημεία καρβαδιμιδίου αμφίφυλα τριπολυμερή με ανιονικό σκελετό και εμβολιασμένα με υδρόφοβες αλκυλικές αλυσίδες. Προσδιορίστηκαν οι ιδιότητες των πολυμερών και χρησιμοποιήθηκαν για την σταθεροποίηση νανοσωματιδίων διοξειδίου του πυριτίου. Επίσης συντέθηκαν νανοσωματίδια οξειδίων του σιδήρου σταθεροποιημένα με πολυφαινόλες από φυτικά εκχυλίσματα μαϊντανού. Ετοιμάστηκαν αραιά αιωρήματα νανοσωματιδιακών συστημάτων με και χωρίς την παρουσία διαφόρων τύπων μονοσθενών και δισθενών αλάτων ώστε να ελεγχθεί η σταθερότητα τους κάτω και από αντίξοες συνθήκες. Οι υδατικές νανο-κolloειδείς διασπορές χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για την ανάπτυξη Pickering γαλακτωμάτων, οι μικροσκοπικές και ρεολογικές ιδιότητες των οποίων προσδιορίστηκαν και συσχετίστηκαν με την σταθερότητα τους. Μετρήθηκαν οι διεπιφανειακές ιδιότητες και η διαβρεκτικότητα για όλα τα συστήματα που συντέθηκαν και αξιολογήθηκε η ικανότητα τους να κινητοποιούν παγιδευμένο πετρέλαιο. Πραγματοποιήθηκαν οπτικά πειράματα δευτερογενούς και τριτογενούς εκτόπισης του υπολειπόμενου κορεσμού πρότυπων υδρογονανθράκων (κ-δωδεκάνιο, παραφινέλαιο, συνθετικό έλαιο) από αιωρήματα νανοσωματιδίων και γαλακτώματα σε δίκτυο πόρων χαραγμένο σε γυάλινες πλάκες. Τα πλέον αποδοτικά αιωρήματα και γαλακτώματα με βάση νανοσωματίδια οξειδίου του σιδήρου δοκιμάστηκαν σε στήλες άμμου και στη συνέχεια σε πυρήνες ενός ψαμμιτικού πετρώματος τύπου Bentheimer. Για την αξιολόγηση της απόδοσης των διαφόρων συστημάτων υπολογίστηκαν δύο παράμετροι απόδοσης ισχύος και ενέργειας από τα μεταβατικά προφίλ της πτώσης πίεσης κατά μήκος όλων των πορωδών μέσων. Συλλέχθηκαν και ταξινομήθηκαν υψηλής ανάλυσης δεδομένα υπολογιστικής τομογραφίας (CT-scan data) από δείγμα Bentheimer και έγινε κατάλληλη προσαρμογή του κώδικα ανοικτής πρόσβασης Open PNM για την ανακατασκευή 3D δικτύου πόρων-λαϊμών και τον προσδιορισμό μικροσκοπικών (κατανομές μεγέθους πόρων λαϊμών, αριθμός συνδιάταξης) καθώς επίσης και μακροσκοπικών ιδιοτήτων (διαπερατότητα, καμπύλη εισόδου Hg, συντελεστής σχηματισμού). Αντίστοιχη 2D ανακατασκευή και υπολογισμός της διαπερατότητας έγινε και για το γυάλινο μικρομοντέλο. Έγινε πλήρης χαρακτηρισμός της πορώδους

