

Depositional conditions during Pliocene and Pleistocene in Northern Adriatic and possible lithostratigraphic division of these rocks

J. Velić and T. Malvić

ORIGINAL SCIENTIFIC PAPER

In the area of Northern Adriatic Neogene and Quaternary sediments have relatively large thicknesses. Those are deposited in some depressions located inside Adriatic Basin, where is the largest Po Depression. Recent borders of Po Depression are located in Italian and Croatian offshore where hemipelagic sequences of Pliocene and Pleistocene were interrupted by Po palaeodelta progradations, and to a lesser extent of Adige and Piave Rivers. These sediments include important reservoirs with significant quantities of hydrocarbon gas, and it is why they are well explored in areas of Italian and Croatian gas fields by deep wells as well as different methods for subsurface imaging, mostly by reflective seismic. Sequence of Pliocene and Pleistocene sediments can reach thickness of 6000 m, and it is divided in lithostratigraphic system with units in rank of formation. On Italian side Cenozoic sediments up to Mesozoic basement are divided in twelve formations, but on Croatian side has been described only one formation. It is Susak Formation that encompasses all Cenozoic rocks. It is why in Croatian part of Northern Adriatic in proposed introducing of the following lithostratigraphic units 8 in rank of formation): Dinaridi Formation (Mesozoic rocks), Susak Formation (Palaeocene-Miocene rocks), Istra Formation (Pliocene sediments) and Ivana Formation (Pleistocene and Holocene sediments).

Key words: lithostratigraphy, Pliocene, Pleistocene, Po Depression, North Adriatic, Croatia

1. INTRODUCTION

Republic of Croatia territory included more than 54 000 km⁵ of Adriatic Sea. According to bathymetry the offshore can be subdivided into four areas.²¹ (1) Area between Istra and Po River delta, where is sea bottom slightly jagged with maximal depth up to 39 m, (2) from line Ravenna-Pula to line Ancona-Zadar with average depths up to 70 m, (3) transitional zone between Central and Southern Adriatic with depths between 70-200 m, (4) from line Monte Gargano-Mljet-Pelješac toward south with depths 200-1 000 m and strongly jagged.

During geological history depositional conditions and tectonic activity in Adriatic offshore had been significantly changed. Adriatic Sea is eventually formed in Holocene after Flandrian transgression.^{3,6,16} However, deposits that today are incorporate in Adriatic Basin are significantly older. The oldest rocks proven in wells are Permian and Triassic, which are up to Ladinian series deposited at epeiric carbonate platform, as part of so called Adria-Apulia plate located on the north-eastern margin of Gondwana. It is followed by rocks of intra-oceanic, isolated Southern Tethyan Megaplatfrom (STM) from end of Ladinian to late Early Jurassic (Toarcian). It is covered by sediments of Adriatic Carbonate Platform (AdCP) from Toarcian to the end of Cretaceous.²³ During Permian period clastics, evaporates and carbonates had been deposited, and in Lower Triassic clastites and carbonates. Locally part of

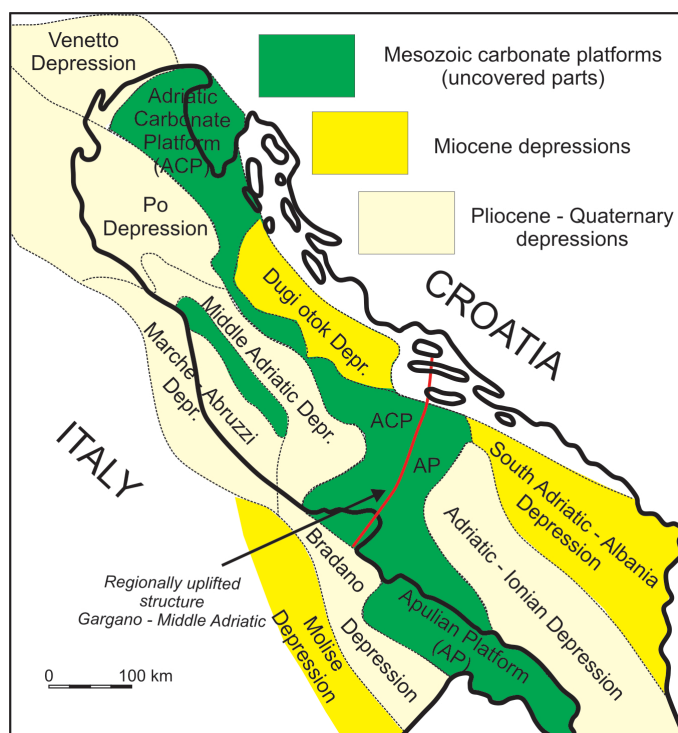


Fig. 1. Depression in Adriatic offshore (modified after 13)
Sl. 1. Depresije u Jadranskom podmorju (modificirano prema 13)

these rocks had been deposited in sabkha environment. Strong tectonic displacements were recorded along deep faults through entire lithosphere during Middle Triassic. It caused basin extension and volcanism. Large AdCP had been gradually disintegrated and uplifted at the end of Cretaceous. Transgression in Early Palaeogene only locally reactivated marine of fresh water sedimentation. Uplifting was accompanied with clastic sedimentation¹⁰, which lasted also in Miocene, Pliocene, Pleistocene and Holocene, but with different detritus sources. In analysed area of North Adriatic, sediments from Palaeocene to Miocene age can be found only locally and mostly in deeper parts, represented by carbonates. On contrary, Pliocene, Pleistocene and Holocene deposits have covered entire area with significant thicknesses and consist of marlstones, clay (stones), siltstones, silts, sandstones and sands.¹³

Adriatic Basin is divided on particular depressions of different ages regarding beginning of creation. Three depressions are formed in Miocene: Dugi otok, South Adriatic-Albania and Molise. Later, in Pliocene, sinking of sea basin bottom caused forming of other depressions: Venetto, Po, Marche-Abruzzi, Middle Adriatic, Bradano and Adriatic-Ionian¹³ (Figure 1). The largest depressions are Po and South Adriatic-Albania, but no one has continuous borders and depositional environments through geological past. It is reflected in different sediment thicknesses and areas as well as unconformities among particular lithological units. Depressions are mostly asymmetrical. Croatian part includes entire Dugi otok Depression, eastern parts of Po and Middle Adriatic Depressions and northern part of Southern Adriatic-Albania Depression.

The goal of presented analysis and proposed lithostratigraphic division is area of Po Depression. The largest part is today located onshore, between Southern Alps and Apennines, which in Pliocene was under sea level (Figure 3). The rest is in northern Adriatic offshore ranging to margins of Istrian part of AdCP. Numerous Croatian gas fields are discovered in the eastern part of depression. Generally Po Depression is fulfilled by sediments of Pliocene, Pleistocene and Holocene age. Siliciclastic detritus have origin mostly in Alps and partially from Apennines. Total thickness can locally overreach 6 000 m in Italian part. In entire Po Depression many hydrocarbon reservoirs had been discovered, mostly of gas. It pointed out the need for sediment division based on lithostratigraphy nomenclature. Moreover, the first gas discoveries had been found in Italian offshore and first lithostratigraphy units had been outlined very detail. On contrary, Croatian nomenclature mostly was based on results obtained with surface exploration of eolian sediments of Susak Island as well as of uncovered parts of AdCP located in Istra. It is why Croatian lithostratigraphy included significantly lower number of lithostratigraphy units. Today valid lithostratigraphy nomenclature in Italian and Croatian parts of Po Depression is given in Table 1.

It is clear (Table 1) that some kind of problem exists in Croatian part of Po Depression regarding dividing or describing of Cenozoic sediments, because all are incorporated in one formation Susak. It directly resulted from fact that this formation had been described before discoveries of significant quantities of gas in this part of Croatian offshore, i.e. before detail seismic profiling and well drilling. However, after almost three decades of different exploration, large numbers of data sets are available.

There was possible to outline differences between Neogene and Quaternary sediments, changes in depositional environments and influence of strong climate transitions. All these data together made possible to construct more detailed lithostratigraphic division.

2. Palaeogeographic reconstruction of Northern Adriatic during Pliocene and Pleistocene

Reconstruction of depositional environment of Po Depression is given for Pliocene and Pleistocene epochs, when Adriatic Sea was forming up to present-day borders, mostly influenced by glacial and interglacial periods.

2.1. Northern Adriatic in Pliocene (5.332-2.588 Ma)

At the end of Miocene, approx. 6 Ma ago, glacial in Antarctic area caused

Table 1. Comparison of Croatian and Italian lithostratigraphy nomenclature for rank of formation

Chronostratigraphic units	Lithostratigraphic formations	
	Croatian name	Italian name
Holocene	Recent sediments	
Pleistocene	Susak	Ravenna
		Carola
Pliocene	Susak	Porto Garibaldi
		Corsini*
		Canopo*
		Santerno
Miocene	Susak	Clara
		Corinna
		Schlier
		Cavanella B
		Bisciario
		Cavanella A
		Scaglia Cinerea
Oligocene		Scaglia
Eocene (Palaeocene?)		
Mesozoic	Dinaridi	Calcarei Del Cellina

(*characteristic lithofacieses of these formations exist exclusive in Italian part of Po Depression)

global sea-level decreasing for about 50 m. Also, the connection through Gibraltar with Atlantic was interrupted and in Mediterranean sea-level had been significantly decreased. In many shallow water environments a large quantities of evaporates had been sedimented. It is known as Messinian salinity crisis event reflected also in Adriatic (e.g. ref.²²). Evaporates are today in the top of Miocene sediments in Mediterranean (Figure 2), what is confirmed in the 1970 by drillings performed with ship Challenger.²⁵ The largest part of Mediterranean represents in Messinian isolated, shallow water, evaporates basin, reduced at the less than half of previous water area. Similar event of reducing happened 10-11 Ma ago and little bit more to the north, when Paratethys was disintegrated in several smaller basins (Pannonian, Dacian, Black Sea, Caspian, Aral^{12,15}). However, connection between Mediterranean and Atlantic was re-established at the end of Messinian and new sedimentation cycle begun in new marine environment.

