



## 7. Wspomagane sieciami neuronowymi makro- i mezoscenariusze przyszłych wydarzeń dotyczących inżynierii powierzchni materiałów

Przegląd piśmiennictwa [352-356] wskazuje, że nie istnieje jeden poprawny i ogólnie przyjęty sposób konstruowania scenariuszy przyszłych wydarzeń bądź algorytm postępowania zalecany do wdrożenia w procesie ich budowania. Praktyka wykazuje, że każdorazowo algorytm ten jest tworzony na nowo przez realizatorów konkretnego badania [357]. Podobnie rzecz miała się w przypadku kreowania scenariuszy przedstawiających prognozowaną przyszłość inżynierii powierzchni materiałów, gdzie wyzwaniem metodologicznym było umiejętne połączenie prezentacji i opisu czynników o różnym stopniu ogólności i uchwycenie występujących pomiędzy nimi związków przyczynowo-skutkowych. W celu rozwiązania tak postawionego zadania badawczego wszystkie analizowane czynniki podzielono na trzy grupy: makro, mezo i mikro, co szczegółowo opisano w podrozdziale 3.3 niniejszej pracy. Opracowane w ramach przeprowadzonych badań scenariusze przyszłych wydarzeń dotyczących inżynierii powierzchni materiałów, zgodnie z doniesieniami literaturowymi [354, 357-359], mogą być scharakteryzowane na wiele sposobów, z uwzględnieniem różnorodnych kryteriów podziału, które to kryteria wybrano arbitralnie i zgodnie z nimi scharakteryzowano utworzone scenariusze na tle scenariuszy opcjonalnych (rys. 120).

Na początkowym etapie prac badawczych, na podstawie wyników panelowych dyskusji eksperckich, wspartych niektórymi wynikami badań wykonanych w ramach Narodowego Programu Foresight Polska 2020 [162], opracowano trzy alternatywne warianty scenariuszy przewidywanych wydarzeń w skali makro, dotyczące prognozowanej przyszłości Polski/Europy/Świata: optymistyczny, neutralny i pesymistyczny.

Scenariusz optymistyczny *Wygrany wyścig* zakłada, że światowy kryzys gospodarczy został zażegnany i ma miejsce wzrost gospodarczy opierający się na pokojowej współpracy i integracji międzynarodowej. Wzrasta pozycja konkurencyjna Unii Europejskiej wśród gospodarek światowych. W kraju realizowane są z powodzeniem, znajdujące akceptację społeczną, liczne reformy, służące rzeczywistej transformacji gospodarki, co sprzyja zrównoważonemu rozwojowi w ramach gospodarki opartej na wiedzy. Polska umiejętnie łączy endogenne czynniki wzrostu z inwestycjami zagranicznymi i efektywnym wykorzystaniem funduszy unijnych. Konsekwencją szeroko zakrojonych planowych działań

RODZAJE SCENARIUSZY			KRYTERIUM PODZIAŁU
<b>Forecastingowy</b> Analiza (zadanie proste) zjawisk występujących w teraźniejszości i określenie w jaki sposób wpłyną one na wydarzenia w przyszłości	<b>Backcastingowy</b> Synteza (zadanie odwrotne) polegająca na przyjęciu za punkt odniesienia określonego stanu przyszłości i poszukiwaniu dróg do osiągnięcia tego stanu		SPOSÓB DEDUKCJI
<b>Problemowy</b> Prognoza dotyczy problemu natury ogólnej	<b>Terytorialny</b> Prognoza dotyczy obszaru terytorialnego	<b>Tematyczny</b> Prognoza dotyczy obszaru tematycznego	PRZEDMIOT PROGNOZY
<b>Makro</b> Rozpatruje się niewielką liczbę czynników istotnie oddziałujących na dużą liczbę innych czynników	<b>Mezo</b> Rozpatruje się ograniczoną liczbę czynników umiarkowanie oddziałujących na inne czynniki	<b>Mikro</b> Rozpatruje się dużą liczbę czynników jednostkowo nieznacznie oddziałujących na inne czynniki	SKALA ZJAWISK
<b>Krótkoterminowy</b> Do 10 lat	<b>Średnioterminowy</b> Od 11 do 24 lat	<b>Długoterminowy</b> Powyżej 25 lat	HORYZONT CZASOWY*)
<b>Nieinterwencyjny</b> Opracowania teoretyczne opisujące możliwe warianty przyszłych wydarzeń bez ambicji oddziaływania na rzeczywistość		<b>Interwencyjny (normatywny)</b> Opracowania służące przewidywaniu, zarządzaniu i kreowaniu przyszłości	UTYLITARNOŚĆ
<b>Prosty</b> Dotyczy jednego wąskiego obszaru analizy		<b>Złożony</b> Dotyczy wielu zmiennych powiązanych przyczynowo-skutkowo w czasie i przestrzeni	POZIOM ZŁOŻONOŚCI
<b>Peryferyjny</b> Koncentrujący się na zdarzeniach skrajnych, mało prawdopodobnych, peryferyjnych	<b>Alternatywny</b> Przedstawiający kilku-wariantową alternatywną wersję wydarzeń	<b>Ekstrapolacyjny</b> Ograniczający się do ekstrapolacji istniejących trendów	ROZPATRYWANE WARIANTY
<b>Pierwotny</b> Sporządzany na podstawie danych pierwotnych zebranych podczas ankietyzacji ekspertów i/lub dyskusji panelowych (burze mózgów)	<b>Wtórny</b> Sporządzony na podstawie danych wtórnych pozyskanych w toku studiów literaturowych	<b>Symulacyjny</b> Sporządzony na podstawie wyników symulacji komputerowych	ŹRÓDŁA DANYCH
<b>Homogeniczny</b> Obejmuje dane o podobnym charakterze dotyczące jednego obszaru tematycznego		<b>Heterogeniczny</b> Obejmuje zróżnicowane dane dotyczące wielu obszarów tematycznych	ZAKRES ANALIZOWANYCH DANYCH
<b>Dyskretny</b> Opisuje stan końcowy bez analizy procesu prowadzącego do jego osiągnięcia		<b>Ciągły</b> Opisuje rozwój zdarzeń prowadzących do osiągnięcia stanu w przyszłości	TYP ZMIENNYCH W FUNKCJI CZASU
<b>Jakościowy</b> Wyniki prezentowane są w postaci opisowej	<b>Ilościowy</b> Wyniki prezentowane są w postaci zestawień liczbowych	<b>Ilościowo-jakościowy</b> Wyniki prezentowane są w postaci zestawień liczbowych uzupełnionych opisem	SPOSÓB PREZENTACJI WYNIKÓW
<b>Progностyczny</b> Opisuje najbardziej prawdopodobny przebieg wydarzeń	<b>Probabilistyczny</b> Opisuje warianty przyszłych wydarzeń z uwzględnieniem prawdopodobieństwa ich zajścia	<b>Warunkowy</b> Opisuje przyszłe wydarzenia, które mogą mieć miejsce pod warunkiem zaistnienia określonych zjawisk	PREZENTACJA WIZJI PRZYSZŁOŚCI

 Charakterystyka scenariuszy opracowanych w ramach wykonanych badań  
 Charakterystyka scenariuszy opcjonalnych

\*) W naukach o zarządzaniu zjawiska długoterminowe dotyczą ponad pięcioletniego horyzontu czasowego. W odniesieniu do scenariuszy, które w swej istocie zawsze dotyczą długiego horyzontu czasowego zastosowano adekwatną skalę względną

*Rysunek 120. Charakterystyka scenariuszy opracowanych w ramach wykonanych badań na tle charakterystyki scenariuszy opcjonalnych*

strategicznych jest systematyczny wzrost poziomu wykształcenia społeczeństwa, aplikacja na szeroką skalę innowacyjnych, proekologicznych technologii w licznych prężnie rozwijających się małych i średnich przedsiębiorstwach (MSP) oraz dużych korporacjach coraz częściej działających w gałęziach wysokiej techniki, efektywne wykorzystanie zasobów rolnych kraju, a także ukształtowanie się nowoczesnej infrastruktury transportowej i teleinformatycznej. Dostępny potencjał jest należycie wykorzystywany do realizacji strategicznych celów rozwojowych, statystycznie ludziom żyje się lepiej, nastroje społeczne są optymistyczne, a perspektywy na kolejne lata świetlane.