δομής του πετρώματος με συνδυασμό των αποτελεσμάτων της 3D ανακατασκευής με δεδομένα πορομετρίας Hg και αριθμητικούς κώδικες αντίστροφης προσαρμογής για διεργασίες τύπου διείσδυσης. Πραγματοποιήθηκε συστηματική παραμετρική ανάλυση της επίδρασης του λόγου ιξωδών και των διεπιφανειακών ιδιοτήτων για διεργασίες εισρόφησης στη μικρο-κλίμακα 2D δικτύου πόρων (γυάλινο μικρο-μοντέλο) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του πεδίου φάσεων στη πλατφόρμα του COMSOL με σύζευξη των εξισώσεων Navier-Stokes και της εξίσωσης Cahn-Hilliard. Επίσης συσχετίσθηκε ο τριχοειδής αριθμός με την χωρο-χρονική εξέλιξη του κορεσμού στη μακρο-κλίμακα 2D δικτύου πόρων για εισβολή Νευτώνειου και μη Νευτώνειου / εκθετικού ρευστού, εξομοιώνοντας τη διεργασία εκτόπισης σε δίκτυο πόρων με βάση την προσέγγιση της διείσδυσης εισβολής υπό βαθμίδα. Προσαρμόστηκαν κατάλληλα και χρησιμοποιήθηκαν κώδικες εξομοίωσης αποστράγγισης / εισρόφησης σε 3D δίκτυα πόρων-λαιμών υπό οινωεί συνθήκες ισορροπίας για τον προσδιορισμό καμπυλών τριχοειδούς πίεσης και σχετικών διαπερατοτήτων. Αυτές οι ιδιότητες τροφοδοτήθηκαν σαν δεδομένα εισόδου σε δυναμικό εξομοιωτή εκτοπίσεων σε μεγάλα 3D δίκτυα για την εξομοίωση της απόδοσης ανάκτησης ελαϊκής φάσης κατά την έκχυση αιωρήματος/γαλακτώματος υπό σταθερό ρυθμό ροής σε πυρήνα πορώδους πετρώματος.

Παραδοτέα. Αναπτύχθηκαν πρωτόκολλα παρασκευής νανοσωματιδίων, αιωρημάτων και γαλακτωμάτων, προσδιορίστηκαν και ταξινομήθηκαν οι ιδιότητες τους (<https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2023.105521>) και επελέγησαν τα πλέον σταθερά συστήματα για EOR δοκιμές. Πραγματοποιήθηκαν μελέτες της απόδοσης ανάκτησης ελαϊκής φάσης κατά τη δευτερογενή εισρόφηση των «έξυπνων ρευστών» σε μοντέλα πορώδη μέσα (γυάλινο μικρομοντέλο, κλίνη κόκκων άμμου) και πυρήνες ψαμμιτικού πετρώματος ενώ από μετρήσεις της πτώσης πίεσης εκτιμήθηκε το ενεργειακό κόστος των διεργασιών (<https://doi.org/10.3390/en16248043>). Έγινε 2D και 3D ανακατασκευή του δικτύου πόρων για το γυάλινο μικρο-μοντέλο και το πορώδες πέτρωμα, αντιστοίχως, και αναπτύχθηκαν αριθμητικοί κώδικες εξομοίωσης της ροής δύο φάσεων και πρόβλεψης της χωρο-χρονικής εξέλιξης των διεργασιών εκτόπισης από τη κλίμακα του πόρου στη κλίμακα του πυρήνα. Μετά από συγκριτική ανάλυση, ταυτοποιήθηκαν τα «έξυπνα ρευστά» με τη μέγιστη EOR και ενεργειακή απόδοση. Πραγματοποιήθηκε διημερίδα (<https://www.iceht.forth.gr/events/workshop-on-advances-toward-the-transport-of-nanoparticles-in-porous-media-and-applications-to-residual-oil-recovery/>) που διερεύνησε τη δυνατότητα χρήσης των εργαλείων που αναπτύχθηκαν όχι μόνο για τη βελτιωμένη ανάκτηση υδρογονανθράκων αλλά και για άλλες εφαρμογές όπως η επιτόπια απορρόπηση εδαφών και ταμειυτήρων υπογείων υδάτων ρυπασμένων με υδρογονάνθρακες (doi:10.1088/1755-1315/1123/1/012064).