In the beginning of Miocene global sea-level rising was happened. This level was higher in Lower Pliocene than today. Adriatic Sea then covered much larger area, especially at the side of present-day Italy (Figure 3), what can be concluded from distribution of marine Pliocene sediments in the foot hills of Northern Apennines and in the delta of Po River.²¹

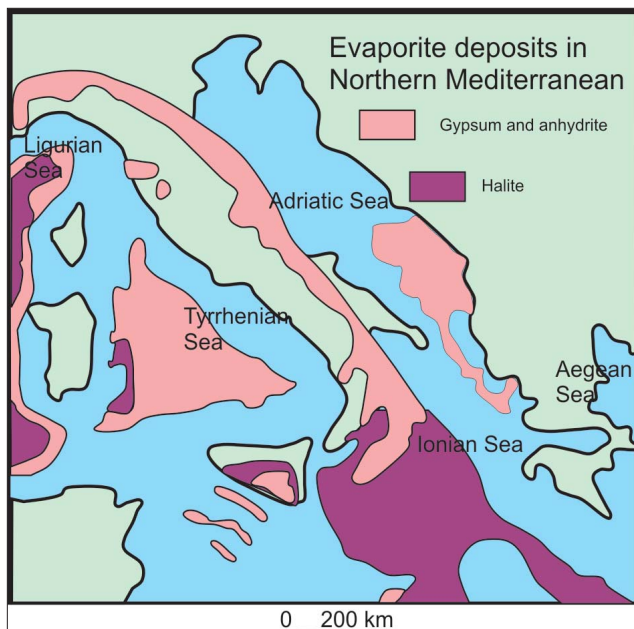


Fig. 2. Distribution of Messinian sediments of halite, gypsum and anhydrite in Mediterranean (modified after²⁵)

Sl. 2. Rasprostanjenost mesinskih naslaga halita, gipsa i anhidrita u Sredozemlju (modificirano prema²⁵)



Fig. 3. Adriatic Sea borders in Lower Pliocene (modified after²⁶)

Sl. 3. Granice Jadranskog mora u donjem pliocenu (modificirano prema²⁶)

Sediments of Lower Pliocene in Croatian part of Adriatic are characterised by numerous samples of marine planktonic and benthic foraminifera, which palaeontologically indicate on warm climate and sedimentation in deeper and open sea, i.e. in outer shelf.^{2,17} Upper Pliocene sediments indicate on decreasing in species number and larger quantity of planktonic foraminifera⁸ what describe moderate-cold climate as result of glaciation. Benthic foraminifera in Northern Adriatic are indicator of lower, epibathial environment with average depth 600–1 000 m. These sediments that today have larger permeability are mostly deposited at Italian side of basin slope in the area that was relatively fast sinking during Upper Pliocene, i.e. 3.0-2.2 Ma ago.¹⁴ Foraminifer's species also indicate that large mass of organic matter had been transported in this area. It was held in upper part of water column thanks to eutrophic conditions or deposited with sands.

2.2. Northern Adriatic in Quaternary (2.588 Ma – present)

Quaternary period is divided in Pleistocene epoch (2.588-0.0117 Ma) and Holocene epoch (0.0117 Ma to recent). It is characterized by climate changes that caused many changes of life evolution and relief forms. Marine Pleistocene sediments had been deposited both in cold, moderate and warm conditions of open and middle shelf to lithoral. In some place periodically land existed. In the northern Earth hemisphere six glacial periods had been registered, with warmer interglacials among them. According to Alpine division glacial are called *Biber*, *Donau*, *Günz*, *Mindel*, *Riss*, *Würm* (Table 2).

Table 2. Glacials and interglacials during Pleistocene (modified after²⁷)

Names	Glacials and interglacials	Age (years)
Würm	Glacial	11 700 - 110 000
Riss- Würm	Interglacial	110 000 - 130 000
Riss	Glacial	130 000-200 000
Mindell-Riss	Interglacial	200 000 - 300/380 000
Mindell	Glacial	300/ 380 000 - 455 000
Günz – Mindell	Interglacial	455 000 - 620 000
Günz	Glacial	620 000 - 680 000
Günz – Donaü	Interglacial	850 000 - 1300 000 (?)
Donaü	Glacial	1300 000 - 1 550 000
Donaü – Biber	Interglacial	2 100 000 - 2 500 000
Biber	Glacial	2 500 000- ?

During Pleistocene glacials volume of ice was three times larger than today, and ice covers had average thickness about 2 km. Huge amount of ocean water was iced what decreased sea-level more than 120 m in comparison with present-day. On contrary, inter-glacial periods resulted in sea-level rising, and sometimes it overreached present level for several meters. Such sea-level changes during Pleistocene and Holocene had been reflected in palaeogeography of Adriatic Sea, which after

last glacial⁷ (Würm) obtained recent borders (Figures 4, 5).

2.3. Depositional characteristics during Pliocene and Pleistocene

During Pliocene and Pleistocene material in Po Depression was mainly transported by Po River, including subsidiaries (Figures 4, 5). Together with Po River, probably influence had Adige River (Figures 4, 5) that also still today transport detritus in Po Depression. The third transport mechanism could be Piave River (Figure 4, 5), located northern from Venice. This river is mostly source of detritus for Veneto Depression and is the shortest from all three mentioned rivers, but part of material from distal part of its delta could reach north part of Po Depression.

Pliocene turbidites are mostly formed in river deltas and represented by clastic deposits. It is silt and sand in Italian part of Po Depression. In Croatian part sediments of delta and prodelta existed only in Pleistocene when border of Adriatic Sea was moved toward east, while periodical sea-level decreasing due to glacial events several

times moved to south. Turbidites transported majority of material in relative shallow, hemipelagic environment, with depth up to 200 m. This environment can be represented by distal part of delta, i.e. prodelta. Mostly fine-grained sediment indicated on turbidites of low density¹⁰, i.e. currents with dominantly distal facies of Bouma sequence¹, like Tc, Td and Te. These sediments are distant from proximal delta area and it is why they are interbedded with interturbiditic, hemipelagic interval Tf¹⁹. Such interval can indicate on absence of re-sedimentation processes or delta moving due to retrogradation caused by sea-level increasing (alocyclic process) or lateral (autocyclic process). Just alteration of turbiditic intervals and hemipelagic facies represents main property of depositional sequences in Croatian part of Po Depression during Pliocene and Pleistocene.

Accordingly, there is good base for selection of Pliocene and Pleistocene depositional lithofacies as separate lithostratigraphic units in Croatian part of North Adriatic. Data from several published papers, mostly about typical facies and lithological properties that characterised them as lithostratigraphic units, are used for detail presentation of both lithofacies.

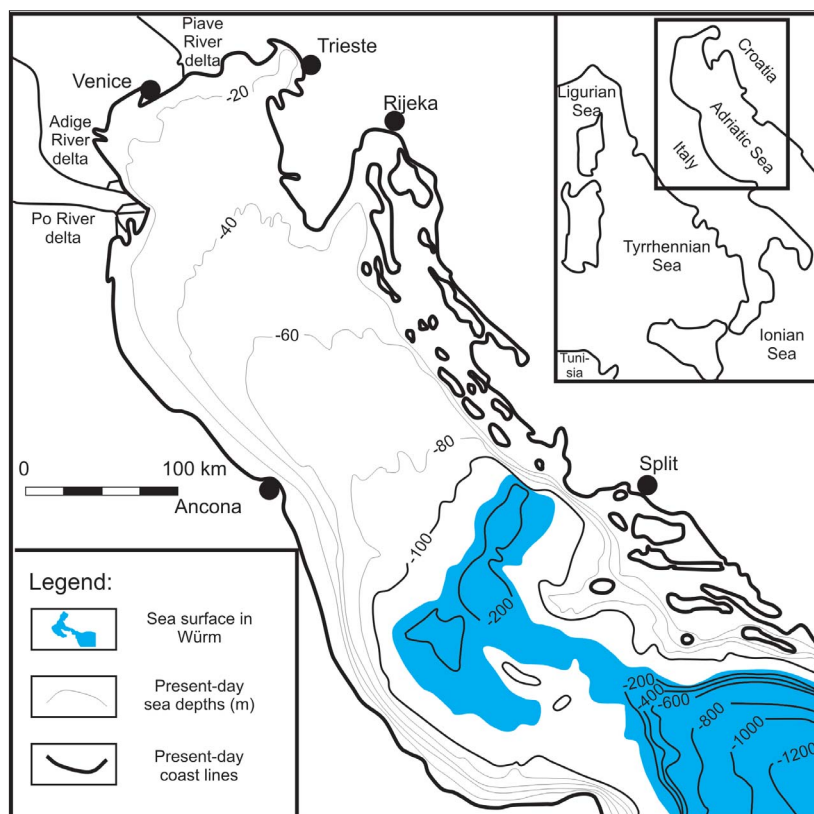


Fig. 4. Borders of Adriatic Sea during Würm (modified after⁴)
 Sl. 4. Granice Jadranskog mora tijekom virna (modificirano prema⁴)