Zgodnie ze scenariuszem neutralnym o nazwie *Wypracowany rozwój* światowy kryzys gospodarczy został zażegnany i Świat ostrożnie powraca na ścieżkę wzrostu gospodarczego w paradygmacie zrównoważonego rozwoju, opierającego się na współpracy i integracji międzynarodowej, choć cały czas ciąży nad nim widmo terroryzmu i lokalnych wojen, które w niesprzyjających okolicznościach mogą rozszerzyć się na wiele krajów. Unia Europejska musi ostro walczyć o swoją pozycję wśród gospodarek światowych, zwłaszcza z wyrastającymi na światowe potęgi Chinami i Indiami. W kraju podejmowane są, z różnym skutkiem, próby prowadzenia reform służących transformacji gospodarki, które często spotykają się z ostracyzmem społecznym i niechęcią ludzi do zmian. Polska stara się wykorzystywać fundusze unijne, lecz nie wszystkie pieniądze zostają efektywnie zagospodarowane. Wdrażanie idei gospodarki opartej na wiedzy i zrównoważonego rozwoju przynosi efekt w postaci wzrostu poziomu wykształcenia społeczeństwa i jego proekologicznej świadomości. Sektor małych i średnich przedsiębiorstwach (MSP) rozwija się w stałym, lecz powolnym tempie, a poziom aplikacji priorytetowych innowacyjnych technologii nadal pozostawia wiele do życzenia. Duże korporacje głównie działają w gałęziach średnioniskiej i średniowysokiej techniki. Kraj stale boryka się z problemami w obszarze finansów publicznych, rolnictwa i służby zdrowia, a tempo kształtowania się nowoczesnej infrastruktury transportowej i teleinformatycznej jest stałe, lecz stosunkowo wolne. Dostępny potencjał jest tylko częściowo wykorzystywany do realizacji strategicznych celów rozwojowych, statystycznie ludziom żyje się nieco lepiej, lecz nastroje społeczne są mieszane. Teoretycznie dość dobre perspektywy rozwojowe na kolejne lata w głównej mierze zależą od kondycji europejskiej i ogólnoswiatowej gospodarki, mądrego gospodarowania finansami publicznymi w długim horyzoncie czasowym i tempa realizacji kolejnych reform popartych zaangażowaniem społeczeństwa.

Scenariusz pesymistyczny *Równia pochyła* zakłada, że światowy kryzys gospodarczy został jedynie nieco spowolniony. Świat boryka się z terroryzmem, wzrastającymi cenami ropy naftowej, skutkami katastrof i lokalnych wojen rozszerzających się na coraz liczniejsze kraje. Unia Europejska pozostaje w tyle w odniesieniu do innych gospodarek światowych, zwłaszcza wyrastających na światowe potęgi Chin i Indii. W kraju podejmowane są najczęściej nieudane próby prowadzenia reform służących transformacji gospodarki, które spotykają się z ostracyzmem społecznym i silną niechęcią ludzi do zmian. Przekazywane Polsce fundusze unijne z roku na rok maleją, a większość pieniędzy zostaje wykorzystana na bieżące ratowanie kondycji gospodarki, podczas gdy poziom inwestycji maleje. Wdrażanie idei gospodarki opartej na wiedzy i zrównoważonym rozwoju, które początkowo zapowiadało się dobrze, podupada. Sektor małych i średnich przedsiębiorstw (MSP) rozwija się słabo, a aplikacja innowacyjnych proekologicznych technologii jest najczęściej niemożliwa ze względu na brak inwestycji i trudno dostępne kredyty. Duże korporacje działają w gałęziach średnioniskiej i średnio-wysokiej techniki, a wiele z nich bankrutuje lub przenosi swoje siedziby do państw azjatyckich. Kraj stale boryka się z problemami w obszarze finansów publicznych, rolnictwa, służby zdrowia, edukacji i infrastruktury transportowej. Dostępny potencjał jest słabo wykorzystywany do realizacji strategicznych celów rozwojowych, które najwyraźniej zostały źle sformułowane, statystycznie ludziom żyje się coraz gorzej, czemu towarzyszą niepokoje społeczne. Perspektywy rozwojowe na kolejne lata są słabe i jeżeli nie nastąpi gwałtowny przełom, Polska będzie zmierzać ku katastrofie.

W prowadzonych badaniach przyjęto sposób dedukcji polegający na poszukiwaniu kombinacji mikro- i mezoczynników, która spowoduje, że z określonym prawdopodobieństwem każdy z trzech możliwych makroscenariuszy będzie miał miejsce w przyszłości. Pozycję strategiczną technologii szczegółowych i grup technologii krytycznych odpowiadających poziomowi mikro wraz z ich prognozowanym rozwojem przedstawionym w postaci zestawień statystycznych i/lub ścieżek rozwoju strategicznego technologii, sporządzonych na podstawie wyników badań eksperckich, zaprezentowano odpowiednio w rozdziałach 5. i 6. niniejszej pracy. Do analizy wzajemnych oddziaływań pomiędzy zdarzeniami w skali makro i mezo zastosowano metodykę badań informatycznych opisaną w podrozdziale 3.5 pracy i oryginalne programy komputerowe omówione w podrozdziale 4.3 niniejszej rozprawy. Wyniki badań eksperckich w postaci wartości prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych analizowanych zjawisk, otrzymane w procesie ankietyzacji ekspertów metodą

e-Delphix, stanowiły zmienne wejściowe, które, podzielone na podzbiory: uczący, walidacyjny i testowy, posłużyły do trenowania sieci neuronowych. Zmienne wyjściowe są natomiast generowane w postaci różnych wykresów prezentujących zależności pomiędzy wartościami prawdopodobieństwa poszczególnych makroscenariuszy a podlegających poszczególnym trendom pozostałych czynników analizy.