2. Συμπεράσματα

Αποτελέσματα: Μόνο τα συστήματα που βασίστηκαν σε οξειδία του σιδήρου παρήχθησαν σε επαρκείς ποσότητες για να γίνουν δοκιμές σε όλα τα πορώδη μέσα. Διαπιστώθηκε σημαντική μεταβολή της διαπερατότητας κατά τη διέλευση αιωρημάτων λόγω της συσσωμάτωσης και εναπόθεσης σωματιδίων στους πόρους. Ορισμένα γαλακτώματα επέδειξαν σημαντική απόδοση ανάκτησης υπολειπόμενης ελαϊκής φάσης. Διαπιστώθηκε ότι οι πιο σημαντικές ιδιότητες που καθορίζουν το μεταβατικό πρότυπο διφασικής ροής και την απόδοση ανάκτησης ελαϊκής φάσης είναι πρωτογενώς ο λόγος ιξωδών και ο τριχοειδής αριθμός και δευτερευόντως η διαβροχή, ενώ πιθανές μεταβολές των διεπιφανειακών ιδιοτήτων λόγω προσκόλλησης σωματιδίων στις διεπιφάνειες έχουν μικρή επίδραση στην τελική ανάκτηση. Οι εξομοιώσεις εστιάστηκαν στην επίδραση των παραπάνω παραμέτρων στην χωρο-χρονική εξέλιξη των διεργασιών εκτόπισης δύο φάσεων στη μικρο- και μακρο-κλίμακα και χρησιμοποιήθηκαν για να ερμηνευτούν τα πειραματικά αποτελέσματα. Διαπιστώθηκε ότι μεταξύ όλων των παραμέτρων που μπορούν να ρυθμιστούν με την έκχυση νανο-κolloειδών, η ενδιάμεση διαβροχή και ο μεγάλος λόγος ιξωδών είναι οι πιο σημαντικές ιδιότητες που μπορούν να αυξήσουν αποτελεσματικά την απόδοση ανάκτησης υπολειπόμενου πετρελαίου.

Αντίκτυπος και προστιθέμενη αξία.

Επιστημονικό πεδίο. Αποκτήθηκε τεχνογνωσία και εμπειρία στη σύνθεση, σταθεροποίηση και χρήση νανο-κolloειδών και γαλακτωμάτων σε διεργασίες διφασικής ροής σε πορώδη μέσα που στη συνέχεια αξιοποιήθηκε για την ανάπτυξη συνεργασιών, σε θέματα βελτιωμένης εξόρυξης πετρελαίου και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα, με ερευνητικές ομάδες από περιοχές όπου υπάρχει σημαντική παραγωγή υδρογονανθράκων (Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα). Η ανάπτυξη, ο χαρακτηρισμός και η χρήση γαλακτωμάτων Pickering με βάση νανοσωματίδια μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη για παρόμοια συστήματα με περιβαλλοντικές εφαρμογές: (α) ανάπτυξη γαλακτωμάτων για χρήση σε διαφανείς φωτοαντιδραστήρες για τη φωτοκαταλυτική οξειδωση διαλυμένων ρύπων και παθογόνων παραγόντων σε υδατικά ρεύματα, (β) ερμηνεία της συμπεριφοράς και πρόβλεψη της τύχης των επιφανειοδραστικών ρύπων στην ακόρεστη και κορεσμένη ζώνη του υπεδάφους με πιο δημοφιλές παράδειγμα τις πολυφθορο-αλκυλιωμένες ουσίες (PFAS).