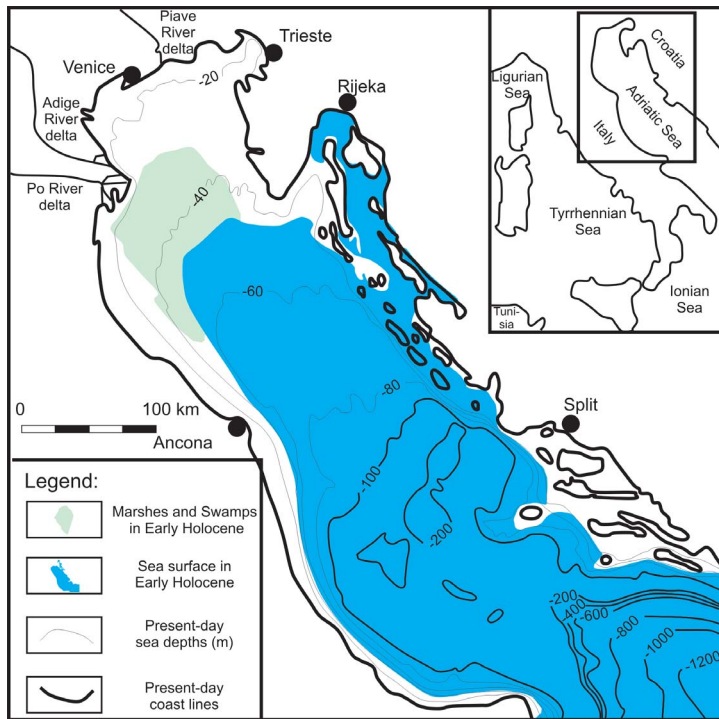


Fig. 5. Borders of Adriatic Sea in beginning of Holocene (modified after⁴)
 Sl. 5. Granice Jadranskog mora početkom holocena (modificirano prema⁴)

3. Typical lithofacies of Pliocene and Pleistocene sediments as base for selection new lithostratigraphic units in Northern Adriatic

In the next paragraphs lithofacies are described in south-eastern and eastern parts of Po Depression. Analyzed locations mostly correspond with positions of Croatian gas fields, i.e. these are parts where sequences of Pliocene, Pleistocene and Holocene are explored in details (Figure 6).

3.1. Pliocene and older lithofacies

During Pliocene borders of Adriatic Sea started to form. It is especially valid for border in Alpine region (Figure 3), and in the area of Gargano Peninsula. Here is important palaeogeography of Alps, which represented area of glaciers forming and advancing as well as source of many rivers with Po as the largest. Po River has recent delta in area of Ravenna town and in Quaternary it was the largest transport mechanism of detritus from the land to Northern Adriatic. The second source is delta of Adige River, and the third of Piave River. Depositional area of Po Depression is mostly determined by Po River delta, and eastern part of area is located in Croatia, mostly south-western from Istra Peninsula and Kvarner islands (Figure 1). But, in Pliocene deltas of all mentioned rivers, especially Po, had been moved toward west and northwest about 200 km. It is why its influence in Pliocene in Croatian part was probably very low and such was remained at least to Upper Pliocene, when Adriatic coast line started to move toward recent borders. Also, Alpine region covered larger areas in Upper Pliocene then in Middle and Lower Pliocene. It is why Pliocene sediments in Croatian offshore are mostly represented by basin pelites – clays and silts. Such facies can be easiest recognized at the very southeast margin of Po Depression, and those are Katarina and Marica Fields, located close to border between Po and Dugi otok Depressions (Figure 6).



Fig. 6. Schematic map of Croatian gas fields in Northern Adriatic
 Sl. 6. Shematski položaj hrvatskih plinskih polja u Sjevernom Jadrano

The oldest sediments in Marica Field are limestones and dolomites of Cretaceous age, which belongs to lithostratigraphic unit-formation Dinaridi. But, some analysis pointed out that part of carbonates could be selected in Italian formations Scaglia, Scaglia Cinera, Cavanella A, Bisciario, Cavanella B, Schlier, Corinna and Clara, i.e. belongs to period from Palaeocene to Lower Miocene. Also, in wider area of Katarina Field, toward Italy (border between AdCP and Adriatic-Ionian Basin), the oldest rocks are described as Middle and Upper Eocene limestone (equivalent of Italian formation Scaglia). In Katarina Field Pliocene sediments are consisted of highly fine-grained sediments like hemipelagic marlstones and clayey marlstones as good isolator rocks. There is no evidence of sands or silts. Only in Pleistocene deposits in Marica Field are discov-

ered 10, and in Katarina Field 5 gas reservoirs in sands, silty sands and silts.

3.2. Pleistocene lithofacieses

These lithofacieses is significantly different from Pliocene due to often intervals of sands and silts. How Croatian part of Po Depression had been closer to Po River delta, more and more sands and silts had been transported in depressions. In Croatian part such facies can be easiest recognized in the largest gas field Ivana (Figure 6). There is proven sequence of Pleistocene sediments^{5,24}, with thickness between 900 and 1 500 m. Toward deeper basin part thicknesses can be even larger. Particular sandy Pleistocene gas reservoirs can overreach thickness of 20 m.

In Ivana Field the oldest sediments are of Cretaceous age unconformably followed by Pliocene clayey marlstones and Pleistocene sands, silty sands and silts (with gas reservoirs), locally interbedded by clays, marls and clayey marls. The youngest are Holocene muds, clays and sands of decametre values.²⁰ Entire Ivana structure is separated from AdCP racks in Istra by regional fault.²²

4. Proposal of new lithostratigraphic units - FORMATIONS

Lithostratigraphic nomenclature today applied in Northern Adriatic has 13 lithostratigraphic formations on Italian side covering geological scale from Mesozoic to Pleistocene. However, for the same time period there are only 2 formations on the Croatian side. So, Dinaridi Formation includes rocks of AdCP and Susak Formation sediments of Palaeocene, Eocene, Oligocene, Miocene, Pliocene and Pleistocene series. Sediments of this long time period belongs only to one formation, although can locally in Italian part reach 6 000 m.

Obviously, there is need for additional selection of these sediments in several lithostratigraphic units, here formations, which can be consider as informal with purpose of exploration new hydrocarbon reservoirs. Like other Croatian lithostratigraphic units, especially in Pannonian Basin and somewhere in Dinarides, it can be believed that new units with start to use as formal lithostratigraphic units in rank of formation. According to North American Stratigraphic Code¹¹, which is the most detail and often document, i.e. instructions, for selection of stratigraphical units (and of course lithostratigraphic), the new lithostratigraphic units-formations in Northern Adriatic can be selected regarding the following criteria (ref. ¹¹, p. 1567):

a) Formation is fundamental unit... in describing and interpreting the geology of a region... based on lithic change... that give it the greatest practicable unity of constitution;

b) Formation should possess some degree of internal lithic homogeneity... it may contain... (1) rock of one lithic type, (2) repetitions of two or more lithic types, (3) extreme lithic heterogeneity that in itself may constitute a form of unity when compared to the adjacent units.

Accordingly to listed assumptions it could be proposed the following lithostratigraphic nomenclature for Cro-

atian part of Northern Adriatic, analysing from younger to older sediments, i.e. in direction of well drilling (Figure 7):

Pleistocene: These sediments are transgressive on Pliocene with average thickness 400-1900 m.⁸ Pleistocene is divided at lower and upper. Lower Pleistocene includes marly clays, clayey marls, alterations of siltite and sands and weak consolidated sandstones. Upper Pleistocene consists of sandy and marly clays and clays with alterations of sands and silts. Coal beds can be found in lower part. The main property of Pleistocene deposits is very low compaction and sand and silt beds with thickness of several meters, which are results of deposition in Po River delta and prodelta. During Pleistocene the location of coast line in interglacials was similar to recent (Figure 5), but in glacial coast lines were moved significantly toward southeast (Figure 4). It is why sands are more often, thicker and with low portions of silts and clays at the northwest of depression (like in Ivana Field, Figure 6) then at the southeast (like in Katarina Field, Figure 6) where turbidites came only in glacial with low sea-level. So, Pleistocene lithofacies can be considered as monotonous alteration of impermeable (clay, clayey marls) and permeable (silts, sands, sandstones) sediments. It is why Ivana Field is selected as typical locality of Pleistocene delta and prodelta sediments. Consequently, it is suggested that Pleistocene sediments would be selected as **Ivana Formation**. Here is important to mention that borders between formations and chronostratigraphic units do not need to be equal, on contrary such borders very often are different except it is not reflected in lithological composition.

Pliocene: These sediments in Croatian part of Northern Adriatic, based mostly on core samples from gas fields, are described as impermeable. Of course, they are not impermeable in entire depression, i.e. they can not be such laterally, but sandstone component was deposited almost exclusively in recent Italian offshore. Typical description of Pliocene sediments in Croatian part had been given in locality Istra More⁸, where it is divided in Lower Pliocene with marlstones and rare clays and silts in total thickness 10-50 m, Middle Pliocene with marly clays, siltstones and partially sands (25-250 m), and Upper Pliocene with marlstones and rarely sandstones (50-200 m). Those sediments are created in hemipelagic environment or distal part of delta (prodelta). It is considered that Pliocene lithofacies, as mostly homogeneous, can be named as **Istra Formation**.

Miocene-Palaeocene: In several gas fields carbonate sediments are drilled. In Marica Field these rocks belongs periods from Palaeocene to Lower Miocene. Similarly, the age of limestones in the wider area of Katarina Field, toward Italy, is Middle and Upper Eocene. Such sediments are, up to now, described only at western margin of Northern Adriatic gas fields zone, i.e. approximately along border of AdCP and Adriatic-Ionian Basin. It is lithologically homogeneous carbonate lithofacies, locally determined and poorly explored. It is why we considered that all lithofacies from periods Palaeocene-Miocene would need to keep in existing **Susak Formation**.