## 7.1. Makroscenariusze a rozwój obszarów tematycznych inżynierii powierzchni materiałów

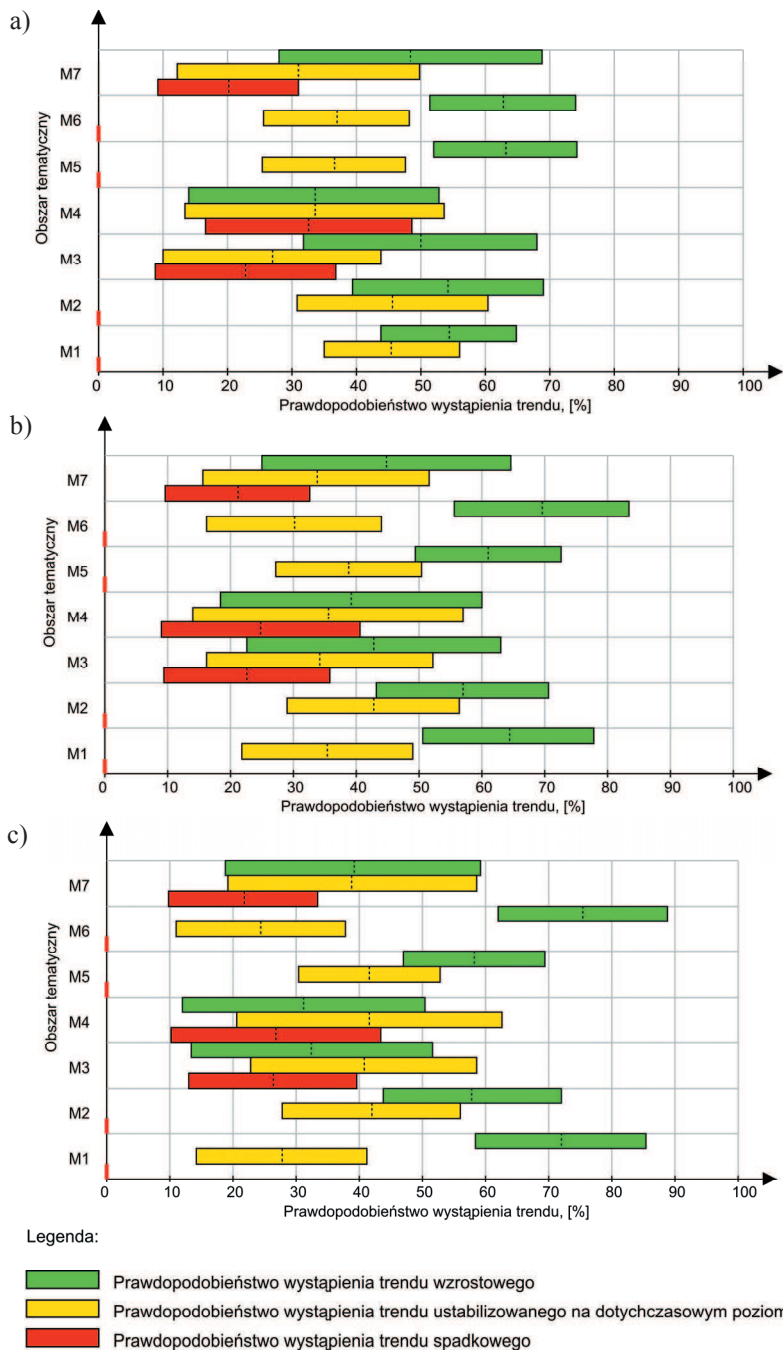
Eksperymenty symulacyjne wykonane z użyciem programu SCENNET21, do którego jako funkcje zaimplementowano sztuczne sieci neuronowe, miały na celu określenie, w jakim stopniu na zaistnienie, z danym prawdopodobieństwem, każdego z trzech alternatywnych scenariuszy ma rozwój poszczególnych 14 obszarów tematycznych, wchodzących w skład pola badawczego  $M$ , odzwierciedlającego punkt widzenia producenta i pola  $P$  odpowiadającego podejściu klienta, oczekującego na produkt o wymaganych cechach użytkowych.

Zastosowanie do rozwiązania tak postawionego problemu badawczego narzędzi sztucznej inteligencji pozwala na błyskawiczne wyszukiwanie w wielotysięcznym zbiorze rozwiązania zbliżonego do optymalnego, satysfakcjonującego użytkownika. Sieć neuronowa wytrenowana z użyciem zaimplementowanych do niej danych wejściowych, pozyskanych w drodze ankietyzacji ekspertów, generuje wielowariantowe prognozy przyszłych wydarzeń. W szczególności możliwe jest określenie wartości prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych trendów rozwojowych (wzrostowego, ustabilizowanego na dotychczasowym poziomie i spadkowego) analizowanych obszarów tematycznych, przy żądanej przez użytkownika wartości prawdopodobieństwa wystąpienia każdego z trzech alternatywnych makroscenariuszy przyszłych wydarzeń. Użytkownik przeprowadzając symulację komputerową, może zarówno zadać konkretną wartość liczbową prawdopodobieństwa wybranego makroscenariusza, jak i poszukiwać rozwiązania dla jego skrajnych wartości, tj. maksymalnej lub minimalnej.

Na rysunku 121 przedstawiono przykładowe wyniki trzech eksperymentów symulacyjnych, wykonanych w odniesieniu do pola badawczego  $M$ , w postaci wykresów wygenerowanych z użyciem programu SCENNET21, dotyczących scenariusza optymistycznego, dla którego wartość prawdopodobieństwa kolejno określono na poziomie 10% (rys. 121a), 20% (rys. 121b)

i 30% (rys. 121c). Na osi odciętych znajdują się określone w procentach wartości prawdopodobieństwa wystąpienia trendu wzrostowego, ustabilizowanego na dotychczasowym poziomie i spadkowego. Na oś rzędnych naniesiono natomiast poszczególne obszary tematyczne poddane analizie, czyli kolejno: Technologie laserowe w inżynierii powierzchni (*M1*), Technologie PVD (*M2*), Technologie CVD (*M3*), Technologie ciepłno-chemiczne (*M4*), Technologie polimerowych warstw wierzchnich (*M5*), Technologie nanostrukturalnych warstw wierzchnich (*M6*), Inne technologie inżynierii powierzchni (*M7*).

Zaprezentowane wyniki symulacji komputerowych, przeprowadzonych z użyciem sieci neuronowych, wskazują na wiodącą przewidywaną rolę rozwoju technologii nanostrukturalnych warstw wierzchnich (*M6*) i technologii laserowych (*M1*) na tle całego pola badawczego *M*, dla których prawdopodobieństwo trendu wzrostowego w istotny sposób rośnie wraz ze wzrostem prawdopodobieństwa optymistycznego makroscenariusza przyszłych wydarzeń. Należy również zauważyć, że w przypadku tych obszarów tematycznych prawdopodobieństwo wystąpienia trendu spadkowego jest zerowe, co oznacza, że degradacja tych obszarów nie jest możliwa. Podobną sytuację można zaobserwować w odniesieniu do technologii PVD (*M2*) i technologii polimerowych warstw wierzchnich (*M5*), dla których wartość prawdopodobieństwa wystąpienia trendu wzrostowego we wszystkich trzech analizowanych przypadkach jest zbliżona i dla obu obszarów tematycznych każdorazowo wynosi maksymalnie ok. 70%. Zależność pomiędzy wartością prawdopodobieństwa wystąpienia trendu wzrostowego w odniesieniu do technologii CVD (*M3*) i innych technologii inżynierii powierzchni (*M7*) a wartością prawdopodobieństwa wystąpienia scenariusza optymistycznego w skali makro jest odwrotnie proporcjonalna, co oznacza, że im szybszy jest postęp, tym szybsza będzie degradacja grup technologii zawierających się w tych obszarach na tle pola badawczego, czyli jest wskazane, aby zamiast nich, bardziej intensywnie rozwijały się technologie o lepszych rokowaniach, tj. *M6*, *M1*, *M2*, *M5*. Najbardziej przewidywalny jest rozwój klasycznych technologii obróbki ciepłno-chemicznej, dla których maksymalna wartość prawdopodobieństwa wystąpienia trendu wzrostowego we wszystkich trzech przypadkach odpowiadających 10, 20 i 30% prawdopodobieństwu wystąpienia scenariusza optymistycznego kształtuje się na zbliżonym poziomie 50-60%. Zarówno wartości te, jak i wartości prawdopodobieństwa wystąpienia trendu ustabilizowanego i spadkowego tych technologii odzwierciedlają realną sytuację i przyszłą pozycję strategiczną tych technologii na tle pola badawczego *M*. Obróbka ciepłno-chemiczna,