Οικονομικό πεδίο. Μετά από αρκετά χρόνια περικοπών και μείωσης του κόστους, οι τιμές του πετρελαίου έχουν αρχίσει να αυξάνονται. Η αγορά προϊόντων βελτιωμένης εξόρυξης με χημική πλημμύρα καθοδηγείται από την αύξηση της παραγωγής αργού πετρελαίου, τις αυξανόμενες δραστηριότητες γεωτρήσεων σε μεγάλα βάθη και την υψηλή ζήτηση για παρόμοιες διεργασίες, ενώ αναμένεται να σημειώσει υψηλή ανάπτυξη από ώριμες γεωτρήσεις και ανεπτυγμένες περιοχές καθώς επίσης και από υπεράκτιες εφαρμογές. Σε μακροπρόθεσμη βάση, το PNP-EOR μπορεί να οδηγήσει στην κατοχύρωση με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας νέων χημικών ουσιών που βασίζονται σε νανοσωματίδια με επικάλυψη πολυμερούς (κυρίως γαλακτώματα) και στην εμπορευματοποίησή τους ως «ανταγωνιστικών» παραγόντων για εφαρμογές χημικών πλημμυρών. Παρά το γεγονός ότι οι ενεργειακές και περιβαλλοντικές πολιτικές παγκοσμίως ευνοούν την υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων από ανανεώσιμες πηγές (ήλιος, άνεμος, υδρογόνο), η οικονομική ανάπτυξη των βιομηχανικών χωρών θα συνεχίσει να εξαρτάται από τους ενεργειακούς πόρους πετρελαίου και φυσικού αερίου για τα επόμενα 30 χρόνια. Σε αυτό το πλαίσιο, οποιαδήποτε πρόοδος προς τη βελτιωμένη ανάκτηση υδρογονανθράκων από υπάρχοντες ταμειυτήρες με μεθόδους βελτιωμένης εξόρυξης θα εξοικονομήσει πόρους και θα μειώσει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα που σχετίζεται με την εξερεύνηση, την ανάπτυξη και τη χρήση νέων πεδίων

Κοινωνικό πεδίο. Η νοτιοανατολική Μεσόγειος και οι ιδιαίτερα οι περιοχές νοτιοδυτικά της Κρήτης, Ιόνιο Πέλαγος και Δυτική Ελλάδα βρίσκονται στο επίκεντρο για έρευνες υδρογονανθράκων. Σε μακροπρόθεσμη βάση, η γνώση και η εμπειρία που αποκτήθηκε στο πλαίσιο του EOR-PNP θα μπορούσαν να συνεισφέρουν σε μία κοινωνία «βασισμένης στη γνώση» εκπαιδεύοντας μια νέα γενιά επιστημόνων και μηχανικών ικανών να εργαστούν στην αναπτυσσόμενη ελληνική βιομηχανία αξιοποίησης των υδρογονανθράκων. Επιπροσθέτως, οι μέθοδοι βελτιωμένης εξόρυξης πετρελαίου μπορούν να αποτελέσουν σημείο αναφοράς για την ανάπτυξη τεχνολογιών αποκατάστασης του εδάφους και των υπόγειων υδάτων και τον μετριασμό της περιβαλλοντικής ρύπανσης.

Extended synopsis (abstract)

1. Description of the project

<http://eorpn.iceht.forth.gr/>

Main objectives. Globally the overall oil recovery factors for primary and secondary recovery range from 35% to 45% and a tertiary recovery method that can enhance the recovery factor by 10-30% could contribute to energy supply. The use of nanoparticles in enhanced oil recovery (EOR) processes comprise an emerging and well-promising approach. The overall objective of EOR-PNP is to optimize the properties of polymer-coated nanoparticles (PNPs) toward the mobilization of residual oil from reservoir rocks. The specific scientific objectives are: (1) synthesis of polymer-coated nanoparticles (PNPs) by grafting adequately synthesized polymers to the surface of nanoparticles, and their stabilization in aqueous media with composition similar to that of brine in reservoir rocks (e.g. high salinity); (2) optimization of the properties of nano-colloids toward the mobilization of trapped oil ganglia from the pore space; (3) synthesis and characterization of Pickering emulsions and foams and their testing as agents of chemical flooding in model porous media (glass-etched pore network, sandpack) and core plugs of porous rocks; (4) adjustment of the synthesis routes and properties of the PNP-based “smart fluids” by using the results of EOR tests, and selection of the most efficient ones in terms of EOR and energy efficiency; (5) development of numerical simulator of the multiphase flow and transport of “smart fluids” in pore networks, reconstructed from 3D CT-scan computed tomography images of reservoir rocks.