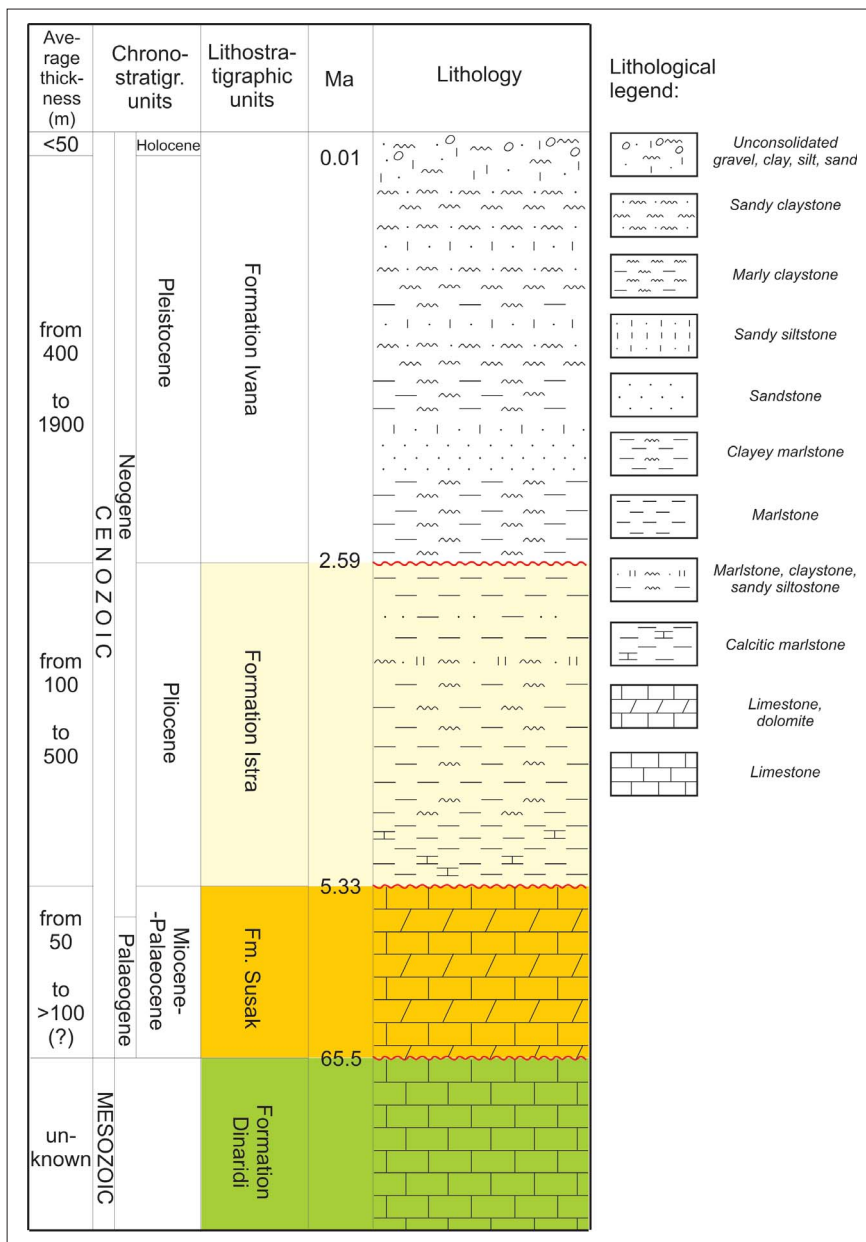


Fig. 7. Proposed lithostratigraphic nomenclature in Northern Adriatic
 Sl. 7. Predložena litostratigrafska nomenklatura u Sjevernom Jadranu

Mesozoic: All possible Northern Adriatic sediments reached in top by drilling, where is assumed or proven age of Mesozoic eratem like Cretaceous rocks in Marica Field, are selected in **Dinaridi Formation**.

5. CONCLUSION

Here is presented analysis about differences between Pliocene and Pleistocene sediments in Northern Adriatic formed during creation and deposition in the area today called as Po Depression. This depression is part of Adriatic Basin, partially located in Italian and partially in Croatian offshore. Moreover, there are described locations where carbonate sediments of are drilled, mostly of Mesozoic or Cenozoic eratem. Lithological data about

Northern Adriatic rocks and deposits were available in large database of published papers, which included data from deep wells.

Here are selected and named formations as the fundamental units in lithostratigraphic nomenclature. The names are given according rules about lithological homogeneity or similarity as it is prescribed in North American Stratigraphic Code. Those are: Istra Formation of Pliocene and Ivana Formation of Pleistocene and Holocene age. Pliocene sediments are impermeable, mostly represented by marlstones and rarely marly claystones, clays and siltstones. Sands and poorly consolidates sandstones are, in Croatian par of Po Depression, very rarely. It is why Istra Formation is described as mostly lithologically homogeneous sequence of impermeable sediments. The younger Pleistocene and Holocene sediments are represented by alteration of impermeable and permeable sediments. Impermeable are marly claystones, clayey marlstones and permeable are siltstones, poorly consolidated sandstones, silts and sands. It is why Ivana Formation represents monotonous alteration of impermeable and permeable sediments.

Logically, it can be followed by mapping of regional unconformities between and inside formations as well as defining of regional markers (key beds). Also, there is very possible to make further division of formations into lithostratigraphic members, taking into consideration results of numerous high-resolution geophysical measurements. Basic data for such procedure could be collected from logging measurements and interpreted reflective seismic, and could be used for determination and naming of EL-markers (characteristic thin beds in concordant order) and EL-borders (characteristic plane linked to unconformities).

6. REFERENCES

6.1. Published papers and books

1. Bouma, A.H. (1962) *Sedimentology of some flysch deposits: a graphic approach to facies interpretation*, Amsterdam, Elsevier.
2. Cita, M.B. and Ryan, W.B.F. (1972) *The Pliocene Record in deep sea Mediterranean sediments. Times-scale and general synthesis*, Initial Reports DSDP, Washington.
3. Colantoni, P., Gallignani, P. and Lenaz, R. (1979) Late Pleistocene and Holocene Evolution of the North Adriatic Shelf (Italy), *Marine Geology*, 33, M41-M50.
4. Correggiari, A., Roveri, M. and Trincardi, F. (1996) Late Pleistocene and Holocene Evolution of the North Adriatic Sea, *Quaternario*, 9, 2, 697-704.
5. Đureković, M., Krpan, M., Pontiggia, M., Ruvo, L., Savino, R. and Volpi, B. (1998) Geological modelling and petrophysical characterisation of turbiditic reservoirs of the Ivana gas field – R. Croatia, *Nafta*, 49, 7/8, 241-258.
6. Fairbanks, F.G. (1989) A 17 000 years glacio-eustatic sea level record: influence on glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation, *Nature*, 342, 637-642.
7. Herak, M. (1987) *Geologija, Školska knjiga*, Zagreb.
8. Kalac, K. (2008) *Biostratigrafsko-kronostratigrafska istraživanja pliocensko-pleistocenskih naslaga u podmorju Jadrana s posebnim osvrtom na klimatske promjene*, Naftaplin, knjiga 45/8, Zagreb.
9. Kuenen, P.H. H. (1957) Sole markings of graded graywacke beds, *Journal of Geology*, 65, 231-258.
10. Middleton, G.V. & Hampton, M.A. (1976) *Subaqueous sediment transport and deposition by sediment gravity lows – in: Stanley, D. J. & Swift, D.J.P. (ed.): Marine Sediment Transport and Environmental Management*, John Wiley, New York.
11. North American Commission On Stratigraphic Nomenclature (2005) North American Stratigraphic Code, *AAPG Bulletin*, 89, 11, 1547-1591.
12. Piller, W.E., Harzhauser, M. and Mandić, O. (2007) Miocene Central Paratethys stratigraphy – current status and future directions, *Stratigraphy*, 4, 151-168.
13. Prelogović, E. and Kranjec, V. (1983) Geološki razvitak područja Jadranskog mora. *Pomorski zbornik*, 21, 387-405.
14. Rio, D., Channel, J.E.T., Bertoldi, R., Poli, M.S., Vergerio, P.R., Raffi, I., Sprovieri, R. and Thunell, R.C. (1997) Pliocene sapropels in the northern Adriatic area: Chronology and paleoenvironmental significance, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Paleocology*, 135, 1-25.
15. Rögl, F. (1998) Paleogeographic considerations for Mediterranean and Paratethys seaways (Oligocene to Miocene), *Ann. Naturhist. Mus. Wien*, 99A, 279-310.
16. Stanley, D.I. (1995) A global sea level curve for the late Quaternary: the impossible dream?, *Marine Geology*, 125, 1-6.
17. Thunel, M. (1971) Grada terciarnog bazena u sjeveroistočnom dijelu Jadranskog mora, *Nafta*, 22, 4-5, 275-434.
18. Tišljarić, J. (1994) *Sedimentne stijene, Školska knjiga*, Zagreb.
19. Van Der Lingen, G.J. (1969) The turbidite problem, *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 12, 7-50.
20. Vdović, N. & Juračić, M. (1993) Sedimentological and Surface Characteristics of the Northern and Central Adriatic Sediments, *Geologia Croatia*, 46, 1, 157-163.
21. Velić, J. (2007) *Geologija ležišta nafte i plina*, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
22. Veseli, V. (1999) *Facijesi karbonatnih sedimenata mlađeg mezozoika i paleogena u pučinskim bušotinama sjevernog Jadrana*, Disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
23. Vlahović, I., Tišljarić, J., Velić, I. & Matičec, D. (2005) Evolution of the Adriatic Carbonate Platform: Palaeogeography, main events and depositional dynamics, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Paleocology*, 220, 3-4; 333-360
24. Zelić, M., Mlinarić, Ž. & Jelić-Balta, J. (1999) Croatian Northern Adriatic Ivana gas field ready for development (Reservoir characteristics and gas inflow conditions into the well), *Nafta*, 50, 1, 19-37.