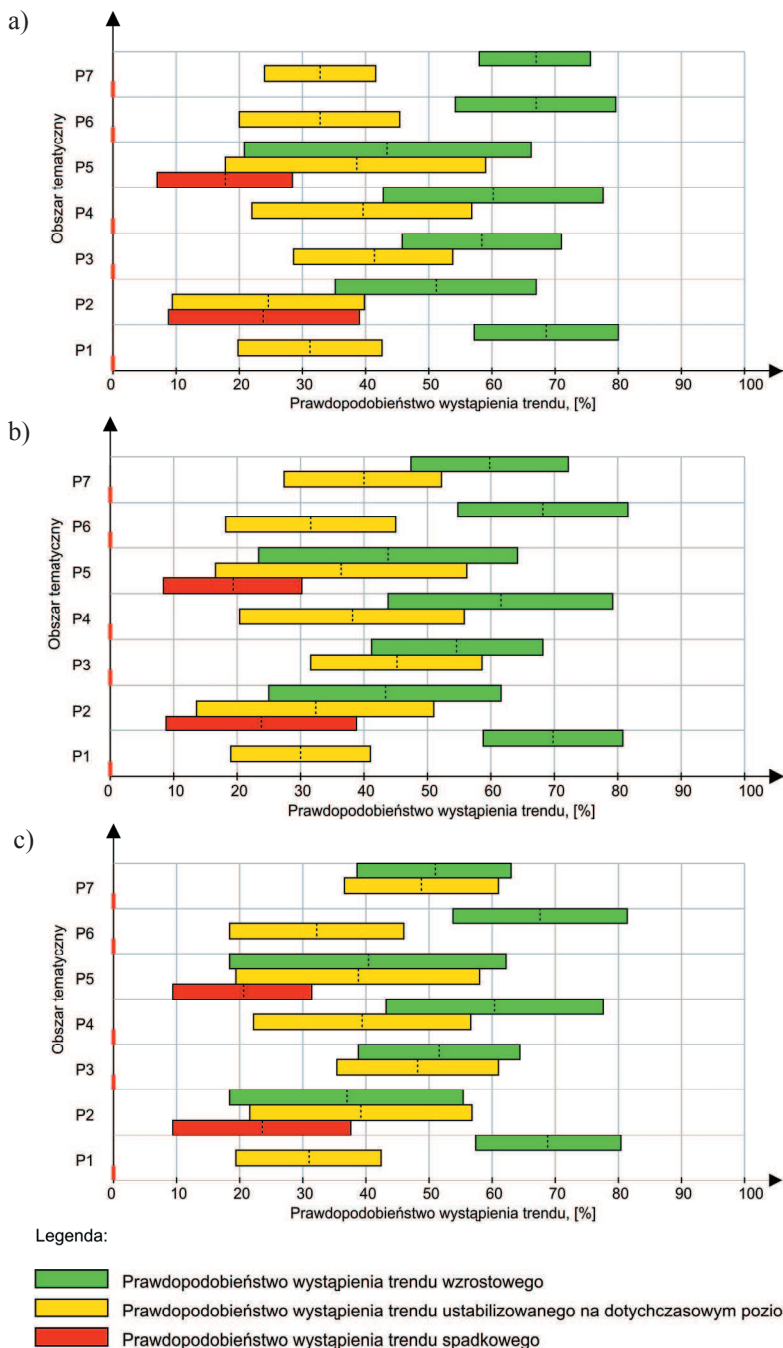
**Rysunek 121.** Wyniki symulacji prezentujące wartości prawdopodobieństwa poszczególnych trendów obszarów tematycznych pola badawczego M w przypadku zaistnienia scenariusza optymistycznego z: a) 10%, b) 20% i c) 30% prawdopodobieństwem

mimo iż nie należy do technologii awangardowych ani skrajnie rozwojowych, ze względu na rachunek ekonomiczny i powszechność stosowania, zajmuje ważne i istotne miejsce we współczesnej gospodarce, a prognoza wskazuje, że taki stan rzeczy utrzyma się przez najbliższe 20 lat.

W odniesieniu do pola badawczego *P* wybrano do prezentacji przykładowe wyniki eksperymentów symulacyjnych, dotyczących zależności pomiędzy trendami rozwojowymi poszczególnych obszarów tematycznych a pesymistycznym makrosceńsariuszem przyszłych wydarzeń, mogącym wystąpić odpowiednio z 10% (rys. 122a), 20% (rys. 122b) i 30% (rys. 122c) prawdopodobieństwem. Na oś odciętych, podobnie jak w przypadku pola badawczego *M*, naniesiono określone w procentach wartości prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych trendów (wzrostowego, ustabilizowanego i spadkowego) w odniesieniu do badanych obszarów tematycznych. Na osi rzędnych znajdują się natomiast kolejno następujące obszary tematyczne poddane badaniom symulacyjnym: Inżynieria powierzchni biomateriałów (*P1*), Inżynieria powierzchni materiałów konstrukcyjnych metalowych (*P2*), Inżynieria powierzchni materiałów konstrukcyjnych niemetalowych (*P3*), Inżynieria powierzchni materiałów narzędziowych (*P4*), Inżynieria powierzchni stali dla przemysłu motoryzacyjnego (*P5*), Inżynieria powierzchni szkła, elementów mikro- i optoelektronicznych oraz fotowoltaicznych (*P6*), Inżynieria powierzchni materiałów polimerowych (*P7*).

Wyniki wykonanych eksperymentów symulacyjnych wskazują na pewny i szybki rozwój inżynierii powierzchni biomateriałów (*P1*), materiałów funkcjonalnych (*P6*) i materiałów narzędziowych (*P4*), o czym świadczy zerowe prawdopodobieństwo wystąpienia trendu spadkowego, a także utrzymująca się na stałym poziomie, maksymalnie ok. 80% w każdym z analizowanych przypadków, wartość prawdopodobieństwa trendu wzrostowego, mimo iż symulacja dotyczy pesymistycznego wariantu przyszłych wydarzeń. W odniesieniu do inżynierii powierzchni materiałów konstrukcyjnych niemetalowych (*P3*) i materiałów polimerowych (*P7*) obserwowana jest odwrotnie proporcjonalna zależność pomiędzy wartością prawdopodobieństwa wystąpienia trendu wzrostowego technologii należących do tych obszarów tematycznych a wartością prawdopodobieństwa wystąpienia pesymistycznego makrosceńsariusza, co oznacza, że pożądanym jest rozwój tych obszarów, którego brak towarzyszy niekorzystnemu przyszłemu scenariuszowi wydarzeń. Dobrą przyszłą pozycję strategiczną technologii reprezentujących obszary *P3* i *P7* potwierdza brak prognoz zakładających spadek ich przyszłego znaczenia, nawet gdy rozważany jest pesymistyczny





**Rysunek 122.** Wyniki symulacji prezentujące wartości prawdopodobieństwa poszczególnych trendów obszarów tematycznych pola badawczego P w przypadku zaistnienia scenariusza pesymistycznego z: a) 10%, b) 20% i c) 30% prawdopodobieństwem

wariant wydarzeń. Odwrotnie proporcjonalną zależność pomiędzy wartością prawdopodobieństwa trendu wzrostowego a wartością prawdopodobieństwa pesymistycznego makroscenariusza przyszłych wydarzeń można zaobserwować również w odniesieniu do inżynierii powierzchni materiałów konstrukcyjnych metalowych ( $P2$ ) i stali dla przemysłu motoryzacyjnego ( $P5$ ). Wyniki symulacji wskazują, że w obu rozpatrywanych przypadkach brak rozwoju technologii należących do tych obszarów tematycznych wpływałaby niekorzystnie na bieg zdarzeń. Technologie wytwarzania stali dla przemysłu motoryzacyjnego ( $P5$ ) i materiałów konstrukcyjnych metalowych ( $P2$ ), podobnie jak omówione wcześniej technologie cieplno-chemiczne ( $M4$ ), należą do konwencjonalnych, tradycyjnych metod obróbki powierzchniowej, stosowanych jednak na dużą skalę w praktyce przemysłowej. Większa wartość prawdopodobieństwa wystąpienia trendu spadkowego, w przypadku obszaru tematycznego  $P2$ , w porównaniu do obszaru  $P5$ , świadczy o lepszej pozycji strategicznej tego ostatniego. W przemyśle motoryzacyjnym, pomimo coraz częstszego zastępowania tradycyjnych stali innymi materiałami, np. stopami metali lekkich (Mg, Al) lub materiałami polimerowymi, zasadniczo pozycja stali jest niezagrożona, m.in. dzięki szybkiemu rozwojowi nowych gatunków stali. Wśród nich należy wymienić, charakteryzujące się unikalną kombinacją własności wytrzymałościowych i plastycznych, austenityczne stale wysokomanganowe typu *TRIP* (ang. *Transformation Induced Plasticity*), w których podczas odkształcenia plastycznego na zimno indukowana jest przemiana martenzytyczna, typu *TWIP* (ang.: *Twinning Induced Plasticity*), charakteryzujące się intensywnym bliźniakowaniem mechanicznym podczas odkształcenia plastycznego oraz typu *TRIPLEX*, cechujące się strukturą trójfazową: austenityczno-ferrytyczną z dyspersyjnymi węglnikami. Technologie wytwarzania materiałów konstrukcyjnych metalowych ( $P2$ ), również nienależących do awangardowych i skrajnie rozwojowych, mają zapewnione swoje pewne miejsce wśród ważnych technologii inżynierii powierzchni materiałów, ze względu na powszechność występowania i często brak możliwości zastąpienia ich innymi rozwiązaniami, po ekonomicznie uzasadnionych kosztach.