Key activities. Statistical linear and statistical comb-type terpolymers were synthesized through free radical polymerization (FRP), while, amphiphilic graft terpolymers comprising an anionic backbone, grafted with hydrophobic alkyl chains, were prepared by grafting reaction based on the well known carbodiimide chemistry. The properties of polymers were measured and used to stabilize commercial SiO₂ nanoparticles. Also, iron oxide nanoparticles were synthesized by green chemistry routes, and were stabilized by the polyphenols extracted from Parsley leaves. Dilute dispersions of nanoparticles were prepared with and without the presence of salts of monovalent and divalent cations to check their stability under adverse conditions, as well. The aqueous nano-colloid suspensions were used to synthesize mainly Pickering emulsions, the rheological and microscopic properties of which were determined and correlated with their stability. For all systems synthesized, the dynamic and static interfacial properties were measured along with wettability, while their capacity to mobilize trapped oil was assessed. Visualization tests of the secondary and tertiary displacement of the residual saturation of model hydrocarbons (n-dodecane, paraffin oil, synthetic oil) by nano-colloid dispersions and emulsions were conducted in a glass-etched pore network. The most efficient dispersions and emulsions, based on iron oxide nanoparticles, were tested in sandpack columns and core plugs of Bentheimer sandstone. For the evaluation of the efficiency of the various systems, two parameters quantifying the power and energy efficiency were calculated from the transient responses of the pressure drop across each porous medium tested. High resolution computed tomography-X-Ray scans of Bentheimer rock samples were collected and classified, and the open access Python code OpenPNM was appropriately adapted to reconstruct the pore-and-throat network and compute the microscopic (pore and throat diameter distributions, coordination number) and macroscopic (permeability, Hg injection curve, electrical formation factor) properties. Likewise, a 2D reconstruction and calculation of permeability was done for the 2D glass-etched pore network. The pore structure of the Bentheimer sandstone was characterized in detail, by combining results of the 3D reconstruction with Hg intrusion / retraction datasets and numerical algorithms of inverse modeling for percolation-type processes. A systematic parametric analysis of the effect of the viscosity ratio, and interfacial properties on imbibition processes at the micro-scale of 2D pore networks (glass micromodel) was performed in the platform of COMSOL with the phase field method by coupling the direct numerical solution of Navier-Stokes equations with the Cahn-Hilliard equation. With the aid of

the viscous gradient percolation approach, the immiscible displacement of two fluids under high viscosity ratio was simulated at the macro-scale of a 2D pore network to correlate the capillary number with the spatial-temporal evolution of the fluid saturation during the injection of a Newtonian or a non-Newtonian power law fluid. The foregoing micro-scale and macro-scale simulations were used to interpret experimental results. Quasi-static and mechanistic-type simulators of drainage / imbibition in pore-and-throat networks were adequately adapted to the characteristics of Bentheimer pore structure and used to determine the capillary pressure and relative permeability curves. These properties were fed as input data in a dynamic large-scale network simulator able to predict at core-scale the oil recovery efficiency during the injection of nano-colloid / emulsion under constant influx rate.

Deliverables. Protocols were developed for the synthesis of nanoparticles, suspensions and emulsions, their properties (<https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2023.105521>) were determined and classified, and the most stable systems were chosen for EOR tests. The oil recovery efficiency was studied during the secondary imbibition of “smart fluids” in model porous media (glass-etched pore network, sandpack) and sandstone core plugs, whereas the energy consumption of the processes was estimated from the transient response of the pressure drop across the porous medium (<https://doi.org/10.3390/en16248043>). 2D and 3D-reconstruction of the pore space was done for the glass micromodel and porous rock, respectively, and numerical codes were developed for the simulation of the two-phase flow and prediction of the spatial-temporal evolution of immiscible displacement processes from the pore-scale to the core-scale. After a comparative analysis, the “smart fluids” with the maximum EOR and energy efficiency were identified. A workshop was organized (<https://www.iceht.forth.gr/events/workshop-on-advances-toward-the-transport-of-nanoparticles-in-porous-media-and-applications-to-residual-oil-recovery/>) to examine the potential to utilize the methodologies and scientific results of EOR-PNP not only for the development of cost-effective and high-performance EOR methods, but also for the generation of innovative knowledge that might be helpful in other applications, such as the remediation of soils and aquifers contaminated by hydrocarbons.