6.2. Internet sources

25. URL 1, <http://records.viu.ca/charles/messinian-crisis-apr03.htm>, 8. XI. 2010.
26. URL 2, http://commons.wikimedia.org/wiki/Adriatic_Sea, 8. XI. 2010.
27. URL 3, http://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_glaciation, 8. XI. 2010.

ACKNOWLEDGMENT

This paper represents lithostratigraphic analysis performed in 2010 in the project “Stratigraphical and geomathematical research of petroleum geological systems in Croatia (project no 195-1951293-0237)”, financed by the Ministry of Science, Education, and Sports of the Republic of Croatia. We wish to thank reviewers for useful and benevolent suggestions.



Authors:

Josipa Velić, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Department of Geology and Geological Engineering, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb, e-mail: josipa.velic@rgn.hr (Full Professor)

Tomislav Malvić, INA-Industry of Oil, Plc., Sector for Geology and Geological Engineering, Šubićeva 29, 10000 Zagreb, e-mail: tomislav.malvic@ina.hr (Assistant Professor, Advisor)

Taložni uvjeti tijekom pliocena i pleistocena u Sjevernom Jadranu te moguća litostratigrafska raščlamba nastalih stijena

J. Velić i T. Malvić

IZVORNI ZNANSTVENI ČLANAK

Na području Sjevernog Jadrana nalaze se neogenske i kvartarne naslage razmjerno velikih debljina. Odlagane su u nekoliko depresija unutar Jadranskoga bazena, od kojih je najveća Padska. Današnje granice te depresije pružaju se unutar talijanskog i hrvatskog podmorja Jadrana gdje su pliocenske i pleistocenske sekvencije hemipelagičkog taloženja prekidane progradacijama delte rijeke Po, a u manjoj mjeri i rijeka Adige i Piave. Ti sedimenti sadrže važna ležišta značajnih količina prirodnog plina, te su dobro istraženi na području više talijanskih i hrvatskih plinskih polja dubokim bušotinama, kao i nizom različitih metoda snimanja podzemlja, uglavnom refleksijskom seizmikom. Slijed pliocenskih i pleistocenskih sedimenata može debljinom doseći i 6 000 m, a podijeljen je u odgovarajući sustav litostratigrafskih jedinica ranga formacija. Dok su na talijanskoj strani kenozojske naslage do mezozojske podine razrađene na dvanaest formacija, na hrvatskoj strani do sada je izdvojena samo jedna. To je formacija Susak koja obuhvaća sve stijene unutar kenozoika. Stoga se u hrvatskom dijelu Sjevernoga Jadrana predlaže uvođenje sljedećih litostratigrafskih jedinica u rangu formacija: formacija Dinaridi (mezozojske stijene), formacija Susak (paleocenske-miocenske stijene), formacija Istra (pliocenske naslage) i formacija Ivana (pleistocenske i holocenske naslage).

Ključne riječi: litostratigrafija, pliocen, pleistocen, Padska depresija, Sjeverni Jadran, Hrvatska

1. UVOD

Republici Hrvatskoj pripada više od 54 000 km² površine Jadranskog mora. Prema batimetriji u podmorju se luče četiri područja. Od sjevera prema jugu to su²¹: (1) područje između ušća rijeke Po i Istre, gdje je dno blago razvedeno i maksimalne dubine do 39 m, (2) od poteza Ravenna-Pula do crte Ancona-Zadar dubine su pretežno do 70 m, (3) prijelazno područje između srednjeg i južnog Jadrana s dubinama od 70 do 200 m, (4) od spojnice Monte Gargano-Mljet-Pelješac prema jugu dno je uglavnom na dubinama od 200 do 1 000 m s izraženom razvedenošću.

Tijekom geološke povijesti taložni uvjeti u jadranskom podmorju značajno su se mijenjali kao i tektonska aktivnost. Jadransko more je konačno oblikovano u holocenu nakon Flandrijske transgresije.^{3,6,16} No, naslage koje se danas nalaze u Jadranskom bazenu znatno su starije. Najstarije nabušene stijene su permske i trijaskne naslage, do ladinika taložene na epiričkoj karbonatnoj platformi, tzv. Adrija-Apulija ploči, na sjeveroistočnom rubu Gondwane. Slijede stijene intra-ocenske, izolirane Južnotetiske megaplatforme (JTM, engl. STM) od kraja ladinika do mlade donje jure (toarcija), a na njima naslage Jadranske karbonatne platforme (JKP, engl. AdCP) od toarcija do kraja krede).²³ Tijekom perma su taloženi klastiti, evaporiti i karbonati, a u starijem trijasu klastiti i karbonati. Na nekim mjestima dio ovih naslaga odlagan je u sredini koja odgovara sabkha okolišima. Tijekom srednjeg trijasa zabilježeni su značajni tektonski pokreti uz duboke rasjede koji su presijecali cijelu Zemljinu koru, što je uzrokovalo širenje bazena i pojavu vulkanizma. Krajem

krede, prostrana se Jadranska karbonatna platforma postupno dezintegrira i izdiže.²³ Transgresijom u starijem paleogenu obnavlja se tek mjestimična marinska karbonatna ili slatkovodna sedimentacija. Intenziviranje izdizanja prati klastična sedimentacija 10 koja se održala i tijekom miocena, pliocena, pleistocena i holocena, ali s različitim izvorima detritusa. U razmatranom području Sjevernog Jadrana naslage paleocenske do miocenske starosti mogu se naći tek mjestimice i to uglavnom u dubljim prostorima gdje su predstavljene karbonatima. Nasuprot tomu, pliocenski, pleistocenski i holocenski sedimenti prekrivaju cijelo područje i znatnih su debljina, a predstavljeni su laporima, glinama, siltovima, silitima, pješčenjacima i pijescima.

Jadranski bazen podijeljen je na pojedinačne depresije, različite starosti s obzirom na početke njihova formiranja. Tako su se u miocenu oblikovale tri depresije: Dugootočna, Južnojadransko-albanska i Moliška. Kasnije, u pliocenu, spuštanjem nastaju i ostale depresije: Venecijanska, Padska, Marche-Abruzzi, Srednjojadranska, Bradanska i Jadransko-jonska¹³ (slika 1). Najveće depresije su Padska i Južnojadransko-albanska, ali nisu, kao ni ostale, bile stalnih granica rasprostranjenosti i sedimentacijskih uvjeta, što je izraženo kroz nejednaku ispunjenost sedimentacijskog prostora i diskordantne odnose između pojedinih litoloških jedinica. Pretežito su asimetričnog oblika. U hrvatskom dijelu Jadrana nalaze se Dugootočna depresija, istočni dijelovi Padske te Srednjojadranske i sjeverni dio Južnojadransko-albanske depresije.

Predmet ove analize i prijedloga litostratigrafske raščlambe slijeda naslaga je prostor Padske depresije, čiji se veći dio danas nalazi na kopnu, između južnih Alpa i Apenina, a tijekom pliocena je bio pod morem (slika 3). Ostatak se pruža u podmorju sve do granica s istarskim dijelom JKP. U istočnom dijelu depresije otkrivena su brojna hrvatska plinska polja.

Padska depresija ispunjena je pretežno pliocenskim, pleistocenskim i holocenskim sedimentima. Siliciklastični detritus podrijetlom je iz Alpa i manjim dijelom Apenina. Debljine ovih naslaga mjestimice veće od 6000 m nalaze se u njezinom talijanskom dijelu. Kako je u cijeloj Padskoj depresiji otkriveno mnogo ležišta ugljikovodika, uglavnom plina, nametnula se potreba raščlambe naslaga prema načelima litostratigrafske nomenklature. Nadalje, kako su prva otkrića plina bila smještena u talijanskom dijelu depresije, točnije u njezinom priobalju, načinjena je vrlo detaljna podjela prema već spomenutoj litostratigrafskoj nomenklaturi. Za razliku, hrvatska nomenklatura temeljila se uglavnom na rezultatima istraživanja površinskih eolskih sedimenata otoka Suska, te otkrivenih dijelova JKP u Istri, pa je samim time rezultirala znatno manjim brojem litostratigrafskih jedinica. Današnje litostratigrafske podjele u talijanskom i hrvatskom dijelu Padske depresije prikazane su u tablici 1.

Uvidom u tablicu 1 očito je da postoji svojevrsan problem kod raščlanjivanja ili opisivanja kenozojskih sedimenata u hrvatskom dijelu Padske depresije, jer su svi oni zajednički obuhvaćeni unutar jedne formacije Susak. To je posljedica činjenice da je ta formacija izdvojena prije negoli su u tom dijelu hrvatskog podmorja otkrivene značajne količine plina i prije negoli je počelo detaljno seizmičko snimanje i brojno bušenje. Nakon gotovo tri desetljeća različitih istraživanja postao

je dostupan veliki broj podataka, te su uočene razlike unutar neogenskog i kvartarnog slijeda naslaga, promjene taložnih okoliša, ali i utjecaja velikih klimatskih promjena, što zajednički promatrano dopušta načiniti detaljniju litostratigrafsku podjelu.