Zaprezentowane wybrane wyniki, dotyczące scenariusza optymistycznego w odniesieniu do pola badawczego  $M$  i scenariusza pesymistycznego dla pola badawczego  $P$ , stanowiące jedynie przykład znacznie szerszych badań symulacyjnych, pozwalają odpowiedzieć na pytanie, w jaki sposób wzrost, stabilizacja lub spadek znaczenia analizowanych obszarów tematycznych wpłynie na wystąpienie z określonym prawdopodobieństwem w ciągu najbliższych 20 lat każdego z alternatywnych makroscenariuszy: optymistycznego, neutralnego i pesymistycznego.

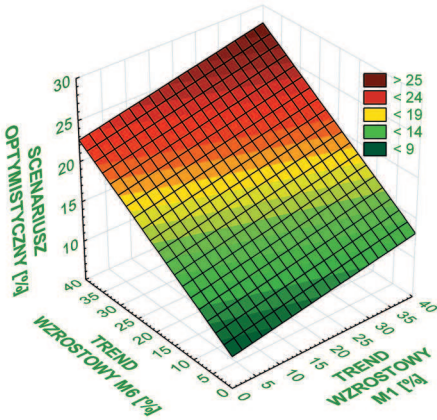
Należy ponadto podkreślić, że odpowiednio wytrenowane sieci neuronowe są użytecznym narzędziem pozwalającym na szybkie wygenerowanie alternatywnych wariantów prognozy przyszłych wydarzeń.

Program SCENNET21 umożliwia wykonywanie symulacji komputerowych, których wyniki dotyczą analizowanych całościowo pól badawczych, odpowiednio  $M$  i  $P$ . Program *Statistica 4.0.F* pozwala natomiast na generowanie trójwymiarowych wykresów, którą to funkcję wykorzystano do przeprowadzenia szczegółowych analiz zależności wartości prawdopodobieństwa wystąpienia danego makroscenariusza przyszłych wydarzeń i wartości prawdopodobieństwa wybranych dwóch trendów, opcjonalnie wzrostowego, ustabilizowanego na dotychczasowym poziomie lub spadkowego, dotyczących wybranych dwóch obszarów tematycznych. Na potrzeby tych eksperymentów symulacyjnych założono, że wartości prawdopodobieństwa pozostałych 19 trendów, dotyczących nierozpatrywanych akurat szczegółowo obszarów tematycznych, wynoszą w odniesieniu do trendu wzrostowego 27, ustabilizowanego 50, a spadkowego 23 procent.

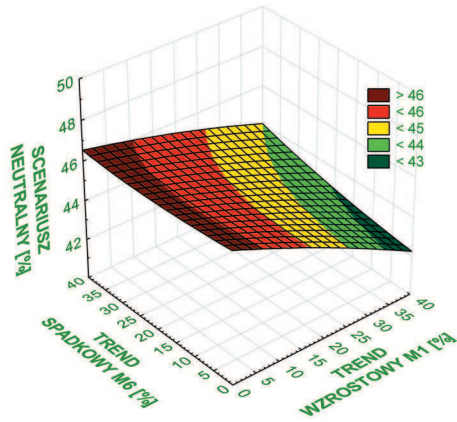
Przykładowe wyniki tych symulacji komputerowych, prezentujące zależności pomiędzy wartością prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych alternatywnych makroscenariuszy a wartością prawdopodobieństwa wybranych trendów (wzrostowego lub spadkowego) dotyczących obszarów tematycznych  $M1$  i  $M6$ , przedstawiono na rysunkach 123 a-c. W odniesieniu do pola badawczego  $P$  wybrano natomiast do prezentacji zależności pomiędzy wartością prawdopodobieństwa alternatywnych makroscenariuszy a wartością prawdopodobieństwa niektórych trendów (wzrostowych lub spadkowych) dotyczących obszarów tematycznych  $P1$  i  $P6$  (rys. 123 d-f). Przedstawione wykresy (rys. 123) pozwalają szczegółowo przeanalizować, w jaki sposób wystąpienie trendów dotyczących dwóch obszarów tematycznych, przy założonych stałych wartościach pozostałych trendów, wpływa na zaistnienie danego makroscenariusza przyszłych wydarzeń.

Wyniki eksperymentów symulacyjnych potwierdzają wyniki wykonanych niezależnie badań heurystycznych (liczebność próby: 202), przedstawionych szczegółowo na rysunkach 124-126. Ankietowani eksperci w szczególności oceniali możliwości praktycznej aplikacji rozpatrywanych grup technologii zakwalifikowanych do poszczególnych obszarów tematycznych (rys. 124), typowali obszary tematyczne, którym będą najczęściej poświęcone prace naukowo-badawcze (rys. 125) oraz definiowali, które obszary tematyczne, a ściślej grupy technologii zawarte w tych obszarach, są kluczowe i ich znaczenie powinno bezwzględnie

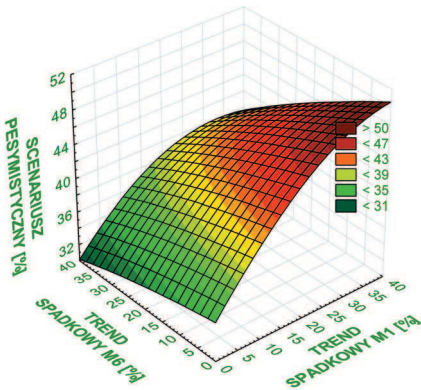
a)



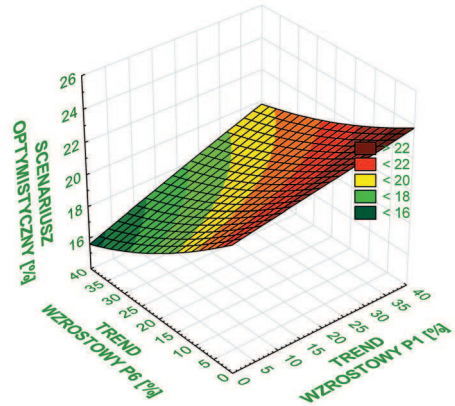
b)



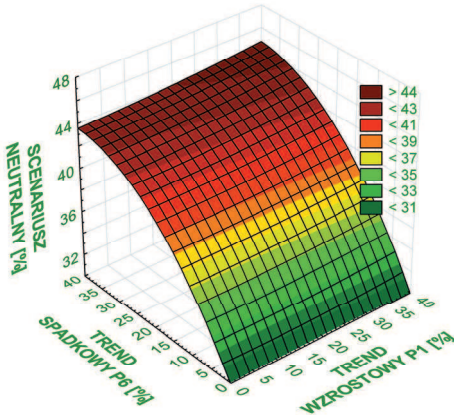
c)