2. Conclusions:

Results. Only the systems based on iron oxides were produced in sufficient quantities to conduct EOR tests in all porous media. During the flow of nano-colloids, respectable reduction of permeability was realized due to the nanoparticle agglomeration and sedimentation in pores. Certain Pickering emulsions demonstrated significant residual oil recovery efficiency. It was realized that the most significant properties governing the transient two-phase flow pattern and the oil recovery efficiency are, primarily, the viscosity ratio and capillary number, and secondarily, the wettability, while potential changes caused on the interfacial tension due to the attachment of nanoparticles on the oil/water interfaces have small effect. The numerical simulations were focused on the effects of the aforementioned parameters on the spatial-temporal evolution of the two-phase displacement processes at the micro- and macro-scale, and used to interpret the experimental results. It was confirmed that among all parameters controlled by the injection of nano-colloids, the high viscosity ratio and intermediate wettability are the most significant parameters that might increase profoundly the residual oil recovery efficiency.

Impacts and added value.

Scientific impact. Experience and knowhow was acquired on the synthesis, stabilization, and use of nano-colloids and emulsions in processes of two-phase flow in porous media, and utilized to establish scientific collaborations, in the topic of enhanced oil recovery and carbon dioxide storage, with research groups from areas with significant oil production (UAE). The development, characterization and utilization of nanoparticle-based Pickering emulsions might be very useful for similar systems with environmental

applications: (a) development of photocatalytic nanoparticles-based emulsions and utilization in transparent photo-reactors for the photocatalytic oxidation of dissolved pollutants and pathogens from water matrices; (b) interpretation of the behaviour and prediction of the fate of surface-active pollutants in vadose and saturated zones with most popular example the per-,polyfluoro-alkylated substances (PFAS) which have become a category of emerging and high priority pollutants.

Economic impact. After several years of cost cuts and downsizing, oil prices have started rising. The market size for EOR chemicals (smart fluids) is driven by increasing production of crude oil, growing deep drilling activities, and high demand for EOR processes, and is expected to witness a high growth from mature wells and developed regions as well as from offshore applications. In long-term basis, PNP-EOR might lead to the patenting of polymer-coated nanoparticle-based chemicals (mainly Pickering emulsions) and their commercialization as “competitive” agents for chemical flooding applications to oil-bearing reservoir rocks. In spite of the fact that the energy and environmental policies worldwide favor the substitution of fossil fuels by renewal energy sources (sun, wind, hydrogen), the economic growth of industrialized countries will continue to depend on oil and natural gas resources for the next 30 years. In this context, any progress toward the improved recovery of hydrocarbons from existing reservoirs by EOR methods will save resources and reduce the environmental fingerprint associated with the exploration, development, and utilization of new fields.

Social impact. The southeastern Mediterranean, and particularly areas located southwest of Crete, in Ionian Sea, and in Western Greece, is at the epicenter for hydrocarbon exploration. In long-term basis, the knowledge and experience obtained from EOR-PNP could contribute to the creation of a “knowledge-based” society by training a new generation of scientists and engineers able to work in developing Greek oil upstream industry. Though, currently the growth of Greek upstream industry is not foreseen at short- or long-term, the know-how and experience earned by scientists and engineers from their involvement in EOR processes might be utilized on the design, development and implementation of remediation strategies on contaminated sites to mitigate the environmental pollution.