2. PALEOGEOGRAFSKA REKONSTRUKCIJA PODRUČJA SJEVERNOG JADRANA TIJEKOM PLIOCENA I PLEISTOCENA

Rekonstrukcija taložnog prostora Padske depresije vezana je za epohe pliocena i pleistocena, kada je Jadransko more dobivalo svoje današnje granice, poglavito pod utjecajem izmjena ledenih i međuledenih doba.

2.1. Sjeverni Jadran u pliocenu (5,332-2,588 milijuna godina)

Krajem miocena, prije otprilike 6 milijuna godina, zbog oledbi u antartičkom prostoru globalno opada morska razina za oko 50-ak metara. Uz to, zbog prekida veze a Atlantskim oceanom kroz Gibraltarski tjesnac, u prostoru Sredozemnog mora dolazi do izrazitog oplićavanja uz taloženje velikih količina evaporita. Taj se događaj poznat kao mesinska kriza saliniteta odrazila i u Jadranu (npr. rad²²). Evaporiti se danas nalaze u vrhu miocenskog slijeda sedimenata ispod Sredozemnog mora (slika 2). To je i potvrđeno 1970. godine bušenjima brodom Challenger.²⁵ Najveći dio Sredozemnog mora tada je predstavljao izolirani plitkovodni evaporitni bazen i sveden je na manje od polovice svoje prethodne površine. Sličan događaj reduiranja vodene površine dogodio se nekoliko milijuna godina ranije i malo sjevernije, tj. početkom gornjeg miocena prije 10-11

milijuna godina, kada se Paratethys dezintegrirao na niz manjih bazena (Panonski, Dacijski, Crnomorski, Kaspijski, Aralski^{12,15}). No, u mediteranskom prostoru ponovnim otvaranjem veze Sredozemnog mora s Atlantskim oceanom koncem mesina započeo je novi ciklus sedimentacije u novouspostavljenom marinskom okolišu.

Početkom pliocena dolazi do globalnog porasta morske razine koja je tijekom donjeg pliocena bila viša nego danas. Jadransko more tada je zauzimalo znatno veće područje, poglavito na strani današnje Italije (slika 3), na što ukazuje rasprostranjenost marinskih pliocenskih sedimenata u podnožju sjevernih Apenina te u dolini rijeke Po.²¹

Sedimenti donjega pliocena hrvatskog dijela Jadrana odlikuju se brojnim nalazima marinskih planktonskih i bentičkih foraminifera, koji u paleoekološkom smislu ukazuju na toplu klimu i na

Tablica 1. Usporedba hrvatskog i talijanskog litostratigrafskog nazivlja formacija

Kronostratigrafska jedinica	Litostratigrafske formacije	
	Hrvatski naziv	Talijanski naziv
Holocen		Recentni sedimenti
Pleistocen	Susak	Ravenna
		Carola
Pliocen	Susak	Porto Garibaldi
		Corsini*
		Canopo*
		Santerno
Miocen	Susak	Clara
		Corinna
		Schlier
		Cavanella B
		Bisciaro
		Cavanella A
		Scaglia Cinerea
Oligocen		Scaglia
Eocen (Palaeocen?)		
Mezozoik		Dinaridi
		Calcarei Del Cellina

(*karakteristični litofacijesi tih formacija postoje samo u talijanskom dijelu Padske depresije)

taloženje u dubljem i otvorenom moru, tj. vanjskom šelfu.^{2,17} Gornjo-pliocenske naslage odlikuju se smanjenjem broja vrsta te većom količinom planktonskih foraminifera⁸ što upućuje na umjereno hladnu klimu kao posljedicu zahladnjenja. U Sjevernom Jadranu bentičke foraminifere indikator su donjege epibatijalnog okoliša prosječne dubine oko 600 do 1 000 m, dok su se naslage koje danas pokazuju veći stupanj propusnosti uglavnom taložile na talijanskoj strani bazenske padine u prostoru koji je relativno brzo tonuo tijekom gornjega pliocena, tj. prije 3,0 do 2,2 milijuna godina.¹⁴ Vrste foraminifera također označavaju da je u taj prostor donošena velika količina organske tvari koja je zadržavana u gornjem dijelu vodenog stupca pod djelovanjem eutrofnih uvjeta ili taložena s pijescima

2.2. Sjeverni Jadran u kvartaru (2,588 milijuna godina – danas)

Period kvartara se dijeli na epohe pleistocen (2,588-0,0117 milijuna godina) i holocen (0,0117 milijuna godina do danas). Karakteriziran je izrazitim klimatskim promjenama, koje su bile uzrokom mnogih promjena ne samo u evoluciji živog svijeta već i u oblikovanju reljefa. Marinski sedimenti pleistocena taloženi su u naizmjenično hladnim, umjerenim i toplim uvjetima u području otvorenog i srednjeg šelfa do litorala, dok je na nekim mjestima povremeno egzistiralo kopno. Na sjevernoj zemljinoj hemisferi tijekom pleistocena zabilježeno je šest razdoblja oledbi ili glacijala između kojih su vladala toplija razdoblja, tj. interglacijali. Prema alpskoj podjeli glacijali se nazivaju biber, donau, ginc, mindel, ris, virm (njem. Biber, Donaü, Günz, Mindel, Riss, Würm) (tablica 2).

Tijekom pleistocenskih glacijala obujam nastalog leda bio je oko tri puta veći nego danas, a ledeni su pokrovi bili prosječne debljine oko 2 km. Velika količina oceanske vode bila je zaleđena što je snižavalo globalnu morsku razinu i za više od 120 m u odnosu na današnju. Deglacijacije su rezultirale porastom razine mora, pa je u nekim razdobljima ona dosegala razinu i nekoliko metara više od recentne. Te promjene morske razine tijekom pleistocena i holocena odrazile su se i na paleogeografiju Jadranskog mora koje je tek nakon zadnjeg, tj. virmkog glacijala⁷ poprimilo današnje granice (slike 4, 5).

2.3. Značajke taloženja tijekom pliocena i pleistocena

Tijekom pliocena i pleistocena glavni izvori, tj. donositelj materijala u Padskoj depresiji bila je rijeka Po sa svojim pritocima (slike 4, 5). Uz rijeku Po utjecaj je vjerojatno imala i rijeka Adige (slike 4, 5) koja danas također donosi detritus u Padsku depresiju. Treći izvor materijala mogla je biti rijeka Piave (slike 4, 5) koja se

Tablica 2. Glacijali i interglacijali tijekom pleistocena (modificirano prema²⁷)

Nazivi	Ledena i međuledena doba	Starost (god.)
Würm	glacijal	11 700 - 110 000
Riss- Würm	interglacijal	110 000 - 130 000
Riss	glacijal	130 000-200 000
Mindell-Riss	interglacijal	200 000 - 300/380 000
Mindell	glacijal	300/ 380 000 - 455 000
Günz – Mindell	interglacijal	455 000 - 620 000
Günz	glacijal	620 000 - 680 000
Günz – Donaü	interglacijal	850 000 - 1300 000 (?)
Donaü	glacijal	1300 000 - 1 550 000
Donaü – Biber	interglacijal	2 100 000 - 2 500 000
Biber	glacijal	2 500 000- ?

nalazi sjeverno od Venecije. Ona je prvenstveno izvor materijala Venecijanske depresije i najmanja je od spomenute tri rijeke, no dio materijala iz distalnog dijela njezine delte mogao je doseći i sjeverni dio Padske depresije.

Pliocenski turbiditi većim dijelom formirani u zonama riječnih delti predstavljeni su klastičnim naslagama, i to siltom i pijeskom u talijanskom dijelu Padske depresije. U njezinom hrvatskom dijelu slični sedimenti delte i prodele javljaju se tek u pleistocenu kada se granica Jadranskog mora pomaknula prema istoku, dok ju je povremeni pad razine mora uslijed glacijacija više puta pomicao prema jugu. Mutne struje kojima je transportirana većina materijala u moru djelovale su u razmjerno plitkom, hemipelagičkom okolišu čija dubina nije prelazila 200 m. Taj okoliš mogao bi predstavljati distalnu deltu, tj. prodeltu. Kako je uglavnom taložen sitnozrnasti sediment vjerojatno se radilo o mutnim strujama niske gustoće¹⁰, tj. strujama u kojima su bili dominantno razvijeni distalni facijesi Boumine sekvencije¹, poput Tc, Td i Te. Zbog udaljenosti od prokismalnog dijela delte često su ti sedimenti proslojeni interturbiditnim, hemipelagičkim intervalom Tf.¹⁹ Takav interval može označavati izostanak resedimentacijskih procesa ili pomicanje delte zbog retrogradacije uslijed porasta razine vode (alociklički proces), odnosno lateralno (autociklički proces). Upravo izmjena turbiditnih intervala i hemipelagičkog facijesa predstavlja glavno obilježje taložnih sekvencija unutar hrvatskog dijela Padske depresije tijekom pliocena i pleistocena.

Prema tome, postoje dobri temelji za izdvajane pliocenskog i pleistocenskog taložnog litofacijesa kao zasebnih litostratigrafskih jedinica u hrvatskom području Sjevernog Jadrana. Kako bi se detaljno prikazao sastav oba litofacijesa, uporabljeni su podatci iz niza objavljenih radova, poglavito o njihovom tipskom razvoju, te o litološkim značajkama po kojima ih se može klasificirati kao litostratigrafske jedinice.