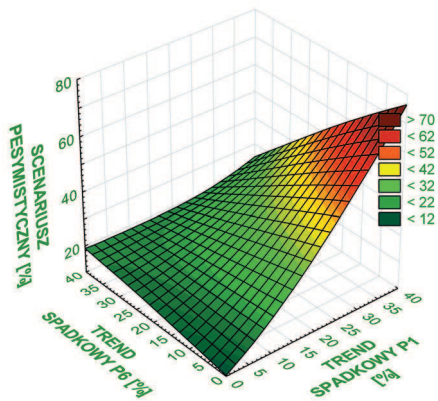
d)



e)

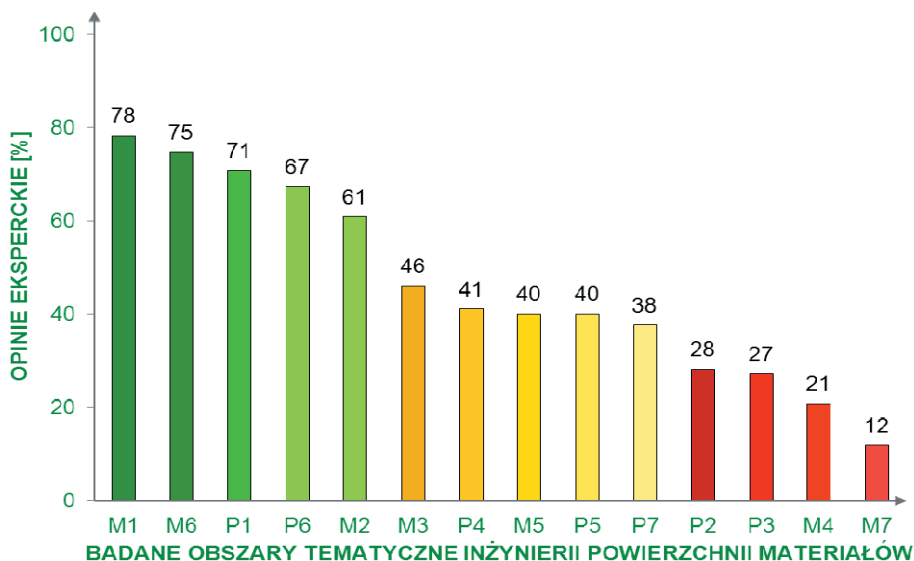


f)

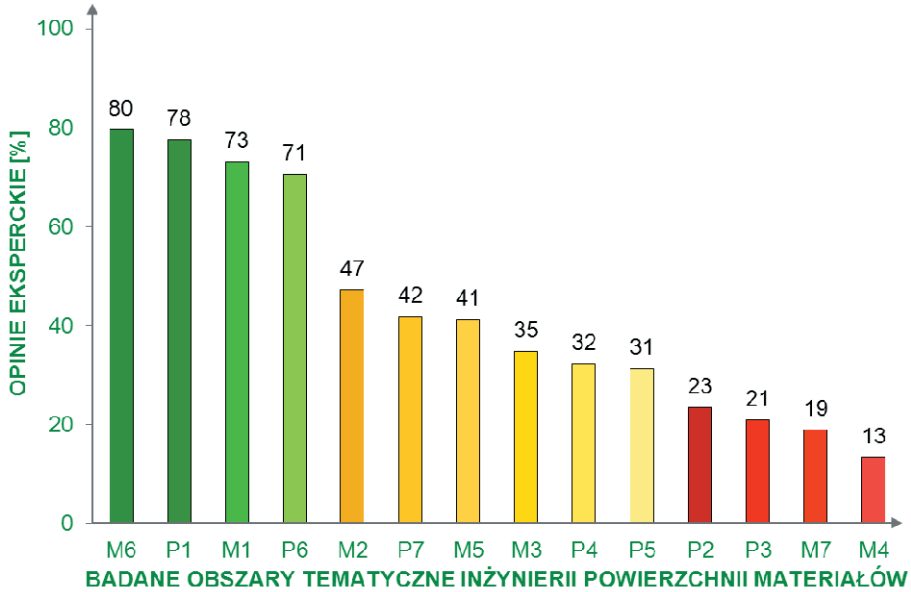


**Rysunek 123.** Wyniki symulacji wpływu prawdopodobieństwa wystąpienia wybranych trendów dotyczących odpowiednio obszarów M1 i M6 (a-c) oraz P1 i P6 (d-e) na prognozowane alternatywne scenariusze wydarzeń

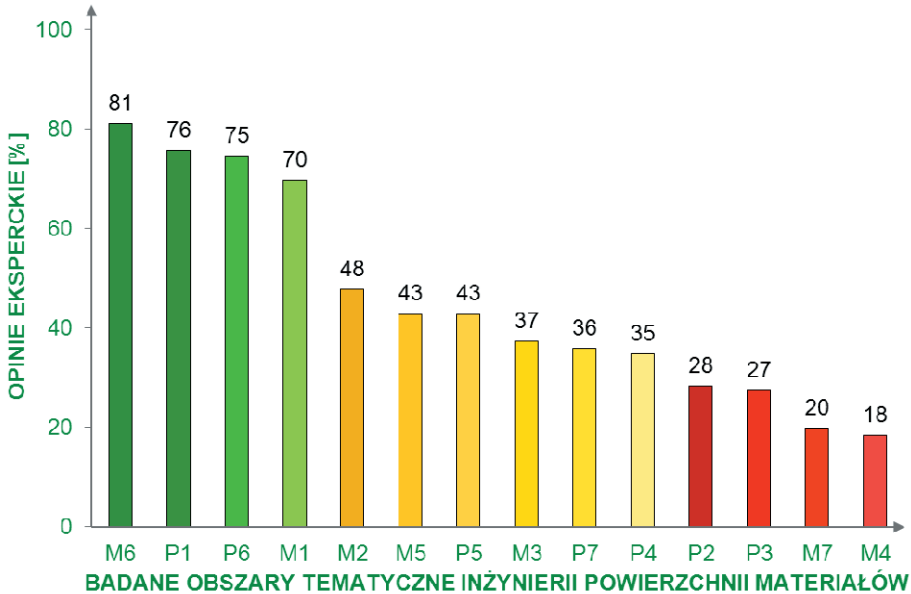
wzrastać, aby miał szansę zaistnieć optymistyczny makroscenariusz przyszłych wydarzeń, zwany *Wygranym wyścigiem* (rys. 126). Założono 20-letni horyzont czasowy prowadzonych badań heurystycznych. We wszystkich przypadkach prezentowanych na trzech wykresach najlepiej oceniono technologie laserowe w inżynierii powierzchni (M1), technologie nanostrukturalnych warstw wierzchnich (M6), inżynierię powierzchni biomateriałów (P1) oraz inżynierię powierzchni szkła, elementów mikro- i optoelektronicznych oraz fotowoltaicznych (P6), w odniesieniu do których każdorazowo otrzymano ok. 80-70% odpowiedzi potwierdzających prawdziwość stawianych tez, dotyczących kolejno: przyszłych licznych aplikacji przemysłowych, licznych prac naukowo-badawczych poświęconych danemu zagadnieniu i bezwzględnej konieczności rozwoju, gwarantującej zaistnienie optymistycznego makroscenariusza przyszłych wydarzeń. Wyniki badań heurystycznych, podobnie jak wyniki badań symulacyjnych, we wszystkich trzech przypadkach wskazują na słabą pozycję klasycznych technologii obróbki powierzchniowej. Interpretując je, po raz kolejny należy zwrócić uwagę, że znaczenia tych technologii, mimo iż nie należą do awangardowych ani skrajnie rozwojowych, nie sposób przecenić, ponieważ są one powszechnie stosowane w przemyśle i, ze względu na rachunek ekonomiczny, produkcja z ich udziałem nadal będzie realizowana w ciągu najbliższych 20 lat, choć zapewne rozwiązania najmniej ekologiczne i najbardziej przestarzałe zostaną wyparte przez te bardziej nowoczesne i bardziej przyjazne środowisku naturalnemu.



**Rysunek 124.** Wyniki badań heurystycznych, dotyczących oceny możliwości praktycznej aplikacji w przemyśle rozpatrywanych grup technologii, zawartych w poszczególnych obszarach tematycznych M1-M7 i P1-P7, w ciągu najbliższych 20 lat



**Rysunek 125.** Wyniki badań heurystycznych, dotyczących oceny, którym grupom technologii, zawartym w poszczególnych obszarach tematycznych M1-M7 i P1-P7, będą w ciągu najbliższych 20 lat, najczęściej poświęcone prace naukowo-badawcze



**Rysunek 126.** Wyniki badań heurystycznych, dotyczących oceny, które z rozpatrywanych grup technologii, zawartych w poszczególnych obszarach tematycznych M1-M7 i P1-P7, są kluczowe i ich znaczenie powinno wzrastać, aby w ciągu najbliższych 20 lat, miał szansę zaistnieć optymistyczny makrosceńsariusz przyszłych wydarzeń

## 7.2. Makroscenariusze a kluczowe mezoczynnik determinujące rozwój inżynierii powierzchni materiałów

W celu określenia wpływu kluczowych, wyselekcjonowanych na wcześniejszych etapach prac, mezoczynników determinujących rozwój inżynierii powierzchni materiałów na wartość prawdopodobieństwa zaistnienia alternatywnych makroscenariuszy przyszłych wydarzeń, zastosowano oryginalny program komputerowy SCENNET48, do którego dołączono jako funkcję (uprzednio wytrenowaną, z użyciem zaimplementowanych do niej danych wejściowych, stanowiących wyniki badań eksperckich) sztuczną sieć neuronową. Pełną listę 16 analizowanych mezoczynników oznaczonych symbolami alfanumerycznymi C1-C16 zaprezentowano na rysunku 10 w rozdziale 3.3 niniejszej pracy.

W ramach badań symulacyjnych wykonano trzy grupy eksperymentów, których, z konieczności, tylko niektóre wyniki wybrano do prezentacji w niniejszej pracy, przyjmując następujące założenia:

- W odniesieniu do każdego wektora wyjściowego klasyfikator oblicza wartość prawdopodobieństwa wystąpienia scenariusza optymistycznego, neutralnego lub pesymistycznego.
- Każda zmienna niezależna może przyjmować jedną z trzech wartości ze zbioru  $\{1, 0, -1\}$ , przy czym wartość 1 odpowiada trendowi wzrostowemu, 0 – trendowi ustabilizowanemu na dotychczasowym poziomie (neutralnemu), natomiast -1 – trendowi spadkowemu danego mezoczynnika.
- Podczas każdego z eksperymentów poszczególne zmienne niezależne mogą przyjmować tylko dwie wybrane wartości ze zdefiniowanego zbioru wartości dopuszczalnych  $\{1, 0, -1\}$ , dzięki czemu liczba możliwych przypadków zostaje ograniczona z  $3^{16}$ , czyli 43 046 721, co odpowiada liczbie wszystkich kombinacji rozpatrywanych równocześnie 16 mezoczynników mogących przyjmować każdy z 3 możliwych trendów, do  $2^{16}$ , czyli 65 536, co ma miejsce, gdy tylko 2 trendy są brane pod uwagę.

Celem pierwszej grupy eksperymentów było wyselekcjonowanie mezoczynników, które wpłyną na zmianę makroscenariusza z optymistycznego na neutralny wraz z określeniem wartości prawdopodobieństwa tego zdarzenia. Zmienne niezależne mogą przyjmować wartość ze zbioru  $\{1, -1\}$ , co odpowiada zmianie trendu badanych mezoczynników ze wzrostowego na spadkowy. Zgodnie z przyjętym założeniem poszukiwano przypadków, w których liczba mezoczynników wykazujących zmianę trendu ze wzrostowego na

spadkowy jest jak najmniejsza. W wyniku przeprowadzonych eksperymentów odnaleziono 15 różnych kombinacji, w których 2 mezosynniki równocześnie zmieniły wartość z 1 na -1 (tabl. 19) oraz 194 takie kombinacje z udziałem 3 mezosynników.

Zgodnie z wynikami przeprowadzonych eksperymentów trzy dwuelementowe kombinacje zmian trendów ze wzrostowych na spadkowe spowodują ze stuprocentowym prawdopodobieństwem zmianę makroszenariusza z optymistycznego na neutralny. Taki efekt wywołują równoczesne zmiany na gorsze czynnika C9 – Dążenie do ciągłego doskonalenia poprzez zapewnianie wyższej jakości technologii i liczne wdrożenia, zwłaszcza w małych i średnich przedsiębiorstwach w połączeniu z następującymi mezosynniki: C1 – Skuteczność działań państwa służących umożliwieniu szerokiego dostępu do informacji dotyczących kluczowych technologii i wyników foresightów technologicznych; C2 – Przejrzystość i przyjazność przepisów prawnych lub C3 – Strategiczne priorytety zjednoczonej Europy określone poziomem współpracy międzynarodowej i kwotą przekazywanych funduszy.

**Tablica 19.** Minimalna kombinacja mezosynników najsilniej wpływających na zmianę makroszenariusza z optymistycznego na neutralny

Lp.	Trend mezosynników analizy																Prawdopodobieństwo wystąpienia scenariusza neutralnego, %
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	
1.	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	100
2.	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	100
3.	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	100
4.	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	99,7
5.	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	97,0



Lp.	Trend mezoszynników analizy																Prawdopodobieństwo wystąpienia scenariusza neutralnego, %
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	
6.																	93,8
7.																	90,2
8.																	88,2
9.																	88,2
10.																	86,7
11.																	83,8
12.																	83,7
13.																	73,6
14.																	70,9
15.																	59,7
Legenda:                      Trend wzrostowy                      Trend spadkowy																	

Celem drugiej grupy eksperymentów było określenie mezoczynników, które wpłyną na zmianę makroscenariusza z neutralnego na optymistyczny wraz z określeniem wartości prawdopodobieństwa tego zdarzenia. Zmienne niezależne mogą przyjmować wartość ze zbioru  $\{0, 1\}$ , co odpowiada zmianie trendu badanych mezoczynników z neutralnego na wzrostowy. Ponownie przyjęto założenie, że poszukiwana jest minimalna liczba zmieniających się trendów, dotyczących poszczególnych mezoczynników. W wyniku przeprowadzonych eksperymentów odnaleziono 16 różnych kombinacji, w których 4 mezoczynniki równocześnie zmieniły wartość z 0 na 1 (tabl. 20) oraz 152 takie kombinacje z udziałem 5 mezoczynników. Analiza wyników eksperymentów symulacyjnych wykazuje największe prawdopodobieństwo (94,9%) zmiany makroscenariusza z neutralnego na optymistyczny, w przypadku gdy nastąpi

**Tablica 20.** Minimalna kombinacja mezoczynników najsilniej wpływających na zmianę makroscenariusza z neutralnego na optymistyczny

Lp.	Trend mezoczynników analizy	Prawdopodobieństwo wystąpienia scenariusza optymistycznego, %
1.		94,9
2.		90,4
3.		85,4
4.		83
5.		80,5
6.		77,7

Lp.	Trend mezczynników analizy																Prawdopodobieństwo wystąpienia scenariusza optymistycznego, %
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	
7.																	74,9
8.																	72,8
9.																	68,4
10.																	67,8
11.																	60,8
12.																	59,1
13.																	57,3
14.																	55,6
15.																	50,2
16.																	50,1
Legenda:  Trend wzrostowy  Trend neutralny																	



równoczesna zmiana trendów z neutralnych na wzrostowe, dotyczących następujących mezoczynników: C2 – Przyjazność i przejrzystość przepisów prawnych; C3 – Strategiczne priorytety zjednoczonej Europy określone poziomem współpracy międzynarodowej i kwotą przekazywanych funduszy; C9 – Dążenie do ciągłego doskonalenia poprzez zapewnianie wyższej jakości technologii i liczne wdrożenia, zwłaszcza w małych i średnich przedsiębiorstwach oraz C11 – Znaczenie technologii proekologicznych dla poprawy funkcjonalności, wydłużenia żywotności i możliwości recyklingu.