3. TIPSKI LITOFACIJESI PLIOCENSKIH I PLEISTOCENSKIH NASLAGA KAO OSNOVA ZA IZDVAJANJE NOVIH LITOSTRATIGRAFSKIH JEDINICA U SJEVERNOM JADRANU

U sljedećim potpoglavljima opisani su litofacijesi na jugoistočnom i istočnom dijelu Padske depresije koji uglavnom odgovaraju položaju hrvatskih plinskih polja, tj. prostorima u kojima su pliocenske, pleistocenske i holocenske sekvencije detaljno istražene (slika 6).

3.1. Pliocenski i stariji litofacijesi

Tijekom pliocena granice Jadranskog mora tek su se počele oblikovati, a to se posebno odnosi na granicu u alpskom području (slika 3), te području poluotoka Gargano. Za ovu analizu važna je paleogeografija Alpa, kao područja rasta i napredovanja ledenjaka, te izvora brojnih rijeka od kojih je najveća rijeka Po. Njezino današnje ušće je u području grada Ravenne i tijekom kvartara predstavljala je najveći prijenosnik detritusa koji je s kopna dopreman i taložen u području Sjevernog Jadrana. Drugi izvor predstavlja ušće rijeke Adige, a treći rijeke Piave. Deltom rijeke Po određeno je sedimentacijsko područje nazvano Padskom depresijom čiji se istočni dio pruža u Hrvatskoj, uglavnom jugozapadno od Istre i kvarnerskih otoka (slika 1). No, kako je tijekom pliocena delta svih rijeka, pa tako i paleodelta rijeke Po bila pomaknuta dvijestotinjak kilometara na zapad i sjeverozapad, njezin utjecaj u hrvatskom dijelu Sjevernog Jadrana mogao je biti razmjerno malen. Takav je morao biti barem do razdoblja gornjega pliocena kada se obalna linija Jadranskog mora počela povlačiti prema današnjim granicama, a i alpsko područje zbog izdizanja je zapremalo veću površinu negoli u donjem i srednjem pliocenu. Zato je tijekom pliocena taloženje u hrvatskom dijelu Sjevernog Jadrana obuhvatilo uglavnom bazenske pelitne sedimente-gline i siltove. Takav facijes se najbolje može prepoznati u hrvatskim poljima smještenim danas na samome jugoistočnom rubu Padske depresije, a to su polja Katarina i Marica, tj. blizu granice Padske i Dugootočke depresije (slika 6).

Najstarije naslage u polju Marica određene su kao vapnenci i dolomiti čiji je vršni dio kredne starosti, a pripadali bi litostratigrafskoj jedinici - formaciji Dinaridi. No, prema nekim odredbama, dio karbonata, koji bi odgovarali talijanskim formacijama Scaglia, Scaglia Cinera, Cavanella A, Bisciaro, Cavanella B, Schlier, Corinna te Clara, pripada i razdoblju od paleocena do donjega miocena. Također, u širem prostoru plinskog polja Katarina prema Italiji (na granici mezozojske JKP prema Jadransko-jonskom bazenu), kao najstarije naslage određeni su srednjo- i gornjoecenski vapnenci koji pripadaju talijanskoj formaciji Scaglia. Na tom polju pliocenske naslage izgrađene su od izrazito sitnozrnastih sedimentata, i to hemipelagičkih lapora i glinovitih lapora s dobro izraženim obilježjima izolatorskih stijena. Nema pojava pijesaka, niti silta. Tek je u pleistocenskim naslagama u području polja Marica utvrđeno 10, a u pol-

ja Katarina 5 ležišta zasićenih plinom izgrađenih od pijesaka, siltovih pijesaka i siltova.

3.2. Pleistocenski litofacijesi

Pleistocenski litofacijes značajno se razlikuje od pliocenskog po pojavi čestih intervala s pijescima i siltom. Što je taložni prostor u hrvatskom dijelu Padske depresije bio bliži delti rijeke Po to je veća količina pijeska i silta donášana u tamošnje depresije. U hrvatskom području te je facijese najlakše izučiti unutar najvećeg plinskog polja Ivana (slika 6), u kojem je razvijen slijed pleistocenskih naslaga^{5,24} u debljini od 900 do 1 500 m. Dalje prema dubljem dijelu bazenu njihove debljine su i veće. Pri tomu pojedinačna pješćana ležišta zasićena plinom unutar pleistocenskih naslaga mogu postići debljinu veću od 20 m.

U polju Ivana najstarije nabušene naslage su bioklastični vapnenci kredne starosti. Diskordantno slijede pliocenski glinoviti lapori, a zatim pleistocenske naslage s ležištima plina izgrađenim od pijesaka, siltovih pijesaka i silta djelomično proslojenih glinama, laporima i glinovitim laporima. Najmlađi su holocenski muljevi, gline i pijesci debljine dekameterskih vrijednosti.²⁰ Cjelokupna struktura Ivana regionalnim je rasjednom odvojena od stijena JKP u Istri.²²

4. PRIJEDLOG NOVIH LITOSTRATIGRAFSKIH JEDINICA - FORMACIJA

Litostratigrafska nomenklatura koja se danas primjenjuje u prostoru Sjevernog Jadrana na talijanskoj strani ima 13 litostratigrafskih jedinica ranga formacija, a obuhvaća vremenski raspon od mezozoika do pleistocena. Međutim, na hrvatskoj strani istog prostora izdvojene su tek dvije formacije. Tako formacija Dinaridi obuhvaća naslage JKP, a formacija Susak naslage paleocenske, eocenske, oligocenske, miocenske, pliocenske i pleistocenske serije. Naslage ovog dugog vremenskog slijeda pripadaju samo jednoj formaciji, iako lokalno na talijanskoj strani mogu doseći debljinu i do 6 000 metara.

S obzirom na potrebu za razvrstavanjem ovih naslaga u više litostratigrafskih jedinica, ovdje formacija, te jedinice mogu se smatrati neformalnim prijedlogom koji će olakšati istraživanja sa svrhom pronalazaka novih ležišta ugljikovodika. Poput ostalih litostratigrafskih jedinica izdvojenih u Hrvatskoj, posebno onih u Panonskom bazenu i ponegdje u Dinaridima, vjerujemo da će njihovom uporabom vremenom one zaživjeti i početi se rabiti kao formalne litostratigrafske jedinice u rangu formacija. Poštujući North American Stratigraphic Code¹¹ kao najdetaljniji i najčešći dokument, tj. upute za izdvajanje stratigrafskih jedinica, pa tako i litostratigrafskih, odlučili smo se za izdvajanje novih litostratigrafskih jedinica-formacija u Sjevernom Jadraniu poštujući sljedeće kriterije (lit.¹¹, str. 1567):

a) Formacija je fundamentalna jedinica... u opisivanje regionalne geologije... koja se temelji na litološkoj promjeni... čije opisivanje ima najveću praktičnu primjenu;

b) Formacija treba sadržavati određeni stupanj litološke homogenosti...te se može sastojati od stijena (1) jednoga litotipa, (2) ponavljanja dva ili više litotipova, (3) ekstremne litološke heterogenosti koja ipak predstavlja prepoznatljivu cjelinu u odnosu prema krovini i podini.

Poštujući gornje postavke predlažemo sljedeću litostratigrafsku nomenklaturu za hrvatski dio Sjevernog Jadrana idući od mladih prema starijima, tj. u smjeru napredovanja bušotina (slika 7):

Pleistocen: Naslage pleistocena su trangresivne na pliocenske uz približne debljine od 400 do 1 900 m.⁸ Pleistocen se dijeli na donji i gornji. Rani pleistocen sadrži laporovite gline, glinovite lapore, proslojke siltita i pijeska te slabo vezano pješčenjake. Gornji pleistocen izgrađen je od pjeskovito-laporovitih glina i glina s proslojcima pijeska i silta, a u njegovom starijem dijelu mogu se pojaviti i ugljeni proslojci. Glavno obilježje pleistocenskih sedimenata je vrlo slaba kompakcija, te pojava slojeva pijeska i silta debljine nekoliko metara. Ti su sedimenti nastali kao rezultat taloženja u delti i prodelti rijeke Po. Tijekom pleistocena položaj delte i obalne linije približno je odgovarao današnjem u interglacijalima (slika 5), dok je tijekom ledenih doba obalna linije Jadranskog mora pomicala znatno prema jugoistoku (slika 4). Zato su i takvi pijesci znatno češći, deblji i s manje silte i glinovite komponente probušeni na SZ Padske depresije, kao što je slučaj u polju Ivana (slika 6), negoli na JI gdje se nalazi polje Katarina (slika 6) kojega su mutne struje dosezale samo tijekom niske razine mora u glacijalnim razdobljima. Tako se pleistocenski litofacijes može promatrati kao monotona izmjena nepropusnih (gline, glinoviti lapori) i propusnih (siltovi, pijesci, pješčenjaci) sedimenata, pa se kao tipski lokalitet pleistocenskih deltnih i prodelnih sedimenata može izdvojiti plinsko polje Ivana. Zato predlažemo da se pleistocenske naslage izdvoje kao **formacija Ivana**. Ovdje je značajno spomenuti, da se granice između formacija i kronostratigrafskih jedinica nipošto ne moraju poklapati, dapače, često se ne poklapaju ako to nije odraženo na litološkom sadržaju.