Ostatnia grupa eksperymentów miała na celu wyłonienie mezoczynników, które wpłyną na zmianę makrosценariusza z neutralnego na pesymistyczny wraz z określeniem wartości prawdopodobieństwa wystąpienia tego zdarzenia. Zmienne niezależne, w przypadku tych eksperymentów, mogą przyjmować wartość ze zbioru  $\{0, -1\}$ , co odpowiada zmianie trendu badanych mezoczynników z neutralnego na spadkowy. Podobnie jak podczas pozostałych eksperymentów przyjęto założenie, że poszukiwana jest minimalna liczba zmieniających się trendów, dotyczących poszczególnych mezoczynników. Wykonane eksperymenty doprowadziły do wyznaczenia 5 różnych kombinacji, w których 2 mezocynniki równocześnie zmieniły wartość z 0 na -1 (tabl. 21) oraz 63 takie kombinacje z udziałem 3 mezoczynników.

Zgodnie z wynikami eksperymentów symulacyjnych najbardziej prawdopodobna (94,1%) jest zmiana makrosценariusza z neutralnego na pesymistyczny przy równoczesnej zmianie trendów z neutralnych na pesymistyczne, dotyczących następujących mezoczynników: C11 – Znaczenie technologii proekologicznych dla poprawy funkcjonalności, wydłużenia żywotności i możliwości recyklingu oraz C13 – Znaczenie technologii podwyższających własności mechaniczne, trybologiczne i antykorozyjne warstw wierzchnich.

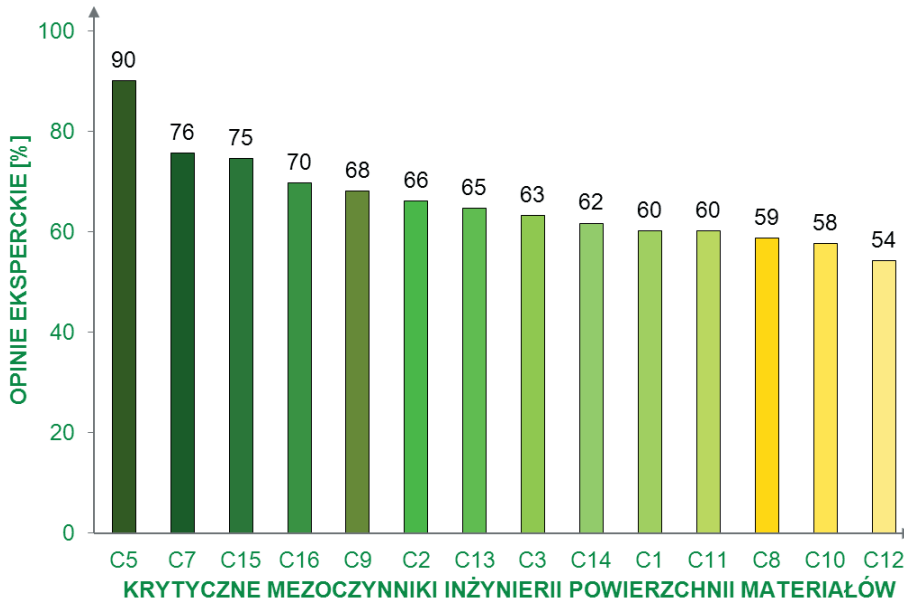
Uzupełnieniem i potwierdzeniem badań symulacyjnych są wyniki badań heurystycznych (liczebność próby: 227) (rys. 127) przeprowadzonych metodą e-Delphix, zgodnie z którymi za najistotniejsze mezocynniki, determinujące możliwość zaistnienia w ciągu najbliższych 20 lat optymistycznego scenariusza rozwoju inżynierii powierzchni materiałów, eksperci uznali: poziom współpracy pomiędzy środowiskami naukowymi i przemysłowymi (90%), liczbę specjalistycznych laboratoriów i placówek badawczo-rozwojowych (76%), wzrost znaczenia technologii wytwarzania nanomateriałów (75%) i materiałów gradientowych (70%), a także dążenie do ciągłego doskonalenia poprzez zapewnienie wyższej jakości technologii i liczne wdrożenia priorytetowych innowacyjnych technologii w małych i średnich przedsiębiorstwach (68%).

**Tablica 21.** Minimalna kombinacja mezoczynników najsilniej wpływających na zmianę makroszenariusza z neutralnego na pesymistyczny

Lp.	Trend mezoczynników analizy	Prawdopodobieństwo wystąpienia scenariusza pesymistycznego, %
1.		94,1
2.		92,7
3.		80,3
4.		66,5
5.		52,0
Legenda:  Trend neutralny  Trend spadkowy		

Spośród analizowanych mezoczynników najniżej oceniono wpływ znaczenia technologii alternatywnych, w tym hybrydowych na zaistnienie w przyszłości optymistycznego scenariusza wydarzeń, natomiast należy zauważyć, że pomimo przyznania oceny najniższej, ponad połowa (54%) respondentów potwierdziło tezę, że czynnik ten jest kluczowy i istotny dla przyszłości inżynierii powierzchni materiałów.

Przeprowadzone eksperymenty symulacyjne, opisane w podrozdziałach 7.1 i 7.2 niniejszej pracy, stanowiące reprezentatywne przykłady dużo szerszych badań, wykazują, że zasadne jest stosowanie sieci neuronowych do analizy wzajemnych oddziaływań pomiędzy zdarzeniami w ramach kreowania wielowariantowych probabilistycznych scenariuszy przyszłych wydarzeń. Zastosowanie tego narzędzia sztucznej inteligencji pozwala na określenie zależności pomiędzy



**Rysunek 127.** Wyniki badań heurystycznych przedstawiające wyrażoną w procentach liczbę odpowiedzi potwierdzających prawdziwość tezy, że dany czynnik jest kluczowy i jego znaczenie powinno bezwzględnie wzrastać, aby w ciągu najbliższych 20 lat miał szansę zaistnieć optymistyczny scenariusz rozwoju inżynierii powierzchni materiałów

zaistnieniem z określonym prawdopodobieństwem każdego z rozpatrywanych alternatywnych makroscenariuszy a wariantami zmiany poszczególnych obszarów tematycznych lub mezo-czynników, biorąc pod uwagę fakt, że ich znaczenie może w założonym horyzoncie czasowym rosnąć, pozostawać na ustabilizowanym poziomie lub maleć. Eksperymentalny i nowatorski pomysł implementacji sieci neuronowych do kreowania scenariuszy przyszłych wydarzeń wiązał się z napotkaniem wszystkich trudności, które spotykają pionierów. Główne wyzwanie stanowiła specyfika danych wejściowych w postaci wyrażonych ilościowo (w procentach) opinii ekspertów. Spotykana rozbieżność oceny zjawisk wynikała z jej subiektywności, wpisanej w specyfikę badań eksperckich. W szczególności eksperci, zapewne w sposób niezamierzony, z jednej strony starali się reprezentować interesy własnych środowisk, a z drugiej strony na zagadnienia o dużym poziomie ogólności (skala makro i mezo) niejednokrotnie spoglądali przez pryzmat swojej znacznie węższej specjalizacji.