Pliocen: Pliocenski sedimenti su u hrvatskom dijelu Sjevernog Jadrana, prvenstveno na temelju uzoraka iz plinskih polja, okarakterizirani kao nepropusni. Bez sumnje, oni nisu isključivo pelitni na cijelom području depresije, niti lateralno to mogu biti, no pješčenjačka komponenta taložena je gotovo isključivo u današnjem talijanskom podmorju. Karakterističan opis pliocenskih naslaga u hrvatskom dijelu načinjen je na lokalitetu Istra More⁸ gdje je on podijeljen na donji pliocen s laporima te rijetkim glinama i siltovima ukupnih debljina od 10-50 m, srednji koji sadrži laporovite gline, siltit i djelomice pijesak ukupnih debljina 25-250 m, te gornji pliocen s laporima i rjeđe pješčenjacima debljina 50-200 m. Ti su sedimenti nastali u hemipelagičkom okolišu ili u distalnom dijelu delte, tj. prodelti. Smatramo da se pliocenski litofacijes, kao pretežito homogen, može imenovati kao **formacija Istra**.

Miocen-paleocen: Na području nekoliko plinskih polja probušene su ili nabušene karbonatne naslage koje su u polju Marica određene starošću od paleocena do donjega miocena. Slično je određena starost vapnenaca u širem prostoru polja Katarina, prema Italiji, gdje su oni

svrstani u srednji i gornji eocen. Takvi sedimenti zasada su opisani samo na zapadnom rubu zone sjevernojadranskih polja prema Italiji, tj. približno na granici JKP prema Jadransko-jonskom bazenu. To je litološki homogen litofacijes karbonata nađen tek mjestimice i slabije je istražen pa smatramo da bi za sve sedimente Jadranskog bazena starosti od paleocena do miocena trebalo zadržati postojeću **formaciju Susak**.

Mezozoik: Sve eventualno nabušene sedimente u području Sjevernog Jadrana za koje je pretpostavljena ili dokazana mezozojska starost, kao što su kredne stijene u polju Marica, i dalje bi trebalo nazivati **formacijom Dinaridi**.

5. ZAKLJUČAK

U ovom je radu ukazano na različitost pliocenskih i pleistocenskih naslaga u Sjevernom Jadranu formiranih tijekom stvaranja i zapunjavanja prostora koji se danas naziva Padskom depresijom. Ona predstavlja dio Jadranskog bazena, dijelom smješten u talijanskom, a dijelom u hrvatskom podmorju. Nadalje, opisani su i slučajevi gdje su dosegnute karbonatne naslage i uglavnom mezozojske ili kenozojske starosti. Podatci o litološkom sastavu stijena i naslaga u Sjevernom Jadranu bili su dostupni iz velikog broja objavljenih radova s analizama podataka prvenstveno iz dubokih bušotina.

Izdvojene su i imenovane formacije kao fundamentalni dijelovi litostratigrafske nomenklature prema svim pravilima, u ovom slučaju litološke homogenosti ili sličnosti kako je to propisano Sjevernoameričkim stratigrafskim kodeksom. To su: *formacija Istra* pliocenske i *formacija Ivana* pleistocensko-holocenske starosti. Pliocenski sedimenti opisani su kao nepropusni. Uglavnom dominiraju lapori uz rijetke laporovite gline, gline i siltove. Pijesci i slabokonsolidirani pješčenjaci su, u hrvatskom dijelu Padske depresije, iznimno rijetki. Zato je formacija Istra opisana kao uglavnom litološki homogena cjelina nepropusnih sedimenata. Mlađe naslage pleistocena i holocena predstavljene su izmjenom nepropusnih i propusnih sedimenata. Kao nepropusni sedimenti opisane su laporovite gline, glinoviti lapori, a propusni su siltiti, slabokonsolidirani pješčenjaci, siltovi i pijesci. Tako formacija Ivana predstavlja monotonu izmjenu nepropusnih i propusnih naslaga.

Logičan sljedeći korak kojim bi se nastavilo prikazano istraživanje bilo bi kartiranje regionalnih diskordancija između pojedinih formacija, pa čak i unutar njih, kao i utemeljivanje i praćenje mogućih regionalno rasprostranjenih repernih slojeva. Vjerujemo da je moguća i daljnja podjela na članove uzimajući u obzir rezultate brojnih geofizičkih mjerenja velike razlučivosti. Za ovo bi temeljni podatci bili dobiveni iz karotajznih mjerenja i interpretacije refleksijske seizmike, a poslužili bi u određivanju i imenovanju regionalnih EK-markera (karakteristični tanki slojevi u konkordantnom slijedu, sinkrone plohe ili kronohorizonti) i EK-repera (karakteristične plohe vezane za diskordancije).

6. LITERATURA

6.1. Tiskani radovi i knjige

1. Bouma, A.H. (1962) *Sedimentology of some flysch deposits: a graphic approach to facies interpretation*, Amsterdam, Elsevier.
2. Cita, M.B. and Ryan, W.B.F. (1972) *The Pliocene Record in deep sea Mediterranean sediments. Times-scale and general synthesis*, Initial Reports DSDP, Washington.
3. Colantoni, P., Galignani, P. and Lenaz, R. (1979) Late Pleistocene and Holocene Evolution of the North Adriatic Shelf (Italy), *Marine Geology*, 33, M41-M50.
4. Correggiari, A., Roveri, M. and Trincardi, F. (1996) Late Pleistocene and Holocene Evolution of the North Adriatic Sea, *Quaternario*, 9, 2, 697-704.
5. Đureković, M., Krpan, M., Pontiggia, M., Ruvo, L., Savino, R. and Volpi, B. (1998) Geological modelling and petrophysical characterisation of turbiditic reservoirs of the Ivana gas field – R. Croatia, *Nafta*, 49, 7/8, 241-258.
6. Fairbanks, F.G. (1989) A 17 000 years glacio-eustatic sea level record: influence on glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation, *Nature*, 342, 637-642.
7. Herak, M. (1987) *Geologija, Školska knjiga*, Zagreb.
8. Kalac, K. (2008) *Biostratigrafsko-kronostratigrafska istraživanja pliocensko-pleistocenskih naslaga u podmorju Jadrana s posebnim osvrtom na klimatske promjene*, Naftaplin, knjiga 45/8, Zagreb.
9. Kuenen, P.H. H. (1957) Sole markings of graded graywacke beds, *Journal of Geology*, 65, 231-258.
10. Middleton, G.V. & Hampton, M.A. (1976) *Subaqueous sediment transport and deposition by sediment gravity lows – in: Stanley, D. J. & Swift, D.J.P. (ed.): Marine Sediment Transport and Environmental Management*, John Wiley, New York.
11. North American Commission On Stratigraphic Nomenclature (2005) North American Stratigraphic Code, *AAPG Bulletin*, 89, 11, 1547-1591.
12. Piller, W.E., Harzhauser, M. and Mandić, O. (2007) Miocene Central Paratethys stratigraphy – current status and future directions, *Stratigraphy*, 4, 151-168.
13. Prelogović, E. and Kranjec, V. (1983) Geološki razvitak područja Jadranskog mora. *Pomorski zbornik*, 21, 387-405.
14. Rio, D., Channel, J.E.T., Bertoldi, R., Poli, M.S., Vergerio, P.R., Raffi, I., Sprovieri, R. and Thunell, R.C. (1997) Pliocene sapropels in the northern Adriatic area: Chronology and paleoenvironmental significance, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Paleoecology*, 135, 1-25.
15. Rögl, F. (1998) Paleogeographic considerations for Mediterranean and Paratethys seaways (Oligocene to Miocene), *Ann. Naturhist. Mus. Wien*, 99A, 279-310.
16. Stanley, D.I. (1995) A global sea level curve for the late Quaternary: the impossible dream?, *Marine Geology*, 125, 1-6.
17. Thunel, M. (1971) Grada tercijarnog bazena u sjeveroistočnom dijelu Jadranskog mora, *Nafta*, 22, 4-5, 275-434.
18. Tišljarić, J. (1994) *Sedimentne stijene, Školska knjiga*, Zagreb.
19. Van Der Lingen, G.J. (1969) The turbidite problem, *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 12, 7-50.
20. Vdović, N. & Juračić, M. (1993) Sedimentological and Surface Characteristics of the Northern and Central Adriatic Sediments, *Geologia Croatia*, 46, 1, 157-163.
21. Velić, J. (2007) *Geologija ležišta nafte i plina*, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
22. Veseli, V. (1999) *Facijesi karbonatnih sedimenata mlađeg mezozoika i paleogena u pučinskim bušotinama sjevernog Jadrana*, Disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
23. Vlahović, I., Tišljarić, J., Velić, I. & Matičec, D. (2005) Evolution of the Adriatic Carbonate Platform: Palaeogeography, main events and depositional dynamics, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Paleoecology*, 220, 3-4; 333-360
24. Zelić, M., Mlinarić, Ž. & Jelić-Balta, J. (1999) Croatian Northern Adriatic Ivana gas field ready for development (Reservoir characteristics and gas inflow conditions into the well), *Nafta*, 50, 1, 19-37.

6.2. Izvori s interneta

25. URL 1, <http://records.viu.ca/charles/messinian-crisis-apr03.htm>, 8. XI. 2010.
26. URL 2, http://commons.wikimedia.org/wiki/Adriatic_Sea, 8. XI. 2010.
27. URL 3, http://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_glaciation, 8. XI. 2010.

ZAHVALA

Rad predstavlja litostratigrafsku analizu načinjenu u 2010. godini u okviru projekta „Stratigrafska i geomatematička istraživanja naftno-geoloških sustava u Hrvatskoj“ (broj 195-1951293-0237) financiranog od strane Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa RH. Zahvaljujemo recenzentima na korisnim i dobronamjernim sugestijama.



Authors:

Josipa Velić, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb, e-pošta: josipa.velic@rgn.hr (redoviti profesor)

Tomislav Malvić, INA-Industrija nafte d.d., Sektor za geologiju i geološko inženjerstvo, Šubićeva 29, 10000 Zagreb, e-pošta: tomislav.malvic@ina.hr (docent, savjetnik)